



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia

**CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO DE CHUVA FORTE NA
CIDADE DO RIO DE JANEIRO NOS DIAS 8 E 9 DE ABRIL DE
2019 A PARTIR DO ESTUDO DA PRECIPITAÇÃO, DOS
MECANISMOS SINÓTICOS E DAS PROPRIEDADES DAS
NUVENS**

Gabriela Rosalino Unfer

Orientadores: D. Sc. José Ricardo Almeida França

D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2021

CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO DE CHUVA FORTE NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO NOS DIAS 8 E 9 DE ABRIL DE 2019 A PARTIR DO ESTUDO DA PRECIPITAÇÃO, DOS MECANISMOS SINÓTICOS E DAS PROPRIEDADES DAS NUVENS

Gabriela Rosalino Unfer

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

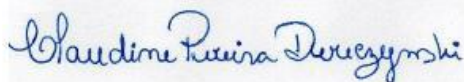
Avaliada por:



Prof.º D. Sc. José Ricardo de Almeida França - IGEO/UFRJ (Orientador)



Profº D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes – IGEO/UFRJ (Orientador)



Prof.ª D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski – IGEO/UFRJ



Profº D. Sc. Hugo Abi Karam - IGEO/UFRJ



M. Sc. Leonardo Abreu Jorge Justo- INEA-RJ

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2021

Quem acredita, sempre alcança!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jaciara e João, a minha irmã, Giovana, e a minha tia, Janice, por terem sempre me apoiado e incentivado a perseguir meus sonhos, me dando suporte em todos os momentos.

Aos meus amigos de curso, principalmente a Jamyle, a Maria Luisa, a Jéssica e o Marcos, agradeço pela grande amizade que construímos e o fiel companheirismo nessa longa caminhada. A minha jornada no curso não teria sido tão proveitosa sem a presença de vocês. Obrigada por tudo!

Aos meus orientadores José Ricardo e Wallace Menezes, sou grata por todos os ensinamentos e incentivos ao meu trabalho, pela paciência, dedicação e por depositarem confiança em mim.

A todos os(as) professores(as) do Departamento de Meteorologia da UFRJ, que me receberam tão calorosamente e atenciosamente quando cheguei de transferência de curso ao departamento, meu sincero muito obrigada por todo o ensinamento e incentivo. Em especial, agradeço ao professor Maia pelos anos em que tive a prazerosa oportunidade de trabalhar ao seu lado, e agradeço ao professor Lino pela oportunidade de termos desenvolvido um trabalho admirável, por toda a troca de ideias, suporte e por todo o incentivo ao meu futuro.

De forma geral, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação acadêmica e desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Nos dias 8 e 9 de abril de 2019 a cidade do Rio de Janeiro foi atingida por chuvas de caráter muito intenso, sendo registrados acumulados de chuva em 24h acima de 300 mm, com o máximo de 343,4 mm na estação Rocinha, do sistema Alerta Rio. Os acumulados foram maiores em estações localizadas a sul do Maciço da Tijuca, enquanto que os menores foram registrados em estações da Zona Norte. Um corredor de umidade com escoamento da região centro-oeste do Brasil para o sudeste, proporcionando ventos de quadrante norte, aliado a formação de um ciclone próximo a costa do Rio de Janeiro, proporcionando ventos de quadrante sul, foram os mecanismos atuantes durante o evento, com a presença de acentuadas regiões de convergência de umidade sobre o município. Identificaram-se três picos distintos a partir do perfil horário da precipitação, chamados P1, P2 e P3, onde o P1 se destacou com as maiores intensidades e duração da chuva, foi o único pico com a ocorrência de relâmpagos, apresentou nuvens com os maiores topos, as menores temperaturas e predomínio de nuvens com topo em fase de gelo. Com todas as informações observadas, pode-se considerar que o caráter da chuva durante o P1 foi devido à presença de nuvens Cumulonimbus. No quesito intensidade e duração da chuva, o P2 e P3 foram semelhantes, apesar de características distintas em relação às nuvens. O P3 foi o pico cujas alturas de topos foram as mais baixas registradas, com as temperaturas mais quentes e predomínio de água super-resfriada no topo das nuvens, indicando a presença de nuvens com alto conteúdo de água líquida. Dadas todas as variáveis, considera-se que o P3 teve a presença de nuvens Nimbostratus. Já o P2 ficou em um meio termo, apresentando nuvens com alturas de topo menores que o P1 e maiores que o P3, porém com maior variabilidade da fase no topo das nuvens, portanto houve uma maior transição entre os tipos de nuvens durante este pico, mas pode-se considerar que no período de maior intensidade da chuva, houve a presença de nuvens Nimbostratus. O efeito de cada pico na precipitação total registrada em 24h mostrou que o P1 foi mais significativo em todas as estações da Zona Sul e em grande parte das estações da Zona Oeste, com a presença de vento em superfície de quadrante sul sendo registrada, ao passo que o P2 foi mais importante nas estações da Zona Norte, onde foi registrado vento em superfície predominantemente de quadrante norte.

Palavras-chave: chuva forte, Rio de Janeiro, nuvem.

ABSTRACT

On April, 8th and 9th of 2019, the city of Rio de Janeiro was hit by very intense rains, with rain accumulated in 24 hours above 300 mm, with a maximum of 343.4 mm at Rocinha station, of the Alerta Rio system. Accumulates were higher at stations located south of Maciço da Tijuca, while the lowest ones were registered at stations in the North Zone of the city. A humidity corridor with flow from the central-west region of Brazil to the southeast, providing north quadrant winds, combined with the formation of a cyclone near the coast of Rio de Janeiro, providing south quadrant winds, were the mechanisms at work during the event, with the presence of marked regions of moisture convergence over the city. Three distinct peaks were identified from the hourly precipitation profile, called P1, P2 and P3, where P1 stood out with the highest intensity and duration of rain, it was the only peak with the occurrence of lightning, it presented clouds with the highest tops, the lowest temperatures and the predominance of clouds with top in the ice phase. With all the observed characteristics, it can be considered that the character of the rain during P1 was due to the presence of Cumulonimbus clouds. Regarding the intensity and duration of rain, P2 and P3 were similar, despite different characteristics in relation to clouds. P3 was the peak whose top heights were the lowest recorded, with the hottest temperatures and a predominance of super-cooled water at the top of the clouds, indicating the presence of clouds with high liquid water content. Given all variables, it is considered that P3 had the presence of Nimbostratus clouds. P2 was in the middle, with clouds with top heights lower than P1 and higher than P3, but with greater phase variability at the top of the clouds, so there was a greater transition between cloud types during this peak, but it can be considered that in the period of greatest rain intensity, there was the presence of Nimbostratus clouds. The effect of each peak on the total rainfall recorded in 24h showed that P1 was more significant in all stations in the South Zone of the city and in most of the stations in the West Zone, with wind on the surface of southern quadrant being recorded, while P2 was more important at stations in the North Zone, where wind was recorded on a predominantly northern quadrant.

Keywords: heavy rainfall, Rio de Janeiro, cloud.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Quadro de recordes de chuva acumulada em 24h desde a implantação do sistema Alerta Rio. Em destaque estão 8 estações cujos máximos históricos ocorreram durante o evento dos dias 8 e 9 de abril de 2019. (Fonte: Alerta Rio)..... 17
- Figura 2: a) Representação das formas de saturação do ar a partir dos processos de resfriamento e adição de umidade. b) Saturação do ar pela mistura de duas parcelas. (Fonte: adaptado de STULL, 2011)..... 19
- Figura 3: a) Representação de um diagrama termodinâmico mostrando que ao ascender uma parcela de ar adiabaticamente, existe um excedente de umidade a partir do ponto NCL (ou LCL do inglês), ponto este que representa a altura da base das nuvens. r_T é a razão de mistura total, r_s é a razão de mistura de saturação e r_E é a quantidade excedente de umidade (Fonte: STULL, 2011); b) Formação de nuvem a partir dos quatro tipos de levantamento de ar na atmosfera (Fonte: adaptado de AHRENS, 2001). 19
- Figura 4: Distribuição dos hidrometeoros com relação ao seu volume e raio (Fonte: STULL, 2011).....21
- Figura 5: Fotografias de uma nuvem a) Nimbostratus e b) Cumulonimbus, com desenho esquemático da precipitação de cada nuvem. (Fonte: OMM - Organização Meteorológica Mundial). 21
- Figura 6: Características da precipitação a) estratiforme e b) convectiva (Fonte: HOUZE, 1993)..... 22
- Figura 7: Relação das variáveis a) Espessura ótica de nuvem e b) Raio efetivo (μm) com a variação da taxa de precipitação (mm/h), considerando-se três valores constantes da massa de água líquida (LWP). (Fonte: extraído de KOBAYASHI & MASUDA, 2009) 25
- Figura 8: Perfil vertical do tamanho do raio efetivo de partículas de a) gelo e de b) gotas. Cada linha representa o perfil vertical na região de maior taxa de precipitação de um evento de chuva extrema no Brasil, onde no gráfico a), as três linhas mais a esquerda, igual as mesmas três mais a direita do gráfico b), são de eventos de chuva mais intensa. As demais linhas são dos eventos de chuva menos intensa. (Fonte: extraído de DUARTE ET AL., 2018). 26
- Figura 9: Climatologia de precipitação de 32 estações pluviométricas do Sistema Alerta Rio para o período de 1997-2016 onde a) Total pluviométrico

	anual (mm/ano) e b) Média mensal (mm/mês) para o outono (Fonte: PRISTO ET AL., 2018).	28
Figura 10:	Mapa da área de estudo e localização das estações (Fonte: confecção própria).....	31
Figura 11:	Precipitação acumulada em 24h registrada pelas estações do sistema Alerta Rio entre os dias 8 e 9 de abril. Em azul os valores dos acumulados e em laranja, o limiar de acumulado em 24h para o percentil 99 de cada estação.....	38
Figura 12:	Mapa da distribuição espacial dos acumulados de 24h. Os círculos coloridos correspondem aos valores de precipitação em cada estação...	39
Figura 13:	Acumulado de precipitação horária das 33 estações do sistema Alerta Rio começando no dia 8 de abril às 15h e terminando no dia 9 de abril às 19h. O valor registrado em cada horário compreende ao acumulado registrado na última hora.	40
Figura 14:	Porcentagem de contribuição de cada pico para o acumulado em 24h para cada estação, com os triângulos em preto indicando a posição do valor do percentil 99.....	42
Figura 15:	Precipitação em 15 minutos registrada pelas estações do sistema Alerta Rio entre os dias 8 e 9 de abril. A linha em laranja é o limiar de chuva em 15 minutos para o percentil 99 de cada estação e em colorido os valores acima desse percentil separados por pico. Cada cruz colorida representa 1 registro de chuva em 15 minutos com valor acima do percentil 99, para aquela estação.	43
Figura 16:	Meteograma de direção e intensidade do vento em superfície nos horários que abrangeram o evento. Em vermelho é o período do P1, azul do P2 e verde do P3.	46
Figura 17:	Quantificação do número de raios que atingiu o município do Rio de Janeiro durante o evento, distribuídos em cada pico.	47
Figura 18:	a) Mapa de densidade de flashes em um raio de 1 km durante o Pico 1; b) Mapa do acumulado de chuva no Pico 1.	48
Figura 19:	Imagens do dia 7 do satélite GOES-16 no canal 9 a) 00Z e b) 12Z, e canal 14 c) 00Z e d) 12Z. (Fonte: DSA – INPE).	50
Figura 20:	Figura 18: Carta sinótica de superfície do dia 07 de abril de 2019 - a) 00Z e b) 12Z (Fonte: CPTEC).....	51

Figura 21:	Campos da rodada de análise do GFS de 0.25° para o dia 07 as 12Z: a) Espessura entre 1000 e 850hPa (preenchido) e pressão ao nível médio do mar (linha cheia), b) Pressão ao nível médio do mar, altura geopotencial em 500hPa (pontilhada) e jato em 200 hPa (preenchido), c) Pressão ao nível médio do mar (linha cheia), d) Vorticidade em 1000hPa (preenchido) e Vento em kt (barbela), e) Umidade específica (preenchido) e linhas de corrente em 850hPa (linha cheia), f) Água precipitável em toda a camada.	53
Figura 22:	Imagens do satélite GOES-16 no canal-9 no dia 8 as a) 18Z e dia 9 as b) 00Z, e canal-14 no dia 8 as c) 18Z e dia 9 as d) 00Z. (Fonte: DSA – INPE).	55
Figura 23:	Carta sinótica de superfície do dia 08 de abril de 2019 as a) 18Z, e dia 09 de abril as b) 00Z (Fonte: CPTEC).	56
Figura 24:	O mesmo que a Figura 21 para o dia 9 as 00Z, durante o P1.	58
Figura 25:	Campos do GFS 0.25° e imagem do satélite GOES-16 no recorte focando o Rio de Janeiro para o dia 9 as 00Z – P1: a) Umidade específica e Linha de corrente em 850 hPa, b) Divergência de umidade em 1000 hPa e c) Banda do infravermelho realçado (Fonte: INMET).....	59
Figura 26:	Imagens do dia 9 do satélite GOES-16 no canal-9 a) 06Z e b) 12Z, e canal-14 c) 00Z e d) 12Z. (Fonte: DSA – INPE).	61
Figura 27:	Carta sinótica de superfície do dia 09 de abril de 2019 - a) 06Z e b) 12Z. (Fonte: CPTEC).	62
Figura 28:	O mesmo que a Figura 21 para o dia 09 as 06Z, durante o P2.	63
Figura 29:	O mesmo da Figura 25, mas para o dia 09 as 06Z – P2.....	64
Figura 30:	O mesmo que a Figura 21 para o dia 9 as 12Z, durante o P3	66
Figura 31:	O mesmo da Figura 25, mas para o dia 09 as 12Z – P3.....	67
Figura 32:	Diagrama de evolução da fase do ciclone, com início as 06Z do dia 7 e fim as 18Z do dia 9 de abril de 2019 a partir de dados de análise do GFS 0,25°.....	68
Figura 33:	Mapa de anomalia positiva de temperatura do mar para o dia 8 de abril de 2019, em resolução de 5km, do programa de monitoramento de recife de corais da NOAA – versão 3.1 (Fonte: extraído de Coral Reef Watch-NOAA, adaptado).	69

Figura 34:	Variação das propriedades macro e microfísicas das nuvens a partir de produtos do satélite GOES-16 para a Zona Sul, representado pela estação Rocinha (-22,98583;-43,245) no período de 20 UTC do dia 8 a 18:49UTC do dia 9 de abril de 2020. Cada cor de linha corresponde a um pico, sendo vermelha para o pico 1, azul para o pico 2 e verde para o pico 3. Na variável COD, o gráfico sobreposto é um zoom da informação logo abaixo dele, variando de 0 a 17.....	73
Figura 35:	O mesmo que a Figura 31 para a Zona Norte, representado pela estação Irajá (-22,826;-43,337).....	75
Figura 36:	O mesmo que a Figura 31 para a Zona Oeste, representado pela estação Campo Grande (-22,903;-43,562).....	77
Figura 37:	Produtos do satélite GOES-16 no momento representativo de cada pico, onde cada coluna representa um pico (P1, P2 e P3, respectivamente). A primeira linha é o produto de altura no topo da nuvem (km), a segunda linha é de pressão no topo da nuvem (hPa), a terceira é a temperatura no topo da nuvem (°C) e a quarta linha é da fase no topo da nuvem.....	79
Figura 38:	Matriz de correlação entre as propriedades macro e microfísica das nuvens durante o evento.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Caracterização do tipo de precipitação a partir da escala do movimento vertical (HOUZE, 1993)	21
Tabela 2:	Detalhamento dos produtos do satélite GOES-16 utilizados.....	34
Tabela 3:	Interpretação da correlação de Pearson (EVANS, 1996)	36
Tabela 4:	Distribuição da proporção das estações quanto ao valor de chuva acumulada em 24 horas.....	37
Tabela 5:	Proporção do número de registros de chuva em 15 minutos acima do percentil 99 em cada pico, separado por zona.	43

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

τ - Espessura ótica da nuvem

ABI – Advanced Baseline Imager

ACHA – Altura do topo da nuvem

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

Cb – Cumulonimbus

CLASS – *Comprehensive Large Array Data Stewardship System*

COD – *Cloud Optical Depth*

CPS – *Cloud Particle Size distribution*

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTP – Pressão no topo da nuvem

Cu – Cumulus

DSA – Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais

ECI – Evento de Chuva Intenso

FF – Frente Fria

GFS – *Global Forecast System*

GLM – *Geostationary Lightning Mapper*

GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellite*

HL – Hora Local

hPa – Hectopascal

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MRJ – Município do Rio de Janeiro

NCAR – *National Center for Atmospheric Research*

NCEP – *National Centers for Environmental Prediction*

NCL – Nível de convecção por levantamento

NO – Noroeste

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

Ns – Nimbostratus

O – Oeste

P1 – Pico 1

P2 – Pico 2

P3 – Pico 3

PNMM – Pressão ao nível médio do mar

r – Correlação

r_e – Raio efetivo das partículas

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RR – Taxa de precipitação

S – Sul

SE – Sudeste

SFs – Sistemas frontais

Temp – Temperatura do topo da nuvem

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UCAR – *University Corporation for Atmospheric Research*

Z – Zulu

ZCAS – Zona de Convergência Intertropical

ZN – Zona Norte

ZO – Zona Oeste

ZS – Zona Sul

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	07
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	12
SUMÁRIO	15
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Fundamentação teórica.....	18
2.2 Propriedades microfísicas das nuvens.....	23
2.3 Chuvas intensas no Rio de Janeiro.....	25
3. DADOS E METODOLOGIA	29
3.1 Dados pluviométricos de estações de superfície.....	29
3.2 Análise sinótica e dinâmica.....	32
3.3 Produtos do satélite GOES-16.....	33
3.4 Correlação de Pearson.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Análise quantitativa, espacial e temporal da precipitação.....	37
4.1.1 Análise do comportamento horário do vento em superfície.....	44
4.1.2 Ocorrência de relâmpagos.....	46
4.2 Análise sinótica e dinâmica.....	49
4.2.1 Análise de D-2 e D-1: dia 7 às 00Z e 12Z.....	49
4.2.2 Análise do dia 8 – 1º Pico.....	54
4.2.3 Análise do dia 9 – 2º e 3º Pico.....	60
4.2.4 Diagrama de fase do ciclone.....	67
4.2.5 Temperatura da superfície do mar.....	69
4.3 Análise das propriedades das nuvens.....	70
4.3.1 Caracterização de cada pico.....	70
4.3.2 Correlação das variáveis.....	80
5. CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO 1	88
ANEXO 2	89
ANEXO 3	90
ANEXO 4.....	91

1. INTRODUÇÃO

Banhado pelo Oceano Atlântico no setor sul, pela Baía de Sepetiba no setor oeste e pela Baía de Guanabara setor leste, medindo 70 km de leste a oeste e 40 km de norte a sul, apresentando um perfil topográfico com três grandes maciços, Pedra Branca e Tijuca, próximos ao litoral, e Gericinó na divisa norte, e contendo 159 bairros, o Município do Rio de Janeiro é considerado um dos maiores centros urbanos do mundo (Fonte: Prefeitura do Rio), cuja população estimada para 2020 é de cerca de 6,75 milhões de pessoas e densidade demográfica, do censo de 2010, de 5.265,82 hab/km² (Fonte: IBGE).

O Município do Rio de Janeiro tem um histórico de ocorrência de chuvas extremas, principalmente durante as estações de verão e outono (DERECZYNSKI *et al.*, 2017). Em um estudo realizado entre os anos de 1997 a 2016, foi evidenciada uma tendência de aumento no número de eventos de chuvas intensas no município (PRISTO *et al.*, 2018). Com mais cenários de ocorrência desses tipos de eventos, surge a necessidade de cada vez mais entender e documentar os mecanismos e as características que levam as suas ocorrências, para que a previsibilidade de casos futuros e prevenção de desastres seja cada vez mais otimizada. O conhecimento e caracterização das condições ambientais e de parâmetros quantitativos permitem que estes não só passem a ser levados em consideração em tomadas de decisão dos previsores, como também podem contribuir para o aprimoramento de ferramentas e modelos conceituais para previsão de tempo de eventos de chuvas intensas e tempestades.

O evento de precipitação que ocorreu nos dias 8 e 9 de abril de 2019, que atingiu o município do Rio de Janeiro, é considerado, até o presente momento, como o caso mais intenso em questões de acumulados de chuva em 24 horas, desde os 23 anos da implementação das estações do Sistema Alerta Rio, com 8 dos 10 recordes de maiores chuvas em 24h tendo sido registrados neste evento (Figura 1). A tempestade deixou diversos danos na cidade, causando alagamentos, deslizamento de terra no Morro da Babilônia, no Leme, desabamento de um trecho da ciclovia Tim Maia e 10 mortes entre os dias 8 e 9. As aulas em escolas e universidades foram suspensas. Na madrugada do dia 9, 45 pontos de alagamento e 8 quedas de árvores foram registrados. Quatro dias depois, em decorrência do acúmulo de chuva no solo, aconteceu um desabamento de dois prédios na comunidade Muzema, no bairro do Itanhangá, deixando 24 mortos. O

município do Rio de Janeiro entrou em estágio de atenção às 18h35 do dia 8, e passou para o estágio de crise as 20h55, com o acionamento de 39 sirenes em 20 comunidades da cidade (Fonte: G1 Rio; Folha de S.Paulo).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar o evento de chuva forte que ocorreu entre os dias 8 e 9 de abril de 2019 na cidade do Rio de Janeiro para melhor compreender sua caracterização e sua evolução espaço-temporal. Para tal foram estudados o perfil da precipitação, os mecanismos sinóticos indutores e, a partir dos dados do novo satélite GOES-16, foi realizada uma caracterização dos parâmetros macro e microfísicos das nuvens, incluindo a ocorrência de raios.

No próximo capítulo é realizada uma revisão de conceitos teóricos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, incluindo a revisão bibliográfica. No capítulo 3 a metodologia é apresentada, onde é explicada detalhadamente a forma de obtenção de dados. Em seguida, os capítulos 4 e 5 descrevem os resultados obtidos e a conclusão, respectivamente.

As Dez maiores precipitações pluviométricas em 24 horas.				
ID	Estação	mm/24h	Data	Hora
103	Sumaré	360,2	06/04/2010	17:35
3	Rocinha	343,4	09/04/2019	15:00
28	Alto da Boa Vista	341,2	09/04/2019	16:15
17	Barra/Barrinha	335,2	09/04/2019	15:00
16	Jardim Botânico	334,4	09/04/2019	15:00
6	Copacabana	329,4	09/04/2019	15:30
1	Vidigal	312,2	09/04/2019	14:45
19	Barra/Riocentro	311,4	09/04/2019	15:00
18	Jacarepaguá/Cidade de Deus	289,6	09/04/2019	16:00
33	Tijuca/Muda	286,0	26/04/2011	19:30

Figura 1: Quadro de recordes de chuva acumulada em 24h desde a implantação do sistema Alerta Rio (1996). Em destaque estão 8 estações cujos máximos históricos ocorreram durante o evento dos dias 8 e 9 de abril de 2019. Extraído em janeiro/2021 (Fonte: Alerta Rio).

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é feita uma fundamentação teórica sobre a formação das nuvens e dos diferentes tipos de precipitação. Seguindo, é feita uma revisão da literatura sobre as propriedades microfísicas das nuvens que serão utilizadas no trabalho, que são:

espessura ótica da nuvem, raio efetivo das partículas e a fase da nuvem, além de uma revisão focada em eventos de chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro.

2.1 Fundamentação teórica

Uma nuvem é um conjunto de partículas de cristais de gelo e/ou gotículas de água suspensas na atmosfera e visíveis a olho nu. Sua existência faz parte do processo hidrológico, onde a fonte de vapor de água vem dos processos de evaporação e transpiração, enquanto que o seu desaparecimento está relacionado aos processos de precipitação ou evaporação da própria nuvem. Para a formação de uma nuvem é necessário que haja umidade, núcleos de condensação e mecanismos forçantes de levantamento do ar (AHRENS, 2001).

A saturação do ar acontece quando a quantidade de vapor de água atinge seu máximo, estando em equilíbrio em uma dada temperatura. Esta saturação pode ocorrer tanto devido ao resfriamento, pela adição de umidade ou pela mistura de massas de ar. O resfriamento de uma parcela de ar faz com que a saturação ocorra quando a temperatura (T) se iguala a temperatura do ponto de orvalho (T_d), que é a temperatura na qual o ar úmido deve ser resfriado, por radiação, até que se atinja a saturação do ar. Já a adição de umidade faz com que a saturação seja atingida ao se elevar o valor T_d até que se iguale ao valor de T . Esses processos estão representados na Figura 2a, que mostra uma parcela não saturada A e as formas de saturá-la ao abaixar a temperatura (resfriamento) e ao aumentar a pressão de saturação, elevando assim o T_d (adição de vapor). Entretanto, é comum que ambos os processos ocorram simultaneamente na atmosfera, o que seria representado no gráfico como uma linha diagonal de A até a região de saturação. A segunda forma de saturação do ar é pela mistura de massas. A Figura 2b mostra duas parcelas não saturadas, C e B, que ao se misturarem, deram origem a parcela X que atingiu a saturação (STULL, 2011).

Ao se elevar uma parcela na atmosfera, ela se expande e se resfria adiabaticamente, aumentando a umidade relativa devido à redução da pressão de vapor da água (LAMB & VERLINDE, 2011). Quando se atinge o chamado NCL – nível de

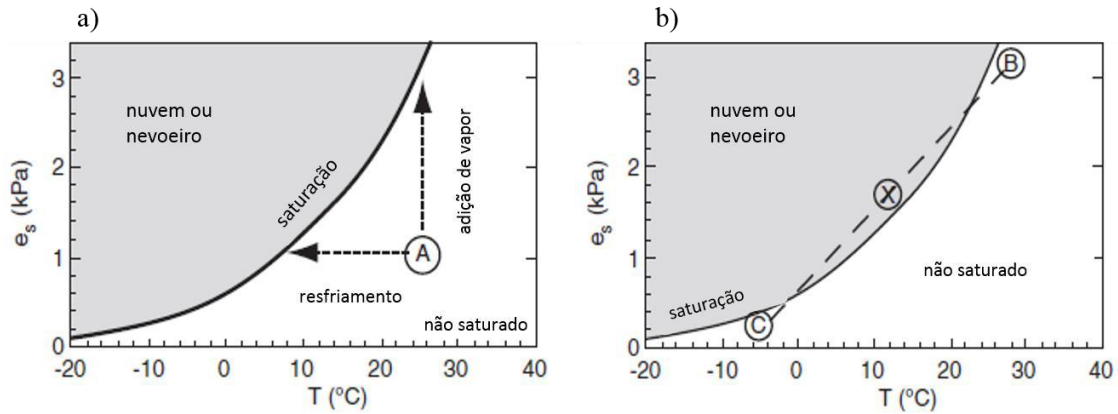


Figura 2: a) Representação das formas de saturação do ar a partir dos processos de resfriamento e adição de umidade. b) Saturação do ar pela mistura de duas parcelas. (Fonte: traduzido de STULL, 2011).

convecção por levantamento (ou LCL do inglês), acontece a saturação do ar, sendo este ponto caracterizado pela altura da base das nuvens (Figura 3a). Existem quatro mecanismos que podem causar a ascensão do ar: convecção, levantamento orográfico, convergência e levantamento frontal, como visto na Figura 3b (AHRENS, 2001). O aspecto mais importante do levantamento de uma parcela de ar é que ele é a forma mais comum para se atingir a supersaturação (WALLACE & HOBBS, 2006).

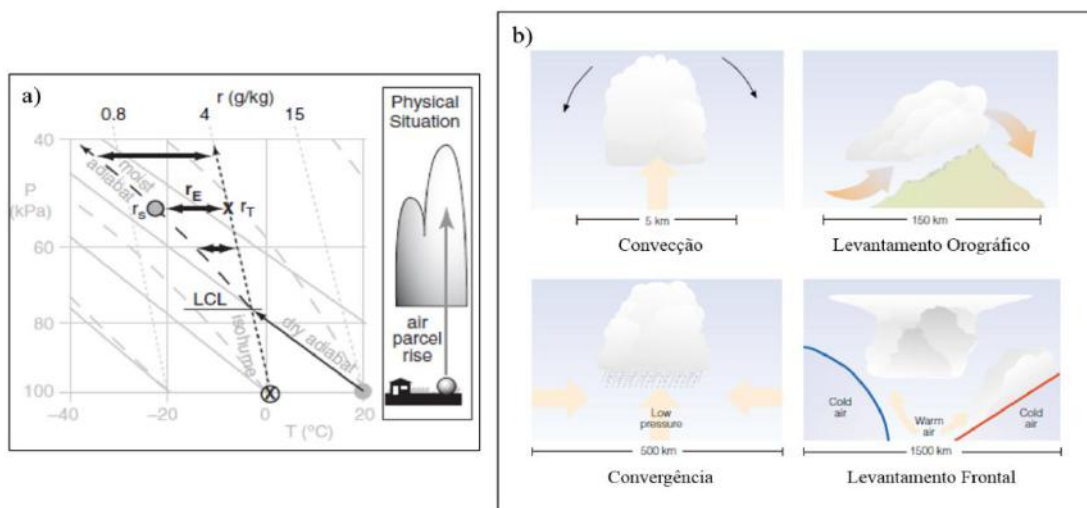


Figura 3: a) Representação de um diagrama termodinâmico mostrando que ao ascender uma parcela de ar adiabaticamente, existe um excedente de umidade a partir do ponto NCL (ou LCL do inglês), ponto este que representa a altura da base das nuvens. r_T é a razão de mistura total, r_s é a razão de mistura de saturação e r_E é a quantidade excedente de umidade (Fonte: STULL, 2011); b) Formação de nuvem a partir dos quatro tipos de levantamento de ar na atmosfera (Fonte: adaptado de AHRENS, 2001).

A supersaturação é a condição necessária para que haja a formação de nuvem, sendo encontrado na atmosfera com valores abaixo de 10%, porém mais frequentemente abaixo de 1% (PRUPPACHER & KLETT, 1997). Pode ser definida por:

$$s = \left(\frac{e}{e_s} - 1 \right) * 100\%$$

Onde,

e : pressão de vapor total

e_s : pressão de saturação do vapor

$\frac{e}{e_s}$: umidade relativa

Num ambiente supersaturado o vapor de água condensa sobre partículas de aerossol, que são os núcleos de condensação, cujo processo é chamado de nucleação heterogênea. A partir da base da nuvem, a supersaturação aumenta quase que linearmente, causando a ativação das partículas de aerossol, transformando-as em gotas de nuvem que agem como sumidouro do excesso de vapor (LAMB & VERLINDE, 2011). Uma gota de nuvem tem raio típico de 10 μm , enquanto que para uma gota de chuva o raio é de 1 mm (Figura 4). Entretanto, o processo de difusão de vapor (condensação) sozinho não consegue formar gotas grandes o suficiente para gerar precipitação. Para tal, acontece o processo de colisão-coalescência. Este processo acontece quando, eventualmente, uma gota de nuvem é maior que as outras, apresentando uma velocidade terminal¹ maior onde, no seu processo de queda, irá colidir e coalescer (unir), formando uma gota de chuva (LAMB & VERLINDE, 2011).

A precipitação pode ser estratiforme ou convectiva. Uma nuvem nimbostratus (Ns; Figura 5a) é caracterizada por precipitação estratiforme, enquanto que a nuvem cumulonimbus (Cb; Figura 5b) é caracterizada por precipitação convectiva. O que difere esses dois tipos de precipitação é a escala do movimento vertical. Uma precipitação é do tipo estratiforme quando o movimento vertical na nuvem (w) é menor que a velocidade

¹ É a velocidade de equilíbrio entre a força da gravidade e a força de arrasto devido ao atrito com o vento, sendo a máxima velocidade atingida por uma partícula precipitante, cuja variação é em função do tamanho da partícula (Houze, 1993).

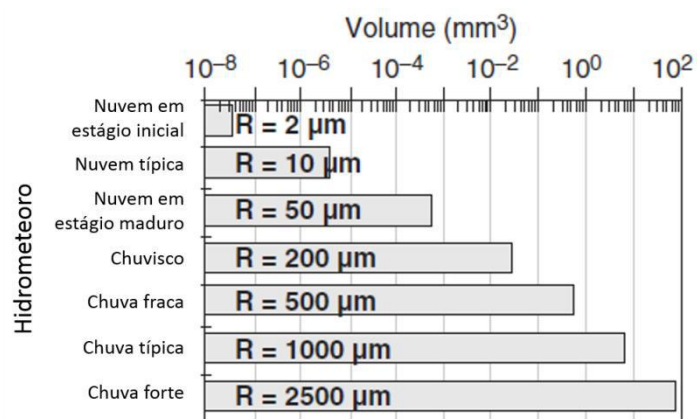


Figura 4: Distribuição dos hidrometeoros com relação ao seu volume e raio (Fonte: traduzido de STULL, 2011).

terminal dos cristais de gelo e neve (V_{gelo}). A precipitação convectiva, por sua vez, apresenta uma escala de movimento vertical que se iguala ou excede a típica velocidade terminal dos cristais de gelo e neve (HOUZE, 1993).

Tabela 1: Caracterização do tipo de precipitação a partir da escala do movimento vertical (Fonte: HOUZE, 1993)

Precipitação estratiforme	Precipitação convectiva
$ w < V_{\text{gelo}}$	$ w \geq V_{\text{gelo}}$
onde $V_{\text{gelo}} \sim 1-3 \text{ ms}^{-1}$	

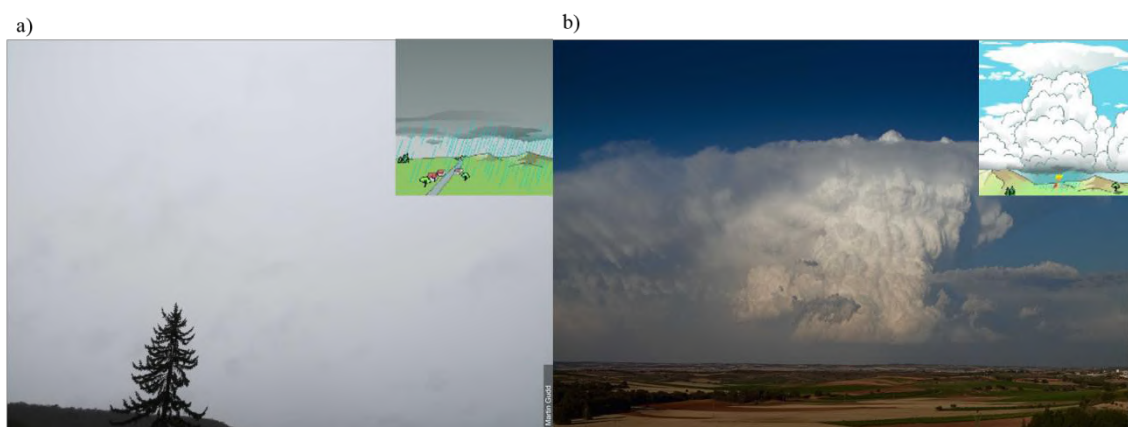


Figura 5: Fotografias de uma nuvem a) Nimbostratus e b) Cumulonimbus, com desenho esquemático da precipitação de cada nuvem. (Fonte: OMM - Organização Meteorológica Mundial).

A Figura 6 mostra as características dos dois tipos de precipitação. Numa nuvem nimbostratus profunda (Figura 6a), a precipitação que atinge o solo é originada na parte superior da nuvem a partir de cristais de gelo que derretem conforme descendem. O tempo de duração desde a formação da nuvem até que haja precipitação é de 1-3h, tempo necessário para que as partículas de gelo cresçam e venham a precipitar. A região de derretimento do gelo é demarcada, quando vista por radar, como um núcleo de maiores refletividades numa orientação horizontal (HOUZE, 1993).

Em uma nuvem cumulonimbus (Fig 6b), a precipitação pode começar a atingir o solo em até 30 minutos a partir do início de formação da nuvem. O rápido crescimento das partículas precipitantes sugere que a formação e crescimento delas ocorre não tão distante da base. Isto só se torna possível devido ao forte movimento ascendente que carrega as partículas para o interior da nuvem, possibilitando que cresçam por acreção de água líquida até que se tornem grandes o suficiente para precipitar. Esta configuração é vista por radar como um núcleo vertical de máxima refletividade, o que se contrasta com a orientação horizontal da precipitação estratiforme (HOUZE, 1993).

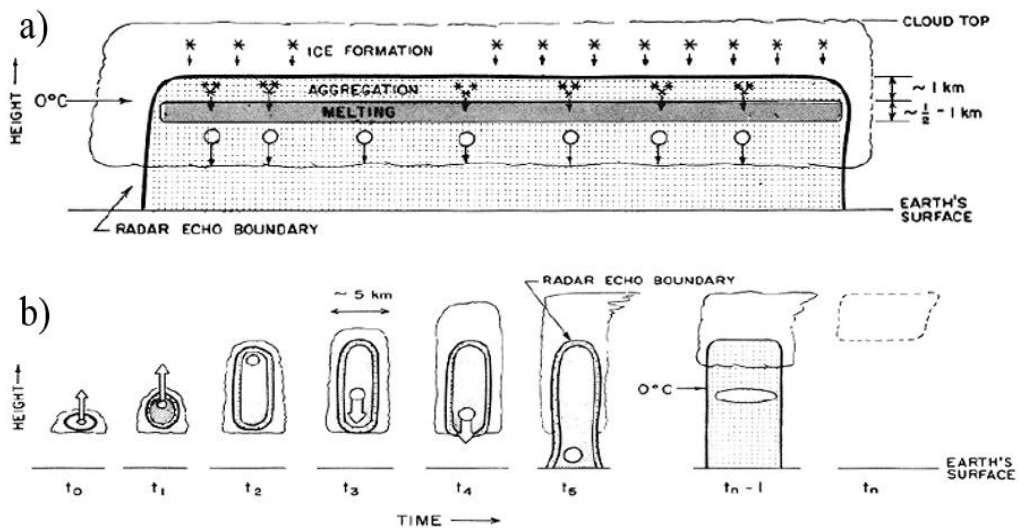


Figura 6: Características da precipitação a) estratiforme e b) convectiva (Fonte: HOUZE, 1993).

Para que ocorram descargas elétricas em uma nuvem é necessário, além da corrente ascendente, que haja três tipos de partículas dentro da nuvem: formação de pequenos cristais de gelo através da deposição de vapor em núcleos de condensação de gelo, gotículas de água super-resfriada e partículas ligeiramente grandes de *graupel* de

gelo. Esses requisitos são majoritariamente encontrados em nuvens do tipo Cb, onde as descargas ocorrem principalmente na faixa de temperatura entre -5 e -20°C, porém essas três condições podem existir na faixa de -0 a -40°C. Conforme as partículas de *graupel* interceptam gotículas de água super-resfriada ao descenderem na atmosfera e conforme os cristais de gelo crescem por deposição de vapor, tendo suporte das correntes ascendentes, a disposição dos elétrons em cada uma dessas superfícies é diferente, devido ao alinhamento das moléculas de água. Se essas partículas se chocam, há a formação da descarga elétrica (STULL, 2011).

2.2 Propriedades microfísicas das nuvens

A profundidade ótica da nuvem (τ , COD – *Cloud Optical Depth* do inglês), também chamada de espessura ótica, é uma medida adimensional do grau de modificação da luz ao passar por uma nuvem, ou seja, é a informação sobre a extinção da luz do topo à base da nuvem, sendo uma propriedade que depende da espessura da nuvem, do conteúdo de água/gelo e do tamanho da distribuição das gotículas de água e cristais de gelo (Glossário de Meteorologia, 2012; CARLOMUSTO, 2019). A distribuição do tamanho da partícula de nuvem (CPS – *Cloud Particle Size distribution*) é definida pela razão entre o terceiro e o segundo momento da distribuição do tamanho da partícula, onde se calcula a medida do raio efetivo das partículas em uma única camada de nuvem (CARLOMUSTO, 2019). Já a fase da nuvem é o estado termodinâmico das partículas que a compõe, podendo ser na fase líquida, gelo ou mista. Uma nuvem em fase mista é aquela contendo tanto partículas de água quanto de gelo, a fase líquida se refere a nuvens que não contenham gelo, enquanto que a fase de gelo se refere a nuvens que não contenham água líquida (MAZIN, 2006).

O satélite GOES-16 apresenta um produto que identifica a fase no topo da nuvem, onde, além dos 3 tipos já mencionados, inclui também a fase de água líquida super-resfriada, definida pela água líquida em temperatura menor que 0°C (CARLOMUSTO, 2019).

Através de simulação numérica, Suzuki *et al.* (2006) consideraram dois tipos de nuvem, que eles chamaram de *non-drizzling* (sem chuvisco) a nuvem ainda no processo de condensação de vapor, e de *drizzling* (chuvisco) a nuvem que passa a ter o processo de colisão-coalescência, originando gotas de chuva. Foi encontrada uma correlação positiva do raio efetivo e da espessura ótica em nuvens sem chuvisco, ao passo que nas

nuvens com chuvisco, a correlação foi negativa. A nuvem sem chuvisco, que está no estágio de difusão de vapor em núcleos de condensação, apresenta um aumento do tamanho das gotículas de nuvem, o que gera um aumento do raio efetivo das partículas, assim como um aumento da espessura devido ao aumento da quantidade total de água líquida na nuvem, portanto uma correlação positiva. Para nuvens com chuvisco, com processo de colisão-coalescência ocorrendo, o número de partículas na nuvem começa a diminuir através do crescimento das gotas de chuva, o que aumenta o raio efetivo das partículas, ao passo que diminui a espessura ótica da nuvem pela menor quantidade de partículas. Logo, correlação negativa.

Kobayashi & Masuda (2009) estudaram a relação da espessura ótica da nuvem com as taxas de precipitação em escala global e encontraram que a massa de água líquida (LWP – *liquid water path*) é apontada como o principal fator para o aumento da espessura ótica da nuvem (τ). Além disso, existe uma diminuição de τ na transição entre as nuvens não precipitantes (taxa de precipitação = 0 mm/h) para as nuvens precipitantes (Figura 7a), que é devido ao processo de crescimento de gotas de nuvem para gotas de chuva, cuja quantidade de gotas dentro da nuvem diminui, reduzindo assim o LWP. Já ao se considerar valores fixos de LWP foi encontrado que nuvens com chuva mais forte (>1 mm/h) não variam τ com a taxa de precipitação, enquanto que nuvens com chuva fraca (<1 mm/h) têm a tendência de diminuir τ com a taxa de precipitação, como observado na Figura 7a, indicando que existe uma dependência da distribuição do tamanho das partículas. Buscando então avaliar esse efeito (Figura 7b) foi evidenciado que, para chuva fraca, a diminuição de τ observada na Figura 7a é devido ao aumento do raio efetivo das gotas, ou seja, quando aumenta-se o raio efetivo existe um aumento do trajeto percorrido pela luz sem que seja atenuada, diminuindo assim a espessura ótica. Enquanto que para chuvas mais fortes, certa constância foi observada na Figura 7b, assim como na Figura 7a.

Ao se caracterizar a estrutura microfísica de eventos de precipitação extremas sobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil através do satélite CloudSat, Duarte *et al.* (2018) evidenciaram que os eventos com presença de nuvem do tipo Nimbostratus obtiveram maiores valores dos parâmetros de água líquida: raio efetivo de gotas, concentração de partículas e conteúdo de água líquida. Já para os eventos com nuvem

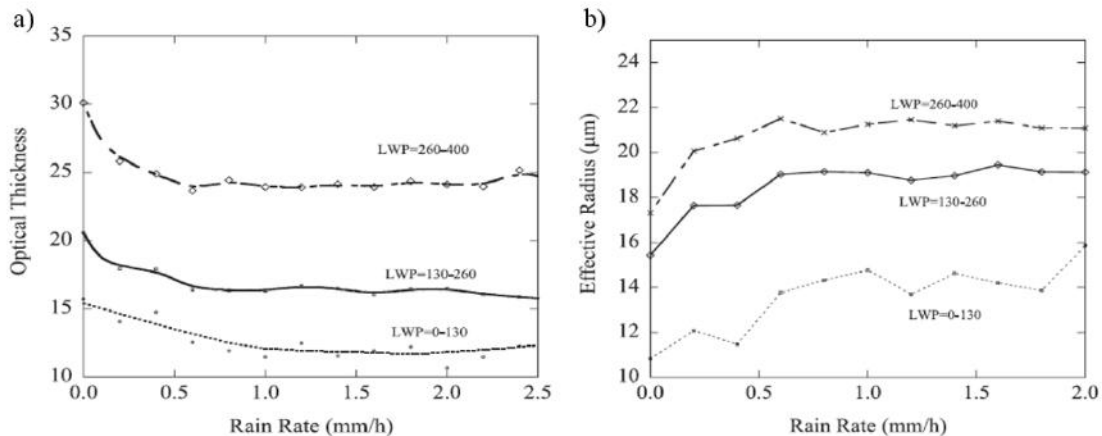


Figura 7: Relação das variáveis a) Espessura ótica de nuvem e b) Raio efetivo (μm) com a variação da taxa de precipitação (mm/h), considerando-se três valores constantes da massa de água líquida (LWP). (Fonte: extraído de KOBAYASHI & MASUDA, 2009)

Cumulonimbus, o papel mais importante passou a ser o dos parâmetros das partículas de gelo. A partir dos perfis verticais no local de maior precipitação, os autores agruparam os seis eventos estudados em dois grupos. O Grupo A foi o grupo com as maiores taxas de precipitação (10, 14 e 18 mm/h) e apresentou as seguintes características: maiores alturas de topo, em torno de 14 km, menores valores dos parâmetros de água líquida em baixos níveis e altos valores dos parâmetros de gelo nos níveis médios e altos da nuvem, sendo este último apontado como o principal processo microfísico gerador de precipitação intensa. Na altitude entre 13 e 14 km a medida do raio efetivo do gelo variou aproximadamente entre 25 e 70 μm (Figura 8a) e na altitude entre 7 e 8 km o raio efetivo das gotas variou entre 10 e 15 μm (Figura 8b), aproximadamente. Enquanto que no Grupo B foram reunidos os eventos com as menores taxas de precipitação (4, 4 e 7 mm/h) onde foi observado, entre outros fatores, que a altura dos topos das nuvens variou em torno de 10 e 11 km e maiores valores dos parâmetros de água líquida, com maior conteúdo de água líquida. Entre 9 e 11 km de altitude houve uma variação aproximada de 30 a 50 μm do raio efetivo das partículas de gelo, já para altitudes entre 6 e 8 km, o raio efetivo de gotas variou entre 16 e 18 μm .

2.3 Chuvas intensas no Rio de Janeiro

Dereczynski *et al.* (2009), a partir da análise de 10 anos de dados de precipitação compreendidos entre os anos de 1997 a 2006, de 30 estações pluviométricas da Fundação Geo-Rio, mostraram que os sistemas frontais (SFs) foram responsáveis por

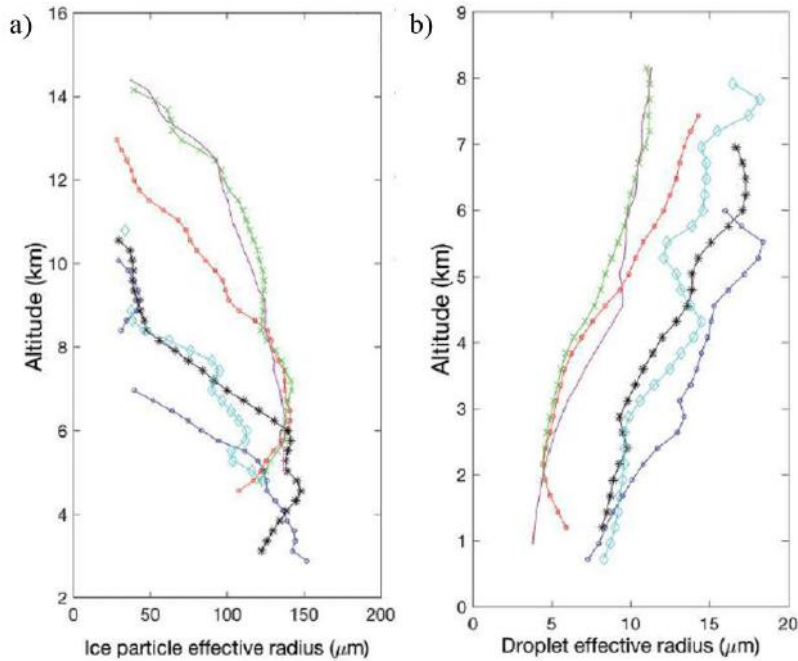


Figura 8: Perfil vertical do tamanho do raio efetivo de partículas de a) gelo e de b) gotas. Cada linha representa o perfil vertical na região de maior taxa de precipitação de um evento de chuva extrema no Brasil, onde no gráfico a), as três linhas mais a esquerda, igual as mesmas três mais a direita do gráfico b), são de eventos de chuva mais intensa. As demais linhas são dos eventos de chuva menos intensa. (Fonte: extraído de DUARTE ET AL., 2018).

77% da ocorrência de chuva intensa no município, presentes durante todos os meses do ano, enquanto que a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) foi responsável por 13%, sem nenhuma ocorrência entre abril e setembro. Os demais sistemas foram os Sistemas Convectivos de Mesoescala (8%) e a circulação de brisa (2%). No mês de abril prevaleceu, com maior frequência, a ocorrência de SFs associados às chuvas intensas.

Lima *et al.* (2010) também encontraram uma maior associação dos SFs (53%) com eventos de chuva intensa. Esse estudo focou no período chuvoso, de novembro a março, para toda a região sudeste. Entretanto, foi discutido que, apesar das ZCAS (47%) estarem ligeiramente menos associadas aos eventos intensos, a probabilidade de ocorrência é maior, ou seja, devido ao caráter persistente das ZCAS, existe uma maior tendência de associação a um evento intenso de chuva.

Com o intuito de entender os padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na RMRJ, Weide-Moura *et al.* (2013), a partir de dados de precipitação das estações meteorológicas da Fundação Geo-Rio (1997-2010) e dados de Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) e altura geopotencial em 500 hPa,

da Reanálise do NCEP/NCAR, evidenciaram que, em geral, dos sistemas meteorológicos que podem provocar eventos intensos de chuva, os SFs são os mais importantes, tanto ao atingirem a região de estudo quanto ao se tornarem estacionários, favorecendo a ocorrência de ZCAS. Os autores mostraram que a entrada de uma típica frente fria (FF) de verão, de trajetória predominantemente zonal, é o principal padrão associado a chuva intensa na RMRJ. O segundo padrão é mais frequente durante o inverno, com a incursão de uma FF sobre boa parte do país até latitudes mais baixas, podendo ocasionar friagem, associado a um significativo sistema de alta pressão pós-frontal, enquanto que em níveis médios, associado a uma significativa onda baroclínica. O último padrão encontrado está relacionado a ocorrência de ventos de quadrante sul no Rio de Janeiro oriundos do posicionamento de um anticiclone a leste do Rio Grande do Sul, associado, geralmente, a um bloqueio atmosférico.

Escobar *et al.* (2020) estudaram a associação de eventos de chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro à ocorrência de ZCAS, no período de outubro de 2006 a abril de 2016. Foi encontrado que quase metade de todas as ZCAS que atingiram a cidade provocaram eventos de chuva intensa, ocorrendo, em sua maioria, durante os primeiros dois dias da instalação do fenômeno. No mês de abril foi evidenciado que nenhuma das duas ZCAS que atingiram a cidade provocaram eventos de chuva intensa. Foram identificados quatro padrões sinóticos, onde, das maiores para as menores variâncias, os dois primeiros estão associados a FF próxima a costa do Rio de Janeiro, o terceiro está associado a um intenso anticiclone pós-frontal que permanece quase estacionário sobre o Oceano Atlântico e o quarto está relacionado a presença de um ciclone localizado no Oceano Atlântico ao sul do Rio de Janeiro. Este ciclone se caracteriza por uma estrutura baroclínica fraca e a FF associada a ele afeta principalmente as costas dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, porém foi mostrado que em várias ocasiões, este ciclone apresenta características subtropicais, favorecendo a intensificação da chuva na cidade do Rio de Janeiro ao permanecer estacionário por vários dias.

A partir do cálculo dos percentis de chuva em 15min e chuva em 24h para toda a série de dados disponíveis (1997-2016) para 32 estações pluviométricas no Município do Rio de Janeiro (MRJ), Pristo *et al.* (2018) definiram que para um evento ser classificado como um Evento de Chuva Intensa (ECI) no MRJ, o registro de chuva acumulada em 24h em uma estação deve se igualar ou ultrapassar seu percentil 95 ao passo que no mesmo período deve-se haver ao menos um registro de chuva em 15 minutos igual ou superior ao seu percentil 95. O percentil 99 é dito como chuva muito

intensa, de caráter extremamente raro. Os mesmos autores realizaram uma climatologia de chuva com a série de 20 anos utilizada (1997-2016). Foi evidenciado que os máximos de precipitação são encontrados a barlavento das regiões montanhosas, enquanto que os mínimos de precipitação localizam-se nas regiões de planície, como na Zona Norte (Figura 9a). Estes resultados corroboram o que já havia sido encontrado por Dereczynski *et al.* (2009), onde as configurações apontadas como principais responsáveis por tal espacialização foram os deslocamentos dos sistemas transientes, que se deslocam de sul para norte, em sua maioria, e também a circulação da brisa marítima. No outono, encontrou-se novamente um pico máximo no alto do Maciço da Tijuca. Um outro pico, mas de menor intensidade em relação ao da climatologia anual, foi encontrado no Maciço da Pedra Branca, cuja intensidade também se assemelha ao encontrado por toda a região e entorno do Maciço da Tijuca, e um mínimo de precipitação novamente abrangendo a Zona Norte (Figura 9b).

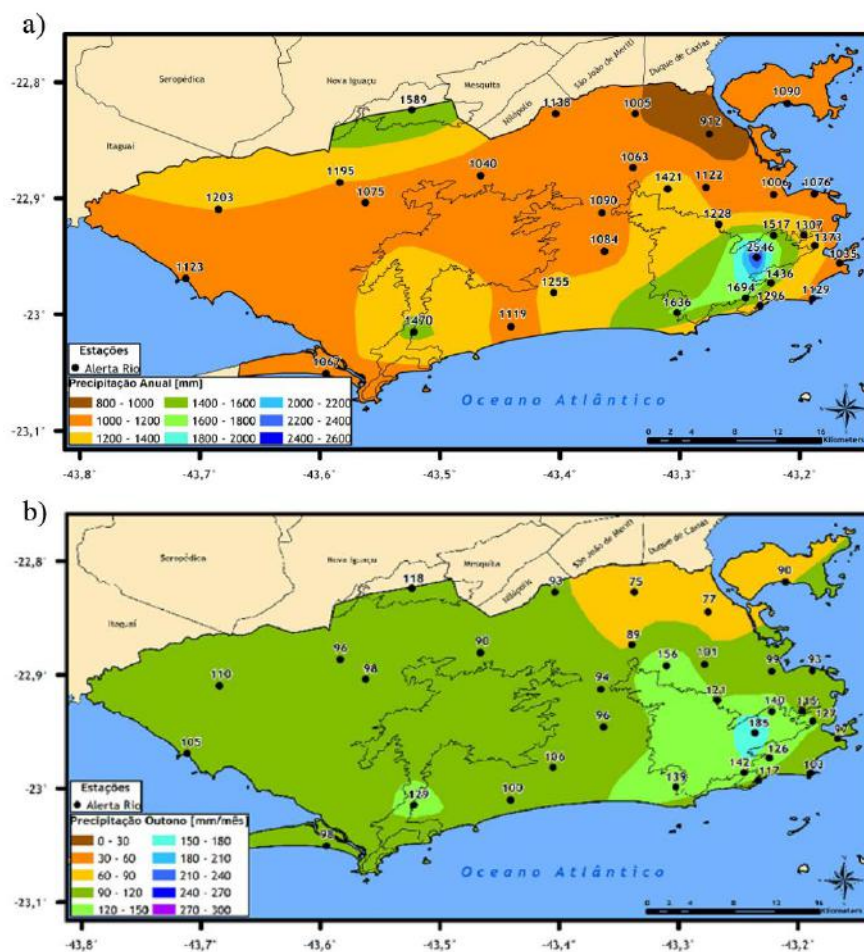


Figura 9: Climatologia de precipitação de 32 estações pluviométricas do Sistema AlertaRio para o período de 1997-2016 onde a) Total pluviométrico anual (mm/ano) e b) Média mensal (mm/mês) para o outono (Fonte: PRISTO ET AL., 2018).

No ano de 2010, no período de 5 a 7 de abril, ocorreu um evento de chuva intensa que ocasionou o escorregamento do Morro do Bumba, em Niterói/RJ. Em sua dissertação de mestrado, Aires (2016) apontou que um sistema frontal estacionário na Região Metropolitana do Rio de Janeiro foi o responsável pela ocorrência das chuvas intensas. Com dados da reanálise CSFR, foi observado o predomínio de ventos de quadrante sul em superfície durante todos os dias, que promoveu a advecção de umidade e temperaturas mais baixas para a região do evento. Além disso, observou-se a existência de um cavado em níveis médios e altos posicionado a oeste do estado do Rio de Janeiro, favorecendo o desenvolvimento de sistemas convectivos e a intensificação e manutenção dos ventos de quadrante sul.

3. Dados e Metodologia

Este trabalho consiste da utilização de dados observados da precipitação a partir das estações pluviométricas de superfície, dos dados de simulação numérica de escala global para a confecção dos campos de escala sinótica, da utilização das cartas sinóticas de superfície e da utilização de imagens e produtos de sensoriamento remoto orbital.

3.1 Dados pluviométricos de estações de superfície

Para a análise da precipitação, foram utilizados dados pluviométricos de 33 estações do Sistema Alerta Rio, entre os dias 8 e 9 de abril de 2019, a partir dos dados de precipitação em 15 minutos, acumulados de 1h e acumulados de 24h. Para a coleta dos acumulados de 24h foram considerados os maiores acumulados registrados no dia 9 de abril, considerando-se os horários iniciais da chuva no dia 8 de abril em cada estação. Devido ao início da chuva ser em horários distintos em grande parte das estações, a faixa de horário do acumulado em 24h é diferente para cada estação (porém todos os horários iniciais ocorreram entre a tarde e noite do dia 8 de abril). Desse modo, os acumulados de 24h foram avaliados de forma a caracterizar o maior quantitativo de chuva que ocorreu em cada estação durante o evento. A Figura 10 mostra a localização

das estações utilizadas e de estações desativadas da rede. Os dados foram obtidos através do site <http://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/>.

Utilizou-se os valores de percentil 99 de chuva em 15min e chuva em 24h encontrados por Pristo *et al.* (2018) para caracterizar o regime de precipitação do evento, percentil este que é utilizado para classificar eventos de chuva muito intenso, segundo os autores. Entretanto, as estações Alto da Boa Vista, Av. Brasil/Mendanha, Barra/Barrinha, Estrada Grajaú/Jacarepaguá e Tijuca/Muda não estão no estudo realizado por Pristo *et al.* (2018) por terem sido instaladas posteriormente. Pela figura 8, notou-se que para as três primeiras estações citadas acima, outras três estações já desativadas se localizavam próximas a elas, e que fizeram parte do estudo de Pristo *et al.* (2018). São elas as estações Sumaré, Mendanha e Itanhangá. Logo, a caráter substitutivo por proximidade e/ou altitude, os limiares de precipitação da estação Sumaré foram utilizados para a estação Alto da Boa Vista, da estação Mendanha para a estação Av. Brasil/Mendanha e da estação Itanhangá para a estação Barra/Barrinha. Para as estações Estrada Grajaú/Jacarepaguá e Tijuca/Muda não foram feitas análises com percentil.

Com o perfil de chuva encontrado ao se analisar a precipitação horária, os resultados foram analisados levando-se em conta três momentos principais, chamados:

- a) **Pico 1 – P1:** 18 UTC do dia 8 a 5:59 UTC dia 9
- b) **Pico 2 – P2:** 6 UTC do dia 9 a 11:59 UTC dia 9
- c) **Pico 3 – P3:** 12 UTC do dia 9 a 21:59 UTC dia 9

onde o fuso horário local é de UTC – 3 horas.

Em conjunto, realizou-se uma análise do comportamento do vento em superfície durante os três picos, utilizando-se as variáveis de direção e intensidade do vento nas estações Guaratiba e São Cristóvão, do Alerta Rio, e nas estações Jacarepaguá, Vila Militar e Forte de Copacabana, do INMET. Os dados das estações do INMET foram obtidas através do banco de dados meteorológicos disponível no endereço <<https://portal.inmet.gov.br/>>.

Na Figura 10 encontra-se o mapa de delimitação da área de estudo e a localização das estações utilizadas neste trabalho.

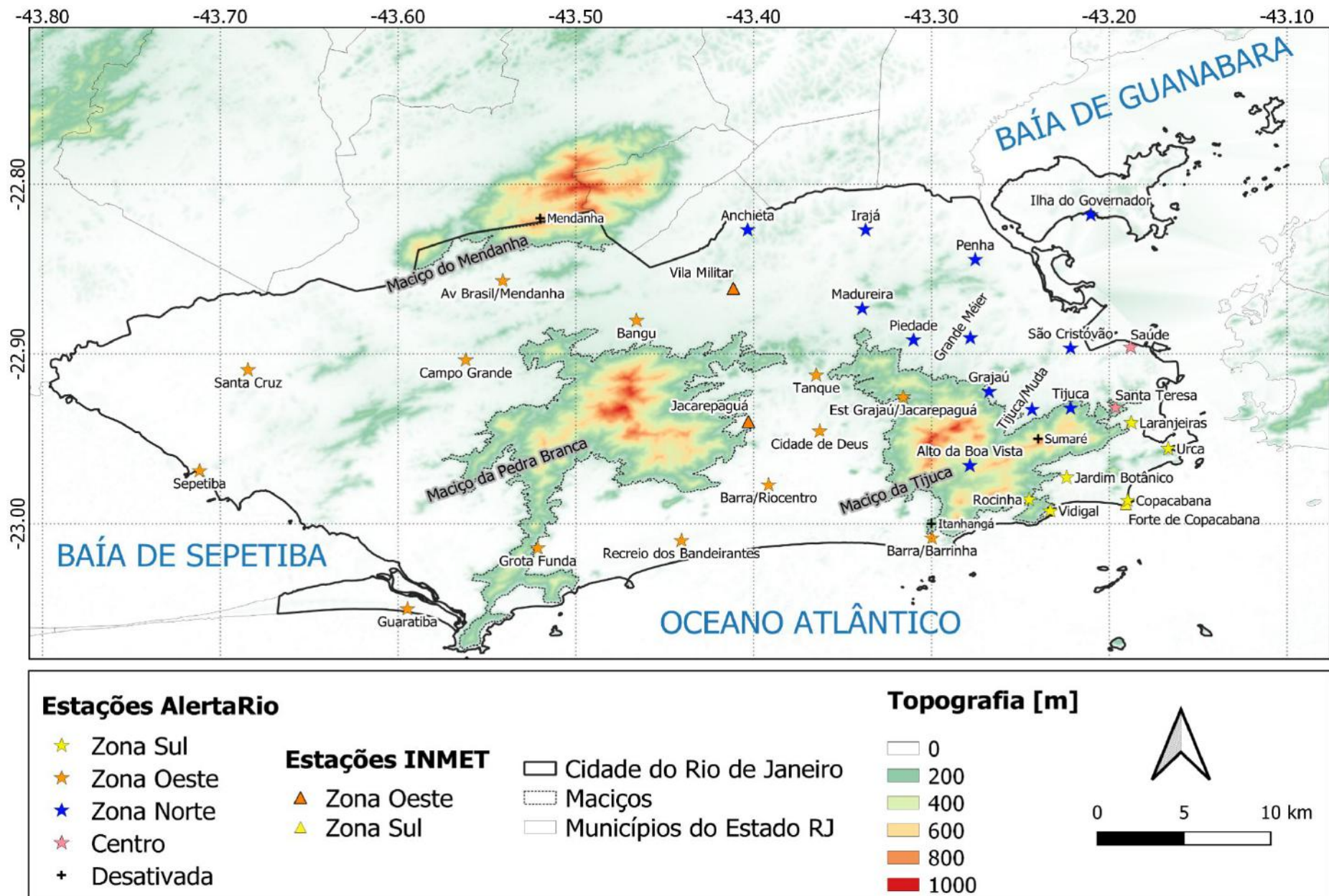


Figura 10: Mapa da área de estudo e localização das estações (Fonte: confecção própria).

3.2 Análise sinótica e dinâmica

As análises sinóticas e dinâmicas foram realizadas a partir do seguinte conjunto de dados:

- a) Imagens dos canais 9 (vapor realçado) e 14 (infravermelho realçado) do satélite GOES-16 obtidas através da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA/INPE);
- b) Cartas sinóticas de superfície do Grupo de Previsão do Tempo (GPT-CPTEC/INPE);
- c) Arquivos de análise de saídas do modelo global GFS, de resolução $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, com a confecção de campos de: a) Pressão ao nível médio do mar e Espessura entre 1000 e 850 hPa, b) Altura Geopotencial em 500 hPa, Pressão ao nível médio do mar e Jato em 200hPa, c) Vorticidade relativa negativa e Barbela de vento em 1000hPa, d) Divergência de velocidade e Linhas de corrente em 200hPa, e) Umidade específica e Linhas de corrente em 850 hPa e f) Água precipitável em toda a camada. Os dados foram obtidos através do banco de dados do NCAR/UCAR (<<https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/>>), no recorte de $75^{\circ}W$ a $20^{\circ}W$ e $5^{\circ}S$ a $45^{\circ}S$.

As análises foram realizadas a fim de se caracterizar o pré-evento e também de analisar as condições de tempo próximo aos horários dos picos de chuva, no horário local, já mencionados:

- 00Z e 12Z dia 7 – D-2 e D-1, respectivamente
- 00Z dia 9 (21HL dia 8) – P1
- 06Z dia 9 (3 HL dia 9) – P2
- 12Z dia 9 (9 HL dia 9) – P3

Além da análise sinótica, uma breve análise em mesoescala foi realizada com foco no Rio de Janeiro, no recorte de $50^{\circ}W$ a $35^{\circ}W$ e $15^{\circ}S$ a $30^{\circ}S$. Produziu-se, a partir dos arquivos do GFS 0.25° , os campos de a) Linhas de corrente e umidade específica em 850 hPa e b) Divergência de umidade em 1000 hPa. Imagens do infravermelho realçado do satélite GOES-16 também foram utilizadas na análise.

A partir do banco de dados de temperatura da superfície do mar (TSM) derivado do satélite do monitoramento de recife de corais da NOAA (<https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index.php#data_access>), um mapa de hot-spots de anomalia de TSM, na resolução de 5 km, para o dia 8 de abril de 2019, foi obtida para complementar a análise.

3.3 Produtos do satélite GOES-16

A missão GOES-R, que ficou conhecida como a nova geração dos satélites da série Satélite Ambiental Operacional Geoestacionário (GOES, *Geostationary Operational Environmental Satellite*), é essencial para a observação contínua das Américas. Com o lançamento dos satélites GOES-16 (GOES-leste) em 2016 e do GOES-17 (GOES-oeste) em 2018, começou-se uma nova era de monitoramento ambiental, trazendo avanços e melhorias em resolução espectral, espacial e temporal, e a possibilidade de se mapear raios em tempo real sendo o primeiro satélite geoestacionário a obter tal recurso, que pode gerar importantes melhorias no monitoramento e previsão do tempo.

Com 16 canais para visualização das nuvens, da atmosfera e da superfície da Terra, o Imageador Avançado de Base (*Advanced Baseline Imager*, ABI) é o instrumento a bordo desses satélites. Quando comparado à série de satélites anteriores (GOES 8-12), o ABI apresenta uma resolução espacial 4 vezes maior, um imageamento cerca de 5 vezes mais rápido, e 3,2 vezes mais canais, aumentando assim sua cobertura espectral (UCAR-COMET *Program*, 2016). No modo de cobertura total dos dois hemisférios (*Full Disk*) o tempo de visualização varia de 5-15 minutos, na cobertura CONUS é a cada 5 minutos e na cobertura Mesoescala, a cada 30s. A cobertura CONUS (que abrange todo o território dos Estados Unidos) e a Mesoescala só estão disponíveis para o hemisfério norte. Uma série de produtos é derivada desse instrumento, onde na Tabela 2 são apresentados os produtos utilizados neste trabalho e as suas características.

Tabela 2: Detalhamento dos produtos do satélite GOES-16 utilizados.

SIGLA	NOME	DEFINIÇÃO	UNIDADE	RESOLUÇÃO
COD	Espessura ótica da nuvem	Calcula a extinção devido à água condensada ou nuvens de gelo no comprimento de onda de 0,64 um	Adimensional	4 km
CPS	Distribuição do tamanho da partícula de nuvem	Calcula a medida do raio efetivo das partículas em uma única camada de nuvem	microns	2 km
Phase	Fase no topo da nuvem	Identifica o topo da nuvem em 4 fases: 1) <i>Warm liquid water</i> – fase <u>líquida</u> : nuvem de água com uma temperatura superior a 273K; 2) <i>Supercooled liquid water</i> – fase <u>água super-resfriada</u> : nuvem de água com uma temperatura inferior a 273K; 3) <i>Mixed phase clouds</i> – fase <u>mista</u> : alta probabilidade de conter água líquida e gelo próximo ao topo da nuvem; 4) <i>Ice phase clouds</i> – fase de <u>gelo</u> : nuvens com topo todo de gelo.	-	2 km
Temp	Temperatura do topo da nuvem	Identifica a temperatura no topo da camada de nuvem	Kelvin	2 km
CTP	Pressão no topo da nuvem	Identifica a pressão atmosférica no topo da camada de nuvem	Hectorpascal	10 km
ACHA	Altura do topo da nuvem	Identifica a altura geopotencial no topo de uma camada de nuvem	Metros	10 km
RR	Taxa de precipitação	Identifica a taxa de precipitação variando de 0-100 mm/h	Milímetros por hora	2 km

Os produtos COD e CPS são derivados de dois algoritmos diferentes, um para o período diurno e outro para o período noturno. Devido a variação do ângulo solar zenital necessária para a utilização de cada algoritmo, os produtos se encontram degradados na chamada região terminal, que compreende o ângulo zenital de 65° a 82° para o algoritmo diurno, e de 82° a 90° para o algoritmo noturno. Para a latitude de -22,9°, que é a latitude aproximada do município do Rio de Janeiro, e para o dia juliano 98 (8 de abril) e 99 (9 de abril), a degradação acontece aproximadamente entre 9:13

UTC e 11:04 UTC e entre 18:55 UTC e 20:47 UTC. Desta forma, durante essas faixas de horário, os produtos COD e CPS foram descartados.

Elegendo-se uma estação em superfície que representasse cada uma das três zonas da cidade do Rio de Janeiro (Zona Norte, Sul e Oeste), ao levar em consideração o acumulado de chuva em 24 horas e a localização da estação, extraiu-se os valores dos produtos da Tabela 2 nos pixels que se encontravam nas coordenadas geográficas dessas estações, na resolução de 10 minutos, iniciando-se as 20 UTC e terminando as 19 UTC. Com esses dados, confeccionou-se gráficos horários dessas variáveis para cada zona da cidade.

Com medições contínuas de descargas elétricas, o Mapeador Geoestacionário de Raios (*Geostationary Lightning Mapper*, GLM) é o instrumento que faz o mapeamento total das taxas de descargas elétricas intra-nuvem e nuvem-solo. O produto é disponibilizado a cada 20 segundos, com uma taxa de amostragem de 2 milissegundos. Três ramificações são feitas, onde um mesmo arquivo contém os chamados (RUDLOSKY, 2018):

- Evento: ocorrência de um único pixel excedendo o limite máximo de detecção durante aproximadamente 2ms; pode ser considerado como a extensão espacial do raio.
- Grupo: eventos simultâneos observados nos pixels adjacentes para o mesmo período de integração dos eventos; pode ser considerado como o caminho do raio.
- Flash: um ou mais grupos sequenciais separados por menos de 330 ms e 16,5 km; um flash é marcado na localização mais luminosa ou centro ponderado da radiância dos eventos e dos grupos.

Neste trabalho foram utilizados os “flash” para a contagem de raios.

Os dados foram obtidos através do banco de dados *Comprehensive Large Array-Data Stewardship System - CLASS* da NOAA, encontrado em <www.avl.class.noaa.gov>. Os produtos do ABI são chamados de GRABIPRD e são disponibilizados somente no formato *full disk* para a área de abrangência da América do Sul. Para o tratamento e visualização dos dados foram desenvolvidas uma série de

rotinas na linguagem Python, utilizando-se principalmente a biblioteca *GOES* (<https://pypi.org/project/GOES/>). O produto de raios é chamado de GRGLMPROD, sendo disponibilizado já no formato de coordenadas geográficas. Utilizou-se a linguagem Python e o software de sistema de informação geográfica, QGIS, no manuseio e visualização desses dados.

Para a metodologia de contagem de raios no município do Rio de Janeiro, considerou-se a ocorrência de flashes dentro dos limites do território e também a ocorrência em uma distância de aproximadamente 1 km de toda a fronteira. O mapa de densidade de raios é dado pela densidade em um raio de 1km.

3.4 Correlação de Pearson

Foram extraídos os valores das variáveis da Tabela 2 nas mesmas coordenadas das 33 estações do Sistema Alerta Rio, na resolução temporal de 10 minutos entre os dias 8 e 9 de abril. Para se calcular a correlação entre as variáveis, utilizou-se a correlação de Pearson (WILKS, 2005), cuja fórmula é a apresentada por:

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}}$$

onde a correlação r é dada pela razão entre a covariância entre duas variáveis x e y pelo desvio padrão de cada uma das variáveis. Na forma extensa, n é a quantidade total de dados, \bar{x} e \bar{y} são a média de cada variável. De acordo com Evans (1996), a interpretação do resultado pode ser explicada entre uma correlação variando de fraca a forte, tanto positivamente quanto negativamente (Tabela 3).

Tabela 3: Interpretação da correlação de Pearson (EVANS, 1996)

r (+ ou -)	Interpretação
0.00 a 0.19	Muito fraca
0.20 a 0.39	Fraca
0.40 a 0.59	Moderada

0.60 a 0.79	Forte
0.80 a 1.00	Muito forte

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados estão dispostos da seguinte forma: 4.1) Análise quantitativa, espacial e temporal da precipitação, 4.2) Análise sinótica e dinâmica, e 4.3) Estudo das propriedades das nuvens.

4.1 Análise quantitativa, espacial e temporal da precipitação

Este evento se destacou por apresentar altas taxas de precipitação acumulada em 24h, como pode ser observado na Figura 11, que mostra os valores registrados em cada estação do sistema Alerta Rio. Percebe-se que o evento foi caracterizado por altos valores de acumulados, com 29 das 33 estações registrando valores acima de 100 mm em 24h. As estações com maiores valores registrados foram as da Rocinha (343,4 mm), do Alto da Boa Vista (341,2 mm), da Barra/Barrinha (335,2 mm), do Jardim Botânico (334,4 mm), de Copacabana (329,4 mm), Vidigal (312,2 mm) e da Barra/Riocentro (311,4 mm). As estações com menores valores foram as da Penha (75,0 mm), de Irajá (80,2 mm), do Grande Méier (95,2 mm) e de São Cristóvão (98,4 mm). A maior parte das estações registrou valores entre 100 e 200 mm. A proporção é exposta na Tabela 4.

Tabela 4: Distribuição da proporção das estações quanto ao valor de chuva acumulada em 24 horas.

Quantidade de estações	Acumulado em 24h [mm]
7	>300
3	200 - 300
19	100 - 200
4	< 100

De acordo com os limiares de precipitação encontrados por Pristo *et al.* (2018), todas as estações ultrapassaram o percentil 99 para chuva acumulada em 24h, como pode ser observado na Figura 11 com todas as estações com valores acima do seu limiar.

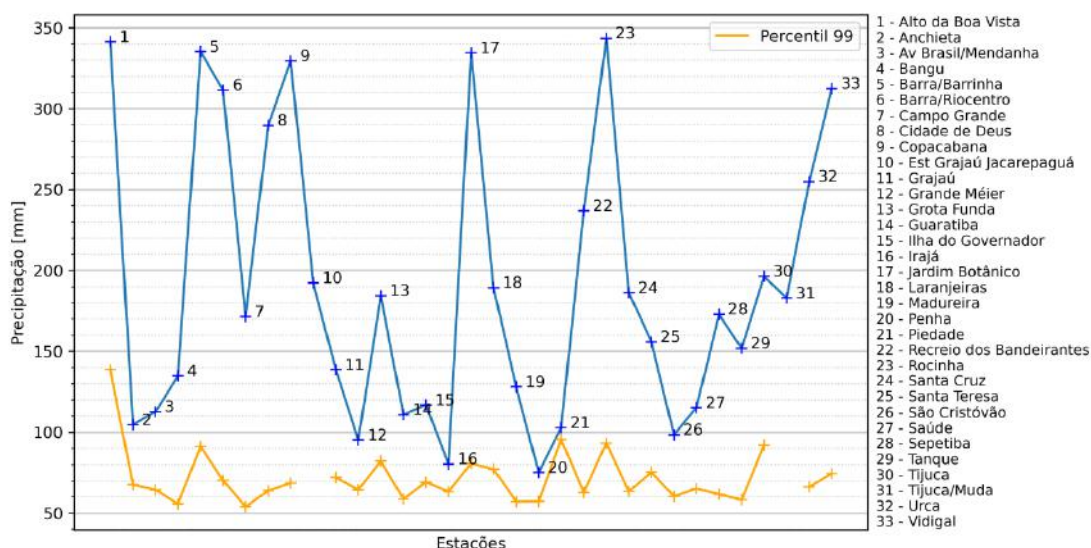


Figura 11: Precipitação acumulada em 24h registrada pelas estações do sistema Alerta Rio entre os dias 8 e 9 de abril. Em azul os valores dos acumulados e em laranja, o limiar de acumulado em 24h para o percentil 99 de cada estação.

A Figura 12 mostra a distribuição espacial dos valores apresentados na Figura 11. Percebe-se que 6 das 7 estações que registraram acumulado em 24h acima de 300 mm estão localizadas a sul do Maciço da Tijuca, e também sobre o mesmo, no caso da estação Alto da Boa Vista. Esta localização pode ser um indicativo de um escoamento de sul a barlavento que proporcionou um levantamento orográfico, fazendo com que ocorressem maiores valores de precipitação nas estações localizadas a sul do maciço. No lado norte do Maciço da Tijuca, nota-se uma diminuição gradual conforme as estações vão se afastando do maciço até que se encontram os menores valores registrados, onde as 4 estações abaixo de 100 mm se localizam na Zona Norte. Esta espacialização da chuva também pode ser um indicativo de um escoamento a sotavento, conhecido por ser a região de mínimos de precipitação, podendo indicar que, na data do evento, um escoamento de sul pode ter sido mais significativo. Tal configuração está coerente com a climatologia de precipitação de Pristo *et al.* (2018) para a estação do outono apresentada na Figura 9b. Na Zona Oeste, exceto a estação Barra/Barrinha que está localizada próxima ao Maciço da Tijuca e que foi a estação com maior valor de acumulado em 24h, as outras 3 estações com maiores valores estão localizadas entre os dois maciços, são elas Barra/Riocentro, Cidade de Deus e Recreio dos Bandeirantes. A estação Grota Funda, que é o ponto com pico de precipitação, próximo ao Maciço da Pedra Branca, tanto na climatologia anual, quanto para o outono (Figura 9b), não apresentou tal característica. Para as estações a oeste e a norte do maciço, todas ficaram

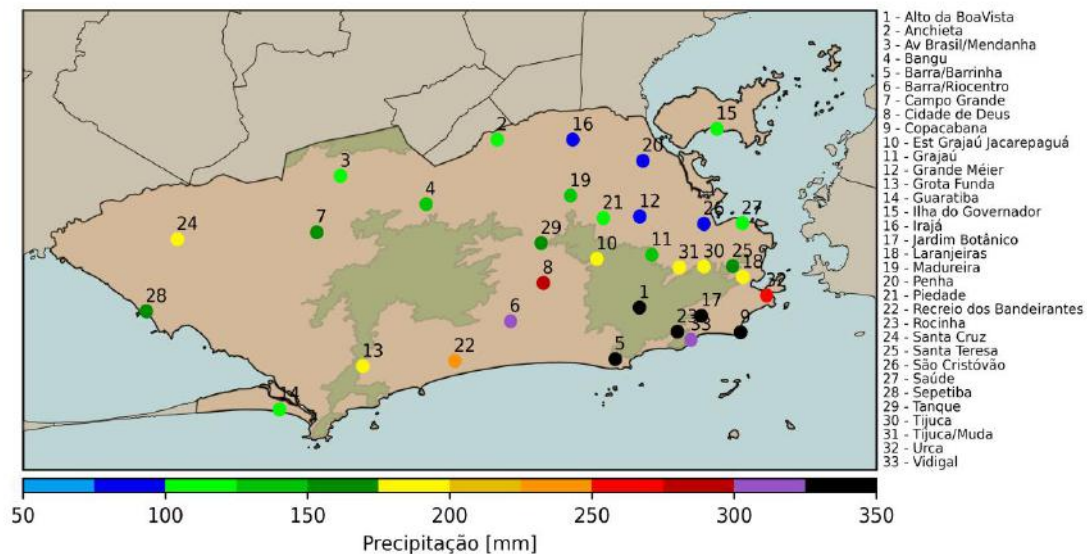


Figura 12: Mapa da distribuição espacial dos acumulados de 24h. Os círculos coloridos correspondem aos valores de precipitação em cada estação.

na faixa entre 100 e 200 mm. Em uma visão geral da Zona Oeste, existe um indicativo de um escoamento de quadrante sul que pode ter proporcionado uma precipitação à barlavento do Maciço da Pedra Branca, que é a região dos máximos de precipitação, enquanto que à sotavento, as regiões de mínimo nas estações Campo Grande, Av. Brasil/Mendanha e Bangu.

Analisando o perfil horário da chuva, pela Figura 13 é possível notar três momentos distintos, os quais, neste trabalho, se chamou de primeiro (P1), segundo (P2) e terceiro pico (P3). O primeiro pico é tratado de 18 UTC do dia 8 até 5:59 UTC do dia 9. O segundo de 6 UTC as 11:59 UTC do dia 9. O terceiro de 12 UTC as 21:59 UTC do dia 9.

É possível perceber que o primeiro pico foi o que obteve os maiores valores de acumulados em 1h e também o de maior extensão horária da chuva, enquanto que o segundo e terceiro apresentam comportamentos parecidos, com menores valores de precipitação e menor duração. O P1 teve aproximadamente 10 horas de ocorrência de chuva, considerando início as 20 UTC do dia 8 e fim as 5 UTC do dia 9, com intensidade máxima de 88 mm acumulados entre 21 e 22 UTC, valor registrado na estação Jardim Botânico. Entre 22 e 3 UTC, o que corresponde a 5 horas, pelo menos uma estação registrou acumulado acima de 40 mm, limiar este que não foi ultrapassado pelos demais picos. O P2 durou cerca de 6 horas, começando as 6 UTC do dia 9 e indo

até as 12 UTC do mesmo dia. As máximas intensidades ocorreram entre os horários de 8 e 9 UTC, alcançando 39,2 mm na estação Tanque, 38,4 mm na estação Est. Grajaú/Jacarepaguá e 37,2 mm na estação Cidade de Deus, todas elas localizadas na Zona Oeste. O P3 também teve duração de cerca de 6 horas, considerando início as 12 UTC do dia 9 e fim as 18 UTC. Apesar de condensá-lo em somente um pico, percebe-se uma subdivisão com um primeiro máximo de 33,6 mm entre 13 e 14 UTC na estação Barra/Barrinha e um segundo máximo de 20,4 mm entre 16 e 17 UTC no Alto da Boa Vista. Existe uma diminuição gradativa dos máximos de intensidade quando comparado os três picos, onde, em um primeiro momento, o padrão associado ao tempo de duração e intensidade da chuva sugere que o P1 foi acometido principalmente por precipitação convectiva, enquanto que o P2 e P3 por precipitação estratiforme. Este padrão, com chuva mais intensa durante as primeiras horas do evento e com menor intensidade nas horas posteriores, de certa forma se relaciona com o observado por Escobar *et al.* (2020) no padrão de eventos de chuva intensa no Rio de Janeiro, que evidenciaram que os primeiros dias de chuva, associada a instalação da ZCAS, foi o que proporcionou chuvas mais intensas no município.

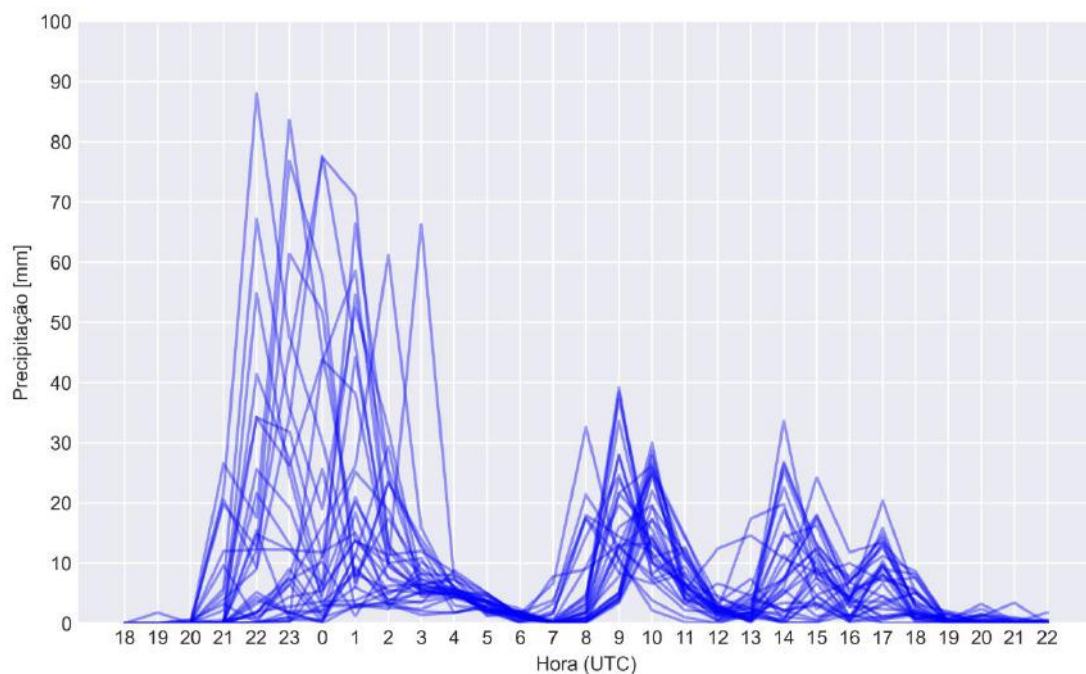


Figura 13: Acumulado de precipitação horária das 33 estações do sistema Alerta Rio começando no dia 8 de abril às 18 UTC e terminando no dia 9 de abril às 22 UTC. O valor registrado em cada horário compreende ao acumulado registrado na última hora.

Analisando qual a proporção de contribuição de cada pico para o acumulado em 24h por estação (Figura 14), pode-se perceber que, no geral, o primeiro pico teve maior contribuição nos valores de acumulado em 24h, onde 17 das 33 estações tiveram contribuição acima de 50% do P1 nos seus acumulados. As 7 estações que apresentaram acumulados acima de 300 mm obtiveram um peso acima de 60% no P1, que são Rocinha, Alto da Boa Vista, Barra/Barrinha, Jardim Botânico, Copacabana, Vidigal e Barra/Riocentro. Entretanto, destaca-se a estação Santa Cruz, cujo primeiro pico influenciou em 77,6% e apresentou o acumulado em 24h de 186,2 mm, a estação Campo Grande, com peso do P1 de 68% e acumulado em 24h de 171,4 mm, e a estação Sepetiba, com P1 influenciando em 64,4% do total de chuva acumulada em 24h, que foi de 172,8 mm. As três estações localizam-se a noroeste do Maciço da Pedra Branca e estão relativamente próximas umas das outras.

Em relação ao segundo pico, ele foi mais significativo nas estações Irajá (~60%), Anchieta (52%) e Penha (48%). As estações Piedade, Madureira e Grande Méier também registraram maiores influências do segundo pico em relação aos demais. Estas estações estão todas localizadas na Zona Norte, o que é um indicativo de que a maior parte da Zona Norte foi atingida por precipitação mais significativa durante a madrugada e início da manhã do dia 9 de abril.

O terceiro pico não se sobressaiu em nenhuma estação como o principal momento contribuidor para o acumulado em 24h. Entretanto, ficou em segundo lugar nas estações Guaratiba (~34%), Tanque (~31%) e Santa Teresa (~31%), ficando atrás do 2º pico nas duas primeiras estações e do 1º pico na terceira. Percebe-se também que as duas estações com menor influência do 3º Pico são estações localizadas próximas umas das outras, Sepetiba e Santa Cruz.

Ainda analisando-se a Figura 14, é possível perceber que todas as estações da Zona Sul (6 estações), as estações Alto da Boa Vista, Tijuca, Tijuca/Muda na Zona Norte (3 de 12 estações), a estação Santa Teresa no Centro (1 de 2 estações) e as estações Bangu, Barra/Barrinha, Recreio dos Bandeirantes, Barra/Riocentro, Cidade de Deus, Campo Grande, Santa Cruz e Sepetiba na Zona Oeste (8 de 13 estações) já no P1 ultrapassaram seu limiar de percentil 99 de chuva acumulada em 24h. As estações Anchieta, Grajaú, Grande Méier, Ilha do Governador, Irajá, Madureira, Penha e São Cristóvão na Zona Norte (8 de 12 estações), a estação Saúde no Centro (1 de 2

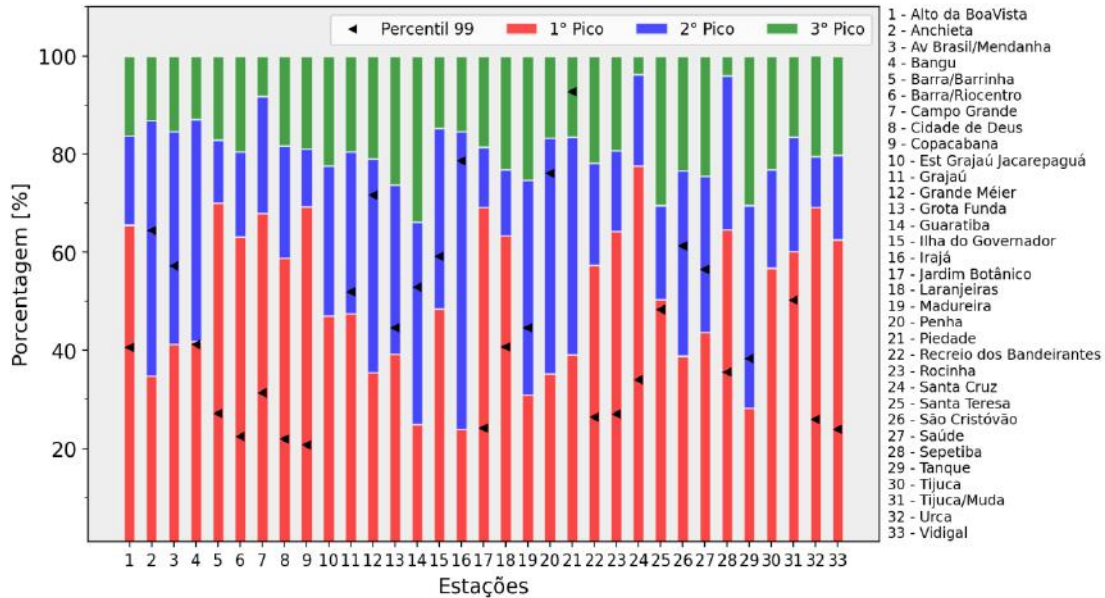


Figura 14: Porcentagem de contribuição de cada pico para o acumulado em 24h para cada estação, com os triângulos em preto indicando a posição do valor do percentil 99.

estações), e as estações Av. Brasil/Mendanha, Grota Funda, Guaratiba e Tanque na Zona Oeste (4 de 13 estações) ultrapassaram seus valores de percentil 99 durante o P2.

Somente a estação Piedade na Zona Norte (1 de 12 estações) que obteve seu percentil 99 ultrapassado durante o P3.

Sabendo-se a proporção de cada pico para os acumulados, com a Figura 15 pode-se analisar a intensidade da chuva em 15 minutos em cada pico, onde cada cruz colorida representa 1 registro de precipitação em 15 minutos acima do percentil 99. Com a linha de percentil 99 indicando que acima dela é considerado chuva muito intensa, nota-se que todas as estações tiveram pelo menos um registro de chuva em 15 minutos acima do seu percentil 99. Logo, o caráter da chuva pode ser considerado muito intenso durante o evento estudado. O volume de chuva que atingiu o P1 foi muito intenso em boa parte das estações e em vários momentos, correspondendo a 68,5% dos valores acima do percentil 99. O segundo pico teve 19,8% e o terceiro, 11,7%. As estações Penha, Piedade e São Cristóvão foram as que tiveram apenas um registro, que foi durante o P2, e as estações com maiores registros foram as que acumularam valores acima de 250 mm em 24h, como Alto da Boa Vista, Copacabana, Jardim Botânico e Rocinha.

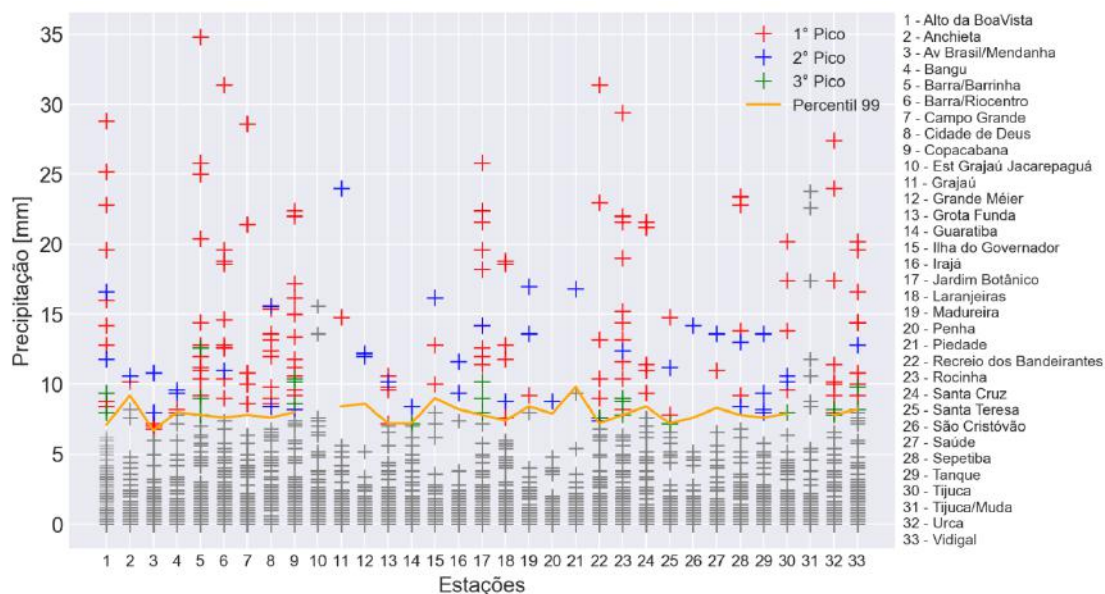


Figura 15: Precipitação em 15 minutos registrada pelas estações do sistema Alerta Rio entre os dias 8 e 9 de abril. A linha em laranja é o limiar de chuva em 15 minutos para o percentil 99 de cada estação e em colorido os valores acima desse percentil separados por pico. Cada cruz colorida representa 1 registro de chuva em 15 minutos com valor acima do percentil 99, para aquela estação.

Separando por zona da cidade, a proporção de registros de chuva em 15 minutos acima do percentil 99 é exposta na Tabela 5. O Alto da Boa Vista foi separado da região da Zona Norte por ser uma estação com características totalmente distintas das demais estações da região, o que estaria mascarando os resultados.

Tabela 5: Proporção do número de registros de chuva em 15 minutos acima do percentil 99 em cada pico, separado por zona.

Pico	Zona Oeste	Zona Sul	Zona Norte e Centro	Alto da Boa Vista
1	74%	74%	40%	69,2%
2	19,8%	6,8%	53,3%	15,4%
3	6,2%	19,2%	6,7%	15,4%

As zonas Oeste e Sul tiveram mais registros de chuva intensa durante o primeiro pico, condizente com o maior peso do P1 nos acumulados de chuva em 24h (Figura 14). Vale ressaltar que a Zona Oeste (ZO) apresenta 13 estações distribuídas num maior domínio espacial enquanto que a Zona Sul (ZS) apresenta 6 estações, concentradas mais próximas umas das outras. Os 74% da zona sul está relacionado a maiores registros em menos estações, porém relativamente próximas. Com exceção da estação Laranjeiras, a mais distante da costa, todas as outras estações apresentaram aproximadamente a

mesma quantidade de registros de chuva muito intensa. Enquanto que os 74% da Zona ZO tem relação a maior quantidade de estações, porém localizadas em uma espacialização maior. Pode-se considerar que a severidade do P1 na ZS foi mais significativa devido aos maiores acumulados de chuva terem sido registrados nessa região, ao passo que na ZO a severidade se relaciona a uma maior abrangência territorial de chuva muito intensa durante o P1. Como já havia sido discutido na proporção dos picos, quando analisa-se a Tabela 3 para a Zona Norte nota-se a maior porcentagem acima do percentil 99 correspondendo com o pico de maior influência, o P2. O Alto da Boa Vista apresentou, com grande peso, maiores registros acima do percentil 99 durante o P1.

As proporções de cada pico, tanto aquelas apresentadas na Figura 14 quanto na Tabela 5 não excluem o caráter de chuva muito intensa, somente servem para caracterização da chuva.

4.1.1 Análise do comportamento horário do vento em superfície

Dado o indicativo da espacialização da chuva sendo influenciada pela orografia, analisou-se o perfil do vento em superfície (Figura 16). Para a estação Forte de Copacabana, localizada na ZS e a sul do Maciço da Tijuca, nota-se vento de quadrante sul nas duas horas iniciais do evento que coincide com o máximo de precipitação acumulada em 1h registrado na estação Copacabana, no valor de 67,2 mm entre 21 e 22 UTC (Anexo 1). Assim como no horário de 01 UTC outra componente de sul foi registrada e o acumulado entre 00 e 01 UTC foi o segundo máximo registrado, no valor de 52,4 mm. Já a estação São Cristóvão, localizada a norte do Maciço da Tijuca, também apresenta vento de quadrante sul principalmente no P1. O mesmo ocorre quando analisadas as estações Jacarepaguá (sul do Maciço da Pedra Branca) e Vila Militar. Este padrão confirma o efeito da orografia na precipitação a barlavento/sotavento dos maciços. O escoamento de SO/O durante todo o P1 na estação Guaratiba, que se localiza a oeste do Maciço da Pedra Branca, pode ser o responsável pelos maiores acumulados registrados nas estações Sepetiba, Santa Cruz e Campo Grande durante o P1, como observado e discutido na Figura 14, cuja proximidade com o maciço pode ter proporcionado um levantamento orográfico e favorecido a precipitação na região.

De forma geral, percebe-se que durante o P2 o escoamento teve componente predominantemente de quadrante norte em todas as estações, o que pode ser um indicativo de um padrão de circulação que favoreceu a precipitação na Zona Norte, região esta que foi mais influenciada pelo P2 no acumulado em 24h.

No P3, pico de menor influência nos acumulados em 24h, percebe-se que nas estações costeiras, Guaratiba e Forte de Copacabana, o escoamento foi de oeste enquanto que nas estações mais continentais, São Cristóvão e Vila Militar, o escoamento ainda permaneceu de quadrante norte. Com esta análise evidencia-se dois escoamentos principais, um vindo do oceano e outro vindo do continente.

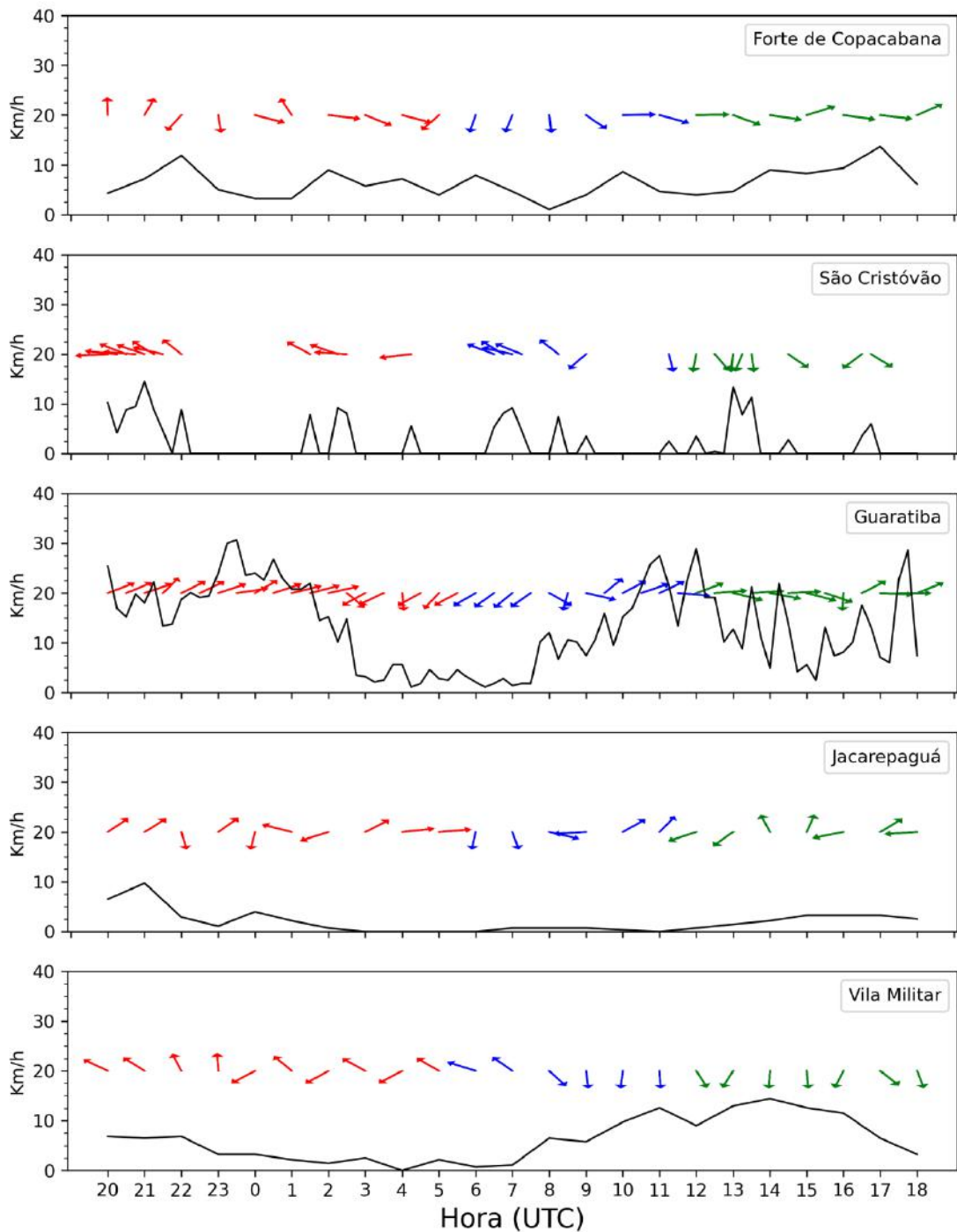


Figura 16: Meteograma de direção e intensidade (km/h) do vento em superfície nos horários que abrangem o evento. Em vermelho é o período do P1, azul do P2 e verde do P3.

4.1.2 Ocorrência de relâmpagos

Pela severidade da chuva durante o evento, buscou-se analisar a ocorrência de relâmpagos pois, além da sua relação com a distribuição da chuva, a ocorrência de

relâmpagos é mais uma ferramenta para se caracterizar a chuva no quesito convectivo, devido a sua formação estar associada a nuvens Cb.

Com a contabilização da quantidade de flashes do produto GLM do GOES-16, foram registrados 658 flashes no município, onde todos eles ocorreram durante o P1 (Figura 17). Essa ocorrência de raios somente durante o P1 corrobora com o indicativo de predomínio de chuva convectiva, enquanto que nos outros picos, a de caráter estratiforme.

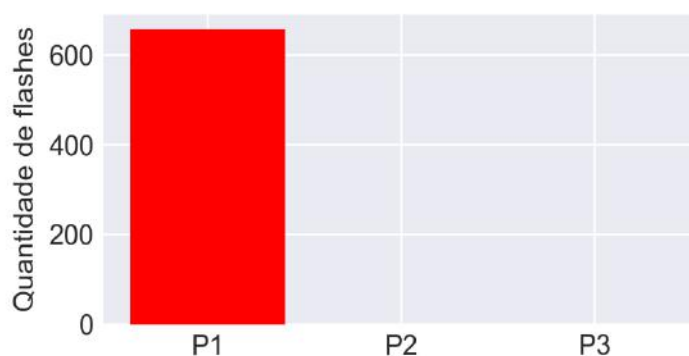


Figura 17: Quantificação do número de raios que atingiu o município do Rio de Janeiro durante o evento, distribuídos em cada pico.

A distribuição espacial dos raios se encontra na Figura 18a, onde observa-se uma maior densidade localizada na Zona Sul, principalmente no oceano próximo da costa, nas regiões próximas das estações Rocinha e Vidigal e na estação Jardim Botânico. Na costa sul da Zona Oeste existe outra região com maior densidade de relâmpagos. No restante do município, existe uma maior homogeneidade da densidade, principalmente na parte oeste/noroeste do Maciço da Pedra Branca. Por outro lado, nota-se que a Zona Norte foi a região menos afetada pelos relâmpagos. Quando comparado com o mapa de acumulado de chuva durante o P1 (Figura 18b), todas as regiões de máximos de densidade coincidem com regiões próximas de estações com os maiores valores de precipitação, ao passo que as regiões com menor intensidade, principalmente na Zona Norte, apresentam estações registrando os menores valores de precipitação acumulada no P1.

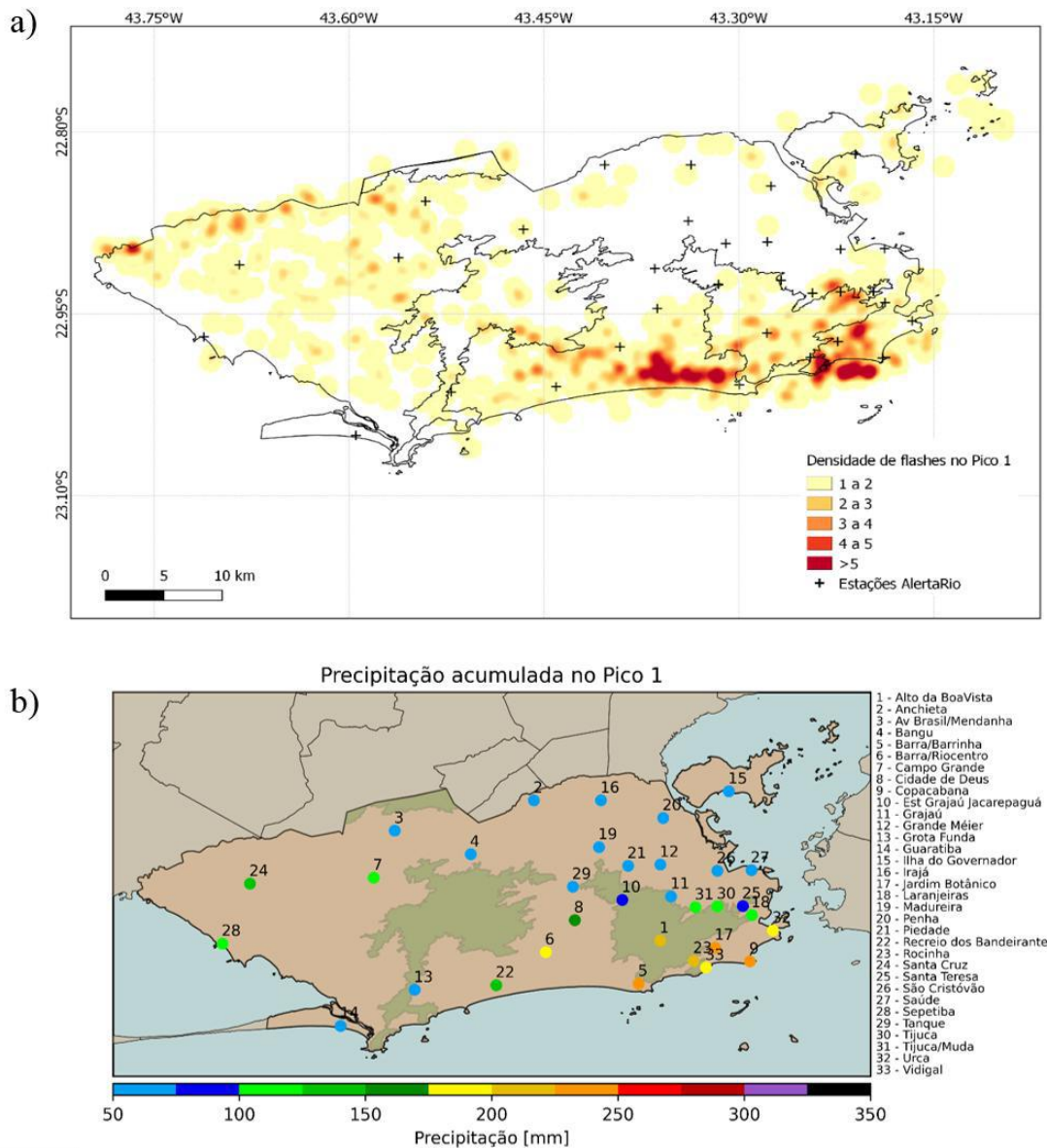


Figura 18: a) Mapa de densidade de flashes em um raio de 1km durante o Pico 1; b) Mapa do acumulado de chuva no Pico 1.

Da análise do perfil da precipitação, alguns pontos a serem investigados são:

- Quais configurações atmosféricas proporcionaram tal evento?
- Quais as características das nuvens em cada pico?
- Qual a correlação das variáveis microfísicas com o caráter da precipitação observada?

Tais indagações serão avaliadas nas seções a seguir.

4.2 Análise sinótica e dinâmica

As análises a seguir foram feitas para dois dias antes do evento (D-2 e D-1), com o intuito de acompanhar a configuração e evolução da situação atmosférica precedente ao evento, e para as horas próximas dos três picos de chuva.

4.2.1 Análise de D-2 e D-1: dia 7 às 00Z e 12Z

Nas imagens de satélite na banda do vapor realçado do dia 7 às 00Z (Figura 19a) e às 12Z (Figura 19b), percebe-se a presença de duas massas de ar sobre o continente marcadas pelas regiões realçadas em amarelo, uma de maior extensão localizada no centro da América do Sul e outra, mais estreita, localizada no nordeste brasileiro. Ao se comparar com as imagens de infravermelho realçado, nota-se que estas regiões estão marcadas por céu limpo ou com poucas nuvens. Ainda nas imagens do infravermelho, existe uma extensa faixa de nuvens convectivas com orientação NO-SE sobre o Brasil, que perde intensidade no horário das 12Z (Figura 19d), havendo uma descontinuidade sobre o Mato Grosso e sudeste do Amazonas. E próximo ao Rio Grande do Sul, existe uma região de nebulosidade mais pronunciada, se estendendo da costa até o oceano que avança para norte ganhando intensidade às 12Z.

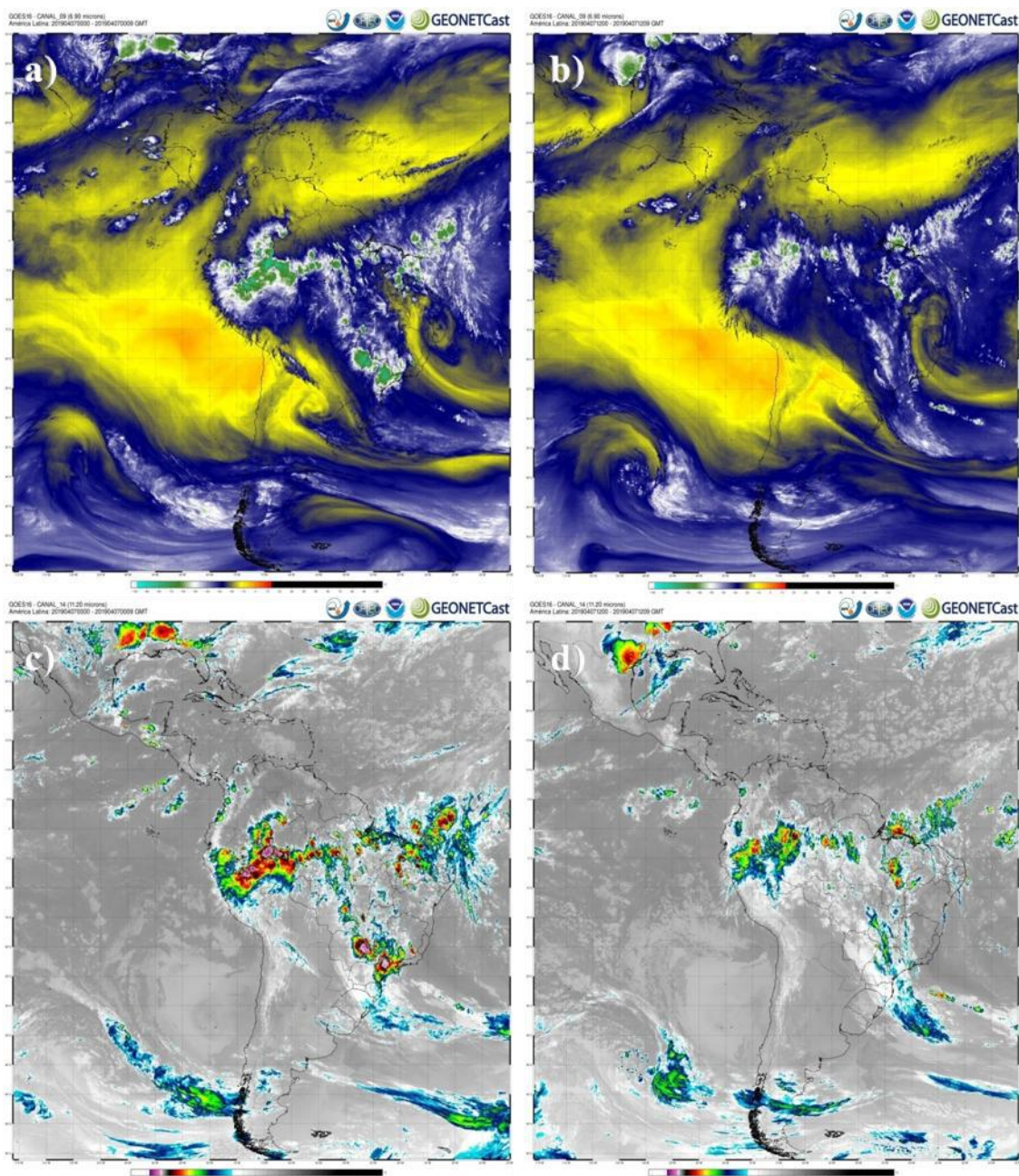


Figura 19: Imagens do dia 7 do satélite GOES-16 no canal 9 a) 00Z e b) 12Z, e canal 14 c) 00Z e d) 12Z. (Fonte: DSA – INPE).

A carta sinótica às 00Z (Figura 20a) mostra um sistema frontal com a frente fria em domínio no oceano, entre aproximadamente a latitude do Rio Grande do Sul até São Paulo, e uma frente estacionária sobre o continente, ambos associados a um ciclone localizado a sudeste da América do Sul, aproximadamente entre 30-35°O e 30-35°S. Na retaguarda localiza-se um sistema de alta pressão, e na dianteira, localiza-se a Alta Subtropical do Atlântico Sul. As 12Z (Figura 20b), a área de influência da frente estacionária agora abrange parte do oceano na costa entre Santa Catarina e São Paulo,

onde uma isóbara fechada de 1016 hPa abrange esta região até o continente no estado de São Paulo.

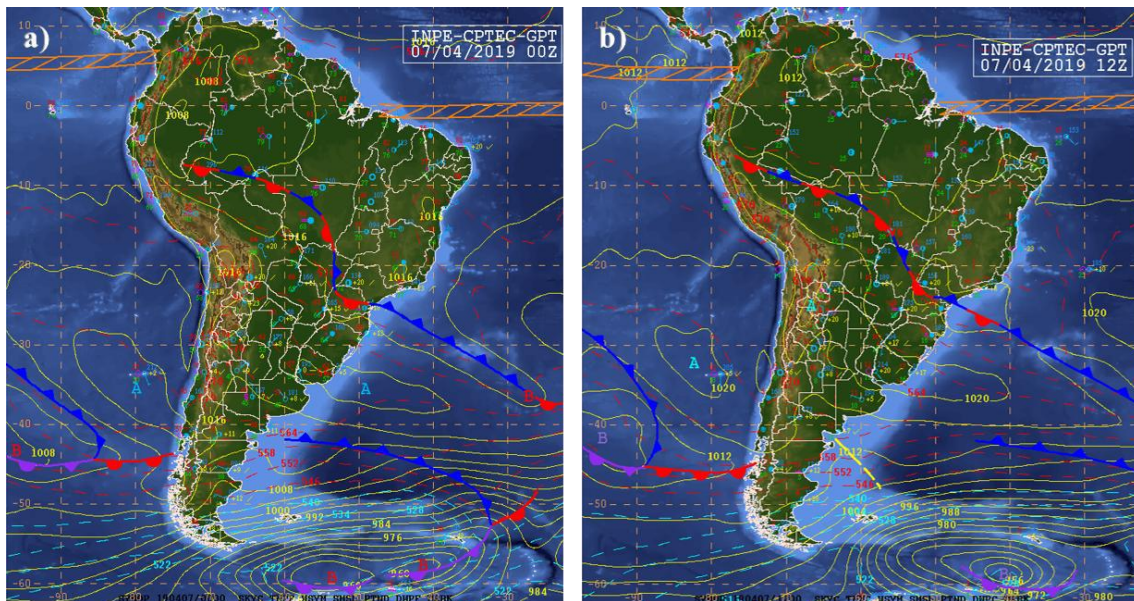


Figura 20: Carta sinótica de superfície do dia 07 de abril de 2019 - a) 00Z e b) 12Z (Fonte: CPTEC).

Nos campos só estão expostos os resultados das 12Z (Figura 21) visto que não houve grandes diferenças entre o horário das 00Z e das 12Z.

Analisando a PNMM pode-se notar um centro de baixa pressão no oceano na mesma região do ciclone associado a FF, cujo centro é de 1014 hPa. Também posiciona-se sobre os estados de São Paulo e Paraná, além de parte do oceano, uma isóbara fechada de 1016hPa com um centro de 1014 hPa. Pela espessura percebe-se o avanço do ar mais frio adentrando o sul, centro-oeste e norte do Brasil, mesma região onde a carta (Figura 20b) marca uma frente fria estacionária. O jato subtropical está localizado sobre o norte da Argentina e sobre parte do sul do Brasil, coincidindo com a região de maior gradiente de espessura entre 1000 e 500 hPa, como visto na Figura 21b. Existe um cavado em 500hPa localizado sobre o norte da Argentina e parte do Paraguai, cuja região de máxima advecção de vorticidade relativa negativa localiza-se sobre parte da região sul do Brasil, coincidindo com a região de nuvens convectivas observada por imagens de satélite. No campo de vorticidade relativa, nota-se uma faixa de vorticidade negativa em baixos níveis sobre o oceano Atlântico a sudeste da América do Sul coincidindo com a localização da FF marcada na carta (Figura 20b) e se localizando

logo a frente da corrente de jato. Nesta mesma região, percebe-se que há divergência em altos níveis (Figura 21d), sendo um pouco mais intensa próximo à costa de São Paulo e menos intensa indo em direção ao centro de baixa, que coincide com as regiões de intensa nebulosidade da imagem de satélite (Figura 19d). No escoamento em altos níveis, existe uma circulação anticiclônica no norte da Bolívia e um vórtice ciclônico sobre o nordeste, principalmente na Bahia. Esse vórtice no nordeste é seguido por uma alta pressão em 500hPa e quando observado nas imagens de satélite, coincide com a região de massa seca e pouca nebulosidade no seu centro. O campo de umidade específica mostra que o Brasil inteiro (exceto pelo sul do Rio Grande do Sul) apresenta altos níveis de umidade em baixos níveis, e no mesmo campo percebe-se que o escoamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) adentra o continente se ramificando no centro do Brasil, tomando direção para noroeste e para sudeste e sul, regiões essas demarcadas pela nebulosidade vistas nas imagens de satélite (Figura 19d). A umidade se pronuncia também sobre o oceano, na localização da FF demarcada pela carta, da região de vorticidade negativa relativa e da região de convergência dos ventos em 1000 hPa. Também é possível notar que existe um escoamento mais seco vindo de sul adentrando pelo centro do continente que coincide com a região da massa de ar seca destacada na imagem de vapor realçado (Figura 19b).

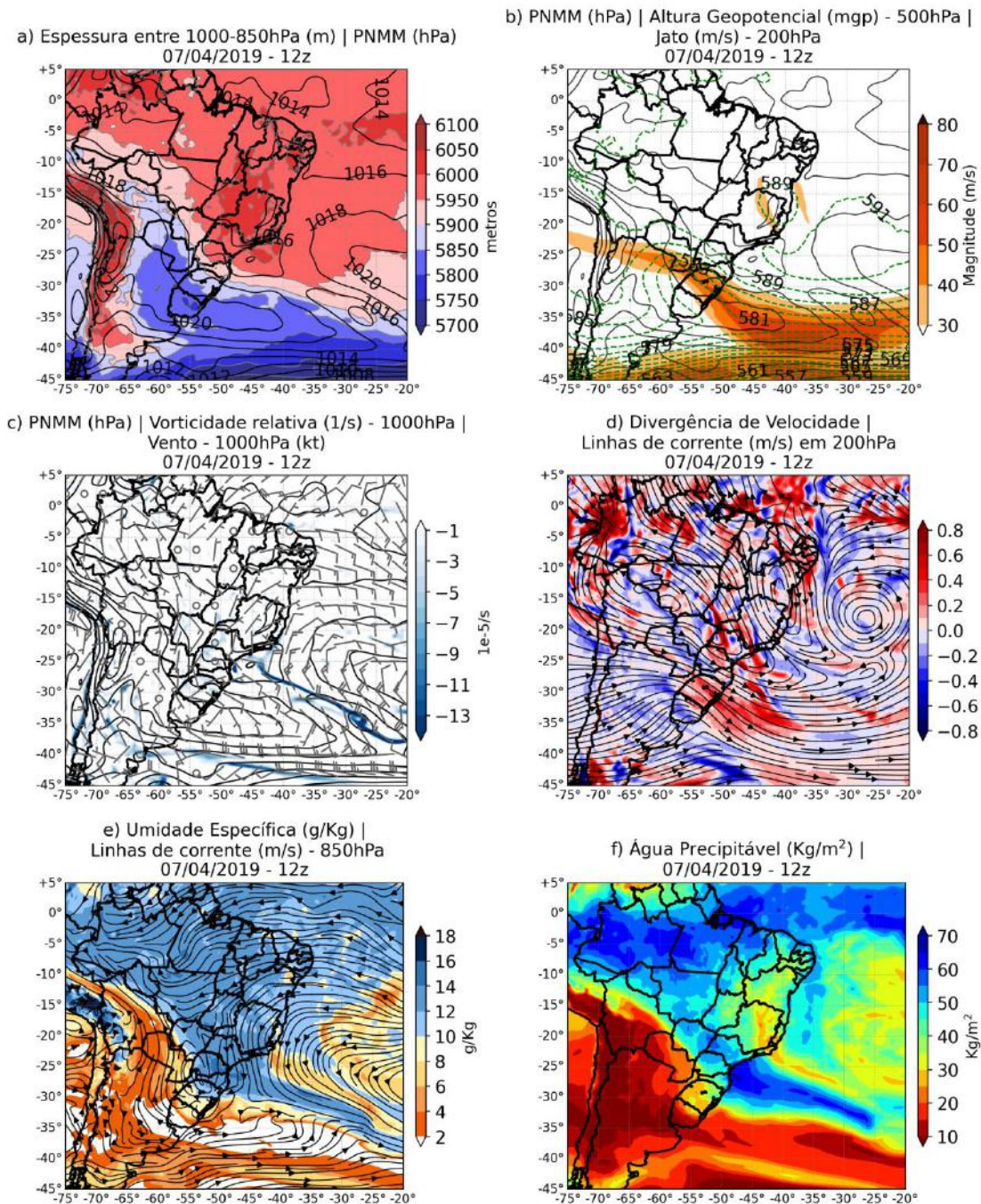


Figura 21: Campos da rodada de análise do GFS de 0.25° para o dia 07 as 12Z; a) Espessura entre 1000 e 850hPa (m; preenchido) e pressão ao nível médio do mar (hPa; linha cheia), b) Pressão ao nível médio do mar (hPa), altura geopotencial em 500hPa (mgp; pontilhada) e jato em 200 hPa (m/s; preenchido), c) Pressão ao nível médio do mar (hPa; linha cheia), d) Vorticidade em 1000hPa (s^{-1} ; preenchido) e Vento (nós; barbela), e) Umidade específica (g/kg; preenchido) e linhas de corrente em 850hPa (linha cheia), f) Água precipitável em toda a camada (kg/m^2).

4.2.2 Análise do dia 8 – 1º Pico

Com o intuito de analisar o mais próximo dos horários de precipitação, as análises das imagens de satélite e das cartas foram feitas para os horários de 18Z (15 horas local) e 00Z do dia 9 (21 horas local). As imagens de vapor (Figuras 22a e 22b) mostram o posicionamento do centro de alta pressão da retaguarda com uma maior extensão que o dia anterior, se estendendo desde o centro da Argentina, Uruguai e sul do Brasil até o Acre, passando por toda a fronteira oeste do Brasil, representada pela região mais seca, realçada em amarelo. Nas imagens de infravermelho realçado (Figuras 22c e 22d) notam-se regiões de nebulosidade convectiva em orientação NO-SE que se estende desde o Amazonas até o oceano, posicionando-se sobre o estado do Rio de Janeiro nos dois horários. Pela configuração observada e também pela permanência do padrão de nebulosidade nas imagens dos próximos dias (análises e Anexo 2), existe a instauração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

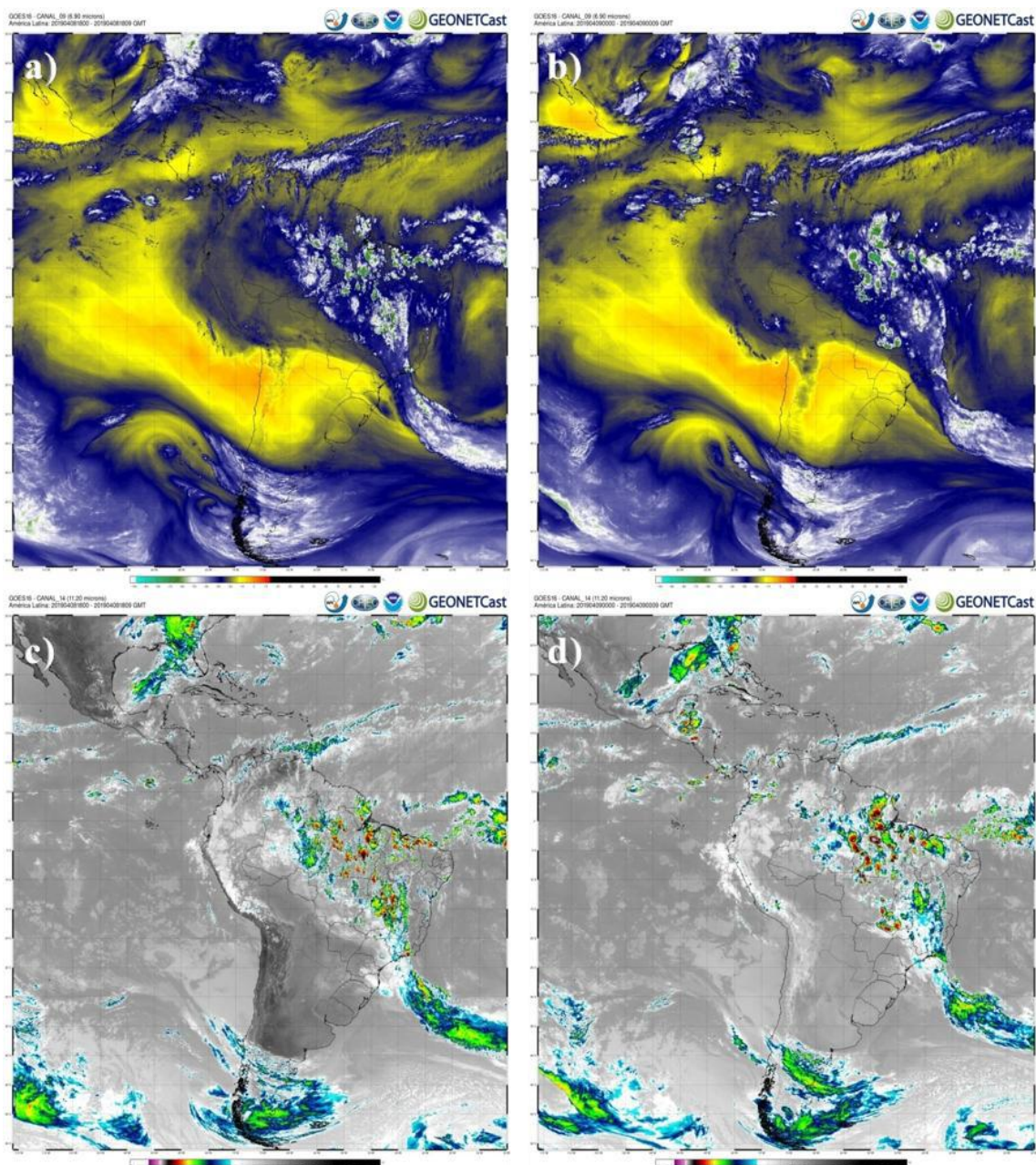


Figura 22: Imagens do satélite GOES-16 no canal-9 no dia 8 as a) 18Z e dia 9 as b) 00Z, e canal-14 no dia 8 as c) 18Z e dia 9 as d) 00Z. (Fonte: DSA – INPE).

As cartas sinóticas do CPTEC dos horários anteriores (por exemplo, dia 8 as 12Z) ainda marcam a FF estacionária aproximadamente na mesma região da carta do dia 7 as 12Z (Figura 20b). A partir do dia 8 às 18Z o termo ZCOU (zona de convergência de umidade) é introduzido, ao invés da FF estacionária, e, ligado a ele, um ciclone no oceano, próximo da região de isóbara fechada de 1016 hPa do dia anterior. Este termo atualmente se encontra em desuso pelo CPTEC, onde já foi analisada, pelas imagens de satélite, a configuração de uma ZCAS. Quase fora do domínio da carta,

entre -30 e -20° de longitude, encontra-se o final do ramo da FF que estava localizada nesta região. Nota-se que esta configuração pouco se altera entre as duas cartas, do horário das 15h para as 21h (Figuras 23a e 23b).

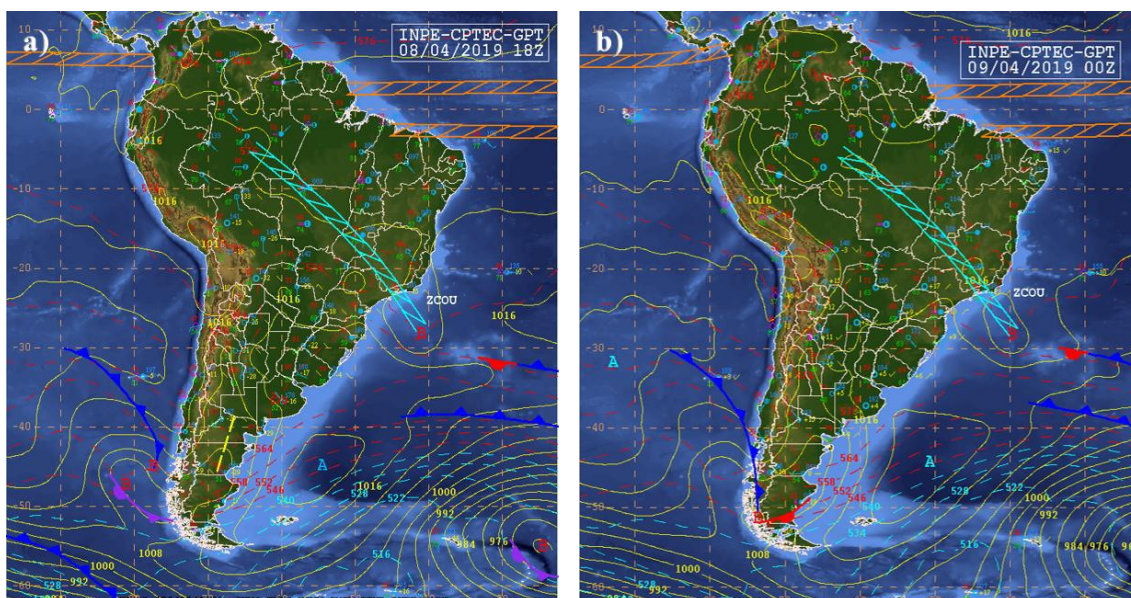


Figura 23: Carta sinótica de superfície do dia 08 de abril de 2019 as a) 18Z, e dia 09 de abril as b) 00Z (Fonte: CPTEC).

Os resultados dos campos nos dois horários apresentam bastante similaridade, portanto somente o das 21HL do dia 8 (dia 9 as 00Z; Figura 24) foi analisado, que está dentro do período de duração do P1.

No campo de espessura nota-se uma configuração do gradiente de espessura similar ao observado nas imagens de satélite, coincidindo com a região de maior realce da massa de ar seco na imagem de vapor (Figura 22b). Por seu maior domínio estar sob um só campo de espessura, o ciclone próximo a costa apresenta característica de um ciclone subtropical, pela presença de uma camada mais quente em baixos níveis (Figura 22a). Entretanto, essa caracterização não foi confirmada pela análise do diagrama de fase, como visto no tópico 4.2.4 apresentado mais adiante. Ainda sobre o ciclone, pode-se notar que ele está localizado a leste do cavado em 500 hPa e na entrada equatorial do jato (Figura 24b), recebendo suporte dinâmico dos níveis médios e altos. Em relação a análise anterior, este cavado se deslocou cerca de 15° para leste. Na vorticidade em baixos níveis (Figura 24c), percebe-se que há vorticidade relativa negativa próximo a costa do Rio de Janeiro, região de localização da baixa pressão, e vento de intensidade

de cerca de 20 nós circuncando o ciclone. Nesta mesma Figura 24c é possível perceber claramente um escoamento de Sul proveniente do oceano, se dirigindo diretamente para a costa do estado do Rio de Janeiro (caixa vermelha), o que sugere uma configuração em acordo com as estações pluviométricas mais litorâneas terem registrado maiores volumes de chuvas do que as mais continentais. Em altos níveis, o estado e a costa do Rio de Janeiro estão sob uma região de divergência, significando movimento ascendente, e o escoamento mostra a mesma circulação anticiclônica da análise anterior, porém mais deslocado para leste, com centro sobre o Mato Grosso (Figura 24d). Todo o Brasil, exceto o Rio Grande do Sul, apresenta altos valores de umidade específica (Figura 24e), com o escoamento em 850 hPa mais seco ainda de quadrante sul subindo a divisa oeste do país. Uma configuração marcante que se apresenta no campo de escoamento em 850hPa é uma confluência significativa sobre o estado do Rio de Janeiro (Caixa Vermelha), dos escoamentos provenientes de sul (através da borda oeste do ciclone) e de Noroeste (oriundo da porção sudoeste do estado de Minas Gerais). A localização do ciclone está em uma região com alta disponibilidade de umidade, onde, além do suporte dinâmico já mencionado, recebe também suporte termodinâmico. Analisando o conteúdo de água precipitável, nota-se uma região com máximos valores próximo e sobre o estado do Rio de Janeiro, com uma quebra do padrão até Goiás, onde volta a se pronunciar do Mato Grosso ao Amazonas, padrão similar observado na bifurcação do escoamento em 850 hPa.

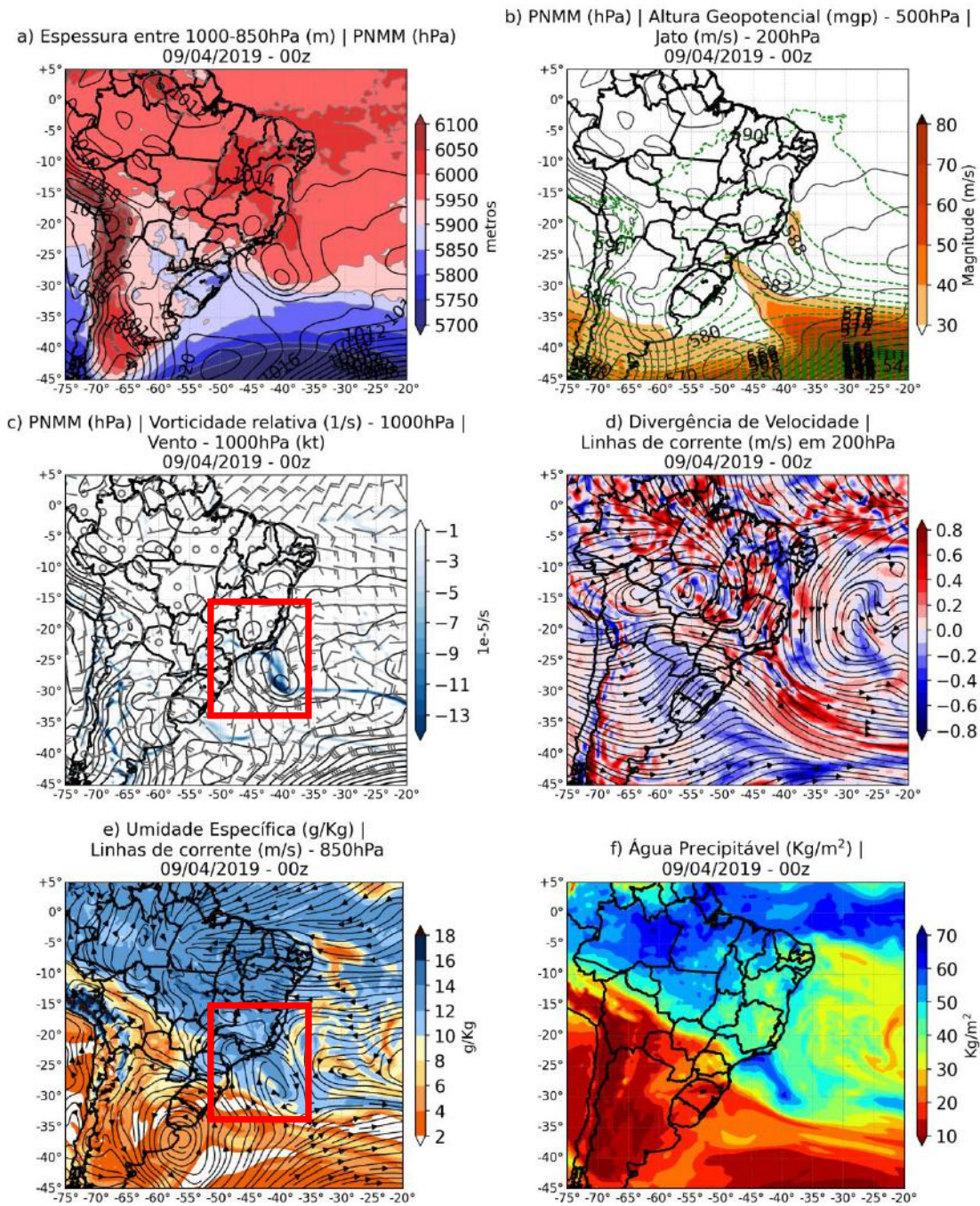


Figura 24: O mesmo que a Figura 21 para o dia 9 as 00Z, durante o P1.

Analisando-se alguns campos do GFS em um recorte mais próximo e setorizado na região de interesse do estudo, ou seja, em um domínio menor, permite observar e perceber alguns detalhamentos nas características dos campos, inclusive algumas configurações em mesoescala associadas ao caso.

Entende-se que o início do evento de precipitação que ocorreu durante o P1 foi devido a advecção de umidade de um escoamento NO-SE, proveniente do continente a partir do centro do Brasil, e de um escoamento de sul associado à borda oeste do ciclone próximo a costa (Figura 25a). Aliado a este escoamento de umidade em 850 hPa, uma convergência de umidade em 1000 hPa é observada sobre a cidade do Rio de Janeiro (Figura 25b). Na imagem de infravermelho realçado (Figura 25c) fica evidente que houve a presença de núcleos convectivos localizados sobre a cidade, demarcado pela coloração vermelho escuro, que indica temperaturas de aproximadamente -70°C . A configuração sinótica atuante durante o P1 foi proporcionada pela estacionaridade de uma superfície frontal, dando origem a um corredor de umidade que se estendeu desde a região centro-oeste até o sudeste. Além disso, o posicionamento do ciclone próximo ao município, que recebeu suporte dinâmico e termodinâmico, favoreceu a intensificação da instabilidade do ar, proporcionando a formação de chuva no caráter que foi observado.

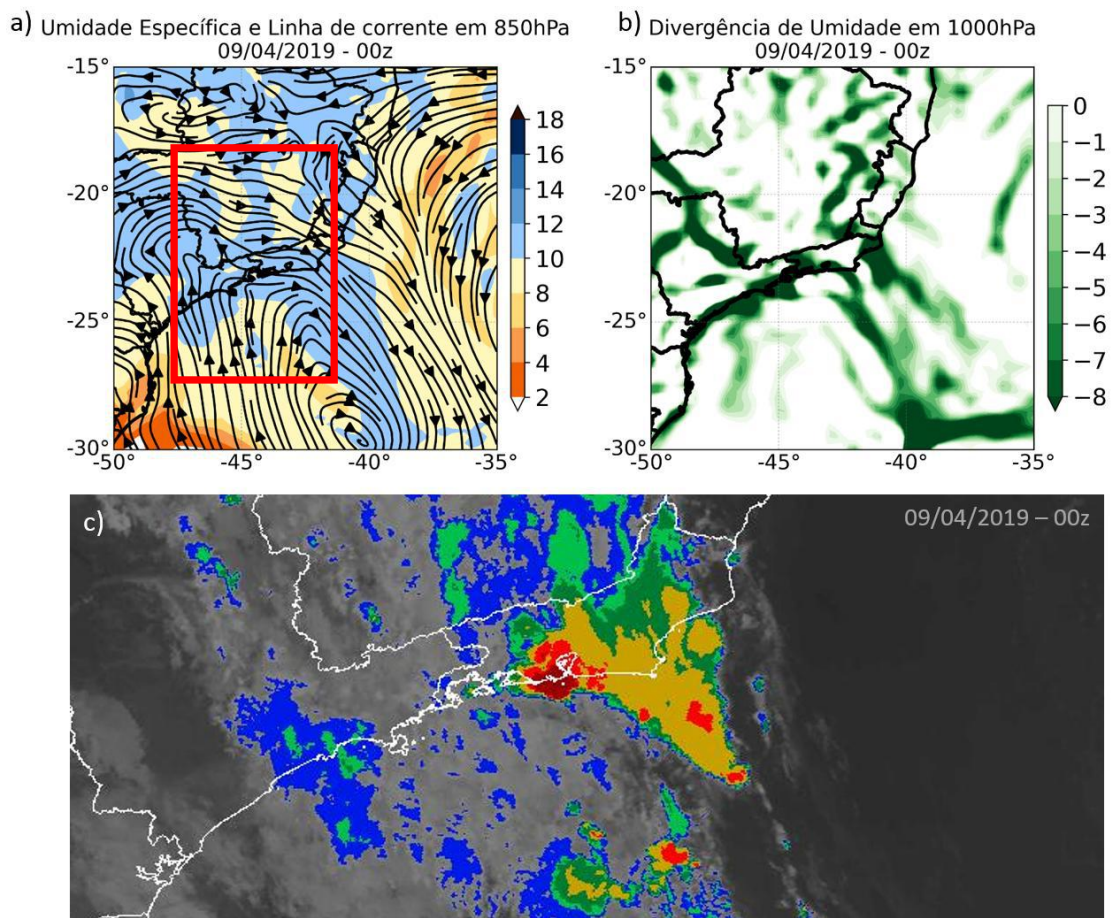


Figura 25: Campos do GFS 0.25° e imagem do satélite GOES-16 no recorte focando o Rio de Janeiro para o dia 9 as 00Z – P1: a) Umidade específica e Linha de corrente em 850 hPa, b) Divergência de umidade em 1000 hPa e c) Banda do infravermelho realçado (Fonte: INMET).

4.2.3 Análise do dia 9 – 2° e 3° Pico

As imagens de satélite e cartas sinóticas apresentadas a seguir, são dos horários próximos ao início do segundo pico, às 06Z ou 3HL (Figura 26a e 26c) e terceiro pico às 12Z ou 9HL (Figuras 26b e 26d). Estes dois picos possuem características semelhantes em questão de intensidade e duração, como visto na análise da precipitação (Figura 13). Nas imagens de vapor pode-se notar que ainda persiste uma região de umidade sobre quase todo o Brasil, exceto na região sul, Mato Grosso do Sul, parte do estado de São Paulo e na divisa oeste do país estendendo-se até o Acre, que estão sob domínio de uma área de alta pressão, visto em ambas as imagens. O sistema como um todo avança ligeiramente para norte perdendo parte de sua intensidade convectiva, como visto na faixa de nebulosidade em sentido NO-SE quando comparada com o dia anterior (Figuras 22c e 22d). Um núcleo mais intenso de nuvens convectivas ainda é observado sobre o oceano, entre aproximadamente 30 e 40°S e 40 e 25°O, que se conecta ao restante do sistema da direção NO.

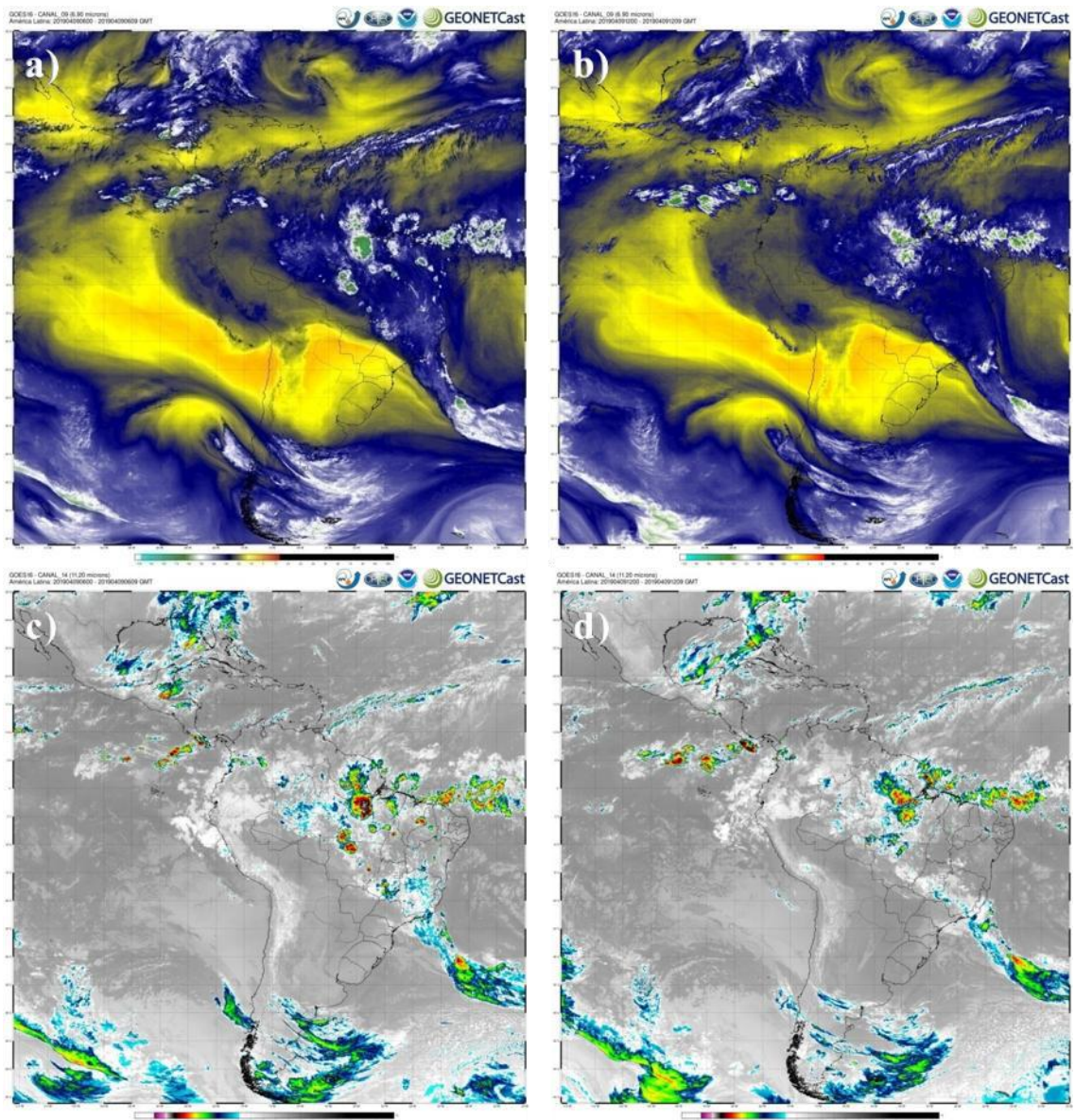


Figura 26: Imagens do dia 9 do satélite GOES-16 no canal-9 a) 06Z e b) 12Z, e canal-14 c) 00Z e d) 12Z. (Fonte: DSA – INPE).

Na carta sinótica do CPTEC para as 06Z (Figura 27a) ainda é marcada uma zona de convergência de umidade onde, neste trabalho, foi classificado como ZCAS, que passa sobre o Rio de Janeiro, localizada na mesma região de nebulosidade e umidade das imagens de satélite. O sistema de baixa pressão aumenta seu domínio territorial, quando comparado com o horário anterior (Figura 23a), mas ainda permanece próximo a costa do Rio de Janeiro, que coincide com a região de nebulosidade na imagem de satélite. No horário de 12Z (Figura 27b), referente ao P3, esse sistema de baixa pressão diminui de extensão, e é marcada uma frente fria associada a ele que, por sua vez, se localiza próximo ao sul do estado do Rio de Janeiro.

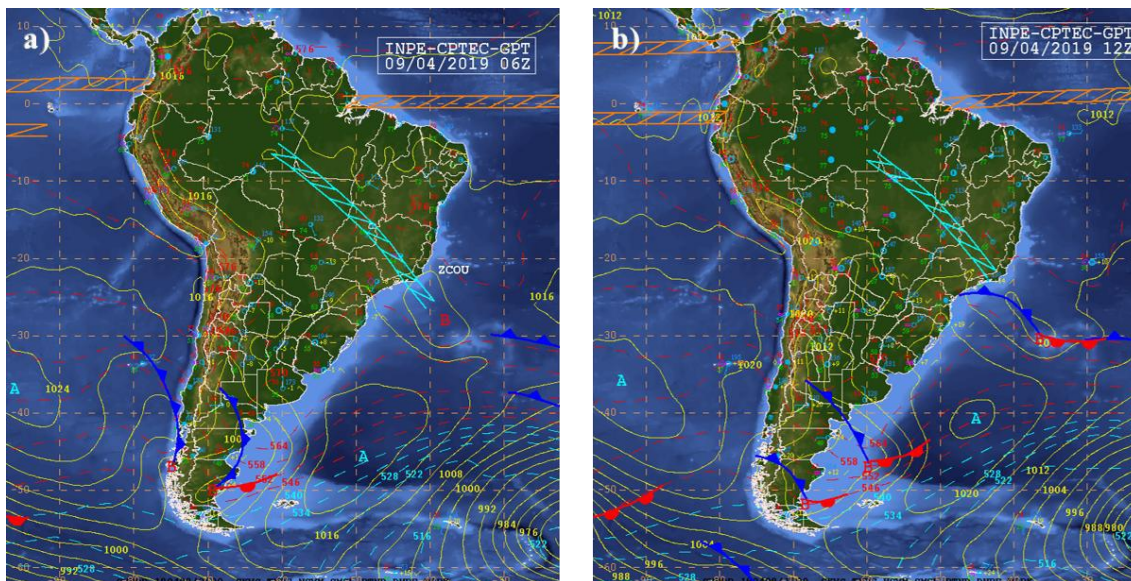


Figura 27: Carta sinótica de superfície do dia 09 de abril de 2019 - a) 06Z e b) 12Z. (Fonte: CPTEC).

Os campos para o horário de 06Z (P2; Figura 28) mostram que o ciclone ainda recebe suporte dinâmico em altitude devido ao seu posicionamento a leste do cavado em 500 hPa, com consequente advecção de vorticidade ciclônica para o sistema, e sob entrada equatorial do jato de altos níveis (Figura 28b). A onda em 500hPa pouco se movimentou entre o P1 e o P2. É visto que esta região do ciclone ainda apresenta vorticidade negativa em baixos níveis e divergência em altos níveis, que se estende até a parte oeste do estado do Rio de Janeiro. No campo de espessura (Figura 28a) percebe-se a massa de ar mais fria que adentrou o Brasil coincidindo com a imagem de vapor (Figura 26a). No campo de escoamento em 1000 hPa (Figura 28c) pode-se ainda perceber o escoamento de componente sul, proveniente do oceano, se dirigindo para a costa do estado do Rio de Janeiro. Já no campo de escoamento e umidade em 850 hPa (Figura 28e), nesse horário não se pode perceber mais, nesse domínio, o escoamento de sul, proveniente do oceano, tão bem configurado como no horário anterior. Sobre o estado do Rio de Janeiro prevalece um escoamento de oeste e ainda o de NO. O escoamento seco de componente sul, que se dirigia para latitudes mais baixas a leste dos Andes, também perdeu configuração, e agora um escoamento anticiclônico mais bem definido passa a dominar, marcada pela região mais seca (Figura 28e). Pelo campo de água precipitável (Figura 28f) pode-se evidenciar o afastamento do ciclone da costa, mas ainda assim com máximos próximo ao Rio de Janeiro.

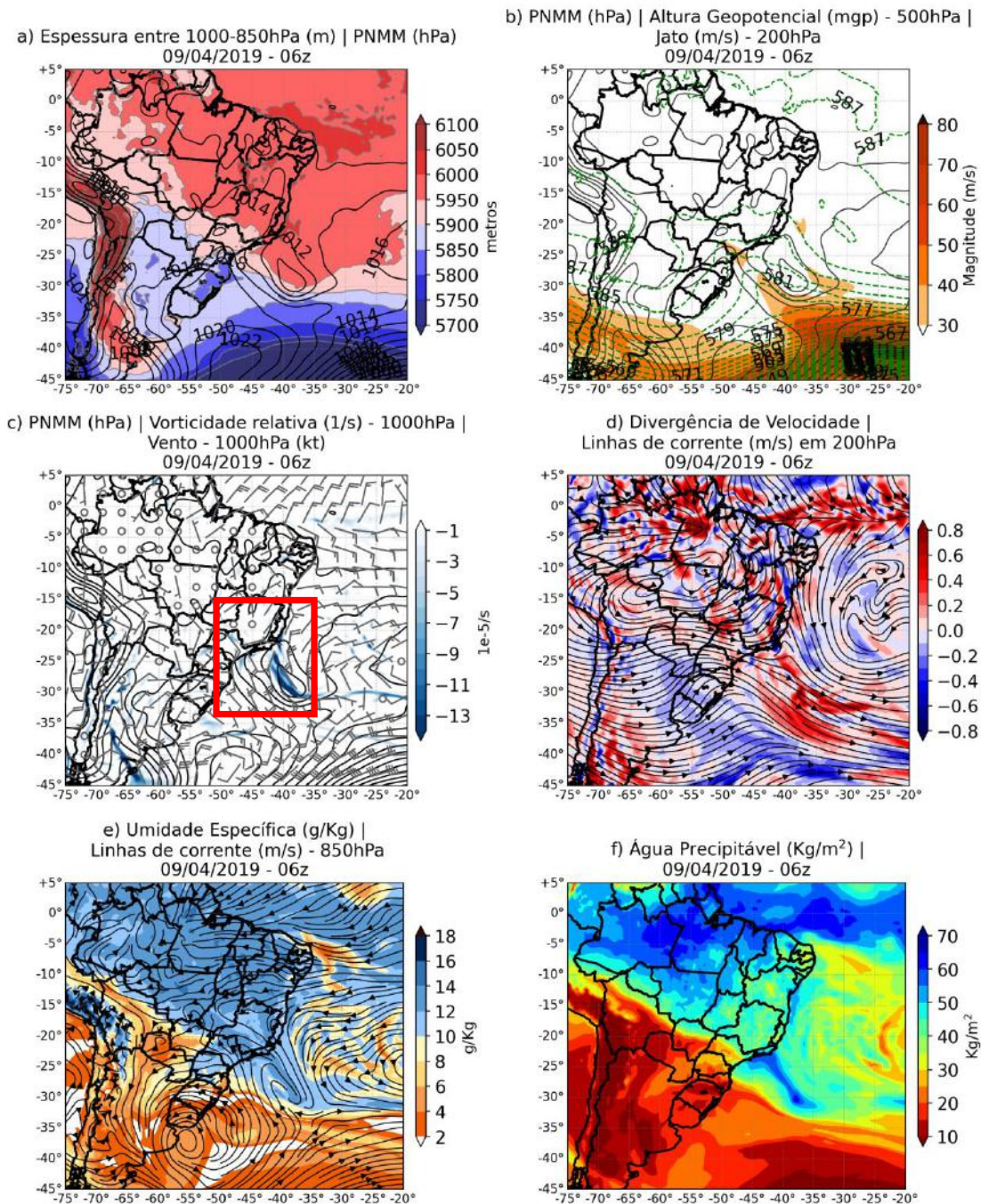


Figura 28: O mesmo que a Figura 21 para o dia 09 as 06Z, durante o P2.

O P2 se diferencia do P1 por um pequeno afastamento do ciclone da costa com um escoamento mais sudoeste atingindo a costa do Rio de Janeiro. Entretanto, um escoamento de quadrante norte em 850hPa ainda persistiu (Figura 29a). A diminuição da intensidade da chuva em todas as estações, quando comparado com o P1, e o predomínio de vento de quadrante norte durante o P2 registrado em todas as estações analisadas (Figura 16), pode estar associado ao deslocamento do ciclone para mais

longe da costa que proporcionou uma influência maior do escoamento de quadrante norte vindo do continente. Esta mudança de escoamento foi sentida na proporção dos picos para cada estação, onde o P2 foi mais significativo na Zona Norte. Percebe-se que o P2 também teve a presença de convergência de umidade em 1000 hPa, mostrando que os mecanismos necessário para a formação de nuvens esteve presente. Como observado na Figura 13, as 3HL (06Z), foi o horário do início do P2 e o horário de menor precipitação, que pode ser observado pela imagem de satélite (Figura 29c) deste mesmo horário a presença núcleos menos convectivos, quando comparado com o P1.

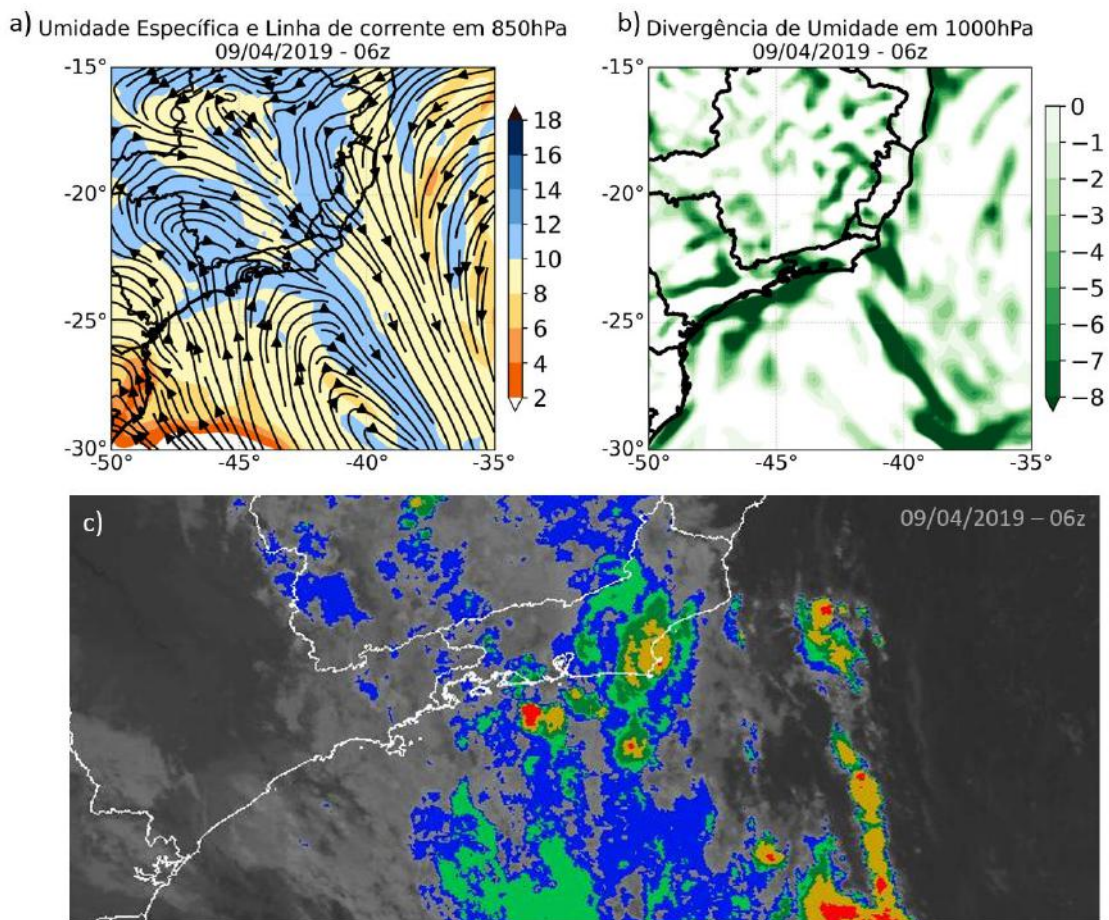


Figura 29: O mesmo da Figura 25 mas para o dia 09 as 06Z – P2.

Comparando com a análise do P2 (6Z), os campos do P3 (12Z; Figura 30) pouco sofreram alteração. Um gradiente de espessura e umidade permanece indo até aproximadamente o Acre, ainda existe a influência do ciclone na costa que está localizado aproximadamente na mesma região que no horário anterior, só que agora a isóbara de 1014hPa se estende até o sul da Bahia e se alongando mais para sul. A onda

em 500 hPa pouco se movimentou, cuja região a leste do cavado ainda se posiciona sobre o ciclone, entretanto o cavado se estendeu mais para o continente. O campo de vento em 1000 hPa mostra a persistência de ventos de componente sul se dirigindo em direção à costa do estado do Rio de Janeiro (Figura 30c) e o escoamento em 850 hPa mostra uma componente mais de oeste atingindo a costa. De quadrante norte, menos configurado que os horários anteriores, ainda persiste um escoamento de quadrante norte para o município. Ainda existe umidade disponível sobre e próximo ao Rio de Janeiro (Figura 30e), com escoamento similar ao P2, e a região de máximo de água precipitável no oceano demarca o posicionamento do ciclone (Figura 30f).

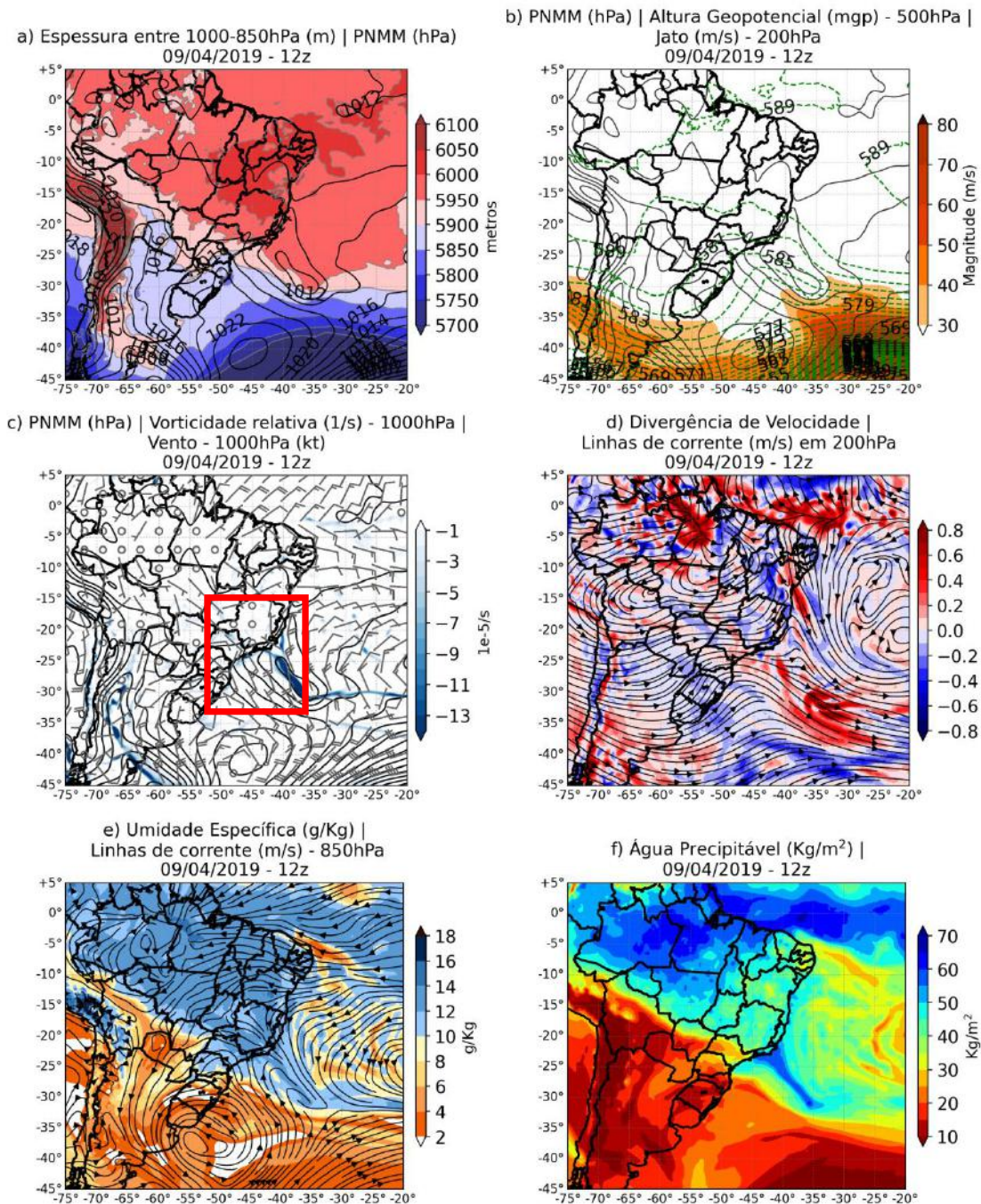


Figura 30: O mesmo que a Figura 21 para o dia 9 as 12Z, durante o P3.

A precipitação durante o P3 teve caráter sinótico similar ao P2, entretanto a configuração do escoamento não foi predominantemente do continente, como no P2. Pela análise do vento em superfície (Figura 16) evidencia-se que o escoamento de oeste registrado nas estações costeiras foi devido a influência da circulação do ciclone, enquanto que as estações mais continentais estiveram sob domínio do escoamento de quadrante norte vindo do continente. Esta configuração foi a que proporcionou menor

influência no acumulado de chuva em 24h registrado nas estações. No campo de escoamento e umidade em 850 hPa (Figura 31a) nota-se que ainda existe a persistência de advecção de umidade tanto do oceano quanto do continente, cuja divergência de umidade em 1000 hPa (Figura 31b) indicando regiões de convergência localizadas mais para o oceano, diferentemente do observado nos picos 1 e 2. Como consequência, observa-se o domínio de nuvens rasas as 12Z (Figura 31c).

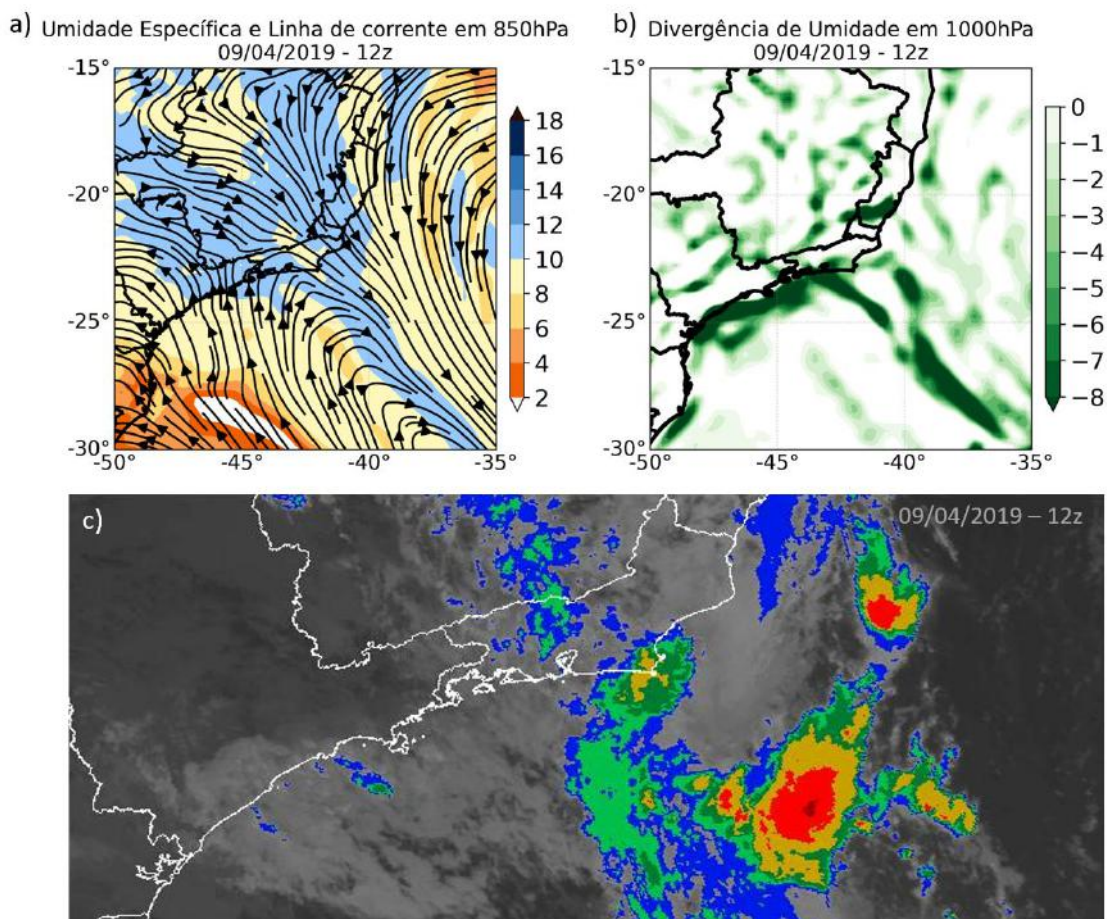


Figura 31: O mesmo da Figura 25, mas para o dia 09 as 12Z – P3.

4.2.4 Diagrama de fase do ciclone

Como observado na análise sinótica, o ciclone que se formou próximo a costa do sudeste e influenciou o evento de chuva no Rio de Janeiro apresentou uma característica de ciclone subtropical. Entretanto, com uma análise mais detalhada através do seu diagrama de fase (Figura 32), é possível observar que o ciclone apresentou núcleo frio e profundo durante todo seu ciclo de vida, com uma tendência a realizar uma transição para um ciclone extratropical, porém decaiu antes de ficar bem configurado. Pode-se

dizer que este ciclone não possuiu um sinal forte que o caracterizasse como um subtropical, nem como um extratropical.

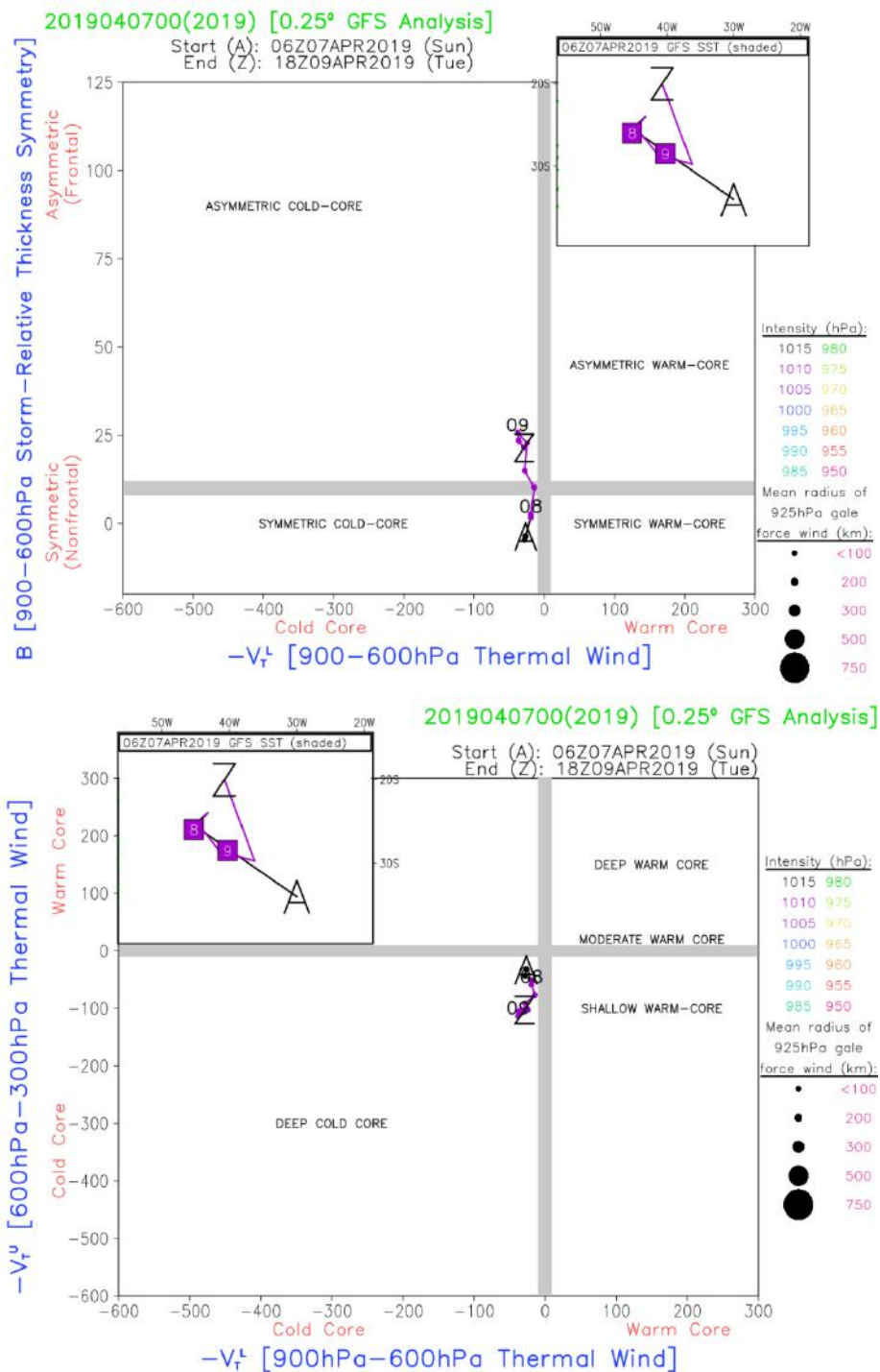


Figura 32: Diagrama de evolução da fase do ciclone, com início as 06Z do dia 7 e fim as 18Z do dia 9 de abril de 2019 a partir de dados de análise do GFS 0,25°.

4.2.5 Temperatura da superfície do mar

A formação de um ciclone próximo à costa e a presença constante de advecção e convergência de umidade demonstram a importância de se avaliar a temperatura da superfície do mar para o evento, dado que o município se localiza em uma região costeira. Pela Figura 33, que mostra o campo de anomalias positivas de TSM para o dia 8, observa-se que toda a costa do Rio de Janeiro, além de uma vasta região do oceano, apresenta anomalias positivas variando em torno de 1,5° a 3°C. A região oceânica do sudeste e sul do Brasil é conhecida por ser a terceira zona ciclogênica da América do Sul (REBOITA et al., 2009b), onde a ocorrência da anomalia positiva na costa do Rio de Janeiro pode ter favorecido o surgimento e a permanência do ciclone que prevaleceu durante o evento.

Um estudo mais a fundo dos possíveis efeitos da TSM na caracterização deste evento é importante e necessária, como mostrado por Yamamoto (2020), Iizuka & Nakamura (2019), Ham *et al.* (2018) e Nouri *et al.* (2012), que avaliaram o papel da TSM na modulação de eventos de chuva extrema.

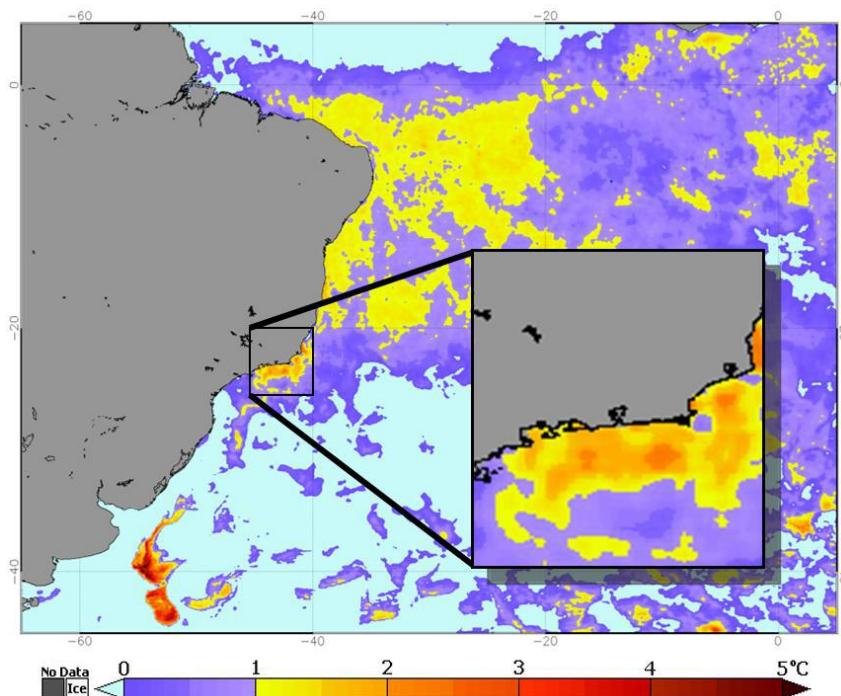


Figura 33: Mapa de anomalia positiva de temperatura da superfície do mar para o dia 8 de abril de 2019, em resolução de 5km, do programa de monitoramento de recife de corais da NOAA – versão 3.1 (Fonte: extraído de Coral Reef Watch-NOAA, adaptado).

4.3 Análise das propriedades das nuvens

4.3.1 Caracterização de cada pico

Foi escolhida uma estação de cada zona territorial do município para se realizar as análises, baseada na discussão apresentada na análise da precipitação. As variáveis foram obtidas do satélite GOES-16, apresentadas na Tabela 1.

A Figura 34 apresenta o comportamento das variáveis na Zona Sul pela representação da estação Rocinha, que foi a estação com o maior acumulado de chuva em 24h e cujo P1 foi o de maior significância tanto na própria estação quanto nas estações próximas a ela.

Analisando as propriedades macrofísicas, as características apresentadas no P1 foram a de maiores alturas de topos de nuvem, variando acima de aproximadamente 11 km, com máximo atingindo 14 km de altura, cuja pressão ficou em torno de 200 hPa e temperaturas de -60°C . Já o P2 e o P3 apresentam valores menores e mais oscilantes que o P1, com uma tendência de diminuição da altura do topo das nuvens e aumento da pressão e temperatura até o final do período. O P2 se caracterizou por alturas de topo de aproximadamente 10 km, com pressão de 300 hPa e temperatura mínima em cerca de -40°C , sendo que na segunda metade do pico atingiu um máximo de 0°C com a altura do topo chegando a 6 km. Essa variação indica uma transição de tipos de nuvem, que se refletiu na intensidade da chuva no P2 na ZS. Para o P3, as variáveis apresentam um comportamento similar da Figura 13, com dois subpicos, o primeiro com alturas de topo em torno de 9 km, pressão de 300 hPa e temperatura máxima de -40°C , e o segundo com alturas de 5 a 8 km, pressão de 550 hPa a 400hPa e temperatura quase constante em 0°C .

Muito parecido com o perfil total de chuva acumulada em 1h (Figura 13) registrado nas estações em superfície, a altura, pressão e temperatura do topo da nuvem variaram de forma proporcional a intensidade da chuva registrada. A configuração observada indica que as maiores alturas de topos de nuvens e, conseqüentemente, menores pressões e menores valores de temperatura foram os responsáveis pela maior intensidade da chuva durante o P1, que está de acordo com o observado por Duarte et al (2018), que relacionou a ocorrência de eventos de chuva extrema com a presença de

nuvem Cb ou Ns, sendo observado que a chuva de maior intensidade e topo em torno de 14 km foi relacionada a presença de Cb. Da mesma forma, as menores intensidades de chuva observadas no P2 e P3 se relacionaram a alturas de topos de nuvens menores e de temperaturas cada vez mais quentes, como evidenciado por Duarte *et al.* (2018) para eventos de chuva extrema de menor intensidade, cuja altura de topo encontrada pelos autores variou em torno de 10 e 11 km, o mesmo encontrado em média neste trabalho. Vale ressaltar que mesmo apresentando menores intensidades do que o P1, nos picos 2 e 3 as maiores intensidades de chuva observada em superfície acompanharam alturas de topos de nuvem maiores.

Com temperatura predominantemente abaixo de -40°C , a fase de gelo no topo da nuvem durante o P1 foi constante em grande parte do tempo, tendo variado para mista e líquida no momento em que se diminuiu a precipitação. Da mesma forma, o COD (espessura ótica da nuvem) o CPS (distribuição do tamanho da partícula de nuvem) permaneceram constantes, com COD em torno de 6 e CPS em $78\ \mu\text{m}$. Este valor de CPS está próximo do valor encontrado por Duarte *et al.* (2018), condizente com a presença de chuvas mais intensas, cuja fase de gelo no topo da nuvem e tamanho do raio efetivo observado remontam a bigorna do topo da Cb. Conforme a temperatura aumenta nos outros dois picos, percebe-se uma maior variação das variáveis microfísicas em relação a fase, onde conforme a fase muda para uma classificação mais baixa no gráfico, o COD aumenta e CPS diminui. Principalmente nas primeiras horas do P2, a fase de gelo foi quase constante, com uma maior variação do COD, mas na mesma escala dos valores observados no P1, e CPS se assemelhando também ao observado no P1, de $78\ \mu\text{m}$. Em associação com as variáveis macrofísicas, cuja altura aproximada foi de 10 km, existe o indicativo de ocorrência de nuvem Ns com topo de gelo nas primeiras horas do P2, onde o caráter de chuva mais fraca, num processo de aumento do raio efetivo das gotas, fez com que COD oscilasse e alcançasse valores mais baixos, como apontado por Kobayashi & Masuda (2009). No P3 predominou a fase de água super-resfriada, ou seja, presença de gotas no estado líquido em temperatura abaixo de 0°C , com COD atingindo o máximo de 158 e CPS em torno de $15\ \mu\text{m}$. Como discutido no parágrafo anterior, o P3 tem indicativo de presença de nuvem Ns, e como foi observado nos eventos estudados por Duarte *et al.* (2018), o raio efetivo de gotas no topo de nuvens dos eventos de chuva menos intenso variou entre 10 e $15\ \mu\text{m}$ na altura de 7-8 km, onde

o valor de 15 μm e a altura média observada de 6 km neste trabalho estão próximos dessas faixas.

A variação de espessura ótica durante os picos está de acordo com o observado por Kobayashi & Masuda (2009), que disseram que o COD permanece aproximadamente constante em casos de chuva mais fortes, sendo observados valores maiores de COD em nuvens com precipitação mais fraca, além de que o aumento do conteúdo de água líquida aumenta o COD. Observa-se que no período de precipitação mais fraca (Figura 13), com presença de fase mista ou super-resfriada (segunda metade do P2 e P3), o COD aumentou drasticamente, podendo indicar a presença de alto conteúdo de água líquida e, conseqüentemente, a presença de nuvens Ns, ao passo que durante o P1, período de precipitação mais intensa, o COD apresentou valores mais baixos e de pouca variação, podendo indicar a presença de nuvens Cb's.

A taxa de precipitação do GOES caracterizou melhor o P1 do que os outros picos, onde nota-se a curvatura da variação de RR seguindo a mesma tendência da altura e pressão, e o oposto para a temperatura. Enquanto que nos outros picos onde a temperatura foi aumentando, a precipitação não foi muito bem representada. Ou seja, a estimativa da taxa de precipitação está fortemente associada a temperatura de brilho da nuvem, não representando bem a precipitação dos picos 2 e 3.

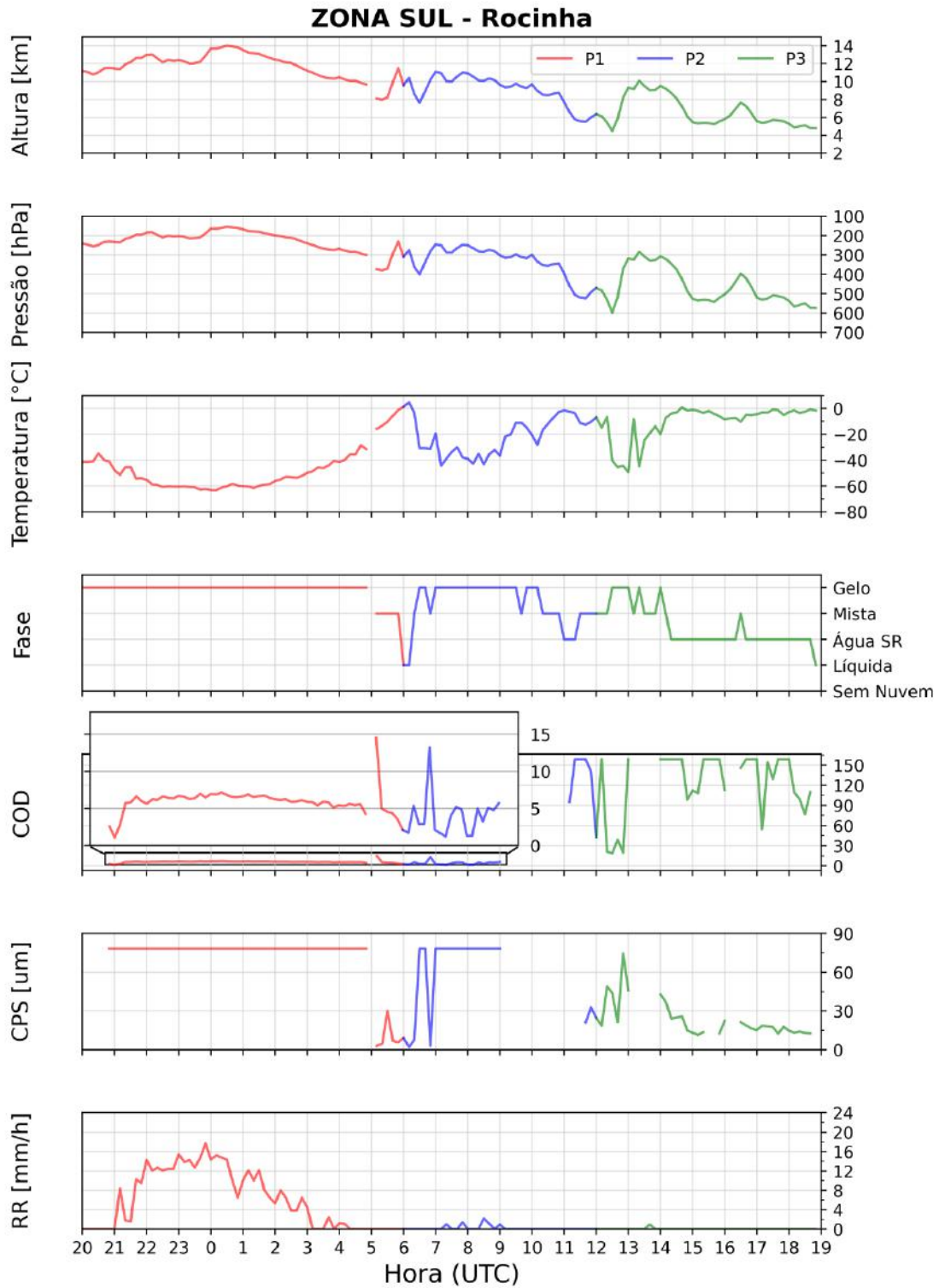


Figura 34: Variação das propriedades macro e microfísicas das nuvens a partir de produtos do satélite GOES-16 para a Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, representado pela estação Rocinha (-22,98583;-43,245) no período de 20 UTC do dia 8 a 18:49 UTC do dia 9 de abril de 2020. Cada cor de linha corresponde a um pico, sendo vermelha para o pico 1, azul para o pico 2 e verde para o pico 3. Na variável COD, o gráfico sobreposto é um zoom da informação logo abaixo dele, variando de 0 a 17.

Na Zona Norte (Figura 35), representado pela estação Irajá, que foi uma das estações com menor valor de acumulado em 24h, mas com maior influência do P2, percebe-se, durante o P1, um comportamento similar ao visto na ZS. Altura de topo máximo de 14 km, mas com menor oscilação do que na ZS, pressão em cerca de 200 hPa e temperatura do topo das nuvens atingindo o mínimo de -60°C . A fase dominante foi de gelo, com espessura ótica (COD) predominando em torno de 6-7 e CPS de 78 μm . A taxa de precipitação acompanha o mesmo comportamento da altura do topo das nuvens, registrando menores valores do que na ZS. Apesar de características parecidas com a ZS, a ZN não foi atingida por altos quantitativos de chuva, quando comparado com as estações da ZS, o que indica a presença de mais de um núcleo convectivo presente no P1, corroborando com o efeito da orografia que possivelmente intensificou a quantidade de chuva precipitante ao sul do Maciço da Tijuca. Também pode-se ressaltar que nem sempre sobre uma mesma localidade onde as alturas de topos das nuvens são as mais elevadas ou também existe a presença de menores valores de temperatura serão observados altos registros de chuva em todos os pontos da superfície.

Durante o P2, pico de maior significância para a ZN, nota-se uma maior variação da fase, não ficando predominantemente gelo nas primeiras horas, como observado na ZS. Entretanto, a taxa de precipitação (RR) registrou valores nos mesmos momentos em que a fase no topo da nuvem foi de gelo, CPS de 78 μm e COD em torno de 5, temperatura no topo em torno de -40°C , pressão em cerca de 300 hPa e altura de 10 km. Essas características foram as mesmas observadas, com maior predomínio, nas primeiras horas do P2 na ZS. O escoamento de norte do vento em superfície observado na Figura 16 em grande parte da cidade assim como o predomínio de convergência de umidade (Figura 29b) e advecção de umidade em 850 hPa (Figura 29a), aliado as características das nuvens destacadas, pode explicar a maior influência do P2 do que o P1 nos acumulados de chuva em 24h das estações da ZN, já que no P1 o escoamento mais significativo foi de sul.

O P3 não apresenta a definição do segundo subpico, que pode ser observado na ZS, mas a característica geral dos valores das variáveis é similar onde, de forma geral, houve o predomínio de nuvens em níveis médios (altura do topo em 6 km e pressão em 500 hPa), de fase de água super-resfriada com temperatura em torno de 0°C , indicando a presença de gotas de água líquida, com a espessura ótica correspondendo a tal fato,

devido a maior presença de conteúdo de água líquida e CPS em cerca de 15 μm na maior parte do tempo.

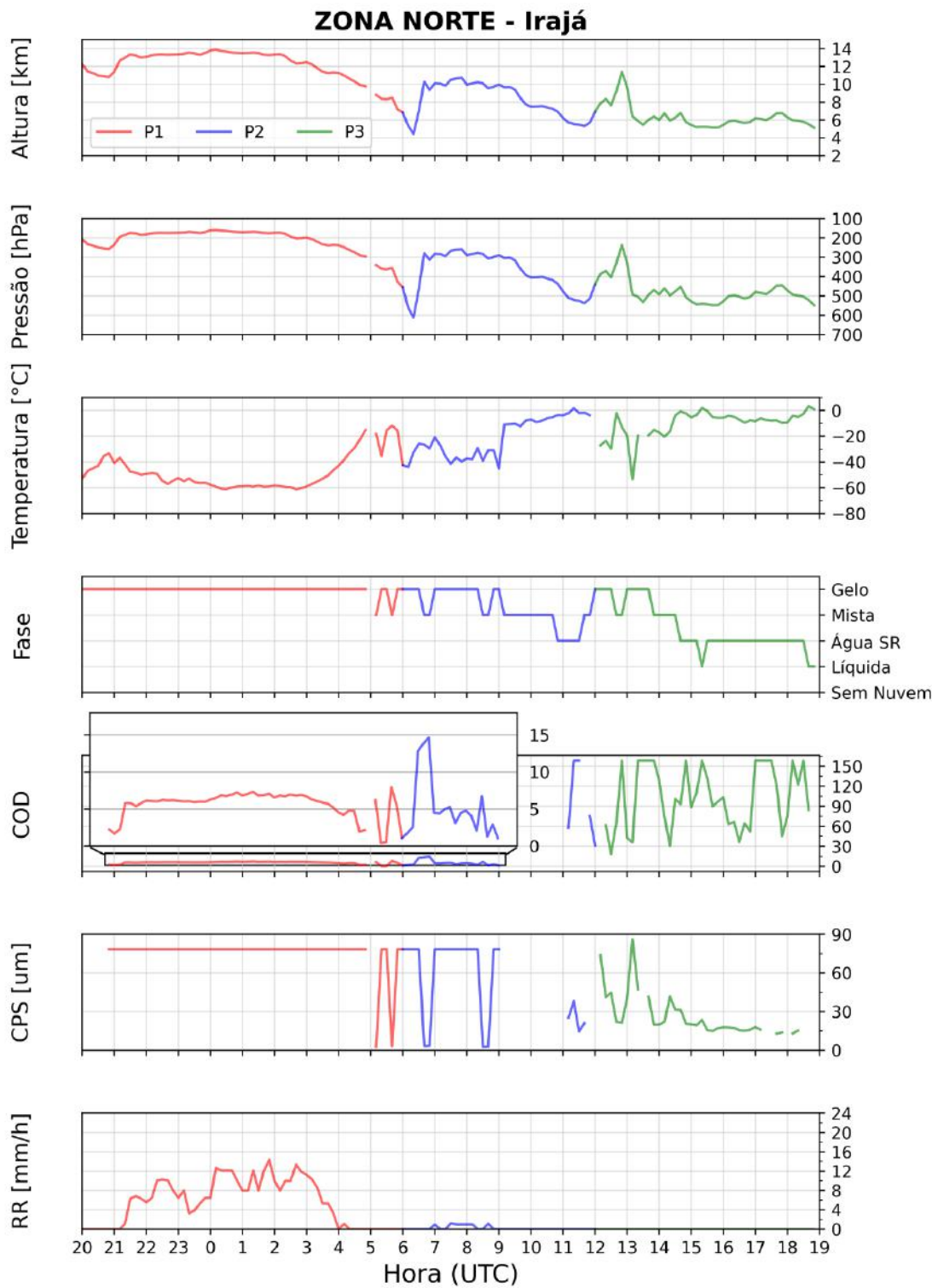


Figura 35: O mesmo que a Figura 33 para a Zona Norte, representado pela estação Irajá (-22,826;-43,337).

Como discutido na análise do perfil da precipitação, grande parte da Zona Oeste foi mais atingida pela chuva durante o P1, onde elegeu-se a estação Campo Grande para representar a zona (Figura 36), principalmente o setor norte e oeste do Maciço da Pedra Branca. As estações mais próximas da costa sul apresentaram comportamento bem similar ao observado na Zona Sul (Anexo 3).

Diferentemente das zonas sul e norte, o P1 inicia-se com alturas mais baixas e temperaturas mais elevadas, com o gráfico de temperatura no topo da nuvem apresentando uma região convexa entre 20 e 00 UTC e outra côncava entre 00 e 5 UTC, onde na ZS e ZN observou-se uma só grande região côncava entre os horários. Nas primeiras horas do P1 as características observadas foram: altura em torno de 11 km, pressão de 250 hPa, temperatura máxima em torno de -20°C , fase de gelo, COD máximo de 14, CPS de $78\ \mu\text{m}$ e RR aproximadamente 0 mm/h em média. Ao passo que quando se iniciam taxas de precipitação mais expressivas, a partir de 21h, as características passam a ser de: altura máxima de 14 km, pressão em torno de 200 hPa, temperatura mínima de -60°C , fase de gelo, COD em torno de 6-7 e CPS de $78\ \mu\text{m}$. Essas últimas características são as mesmas observadas no P1 da ZS e ZN. Logo, percebe-se que as primeiras horas do P1 no setor noroeste da ZO a presença de nuvens mais baixas e temperaturas mais quentes, ainda sim com topo de gelo, mas com espessura máxima atingindo 14 foi responsável pelo não registro de precipitação em superfície (Anexo 4). Enquanto que, a partir da transição para nuvens de topos mais elevados, a precipitação começou a acontecer, e de forma intensa, indicando a presença de nuvens convectivas.

O P2 apresentou altura no topo da nuvem predominante de 10 km, pressão de 300 hPa, temperatura máxima de 0°C e mínima em torno de -40°C , a fase oscilou entre todos os tipos, inclusive em um momento registrou a fase líquida, COD variou de 2 a aproximadamente 15 e CPS apresentou valores de aproximadamente 1 a até $78\ \mu\text{m}$. Essas características mostram alta variabilidade dos parâmetros, indicando a presença de diversos tipos de nuvem, que refletiu na menor quantidade de precipitação registrada em superfície.

Com bastante similaridade com as zonas sul e norte, o P3 na zona oeste apresentou predominância de altura no topo de 6 km, pressão de 550 hPa, temperatura em torno de 0°C , fase indicando a presença de água super-resfriada, espessura óptica com

bastante oscilação, com valores máximos acima de 150 e mínimos em torno de 30, e CPS com grande amplitude, sendo registrado valores de 15 a 78 μm .

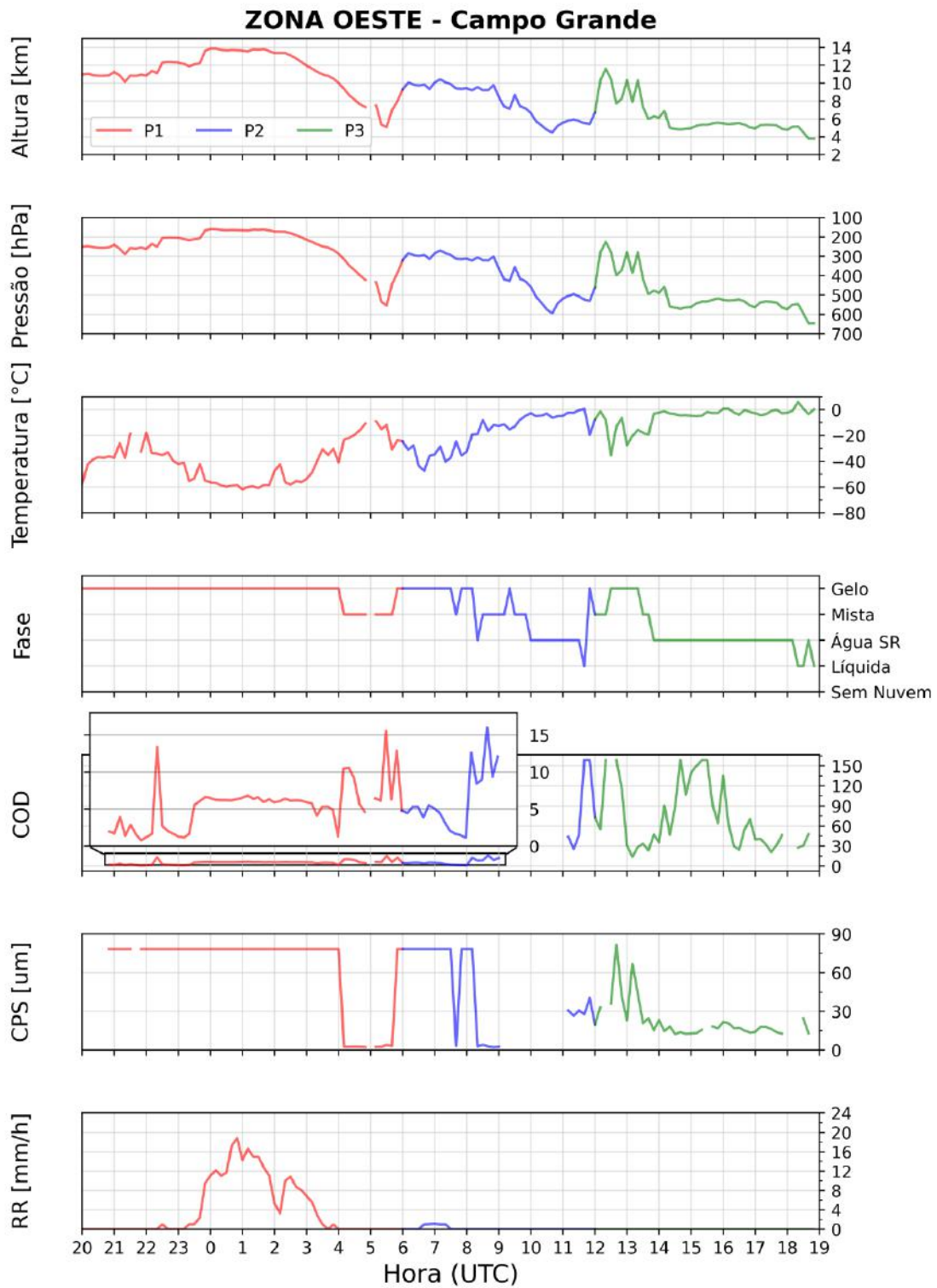


Figura 36: O mesmo que a Figura 33 para a Zona Oeste, representado pela estação Campo Grande (-22,903;-43,562).

Na Figura 37 apresentam-se mapas das variáveis em um instante de cada pico, mostrando a espacialização do que já foi comentado acima.

No P1 observa-se um núcleo quase circular sobre o município do Rio de Janeiro, cuja altura do topo das nuvens ficou na faixa entre 13 e 14 km com um pico máximo, próximo ao Maciço da Pedra Branca, acima de 14km. A pressão no topo da nuvem atingiu a faixa de 200 a 150 hPa com um pico máximo dentro da mesma região de pico de altura no topo da nuvem com pressão abaixo de 150 hPa. A temperatura na porção sul e leste do município variou entre -60 a -70 °C e na porção norte e oeste, de -40 a -60 °C. A fase no topo da nuvem indica o predomínio de nuvens de gelo em todo o município. Estas características sugerem que houve a formação de núcleos nuvens de desenvolvimento vertical do tipo Cb, dados os valores de altura de topos de nuvem acima de 13 km com temperaturas abaixo de -60 °C. Pela variação de altura e temperatura no topo da nuvem em todo o domínio da fase de gelo, entende-se que a formação quase circular sobre o município pode ser da extensão do topo em formato de bigorna das nuvens Cbs e os máximos registrados tanto na altura do topo quanto na pressão próximo ao Maciço da Pedra Branca, pode ser da região do domo da bigorna. Pela temperatura no topo percebe-se uma região mais intensa na parte centro sul do município com domínio também no oceano. Pela análise do perfil da precipitação, esta localização coincide com as regiões de maior intensidade da chuva, que atingiu mais intensamente as zonas Sul e Oeste, principalmente próximo à costa sul do município.

Para P2 pode-se notar que as alturas do topo das nuvens sobre o município variam de 9 a 10 km na parte oeste, enquanto que na parte leste variou de 10 a 11 km. Já a pressão, aproximadamente na mesma região, varia de 350 a 300 hPa e de 300 a 250 hPa, respectivamente. Percebe-se que a parte oeste do município, que apresenta topos menores e maior pressão que a parte leste, apresenta um predomínio de temperaturas entre 0 e -10 °C cuja fase no topo da nuvem registrada foi como mista. Já a parte leste há o predomínio de temperaturas variando de -20 a -40 °C com regiões com pronunciamento na temperatura, registrando de -40 a -50 °C, como sobre a Ilha do Governador.

Com o deslocamento do ciclone mais para longe da costa, deslocando também as regiões de convergência de umidade (Figura 29b), o P3 apresenta características diferentes dos outros dois picos, que foi observado na análise horária das propriedades

das nuvens. No instante apresentado na figura, que foi o de maior intensidade da chuva no P3, as alturas nos topos das nuvens apresentam um gradiente variando de 5 a 9 km, com a parte SE do município, abrangendo principalmente a zona Sul, com topo entre 9 e 10 km. Respectivamente, a pressão variou de 550 hPa na parte oeste a cerca de 300 hPa na parte leste do município. A temperatura predominante variou de 0 a -10 °C, indicando nuvens mais quentes, cuja fase variou de água super congelada a mista. Como observado na figura, nos horário seguintes o predomínio foi de nuvens com presença de água super-resfriada, que pode ser observada na figura avançando pelo município.

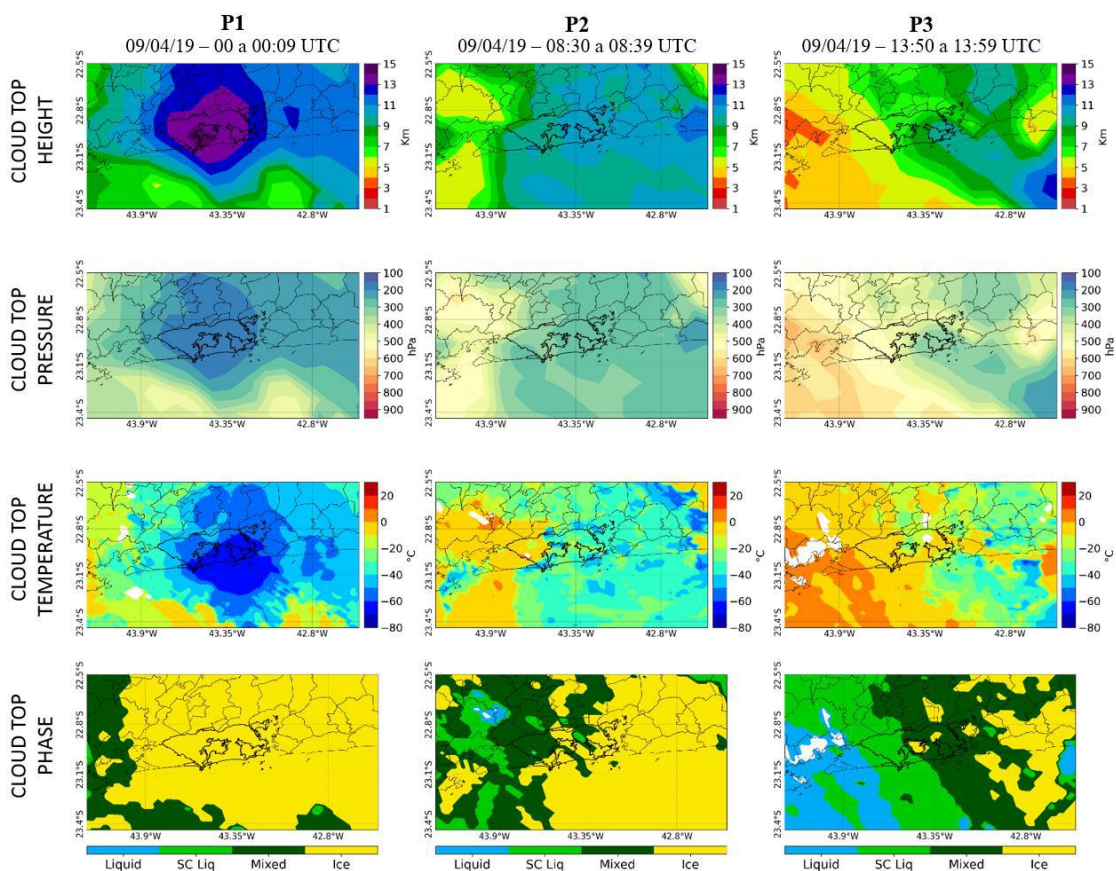


Figura 37: Produtos do satélite GOES-16 no momento representativo de cada pico, onde cada coluna representa um pico (P1, P2 e P3, respectivamente). A primeira linha é o produto de altura no topo da nuvem (km), a segunda linha é de pressão no topo da nuvem (hPa), a terceira é a temperatura no topo da nuvem (°C) e a quarta linha é da fase no topo da nuvem.

4.3.2 Correlação das variáveis

Com a análise das propriedades das nuvens, notou-se certas relações entre elas. A partir da matriz de correlação (Figura 38) pode-se averiguar tais relações. Primeiramente, e de caráter mais intuitivo, a altura, pressão e temperatura são altamente correlacionadas. O foco é nas outras variáveis. Ficou evidenciado que a fase no topo da nuvem e o CPS (distribuição do tamanho da partícula de nuvem) estão positivamente correlacionados, e de forma muito forte, com $r = 0,85$. Conforme a fase da nuvem muda, aumentando no gráfico de líquida para gelo, CPS também aumenta, e vice-versa, onde o observado nos gráficos foi que a fase de gelo foi caracterizada por altos valores de CPS enquanto que a fase de água super-resfriada, por baixos valores de CPS. Além disso, negativamente correlacionado, e de maneira forte, está o COD com essas duas variáveis. Ou seja, maiores valores de espessura ótica estão associados a nuvens de fase líquida e CPS de menor tamanho, indicando a maior presença de conteúdo de água líquida com domínio de gotas de água líquida no topo. O COD também se correlaciona na mesma intensidade, mas de forma positiva, com a temperatura, onde entende-se que as nuvens mais espessas foram as nuvens com tendência de topos mais quentes, que está coerente com a fase líquida já correlacionada.

Como observado nos gráficos, a taxa de precipitação só foi bem caracterizada durante o P1, pico este com os menores valores de temperatura no topo da nuvem. Isto se refletiu na forte correlação negativa de $r = -0.73$. A correlação entre a temperatura e o CPS apresentou uma correlação negativa muito forte ($r = -0.82$), indicando que as nuvens com temperaturas mais baixas no topo são as que apresentam tamanho de raio efetivo das partículas maiores, característico das partículas de gelo. Com correlações fortes entre a taxa de precipitação e a altura ($r = 0.67$) e a temperatura ($r = -0.73$), fica claro que o período de chuva mais intenso está correlacionado a nuvens de topos mais altos e temperaturas mais baixas, que foi observado no P1. Os outros picos não foram bem representados pelo RR, mas sabendo-se que houve precipitação nas estações de superfície, e que elas foram de menor intensidade que o P1, pode-se relacionar o período de chuva menos intenso com a presença de nuvens de topos mais baixos e temperaturas maiores, cujo COD foi mais alto e CPS mais baixo que o P1, ou seja, nuvens com maior conteúdo de água líquida.

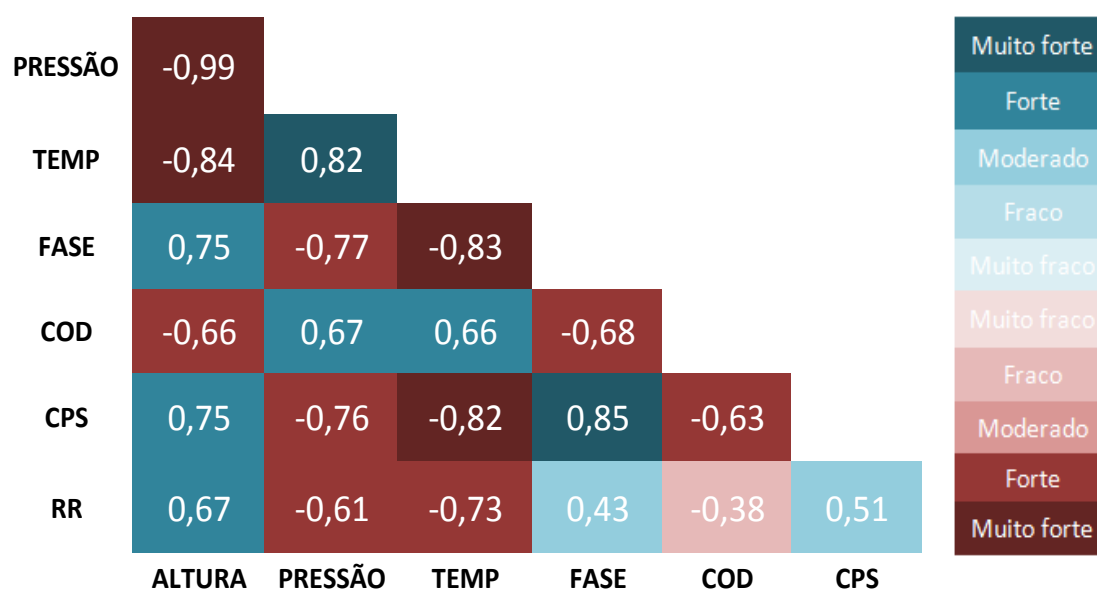


Figura 38: Matriz de correlação entre as propriedades macro e microfísica das nuvens durante o evento.

5. CONCLUSÃO

O evento de precipitação que acometeu o município do Rio de Janeiro durante os dias 8 e 9 de apresentou caráter de chuva muito intensa. Todas as 33 estações do sistema Alerta Rio apresentaram chuva acumulada em 24h acima do seu percentil 99, além de ter pelo menos um registro de chuva em 15 minutos também acima do seu percentil 99. As estações mais atingidas pela chuva foram Rocinha, Alto da Boa Vista, Barra/Barrinha, Jardim Botânico e Copacabana, localizadas a sul e bem próximas do Maciço da Tijuca. Estas estações apresentaram acumulado em 24h acima de 300 mm. As estações menos atingidas, com acumulados abaixo de 100 mm, foram Penha, Irajá, Grande Méier e São Cristóvão, todas localizadas a norte e gradativamente distantes do Maciço da Tijuca, situadas na Zona Norte.

Identificaram-se três picos de chuva durante o evento, onde o Pico 1 foi o de maior duração e intensidade, 10 horas e acum1h máximo de 88 mm, e os Picos 2 e 3 apresentaram similaridades, menos intensos e de menor duração quando comparado com o P1, 6 horas e acum1h máximo de 39,2 mm para o P2 e 6 horas e acum1h máximo de 33,6 mm. De forma geral, o P1 foi o de maior peso para o acumulado em 24h em 17 das 33 estações, contribuindo acima de 50%, com mais da metade de todas as estações atingindo o valor de percentil 99 de acumulado de chuva em 24h já durante o P1,

inclusive todas as estações localizadas na Zona Sul. Na Zona Norte, o P2 apresentou maior peso, como nas estações Irajá, Anchieta e Penha. Já o P3 foi inferior aos demais picos em todas as estações. Considerando-se o registro de chuva em 15 minutos acima do percentil 99, conclui-se que as Zonas Sul e Oeste, além da estação Alto da Boa Vista, tiveram mais registros de chuva muito intensa durante o P1, enquanto que a Zona Norte apresentou mais registros durante o P2.

Ocorreram 658 relâmpagos durante a duração de todo o evento, onde todas as ocorrências foram observadas durante o P1, podendo-se considerar que houve precipitação do tipo convectiva nas primeiras horas do evento. O mapa de densidade de raios mostrou que as regiões de maiores densidades coincidiram com os locais mais atingidos pela chuva. Ao mesmo tempo, a baixa densidade de raios na ZN coincidiu com as menores intensidades da chuva durante o P1.

O caráter estacionário de uma superfície frontal proporcionou a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que promoveu corredor de umidade da região central do Brasil para o sudeste que, aliado a anomalias de $1,5^{\circ}$ a 3°C de TSM, favoreceu a formação de um ciclone no oceano próximo à costa do Rio de Janeiro, cerca de 2 horas antes do início da precipitação do P1. Este ciclone teve suporte dinâmico do cavado em 500 hPa e do posicionamento da entrada equatorial do jato, além do suporte termodinâmico pela alta disponibilidade de umidade, cerca de 15 g/kg de umidade específica. Devido a proximidade deste ciclone à costa do Rio de Janeiro, do escoamento de quadrante sul do ciclone e do escoamento de quadrante norte da região central do país, o grau de intensidade da precipitação durante o P1 pode ser explicado pela convergência de umidade e pela instabilidade causada pelo ciclone. Aliado a isso, pela análise do vento de estações em superfície, o vento de quadrante sul foi o mais significativo para o P1, o que indica o possível efeito da orografia quando observado o caráter mais intenso da chuva nas estações a sul do Maciço da Tijuca. Para o P2, a configuração sinótica permaneceu a mesma do que no P1, com a diferença de um leve afastamento do ciclone da costa da cidade e a mudança no escoamento, que predominou de quadrante norte, justificando a importância do P2 para a Zona Norte. Durante o P3 houve a presença de ambos os escoamentos, do oceano e do continente, sentidos nas estações costeiras (vento de oeste/sudoeste) e mais continentais (vento de quadrante norte), respectivamente, cuja convergência de umidade se localizou mais para o oceano,

diferentemente do observado nos picos 1 e 2 que se configurou mais sobre o município. O escoamento observado durante o evento se diferenciou do evento de chuva intensa que ocorreu no caso do deslizamento do Morro do Bumba, que apresentou escoamento de sul durante todo o período (AIRES, 2016). A persistência do ciclone no oceano se enquadrou no quarto padrão identificado por Escobar *et al.* (2020), em padrões de casos de chuva intensa no Rio de Janeiro associados a eventos de ZCAS.

A variação de cada pico em relação a localidade apresentou certa consonância ao se avaliar as propriedades das nuvens em relação as zonas norte, sul e oeste. As variações da espacialização da chuva pode ter tido maior influência de características locais de mesoescala, como o escoamento do vento, orografia ou proximidade/distância de corpos de água. Já em relação a comparação entre os três picos, características diferentes foram observadas. A intensidade da chuva durante o P1 pode ser explicada pelo predomínio de nuvens com topos altos e de temperaturas mínimas, característico de nuvens convectivas. A altura média foi cerca de 13-14 km, pressão de 200 hPa e temperatura de -60°C , a fase de gelo predominou, com COD em torno de 6 e CPS de 78 μm . Durante o P2 houve uma migração da altura do topo das nuvens para uma altitude menor do que o P1 que, conseqüentemente, aumentou a temperatura do topo. Em média a altura foi de cerca de 10 km, com pressão de 300 hPa e temperatura de -20°C , a fase variou entre principalmente entre gelo e mista, COD oscilou entre 2 e 15 e CPS variou entre ~ 0 a 78 μm . Com valores ainda menores que o P2, durante o P3 a altura média das nuvens predominou em cerca de 6 km, cuja pressão foi de 500hPa e temperatura de 0°C , a fase de água super-resfriada prevaleceu, COD predominou acima de 100 e CPS de maior domínio em torno de 15 μm . Dada todas essas características, aliado ainda a presença de relâmpagos somente no P1, conclui-se que durante o P1 predominou a ocorrência de chuva originada de nuvens Cumulonimbos já o P2 e P3 foram acometidos por chuva de nuvens Nimbostratus.

Uma correlação da fase da nuvem com o COD e o CPS foi observada. Quando a fase no topo da nuvem foi de gelo e, conseqüentemente, atingindo maiores alturas de topo e menores valores de temperatura, COD apresentou valores mais baixos e CPS mais alto. Já para a fase de água super-resfriada, COD apresentou altos valores enquanto que CPS apresentou valores mais baixos. Nuvens com topos mais baixos e, conseqüentemente, com temperaturas no topo mais quentes, por terem uma maior

quantidade de água líquida, apresentaram espessura maior e CPS menor, com correlação positivamente forte entre a temperatura e COD, e negativamente muito forte entre a temperatura e CPS. O alto volume de precipitação durante o P1 relacionou-se a presença de nuvens altas, com topo de gelo e menor conteúdo de água líquida, ao passo que no P2 e P3, a diminuição do volume de precipitação relacionou-se a presença de nuvens mais quentes, com raio efetivo das partículas no topo de gotas de água líquida super-resfriada e com alto conteúdo de água líquida, resultando em nuvens de maior espessura ótica.

Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho evidenciou o possível efeito da orografia na intensificação e espacialização dos acumulados de chuva, portanto sugere-se estudos mais aprofundados buscando avaliar tal fato. Assim como, devido à proximidade com corpos de água, entende-se ser de fundamental importância avaliar a influência da TSM na modulação do evento. A distribuição espacial dos relâmpagos também é algo a ser estudado, onde estudos apontam que a poluição do ar em superfície está correlacionada com a ocorrência de raios, tendo sido encontrada correlação positiva com a concentração de poluentes como o SO₂ e o PM10 (KAR & LIOU, 2014; MIDDEY & CHAUDHURI, 2013). Uma análise que trará mais fundamentação e clareza ao observado neste trabalho é o estudo de perfis ou cortes verticais das nuvens durante os picos, com foco nas variáveis microfísicas, principalmente buscando avaliar o papel dos aerossóis neste evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, Donald C. **Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere**. 3ed. Austrália: Brooks/Cole Publishing Co., 2001.

AIRES, M. **Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro: estudo de caso do escorregamento do Morro do Bumba, Niterói, RJ, utilizando o modelo BRAMS**. Rio de Janeiro, 2018. 139f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

ALERTA RIO. **Estatísticas – Maiores Chuvas**. Disponível em: <<http://alertario.rio.rj.gov.br/maiores-chuvas/>>. Acesso em: 09 jan. 2021.

CARLOMUSTO, Michael. GOES-R Series Product Definition and Users' Guide. **NASA, 416-R-PUG-GRB-0348 Vol. 4, Rev 2.2**, v. 5, p. 387, 2019.

CORAL REEF WATCH-NOAA. **Daily Global 5km Satellite Coral Bleaching Heat Stress Monitoring**. Disponível em: <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index.php#data_access>. Acesso em: 23 set. 2020.

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

DERECZYNSKI, Claudine Pereira; CALADO, Renata Novaes; DE BARROS, Airton Bodstein. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 2, p. 17-30, 2017.

DUARTE, Bruno Muniz; FRANÇA, José Ricardo de Almeida; JUSTO, Leonardo Abreu Jorge. The Use of CloudSat Data to Characterize The Microphysical Structure of Extreme Precipitation Events over South and Southeast of Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 15-27, 2018.

ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; DE ALMEIDA MARQUES, Ana Clara; DEREZYNSKI, Claudine Pereira. Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Atmosfera**, [S.l.], dez. 2020. ISSN 2395-8812.

EVANS, J. D. **Straightforward statistics for the behavioral sciences**. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Publishing, 1996.

FOLHA DE S. PAULO. **Chuva forte deixa ao menos quatro mortos no Rio de Janeiro**. Disponível em: <<https://cutt.ly/KjzYkd2>>. Acesso em: 22 set. 2020.

G1 RIO. **Chuva dos dias 8 e 9 de abril bateu recorde, diz Alerta Rio**. Disponível em: <<https://cutt.ly/rjzYsQC>>. Acesso em: 22 set. 2020.

G1 RIO. **Chuva do Rio é a mais forte em 22 anos, segundo dados do Alerta Rio.** Disponível em: <<https://cutt.ly/3jzYdWQ>>. Acesso em: 22 set. 2020.

G1 RIO. **Chuva forte causa deslizamentos, morte e deixa o Rio em estágio de crise.** Disponível em: <<https://cutt.ly/LjzYg6G>>. Acesso em: 22 set. 2020.

HAM, Yoo Geun; NA, Hye Yun; OH, Seol Hee. Role of Sea Surface Temperature over the Kuroshio Extension Region on Heavy Rainfall Events over the Korean Peninsula. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, n. 1, p. 19–29, 2019.

GLOSSÁRIO DE METEOROLOGIA. **cloud optical depth.** Disponível em: <<https://cutt.ly/TjzY9ys>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

HOUZE, Robert A. **Cloud Dynamics.** 1ed. University of Washington: Academic Press, 1993.

IBGE. **Rio de Janeiro.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>>. Acesso em: 22 set. 2020.

IIZUKA, Satoshi; NAKAMURA, Hisashi. Sensitivity of Midlatitude Heavy Precipitation to SST: A Case Study in the Sea of Japan Area on 9 August 2013. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 8, p. 4365–4381, 2019.

KOBAYASHI, Takahisa; MASUDA, Kazuhiko. Changes in cloud optical thickness and cloud drop size associated with precipitation measured with TRMM satellite. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 87, n. 4, p. 593–600, 2009.

LAMB, Dennis; VERLINDE, Johannes. **Physics and Chemistry of Clouds.** Cambridge University Press, 2011.

LIMA, Kellen Carla; SATYAMURTY, Prakki; FERNÁNDEZ, Júlio Pablo Reyes. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 121–135, 2010.

MAZIN, I. P. Cloud phase structure: Experimental data analysis and parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, n. 2, p. 667–681, 2006.

NOURI, H; AZADI, M; GHASEMPOUR, G. Effect of Sea-Air Interaction of Caspian Sea on Heavy and Super Heavy Precipitation Events in the Southern Coasts of Caspian Sea. **Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics.** DOI 10.1007/978-3-642-29172-2_92. 2012.

OMM. **Nimbostratus (Ns) (CEN 1930).** Disponível em: <<https://cloudatlas.wmo.int/en/nimbostratus-ns.html>>. Acesso em: 28 dez. 2020.

OMM. **Cumulonimbus (Cb) (Weilbach 1880).** Disponível em: <<https://cloudatlas.wmo.int/en/cumulonimbus-cb.html>>. Acesso em: 28 dez. 2020.

PREFEITURA DO RIO. **Características Geográficas**. Disponível em: <<https://bitly.com/NRanT>>. Acesso em: 22 set. 2020.

PRISTO, Marcos Vinícius de Jesus; DEREZYNSKI, Claudine Pereira; DE SOUZA, Pedro Regoto; MENEZES, Wallace Figueiredo. Heavy rainfall events climatology in the city of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 615–630, 2018.

PRUPPACHER, Hans R.; KLETT, James D. **Microphysics of Clouds and Precipitation**. 2ed. Kluwer Academic Publishers, 1997.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; SUGAHARA S.. South Atlantic Ocean Cyclogenesis Climatology Simulated by Regional Climate Model (RegCM3). *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-009-0668-7, 2009b

RUDLOSKY; Scott. Geostationary Lightning Mapper: Definitions and Detection Methods. version 2. NOAA/NESDIS/STAR (CICS-MD), 2018.

STULL, R. **Meteorology for Scientists & Engineers**. 3ed. Univ. of British Columbia. 938 pages. ISBN 978-0-88865-178-5. 2011.

SUZUKI, Kentaroh; NAKAJIMA, Teruyuki; NAKAJIMA, Takashi Y.; KHAIN, Alexander. Correlation pattern between effective radius and optical thickness of water clouds simulated by a spectral bin microphysics cloud model. **Scientific Online Letters on the Atmosphere**, v. 2, p. 116–119, 2006.

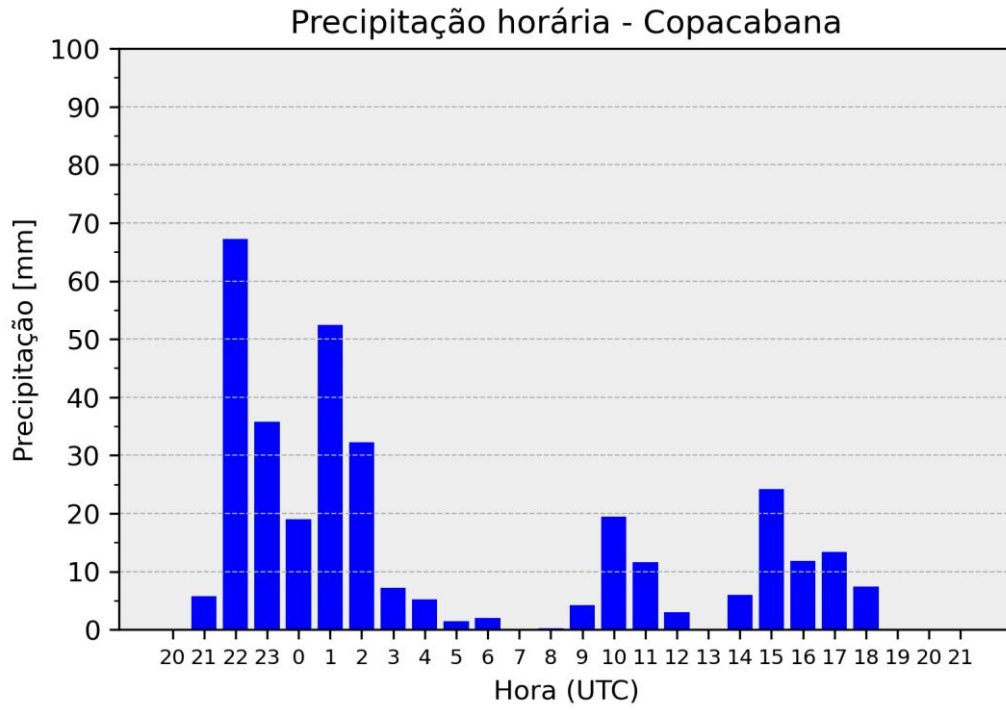
UCAR-COMET PROGRAM. **GOES-R ABI: A Nova Geração das Imagens de Satélite**. Disponível em: < <https://cutt.ly/YjzY5xD>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric Science: an introductory survey**. 2ed. University of Washington: Elsevier, 2006.

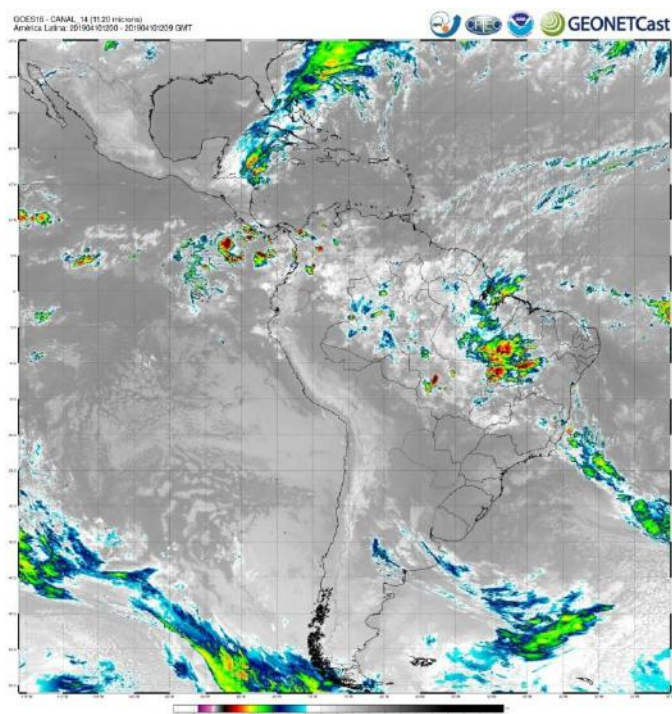
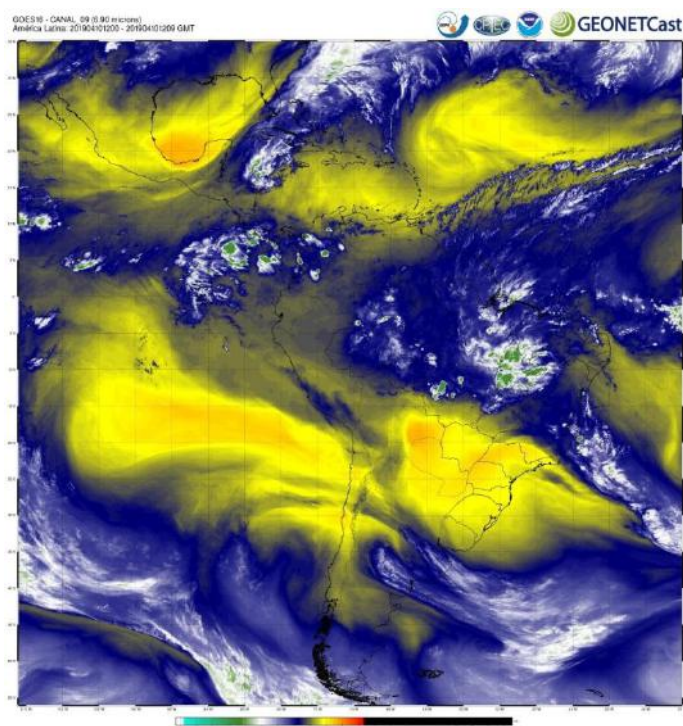
WEIDE-MOURA, Carlos Roberto Weide; ESCOBAR, Gustavo Carlos Juan; ANDRADE, Kelen Martins. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 267–280, 2013.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2ed. Cornell University: Elsevier, 2005.

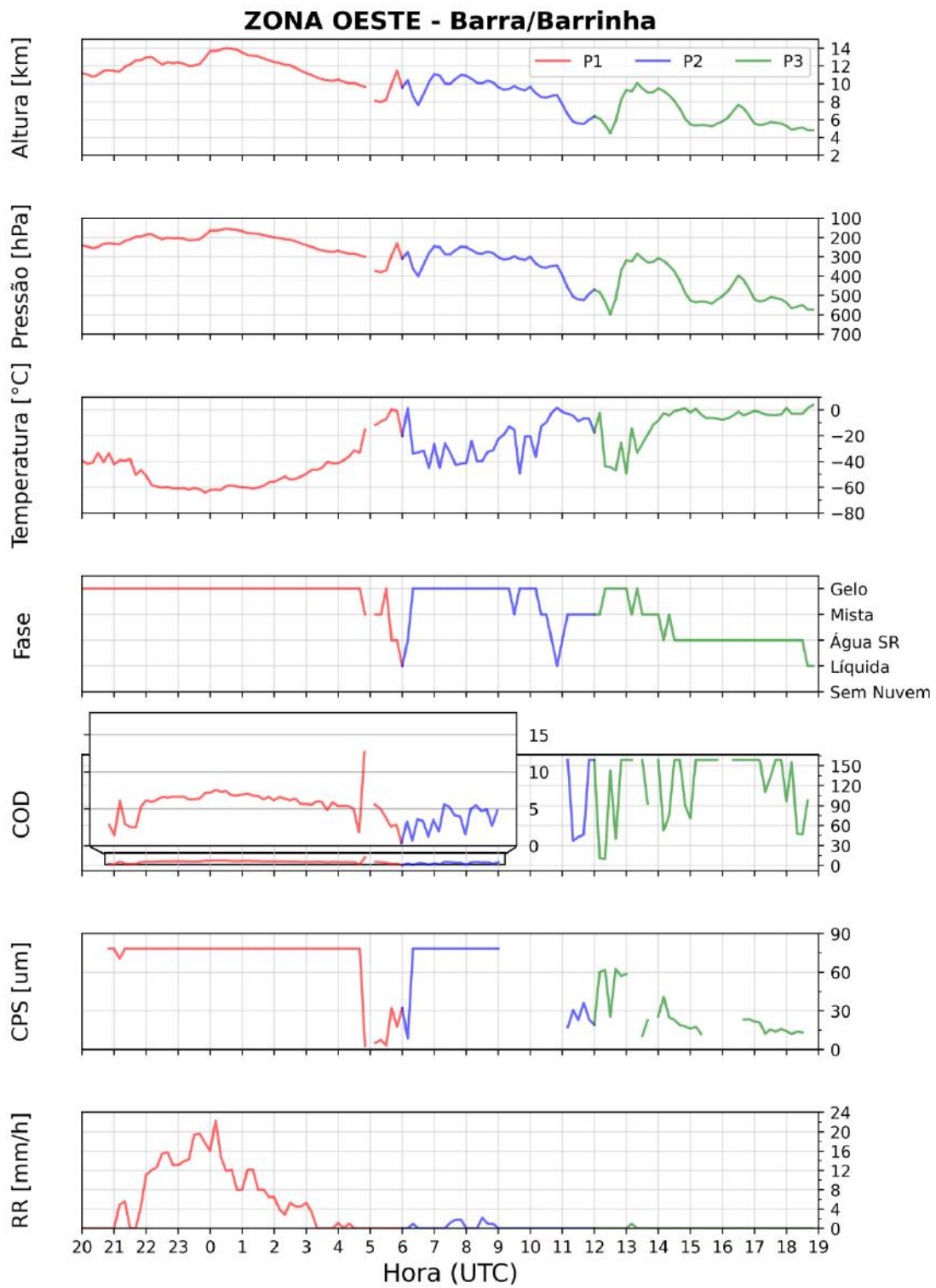
ANEXO 1 – Precipitação acumulada em 1h na estação Copacabana do sistema Alerta Rio.



ANEXO 2 – Imagens dos canais 9 e 14 do dia 10 de abril de 2019 às 12Z.



ANEXO 3 – Variação das propriedades macro e microfísicas na estação Barra/Barrinha



ANEXO 4 – Precipitação acumulada em 1h na estação Campo Grande do sistema Alerta Rio.

