



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

GALDINO VIANA MOTA

**APLICAÇÕES DE GNSS METEOROLOGIA:
ESTUDOS DE CASO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO RIO DE
JANEIRO E BELÉM**

**BELÉM-PA
2024**

GALDINO VIANA MOTA

**APLICAÇÕES DE GNSS METEOROLOGIA: ESTUDOS DE CASO DE EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO RIO DE JANEIRO E BELÉM**

Tese submetida ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Pará, como requisito para promoção à Classe Titular da Carreira de Docente da UFPA.

Áreas de concentração: Sensoriamento Remoto da Atmosfera e Meteorologia Observacional
Linha de pesquisa: GNSS Meteorologia

BELÉM-PA
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat mediante os dados fornecidos pelo autor**

- M917a Mota, Galdino Viana.
Aplicações de GNSS meteorologia: estudos de caso de eventos extremos de precipitação no Rio de Janeiro e Belém / Galdino Viana Mota. — 2024.
173 f.
- Tese para promoção à Classe Titular da Carreira de Docente da UFPA - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Guamá, Instituto de Geociências, Belém, 2024.
1. GNSS meteorologia. 2. ZTD e IWV e a precipitação extrema. 3. Rio de Janeiro e Belém. 4. Ciclo diurno do vapor d'água e precipitação. I. Título.

CDD 551.577282

GALDINO VIANA MOTA

**APLICAÇÕES DE GNSS METEOROLOGIA: ESTUDOS DE CASO DE EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO RIO DE JANEIRO E BELÉM**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Pará, como requisito para promoção à Classe Titular da Carreira de Docente da UFPA. Áreas de concentração: Sensoriamento Remoto da Atmosfera e Meteorologia Observacional. Linha de pesquisa: GNSS Meteorologia.

Aprovada em 18 de junho de 2024.
Conceito: Aprovado


Banca Examinadora:



Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Presidente
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof. David Kenton Adams - Membro Externo
Doutor em Atmospheric Sciences
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



Prof. Luiz Fernando Sapucci - Membro Externo
Doutor em Ciências Cartográficas
DMD-CPTEC-INPE



Prof. Anselmo Fortunato Ruiz Rodriguez - Membro Externo
Doutor em Física
BIONORTE-UFAC

Aos meus pais: Seu Mota e Elzinha (in memoriam),
pela simplicidade e sabedoria com que viveram a
vida.

*A mia moglie e a mio figlio per l'affetto e
l'incoraggiamento sempre.*

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão aos membros da banca examinadora, os Profs. Drs. Everaldo Barreiros de Souza, David Kenton Adams, Luiz Fernando Sapucci e Anselmo Fortunato Ruiz Rodriguez, pela disponibilidade, correções e sugestões valiosas. Suas contribuições serão fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa.7gh

Agradeço especialmente ao amigo, Diretor e Prof. João Batista Miranda Ribeiro por ter me apresentado ao fascinante universo do GNSS meteorologia. Sua orientação e incentivo abriram inúmeras portas e oportunidades que foram cruciais para o meu desenvolvimento profissional e científico, e conseqüentemente, para o avanço desta pesquisa.

Minha gratidão se estende à Dra. Shuli Song pela colaboração indispensável, que foi vital para a concretização deste projeto. Agradeço também por ter viabilizado a parceria entre o SHAO e a UFPA, bem como pelo apoio financeiro fornecido por ambas as instituições.

Também agradeço ao Diretor do IG, o Prof. Arnaldo de Queiroz da Silva, pelo apoio inestimável no projeto com os parceiros do SHAO.

Agradeço aos amigos e Profs. Drs. Paulo Kuhn e Francisco Oliveira pelo apoio, especialmente durante seus mandatos como Diretores da FAMET. Suas orientações e suporte foram essenciais para a execução deste projeto.

Um agradecimento especial aos monitores/bolsistas/alunos/colaboradores Camile B. da Silva, Lusiene S. de Jesus, Matheus P. Aguiar e Alessandro Silva pelo auxílio incansável com o equipamento da estação e com os dados de GNSS.

Por fim, agradeço às orientações feitas pela Biblioteca do Instituto de Geociências que foram muito importantes na redação e formatação final deste trabalho.

E por fim, sou profundamente grato à Fernanda G. Martino Mota pelo apoio incondicional nos bastidores durante todo o processo, e ao Lourenço L. Martino Mota pelo constante incentivo. Suas contribuições pessoais foram inestimáveis para a realização deste trabalho.

RESUMO

Eventos extremos de chuva, concomitantemente desencadeados com inundações, deslizamentos de terra e alagamentos, estão temporalmente relacionados às variações do atraso zenital total (ZTD) e do vapor d'água integrado (IWV) do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) meteorologia. A relação entre a variação de ZTD/IWV e a precipitação foi investigada neste trabalho, utilizando médias, séries temporais e estudos de caso de eventos extremos no Rio de Janeiro entre 2015 e 2018, e em Belém entre 2010 e 2022. Os dados de GNSS são oriundos do *International GNSS Monitoring and Assessment System* (iGMAS) e da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), e os dados de precipitação do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (Alerta Rio), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Tecnológico Vale (ITV). Na composição das séries temporais de ZTD/IWV e precipitação no Rio de Janeiro, foram identificadas configurações de rampas quase lineares seguidas de rampas não lineares, com as maiores taxas de variação e picos de ZTD/IWV ocorrendo, respectivamente, de 1–2 horas e 0,5 hora antes dos máximos de precipitação predominantemente entre 18:00 e 00:00 hora local (HL). Estudos de caso de eventos extremos de precipitação durante a estação chuvosa revelaram configurações nas curvas de ZTD/IWV na forma de: (i) ondulações nomeadas ‘semisenóides assimétricas’ com duração de 3–5 horas, formadas pelo rápido crescimento vespertino em rampas não lineares, com uma taxa de variação média no ponto de inflexão de $+11$ (1,4) $\text{mm} [15\text{min}]^{-1}$; (ii) saltos (*jumps*) com taxa de variação média de $+17,3$ ($+2,66$) $\text{mm} [15\text{min}]^{-1}$ e máxima de $+21,3$ ($+3,33$) $\text{mm} [15\text{min}]^{-1}$; (iii) rampas alongadas e ondulações denominadas ‘protuberâncias’ (*bumps*) sequenciais escalonadas nas rampas ascendentes com duração de 1–2 horas; e (iv) ‘protuberâncias’ ou rampas ascendentes em valores de ZTD/IWV já elevados devido à atuação de sistemas meteorológicos como a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) ou a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Foram identificados eventos com grandes volumes de chuvas resultando na elevação dos níveis dos rios, igarapés e canais, causando alagamentos em vários locais de Belém. Três eventos ocorreram durante a estação menos chuvosa com precipitação na categoria muito-forte provenientes de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs), e outros quatro eventos durante a estação chuvosa sob a influência principal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). As curvas de ZTD apresentaram variações não lineares antes e depois dos eventos de chuvas significativas, com rampas ascendentes quase lineares e picos

seguidos por rampas descendentes. Quando se aproximavam dos eventos, as curvas tinham uma configuração de ‘saltos’ de ZTD, com súbito crescimento precedendo chuva intensa ou ocorrendo em múltiplos saltos durante os eventos de chuva intensa por várias horas. Porém, algumas curvas de ZTD/IWV apresentaram as configurações de semissenóides, protuberâncias ou saltos sem resultar em precipitação, evidenciando a existência de falsos alarmes. Por isso, recomendou-se a instalação de estações meteorológicas junto das estações de GNSS, para medir pelo menos a precipitação, pressão, temperatura e umidade relativa com resolução de 5 minutos, que é essencial para o monitoramento de eventos extremos de precipitação. Recomenda-se expandir as análises para períodos mais longos, identificar configurações significativas nas séries temporais de ZTD e IWV, definir limiares críticos e utilizar técnicas avançadas e mais complexas, como redes neurais, análise de ondeletas para as séries temporais de ZTD/IWV ou tomografia troposférica. Essas abordagens são essenciais para melhorar a previsão de eventos de precipitação severa, prevenir e mitigar os impactos de fenômenos meteorológicos adversos, garantir a segurança e fornecer infraestrutura adequada nas áreas afetadas.

Palavras-chave: GNSS; ZTD; IWV; iGMAS; RBMC; chuvas extremas; Rio de Janeiro; Belém.

ABSTRACT

Extreme rainfall events, concurrently triggered with floods, waterlogging and landslides, are temporally related to variations in zenith total delay (ZTD) and integrated water vapor (IWV) from the Global Navigation Satellite System (GNSS) meteorology. The relationship between ZTD/IWV variations and precipitation was investigated in this work, using means, time series, and case studies of extreme events in Rio de Janeiro between 2015 and 2018, and in Belém between 2010 and 2022. The GNSS data are from the International GNSS Monitoring and Assessment System (iGMAS) and the Brazilian Continuous Monitoring Network (RBMC), while the precipitation data come from the Rio de Janeiro City Hall Alert System (Alerta Rio), the National Institute of Meteorology (INMET), and the Vale Technology Institute (ITV). In the composition of the ZTD/IWV and precipitation time series in Rio de Janeiro, quasi-linear ramps followed by non-linear ramps were identified, with the highest rates of change and ZTD/IWV peaks occurring, respectively, 1–2 hours and 0.5 hours before the precipitation maxima, predominantly between 18:00 and 00:00 local time (LT). Case studies of extreme precipitation events during the rainy season revealed configurations in ZTD/IWV curves in the shape of: (i) oscillations named ‘asymmetric semisinusoid’ lasting 3–5 hours, formed by rapid vespertine growth in non-linear ramps, with an average rate of change at the inflection point of +11 (1.4) mm [15min]⁻¹; (ii) a jump with an average rate of change of +17.3 (+2.66) mm [15min]⁻¹ and a maximum of +21.3 (+3.33) mm [15min]⁻¹; (iii) elongated ramps and oscillations named ‘bumps’ that were sequentially staggered on the ascending ramps lasting 1–2 hours; and (iv) ‘bumps’ or ascending ramps in already elevated values of ZTD/IWV due to the influence of meteorological systems such as the Humidity Convergence Zone (in Portuguese *Zona de Convergência de Umidade*, ZCOU) or the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) (in Portuguese *Zona de Convergência do Atlântico Sul*, ZCAS). Events with large volumes of rainfall were identified, resulting in the elevation of river, *igarapé*, and canal levels, causing flooding in various locations in Belém. Three events occurred during the less rainy season with very heavy rainfall from Mesoscale Convective Systems (MCSs), and others during the rainy season under the main influence of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). The ZTD curves showed non-linear variations before and after significant rainfall events, with quasi-linear ascending ramps and peaks followed by descending ramps. As the events approached, the curves exhibited a ‘ZTD jumps’ configuration, with sudden increases preceding

heavy rainfall or occurring in multiple jumps during intense rain events over several hours. However, some ZTD/IWV curves showed semisinusoid, bump, or jump configurations without resulting in precipitation, highlighting the existence of false alarms. Installing meteorological stations alongside GNSS stations to measure at least precipitation, pressure, temperature, and relative humidity with a 5-minute resolution is essential for monitoring extreme weather events. It is recommended to expand the analyses to longer periods, identify significant configurations in ZTD and IWV time series, define critical thresholds, and use advanced and more complex techniques such as neural networks, wavelet analysis for ZTD/IWV time series, or tropospheric tomography. These approaches are essential to improve the prediction of severe precipitation events, prevent and mitigate the impacts of adverse meteorological phenomena, ensure safety, and provide adequate infrastructure in affected areas.

Keywords: GNSS; ZTD; IWV; iGMAS; RBMC; extreme rainfall events; Rio de Janeiro; Belém.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Elevação (m), com resolução espacial de 15” de arco de latitude e longitude (vide a referência de Danielson e Gesch (2011) para a fonte dos dados de elevação) de parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O contorno continental e insular é delineado pela isolinha de elevação de 1,5 m acima do nível médio do mar (NMM). As localizações das estações do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ONRJ e RIOD da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e da estação RDJN do *International GNSS Monitoring and Assessment System* (iGMAS), instalada no Observatório Nacional (ON) do Rio de Janeiro, e das estações meteorológicas (i) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na Vila Militar (INVM); (ii) do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2023) no São Cristóvão (ARSC), na Ilha do Governador (ARIG), na Penha (ARPE) e em Irajá (ARIR); e (iii) do iGMAS (RD, instalada junto à estação de GNSS RDJN). A denominação das estações meteorológicas foi adaptada neste trabalho. 36
- Figura 2 – Elevação (m), com resolução espacial de 15” de arco de latitude e longitude (vide a referência de Danielson e Gesch (2011) para a fonte dos dados de elevação) de parte da Região Metropolitana de Belém (RMBE). O contorno continental e insular é delineado pela isolinha de elevação de 1,5 m acima do NMM. As localizações das estações do GNSS BELE e BEPA da RBMC e da estação LPGS do iGMAS, instalada no Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), e das estações meteorológicas (i) do INMET (aqui denominada INBE); (ii) do Instituto Tecnológico Vale – ITV (aqui denominada ITV-UFPA); e (iii) do iGMAS (LPGS, instalada junto à estação de GNSS LPGS). 37

Figura 3 – Ciclo diurno médio, na hora local (HL), a cada intervalo de 15 minutos, no período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018, do (a) atraso troposférico zenital (ZTD, em m) com a média entre parênteses e o desvio padrão (STD) mínimo e máximo de todo o período nas estações RDJN, ONRJ e RIOD, e da taxa de variação (TV) mínima (min.), média (med.) e máxima (max.) de ZTD (mm hr^{-1}) na estação RDJN; (b) o mesmo que o item (a) exceto que para o vapor d'água integrado (IWV, em mm), e da TV min., med. e max. de IWV (mm hr^{-1}); e no painel adicional com o ciclo diurno médio da chuva acumulada (CA) a cada 15 minutos (barras estreitas) e a cada hora (barras espessas), ambas em unidades de mm [15min]^{-1} , das estações meteorológicas ARSC, ARIG, ARPE, ARIR e a média da CA nas 4 estações (MED), e com a média da CA (em mm ano^{-1}) de todo o período entre parênteses; e o total número de amostras (NA) da $CA \geq 0$ nos intervalos de 15 minutos. Os mínimos e máximos de ZTD e IWV, assim como os mínimos e máximos STDs de ZTD e IWV por estação estão indicados nos painéis correspondentes..... 44

Figura 4 – O mesmo que a Figura 3, exceto que para o ciclo diurno do (a) ZTD categorizado por $CA > 0$ e $CA = 0$ em cada intervalo de 15 minutos com a média entre parênteses e o STD_{\min} e STD_{\max} de todo o período na estação RDJN; e da TV média de ZTD, em unidades de mm [15min]^{-1} , na estação RDJN; (b) o mesmo que o item (a) exceto que para o IWV e da TV med. de IWV, em unidades de mm [15min]^{-1} ; e (c) do total do NA com $CA > 0$ e $CA = 0$ em 15 minutos registrada na estação meteorológicas ARSC; e o total NA com CA categorizada pelos 75°, 90°, 95° e 99° percentis, que são correspondentes aos limiares de 0,6, 1,8, 3,6 e 9,8 mm, respectivamente, nos intervalos de 15 minutos..... 47

Figura 5 – Composições de séries temporais no período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018 de eventos de precipitação com dados de GNSS_{RDJN} de (a) ZTD (m) e TV de ZTD (mm [15min]⁻¹); e (b) IWV (mm), TV de IWV (mm [15min]⁻¹), total NA mediados nas composições e média da CA em cada 15 minutos num intervalo de 6 horas e a min./med./max. STD de ZTD e IWV de todos os intervalos de 15 minutos das composições. As variáveis foram mediadas de acordo com as ocorrências de chuva acumulada nos intervalos de 6 horas nos instantes: (i) t=0 com CA≥3,6 mm [15min]⁻¹ nos intervalos de referência de 0600–12:00 HL, 12:00–18:00 HL, 18:00–00:00 e 00:00–06:00; e (ii) -5h45min≤t<-15min com 0≤CA<1,8 mm nas 5 horas e 45 minutos que antecederam os instantes t=0. As TVs min./med./max. de ZTD e IWV, em unidades de mm [15min]⁻¹, são correspondentes às mediações horárias das composições..... 49

Figura 6 – Estudos de caso na cidade do Rio de Janeiro [RJ1 | RJ2 | RJ3] em [15 de fevereiro de 2015 | 19 de fevereiro de 2016 | 16 de março de 2015] com 8 horas por cada caso das [1200–2000 | 1200–2000 | 1500–2300] HL de acumulados de 15 minutos de chuva das estações meteorológicas ARSC/ARIG/ARPE/ARIR do sistema Alerta Rio e dados das estações de GNSS RDJN/ONRJ/RIOD quando disponíveis: (a) ZTD (m), média mensal de ZTD (m) e CA (mm [15min]⁻¹); e (b) IWV (mm), média de IWV (mm) e CA (mm [15min]⁻¹). Os máximos e os mínimos de ZTD e IWV estão com os símbolos destacados nas respectivas curvas. O acumulado de chuva de cada período dos 3 casos está descrito ao lado da identificação da estação meteorológica. Os máximos valores de ZTD, IWV e CA estão indicados de acordo com as cores das curvas das respectivas estações e próximos aos eixos das ordenadas. As linhas com traços longos e em preto indicam os valores da chuva nos percentis 75°, 90°, 95° e 99° correspondentes aos limiares de chuva de 0,6, 1,8, 3,6 e 9,8 mm que também estão indicados nas ordenadas do lado esquerdo ou direito. As médias de ZTD e IWV são referentes ao ciclo diurno mensal médio do período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018. Os valores min., med. e max. horário da TV de ZTD (IWV) em mm [15min]⁻¹ dos dados das estações disponíveis estão plotados abaixo dos eixos das abscissas. Os valores em preto são de TV de ZTD (IWV) a cada hora maiores que +10 (+2) mm [15min]⁻¹ ou menores que -10 (-2) mm [15min]⁻¹. 52

Figura 7 – O mesmo que a Figura 6, exceto que para os casos [RJ4 RJ5 RJ6] de [29 de março de 2015 12 de março de 2016 12 de dezembro de 2016] com 8 horas por cada caso das [1400–2200 1400–2200 1300–2100] HL.....	57
Figura 8 – O mesmo que a Figura 7, exceto que para o caso RJ7 das 13:00 HL do dia 19 até às 13:00 HL do dia 20 de novembro de 2017.	63
Figura 9 – O mesmo que a Figura 8, exceto que só para as variáveis ZTD, média de ZTD, valores min., med. e max. horário da TV de ZTD e CA nos casos (a) RJ8 do dia 11 de janeiro de 2011 de 0000–24:00 HL; e (b) RJ9 do dia 8 às 12:00 HL até o dia 9 de abril de 2019 às 12:00 HL.	65
Figura 10 – Ciclo diurno médio da CA (em mm hr ⁻¹) e série temporal de dados mensais e anuais (em mm mês ⁻¹) da CA horária nas estações meteorológicas do ITV (ITV-UFPA) e INMET (INBE), cobrindo o período de novembro de 2015 a dezembro de 2018. Os painéis (a) e (b) exibem os totais e médias dos dados horários da CA que coincidem entre as estações ITV-UFPA e INBE, enquanto os painéis (c) e (d) apresentam todos os dados disponíveis e independentes de ITV-UFPA e INBE. As contribuições mensais da CA são visualizadas por meio de barras coloridas: barras vermelhas representam o total mensal de chuva com o critério da CA ≥ 0 mm hr ⁻¹ ; barras douradas indicam o total mensal das ocorrências da CA ≥ 9,6 mm hr ⁻¹ na categoria de chuva moderada-a-forte, forte e muito-forte; e barras verdes destacam o total mensal onde a CA foi igual ou superior a 15,4 mm hr ⁻¹ na categoria de chuva forte e muito-forte. Além disso, as médias mensais da CA, expressos em mm mês ⁻¹ , são representados pelas barras cinzas. Os valores da média total anual da CA, expressos em mm ano ⁻¹ , estão apresentados entre colchetes nos topos dos painéis, conforme os critérios estabelecidos para as contribuições. As linhas horizontais representam as médias (em mm mês ⁻¹) da CA de acordo com a categoria dos dados apresentados.	71
Figura 11 – Média da temperatura de brilho (T _b) do topo de nuvens no canal infravermelho (IR) do período de 2000 a 2015 entre as longitudes de 52°W a 46°W e latitudes de 4°S a 2°N nas resoluções temporal de 30 minutos e espacial de 4 × 4 km.....	76

Figura 12 – O mesmo que a Figura 11, exceto que das médias sazonais para os períodos de dezembro–janeiro–fevereiro (DJF), março–abril–maio (MAM), junho–julho–agosto (JJA) e setembro–outubro–novembro (SON).	77
Figura 13 – O mesmo que a Figura 11, exceto que para o ciclo diurno médio entre os horários das 13:00 às 00:30 HL.	79
Figura 14 – Ciclo diurno sazonal médio de T_b nos pontos de grades mais próximos das estações INBE e ITV-UFPA.	81
Figura 15 – Séries temporais, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022, a cada 15 minutos, do (a) ZTD corrigido ao nível médio do mar (NMM) das estações de GNSS LPGS, BEPA e BELE, respectivamente em vermelho, verde-oliva e azul. Além disso, é mostrada a média mensal do ZTD de todo o período, representada nas cores correspondentes em azul-celeste, verde-oliva-claro e laranja. A amplitude min., med. e max. diária do ZTD mensal médio de todo o período (em milímetros) estão indicadas junto ao nome das estações. As médias anuais do ZTD nas três estações, que são independentes temporalmente umas das outras, estão indicadas nas linhas horizontais e entre parênteses no subtítulo do painel (a). No painel (b), é apresentada a média mensal sequencial do ZTD. As amplitudes min., med. e max. do ZTD mensal sequencial médio estão indicadas entre parênteses no subtítulo do painel (b).	83
Figura 16 – Séries temporais, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022, da precipitação na estação INBE acumulada (a) a cada hora (mm hr^{-1}); e (b) por mês (mm mês^{-1}), representada na cor amarela, juntamente com a média mensal da CA, correspondendo a uma climatologia da CA, na cor verde. As médias anuais estão indicadas entre parênteses no título e no subtítulo do painel (b).	84

Figura 17 – Ciclo diurno médio anual, no período de dezembro de 2018 a março de 2022, do ZTD ao nível médio do mar (NMM) (m), a cada 15 minutos, dos dados (a) de LPGS (vermelho), BEPA (verde-oliva) e BELE (azul) nos horários coincidentes; (b) de LPGS e BELE nos horários coincidentes; e (c) de LPGS, BEPA e BELE nos horários independentes. No painel (d) está o ciclo diurno médio anual da CA (mm hr^{-1}) da estação INBE (barras verdes). Os valores totais da CA e médios anuais do ZTD estão indicados nos subtítulos..... 87

Figura 18 – Ciclo diurno médio anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) no período de julho de 2014 a novembro de 2022 (i) da CA (mm hr^{-1}) registrada na estação INBE (barras verdes para anual e amarelas para sazonal) a cada hora, nos painéis do lado esquerdo; e (ii) do ZTD ao NMM (m) a cada 15 minutos e nos dados coincidentes das estações de GNSS BELE (curvas em azul-celeste para anual e em azul para sazonal) e BEPA (curvas em marrom para anual e em verde-oliva para sazonal) do lado direito. Os máximos e mínimos de ZTD estão indicados nas curvas dos painéis correspondentes. As médias anuais e sazonais da CA e do ZTD estão indicados no título e nos subtítulos para BELE e BEPA entre parênteses. 90

Figura 19 – Estudo de Caso BE1 em Belém, com ênfase no evento de 7 de maio de 2018, entre 16:00 e 17:00 HL. O painel (a) apresenta dados de ZTD (em metros) e a média mensal de ZTD, determinados a cada 15 minutos pelas estações de GNSS LPGS, BELE e BEPA. Além disso, são mostradas a CA (em mm hr^{-1}) das estações meteorológicas ITV-UFPA e INBE, representadas respectivamente em barras azuis-celestes e verdes. Os tons de verde variam com a intensidade da chuva: verde-claro para $CA \geq 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$, verde-intermediário para $9,4 \leq CA < 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$, e verde-escuro para $CA < 9,4 \text{ mm hr}^{-1}$. Os valores máximos da CA, durante a pêntada estudada, estão dispostos à esquerda do eixo das ordenadas, enquanto à direita são apresentados os limiares de 3,4, 9,6, 15,4 e 29,6 mm hr^{-1} , correspondentes aos percentis 75°, 90°, 95° e 99°. Estes limiares indicam a classificação da chuva quanto à intensidade – leve, moderada, moderada-a-forte, forte e muito-forte – com base nos dados históricos de janeiro de 2010 a dezembro de 2022 da estação INBE. Os valores de $0 < CA < 1 \text{ mm hr}^{-1}$, bem como o 50° percentil (mediana dos dados, valor de 0,8 mm hr^{-1}), estão indicados nas barras abaixo do eixo da abscissa. O painel (b) exhibe a média horária da Temperatura do ar (T, em °C) e a média mensal de T. O painel (c) apresenta a média horária da Umidade Relativa do ar (UR, em %) e a média mensal de UR. O painel (d) apresenta a máxima rajada horária (em m s^{-1}) e a média mensal da máxima rajada horária. Os painéis (b) e (c) incluem também os dados da estação meteorológica LPGS, apresentados na resolução temporal de 15 minutos e coloridos em vermelho. Os dados das estações ITV-UFPA e INBE para os itens (b), (c) e (d) foram interpolados para serem apresentados também na resolução temporal de 15 minutos. As médias mensais referem-se ao período de janeiro de 2010 a novembro de 2022, quando disponíveis. [Fonte: Elaborada pelo autor]..... 95

Figura 20 – O mesmo que a Figura 19, exceto que para estudo de caso BE2 do dia 3 de fevereiro de 2018 das 20:00 às 21:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor]..... 97

Figura 21 – O mesmo que a Figura 20, exceto que para estudo de caso BE3 do dia 7 de março de 2020 das 10:00 às 11:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor]..... 100

Figura 22 – O mesmo que a Figura 21, exceto que para estudo de caso BE4 do dia 7 de abril de 2018 de 00:00 a 01:00 HL e 10 de abril de 2018 das 12:00 às 13:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor]..... 102

Figura 23 – O mesmo que a Figura 22, exceto que para estudo de caso BE5 do dia 10 de junho de 2019 das 21:00 às 22:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor].....	104
Figura 24 – O mesmo que a Figura 23, exceto que para estudo de caso BE6 do dia 31 de agosto de 2022 das 16:00 às 17:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor].....	106
Figura 25 – O mesmo que a Figura 24, exceto que para estudo de caso BE7 do dia 3 de novembro de 2022 das 15:00 às 16:00 HL. [Fonte: Elaborada pelo autor].	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

abr	abril
AGO, ago	agosto
Alerta Rio	Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro
ARIG	Estação meteorológica do Alerta Rio na Ilha do Governador
ARIR	Estação meteorológica do Alerta Rio em Irajá
ARPE	Estação meteorológica do Alerta Rio na Penha
ARSC	Estação meteorológica do Alerta Rio em São Cristóvão
BE	Belém
CA	Chuva acumulada
CAS	<i>Chinese Academy of Sciences</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DEZ, dez	dezembro
DJF	dezembro-janeiro-fevereiro
ENSO	El Niño/Oscilação Sul
FEV, fev	fevereiro
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite (<i>Global Navigation Satellite System</i>)
GPS	<i>Global Positioning System</i>
h, hr	hora(s)
HL	Hora local
IG	Instituto de Geociências
iGMAS	<i>International GNSS Monitoring and Assessment System</i>

INBE	Estação meteorológica do INMET em Belém
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INVM	Estação meteorológica do INMET na Vila Militar
IR	Infravermelho
ITCZ	<i>Intertropical Convergence Zone</i>
ITV	Instituto Tecnológico Vale
IWV	Vapor d'água integrado (<i>integrated water vapor</i>)
jan	janeiro
JJA	junho-julho-agosto
jul	julho
jun	junho
LT	<i>Local time</i>
mai	maio
MAM	março-abril-maio
MAR, mar	março
max.	máximo(a)
MCS	<i>Mesoscale Convective System</i>
med.	médio(a)
min	minuto(s)
min.	mínimo(a)
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NA	Número de amostras
NMM	Nível médio do mar
nov	novembro

ON	Observatório Nacional
out	outubro
PWV	<i>Precipitable water vapor</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RD	Estação meteorológica do iGMAS
RJ	Rio de Janeiro
RMBE	Região Metropolitana de Belém
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
SACZ	<i>South Atlantic Convergence Zone</i>
SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
set	setembro
SHAO	<i>Shanghai Astronomical Observatory</i>
SON	setembro-outubro-novembro
STD	Desvio padrão
Tb	Temperatura de brilho
TV	Taxa de variação
UFPA	Universidade Federal do Pará
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade
ZHD	Atraso zenital hidrostático (<i>zenith hydrostatic delay</i>)
ZTD	Atraso zenital total (<i>zenith tropospheric delay</i> ou <i>zenith total delay</i>)
ZWD	Atraso zenital úmido (<i>zenith wet delay</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	gradiente vertical de temperatura (lapse rate de temperatura)
φ	latitude
%	porcentagem
ρ_v	densidade de vapor d'água
”	segundo de arco
°C	Grau Celsius
g	aceleração devido a gravidade
g_m	aceleração média da gravidade
g_0	$9,80665 \text{ m s}^{-2}$
h	altitude do local acima do NMM
H	altura da superfície acima do elipsoide ou escala da altura
1/H	inverso da escala da altura
hr	hora(s)
k_1, k_2, k_3, k_2'	constantes de refratividade
m	metro
mm	milímetro
min	minuto(s)
M_d	massa molar do ar seco
M_v	massa molar do vapor d'água
P_s	pressão atmosférica à superfície (nível do receptor)
R_d	constante dos gases para o ar seco

R_v	constante dos gases para o vapor d'água
s	segundo
T	temperatura do ar
T_m	temperatura média da coluna de ar vertical
T_s	temperatura à superfície (nível do receptor)
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Chuvas extremas na cidade do Rio de Janeiro	26
1.2 Chuvas e marés em Belém	28
1.3 GNSS meteorologia	29
1.4 Objetivos e descrição do trabalho	32
2 MATERIAIS E MÉTODOS	34
2.1 Estações e dados meteorológicos	34
2.2 ZTD e IWV derivados de GNSS	38
3 ZTD E IWV E AS PRECIPITAÇÕES SEVERAS NO RIO DE JANEIRO	43
3.1 Ciclo diurno médio de ZTD, IWV e de chuva no Rio de Janeiro	43
3.2 Composições de ZTD/IWV e chuva acumulada	48
3.3 Estudos de caso de chuvas extremas no Rio de Janeiro	50
3.3.1 Rampas ascendentes e descendentes, semissenóides e saltos de ZTD e IWV	51
3.3.2 Rampas ascendentes alongadas e protuberâncias escalonadas de ZTD e IWV	56
3.3.3 Estudos de caso RJ7, RJ8 e RJ9: protuberâncias em elevado ZTD/IWV	61
4 ZTD E AS PRECIPITAÇÕES SEVERAS EM BELÉM	70
4.1 Comparações da chuva mensal e anual e ciclo diurno médio de precipitação	70
4.2 Relações entre o ZTD e a chuva na região de Belém	82
4.3 Estudos de caso de chuvas extremas em Belém	92
4.3.1 Estudo de caso BE1	94
4.3.2 Estudo de caso BE2	96
4.3.3 Estudo de caso BE3	99
4.3.4 Estudo de caso BE4	101
4.3.5 Estudo de caso BE5	103
4.3.6 Estudo de caso BE6	105
4.3.7 Estudo de caso BE7	107
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	110
5.1 Discussão dos resultados	110
5.2 Conclusões	124
REFERÊNCIAS	128

APÊNDICE A – Normais Climatológicas das precipitações mensais e anuais (mm).	142
APÊNDICE B – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em DJF no período de 2000–2015.	143
APÊNDICE C – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em MAM no período de 2000–2015.	144
APÊNDICE D – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em JJA no período de 2000–2015.	145
APÊNDICE E – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em SON no período de 2000–2015.	146
APÊNDICE F – Médias anual e sazonal e ciclo diurno da CA (INMET) e ZTD ao NMM (BELE e BEPA) no período de 2010 A 2022.	147
APÊNDICE G – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 06/05/2018 das 14:00 às 21:00 HL.	148
APÊNDICE H – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 07/05/2018 das 14:00 às 21:00 HL.	149
APÊNDICE I – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 03/02/2018 das 08:00 às 15:00 HL.	150
APÊNDICE J – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 03/02/2018 das 16:00 às 23:00 HL.	151
APÊNDICE K – Imagem do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 03/02/2018 às 20:00 HL.	152
APÊNDICE L – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 07/03/2020 das 05:00 às 13:00 HL.	153
APÊNDICE M – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 09/03/2020 das 01:00 às 08:00 HL.	154
APÊNDICE N – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 06/04/2018 das 15:00 às 22:00 HL.	155
APÊNDICE O – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 06–07/04/2018 das 23:00 às 06:00 HL.	156
APÊNDICE P – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 10/04/2018 das 12:00 às 21:00 HL.	157
APÊNDICE Q – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 10/06/2019 das 19:00 às 02:00 HL.	158
APÊNDICE R – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 30/08/2022 das 16:00 às 22:00 HL.	159
APÊNDICE S – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 31/08/2022 das 14:00 às 17:30 HL.	160

APÊNDICE T – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 03/11/2022 das 14:00 às 21:00 HL.....	161
APÊNDICE U – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 04/11/2022 das 10:00 às 17:00 HL.....	162
ANEXO A – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 15/02/2015 das 19:00 às 22:00 Z.....	163
ANEXO B – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 19/02/2016 das 19:00 às 22:00 Z.....	164
ANEXO C – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 15/03/2015 das 20:30 às 23:30 Z.....	165
ANEXO D – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 29/03/2015 das 20:30 às 23:30 Z.....	166
ANEXO E – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 12/03/2016 das 20:30 às 23:30 Z.....	167
ANEXO F – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 12/12/2016 das 20:00 às 23:00 Z.....	168
ANEXO G – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 20/11/2017 das 02:00 às 05:00 Z.....	169
ANEXO H – Imagens do satélite GOES 12: 11/01/2011 das 00:15 e 01:28 Z.....	170
ANEXO I – Imagens do satélite GOES 12: 11/01/2011 das 21:15 e 23:45 Z.....	171
ANEXO J – Imagens do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) - 09/04/2019 das 00:00 às 03:00 Z.....	172
ANEXO K – Imagens do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) - 09/04/2019 das 08:00 às 11:00 Z.....	173

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A análise detalhada da distribuição da precipitação e suas variações é essencial para a compreensão das dinâmicas atmosféricas em múltiplas escalas. Fenômenos atmosféricos na América do Sul, impulsionados por fontes de calor latente, como sistemas convectivos de mesoescala (SCMs), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT ou *Intertropical Convergence Zone-ITCZ* em inglês), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS ou *South Atlantic Convergence Zone-SACZ* em inglês) e os fenômenos El Niño/Oscilação Sul (ENOS ou *El-Niño/Southern Oscillation-ENSO* em inglês), frequentemente apresentam impactos significativos nas esferas social e econômica. Estes fenômenos estão geralmente associados a eventos meteorológicos extremos, que podem resultar em chuvas torrenciais, inundações, deslizamentos de terra e alagamentos, levando a consequências sociais e infraestruturais graves.

A redução da precipitação também tem efeitos adversos, manifestados como anomalias negativas, especialmente no setor agrícola e na produção hidroelétrica, afetando significativamente as bacias hidrográficas do continente. O monitoramento ativo de eventos meteorológicos e climatológicos extremos é fundamental para mitigar os riscos relacionados a essas anomalias. Essa necessidade é particularmente crítica em regiões carentes de infraestrutura robusta para gerenciamento de água e resíduos, planejamento urbano e engenharia de tráfego, agravada por fatores geográficos e topográficos específicos.

1.1 Chuvas extremas na cidade do Rio de Janeiro

A cidade do Rio de Janeiro, situada na Região Sudeste do Brasil, é um exemplo emblemático de vulnerabilidade a chuvas intensas. A cidade ostenta três extensas cadeias montanhosas adornadas com vegetação, cercadas por áreas urbanas e suburbanas densamente povoadas. Essas áreas montanhosas registram os maiores acumulados de precipitações anuais na cidade, conforme observado por Dereczynski, Oliveira e Machado (2009). Os eventos de chuvas mais intensas na região são atribuídos às incursões de sistemas frontais oriundos de sul ou sudoeste, passando pela topografia complexa ao longo do ano. Assim como também podem ser sucedidos pelo surgimento de uma Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), ZCAS (Kousky; Cavalcanti, 1988; Kodama, 1992; Kodama, 1993; Quadro, 1993; Carvalho; Jones; Liebmann, 2002, 2004;

Andrade, 2011; Reboita *et al.*, 2012; Amorim *et al.*, 2020), SCMs, especialmente durante o verão, e/ou ocorrências associadas a sistemas de convergência de brisa marítima.

O registro histórico de eventos severos de precipitação, deslizamentos de terra e inundações no Rio de Janeiro data dos tempos coloniais do século XVI, com documentação oficial disponível desde o século XVIII (Costa, 2001; Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente da COPPE/UFRJ, 2001). A probabilidade de ocorrências máximas anuais de chuvas diárias no Brasil foi examinada por Carvalho *et al.* (2014), revelando uma vulnerabilidade aumentada nas Regiões Sul e Sudeste a eventos perigosos extremos de precipitação, impactando a produção agrícola e áreas urbanas. Registros históricos de chuvas intensas, documentados por Dereczynski, Calado e Bodstein (2017), examinaram 82 eventos com acúmulo de chuva superior a 100 mm em 24 horas ao longo de 63 anos, de 1881 a 1996, com as ocorrências mais altas durante as estações de verão (40%) e outono (40%). Pristo *et al.* (2018) utilizaram dados do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2020) de 1997 a 2016, investigando a climatologia de eventos de chuva para grandes acumulações diárias e chuvas intensas observadas a cada 15 minutos, associadas a riscos para a população.

Os processos de crescimento urbano desorganizado, uso e ocupação irregular do solo urbano, juntamente com deficiências na drenagem de água, são os principais fatores que contribuem para deslizamentos de terra relacionados a chuvas extremas e desastres de inundação no município do Rio de Janeiro, conforme indicado por Silva, Loureiro e Silveira (2010). A investigação de Ferreira e Cunha (1996) sobre eventos de inundação nos distritos do Rio de Janeiro destacou o evento extremo de 13 a 14 de fevereiro de 1996, com um acúmulo total de chuva de 306 mm em 24 horas, causando inundações com alturas de até 2,5 m. Esse evento resultou de uma incursão de sistema frontal, sua passagem sobre topografia complexa e sua combinação com células convectivas locais, causando inúmeras fatalidades e deslocando centenas de residentes.

O registro de chuva de 360,2 mm em 24 horas em 6 de abril de 2010, considerado pelo sistema Prefeitura do Rio de Janeiro (2020) como um dos eventos mais perigosos de deslizamento de terra desencadeado por chuvas até aquela data, resultou em colapsos significativos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) (Silva; Loureiro; Silveira, 2010; D’Orsi, 2016). Os deslizamentos de terra e inundações mais catastróficos ocorreram nas terras altas do estado Rio de Janeiro em 11 a 12 de janeiro de 2011, resultando em 916 mortes e deixando milhares de pessoas sem abrigo, conforme descrito por Pinheiro, Andrade e Moura (2011). Enquanto os modelos

meteorológicos forneceram avisos do padrão geral de precipitação causado pela ZCAS para a região naquela ocasião, enfrentaram limitações na representação da intensidade das chuvas e nas localizações precisas de eventos de chuva extrema. Além disso, como discutido por Coelho Netto *et al.* (2013), alguns eventos de deslizamento de terra foram desencadeados simultaneamente com instâncias de chuvas intensas, enquanto muitos outros não mostraram uma relação direta com o momento de chuvas intensas. Eles também especularam que raios poderiam ter induzido vibrações e sons muito-fortes, desencadeando deslizamentos de terra não diretamente relacionados à chuva, com base em relatos de testemunhas de eventos catastróficos e marcas locais de impacto de raios observadas.

Medidas de mitigação em todo o mundo, incluindo no estado Rio de Janeiro, foram implementadas para reduzir os riscos de inundações e deslizamentos de terra induzidos por chuvas. Essas medidas incluem alertas fornecidos por instituições como o Alerta Rio, o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet, 2019), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2019a) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden, 2019). Modelos de sistemas de alerta precoce de deslizamentos de terra (LEWSs), descritos por Piciullo, Calvello e Cepeda (2018) e Calvello e Piciullo (2016), geralmente dependem do monitoramento de chuvas por pluviômetros e previsões de modelagem meteorológica.

1.2 Chuvas e marés em Belém

A Região Metropolitana de Belém (RMBE), localizada na Região Norte do Brasil, é caracterizada por um terreno plano e de baixa altitude, é também suscetível a inundações, causando interrupções às populações nas vias e residências ao longo de canais, riachos (igarapés) e rios. A parte continental de Belém é limitada ao sul, oeste e norte por grandes corpos d'água — o Rio Guamá, Baía do Guajará e Baía do Marajó. Esses cursos d'água recebem drenagem de canais, riachos e rios na região. No entanto, durante as marés altas, especialmente durante as marés de sizígia, combinadas com chuvas frequentes, o fluxo de água se move em direção ao interior da cidade por meio das redes fluviais.

Essa região é conhecida por suas significativas acumulações anuais de precipitação, com altas taxas mensais de chuva, particularmente de dezembro a maio, conforme estudos de Nechet (1984, 1993), Moraes e Francisco Filho (2018), e Rebelo *et al.* (2023). Tempestades severas

ocorrem ao longo do ano, contribuindo para as médias climatológicas que superam 3000 mm (Nechet, 1993; Bastos *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2016; Figueroa; Nobre, 1990; Legates, 1987; Legates; Willmott, 1990; Nimer, 1989; Hoffman, 1975).

A estação chuvosa, de dezembro a maio, nas regiões norte e nordeste do estado do Pará e Amapá, é profundamente influenciada pela ZCIT. A interação da ZCIT com as circulações locais e os contrastes térmicos entre o continente e o oceano resulta em um padrão climático complexo e distinto (Souza; Cunha, 2010; Hastenrath; Heller, 1977; Hastenrath; Lamb, 1977; Vianello; Alves, 1991). Esses fatores, juntamente com a convergência dos ventos alísios, são cruciais para a distribuição de chuva nessas regiões. A convergência destes ventos nas costas norte da América do Sul promove a formação de linhas de instabilidade que se movem em direção ao interior da Amazônia, gerando bandas de precipitação ao longo de todo o ano (Kousky, 1980; Garstang *et al.*, 1994; Greco *et al.*, 1994; Cohen; Silva Dias; Nobre, 1997; Adams *et al.*, 2015). Esta dinâmica, reforçada pelas características geográficas e termodinâmicas da região, resulta em um ambiente propício para a formação de chuvas intensas, especialmente durante a estação chuvosa.

A região de Belém, em particular, frequentemente lida com problemas relacionados a inundações (Moreira *et al.*, 2019; Campos; Mota; Santos, 2015; Silva Júnior, 2018), especialmente quando chuvas intensas coincidem com marés altas durante as fases de Lua Nova e Lua Cheia, causando a elevação das águas nas redes pluviais da cidade. No entanto, de acordo com Silva Júnior e Costa (2010) e Silva Júnior *et al.* (2011), na ausência de influência de marés altas, chuvas superiores a 35 mm em um curto período são suficientes para induzir inundações na cidade. Entretanto, eventos de chuva superiores a 10 mm, coincidindo com marés altas, também causam inundações e alagamentos na cidade. Assim como no Rio de Janeiro, os processos de crescimento urbano desordenado, o uso e ocupação irregular do solo urbano, juntamente com deficiências na drenagem de água e na organização do tráfego, são fatores que contribuem para agravar a situação caótica relacionada aos grandes volumes de chuva na cidade de Belém.

1.3 GNSS meteorologia

Enquanto as previsões meteorológicas avançaram por meio de iniciativas governamentais e desenvolvimentos metodológicos, exemplificados pela proposta de Barcellos (2009) para a previsão imediata de eventos climáticos extremos com base em parâmetros meteorológicos, as

últimas décadas testemunharam a consolidação de uma ferramenta adicional para monitorar indiretamente chuvas intensas. Trata-se do vapor d'água integrado (IWV — *integrated water vapor*) que é parâmetro meteorológico que pode ser derivado do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS — *Global Navigation Satellite System*). Apesar de o IWV ser uma integração da massa total de vapor d'água em uma coluna de ar atmosférico, ou seu equivalente de vapor d'água precipitável (PWV — *precipitable water vapor*), calculado a partir do atraso troposférico zenital (ZTD — *zenith tropospheric delay*, também conhecido como *zenith total delay*) derivado do GNSS, observações empíricas correlacionaram extensivamente o IWV, assim como também o ZTD, com chuvas intensas e convecção profunda, conforme demonstrado em investigações na Amazônia por Adams *et al.* (2011, 2013, 2015) e Adams, Fernandes e Maia (2011). Os estudos de Adams *et al.* (2013) em Manaus que observaram a configuração de PWV como uma rampa quase linear de aumento de PWV seguida por uma rampa de crescimento não linear e mais acentuada antecedendo eventos de precipitação intensa.

Documentação recente no Brasil explora a associação da variação GNSS-IWV com chuvas intensas. O termo “saltos de *Global Positioning System* (GPS)-PWV” (GPS-PWV *jumps*) foi introduzido por Sapucci *et al.* (2019) para descrever um aumento acentuado na PWV observado antes de eventos intensos de chuva durante um experimento de campo em uma região de vale no estado de São Paulo de novembro a dezembro de 2011. Sapucci *et al.* (2017) discutiram a eficiência e o potencial de uma nova aplicação GNSS para prever imediatamente eventos extremos de chuva, utilizando dados GNSS da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo — RBMC (Fortes, 1996; Fortes *et al.*, 1998), disponíveis online por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018, 2019). Outro estudo recente avaliou a relação entre aumentos acentuados e diminuições súbitas nas séries temporais do PWV entre uma hora ou 30 minutos antes dos picos de GPS-PWV e antecipando as chuvas intensas provenientes de sistemas convectivos observados em Belém (Campos *et al.*, 2023).

A instalação em 2014 no Observatório Nacional (ON) do Rio de Janeiro e em 2017 no Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) das estações de GNSS nomeadas RDJN e LPGS, respectivamente, representaram uma valiosa fonte adicional de dados brutos de observação e monitoramento, beneficiando, dentre outras, diversas aplicações em meteorologia e climatologia. Esses conjuntos de dados das estações resultaram de um objetivo delineado pelo programa *International GNSS Monitoring and Assessment System* (iGMAS), que

visa promover o monitoramento de GNSS em escala global. Essa iniciativa surgiu a partir de acordos estabelecidos entre o Observatório Astronômico de Xangai (SHAO — *Shanghai Astronomical Observatory*), pertencente à Academia Chinesa de Ciências (CAS — *Chinese Academy of Sciences*) e entre o ON do Brasil; e entre o SHAO e a UFPA.

Mota, Song e Stępniaik (2019) avaliaram a distribuição espaço-temporal do IWV nas cidades do Rio de Janeiro e Campos dos Goytacazes, no estado do Rio de Janeiro, em que incorporaram dados de GNSS das estações do iGMAS e do RBMC, dos dados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e de radiossondas, abrangendo o período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018. Esse trabalho revelou diferenças significativas nas temperaturas e umidade relativa entre as estações meteorológicas e entre o GNSS-IWV e o IWV derivado de radiossondas no Rio de Janeiro, especialmente durante o período noturno. Comparações entre o GNSS-IWV e o GNSS-ZTD da estação RDJN em relação à estação ONRJ do RBMC demonstraram a utilidade dos dados de GNSS meteorologia para investigar a distribuição de vapor d'água e precipitação naquela região.

Inúmeros estudos têm utilizado globalmente estimativas do ZTD e IWV derivadas do GNSS para antecipar eventos de chuva intensa. Bonafoni *et al.* (2019) forneceram uma revisão abrangente das contribuições dos receptores baseados em solo (GB) e de rádio ocultação (RO) para entender e prever condições climáticas severas. Eles destacaram os impactos positivos das observações GNSS GB e RO na pesquisa e previsão do clima, focando em chuvas intensas em trabalhos de Iwabuchi *et al.* (2003), Van Baelen e Penide (2009), Li e Deng (2009), Priego *et al.* (2017), Sapucci *et al.* (2019), Huelsing *et al.* (2017) e Barindelli *et al.* (2018). Esses estudos documentaram a variação temporal do IWV antes e após o início de chuvas intensas.

Variações temporais do vapor d'água em relação a chuvas intensas foram analisadas no norte da Itália sob diferentes situações. O pico do PWV foi observado em todas as estações de GNSS afetadas por uma frente de chuva generalizada, seguido por uma queda acentuada à medida que nuvens de chuva passavam pela região. No caso de chuvas intensas em escala convectiva, não foram observadas variações na rede de GNSS, mas foram detectadas em uma estação de baixo custo próxima à área de interesse (Barindelli *et al.*, 2018).

Bianchi *et al.* (2016) utilizaram dados IWV e ZTD de vários anos sobre a América do Sul e Central para investigar estudos climáticos. Eles encontraram evidências de secagem troposférica sobre regiões temperadas, contrastando com sugestões de um umedecimento lento.

Os últimos anos testemunharam avanços consideráveis na compreensão da variabilidade dos padrões de circulação atmosférica sobre a América do Sul e os oceanos adjacentes, utilizando tanto ferramentas tradicionais quanto sensoriamento remoto, incluindo a GNSS meteorologia. No entanto, são necessários mais estudos sobre as aplicações de dados GNSS para prever e aprimorar ações de mitigação de riscos causados por fenômenos meteorológicos e climáticos intensos, como nas cidades do Rio de Janeiro e Belém.

1.4 Objetivos e descrição do trabalho

Este trabalho visa expandir a compreensão dos complexos padrões meteorológicos e oferecer insights para a mitigação dos riscos associados a eventos extremos de chuva. O principal objetivo deste estudo é aplicar dados de GNSS meteorologia para investigar a relação entre a variabilidade do ZTD e IWV e as chuvas extremas em áreas propensas, como nas cidades do Rio de Janeiro e Belém, que possuem estações de GNSS do iGMAS e da RBMC. Isso envolve os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar a relação entre ZTD e IWV — provenientes das duas redes de GNSS —, ambos processados em intervalos de 15 minutos, em correlação com dados de chuva de mesma periodicidade. Essa investigação inclui o uso de médias, ciclo diurno, composições e estudos de caso de eventos extremos de chuva no Rio de Janeiro;
- b) examinar as séries temporais de ZTD, a cada 15 minutos, e precipitação, com uma resolução temporal de uma hora em Belém, cobrindo o período de 2010 a 2022;
- c) estudar o ciclo diurno de ZTD e precipitação em Belém, durante o mesmo período, para identificar padrões e tendências significativas;
- d) examinar as médias anuais, sazonais e o ciclo diurno médio das temperaturas de brilho (Tbs) do topo de nuvens no canal infravermelho (IR), para auxiliar no estudo da distribuição e variabilidade tempo-espacial das nuvens convectivas; e
- e) investigar em estudos de caso específicos de ZTD, processados a cada 15 minutos, a variação deste parâmetro e sua relação com os eventos de chuvas intensas em Belém.

A descrição das regiões e das estações, da metodologia empregada nos dados de ZTD e IWV derivados de GNSS, e dados meteorológicos aplicados neste trabalho é apresentada no

próximo capítulo. No capítulo 3 é aplicado GNSS meteorologia através de composições e estudos de caso de extrema precipitação e suas relações com ZTD e IWV no Rio de Janeiro. No capítulo 4 é aplicado GNSS meteorologia através da investigação de séries temporais e estudos de caso de intensa precipitação e a sua relação com o ZTD em Belém. No capítulo 5 são expostas as discussões dos resultados, as conclusões e sugestões para ações e pesquisas futuras vinculadas às relações das variáveis IWV e ZTD derivados de GNSS e a precipitação intensa.

CAPÍTULO 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de GNSS meteorologia tem atraído a atenção da comunidade científica internacional devido à sua comprovada eficácia na estimativa do vapor d'água atmosférico com alta resolução temporal, independência das condições meteorológicas e relativamente baixo custo. Diferentes tipos de equipamentos de recepção e técnicas de processamento dos dados de GNSS têm sido continuamente aperfeiçoados, juntamente com a integração de seus produtos com outros dados de sensoriamento remoto por satélites e de superfície, para aplicações em áreas que demandam esses conhecimentos.

Este capítulo explora a metodologia aplicada aos produtos ZTD e IWV, derivados dos dados de GNSS meteorologia, além dos dados complementares utilizados no estudo proposto. O foco está na relação dessas variáveis com a precipitação intensa e outros parâmetros meteorológicos nas cidades do Rio de Janeiro e Belém.

2.1 Estações e dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho são de temperatura do ar (T , em $^{\circ}\text{C}$), pressão atmosférica (P , em hPa) ao nível da estação e de umidade relativa (UR , em %), que são correspondentes às médias horárias ou do período de 15 min; enquanto a chuva acumulada (CA , em mm) corresponde ao acumulado no período de 1 hora ou 15 min; e as rajadas de vento (em ms^{-1}) equivalentes à máxima velocidade do vento do intervalo de 1 hora. Estes dados são provenientes das redes de observação em superfície do INMET, do Alerta Rio, do iGMAS (instalada no ON no Rio de Janeiro) e do Instituto Tecnológico Vale (ITV). Os dados meteorológicos à superfície utilizados têm resolução temporal de 1 hora para as estações automáticas do INMET e do ITV, enquanto aqueles do Alerta Rio e do iGMAS¹ são de 15 minutos. Também são utilizadas como comparação as Normais Climatológicas de precipitação de estações convencionais para comparações com outros dados.

¹ A estação meteorológica do iGMAS, denominada aqui como RD, está equipada com sensores para medir temperatura, pressão e umidade relativa, e está instalada próxima à estação GNSS RDJN do iGMAS. Embora a resolução temporal original dos sensores seja de um segundo, os registros meteorológicos foram mediados para intervalos de 15 minutos, a fim de coincidir com a resolução temporal das saídas de ZTD e possibilitar o cálculo do IWV para os dados das estações RDJN e ONRJ, que são descritas na sequência.

As estações meteorológicas procedentes do (i) INMET: nomeadas INBE (Belém) e INVM (Vila Militar no Rio de Janeiro); (ii) Alerta Rio: nomeadas ARSC (São Cristóvão), ARIG (Ilha do Governador), ARPE (Penha) e ARIR (Irajá); (iii) iGMAS: nomeada RD (no Rio de Janeiro); e (iv) ITV: nomeada ITV-UFPA (estação meteorológica instalada no IG da UFPA em Belém). As estações meteorológicas, assim como as estações de GNSS, e a topografia das regiões, com resolução espacial de 15" de arco de latitude e longitude (Danielson; Gesch, 2011), estão indicadas nas Figuras 1 e 2.

Os dados de GNSS utilizados estão disponíveis no formato RINEX, com estações localizadas no Rio de Janeiro² pertencentes ao iGMAS e à RBMC. A estação RDJN do iGMAS está instalada na laje superior de um prédio do ON. As estações ONRJ e RIOD (esta última desativada em 12/06/2019) pertencem à RBMC (Figura 1).

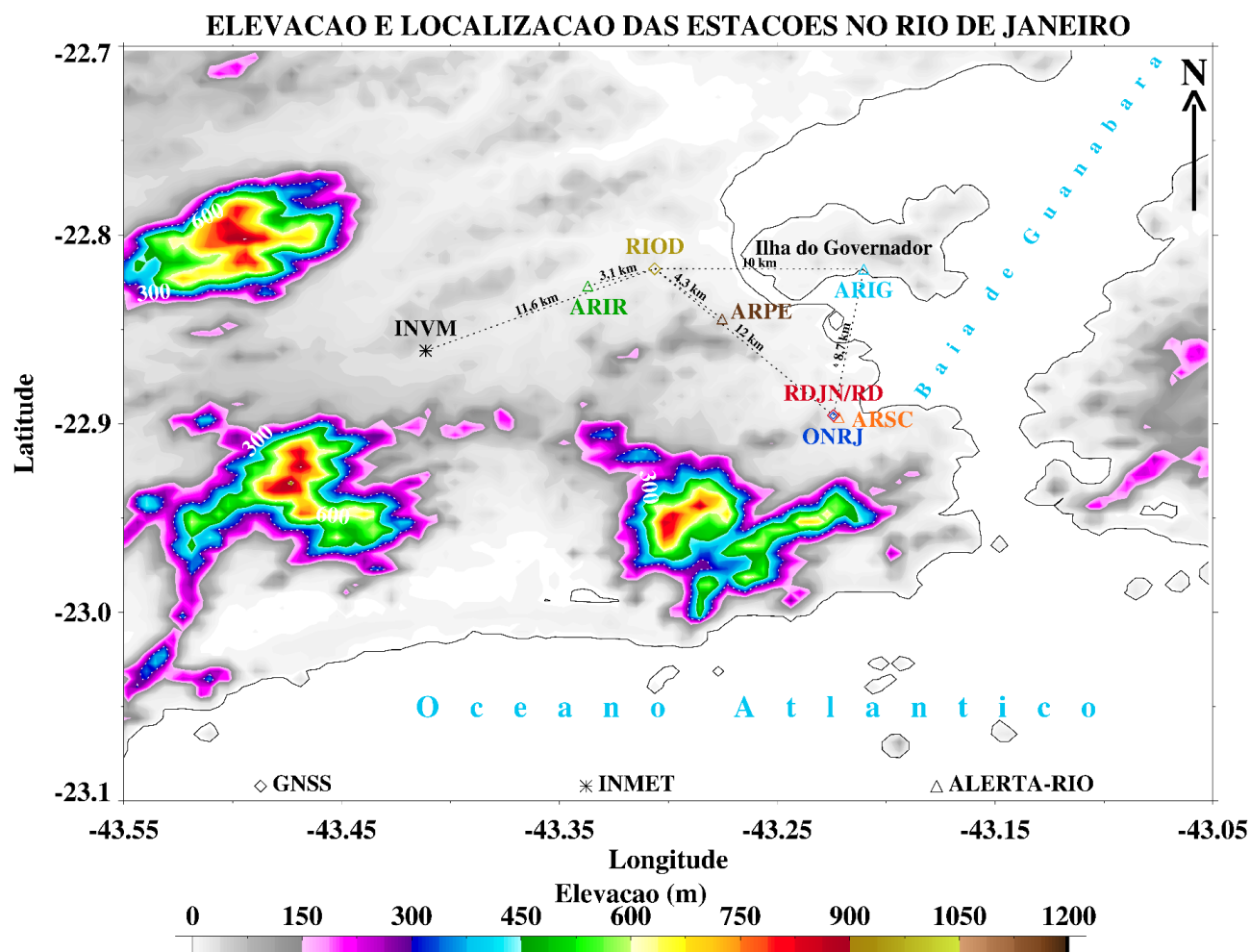
Em Belém, há três estações: (i) LPGS, pertencente ao iGMAS, cuja antena está instalada em uma base de concreto de 1,45 m de altura na laje da torre leste (~13 m de altura) do Instituto de Geociências (IG) da UFPA; e (ii) as duas estações pertencentes à RBMC³: BELE, instalada em um pilar de concreto cilíndrico no teto do Edifício Técnico Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM); e BEPA, instalada em um pilar cilíndrico de concreto medindo 2,85 m de altura e 0,30 m de diâmetro, sobre uma base de concreto no solo no INPE (Figura 2).

As Tbs do topo de nuvens no canal IR, provenientes do *Full Resolution IR Data* da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Janowiak; Joyce; Yarosh, 2001), são usadas nas investigações da distribuição e variação espacial e temporal das nuvens convectivas nos setores leste e sudeste do estado do Amapá e norte e nordeste do estado do Pará como suporte nas análises dos estudos da precipitação e vapor d'água.

² Para mais detalhes sobre as estações de GNSS no Rio de Janeiro, consulte Mota, Song e Stępnik (2019), bem como a Figura 1.

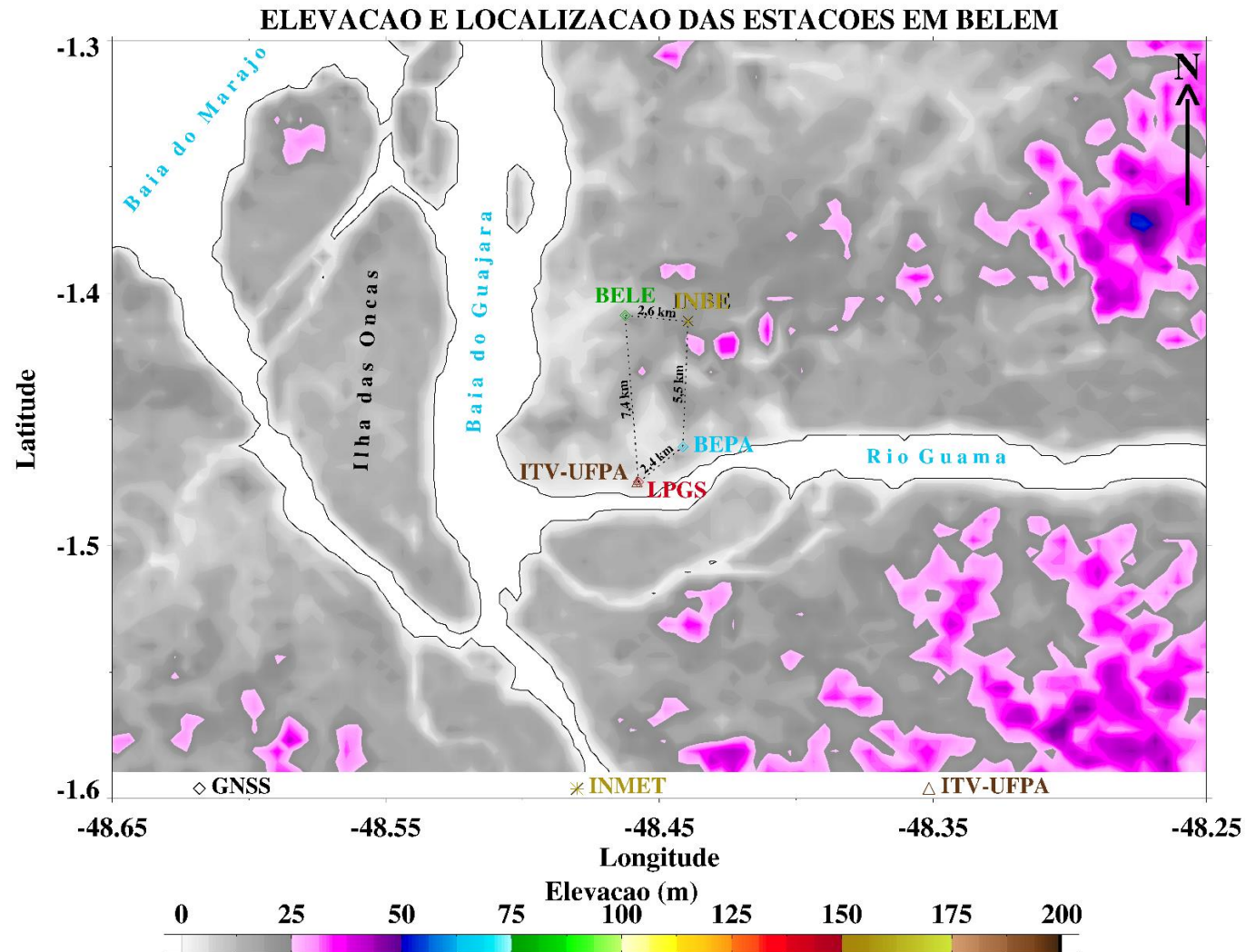
³ As informações oficiais das estações da RBMC de Belém estão disponíveis nos arquivos descritivos nas webpages: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo_BELE.pdf e https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/relatorio/Descritivo_BEPA.pdf.

Figura 1 – Elevação (m), com resolução espacial de 15" de arco de latitude e longitude (vide a referência de Danielson e Gesch (2011) para a fonte dos dados de elevação) de parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O contorno continental e insular é delineado pela isolinha de elevação de 1,5 m acima do nível médio do mar (NMM). As localizações das estações do *Global Navigation Satellite System* (GNSS) ONRJ e RIOD da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e da estação RDJN do *International GNSS Monitoring and Assessment System* (iGMAS), instalada no Observatório Nacional (ON) do Rio de Janeiro, e das estações meteorológicas (i) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na Vila Militar (INVM); (ii) do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (Prefeitura do Rio de Janeiro, 2023) no São Cristóvão (ARSC), na Ilha do Governador (ARIG), na Penha (ARPE) e em Irajá (ARIR); e (iii) do iGMAS (RD, instalada junto à estação de GNSS RDJN). A denominação das estações meteorológicas foi adaptada neste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2 – Elevação (m), com resolução espacial de 15" de arco de latitude e longitude (vide a referência de Danielson e Gesch (2011) para a fonte dos dados de elevação) de parte da Região Metropolitana de Belém (RMBE). O contorno continental e insular é delineado pela isolinha de elevação de 1,5 m acima do NMM. As localizações das estações do GNSS BELE e BEPA da RBMC e da estação LPGS do iGMAS, instalada no Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), e das estações meteorológicas (i) do INMET (aqui denominada INBE); (ii) do Instituto Tecnológico Vale – ITV (aqui denominada ITV-UFGA); e (iii) do iGMAS (LPGS, instalada junto à estação de GNSS LPGS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2 ZTD e IWV derivados de GNSS

O ZTD é definido como a propriedade da atmosfera de causar um atraso nas ondas eletromagnéticas emitidas pelos satélites para os receptores na direção zenital. Os sinais do GNSS do atraso total na direção zenital são divididos, como mostrado por Bevis *et al.* (1992), Davis *et al.* (1985) e Saastamoinen (1972), em atraso zenital hidrostático (ZHD — *zenith hydrostatic delay* — com a maior contribuição dos gases atmosféricos de ar seco) e atraso zenital úmido (ZWD — *zenith wet delay* — que é produzido exclusivamente pelo vapor d'água atmosférico):

$$\text{ZTD} = \text{ZHD} + \text{ZWD}, \quad (1)$$

onde

$$\text{ZHD} = 10^{-6} k_1 R_d \frac{P_s}{g_m}, \quad (2)$$

k_1 é uma constante de refratividade, R_d é a constante de gás do ar seco, P_s é a pressão atmosférica à superfície, e g_m é a aceleração média da gravidade, que pode ser expressa como

$$g_m = \frac{\int_0^{\infty} \rho_v(z) g(z) dz}{\int_0^{\infty} \rho_v(z) dz}, \quad (3)$$

onde ρ_v é a densidade de vapor d'água e g é a aceleração devido a gravidade.

O conteúdo de IWV⁴, em unidades de kg m^{-2} , ou também PWV, equivalente à altura (em mm) de água líquida obtida se a massa total de vapor d'água contida em uma coluna de ar atmosférico de área de seção transversal unitária for condensada e levada ao nível do receptor.

$$\text{IWV} = \int_0^{\infty} \rho_v(z) dz. \quad (4)$$

⁴ Para facilitar nas análises, foi usada neste trabalho a unidade de IWV em milímetros.

A partir da relação aproximada entre IWV e ZWD observada que foi derivada por Askne e Nordius (1987),

$$\text{ZWD} = 10^{-6} R_v \int_0^{\infty} \rho_v(z) \left[k'_2 + \frac{k_3}{T(z)} \right] dz, \quad (5)$$

onde $k'_2 = k_2 - k_1[M_v/M_d]$ (K hPa⁻¹), $k_1 = 77,643 \pm 0,0094$ (K hPa⁻¹), $k_2 = 71,2455 \pm 1,3$ (K hPa⁻¹), e $k_3 = (375,201 \pm 0,76) \times 10^3$ (K² hPa⁻¹) são as constantes de refratividade, com os respectivos intervalos de incerteza, adaptadas e indicadas por Bock *et al.* (2020) a partir das ‘melhores aproximações’ dos coeficientes de Rüeger (2002); $R_v = 461,522 \pm 0,008$ (J K⁻¹ kg⁻¹) é a constante dos gases para o vapor d’água; $M_v = 18,0152$ (g mol⁻¹) é a massa molar do vapor d’água e $M_d = 28,9644$ (g mol⁻¹) é a massa molar do ar seco; e T é a temperatura do ar.

Seguindo a definição da temperatura média da coluna de ar vertical T_m Davis *et al.* (1985),

$$T_m = \frac{\int_0^{\infty} \rho_v(z) dz}{\int_0^{\infty} \frac{\rho_v(z)}{T(z)} dz}, \quad (6)$$

e combinando a equação de estado vapor d’água e as Equações (2)–(6), conforme Bevis *et al.* (1992) e seguindo o formalismo proposto por Davis *et al.* (1985) e Saastamoinen (1972), e reorganizando-as,

$$\text{IWV} = \kappa(T_m) \times \text{ZWD}, \quad (7)$$

onde $\kappa(T_m)$ é uma função da temperatura média ponderada, expressa como

$$\kappa(T_m) = 10^{-6} R_v \left[k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right]. \quad (8)$$

Também se utiliza a seguinte equação, derivada de Davis *et al.* (1985) e Saastamoinen (1972), para calcular IWV:

$$g_m(\varphi, H) = 9.784[(2\varphi) - 0.00000028 H], \quad (9)$$

onde φ e H são a latitude e a altura da superfície acima do elipsoide, respectivamente.

Para calcular T_s e P_s no nível do receptor, para corrigir as diferenças de altura entre os sensores meteorológicos e o receptor GNSS, utilizamos as equações auxiliares recomendadas pela ICAO (1993):

$$T_2 = T_1 + \alpha(z_2 - z_1) \quad (10)$$

e

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-g_0/\alpha R_d}, \quad (11)$$

onde α é o gradiente vertical de temperatura (lapse rate de temperatura de -6 km^{-1}), e T_1 e P_1 são a temperatura e a pressão observadas na altura inicial z_1 , $R_d=287,027 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ a constante dos gases para o ar seco incluindo 0,0375% de CO_2 , conforme Bock *et al.* (2020), e $g_0= 9,80665 \text{ m s}^{-2}$. Para o cálculo de IWV na estação (a) RIOD, usou-se T_1 e P_1 respectivamente das estações meteorológicas ARIR e INVM; e nas estações (b) ONRJ e RDJN, usou-se T_1 e P_1 da estação meteorológica RD.

O valor real de T_m é esperado variar devido à dependência da temperatura da superfície, o perfil de temperatura troposférica e em relação à distribuição vertical da atmosfera (Bevis *et al.*, 1992). No entanto, é adotada neste trabalho a aproximação de $T_m = 70.2 + 0.72T_s$ (Bevis *et al.*, 1992) pela ausência de frequentes radiossondas para cobrir todo o ciclo diurno e para os propósitos desta pesquisa.

Os dados de observação de GPS (arquivos tipo RINEX) são utilizados aplicando uma técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) sem diferenças (*zero-differenced Precise Point Positioning*), através do software “Bernese GNSS” versão 5.2 (Dach *et al.*, 2015) para estimar os parâmetros troposféricos. Os dados coletados foram processados em sessões de 24 horas, iniciando à 0000 UTC (*Coordinated Universal Time*) a cada dia com amostragem de dados a cada 30 segundos. Assim, foi empregada e ajustada à da técnica PPP versão estendida do Software Bernese (PPP_DEMO.PCF) para obter parâmetros troposféricos com alta taxa com amostragem de 15

minutos. Foi aplicada os termos secos e úmidos da Função de Mapeamento de Viena 1⁵ (Boehm; Werl; Schuh, 2006) juntamente com correções de atrasos de trajetória zenital baseadas no *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Gradientes troposféricos horizontais foram estimados a cada 24 horas usando o modelo de gradiente Chen-Herring (Chen; Herring, 1997). Foi adotado o valor de 3° para o ângulo de corte de baixa elevação em todos os dados processados.

Todas as estimativas de ZTD passaram por controle de qualidade obrigatório para evitar observações errôneas. Foi aplicado o procedimento de filtragem, conforme a abordagem proposta por Bock *et al.* (2014) e desenvolvida por Stępnia, Bock e Wielgosz (2018), com o objetivo de detectar e remover as estimativas de ZTD fisicamente irreais e/ou menos precisas. Os dados de ZTD foram triados em relação a: (i) verificação de alcance (rejeição de valores de ZTD fora de 1 m e 3 m); (ii) verificação de valores discrepantes (rejeição de valores de ZTD fora da mediana de $\pm 0,5$ m); (iii) verificação de alcance de σ_{ztd} (rejeição de valores de σ_{ztd} fora de 0,1 mm e 6 mm); e (iv) verificação de valores discrepantes de σ_{ztd} (rejeição de valores de $\sigma_{ztd} > 2 \times \text{mediana}[\sigma_{ztd}]$).

Para as comparações de ZTD de estações com diferentes altitudes apresentadas nas primeiras seções do Capítulo 4, os valores de ZTD das estações foram reduzidos ao nível médio do mar (NMM) a fim de fazer uso da vantagem do uso de ZTD em não requerer medidas atmosféricas junto à antena (Sapucci; Schubert, 2012). Assim, neste trabalho usou-se a metodologia de Lou *et al.* (2018) que mostraram que os perfis de ZTD decrescem exponencialmente (ou próximo de uma exponencial, conforme Li *et al.*, 2012) com a altitude em algumas estações com diferentes latitudes e altitudes na China. Segundo Lou *et al.* (2018), a função exponencial para a variação vertical de ZTD pode ser expressa como:

$$ZTD(h) = ZTD_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{H} \cdot h\right) \quad (12)$$

onde ZTD_0 é o atraso troposférico zenital ao NMM, H é a escala da altura, e h denota a altitude do local acima do NMM.

⁵ VMF1 – Vienna Mapping Function, disponível para download em <http://vmf.geo.tuwien.ac.at/>.

Alterando a Equação 12 para converter ZTD numa dada altura (h_1) para uma altura requisitada (h) como:

$$ZTD(h) = ZTD_1 \cdot \exp\left(-\frac{1}{H} \cdot (h - h_1)\right), \quad (13)$$

onde ZTD_1 é o atraso troposférico zenital numa dada altura h_1 . Os autores encontraram valores médios para pontos de grades na China do inverso da escala de altura entre $1,21 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ e $1,49 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$.

Com base nestes resultados de Lou *et al.* (2018), foi adotado o valor para o inverso da escala da altura ($1/H$) equivalente à latitude de Belém de $1,42 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ para o cálculo de ZTD, da Equação 13, para reduzir ZTD em BEPA, BELE e LPGS nas análises comparativas da segunda seção do Capítulo 4.

No capítulo seguinte são apresentadas as relações entre ZTD e IWV e a extrema precipitação no Rio de Janeiro através composições e estudos de caso.

CAPÍTULO 3 ZTD E IWV E AS PRECIPITAÇÕES SEVERAS NO RIO DE JANEIRO

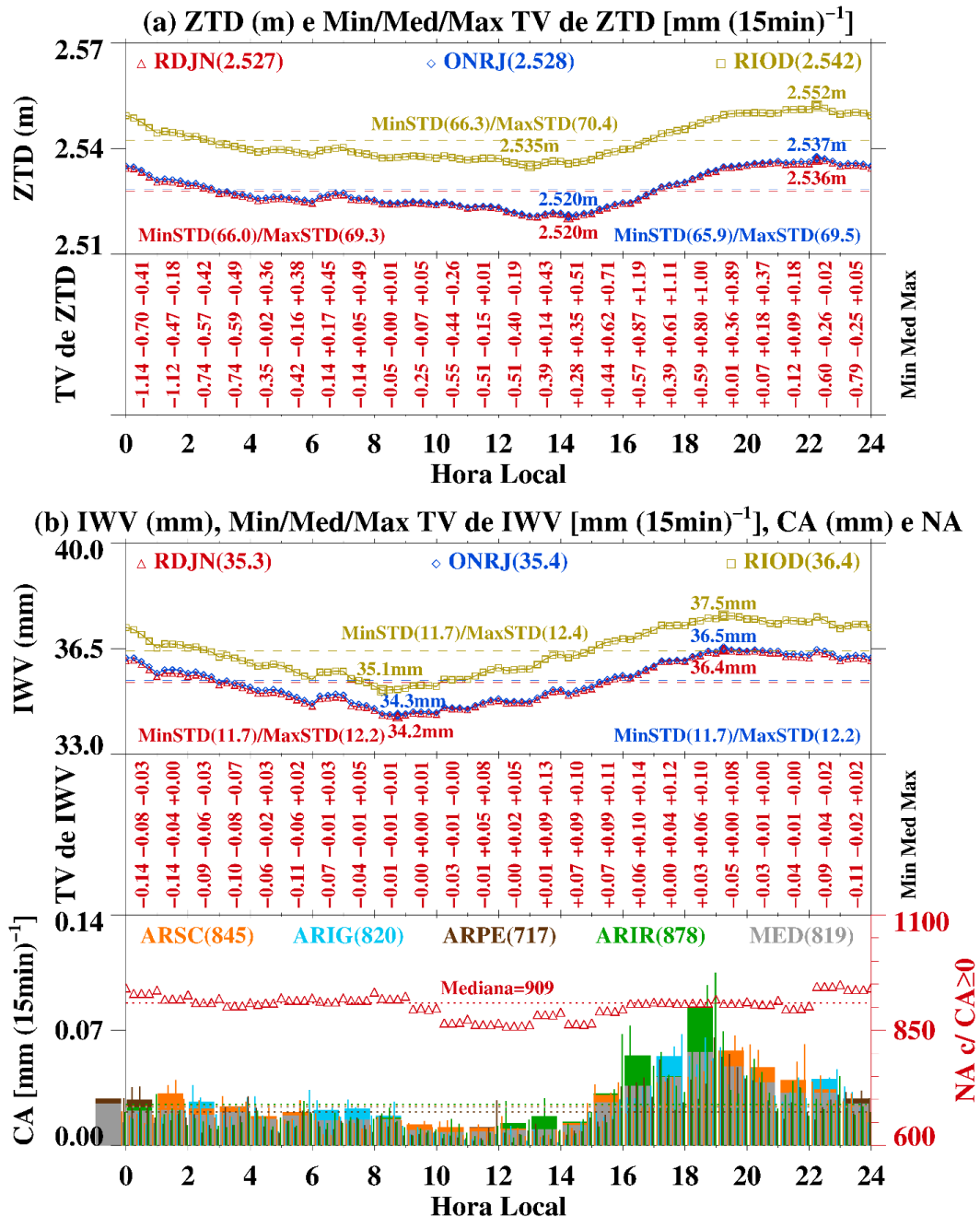
3.1 Ciclo diurno médio de ZTD, IWV e de chuva no Rio de Janeiro

Os dados simultâneos de GNSS e meteorológicos no Rio de Janeiro foram utilizados para elaborar o ciclo diurno médio do ZTD e do IWV, com intervalos de 15 minutos, ao nível das respectivas estações de GNSS RDJN, ONRJ e RIOD. A análise incluiu a taxa de variação do ZTD e do IWV, bem como a média e os desvios padrões mínimos e máximos observados durante o período analisado. Os resultados, apresentados na Figura 3, abrangem observações de fevereiro de 2015 a agosto de 2018. Um painel adicional exhibe o ciclo diurno médio da chuva acumulada (CA), registrada a cada 15 minutos nas estações meteorológicas ARSC, ARIG, ARPE e ARIR, integrantes do sistema Alerta Rio. Incluem-se também o número de amostras (NA) de chuva com valores iguais ou superiores a zero e a média anual da precipitação (em mm ano^{-1}) por estação.

As análises comparativas das curvas do ciclo diurno de ZTD e IWV mostraram um comportamento quase paralelo nas estações RDJN, ONRJ e RIOD, conforme demonstrado nos painéis (a) e (b) da Figura 3. As médias de ZTD nessas estações foram 2,527 m, 2,528 m e 2,542 m, respectivamente, com o desvio padrão (STD) do ZTD de cada intervalo de 15 minutos variando entre 66 e 70 mm. Os valores máximos e mínimos das curvas de ZTD e IWV do ciclo diurno médio das três estações, no momento das suas ocorrências, também estão indicados nos painéis (a) e (b), propiciando as estimativas das amplitudes médias do ZTD (IWV) de 16 (2,2), 17 (2,2) e 17 (2,4) mm, respectivamente nas estações RDJN, ONRJ e RIOD. Na variação diurna, observou-se uma variação subdiurna do ZTD de algumas horas: a crista primária (secundária) ocorreu aproximadamente entre 19:00 e 00:30 (06:30 e 07:15) HL, enquanto o vale primário (secundário) se situa entre 12:00 e 15:00 (05:00 e 06:15) HL. Os valores médios da curva de ZTD na estação RDJN foram menores que 1 mm comparados aos valores médios da curva da estação ONRJ, apesar de que a altitude desta última estação seja menor que aquela da estação RDJN. Os valores de ZTD na estação RIOD foram aproximadamente 15 (14) mm maiores que os da estação RDJN (ONRJ), refletindo as diferenças altimétricas entre a estação RIOD e as outras duas estações. A taxa de variação (TV) média do ZTD durante o ciclo diurno manteve-se positiva continuamente das 13:00 às 22:00 HL, atingindo máximos superiores a 1 mm [15min]^{-1} (com média de aproximadamente 0,8 mm [15min]^{-1}) entre 16:00 e 18:00 HL.

Figura 3 – Ciclo diurno médio, na hora local (HL), a cada intervalo de 15 minutos, no período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018, do (a) atraso troposférico zenital (ZTD, em m) com a média entre parênteses e o desvio padrão (STD) mínimo e máximo de todo o período nas estações RDJN, ONRJ e RIOD, e da taxa de variação (TV) mínima (min.), média (med.) e máxima (max.) de ZTD (mm hr^{-1}) na estação RDJN; (b) o mesmo que o item (a) exceto que para o vapor d'água integrado (IWV, em mm), e da TV min., med. e max. de IWV (mm hr^{-1}); e no painel adicional com o ciclo diurno médio da chuva acumulada (CA) a cada 15 minutos (barras estreitas) e a cada hora (barras espessas), ambas em unidades de mm [15min]^{-1} , das estações meteorológicas ARSC, ARIG, ARPE, ARIR e a média da CA nas 4 estações (MED), e com a média da CA (em mm ano^{-1}) de todo o período entre parênteses; e o total número de amostras (NA) da $\text{CA} \geq 0$ nos intervalos de 15 minutos. Os mínimos e máximos de ZTD e IWV, assim como os mínimos e máximos STDs de ZTD e IWV por estação estão indicados nos painéis correspondentes.

ESTADÍSTICAS DE ZTD/IWV COM $\text{CA} \geq 0$ FEV/2015–AGO/2018



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse contexto, percebe-se um discreto acréscimo na média de ZTD entre 06:00 e 07:00 HL, alinhado com um pequeno pico secundário observado neste intervalo. Por outro lado, registram-se valores negativos da TV de ZTD entre 22:00 e 06:00 HL, bem como entre 09:00 e 13:00 HL, destacando-se os mínimos absolutos, inferiores a $-1 \text{ mm [15min]}^{-1}$, entre 00:00 e 02:00 HL. É importante enfatizar que os valores positivos da TV de ZTD indicam um incremento significativo do ZTD no período da tarde, seguido por uma redução notável a partir das 22:00 HL do ciclo diurno, evidenciado pelos valores negativos da TV de ZTD.

Em relação às curvas do ciclo diurno de IWV, observam-se padrões semelhantes aos do ZTD nas estações RDJN, ONRJ e RIOD, conforme ilustrado no painel (b) da Figura 3. As médias de IWV, ao longo do período analisado, foram de 35,3/35,4/36,4 mm, com um STD variando entre 11,7 e 12,4 mm em cada intervalo de 15 minutos para as três estações. Na variação diurna (subdiurna) de IWV, o máximo primário (secundário) ocorre aproximadamente entre 18:00 e 00:30 (06:15 e 07:00) HL, enquanto o mínimo primário (secundário) é observado entre 08:00 e 10:00 (05:45 e 06:00) HL. Os valores médios do ciclo diurno de IWV na estação RDJN foram ligeiramente menores que os da estação ONRJ em 0,1 mm, enquanto os valores de IWV na estação RIOD excederam os valores de IWV na estação RDJN (ONRJ) em 1,1 (1,0) mm. A TV de IWV, no decorrer do ciclo diurno, manteve valores médios positivos de forma contínua das 11:00 às 19:00 HL, alcançando picos entre 0,10 e 0,14 mm [15min]^{-1} (com média de aproximadamente 0,08 mm [15min]^{-1}) entre 13:00 e 19:00 HL. Valores negativos foram registrados entre 20:30 e 09:00 HL, com os mínimos absolutos do ciclo diurno abaixo de $-0,11 \text{ mm [15min]}^{-1}$ entre 23:30 e 02:00 HL. Tanto os valores positivos quanto os negativos da TV de IWV refletem o crescimento predominante de IWV desde o final da manhã até o pico no início da noite, seguido por um declínio acentuado a partir das 03:00 HL. Diferentemente das TVs de ZTD, que exibem um aumento repentino no período da tarde e uma diminuição gradual desde as primeiras horas do dia até o mínimo principal no início da tarde.

O ciclo diurno médio da precipitação acumulada por estação e a média (MED) da precipitação nas 4 estações (barras e linha cinzas), registradas a cada 15 minutos e apresentadas em intervalos de 1 hora no painel inferior da Figura 3b. Foi revelado que os valores acima da média geral entre 15:00 e 24:00 HL, com picos mais significativos em entre 18:00 e 20:00 HL. Observou-se uma flutuação nos valores médios horários, exceto pelos valores mínimos, que foram registrados entre 09:00 e 15:00 HL. O $NA \geq 0$ com intervalos de chuva, a cada 15 minutos, aproximou-se da

mediana de 909 eventos observados durante o ciclo diurno completo. Contudo, os valores mínimos foram registrados durante o período de menor precipitação acumulada do dia, entre 09:00 e 15:00 HL, enquanto o máximo foi observado entre 22:00 e 24:00 HL.

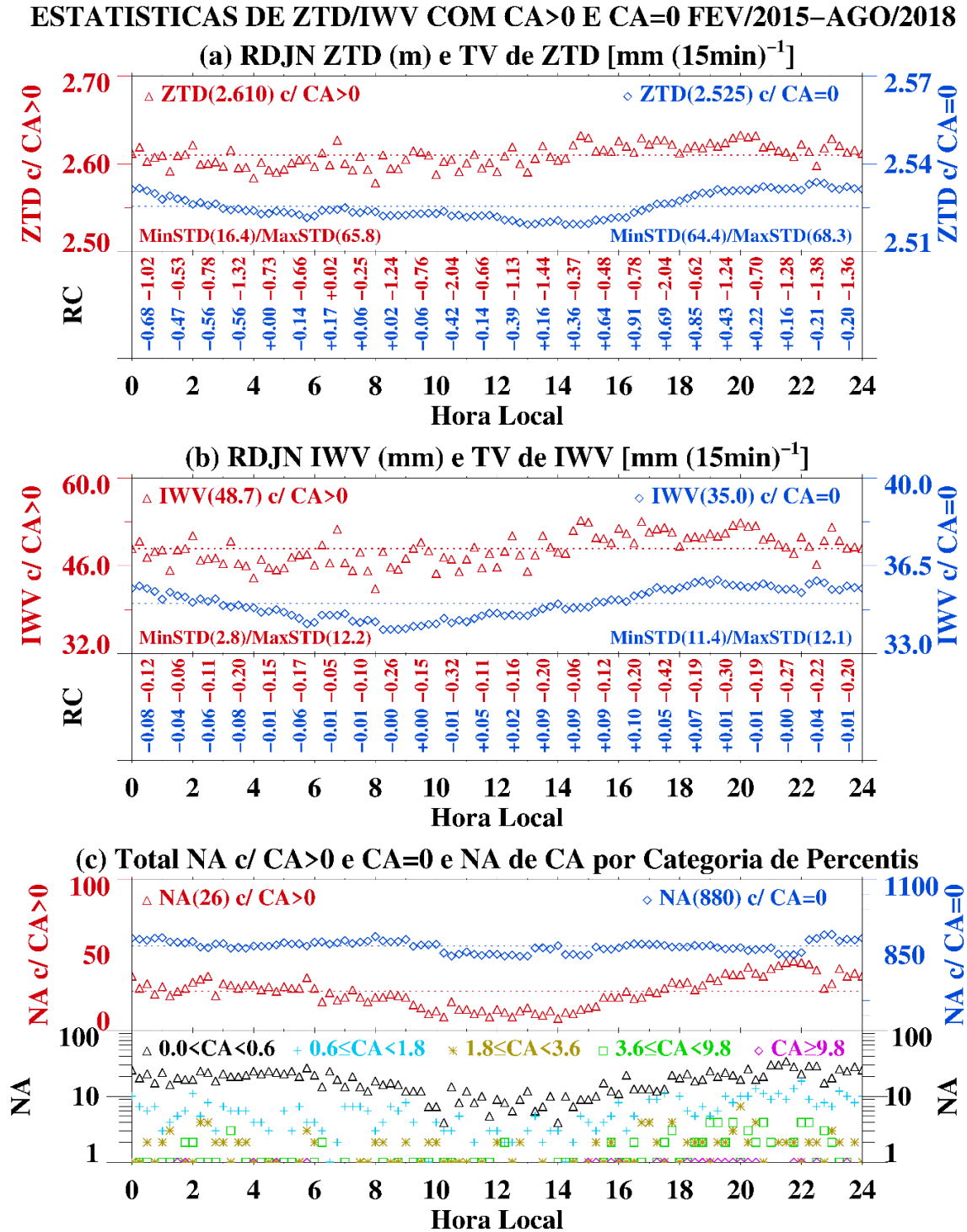
Similar à Figura 3, a Figura 4 ilustra nos painéis o ciclo diurno de (a) ZTD e (b) IWV, categorizados por amostras com $CA > 0$ e $CA = 0$, em intervalos de 15 minutos, acompanhados de suas respectivas TVs; além de (c) NA e seus 75^o/90^o/95^o/99^o percentis para os limiares de 0,6/1,8/3,6/9,8 mm [15min]⁻¹, classificando a intensidade da chuva como leve/moderada/moderada-a-forte/forte e muito-forte para valores iguais ou superiores a 9,8 mm [15min]⁻¹. Essa classificação baseia-se nos dados da estação meteorológica ARSC.

O ciclo diurno de ZTD com $CA > 0$ apresentou alta variabilidade, com um STD mínimo de ZTD de 16,4 mm, significativamente inferior ao STD mínimo de 64,4 mm para ZTD com $CA = 0$. O ZTD_{RDJN} com $CA > 0$ mostra grande variabilidade em torno do alto valor da média de 2,610 m (embora os mais altos valores de ZTD se encontrem entre o meio da tarde para o meio da noite), enquanto o ZTD_{RDJN} com $CA = 0$ possui forma e valores semelhantes aos de ZTD_{RDJN} com $CA \geq 0$ (Figura 3), com média de 2,525 m. A TV de ZTD_{RDJN} com $CA > 0$ apresenta valores médios horários majoritariamente negativos, ao passo que a TV de ZTD_{RDJN} com $CA = 0$ possui valores médios horários similares àqueles do ciclo diurno para todos os eventos da $CA \geq 0$.

No painel (b) da Figura 4, o ciclo diurno de IWV_{RDJN} para $CA > 0$ e $CA = 0$ tem configuração similar àquela do ZTD apresentado no painel (a), com médias de 48,5 e 35,0 mm, e STDs mínimos de 2,8 e 11,7 mm, respectivamente, para $CA > 0$ e $CA = 0$. Os valores da TV de IWV_{RDJN} são todos negativos quando $CA > 0$, enquanto para $CA = 0$, são similares à curva de IWV_{RDJN} com $CA \geq 0$.

Na parte de cima do painel (c) da Figura 4 é apresentado o NA com $CA > 0$ e com $CA = 0$, e com as medianas do NA que estão informadas entre parênteses. O NA com $CA > 0$ corresponde a menos de 3% do total de amostras, e os horários com maior ocorrência de chuva são das 20:00 às 22:30 HL e os horários de menor ocorrência são das 09:30 às 14:30 HL. Embora tenha havido variações, observou-se no geral um decréscimo gradual do NA entre as primeiras horas do dia até o meio da manhã e um incremento no período vespertino até o início da noite. Este padrão do ciclo diurno é constante em todas as categorias dos percentis 75^o, 90^o, 95^o e 99^o, apresentado na parte de baixo do painel (c), marcando uma diminuição mais acentuada no NA entre 09:00 e 15:00 HL e a ausência de casos de CA acima de 9,8 mm [15min]⁻¹, considerados como eventos de chuva muito-forte, desde o início da manhã até por volta das 14:45 HL. Essa característica será abordada na for-

Figura 4 – O mesmo que a Figura 3, exceto que para o ciclo diurno do (a) ZTD categorizado por CA>0 e CA=0 em cada intervalo de 15 minutos com a média entre parênteses e o STDmin e STDmax de todo o período na estação RDJN; e da TV média de ZTD, em unidades de mm [15min]⁻¹, na estação RDJN; (b) o mesmo que o item (a) exceto que para o IWV e da TV med. de IWV, em unidades de mm [15min]⁻¹; e (c) do total do NA com CA>0 e CA=0 em 15 minutos registrada na estação meteorológicas ARSC; e o total NA com CA categorizada pelos 75°, 90°, 95° e 99° percentis, que são correspondentes aos limiares de 0,6, 1,8, 3,6 e 9,8 mm, respectivamente, nos intervalos de 15 minutos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

ma de composições e estudos de caso nas seções subsequentes.

3.2 Composições de ZTD/IWV e chuva acumulada

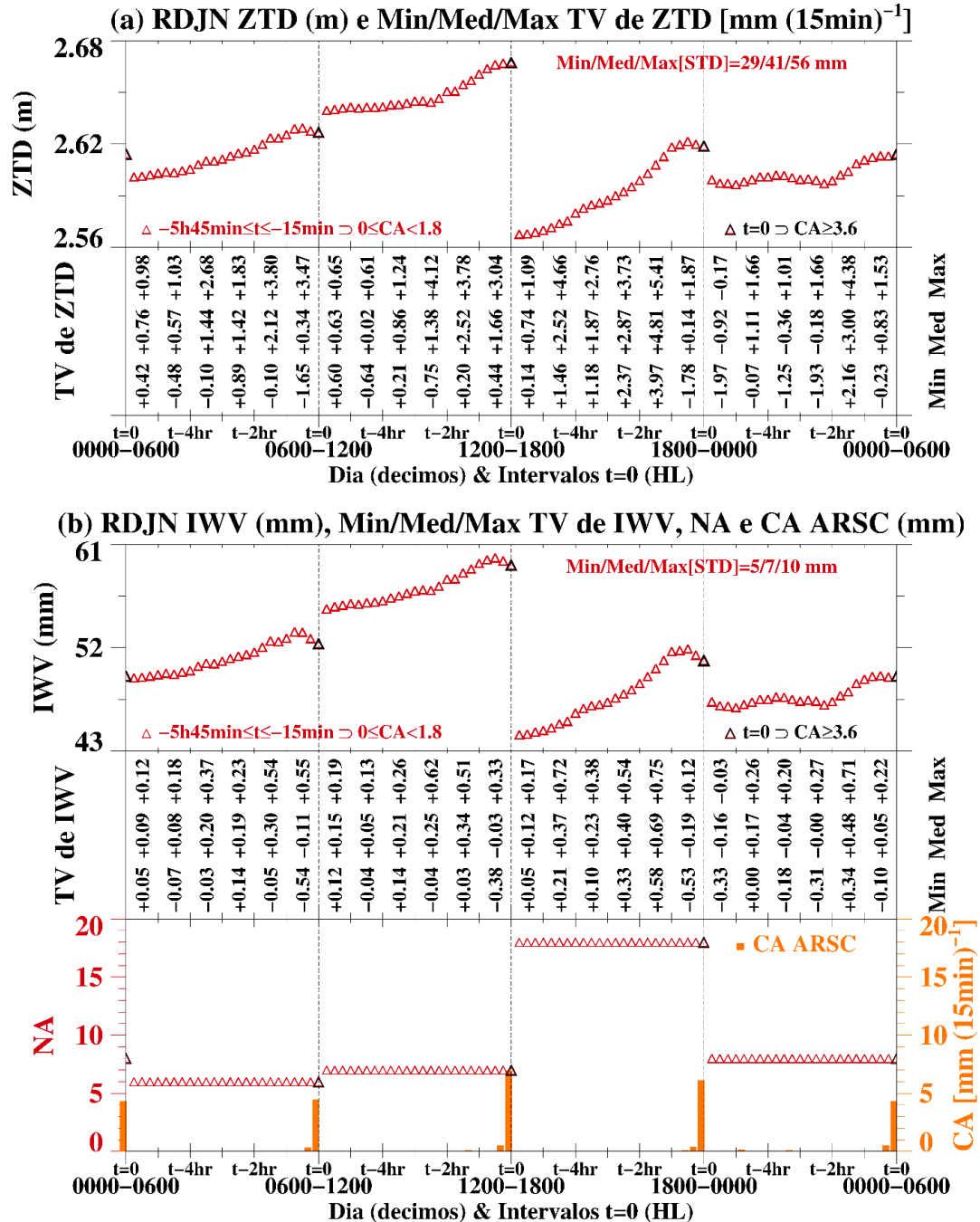
A Figura 5 exibe as quatro composições das séries temporais no período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018 de eventos de precipitação com dados de GNSS_{RDJN}. As composições incluem: (a) ZTD e a min./med./max. horária da TV de ZTD; e (b) IWV e a min./med./max. horária da TV de IWV. Também foram incluídas a min./med./max. do STD de ZTD e IWV, compiladas de todas as amostras coletadas a cada 15 minutos nas quatro composições. Os valores min./med./max.[STD] de 29/41/56 mm para ZTD e de 5/7/10 mm para IWV refletem a dispersão das amostras. Adicionalmente, são apresentados o total de NA contabilizados nas composições e a média da CA em intervalos de 15 minutos durante um período de 6 horas. Estas composições baseiam-se nas ocorrências de chuva acumulada nos seguintes intervalos: (i) em $t=0$ com $CA \geq 3,6$ mm nos períodos de referência de 06:00–12:00 HL, 12:00–18:00 HL, 18:00–00:00 HL e 00:00–06:00 HL⁶; e (ii) em $-5h45 \leq t \leq -15min$ com $0 \leq CA$ 1,8 mm a cada 15min durante as 5 horas e 45 minutos que precedem o instante $t=0$.

Nos períodos de 06:00–12:00 HL, 12:00–18:00 HL e 18:00–00:00 HL, as análises das composições de ZTD e IWV revelaram um aumento quase linear — evidenciado pelos valores positivos da média e máxima TV do ZTD e IWV — desde $t=5h45$ até aproximadamente $t=2hr$. Seguiu-se um aumento significativo até o pico próximo de $t=45min$ a $t=30min$ para as composições de ZTD dos períodos de 06:00–12:00 HL e 18:00–00:00 HL, assim como para as composições de IWV dos períodos de 06:00–12:00 HL, 12:00–18:00 HL e 18:00–00:00 HL. Este aumento foi seguido por uma diminuição até o instante $t=0$. Essas composições resultaram em cristas bem definidas nas curvas de ZTD e IWV, imediatamente antes do instante $t=0$. Os aumentos significativos em ZTD e IWV também foram observados nas outras composições a partir de $t=2hr$, alcançando picos entre $t=30min$ e $t=0$. No entanto, para as composições de ZTD e IWV do período das 00:00 às 06:00 HL, não se notou um aumento gradativo nas primeiras horas, mas sim uma con-

⁶ Para garantir a precisão e evitar sobreposições nos horários de corte dos dados, foram adotados intervalos rigorosamente definidos: “06:15–12:00 HL, 12:15–18:00 HL, 18:15–00:00 HL e 00:15–06:00 HL”. Esta estruturação cuidadosa dos intervalos de tempo serve para minimizar redundâncias nas fronteiras temporais dos dados coletados. Portanto, a nomenclatura utilizada anteriormente e na Figura 5 foi escolhida principalmente por sua facilidade de interpretação, alinhando-se com esta abordagem metodológica precisa.

Figura 5 – Composições de séries temporais no período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018 de eventos de precipitação com dados de GNSS_{RDJN} de (a) ZTD (m) e TV de ZTD (mm [15min]⁻¹); e (b) IWV (mm), TV de IWV (mm [15min]⁻¹), total NA mediados nas composições e média da CA em cada 15 minutos num intervalo de 6 horas e a min./med./max. STD de ZTD e IWV de todos os intervalos de 15 minutos das composições. As variáveis foram mediadas de acordo com as ocorrências de chuva acumulada nos intervalos de 6 horas nos instantes: (i) t=0 com CA≥3,6 mm [15min]⁻¹ nos intervalos de referência de 0600–12:00 HL, 12:00–18:00 HL, 18:00–00:00 e 00:00–06:00; e (ii) -5h45min≤t<-15min com 0≤CA<1,8 mm nas 5 horas e 45 minutos que antecederam os instantes t=0. As TVs min./med./max. de ZTD e IWV, em unidades de mm [15min]⁻¹, são correspondentes às mediações horárias das composições.

FEV/2015–AGO/2018 COMPOSICOES [5h45: 0≤CA<1.8 & 15min: CA≥3.6]



figuração de crista em ZTD e IWV, característica das horas precedentes à precipitação.

A tendência de crescimento de ZTD e IWV foi mais acentuada na composição de 18:00–00:00 HL (período de maior precipitação acumulada do ciclo diurno na estação ARSC, conforme ilustrado na Figura 3, situada nas proximidades da estação RDJN). Registrou-se a taxa de crescimento médio de ZTD (IWV) de +4,81 (+0,69) mm [15min]⁻¹ e o máximo de +5,41 (+0,75) mm [15min]⁻¹, entre 1 e 2 horas antes de t=0, ou ainda entre 0,5 e 1,5 horas antes do ápice de ZTD (IWV). Após o máximo de ZTD (IWV), a tendência inverteu-se, passando de positiva para negativa, com um mínimo de -1,78 (-0,53) mm [15min]⁻¹. Notavelmente, a composição no intervalo das 18:00 às 00:00 HL também registrou o maior número de eventos, com 18 ocorrências.

Portanto, a composição de 6 horas que exibiu os maiores valores de ZTD e IWV ocorreu no intervalo com a maior taxa de crescimento dessas variáveis nos campos médios (Figura 3), ou seja, no período vespertino, caracterizado pelo intenso aquecimento do ar próximo à superfície. O padrão típico de configuração de ZTD/IWV antes de um evento de chuva forte ou muito-forte (definida anteriormente) foi observado na composição das 18:00 às 00:00 HL, com o pico de crescimento situando-se entre 1 e 2 horas antes do evento de $CA \geq 3,6$ mm, seguido por uma redução nas taxas de variação até alcançarem valores negativos. Estas observações serão exploradas com maior detalhe nos estudos de caso apresentados na próxima seção.

3.3 Estudos de caso de chuvas extremas no Rio de Janeiro

Esta seção investiga nove eventos de chuva extrema no Rio de Janeiro, caracterizados por acumulações de chuva em 15 minutos superiores ao 95º percentil e por totais de pelo menos 22 mm em 8 horas ou pelo menos 30 mm em 24 horas, registrados em pelo menos uma das quatro estações meteorológicas do sistema Alerta Rio e com dados de ZTD disponíveis em pelo menos duas estações de GNSS da região. Dos nove eventos, em sete utilizou-se dados de ZTD e IWV das estações RDJN, ONRJ e RIOD, juntamente com o ciclo diurno médio mensal do período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018 como referência. Nos dois eventos restantes foram utilizados apenas os dados de ZTD.

Cada caso é detalhado em intervalos de 15 minutos e na hora local. O painel (a) das Figuras 6 a 8 exhibe o ZTD (m) das estações RDJN, ONRJ e RIOD, o ciclo diurno médio mensal de ZTD (m) do período de referência, a CA em mm [15min]⁻¹ e as mínimas, médias e máximas horárias

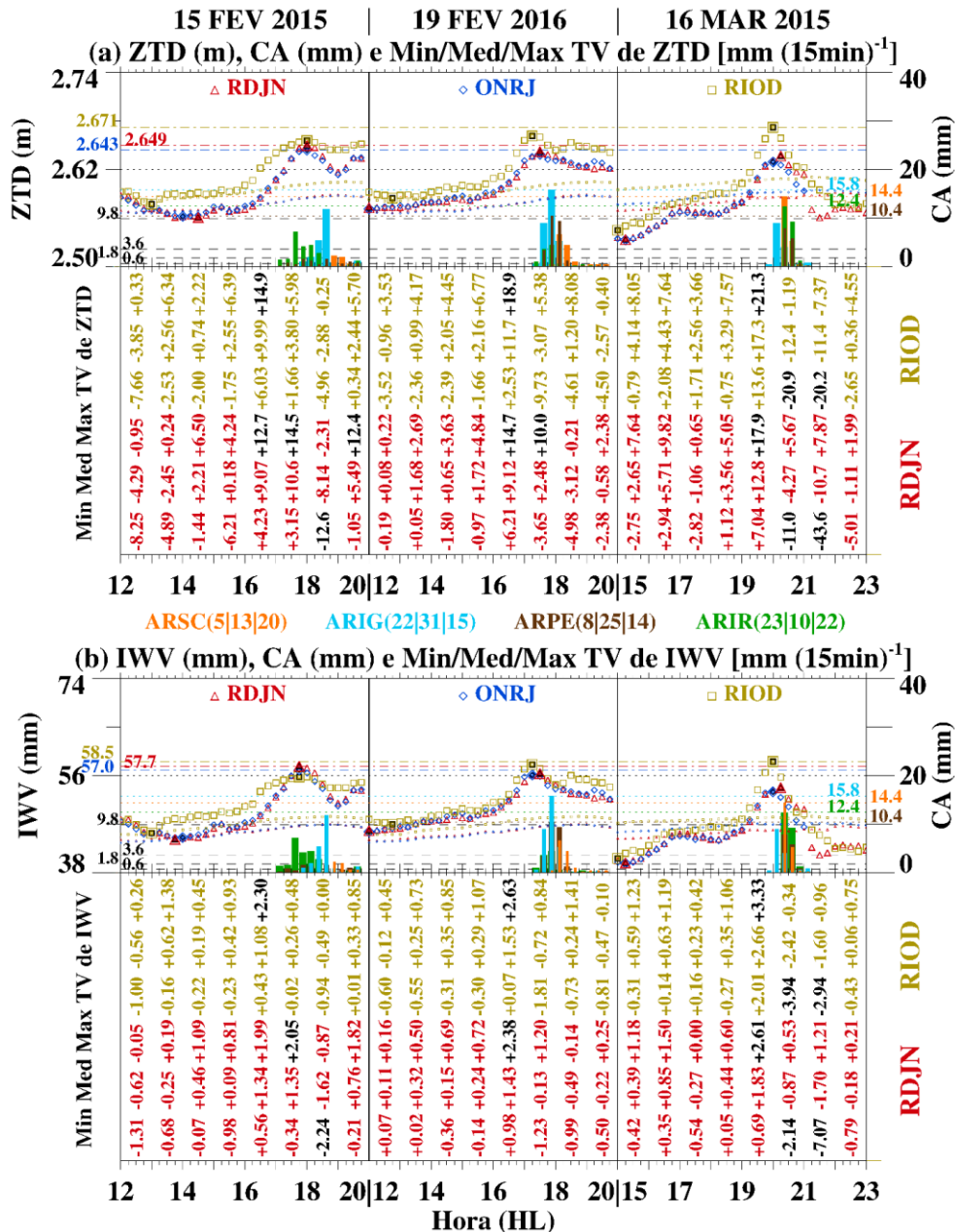
das TVs de ZTD em mm [15min]^{-1} das estações RIOD e RDJN (ou ONRJ, dependendo da disponibilidade do maior número de observações); enquanto o painel (b) mostra as informações para IWV (mm) equivalentes ao item (a). Os totais acumulados de chuva (mm) por estação e nos períodos correspondentes de cada caso são indicados entre parênteses junto às estações meteorológicas nos painéis (a) e (b). Embora os valores totais de chuva sejam idênticos entre as estações dos painéis (a) e (b), as colunas foram dispostas alternadamente para facilitar a análise comparativa dos valores de chuva entre as estações. As colunas correspondentes aos totais da chuva nas estações ARIR e ARPE estão superpostas em relação às estações ARSC e ARIG no painel (a) e vice-versa no painel (b). O valor do máximo e mínimo de cada estação e de cada estudo de caso tem o respectivo símbolo destacado na curva correspondente. A apresentação dos casos é feita a seguir em grupos com eventos de características similares quanto à configuração da marcha de ZTD e IWV.

3.3.1 Rampas ascendentes e descendentes, semissenóides e saltos de ZTD e IWV

A Figura 6 apresenta três casos de chuva intensa e com os valores de ZTD (IWV) crescendo rapidamente a partir da média ou de valores abaixo do ciclo diurno médio de ZTD (IWV), identificados como RJ1, RJ2 e RJ3, ocorridos respectivamente em 15 de fevereiro de 2015 das 12:00 às 20:00 HL, 19 de fevereiro de 2016 das 12:00 às 20:00 HL e 16 de março de 2015 das 15:00 às 23:00 HL. A configuração das curvas de ZTD e IWV apresentaram rampas quase lineares nas primeiras horas de estudo e uma rampa não linear que se assemelha ao gráfico de uma função gaussiana — ‘função sino’ — ou de uma semissenóide, porém não necessariamente simétrica em relação à origem da rampa não linear. Os valores extremos de ZTD (IWV) do período de 8 horas, nas estações RDJN/ONRJ e RIOD, foram respectivamente:

- (i) com mínimos de 2,561/2,562 e 2,577 m (44,2/44,5 e 45,3 mm) e máximos de 2,650/2,644 e 2,656 m (57,7/57,0 e 55,7 mm), resultando nas amplitudes de 89/82 e 79 mm (13,5/12,5 e 10,4 mm) para o estudo de caso RJ1;
- (ii) com mínimos de 2,573/2,571 e 2,584 m (45,8/45,6 e 46,9 mm) e máximos de 2,642/2,639 e 2,661 m (56,4 /56,1 e 58,0 mm), resultando nas amplitudes de 69/68 e 77 mm (10,6/10,5 e 11,1 mm) para o estudo de caso RJ2;

Figura 6 – Estudos de caso na cidade do Rio de Janeiro [RJ1 | RJ2 | RJ3] em [15 de fevereiro de 2015 | 19 de fevereiro de 2016 | 16 de março de 2015] com 8 horas por cada caso das [1200–2000 | 1200–2000 | 1500–2300] HL de CA a cada 15 minutos das estações meteorológicas ARSC/ARIG/ARPE/ARIR do sistema Alerta Rio e dados das estações de GNSS RDJN/ONRJ/RIOD quando disponíveis: (a) ZTD (m), média mensal de ZTD (m) e CA (mm [15min]⁻¹); e (b) IWV (mm), média de IWV (mm) e CA (mm [15min]⁻¹). Os máximos e os mínimos de ZTD e IWV estão com os símbolos destacados nas respectivas curvas. O acumulado de chuva de cada período dos 3 casos está descrito ao lado da identificação da estação meteorológica. Os máximos valores de ZTD, IWV e CA estão indicados de acordo com as cores das curvas das respectivas estações e próximos aos eixos das ordenadas. As linhas com traços longos e em preto indicam os valores da chuva nos percentis 75°, 90°, 95° e 99° correspondentes aos limiares de chuva de 0,6, 1,8, 3,6 e 9,8 mm que também estão indicados nas ordenadas do lado esquerdo ou direito. As médias de ZTD e IWV são referentes ao ciclo diurno mensal médio do período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018. Os valores min., med. e max. horário da TV de ZTD (IWV) em mm [15min]⁻¹ dos dados das estações disponíveis estão plotados abaixo dos eixos das abscissas. Os valores em preto são de TV de ZTD (IWV) a cada hora maiores que +10 (+2) mm [15min]⁻¹ ou menores que -10 (-2) mm [15min]⁻¹.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- (iii) com mínimos de 2,533/2,533 e 2,545 m (39,8/39,7 e 40,6 mm) e máximos de 2,637/2,629 e 2,672 m (53,8/52,9 e 58,6 mm), resultando nas amplitudes de 104/96 e 127 (14,0/13,2 e 18,0) para o estudo de caso RJ3.

O estudo de caso RJ1 é referente ao aglomerado convectivo associado à banda frontal que atingiu a Região Sudeste no dia 15/02/2015 (Apêndice A). Na coluna da esquerda da Figura 6(a) e 6(b), é ilustrada a marcha de ZTD (IWV) foi decrescente na primeira hora a partir das 12:00 HL na estação RIOD e até a segunda hora para as estações RDJN e ONRJ, para depois seguir uma tendência ligeiramente crescente e paralela ao ciclo diurno médio do mês de fevereiro até às 15:00 HL em rampas quase lineares. A partir das 15:00 HL, observou-se o início do crescimento de ZTD e IWV, marcando a origem de uma rampa não linear em uma curva semissenoidal que se estendeu até as 19:00 HL, perfazendo uma duração total de 5 horas. As máximas TVs de ZTD (IWV), que ocorreram próximas dos pontos de inflexão das semissenóides, foram de +14,9 (+2,30) mm [15min]⁻¹ na estação RIOD e +14,5 (2,05) mm [15min]⁻¹ na estação RDJN. Após os picos, observou-se que as rampas descendentes assumiram formas assimétricas em relação às rampas ascendentes imediatamente anteriores aos picos. Houve um decréscimo de ZTD e IWV na estação RIOD, com as mínimas TVs de ZTD (IWV) de -4,96 (-2,24) mm [15min]⁻¹, e um declínio mais acentuado na estação RDJN com as mínimas TVs de ZTD (IWV) de -12,6 (-2,26) mm [15min]⁻¹. As rampas descendentes das semissenóides foram sucedidas por um novo crescimento em ZTD e IWV, com tendências positivas em todas as três estações, indicando a continuação de alta umidade atmosférica.

As chuvas foram registradas nas estações entre 17:00 e 20:00 HL, com um pico de 11,8 mm [15min]⁻¹ na estação ARIG (barra azul) entre 18:30 e 18:45 HL aproximadamente 30 minutos após o pico de ZTD e IWV; e entre 60–75 minutos após o pico da máxima TV de ZTD e IWV na estação RDJN (e ONRJ). No entanto, o pico secundário da chuva registrada na estação ARIR (barra verde) ocorreu 15–30 minutos antes do eixo da crista alongada de ZTD e IWV na estação RIOD, porém ocorreu 60–75 minutos após o pico da média e da máxima TV de ZTD e IWV. Também houve registros de chuva moderada e leve nas estações ARIR e ARPE (barra marrom) desde aproximadamente 1 hora antes do eixo da crista de ZTD (IWV) da estação RIOD que se localizava mais perto dessas estações meteorológicas. Ademais, após o pico de ZTD (IWV), observou-se uma rápida diminuição nas TVs nas estações RDJN e ONRJ, seguida por um aumento entre 19:00 e

20:00, período que somente houve registros de chuva moderada e leve na estação ARSC (barras laranjas) a partir de 1 hora após o pico de ZTD e IWV.

O estudo de caso RJ2, ilustrado nas imagens realçadas do Anexo B por aglomerados convectivos isolados e sem grande extensão vertical, mas que atingiram a RMRJ causando alguns eventos de chuva forte. Também é ilustrado na coluna da central da Figura 6(a) e 6(b), que ocorreu em 19 de fevereiro de 2016, apresentou características semelhantes ao estudo de caso RJ1 em relação à configuração geral das curvas de ZTD e IWV. Nas estações RDJN e ONRJ, ocorreu uma sequência de uma rampa quase linear seguida por uma rampa não linear, formando uma curva semissenooidal aproximadamente das 15:00 às 19:00 HL. Na estação RIOD, este padrão se estendeu das 15:00 às 18:00 HL. A ocorrência de chuvas de todas as categorias iniciou-se a partir dos máximos de ZTD e IWV, nos pontos de inflexão e ao longo da rampa descendente.

A partir das 15:30, observou-se um crescimento de ZTD e IWV com significativo pico da máxima TV de ZTD (IWV) de +18,9 (+2,63) mm [15min]⁻¹ no ponto de inflexão da semissenoide na estação RIOD, e de +15,6 (+2,52) mm [15min]⁻¹ na estação ONRJ. Após os picos de ZTD e IWV, ocorreram variações, porém houve, no geral, uma rampa descendente curta na estação RIOD e uma rampa descendente quase linear na estação ONRJ; com as mínimas TVs de ZTD (IWV) de -9,73/-4,61/-4,50 (-1,81/+0,73/+0,81) mm [15min]⁻¹ na estação RIOD e de -6,55/-3,76/-6,77 (-1,69/-0,47/-1,22) mm [15min]⁻¹ na estação ONRJ.

As chuvas fortes e muito-fortes, que se concentraram entre 17:30 e 18:15 HL, ocorreram entre 15–60 minutos após os picos de ZTD e IWV, e entre 30–90 minutos após as máximas TVs de ZTD e IWV. Após as 18:15 HL houve uma diminuição na intensidade das chuvas, passando de fortes para moderadas e leves nas horas subsequentes.

No estudo de caso RJ3, ilustrado nas imagens realçadas do Anexo C por aglomerados convectivos isolados que atingiram a RMRJ causando alguns eventos de chuva forte, e ilustrado na coluna da direita da Figura 6(a) e 6(b), ocorrido em 16 de março de 2015, observou-se um padrão similar ao dos casos RJ1 e RJ2, com a ocorrência de rampas ascendentes quase lineares seguidas por uma semissenoide nas curvas de ZTD/IWV das estações RDJN/ONRJ/RIOD. A diferença foi que neste evento foi identificado um salto em ZTD e IWV na estação RIOD e uma semissenoide nas estações RDJN e ONRJ aproximadamente entre 18:00 e 21:00 HL. Em um período de 1,5 horas as variáveis ZTD e IWV cresceram rapidamente e atingiram o pico da curva, seguido de um declínio também abrupto. As TVs horárias de ZTD (IWV) mostraram valores positivos tanto na

máxima quanto na mínima horária; com pico da máxima TV de ZTD (IWV) de +21,3 (+3,33) mm [15min]⁻¹ na estação RIOD e de +17,9 (+2,61) mm [15min]⁻¹ na estação RDJN. Após o pico de ZTD (IWV), as variações reduziram drasticamente, alcançando a mínima TV de ZTD (IWV) de -20,9 (-3,94) mm [15min]⁻¹ na estação RIOD e -43,6 (-7,07) mm [15min]⁻¹ na estação RDJN. Os máximos de chuva, na categoria muito-forte, foram registradas aproximadamente entre 45–90 minutos após a máxima TV de ZTD e IWV, com os maiores acumulados de chuva (14,4 e 12,4 mm, respectivamente nas estações ARSC e ARIR) ocorrendo entre 0–45 minutos após o pico de ZTD e IWV. Neste estudo de caso também foi observado que os registros de chuva significativa ocorreram na rampa descendente após o pico de ZTD e IWV, exceto os primeiros registros de chuva ocorreram nas estações ARIR e ARIG, e quase simultaneamente ao eixo dos máximos de ZTD e IWV. A chuva na estação ARSC, com pico de 14,4 mm [15min]⁻¹, que foi o máximo acumulado em 15 minutos neste evento, iniciou a partir dos picos de ZTD e IWV na estação RDJN e a partir de 15 minutos após os picos de ZTD e IWV na estação ONRJ.

As principais características dos casos RJ1, RJ2 e RJ3 foram:

- (i) configurações de rampas ascendentes e descendentes quase lineares bem definidas para os três eventos;
- (ii) amplitudes relativamente grandes de ZTD (IWV) com médias de 83 (12) mm, 71 (11) mm e 109 (15) mm, respectivamente nos casos RJ1, RJ2 e RJ3; crescimento vespertino de ZTD (IWV) na forma de semissenóides assimétricas a partir de baixos valores nas rampas não lineares e com duração de 3 a 5 horas;
- (iii) valores elevados das TVs de ZTD (IWV) nos pontos de inflexão das rampas ascendentes das semissenóides dos casos RJ1 e RJ2 (a) na estação RDJN com médias variando de +9,12 a +10,6 (+1,35 a +1,43) mm [15min]⁻¹ e máximas variando de +14,5 a +14,7 (+2,05 a +2,38) mm [15min]⁻¹; e (b) na estação RIOD com médias variando de +9,99 a +11,7 (+1,08 a +1,53) mm [15min]⁻¹ e máximas variando de +14,9 a +18,9 (+2,3 a +2,63) mm [15min]⁻¹. A configuração das curvas de ZTD e IWV no caso RJ3 também apresentaram uma configuração de semissenóides assimétricas nas estações RDJN e ONRJ enquanto a configuração na estação foi de um salto em ZTD e IWV. Então, os valores das TVs de ZTD (IWV) no ponto de inflexão da rampa ascendente da semissenóide dos caso RJ3 na estação RDJN foi na média de +12,8 (+1,83) mm [15min]⁻¹ e máxima de +17,9 (+2,61) mm

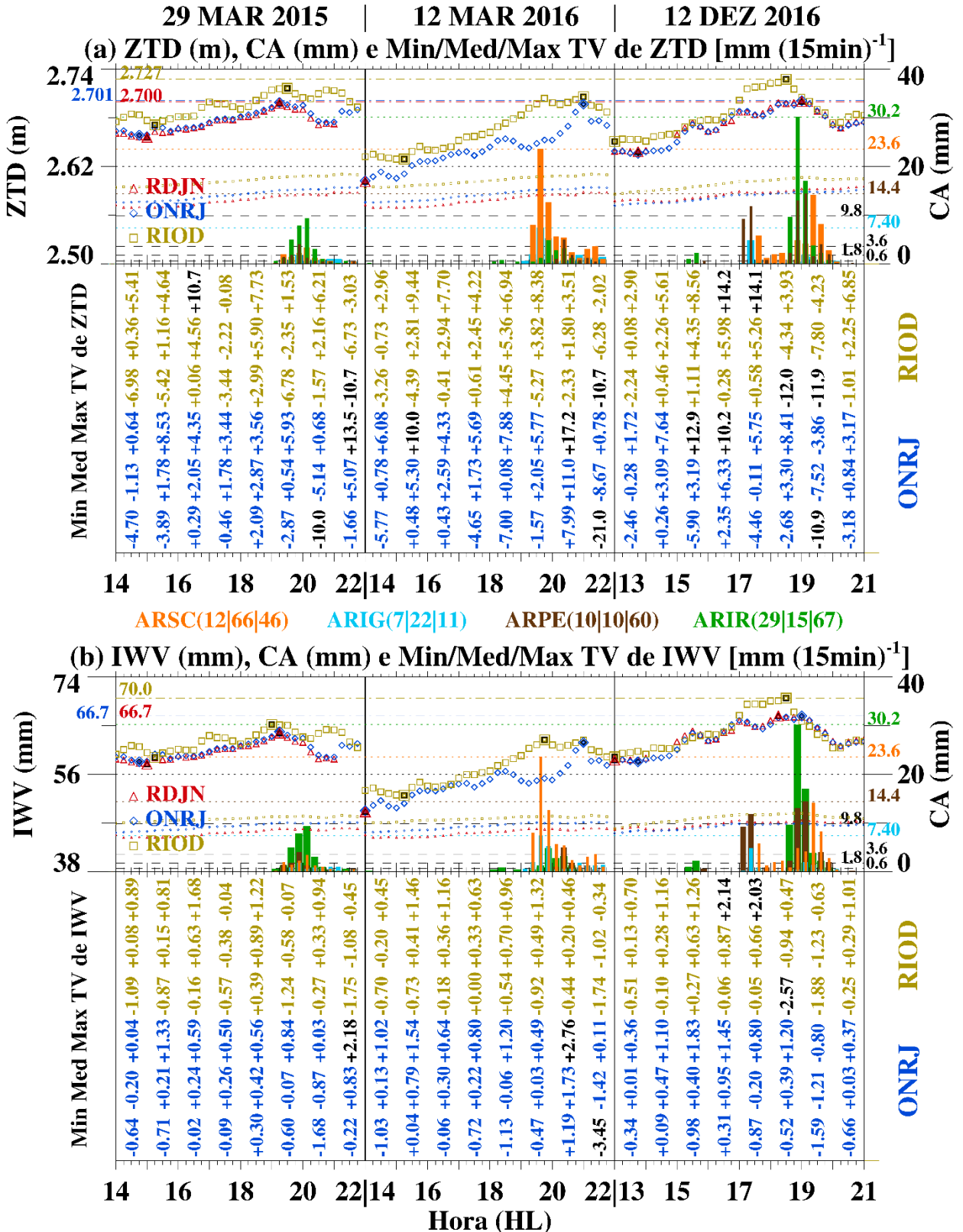
[15min]⁻¹; e no evento identificado como um salto em ZTD e IWV na estação RIOD, com a TV de ZTD (IWV) média de +17,3 (+2,66) mm [15min]⁻¹ e máxima de +21,3 (+3,33) mm [15min]⁻¹ na rampa ascendente;

- (iv) os picos da máxima TV de ZTD e IWV precederam os máximos de ZTD e IWV entre 30–60 minutos em todas as estações exceto na estação RIOD no caso RJ1 que teve uma crista alongada e o intervalo entre a máxima TV de ZTD e IWV e os máximos de ZTD e IWV foram entre 75–90 minutos. Os máximos de ZTD e IWV precederam o início de precipitações forte e muito-fortes entre 0–45 minutos. No entanto, no caso RJ1 a precipitação forte na estação ARIR ocorreu entre 15–30 minutos antes dos máximos de ZTD e IWV;
- (v) o início da precipitação — da categoria moderada até forte ou muito-forte — ocorreu ainda na rampa ascendente da semissenóide e na crista alongada de ZTD e IWV na estação RIOD do caso RJ1, e imediatamente após os picos de ZTD e IWV dos casos RJ2 e RJ3;
- (vi) os máximos de precipitação de todas as estações — categorizados como fortes ou muito-forte — ocorreram nas rampas descendentes de ZTD e IWV e entre 15 e 45 minutos após os picos de ZTD e IWV dos casos de RJ1, RJ2 e RJ3. Uma exceção foi observada na estação ARIR, em que o pico de precipitação forte ocorreu ainda durante a rampa ascendente não linear de ZTD e IWV.

3.3.2 Rampas ascendentes alongadas e protuberâncias escalonadas de ZTD e IWV

A Figura 7 destaca três eventos de chuva intensa, denominados RJ4, RJ5 e RJ6, ocorridos em 29 de março de 2015 das 14:00 às 22:00 HL, 12 de março de 2016 das 14:00 às 22:00 HL e 12 de dezembro de 2016 das 13:00 às 21:00 HL, respectivamente. Esses eventos apresentaram características semelhantes. Durante esses períodos de 8 horas, os valores das variáveis relacionadas à umidade permaneceram consistentemente acima daqueles observados no ciclo diurno mensal médio. Esses valores foram caracterizados por um crescimento em rampas prolongadas e/ou ondulações em forma de uma série de ‘protuberâncias’ (*bumps*) de ZTD e IWV escalonadas com cada uma tendo duração aproximada de 1 a 2 horas. Os valores de ZTD e IWV nesses períodos, nas estações RDJN, ONRJ e RIOD, foram, respectivamente:

Figura 7 – O mesmo que a Figura 6, exceto que para os casos [RJ4 | RJ5 | RJ6] de [29 de março de 2015 | 12 de março de 2016 | 12 de dezembro de 2016] com 8 horas por cada caso das [1400–2200 | 1400–2200 | 1300–2100] HL.



- (i) com mínimos de 2,656/2,658 e 2,671 m (57,9/58,4 e 59,1 mm) e máximos de 2,698/2,699 e 2,716 m (63,6/63,8 e 65,2 mm), resultando nas amplitudes de 42/41 e 45 mm (5,7/5,4 e 6,1 mm) para o estudo de caso RJ4;
- (ii) com mínimos de 2,602/2,602 e 2,629 m (49,1/49,2 e 52,1 mm) e máximos de — /2,697 e 2,706 m (— /61,9 e 62,4 mm), resultando nas amplitudes de — /95 e 77 mm (— /12,7 e 10,3 mm) para o estudo de caso RJ5;
- (iii) com mínimos de 2,638/2,636 e 2,650 m (58,6/58,3 e 59,2 mm) e máximos de 2,700/2,701 e 2,727 m (66,8/66,8 e 70,1 mm), resultando nas amplitudes de 62/65 e 91 (8,2/8,5 e 10,9 mm) para o estudo de caso RJ6.

No caso RJ4, ocorrido em 29 de março de 2015 e ilustrado pelas imagens de satélites do Anexo D que apresentam aglomerados convectivos profundos que atingiram a RMRJ e estavam associados a uma banda frontal sobre o oceano Atlântico e regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil. Este caso é também ilustrado na coluna da esquerda das Figuras 7(a) e 7(b), nota-se que as curvas de ZTD (IWV) já apresentavam valores elevados desde o início da tarde, atingindo picos próximos ou acima de 2,7 m (64 mm) entre 19:00 e 20:00 HL nas três estações. Em comparação com os estudos de caso RJ1, RJ2 e RJ3, o caso RJ4 exibiu valores mais baixos tanto nas magnitudes das médias TVs quanto nas amplitudes de ZTD e IWV. As curvas de ZTD e IWV na estação RIOD apresentaram uma série de protuberâncias proeminentes. Observou-se alternância entre valores positivos e negativos nas médias TVs de ZTD e IWV a partir das 16:00 HL, assim como alternância entre valores maiores e menores nas máximas e mínimas TVs de ZTD e IWV a partir de 15:00 HL, continuando até o final do período de estudo. O maior valor da média TV de ZTD (IWV) de +5,9 (+0,9) mm [15min]⁻¹ ocorreu de 15–75 minutos antes do eixo da protuberância que teve maior ZTD (IWV) e concomitante um período de 45 minutos de chuvas fortes na estação ARIR e chuva moderada-a-forte na estação ARPE.

A configuração de ZTD nas estações RDJN e ONRJ foi de uma rampa ascendente alongada com suaves ondulações até o pico e com médias TVs de ZTD e IWV relativamente baixas. O pico da média TV de ZTD (IWV) de +2,87 (+0,42) mm [15min]⁻¹ ocorreu entre 15–75 minutos antes do pico de ZTD (IWV), concomitante com o início de 1,5 horas de chuvas moderada-a-forte e moderada e de 45–60 minutos antes da máxima chuva na estação ARSC.

No caso RJ5, em 12 de março de 2016, ilustrado pelas imagens de satélites do Anexo E que apresentam aglomerados convectivos que atingiram a RMRJ e estavam associados a uma banda

frontal sobre a região. Este caso é também ilustrado na coluna central da Figura 7(a) e 7(b), houve pequenas ondulações nas curvas de ZTD e IWV da estação RIOD, que já exibiam valores relativamente elevados nas primeiras horas do estudo, porém menores que no estudo de caso RJ4. A partir das 17:00 HL, observou-se uma rampa alongada de aproximadamente 3 horas e de crescimento quase linear de ZTD e IWV culminando num primeiro pico de aproximadamente 2,7 m (62 mm) às 19:45 HL. ZTD (IWV) diminuiu suavemente e cresceu novamente até um segundo pico de aproximadamente o mesmo valor às 21:00 HL. Chuvas leves e intermitentes na estação ARIR começaram às 18:00 HL e intensificaram-se a partir das 19:30 HL, tornando-se fortes e coincidindo com o pico de ZTD e IWV na estação RIOD. A máxima TV de ZTD (IWV) na rampa foi de +8,38 (+1,32) mm[15min]⁻¹ e ocorreu de alguns minutos a 45 minutos antes do primeiro pico no intervalo de 19:00–20:00 HL e de 15–60 minutos antes do pico de chuva forte na estação ARIR. A chuva na estação ARPE ocorreu por 1,5 horas com o máximo na categoria forte ocorreu entre os picos de ZTD (IWV) da estação RIOD.

As curvas de ZTD e IWV na estação ONRJ apresentaram um padrão de protuberâncias desde o início da tarde, diferindo da rampa alongada observada na estação RIOD. O pico secundário de ZTD (IWV) ocorreu na protuberância às 18:30 HL, com valores de aproximadamente 2,65 m (56 mm). A máxima TV de ZTD (IWV) na rampa ascendente não linear da protuberância foi de +7,88 (+0,4) mm[15min]⁻¹ e ocorreu de 75–90 minutos antes do máximo das chuvas intensas na estação ARSC. Após a rampa descendente dessa protuberância, e durante um período de chuvas forte e muito-fortes, as curvas de ZTD (IWV) exibiram uma pequena ondulação seguida por um salto de máxima TV de +17,2 (+2,76) mm [15min]⁻¹. Este salto alcançou o valor máximo do período de ZTD (IWV) de aproximadamente 2,7 m (62 mm), coincidindo com a continuação de chuvas moderadas a fortes na estação ARSC, que totalizaram 66 mm em 2,5 horas.

O caso RJ6, ocorrido em 12 de dezembro de 2016, é apresentado por um grande e profundo SCM que atingiu os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais associados ao sistema frontal no Atlântico e a ZCOU na região (Anexo F; Inpe, 2016). Este caso também é ilustrado na coluna direita da Figura 7(a) e 7(b), observa-se um padrão distinto nas curvas de ZTD (IWV) das três estações, que apresentaram também valores significativamente acima da média do ciclo diurno mensal. A curva na estação RIOD curva caracterizou-se por um crescimento em rampas escalonadas. A penúltima rampa do período foi extremamente íngreme com a média das máximas TVs de ZTD (IWV) de +14,15 (+2,08) mm [15min]⁻¹. Este aumento ocorreu simultaneamente com

um primeiro período de chuvas intensas na estação ARPE, tanto nas categorias forte quanto muito-forte, e antecedeu o topo da rampa, com ZTD (IWV) de aproximadamente 2,72 m (69 mm), em 15 minutos. Como ZTD (IWV) já estava extremamente alto, a máxima TVs de ZTD (IWV) diminuiu para +3,9 (+0,5) mm [15min]⁻¹ e alcançou o pico extremo de ZTD (IWV) de 2,727 m (70 mm) — o valor mais alto registrado neste estudo — entre 45 minutos e 1 hora, e antecedeu um período de precipitação também extrema nas estações ARIR e ARPE entre 1–1,5 horas. A precipitação extrema ocorreu nestas estações logo após o pico de ZTD (IWV) na estação RIOD e durante toda a rampa descendente, atingindo máximos de 30,2 e 14,4 mm entre 15–45 minutos após o pico, respectivamente.

Nas estações RDJN e ONRJ, a configuração de crescimento de ZTD (IWV) exibiu três protuberâncias a partir da terceira hora do estudo, alcançando um máximo de 2,70 m (66,7 mm) na terceira protuberância que possuía uma crista alongada. As chuvas intensas na estação ARSC começaram na rampa descendente da segunda protuberância e se estenderam até a rampa descendente da terceira, totalizando 46 mm em 2,5 horas. O pico da máxima TV de ZTD (IWV) de +10,2 (+1,45) mm [15min]⁻¹ na rampa ascendente da protuberância ocorreu entre 30 e 45 minutos antes do pico de ZTD e (IWV) e entre 45 minutos e 1 hora antes do início das chuvas intensas na estação ARSC.

As principais características dos casos RJ4, RJ5 e RJ6 foram:

- (i) configurações de rampas ascendentes não lineares alongadas ou uma série de protuberâncias escalonadas na marcha de ZTD (IWV), cada uma com duração aproximada de 1 a 2 horas, e alcançando valores elevados de ZTD (IWV) próximos ou acima de 2,7 m (62 mm);
- (ii) pequenas amplitudes de ZTD (IWV) com média de 43 (5,7) mm para o caso RJ4, que teve crescimento de ZTD e IWV a partir de valores vespertinos já elevados. Porém, houve grandes amplitudes de ZTD (IWV) com médias de 86 (11,5) mm e 73 (9) mm, respectivamente nos casos RJ5 e RJ6 que tiveram rampas de crescimento vespertino a partir de médios e altos valores em direção aos extremos de ZTD e IWV;
- (iii) o valor mais elevado, dentre estes casos, da máxima TV de ZTD (IWV) de +17,2 (+2,8) mm [15min]⁻¹ na estação ONRJ no caso RJ5, foi um caso atípico, pois ocorreu após o extremo de precipitação na estação ARSC. Além disso, a

precipitação, na dianteira deste pico de 2,7 m na estação ONRJ, não chegou a ser da categoria forte. Assim, o valor mais alto de TV de ZTD (IWV) que precedeu níveis extremos de ZTD (IWV) foi de +14,15 (2,08) no caso RJ6. No entanto, médios valores das TVs de ZTD (IWV), variando de +3 a +8 (0,4 a 1,3) mm [15min]⁻¹ nas rampas ascendentes quase lineares alongadas ou escalonadas ou nas protuberâncias em altos valores de ZTD e IWV para os casos RJ4, RJ5 e RJ6;

- (iv) os picos da máxima TV de ZTD e IWV, nas rampas quase lineares alongadas e nas protuberâncias, precederam os máximos de ZTD e IWV entre 15–75 minutos, e precederam os máximos de precipitação entre 15–90 minutos nos casos RJ4, RJ5 e RJ6;
- (v) o início da precipitação — da categoria moderada até forte ou muito-forte — ocorreu no topo da rampa alongada ou da protuberância mais alta do caso RJ4, RJ5 e RJ6 quando ZTD e IWV estavam extremamente altos; ainda na rampa ascendente e íngreme de altos ZTD e IWV na estação RIOD do caso RJ6, e imediatamente após os picos de ZTD (IWV) e nas rampas descendentes dos casos RJ5 e RJ6;
- (vi) os máximos de precipitação de todas as estações — que foram da categoria forte ou muito-forte — ocorreram nas rampas descendentes de ZTD e IWV e entre 15–45 minutos após os picos de ZTD e IWV dos casos de RJ4 e RJ6; ainda na rampa alongada entre 15–30 minutos antes de um máximo extremo de ZTD (IWV) na estação RIOD dos casos RJ5 e RJ6; e precipitação extrema que ocorreu na estação ARSC que ocorreu após a rampa descendente e na ondulação seguinte de ZTD e IWV da estação ONRJ no caso RJ5.

3.3.3 Estudos de caso RJ7, RJ8 e RJ9: protuberâncias em elevado ZTD/IWV

A seguir são apresentados os três estudos de caso de chuva intensa, identificados como: RJ7, ocorrido nos dias 19–20 de novembro de 2017 (das 13:00 às 13:00 HL); RJ8, ocorrido em 11 de janeiro de 2011 (das 00:00 às 00:00 HL); e RJ9, ocorrido entre os dias 8–9 de abril de 2019 (das 12:00 às 12:00 HL). Os valores extremos de ZTD (IWV) nos períodos de 24 horas foram para o estudo de caso RJ7, respectivamente nas estações RDJN/ONRJ e RIOD, a partir dos mínimos de 2,625/2,625 e 2,640 m (54,7/55,3 e 56,6 mm) aos máximos 2,673/2,673 e 2,692 m (60,6/60,3 e

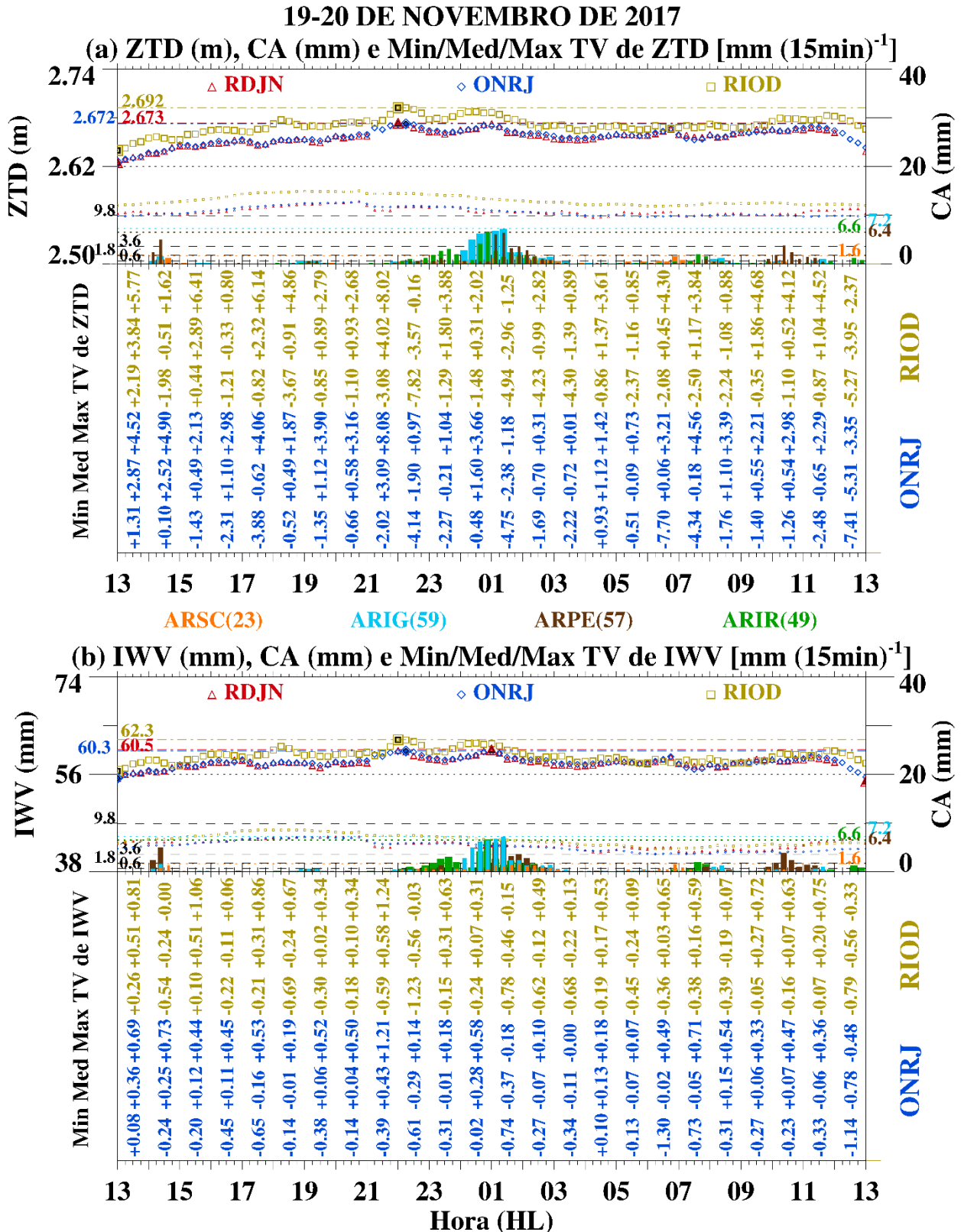
62,4 mm), resultando nas amplitudes de 48/48 e 52 mm (5,9/5,0 e 5,8 mm). Para os estudos de caso subsequentes, foram apresentados apenas os valores de ZTD nas estações ONRJ e RIOD:

- (a) para o caso RJ8, os valores mínimos foram de 2,590 m e 2,607 m, com máximos de 2,676 m e 2,703 m e amplitudes de 86 mm e 96 mm, respectivamente em ONRJ em RIOD;
- (b) para o caso RJ9, os valores mínimos foram de 2,596 m e 2,606 m, com máximos de 2,699 m e 2,705 m e amplitudes de 103 mm e 99 mm, respectivamente em ONRJ em RIOD.

O estudo de caso RJ7, apresentado na Figura 8, foram observados valores elevados de ZTD e IWV de 13:00 HL de 19 de novembro até às 13:00 HL de 20 de novembro de 2017. Durante este período, houve atuação da ZCAS (Anexo G; Inpe, 2017) que causaram chuvas totalizaram 23 mm, 49 mm, 57 mm e 59 mm nas estações ARSC, ARIR, ARPE e ARIG, respectivamente. No entanto, as imagens de satélite apresentadas no Anexo G mostram que as bandas de nebulosidade não eram profundas, que é indicado pelas Tbs menos frias que aquelas do caso RJ6.

Observou-se uma correlação significativa entre as perturbações nas curvas de ZTD e IWV, que apresentaram configurações similares às protuberâncias observadas nos casos RJ4, RJ5 e RJ6, assim como nos eventos de chuva associados. As protuberâncias foram identificadas na marcha de crescimento vespertino, particularmente na estação RIOD na primeira metade do período estudado, em que os valores intermediários de ZTD e IWV mostraram uma relação direta com a precipitação. No entanto, duas protuberâncias se destacaram na marcha de ZTD e IWV durante ciclos em que a umidade atmosférica estava significativamente elevada. A primeira protuberância foi registrada entre 21:00 e 23:00 HL, quando os valores de ZTD (IWV) aumentaram de aproximadamente 2,67 m (60 mm) para um pico de 2,69 m (62,3 mm) às 22:00 HL na estação RIOD. O pico da máxima TV de ZTD (IWV) de 8,02 (1,24) mm [15min]⁻¹ ocorreu entre 15–30 minutos antes do máximo de ZTD (IWV) e coincidiu com o início de 6 horas de chuva de leve a forte em pelo menos uma das quatro estações. As chuvas na categoria moderada-a-forte na estação ARIR começaram às 23:00 HL na rampa descendente da primeira protuberância dos mais altos valores da curva e continuaram na rampa ascendente da segunda protuberância até às 00:00 HL. Esta segunda protuberância também alcançou níveis elevados de ZTD e IWV, mas as TVs foram menores devido à sua forma alongada com duração de aproximadamente 3,5 horas. Chuvas fortes ocorreram por uma hora, a partir do pico de ZTD e IWV, às 00:30 HL nas estações ARIR e ARPE, ocorrendo de 60 a 75 minu-

Figura 8 – O mesmo que a Figura 7, exceto que para o caso RJ7 das 13:00 HL do dia 19 até às 13:00 HL do dia 20 de novembro de 2017.



Fonte: Elaborada pelo autor.

tos após o pico da máxima TV de ZTD e IWV.

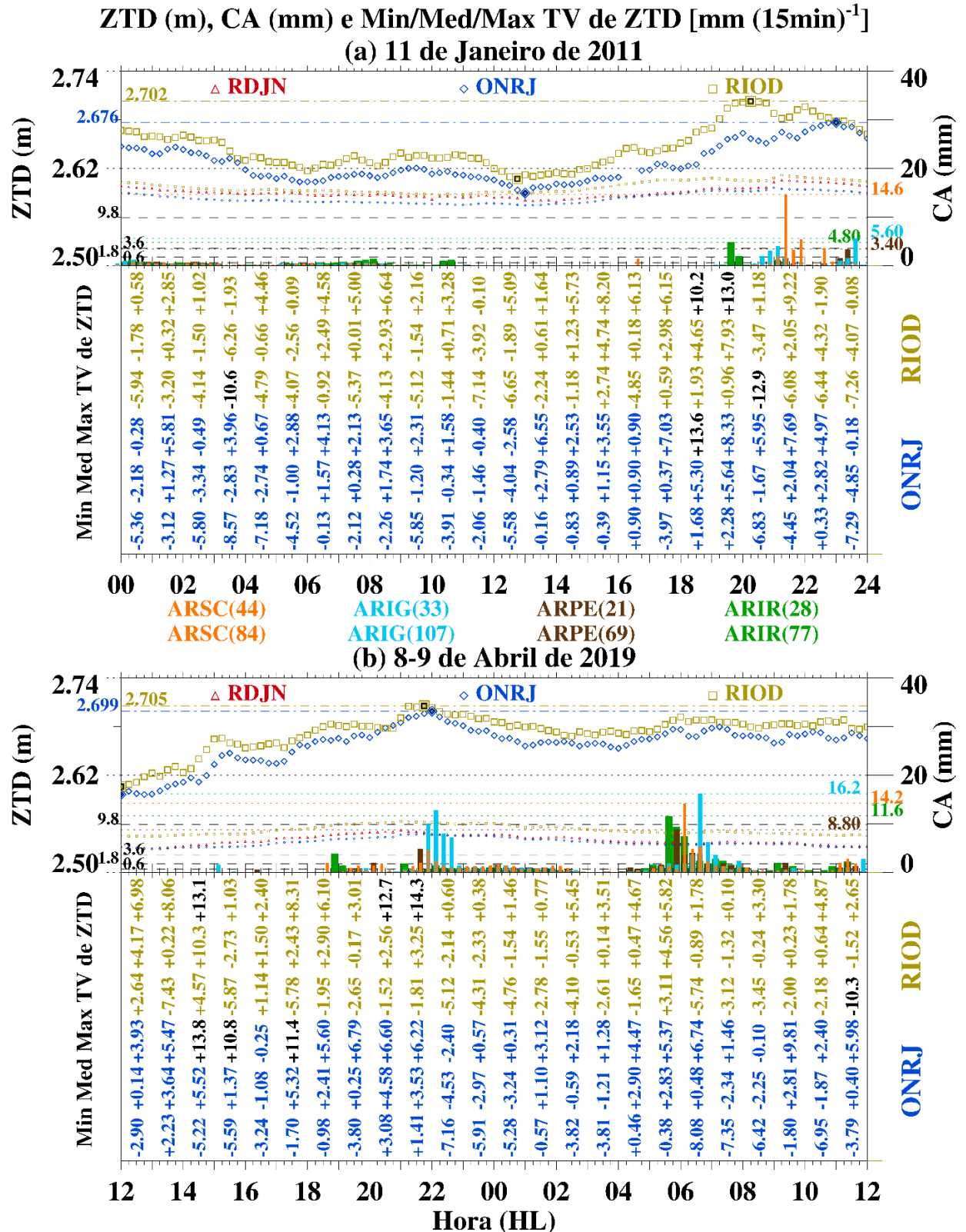
As curvas de ZTD e IWV nas estações RDJN e ONRJ exibiram uma configuração aproximadamente paralela à observada na estação RIOD, embora a diferença de ZTD (IWV) entre RIOD e RDJN/ONRJ fosse de aproximadamente 20 mm. As chuvas registradas na estação ARSC e/ou na estação ARIG foram contínuas por 6 horas, exceto por uma interrupção de 15 minutos. As chuvas na estação ARSC (ARIG), que foram moderadas (fortes) por 2 horas (75 min), coincidiram com o máximo (ponto de inflexão da rampa ascendente) da protuberância nas curvas de ZTD e IWV. Outros períodos de precipitação entre as categorias leve e moderada-a-forte foram correlacionados com protuberâncias mais suaves nas curvas de ZTD e IWV nas estações RIOD e RDJN/ONRJ:

- (i) chuvas nas categorias moderada, moderada-a-forte e forte por 75 minutos durante o crescimento de ZTD (IWV) no período vespertino;
- (ii) um intervalo de 4 horas de chuvas nas categorias leve e moderada e outro de 2 horas nas categorias moderada e moderada-a-forte, respectivamente nas primeiras e últimas horas no período matutino, quando ZTD e IWV permaneciam elevados.

Os dois estudos de caso subsequentes utilizam os dados de ZTD obtidos das estações RIOD e ONRJ. A Figura 9 detalha os eventos correspondentes aos episódios notáveis de chuvas extremas que impactaram especialmente a região serrana o estado do Rio de Janeiro em 2011 (Dourado; Arraes; Silva, 2013; Avelar *et al.*, 2013) e a cidade do Rio de Janeiro em 2019 (Climatempo, 2019a; Prefeitura do Rio de Janeiro, 2020).

No estudo de caso RJ8, representado na Figura 9a, foram analisadas as curvas de ZTD nas estações RIOD e ONRJ, juntamente com os dados de precipitação acumulada do período das 00:00 às 24:00 HL do dia 11 de janeiro de 2011. Apesar da cidade Rio de Janeiro não ter sofrido a devastação ocorrida na região serrana — resultado das chuvas extremas decorrentes da interação entre fenômenos de diferentes escalas, como a ZCAS, frente fria e circulações locais (Anexos H e I), conforme discutido nos estudos de Lopez *et al.* (2023) e Barcellos e Quadro (2019) —, também ocorreram precipitações estratiformes e convectivas significativas na capital. Registrou-se precipitação tipicamente estratiforme nas categorias leve e moderada, porém contínua de 00:00 até às 11:00 HL, que somando com a precipitação dos outros horários totalizou em 24 horas 44 mm, 33 mm, 21 mm e 28 mm, respectivamente nas estações ARSC, ARIG, ARPE e ARIR.

Figura 9 – O mesmo que a Figura 8, exceto que só para as variáveis ZTD, média de ZTD, valores min., med. e max. horário da TV de ZTD e CA nos casos (a) RJ8 do dia 11 de janeiro de 2011 de 0000–24:00 HL; e (b) RJ9 do dia 8 às 12:00 HL até o dia 9 de abril de 2019 às 12:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As curvas de ZTD refletiram o ciclo diurno médio com flutuações acompanhadas das precipitações, com um declínio noturno até os mínimos entre 12:45 e 13:00 HL, alcançando 2,60 m na estação RIOD e 2,59 m na estação ONRJ. Houve um aumento quase linear de ZTD no início da tarde, possivelmente impulsionado pelo aquecimento solar, com a ocorrência de uma protuberância na rampa ascendente na estação RIOD, mas sem resposta significativa de precipitação até o início da noite.

A partir das 19:00 HL, o ZTD na estação RIOD exibiu protuberâncias significativas, com a máxima TV atingindo $+13 \text{ mm [15min]}^{-1}$ entre 19:00 e 20:00 HL, resultando em um pico principal de 2,702 m às 20:15, seguido por uma rampa descendente e uma nova ascensão, atingindo outro pico significativo às 22:00 HL. Registrou-se chuva moderada a forte, especialmente entre 19:30 e 20:00 HL, coincidindo com a rampa ascendente em ZTD_{RIOD} . Diversos eventos de chuva foram registrados desde o momento da taxa máxima de crescimento de ZTD até a meia-noite. Houve chuva forte e moderada na estação ARIR entre 19:30 e 20:00 HL na posição do ponto de inflexão da rampa ascendente da primeira protuberância principal em ZTD_{RIOD} . Também houve registros de chuva moderada e moderada-a-forte nas rampas descendentes seguintes.

Na estação ONRJ, um padrão similar de altas taxas de crescimento de ZTD foi observado no final da tarde, com máximas TVs de $+13,6$ e $+8,33 \text{ mm [15min]}^{-1}$ a partir de 18:30. A sequência de protuberâncias culminou em um pico de 2,676 m. As chuvas, variando de moderada a muito-forte, foram registradas principalmente nas rampas ascendente e descendente da segunda protuberância na estação ARSC, com o máximo de precipitação de $14,6 \text{ mm [15min]}^{-1}$ ocorrendo logo após o segundo pico de ZTD. Chuvas variando da categoria moderada a forte registradas na estação ARIG ocorreram nas rampas descendentes da primeira e da terceira protuberâncias.

No caso RJ9, ilustrado na Figura 9b, que abrange o período do meio-dia de 8 de abril até o meio-dia de 9 de abril de 2019, houve precipitação contínua por várias horas, com volumes expressivos acumulados de 69 mm, 77 mm, 84 mm e 107 mm, respectivamente, nas estações ARPE, ARIR, ARSC e ARIG. As chuvas extremas foram causadas aglomerados convectivos, que atuaram na região em dois momentos: (i) entre 00:00 e 03:00 Z (Anexo J); e (ii) entre 08:00 e 11:00 Z (Anexo K), associados à ZCOU (Inpe, 2019b). Estes eventos causaram transtornos significativos na cidade do Rio de Janeiro, com recordes de precipitação superando 300 mm em 24 horas em vários bairros, e atingindo um máximo de 343,4 mm na estação da Rocinha, conforme reportado pela Prefeitura do Rio de Janeiro (2020). As curvas de ZTD mostraram elevações notáveis,

começando acima da média do ciclo diurno mensal com aumentos significativos, culminando em máximos de 2,70 m em RIOD e 2,69 m em ONRJ às 21:45 e 22:00 HL, respectivamente.

As configurações das marchas de ZTD nas estações nas 24 horas foram com a ocorrência de protuberâncias e rampas. A primeira protuberância mais destacada no ZTD de ambas as estações ocorreu no meio da tarde, mas ainda nas rampas de crescimento vespertino. A segunda protuberância mais pronunciada começou às 17:00 HL, marcando o início da precipitação contínua que durou 8 horas. As chuvas foram das categorias moderada e forte nos primeiros 45 minutos e alternaram entre leve e moderada ao longo da rampa descendente após o pico de ZTD nas estações ONRJ e RIOD. Os detalhes em torno do pico de ZTD na estação RIOD incluem:

- (i) uma rampa ascendente íngreme e curta, com uma média da máxima TV de ZTD de $+13,5 \text{ mm [15min]}^{-1}$ entre 20:45 e 21:15 HL, acompanhada de chuva moderada em ARIR;
- (ii) uma crista alongada de ZTD começando às 21:15 HL com chuva forte na estação ARPE coincidindo com o pico de ZTD;
- (iii) uma rampa descendente quase linear prolongada entre 22:15 e 02:30 HL com o valor da TV de ZTD média de $-1,6 \text{ mm [15min]}^{-1}$, acompanhada por chuva moderada ao longo da rampa nas estações ARPE ou ARIR.

Já os detalhes em torno do pico de ZTD na estação ONRJ foram:

- (i) uma rampa ascendente quase linear das 20:00 às 22:00 HL com uma TV de ZTD média de $+6,4 \text{ mm [15min]}^{-1}$, durante a qual houve chuva moderada a leve contínua em ARSC, com uma interrupção apenas de 15 minutos e chuva forte por 15 minutos imediatamente antes do pico de ZTD;
- (ii) uma rampa descendente quase linear das 22:00 às 01:00 HL com uma TV de ZTD média de $+3,6 \text{ mm [15min]}^{-1}$, começando com chuva moderada a forte nos primeiros 15 minutos e continuando com chuva moderada em ARSC.

Após uma interrupção de cerca de uma hora, a chuva recomeçou às 04:15 HL, simultaneamente a um novo aumento no ZTD com protuberâncias e rampas quase lineares que precederam os picos secundários de ZTD às 06:00 HL. As chuvas de intensidade variando entre as categorias moderada a muito-forte ocorreram nas estações ARPE e ARIR momentos antes e depois dos picos secundários de ZTD. O ZTD permaneceu elevado, oscilando com chuvas de variadas intensidades até o final do período analisado.

Após os máximos absolutos de ZTD e uma subsequente redução nas rampas descendentes quase lineares e flutuações em RIOD e ONRJ, os valores de ZTD permaneceram elevados, superiores a 2,66 m para RIOD e 2,65 m para ONRJ, até às 03:00 HL. Nesse momento, cessaram as chuvas moderadas e leves que haviam persistido por várias horas. Após uma interrupção de cerca de uma hora, a chuva retomou às 04:15 HL, coincidindo com um novo aumento no ZTD, que apresentou protuberâncias e rampas quase lineares. As máximas TVs de ZTD alcançaram apenas os valores médios de +4,67 e +5,82 mm [15min]⁻¹ na estação RIOD, e +4,47 e +5,37 mm [15min]⁻¹ na estação ONRJ, antecedendo os picos secundários de ZTD às 06:00 HL nas duas estações.

O pico de precipitação em cada estação meteorológica associado aos máximos secundários de ZTD ocorreu em momentos distintos: em ARPE (ARIR), a precipitação de categoria forte (muito-forte) aconteceu ainda rampa ascendente em 15 (30) minutos antes do pico de ZTD em RIOD. Enquanto isso, o pico de chuva muito-forte em ARSC (ARIG) ocorreu 15 (45) minutos após o pico de ZTD em ONRJ. Durante esse período, o ZTD continuou em níveis elevados, oscilando juntamente com as chuvas de diversas intensidades. Após o pico de chuva de todo o período, que aconteceu na estação ARIG, houve uma diminuição para chuva forte, daí as intensidades variaram das categorias de moderada-a-forte, moderada e leve em todas as estações até o final do período analisado.

As principais características dos casos RJ7, RJ8 e RJ9 foram:

- (i) configurações de rampas não lineares em forma de protuberâncias proeminentes ou em rampas ora curtas ora alongadas na marcha de ZTD (IWV), que ocorreram em uma atmosfera com valores já elevados de ZTD (IWV). Por exemplo, houve um aumento de 20 (2) mm em 30 a 60 minutos, antecipando chuvas fortes a muito-fortes em 30 a 90 min;
- (ii) pequenas amplitudes de ZTD (IWV) com média de 50 (5,6) mm em condições de atmosfera saturada. No entanto, houve grandes amplitudes de ZTD com médias de 95 mm nos casos em que as rampas de crescimento vespertino partiram de valores médios a altos em direção aos extremos de ZTD;
- (iii) o valor mais elevado, dentre estes casos, da máxima TV de ZTD de +14,3 mm [15min]⁻¹ foi registrado na estação RIOD; contudo, a TV de ZTD na estação ONRJ foi de +6,6 mm [15min]⁻¹ para o mesmo evento de precipitação forte;

- (iv) os picos da máxima TV de ZTD e IWV, nas rampas quase lineares alongadas e nas protuberâncias, precederam os máximos de ZTD e IWV por 15–45 minutos e antecederam os máximos de precipitação por 30–90 minutos nos casos RJ7, RJ8 e RJ9;
- (v) o início da precipitação — categorizada de moderada até forte ou muito-forte — ocorreu ainda na rampa ascendente e íngreme dos casos RJ8 e RJ9 quando ZTD estava extremamente elevado; e nas rampas descendentes do caso RJ7;
- (vi) os máximos de precipitação de todas as estações — categorizados como fortes ou muito-fortes — ocorreram entre o topo das rampas ascendentes, picos de ZTD (ou IWV) e das rampas descendentes das protuberâncias secundárias nos valores elevados de ZTD (ou IWV) dos casos RJ7, RJ8 e RJ9. Também houve precipitações intensas entre o topo da rampa ascendente, o pico e a rampa descendente de ZTD da protuberância primária nos valores elevados de ZTD do caso RJ9.

No próximo capítulo, é explorada a relação entre ZTD e eventos de chuvas intensas na cidade de Belém, ampliando a compreensão sobre estes fenômenos meteorológicos em contextos geográficos, climáticos e meteorológicos distintos.

CAPÍTULO 4 ZTD E AS PRECIPITAÇÕES SEVERAS EM BELÉM

Eventos de chuvas intensas são comuns em Belém e possuem um potencial significativo de impacto na cidade. Neste capítulo, é realizada uma comparação entre os dados de precipitação provenientes de duas estações distintas, além da análise da distribuição espacial e temporal das Tbs do topo das nuvens no canal IR (Janowiak; Joyce; Yarosh, 2001). Adicionalmente são investigados os dados de precipitação da estação INBE concomitantemente aos dados de ZTD das estações de GNSS: LPGS (da rede iGMAS), BELE e BEPA da RBMC disponíveis, validados e processados, respectivamente, entre (i) dezembro de 2018 a março de 2022, (ii) julho de 2014 a novembro de 2022 e (iii) janeiro de 2010 a novembro de 2022. Essas análises são utilizadas para validar os dados de precipitação para fornecer um suporte nas investigações das relações entre as chuvas extremas e o ZTD na região de Belém.

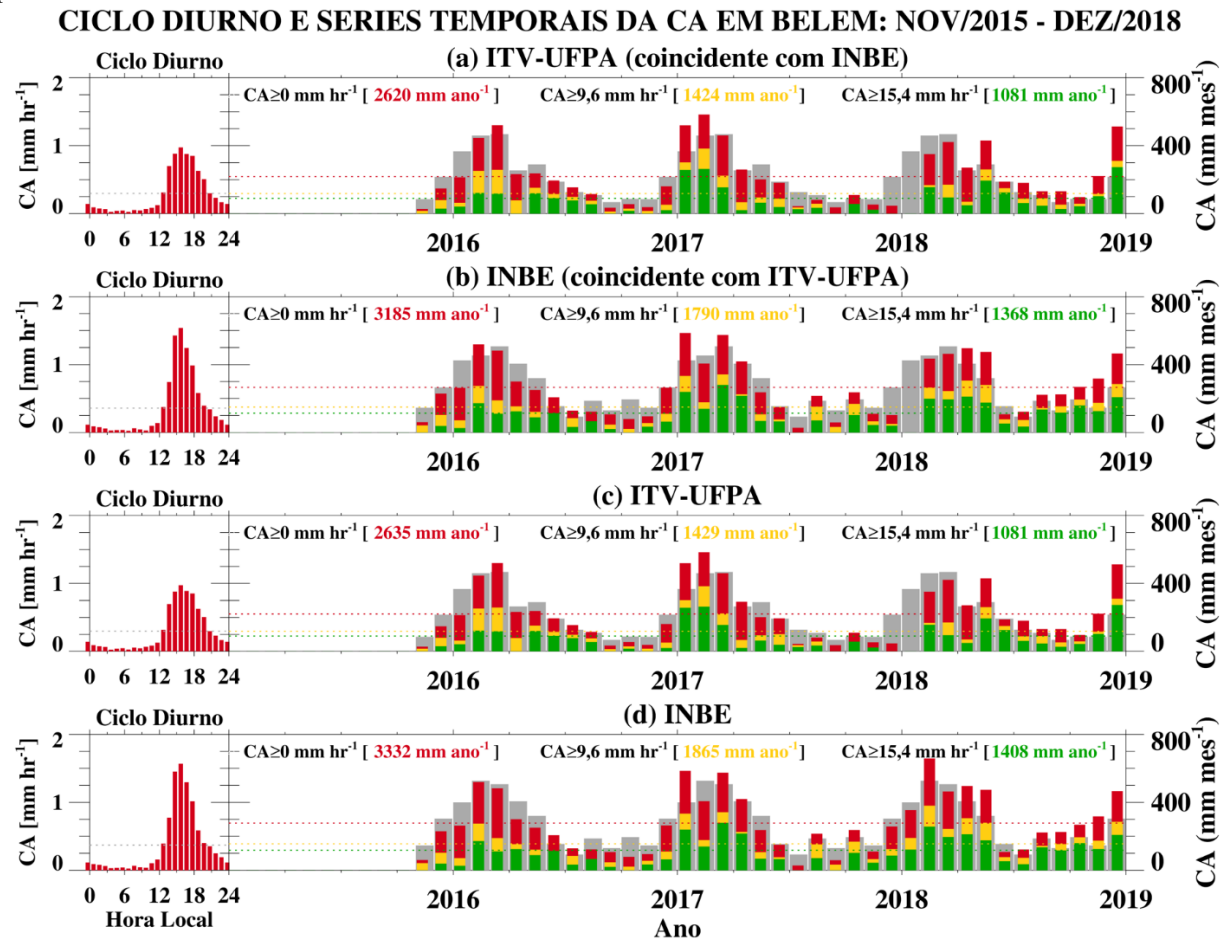
Este capítulo é estruturado em três partes: na primeira, realiza-se a análise comparativa da distribuição mensal e anual, bem como do ciclo diurno da chuva, conforme registrado nas estações meteorológicas do INMET (INBE) e do ITV (ITV-UFPA), que estão localizadas em sub-regiões com algumas características fisiográficas diferentes; e da distribuição espacial e temporal de Tbs do topo de nuvens no canal IR. A segunda seção também aborda as séries temporais, médias anuais e sazonais, além do ciclo diurno médio do ZTD das estações LPGS, BELE e BEPA; e da CA na estação INBE. A terceira parte do capítulo concentra-se nos estudos de caso de chuvas extremas, investigando a relação destes eventos com a variabilidade do ZTD. Nessa seção são incluídos outros parâmetros meteorológicos relevantes.

4.1 Comparações da chuva mensal e anual e ciclo diurno médio de precipitação

A Figura 10 retrata o ciclo diurno médio da CA (em mm hr^{-1}) e a série temporal dos dados mensais, assim como as médias anuais expressas em milímetros por ano da CA, provenientes das estações meteorológicas ITV-UFPA e INBE, abrangendo o intervalo temporal de novembro de 2015 a dezembro de 2018.

Os painéis (a) e (b) da figura destacam os totais e médias da CA a partir dos dados horários que coincidiram entre as estações ITV-UFPA e INBE. Por outro lado, os painéis (c) e (d) exibem todos os dados disponíveis de ITV-UFPA e de INBE, respectivamente, independentemente um do

Figura 10 – Ciclo diurno médio da CA (em mm hr^{-1}) e série temporal de dados mensais e anuais (em mm mês^{-1}) da CA horária nas estações meteorológicas do ITV (ITV-UFPA) e INMET (INBE), cobrindo o período de novembro de 2015 a dezembro de 2018. Os painéis (a) e (b) exibem os totais e médias dos dados horários da CA que coincidem entre as estações ITV-UFPA e INBE, enquanto os painéis (c) e (d) apresentam todos os dados disponíveis e independentes de ITV-UFPA e INBE. As contribuições mensais da CA são visualizadas por meio de barras coloridas: barras vermelhas representam o total mensal de chuva com o critério da $\text{CA} \geq 0 \text{ mm hr}^{-1}$; barras douradas indicam o total mensal das ocorrências da $\text{CA} \geq 9,6 \text{ mm hr}^{-1}$ na categoria de chuva moderada-a-forte, forte e muito-forte; e barras verdes destacam o total mensal onde a CA foi igual ou superior a $15,4 \text{ mm hr}^{-1}$ na categoria de chuva forte e muito-forte. Além disso, as médias mensais da CA, expressos em mm mês^{-1} , são representados pelas barras cinzas. Os valores da média total anual da CA, expressos em mm ano^{-1} , estão apresentados entre colchetes nos topos dos painéis, conforme os critérios estabelecidos para as contribuições. As linhas horizontais representam as médias (em mm mês^{-1}) da CA de acordo com a categoria dos dados apresentados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

outro. Para garantir a representatividade das médias mensais exibidas nesses painéis, foi adotado o critério de incluir apenas os meses em que pelo menos 70% de todas as observações horárias estavam disponíveis, assegurando assim a confiabilidade das médias calculadas.

O ciclo diurno médio da CA na estação ITV-UFPA, cujos horários foram coincidentes com os da estação INBE, conforme ilustrado no painel (a) da Figura 10, revela uma configuração similar ao ciclo diurno médio de todos os dados independentes, conforme exibido no painel (c). Em ambos os cenários, os horários de máxima precipitação, ultrapassando 72% do valor do pico, ocorreram, em média, das 13:00 às 18:00 HL.

Os picos de CA na estação ITV-UFPA foram de $0,9737 \text{ mm hr}^{-1}$ e $0,9734 \text{ mm hr}^{-1}$, respectivamente para os que coincidem com os da estação INBE (painel “a”) e para os dados independentes (painel “c”), ambos ocorrendo entre 15:00 e 16:00 HL. As médias de CA foram de $0,2976 \text{ mm hr}^{-1}$ para os dados nos horários coincidentes e $0,2982 \text{ mm hr}^{-1}$ para os dados independentes. Os valores mínimos de CA em ITV-UFPA foram registrados do início do dia até as 12:00 HL.

De maneira similar, a estação INBE exibiu um padrão consistente em seus valores de CA, tanto para os dados que coincidiram com a ITV-UFPA (painel “b”) quanto para os dados independentes (painel “d”). No entanto, é notável que os valores de CA registrados na estação INBE durante as horas tarde foram consistentemente mais altos. Especificamente, os picos de CA se concentraram no intervalo das 14:00 às 17:00 HL.

Nos dados da estação INBE em que os horários coincidem com aqueles da estação ITV-UFPA (painel “b”), foi observado um pico de CA de $1,5383 \text{ mm hr}^{-1}$, enquanto nos dados independentes (painel “d”), o pico foi ligeiramente mais alto, $1,5685 \text{ mm hr}^{-1}$, ambos registrados entre 15:00 e 16:00 HL; as médias foram de $0,3594 \text{ mm hr}^{-1}$ e $0,3707 \text{ mm hr}^{-1}$, respectivamente, para os dados nos horários coincidentes e independentes.

Esses resultados indicam que a CA na estação INBE, tanto nos cenários de dados nos horários coincidentes quanto independentes, tendeu em registrar valores mais altos de precipitação do que na estação ITV-UFPA nas horas da tarde. Assim, o máximo (média) do ciclo diurno da CA na estação ITV-UFPA (painel “a”) representou 63% (83%) do valor correspondente na estação INBE (painel “b”) para os dados nos horários coincidentes, enquanto o máximo (média) na estação ITV-UFPA (painel “c”) representou 62% (80%) daquele de INBE para os dados independentes (painel “d”).

Os painéis da Figura 10 também exibem as séries temporais da CA (em mm mês⁻¹) abrangendo um período de mais de três anos, incluindo as médias e os totais mensais e anuais. Os totais mensais de CA são ilustrados por meio de barras coloridas, seguindo um esquema específico:

- a) barras vermelhas, indicando a precipitação total. Este critério é aplicado quando a CA é igual ou superior a 0 mm hr⁻¹, representando, portanto, a quantidade total de precipitação registrada no mês;
- b) barras douradas, que representam a soma da precipitação horária com intensidade de moderada-a-forte, forte e muito-forte em cada mês. Este critério é definido para a CA igual ou superior a 9,6 mm hr⁻¹;
- c) barras verdes, indicando a soma da precipitação horária com intensidade forte e muito-forte em cada mês. Para esta classificação, o critério aplicado é uma CA igual ou superior a 15,4 mm hr⁻¹.

Além de exibir os totais mensais, a Figura 10 também enfatiza as médias mensais de CA ao longo do período, expressas em mm mês⁻¹, visualizadas através de barras cinzas. Estas barras fornecem um panorama detalhado da média mensal de chuva acumulada, complementando a representação dos totais mensais.

A Figura 10 também destaca a média anual da CA, expressa em mm ano⁻¹, oferecendo uma visão abrangente da quantidade total de chuva acumulada ao longo do período desses três anos e dois meses. Estes valores anuais são claramente indicados entre colchetes, localizados na parte interna e no topo de cada painel, facilitando a análise da quantidade total de chuva acumulada, de acordo com cada categoria de intensidade de precipitação. Além disso, esses dados anuais são representados no gráfico por linhas tracejadas e coloridas, com os valores correspondentes expressos em mm mês⁻¹ na ordenada.

Para as médias totais anuais nos dados dos horários coincidentes (painéis “a” e “b”), a CA na estação ITV-UFGA foi de 2620 mm (enquanto na estação INBE foi de 3185 mm), o que representa 82% da média total na estação INBE. Já para os dados independentes (painéis “c” e “d”), a CA na estação ITV-UFGA foi de 2635 mm (comparada a 3332 mm na estação INBE), equivalendo a 79% da média total na estação INBE. A média da CA na estação INBE foi da mesma ordem de grandeza dos valores das Normais Climatológicas das estações automáticas e convencionais do INMET e da Embrapa Amazônia Oriental, embora para períodos distintos, conforme o Apêndice A.

A contribuição por categoria na precipitação total da ITV-UFPA, tanto para os dados nos horários coincidentes como independentes, foi de aproximadamente 54% para $CA \geq 9,6 \text{ mm hr}^{-1}$ e 41% para $CA \geq 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$. Na estação INBE, essa contribuição foi de 56% para $CA \geq 9,6 \text{ mm hr}^{-1}$ e 43% para $CA \geq 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$.

Nos painéis (a) e (b), que representam as medições simultâneas da precipitação acumulada nas estações ITV-UFPA e INBE, observa-se que, em poucos meses, a CA foi maior na ITV-UFPA do que na INBE. Um exemplo notável é fevereiro de 2017, quando a estação ITV-UFPA registrou 583,4 mm comparados a 405,8 mm na estação INBE. No entanto, na maioria dos outros meses do período total, a CA na estação ITV-UFPA foi mais baixa do que na estação INBE, especialmente no mês de abril de cada ano, reduzindo assim a média da CA desse mês, por exemplo, para valores abaixo da média de maio, que é climatologicamente menor que a média de abril, conforme as Normais Climatológicas apresentadas no Apêndice A (e.g., Bastos *et al.*, 2002; Nechet, 1984; Moraes; Francisco Filho, 2018). Outro exemplo de discrepância está nas medições nas duas estações meteorológicas concernente ao recorde do total mensal do período de estudo com o valor da CA de 658 mm em fevereiro de 2018 na estação INBE (painel “d”). O valor da CA correspondente na estação ITV-UFPA foi medido em 350 mm (painéis “a” e “c”); e o valor da CA na estação INBE nos horários simultâneos com os horários da estação ITV-UFPA foi reduzido para 435 mm. Os meses menos chuvosos também registraram menor precipitação na estação ITV-UFPA em comparação com a registrada na estação INBE, tanto nos dados dos horários coincidentes quanto nos dados independentes. Além disso, janeiro de 2018 teve um registro total de apenas 0,4 mm na ITV-UFPA, que não foi considerado para os cálculos da média mensal (barras cinzas) nos painéis “a” e “c”, mas é usado para efeitos comparativos com os 354,2 mm totalizados naquele mês na estação INBE (painel “d”).

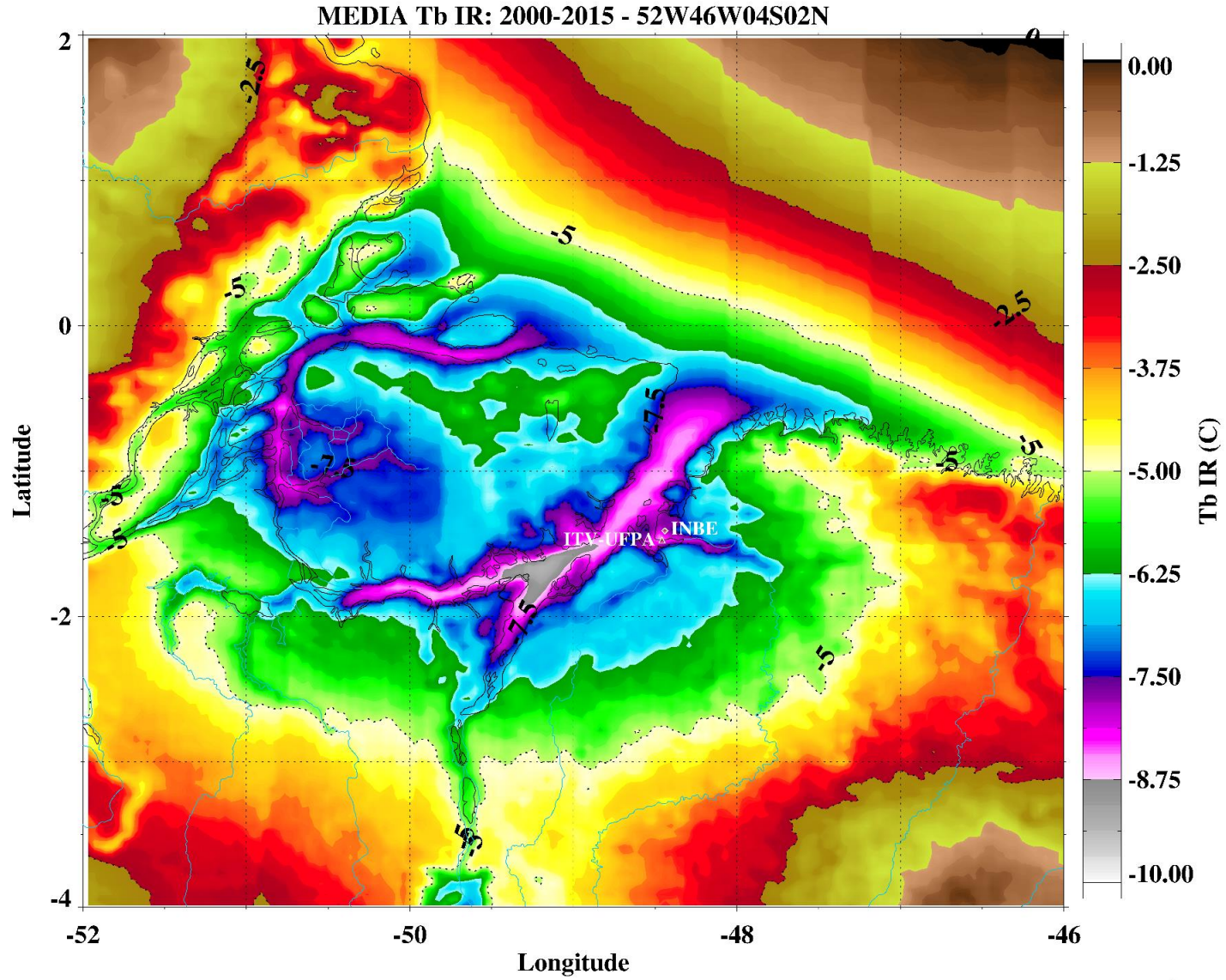
As análises das precipitações conduzidas destacam uma variação substancial na CA na comparação dos dados da estação INBE com os dados da estação ITV-UFPA, esta última localizada a 7,27 km de distância, na direção sul-sudoeste. Esta investigação foi enriquecida com o uso de médias totais, sazonais e de parte do ciclo diurno da Tb do topo das nuvens no canal IR, coletadas ao longo de 16 anos. Embora esta metodologia represente uma abordagem indireta e os conjuntos de dados analisados cubram diferentes períodos, ela proporciona insights valiosos sobre a distribuição espacial e temporal da precipitação nas áreas nordeste e norte do estado do Pará, assim como nas regiões sudeste e leste do estado do Amapá.

As Figuras 11 e 12 ilustram, respectivamente, as médias totais e sazonais da Tb do topo de nuvens no canal IR abrangendo o período de 2000 a 2015. Estas figuras são produtos dos dados de sensoriamento remoto com resolução temporal de 30 minutos e com resolução espacial de 4 km × 4 km, cobrindo a área geográfica definida pelas coordenadas de 52°W a 46°W de longitude e de 4°S a 2°N de latitude. Além disso, essas figuras mostram a posição da estação INBE e a posição da estação ITV-UFGPA localizada a 475 m ao norte de um importante recurso hídrico na região de Belém, o Rio Guamá.

Os valores mais baixos da média das Tbs (Figura 11) na área estudada estão distribuídos sobre o Arquipélago do Marajó, com mínimos numa região onde o Rio Pará encontra o Rio Tocantins (indicados em cinza com Tbs abaixo de $-8,75^{\circ}\text{C}$), e faixas estendendo-se (em rosa com Tbs abaixo de $-7,5^{\circ}\text{C}$) para a Baía do Marajó a nordeste (incluindo o Rio Guamá e o setor sul de Belém onde se encontra a estação ITV-UFGPA), o Rio Pará a oeste, e o Rio Tocantins a sul-sudoeste. A RMBE apresenta Tbs mais baixas ao sul e oeste em comparação com os setores norte e leste. As duas estações meteorológicas estão localizadas em áreas com Tbs distintas, sendo a localização da estação ITV-UFGPA ligeiramente mais baixa que a da estação INBE. Uma faixa adicional com Tbs abaixo de $-7,5^{\circ}\text{C}$ é observada a leste da foz do Rio Amazonas, próxima ao litoral oeste da principal ilha do Arquipélago do Marajó, estendendo-se pelos furos a leste e contornando a ilha principal ao norte. Em contraste, as médias das Tbs definidas pela isoterma de -5°C , que se estende do litoral nordeste do estado do Pará até o litoral do Amapá, destacam uma região com temperaturas intermediárias, conforme ilustrado na Figura 11.

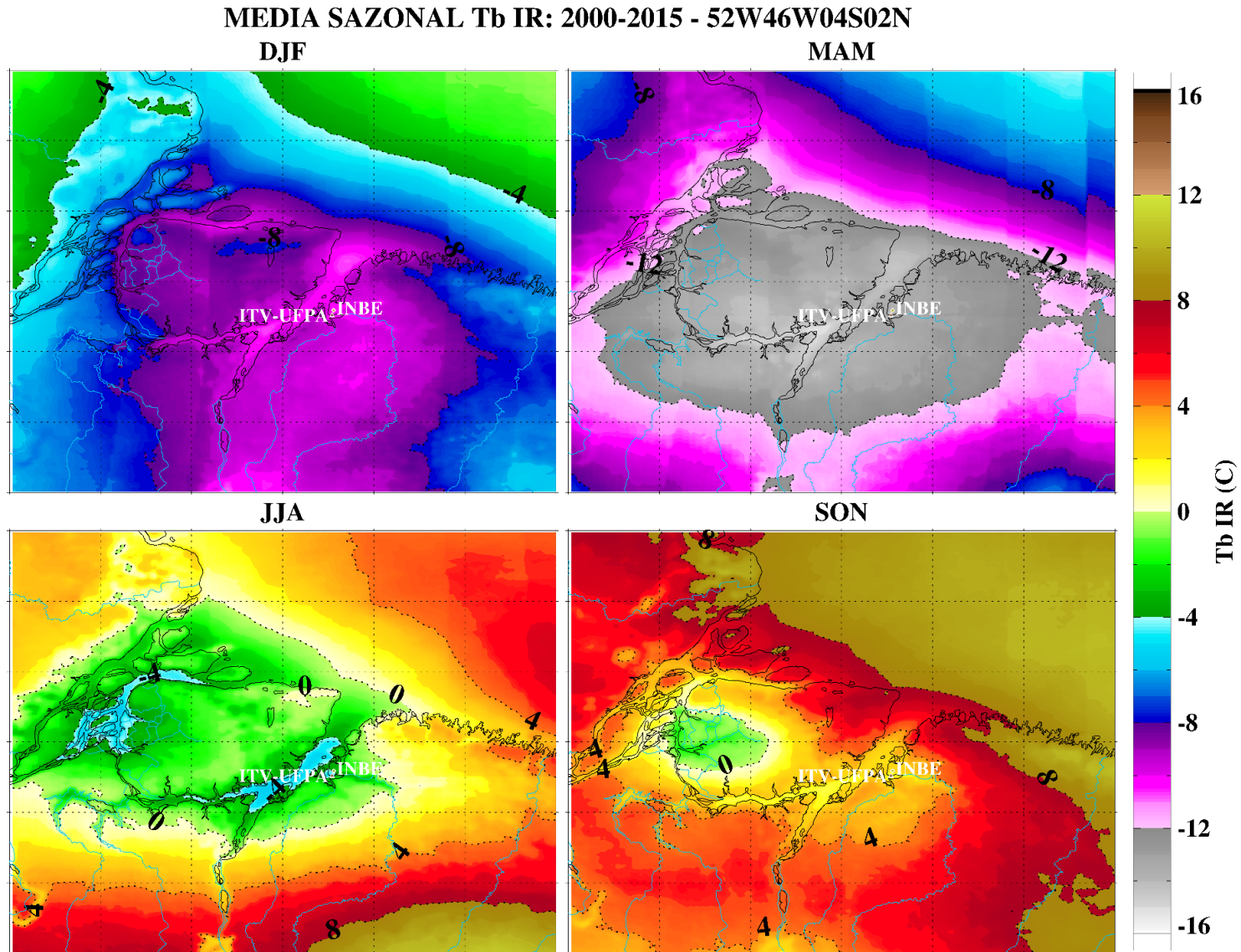
A distribuição sazonal da Tb do topo das nuvens na área estudada (Figura 12) revela que as Tbs mais baixas, definidas pela isoterma de -12°C , envolvem o Arquipélago do Marajó, com expansão para o sudoeste, sul e leste, abrangendo parte do nordeste paraense no trimestre mais chuvoso de MAM. Os valores mínimos, que são ligeiramente menores que ao redor, estão concentrados sobre os corpos d'água ao sul, sudeste e leste da Ilha do Marajó. A área com menores valores de Tb no segundo trimestre mais chuvoso de DJF, definida pela isoterma de -8°C , também se localiza sobre o Arquipélago do Marajó, estendendo-se para o nordeste e o sul do estado do Pará. Neste trimestre, as mínimas Tbs estão focadas principalmente sobre os corpos d'água ao sul, sudeste e leste da Ilha do Marajó, também com os valores mínimos das Tbs ligeiramente menores que na vizinhança. No trimestre menos chuvoso de JJA, uma vasta região em torno do Arquipélago do Marajó é demarcada pela isoterma da Tb de 0°C , com duas sub-regiões apresentando as mínimas

Figura 11 – Média da temperatura de brilho (Tb) do topo de nuvens no canal infravermelho (IR) do período de 2000 a 2015 entre as longitudes de 52°W a 46°W e latitudes de 4°S a 2°N nas resoluções temporal de 30 minutos e espacial de 4 × 4 km.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – O mesmo que a Figura 11, exceto que das médias sazonais para os períodos de dezembro–janeiro–fevereiro (DJF), março–abril–maio (MAM), junho–julho–agosto (JJA) e setembro–outubro–novembro (SON).



Fonte: Elaborada pelo autor.

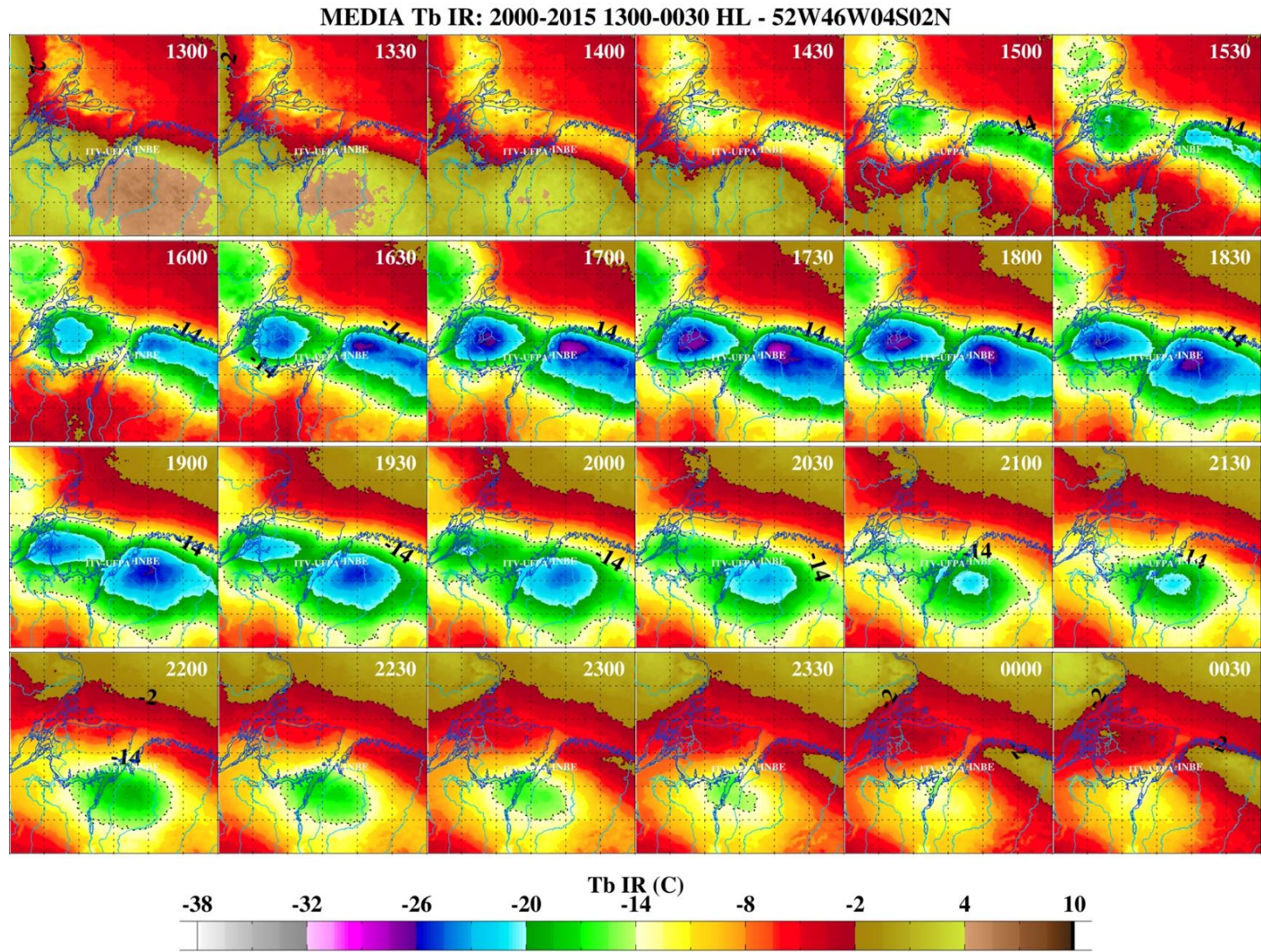
Tbs inferiores a -4°C sobre os furos nos setores oeste e norte do Arquipélago do Marajó e sobre os corpos d'água no sudeste e leste da ilha principal em direção à Baía do Marajó e um núcleo sobre os setores sudoeste e sul de Belém. Por fim, no trimestre de SON, que é o menos chuvoso da região de estudo, há um núcleo com as Tbs mais baixas definidas pela isoterma de 0°C sobre o oeste da Ilha do Marajó e os furos adjacentes.

A análise das médias das Tbs dos topos das nuvens ao longo do período estudado revela a presença de convecção profunda, indicada por áreas com os valores mais baixos de Tb, predominantemente no Arquipélago do Marajó e regiões adjacentes, desde a foz do rio Amazonas até o leste de Belém. Esta tendência é particularmente notável nos setores a oeste da ilha principal e a sudeste e leste, em direção à região de Belém. Esse padrão de Tb mais baixa foi observado em todo o Arquipélago do Marajó durante os dois trimestres mais chuvosos. No trimestre menos chuvoso de JJA, destacaram-se dois mínimos de Tb no oeste e no leste do arquipélago. Já no trimestre menos chuvoso de SON, uma região específica no oeste do arquipélago apresentou as Tbs mais baixas. No entanto, na análise do ciclo diurno sobre a região nas imagens a cada 30 minutos observam-se três áreas em destaque.

A Figura 13 apresenta o ciclo diurno (cobrindo das 13:00 às 00:30 HL) das Tbs indicando a formação de aglomerados convectivos no início da tarde nas regiões costeiras nordeste do estado do Pará, norte do Arquipélago do Marajó e leste do estado do Amapá. Esses aglomerados, caracterizados por topos mais frios, formam-se em faixas quase paralelas à linha da costa e se deslocam aproximadamente de nordeste. Duas bandas de convecção profunda se destacam, resultando no desenvolvimento de núcleos distintos com topos mais frios: um no centro-oeste do Arquipélago do Marajó e outro mais intenso e alongado no nordeste paraense, estendendo-se até as proximidades orientais de Belém ao final da tarde. Após às 18:00 horas, inicia um aumento das Tbs, reduzindo a intensidade das bandas convectivas, culminando na formação de um único núcleo ao sul de Belém e a sudeste do Arquipélago do Marajó, que se dissipa durante a noite. No estado do Amapá, observa-se que a banda convectiva é predominantemente composta por temperaturas dos topos de nuvens mais altas que nas duas bandas formadas no nordeste paraense e no norte do Arquipélago do Marajó.

Os ciclos diurnos médios das Tbs em cada trimestre, apresentados nos Apêndices B a E, mostram padrões semelhantes aos observados no ciclo diurno médio dos 16 anos apresentados na Figura 13. Nota-se, particularmente no trimestre mais chuvoso de MAM, que as regiões no nordeste

Figura 13 – O mesmo que a Figura 11, exceto que para o ciclo diurno médio entre os horários das 13:00 às 00:30 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

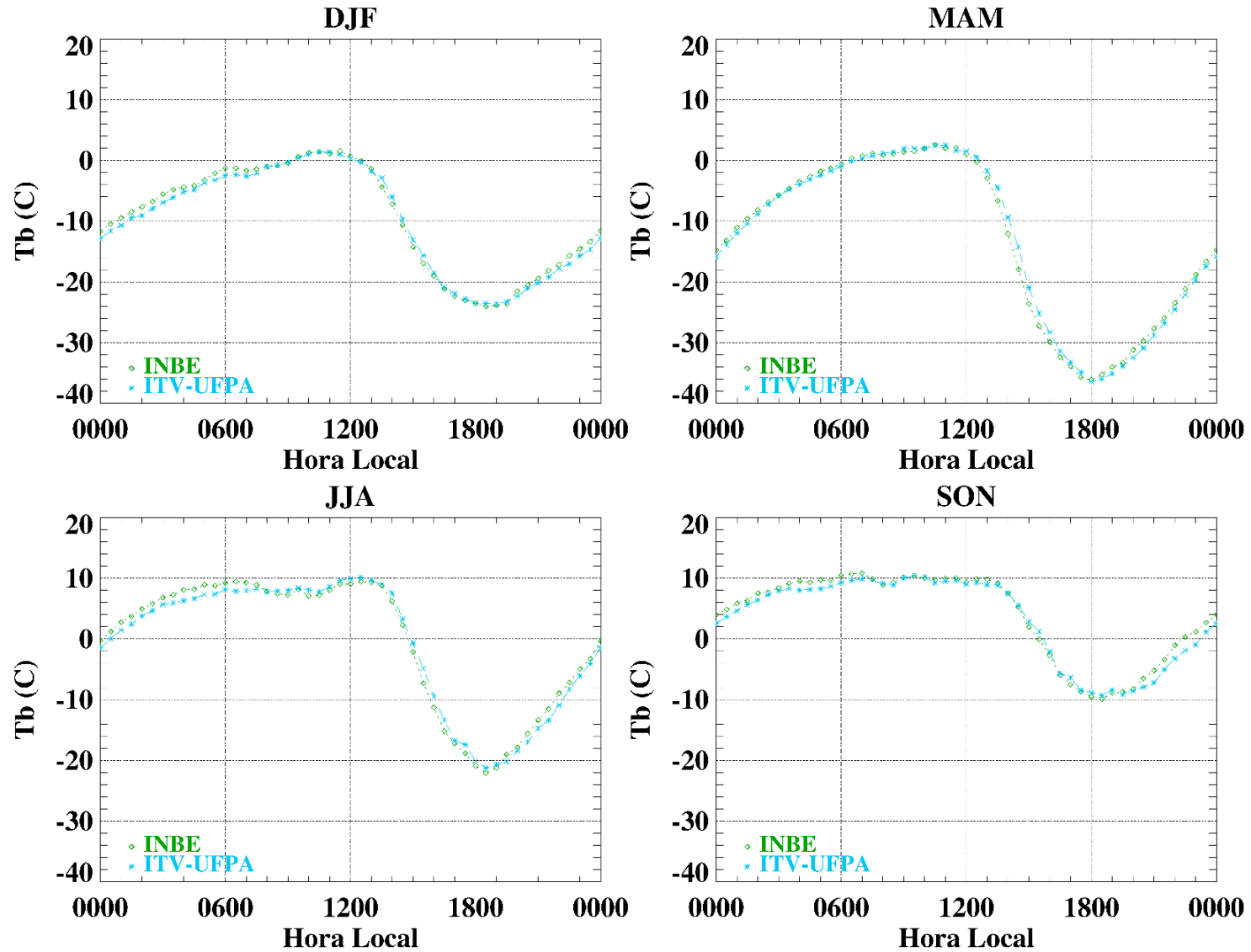
paraense com as Tbs mais baixas, com valores abaixo de -32°C , têm uma área de abrangência significativamente maior, em comparação com os setores menos frios no centro-oeste do Arquipélago do Marajó e o leste do estado do Amapá. Esses grandes aglomerados são formados e se deslocam para o interior durante o período da tarde. Por outro lado, no trimestre menos chuvoso de SON, é notável uma área bem definida de Tbs mais baixas no setor centro-oeste do Arquipélago do Marajó, em contraste com as regiões vizinhas, o leste do estado do Amapá e o setor leste da região de Belém.

As observações indicam variações notáveis na Tb do topo das nuvens entre diferentes regiões estudadas, como o nordeste paraense, o Arquipélago do Marajó e o Amapá. Além disso, diferenças discretas de Tb foram notadas entre as sub-regiões de Belém, especificamente nas localizações das estações meteorológicas INBE e ITV-UFPA. Tais diferenças são observadas nas médias para todo o período (Figura 11) e nas médias dos trimestres menos chuvosos (JJA e SON, conforme Figura 12). Nos painéis que representam os ciclos diurnos das médias totais e sazonais de Tb (Figura 13 e Apêndices B a E), observam-se pequenas variações temporais nas Tbs à medida que os sistemas de nuvens se deslocam sobre as estações meteorológicas.

A Figura 14 mostra o ciclo diurno sazonal médio da Tb nos pontos de grade mais próximos das estações INBE e ITV-UFPA. A marcha média diária das Tbs em ambas as grades apresenta máximos bem definidos entre 10:00 e 11:00 HL nos trimestres mais chuvosos e os maiores valores diários oscilando entre 06:00 e 13:00 HL nos trimestres menos chuvosos. Os mínimos ocorreram em torno das 18:00 HL em todos os trimestres. Observa-se um ‘rápido’ decaimento das temperaturas médias do topo de nuvens nas 6 horas do horário vespertino em comparação com o crescimento nas 18 horas seguintes até o próximo máximo. O horário de decaimento das Tbs nas duas grades coincidiu com o máximo de precipitação registrado em ambas as estações meteorológicas localizadas nessas grades embora estes sejam resultados de períodos diferentes. Essa diminuição das Tbs foi ligeiramente antecipada na grade da estação INBE em comparação com a grade da estação ITV-UFPA em todos os trimestres, sendo particularmente mais evidente no trimestre mais chuvoso de MAM. De forma similar, o aumento nas Tbs, após o mínimo do ciclo diurno por volta das 18:00 e 19:00 HL, também ocorreu primeiramente na grade da estação INBE e logo em seguida na grade da estação ITV-UFPA em todos os trimestres. Assim, as médias das Tbs a cada 30 minutos na grade da estação ITV-UFPA foi ligeiramente maior (menor) que as Tbs na grade da estação INBE no período de decaimento (crescimento) das Tbs médias nas duas grades

Figura 14 – Ciclo diurno sazonal médio de Tb nos pontos de grades mais próximos das estações INBE e ITV-UFPA.

CICLO DIURNO MEDIO SAZONAL Tb IR: 2000-2015 - NAS GRADES DE INBE E ITV-UFPA



Fonte: Elaborada pelo autor.

estudadas na região de Belém em todos os trimestres. Comparações entre os ZTDs dessas localizações podem fornecer insights adicionais sobre os padrões climáticos e meteorológicos locais, considerando que o ZTD representa a quantidade total de água na atmosfera e é sensível a diversos fatores meteorológicos (como temperatura do ar e pressão atmosférica) e geográficos (como topografia, altitude e proximidade do litoral).

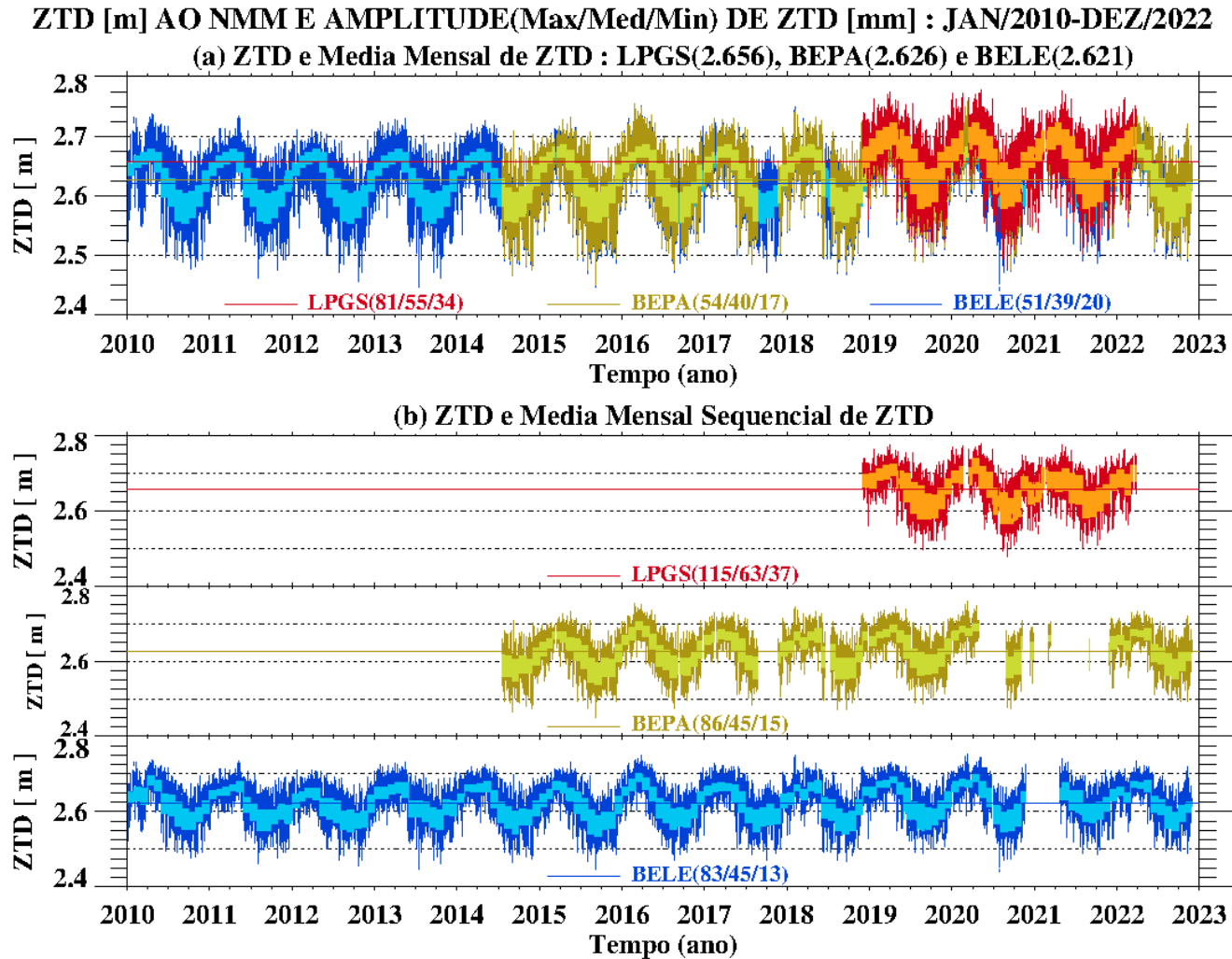
4.2 Relações entre o ZTD e a chuva na região de Belém

A Figura 15 apresenta séries temporais do ZTD corrigido ao NMM, em metros, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022, com resolução de 15 minutos. O painel (a) exibe as séries temporais do ZTD das três estações de GNSS: LPGS (em vermelho), BEPA (em verde-oliva) e BELE (em azul), juntamente com as médias mensais do ZTD de todo o período, representadas respectivamente nas cores azul-celeste, verde-oliva-claro e laranja, correspondente a uma “climatologia” mensal de ZTD a cada 15min, cujos retângulos estão limitados pelo máximo e mínimo do ciclo diurno mensal médio. As médias anuais do ZTD nas três estações, com períodos independentes, estão indicadas nas linhas horizontais e entre parênteses no subtítulo do painel (a). A amplitude min., med. e max. diária do ZTD mensal médio de todo o período, em milímetros, estão indicadas junto ao nome das estações na parte debaixo do painel (a). As médias mensais sequenciais do ZTD são mostradas no painel (b), juntamente com as amplitudes min., med. e max. diárias do ZTD mensal sequencial médio entre parênteses no subtítulo desse painel.

A Figura 16, utilizada para investigar paralelamente as distribuições da precipitação na estação INBE com o ZTD, apresenta as séries temporais da precipitação acumulada (a) em milímetros por hora e (b) em milímetros por mês (em amarelo), juntamente com a “climatologia” mensal da precipitação (em verde), no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022. A “climatologia” anual está indicada nas linhas horizontais e entre parênteses no título da Figura 16 em milímetros por ano e no subtítulo do painel (b) em milímetros por mês.

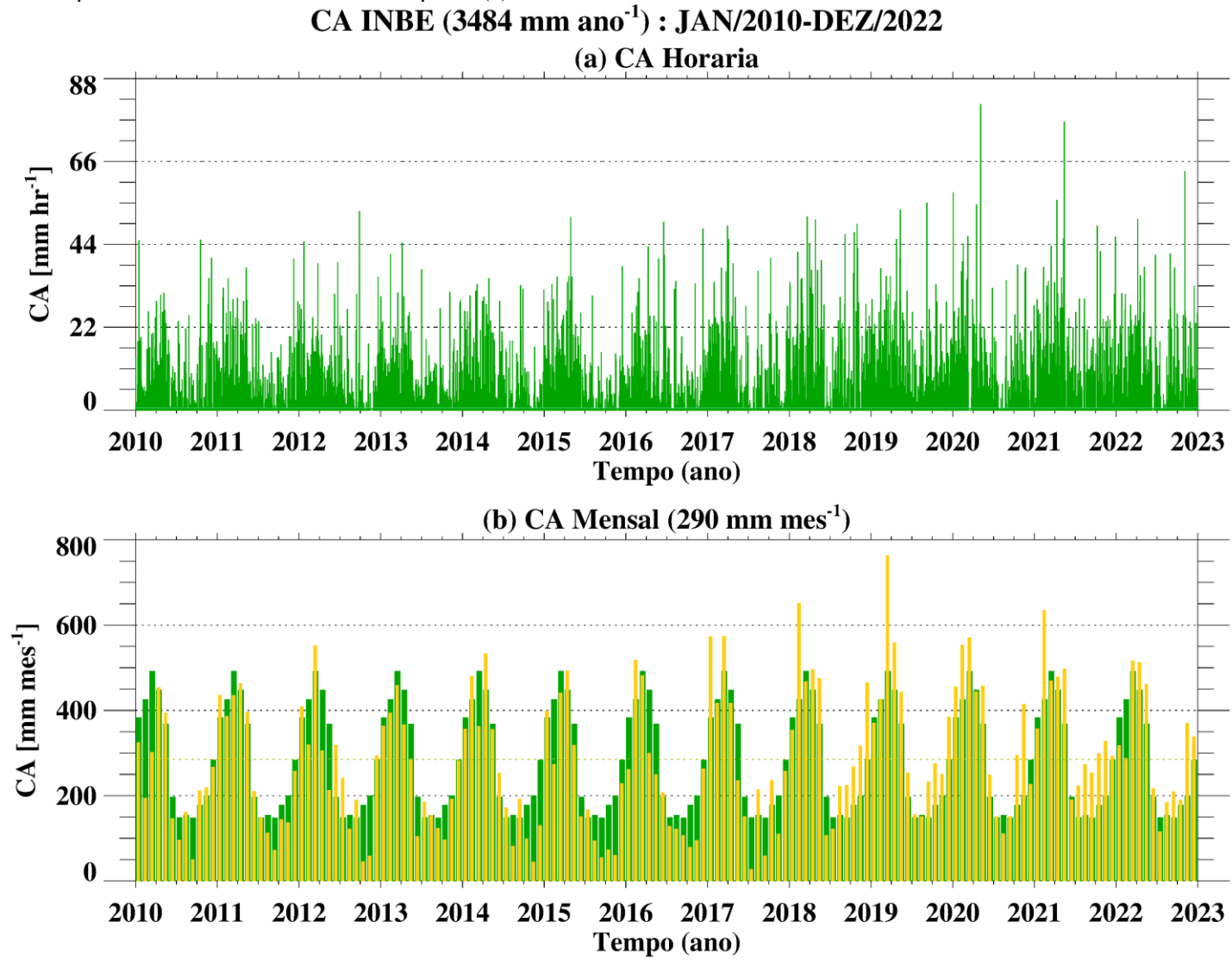
A média “climatológica” anual da precipitação na estação INBE para os 13 anos foi de 3484 mm (Figura 16a). A Figura 16b e o Apêndice A exibem que os meses mais chuvosos foram de dezembro e maio, pois tiveram médias “climatológicas” maiores ou próximas da média “climatológica” anual de 290 mm por mês. O mês de dezembro esteve na transição entre o período menos chuvoso para o período chuvoso com 288 mm. O mês mais chuvoso foi março com média

Figura 15 – Séries temporais, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022, a cada 15 minutos, do (a) ZTD corrigido ao nível médio do mar (NMM) das estações de GNSS LPGS, BEPA e BELE, respectivamente em vermelho, verde-oliva e azul. Além disso, é mostrada a média mensal do ZTD de todo o período, representada nas cores correspondentes em azul-celeste, verde-oliva-claro e laranja. A amplitude min., med. e max. diária do ZTD mensal médio de todo o período (em milímetros) estão indicadas junto ao nome das estações. As médias anuais do ZTD nas três estações, que são independentes temporalmente umas das outras, estão indicadas nas linhas horizontais e entre parênteses no subtítulo do painel (a). No painel (b), é apresentada a média mensal sequencial do ZTD. As amplitudes min., med. e max. do ZTD mensal sequencial médio estão indicadas entre parênteses no subtítulo do painel (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 16 – Séries temporais, no período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022, da precipitação na estação INBE acumulada (a) a cada hora (mm hr^{-1}); e (b) por mês (mm mês^{-1}), representada na cor amarela, juntamente com a média mensal da CA, correspondendo a uma climatologia da CA, na cor verde. As médias anuais estão indicadas entre parênteses no título e no subtítulo do painel (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

de 515 mm enquanto os meses menos chuvosos foram julho, agosto e setembro com 149, 155 e 149 mm, respectivamente.

Os resultados com média anual acima de 3000 mm (Apêndice A) corroboram com os estudos climatológicos de Belém, e.g., Figueroa e Nobre (1990), Bastos *et al.* (2002), Oliveira *et al.* (2016), Nechet (1984), Legates (1987), Legates e Willmott (1990), Moraes e Filho (2018) e Rebelo *et al.* (2023). A normal climatológica de precipitação elevada é correspondente aos altos valores médios do ZTD observados, em ordem crescente de ZTD, nas estações BELE (2,621 m), BEPA (2,626 m) e LPGS (2,656) (Figura 15), refletindo assim as características intrínsecas do clima equatorial úmido da região. Os resultados apontam uma ‘pequena’ diferença de 5 mm entre o ZTD de BEPA e BELE, e uma diferença mais acentuada de 35 mm entre LPGS e BELE, embora os dados sejam independentes.

As análises das séries temporais, evidenciadas nas Figuras 15 e 16, descrevem o ciclo anual bem definido de ZTD e CA, com ênfase nas variações máximas e mínimas ao longo dos 13 anos. O painel (a) da Figura 15 destaca que o trimestre com a maior média de ZTD é nos meses chuvosos de março, abril e maio, atingindo seu pico em abril. Por outro lado, o trimestre com menores médias de ZTD, caracterizados pelos meses menos chuvosos de agosto, setembro e outubro, apontam o mínimo em setembro para as estações BELE e BEPA, e em agosto para a LPGS, conforme ilustrado no painel (a). Apesar de variações dos picos da média mensal sequencial de ZTD (painel “b”) tenham ocorrido entre fevereiro e maio ao longo dos anos, a tendência geral permanece. Por outro lado, de menor média de ZTD é nos meses menos chuvosos de agosto–setembro–outubro, com o mínimo em setembro nas estações BELE e BEPA e em agosto na estação LPGS (painel “a”). Nota-se que o trimestre mais (menos) chuvoso apresentado na Figura 16b é nos meses de fevereiro–março–abril (julho–agosto–setembro), com máximo (mínimo) em março (setembro).

Além disso, observam-se variações interanuais, como picos nos valores de ZTD durante os períodos mais chuvosos de alguns anos. Um exemplo notável é o ano de 2016, que registrou valores mais elevados de ZTD em comparação com o ZTD de 2015 ou da média mensal sequencial dos outros anos para as estações BELE ou BEPA (Figura 15, painéis “a” e “b”).

Também é notável a ocorrência de valores excepcionalmente altos da chuva horária e acumulados mensais, especialmente a partir de 2019. Esses picos na precipitação podem estar correlacionados com os valores mais altos de ZTD nas médias sequenciais das três estações observados nos meses chuvosos de 2019 e 2020, sugerindo uma relação direta entre esta grandeza

que está associada à alta umidade atmosférica e a ocorrência de chuvas intensas. As anomalias positivas de precipitação registradas nos meses menos chuvosos de 2021, em que as barras amarelas são maiores que as barras verdes na Figura 16b, são condizentes com os valores mais elevados de ZTD das três estações nas médias sequenciais nesses meses em comparação o período menos chuvoso de 2020 ou 2022, por exemplo. Ademais, algumas anomalias negativas de precipitação também estavam condizentes com os baixos valores de ZTD. A exemplo, os meses de março de 2018 e fevereiro de 2022.

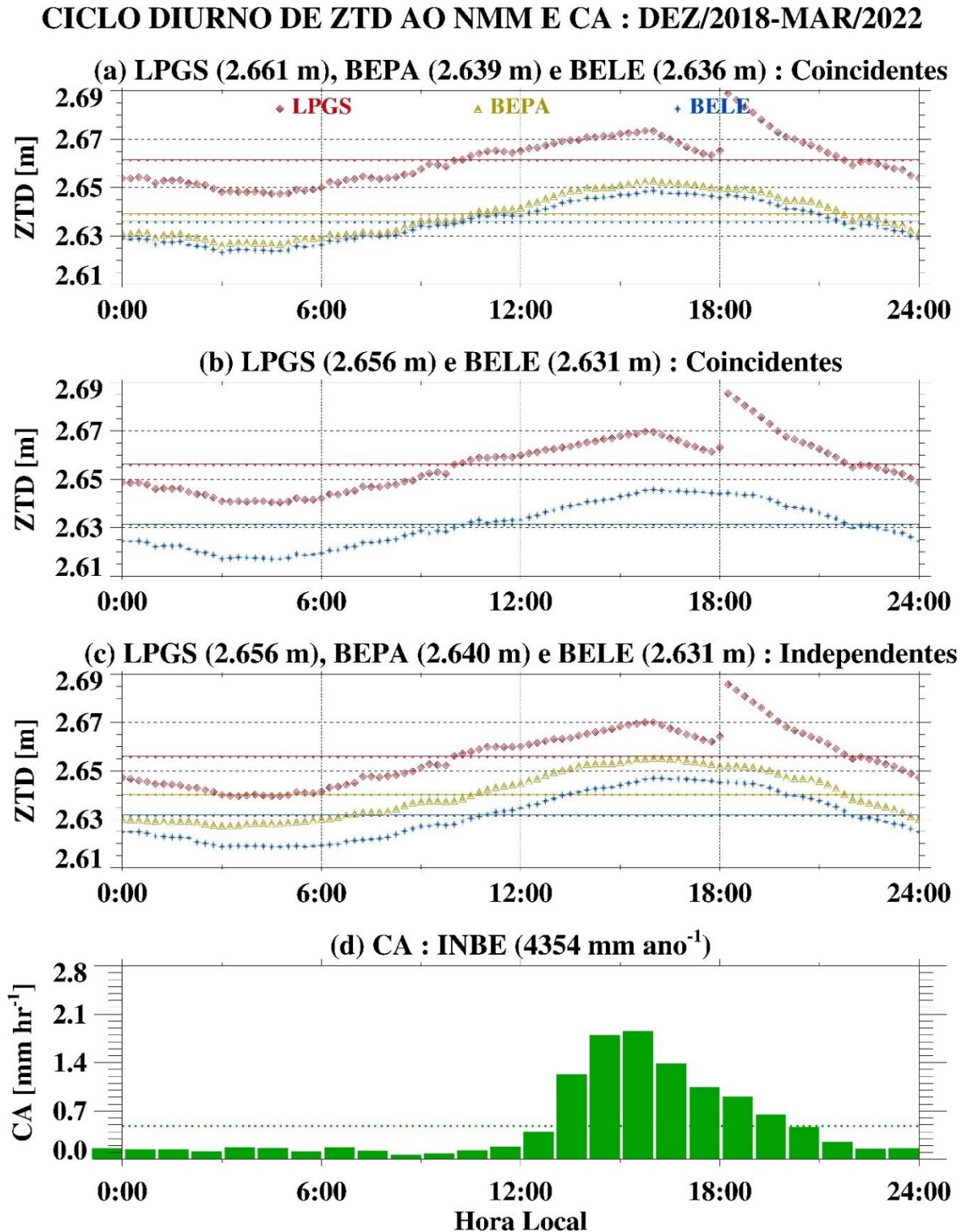
Por outro lado, os meses com as maiores anomalias positivas de precipitação do período investigado, acima de 600 e 700 mm, de fevereiro de 2018 e março de 2019, não foram observadas anomalias positivas expressivas de ZTD nas médias sequenciais destes meses. Também houve precipitação significativa de fevereiro de 2021, porém não pôde ser correlacionada por ausência parcial ou total nos dados de ZTD para este mês.

Para realizar uma análise comparativa entre os dados do ZTD nas três estações de GNSS e da CA, recorre-se à Figura 17, que ilustra o ciclo diurno médio, abrangendo o período de dezembro de 2018 a março de 2022. Nesta figura, o ZTD é representado com uma resolução de 15 minutos nos painéis “a”, “b” e “c”, enquanto a CA é detalhada com resolução horária no painel “d”. Através do painel (a), realiza-se a comparação dos dados de ZTD das três estações nos horários simultâneos, apresentando uma média anual de ZTD de 2,661 m, 2,639 m e 2,636 m, respectivamente, para LPGS, BEPA e BELE. Esses valores médios de ZTD excedem as médias analisadas anteriormente devido aos diferentes períodos considerados e ao critério de independência entre os dados das estações. A diferença entre as médias de ZTD em BEPA e BELE permanece marginal, de somente 3 mm, enquanto a diferença entre LPGS e BELE é mais pronunciada, alcançando 25 mm.

Essas variações mantêm-se consistentes durante o ciclo diurno, exceto nos dados de LPGS, que divergem dos de BELE e BEPA desde o final da tarde até aproximadamente a meia-noite, horário local. Esta discrepância parece estar atrelada a erros instrumentais e/ou outros erros sistemáticos que ainda necessitam de investigações adicionais.

A configuração das linhas e os valores das médias de ZTD do painel (b) assemelham-se aos padrões observados no painel (a), pois são consideradas os valores médios de ZTD entre as estações LPGS e BELE, também a partir dos dados em horários simultâneos dessas estações. A variação de ZTD entre as duas metodologias é de cerca de 5 mm, em que a média anual de ZTD em LPGS foi 2,656 m e em BELE foi 2,621 m.

Figura 17 – Ciclo diurno médio anual, no período de dezembro de 2018 a março de 2022, do ZTD ao nível médio do mar (NMM) (m), a cada 15 minutos, dos dados (a) de LPGS (vermelho), BEPA (verde-oliva) e BELE (azul) nos horários coincidentes; (b) de LPGS e BELE nos horários coincidentes; e (c) de LPGS, BEPA e BELE nos horários independentes. No painel (d) está o ciclo diurno médio anual da CA (mm hr⁻¹) da estação INBE (barras verdes). Os valores totais da CA e médios anuais do ZTD estão indicados nos subtítulos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já o painel (c) da Figura 17 exibe a média anual e o ciclo diurno do ZTD, enquanto o painel (d) apresenta a média anual e o ciclo diurno da precipitação, considerando os dados independentes das três estações GNSS e da estação meteorológica, dentro do mesmo período analisado. Para os dados com horários não necessariamente simultâneos, as médias anuais de ZTD foram de 2,656 m, 2,640 m e 2,631 m, respectivamente, para LPGS, BEPA e BELE. Neste caso, as médias de ZTD em LPGS e em BELE tiveram o mesmo valor que no caso do painel (b).

Quanto à média anual da precipitação para o período, que foi de 4354 mm, constituiu um valor significativamente acima das médias climatológicas de Belém. Porém, este valor estava em consonância com as anomalias positivas observadas em diversos meses entre os anos de 2019 e 2022, conforme demonstrado na Figura 16.

Concernente ao ciclo diurno de ZTD e a precipitação no período de dezembro de 2018 a novembro de 2022, à parte das pequenas diferenças das curvas de ZTD entre BEPA e BELE, as diferenças mais significativas entre LPGS e as outras duas e as inconsistências na curva de LPGS a partir do final da tarde até a meia-noite, observou-se que houve um mínimo (máximo) de ZTD por volta das 04:00 (16:00) HL.

Analisando o ciclo diurno do ZTD e da precipitação no período considerado, nota-se pequenas diferenças nas curvas de ZTD entre as estações BEPA e BELE, indicando que existe uma pequena diferença entre a umidade atmosférica sobre BEPA e BELE. No entanto, ainda não é possível afirmar que a relativamente grande diferença entre o ZTD médio anual em LPGS e BELE (ou BEPA) seja resultado da diferença da umidade atmosférica tão expressiva em tão pequena distância. Ademais, as inconsistências na curva de ZTD de LPGS, que se manifestaram do final da tarde até a meia-noite, são dignas de atenção.

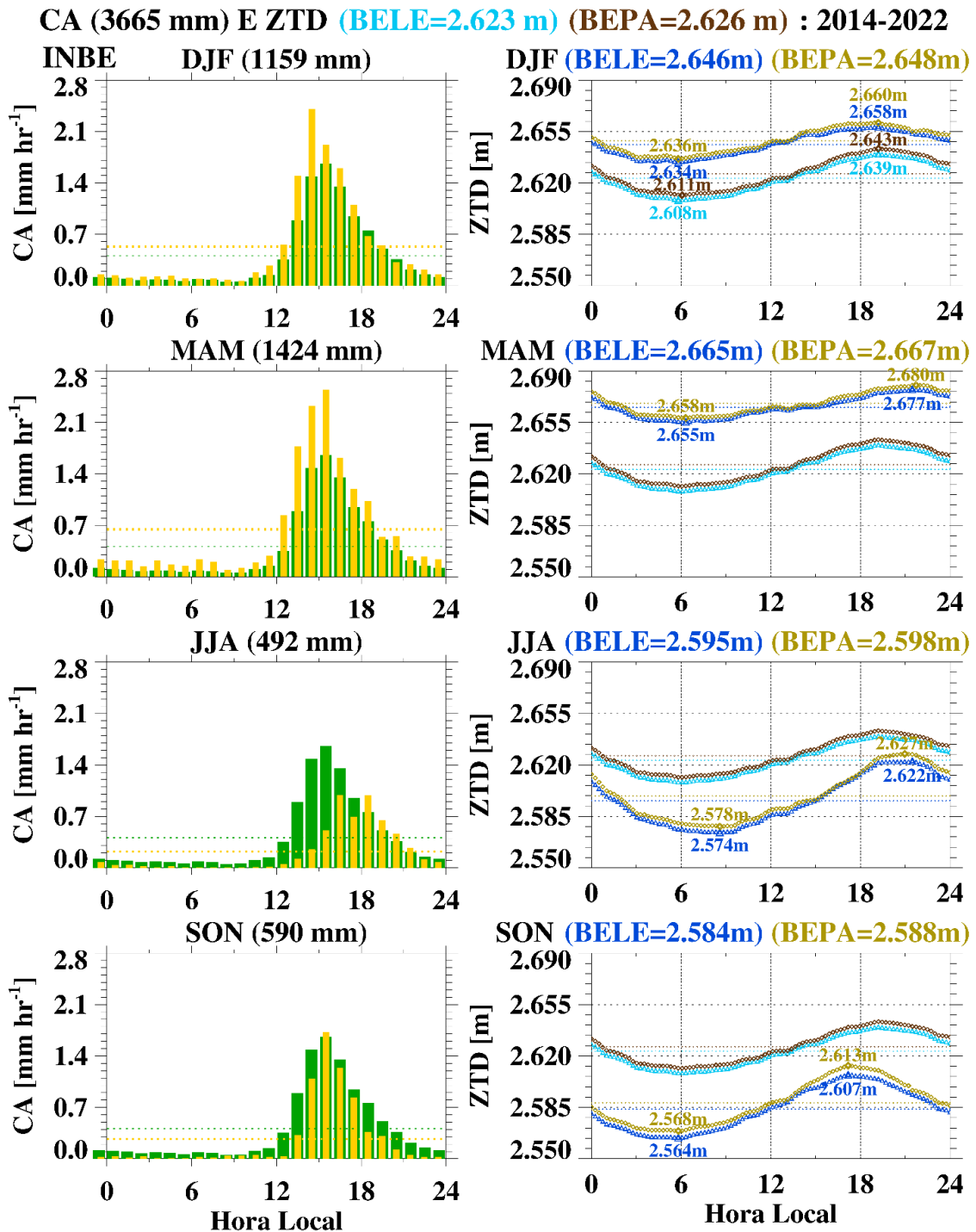
É fundamental destacar que, no decorrer do ciclo diurno, o ZTD alcançou seu ponto mínimo aproximadamente às 04:00 HL e atingiu o máximo por volta das 16:00 HL. Quanto à CA, observou-se um aumento significativo nos valores durante o início da tarde, culminando e se mantendo em um nível máximo no meio da tarde. Seguiu-se uma redução gradual da CA até meia-noite, período após o qual se observou a manutenção de valores mínimos até o meio-dia. Este padrão diurno é um reflexo das variações atmosféricas naturais ao longo do dia, nas quais o valor mínimo de ZTD, registrado nas primeiras horas da manhã, pode ser interpretado como um indicativo de condições atmosféricas mais estáveis. Por outro lado, o pico observado ao final do dia pode ser indicativo de maior instabilidade ou variação na umidade atmosférica.

Para aprofundar a análise do ZTD (corrigido ao NMM) em um intervalo temporal mais extenso, com dados coletados em horários simultâneos e que superam a abrangência do período anteriormente estudado, a Figura 18 é utilizada como referência. Esta figura detalha os valores totais e médios anuais, bem como as variações sazonais para os trimestres de DJF, MAM, JJA e SON, cobrindo o período de julho de 2014 a novembro de 2022. Neste contexto, a Figura 18 apresenta o ciclo diurno médio: (i) da precipitação anual (simbolizada por barras verdes) e sazonal (barras amarelas), com acumulados horários, nos painéis do lado esquerdo; e (b) do ZTD anual (em azul-celeste para a estação BELE e em marrom para BEPA) e sazonal (curvas em azul para BELE e verde-oliva para BEPA), nos painéis do lado direito, com dados registrados a cada 15 minutos. A média anual da CA em Belém foi de 3665 mm ano^{-1} no período de 2014 a 2022, valor que se mostra comparável tanto à média climatológica de 3480 mm ano^{-1} (no período de 2010 a 2022), apresentada no Apêndice F⁷, quanto às médias dos períodos estudados anteriormente. Esta média de CA também está alinhada com o alto valor médio anual do ZTD observado nas estações BELE (2,623 m) e BEPA (2,626 m), refletindo as características do clima equatorial úmido da região. Os valores máximos e mínimos de ZTD do ciclo diurno médio das 2 estações também estão indicados no painel superior à direita, com amplitude média do ZTD de, respectivamente, 31 e 32 mm nas estações BELE e BEPA. Os totais sazonais de CA, que são de 1159 mm para o trimestre de DJF e 1424 mm para MAM, correspondem a 31,6% e 38,8% da precipitação anual, respectivamente, marcando a estação chuvosa, conhecida localmente como ‘inverno amazônico’. Por outro lado, durante a estação menos chuvosa, o ‘verão amazônico’, os totais foram de 492 mm para JJA e 590 mm para SON, representando 13,4% e 16,1% do total anual de chuva, respectivamente.

Nos trimestres mais chuvosos, os valores sazonais médios de ZTD nas estações BELE (BEPA) foram de 2,646 (2,648) m para DJF e 2,665 (2,667) m para MAM, respectivamente. Nos trimestres menos chuvosos, os valores sazonais médios de ZTD em BELE (BEPA) foram de 2,595 (2,598) m para JJA e 2,584 (2,588) m para SON. Assim, as médias de ZTD na estação BEPA tendem a ser de 2 mm maiores do que as médias na estação BELE durante os períodos mais chuvo-

⁷ O Apêndice F é utilizado para apresentar uma “climatologia” e o ciclo diurno médio dos dados independentes de CA na estação INBE e do ZTD nas estações BELE e BEPA. Essa análise é baseada em horários dos dados disponíveis entre as estações, cobrindo um período que vai desde 2010 até dezembro de 2022. A partir dessa observação, nota-se que as médias climatológicas dessas variáveis foram menores às médias dos períodos mais curtos anteriormente estudados que tiveram uma ponderação maior dos dados de a partir de 2018, período que registrou um número maior de anomalias positivas tanto na CA quanto no ZTD.

Figura 18 – Ciclo diurno médio anual e sazonal (DJF, MAM, JJA e SON) no período de julho de 2014 a novembro de 2022 (i) da CA (mm hr^{-1}) registrada na estação INBE (barras verdes para anual e amarelas para sazonal) a cada hora, nos painéis do lado esquerdo; e (ii) do ZTD ao NMM (m) a cada 15 minutos e nos dados coincidentes das estações de GNSS BELE (curvas em azul-celeste para anual e em azul para sazonal) e BEPA (curvas em marrom para anual e em verde-oliva para sazonal) do lado direito. Os máximos e mínimos de ZTD estão indicados nas curvas dos painéis correspondentes. As médias anuais e sazonais da CA e do ZTD estão indicados no título e nos subtítulos para BELE e BEPA entre parênteses.



Fonte: Elaborada pelo autor.

sos, e de 3 a 4 mm maiores durante os períodos menos chuvosos. Já as amplitudes do ciclo diurno de ZTD nas estações BELE e BEPA foram de 24 mm em DJF e 22 mm em MAM. Enquanto nos trimestres menos chuvosos nas estações BELE (BEPA) foi de 48 (49) mm em JJA e 43 (45) mm em SON.

O ciclo diurno anual médio da CA em Belém exibe um padrão distinto, marcado por um incremento substancial ao longo de três horas, culminando em um ápice na metade da tarde e seguindo com um declínio progressivo até a meia-noite. Os valores mais baixos, oscilando aproximadamente entre 0,11 e 0,05 mm hr⁻¹, são observados da meia-noite às 09:00 HL. Este valor experimenta um leve aumento, alcançando cerca de 0,06 a 0,14 mm hr⁻¹ no período das 09:00 às 12:00 HL. A partir das 12:00 horas, a CA registra um aumento acentuado, atingindo aproximadamente 1,48 mm hr⁻¹ entre 14:00 e 15:00 HL e chegando a um pico de cerca de 1,66 mm hr⁻¹ entre 15:00 e 16:00 horas. Após este ápice, nota-se uma redução gradual na precipitação, retornando aos valores mínimos à meia-noite.

De maneira similar, o ciclo diurno sazonal médio da CA para os trimestres mais chuvosos revela um período de 12 horas com valores mínimos flutuantes: (a) variando entre 0,14 e 0,07 mm hr⁻¹ da meia-noite às 10:00 HL e entre 0,18 e 0,28 mm hr⁻¹ das 10:00 às 12:00 HL para o trimestre de DJF; e (b) oscilando entre 0,22 e 0,09 mm hr⁻¹ da meia-noite às 09:00 HL e entre 0,12 e 0,28 mm hr⁻¹ das 09:00 às 12:00 HL para MAM.

Para os trimestres menos chuvosos, o período de mínimos se estende por 14 a 16 horas, variando: (a) entre 0,08 e 0,002 mm hr⁻¹ das 23:00 às 08:00 HL e entre 0,002 e 0,12 mm hr⁻¹ das 08:00 às 14:00 HL para JJA; e (b) entre 0,05 e 0,006 mm hr⁻¹ das 21:00 às 06:00 HL e entre 0,03 e 0,03 mm hr⁻¹ das 06:00 às 13:00 HL para SON.

O pico médio da CA de 2,4 mm hr⁻¹ foi registrado entre 14:00 e 15:00 horas para o trimestre chuvoso de DJF; e os picos de 2,3 mm e 2,6 mm hr⁻¹ ocorreram, respectivamente, entre 14:00 e 15:00 HL e entre 15:00 e 16:00 HL no trimestre chuvoso de MAM. Nos trimestres menos chuvosos de JJA, observaram-se três picos horários de CA de 1,0, 0,7 e 1,0 mm hr⁻¹ entre 16:00 e 19:00 HL; enquanto em SON, o ápice de 1,7 mm hr⁻¹ ocorreu entre 15:00 e 16:00 HL.

Em contraste, o ciclo diurno médio anual do ZTD nas estações BELE e BEPA, representadas respectivamente pelas curvas nas cores azul-celeste e marrom, exibe uma configuração mais suave e ondulatória em comparação ao ciclo diurno da CA. O ponto mínimo do ZTD ocorre por volta das 06:00 HL, enquanto o máximo é observado em torno das 19:00 HL. De

forma notável, o pico do ciclo diurno médio anual da CA precede o pico de ZTD em cerca de 3 horas. Conforme ilustrado na Figura 18, as curvas do ciclo diurno e os valores médios de ZTD na estação BEPA são em média 3 mm maiores do que aqueles na estação BELE.

Assim como no ciclo diurno sazonal médio da CA, os valores extremos de ZTD também variaram ao longo dos trimestres. Durante o trimestre DJF, as estações BELE (curva azul) e BEPA (curva verde-oliva) apresentaram mínimos de ZTD às 06:00 HL e máximos às 19:00 HL. Curiosamente, o pico da CA neste trimestre aconteceu cerca de 4 horas antes do máximo de ZTD.

No trimestre MAM, os mínimos de ZTD nas estações BELE e BEPA continuaram sendo observados às 06:00 HL, mas os máximos se deslocaram para os horários entre 21:00 e 22:00 HL em ambas as estações. O pico da CA neste trimestre ocorreu aproximadamente 6 horas antes dos máximos de ZTD.

Nos trimestres menos chuvosos, o ciclo diurno médio de ZTD mostrou padrões distintos em comparação com os trimestres mais chuvosos. Ambas as estações, BELE e BEPA, registraram maiores amplitudes e variações mais expressivas de ZTD. No trimestre JJA, os mínimos de ZTD ocorreram por volta das 09:00 HL, com os máximos observados aproximadamente das 19:15 às 21:15 HL. Neste trimestre, os picos da CA precederam os máximos de ZTD por 2 a 3 horas.

Já no trimestre SON, os mínimos de ZTD foram registrados entre 05:00 e 06:00 HL, com os máximos às 17:00 HL nas estações BELE e BEPA. O pico da CA neste trimestre ocorreu cerca de 2 horas antes dos máximos de ZTD.

Observou-se, adicionalmente, que as diferenças entre os valores extremos de ZTD entre BELE e BEPA se tornam mais evidentes nos trimestres menos chuvosos. As diferenças entre as estações nos pontos mínimos (máximos) do ciclo diurno, respectivamente para os trimestres DJF/MAM/JJA/SON, são de 3,0/3,1/3,9/4,7 (3,4/3,2/5,1/6,1) mm.

A próxima seção abordará estudos de caso de chuvas extremas e sua relação com as variações de ZTD e outras variáveis meteorológicas.

4.3 Estudos de caso de chuvas extremas em Belém

Este estudo aborda incidentes específicos de precipitações intensas em Belém, enfatizando a relação entre esses eventos e a variação de ZTD, além de outras variáveis meteorológicas chave. Foram selecionados sete casos para análise: quatro ocorreram entre os meses de fevereiro e maio,

durante a estação chuvosa, cuja precipitação é influenciada principalmente pela ZCIT; e três durante a estação menos chuvosa, nos meses de junho, agosto e novembro. As análises baseiam-se em representações gráficas focadas em períodos pentadais a fim de apresentar o comportamento das variáveis de um dia para outro. Para cada caso, são apresentadas as informações detalhadas de:

- a) ZTD (m), ao nível da antena, e o ciclo diurno mensal médio do período de janeiro de 2010 a novembro de 2022, com dados processados a cada 15 minutos das estações de GNSS LPGS, BELE e BEPA, respectivamente nas cores vermelho, azul e verde-oliva. Esses dados são incrementados pela precipitação acumulada a cada hora, monitorada pelas estações meteorológicas ITV-UFGA e INBE, representadas em barras azuis-celestes e verdes, respectivamente. As tonalidades de verde variam de acordo com os valores da precipitação acumulada: $CA \geq 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$ (verde-claro), $9,6 \leq CA < 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$ (verde-intermediário) e $CA < 9,4 \text{ mm hr}^{-1}$ (verde-escuro). Os máximos de cada estação meteorológica são indicados por linhas tracejadas e anotados à esquerda do eixo das ordenadas da CA. Linhas tracejadas adicionais com os respectivos valores à direita deste eixo das ordenadas correspondem aos limiares de 3,4/9,6/15,4/29,6 mm hr^{-1} , representando os percentis 75°/90°/95°/99°. Estes percentis classificam a chuva em categorias que são de leve/moderada/moderada-a-forte/forte e muito-forte para os valores acima de 29,6 mm hr^{-1} , com base nos dados históricos da estação do INMET de janeiro de 2010 a dezembro de 2022. Traços de precipitação, classificados aqui por valores da CA maiores que 0 e menores que 1 mm por hora, são indicados nas barras abaixo do eixo da abscissa. O percentil 50°, correspondente à mediana dos dados no valor de 0,8 mm hr^{-1} , também está anotado abaixo deste eixo;
- b) temperatura média por hora (T, em °C) e o ciclo diurno mensal médio;
- c) umidade relativa média por hora (UR, em %) e o ciclo diurno mensal médio;
- d) máxima velocidade de rajada de vento por hora (m s^{-1}) e o ciclo diurno mensal médio dessa máxima.

Os gráficos para as variáveis (b) e (c) incluem também valores da estação meteorológica LPGS, apresentados a cada 15 minutos, apesar dos dados originais estarem disponíveis em alta resolução temporal. As informações das estações ITV-UFGA e INBE para as variáveis (b), (c) e

(d) são originalmente fornecidas em média horária, mas foram interpoladas para serem exibidas em intervalos de 15 minutos para consistência na análise.

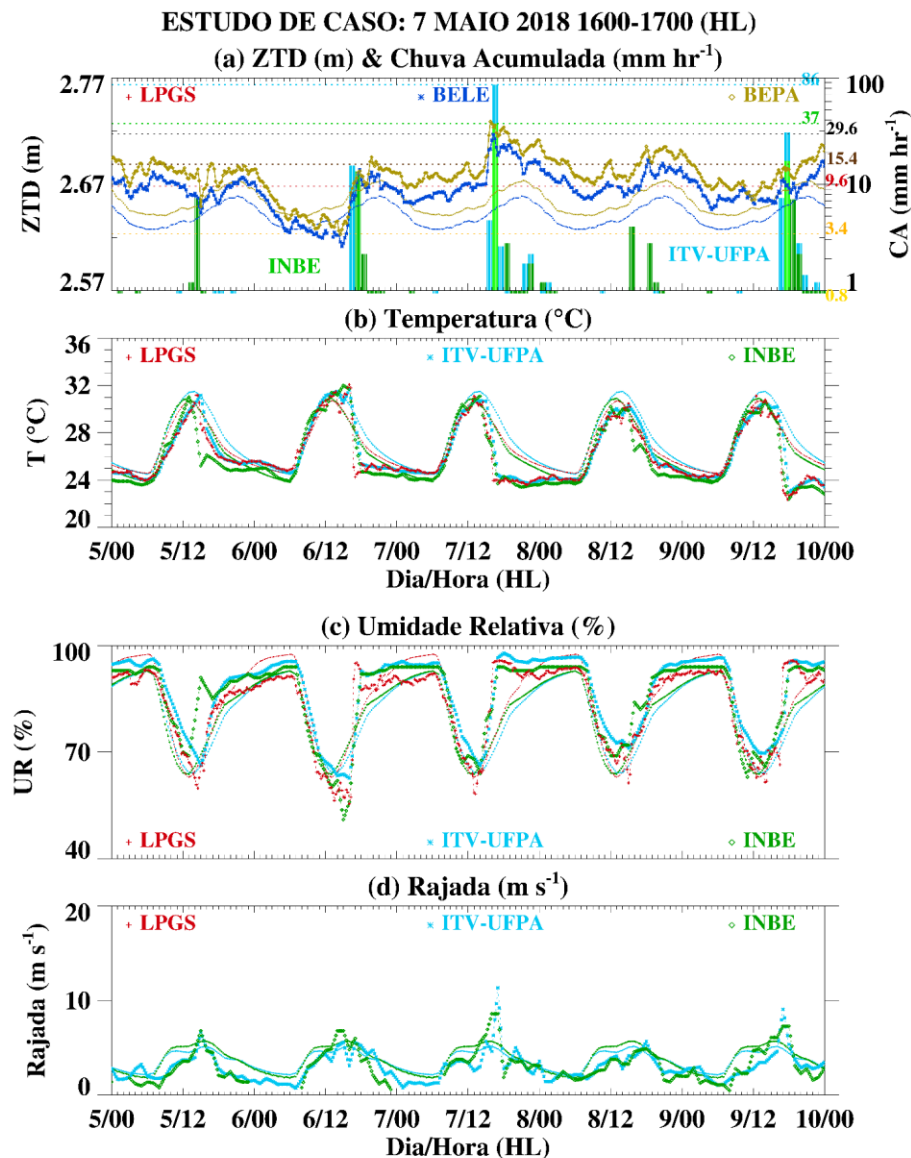
4.3.1 Estudo de caso BE1

A Figura 19a ilustra as curvas de ZTD, no estudo de caso BE1, que apresentaram um comportamento mais irregular em comparação com as curvas de ZTD e IWV nos estudos de caso no Rio de Janeiro. Além disso, a figura também mostra os eventos de precipitação em Belém durante um período de cinco dias, com destaque para o evento extremo de chuva que ocorreu em 7 de maio de 2018. Entre 16:00 e 17:00 HL deste dia, as estações ITV-UFPA e INBE registraram precipitações significativas de 86,2 e 37,2 mm hr⁻¹, respectivamente. Este horário de fortes chuvas foi precedido por chuva moderada e seguido por chuva leve. No dia 9, entre 17:00 e 18:00 HL, as estações registraram 30,6 e 16,6 mm hr⁻¹, respectivamente. Estes eventos, marcados por trovoadas e chuvas intensas⁸, que tiveram um impacto considerável na cidade, especialmente no final da tarde, conforme relatado pelo Weather Spark (2018) e pelo jornal Diário Online (DOL) (Forte..., 2018; Imagens..., 2018). A cidade enfrentou inundações e transtornos no trânsito, tornando várias áreas praticamente intransitáveis. Não era esperado que as marés altas alcançassem os níveis das marés altas de sizígia, visto que a Lua se encontrava na fase Minguante, mas houve transbordamento de igarapés e canais, com alagamentos e transporte de lixo em partes da cidade, inclusive no dia 6, conforme relatado pelo Chuva... (2018), que teve chuva menos expressiva que nos dias 7 ou 9.

Na análise do painel (a) da Figura 19, observou-se que as curvas de ZTD das estações BELE e BEPA apresentaram variações não lineares, especialmente antes e depois dos eventos de precipitações significativas. Durante a maior parte do período de cinco dias, os valores de ZTD estiveram acima das médias mensais, indicando uma atmosfera mais úmida do que a média do mês. Essa observação destaca a influência de eventos de precipitação na variação do ZTD, sugerindo uma relação direta entre o aumento da umidade atmosférica e as anomalias no ZTD. A exceção foi o período entre um vale na curva de ZTD e a ocorrência de chuva moderada-a-forte no dia 6 entre

⁸ O caso BE1, com chuva extrema e com transtornos para a população, foi similar aos eventos ocorridos em 4/5/2020, das 15:00 às 16:00 e em 13/5/2021, das 18:00 às 19:00 HL, que tiveram forte chuva vespertina para o início da noite, acima de 70 mm hr⁻¹ registrados na estação do INMET.

Figura 19 – Estudo de Caso BE1 em Belém, com ênfase no evento de 7 de maio de 2018, entre 16:00 e 17:00 HL. O painel (a) apresenta dados de ZTD (em metros) e a média mensal de ZTD, determinados a cada 15 minutos pelas estações de GNSS LPGS, BELE e BEPA. Além disso, são mostradas as CAs (em mm hr^{-1}) das estações meteorológicas ITV-UFGA e INBE, representadas respectivamente em barras azuis-celestes e verdes. Os tons de verde variam com a intensidade da chuva: verde-claro para $CA \geq 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$, verde-intermediário para $9,4 \leq CA < 15,4 \text{ mm hr}^{-1}$, e verde-escuro para $CA < 9,4 \text{ mm hr}^{-1}$. Os valores máximos da CA, durante a pênitida estudada, estão dispostos à esquerda do eixo das ordenadas, enquanto à direita são apresentados os limiares de 3,4, 9,6, 15,4 e 29,6 mm hr^{-1} , correspondentes aos percentis 75°, 90°, 95° e 99°. Estes limiares indicam a classificação da chuva quanto à intensidade – leve, moderada, moderada-a-forte, forte e muito-forte – com base nos dados históricos de janeiro de 2010 a dezembro de 2022 da estação INBE. Os valores de $0 < CA < 1 \text{ mm hr}^{-1}$, bem como o 50° percentil (mediana dos dados, valor de 0,8 mm hr^{-1}), estão indicados nas barras abaixo do eixo da abscissa. O painel (b) exibe a média horária da Temperatura do ar (T, em °C) e a média mensal de T. O painel (c) apresenta a média horária da Umidade Relativa do ar (UR, em %) e a média mensal de UR. O painel (d) apresenta a máxima rajada horária (em m s^{-1}) e a média mensal da máxima rajada horária. Os painéis (b) e (c) incluem também os dados da estação meteorológica LPGS, apresentados na resolução temporal de 15 minutos e coloridos em vermelho. Os dados das estações ITV-UFGA e INBE para os itens (b), (c) e (d) foram interpolados para serem apresentados também na resolução temporal de 15 minutos. As médias mensais referem-se ao período de janeiro de 2010 a novembro de 2022, quando disponíveis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

16:00 e 18:00 HL, que foi proveniente de sistemas convectivos desorganizados que se deslocavam a partir da faixa litorânea do nordeste do estado do Pará (Apêndice G).

Após esse evento do dia 6, notou-se que as curvas de ZTD oscilaram até cerca das 15:00 HL do dia 7, quando ocorreu uma rampa com aumento súbito e acentuado, configurando um salto de ZTD nas curvas de ambas as estações de GNSS, atingindo os valores máximos no período estudado desta pênstada. O período de chuvas iniciou-se em conjunto com a rampa ascendente de ZTD.

As variáveis meteorológicas apresentadas nos painéis (b), (c) e (d) da Figura 19 reagiram sensivelmente aos eventos de chuva observados ao longo desses dias, particularmente durante o período diurno. Por exemplo, a temperatura diminuiu drasticamente e a umidade relativa aumentou com a chegada da chuva. Nos dias 7 e 9, as estações do INMET e ITV-UFPA registraram rajadas de vento antes das trovoadas e chuvas, um padrão típico das tempestades vespertinas em Belém.

A análise do dia 7 revela que o pico extremo de precipitação horária foi precedido por rampas ascendentes quase lineares com elevados gradientes de ZTD nas duas estações de GNSS, começando o crescimento aproximadamente uma hora antes da chuva extrema causada pelo ramo sul da ZCIT que foi intensificado pela convecção continental vespertina e encobriu o nordeste do estado do Pará (Apêndice H). A curva de ZTD em BEPA atingiu o máximo e iniciou o declínio pouco antes do início da chuva extrema, sugerindo a condensação do vapor d'água para a formação e crescimento de gotículas de nuvem.

Em contraste, no dia 6, que apresentou duas horas de chuva na categoria moderada a forte, a inclinação das curvas de ZTD foi menos acentuada. O aumento começou a partir de valores mínimos, alcançando picos menos elevados e apresentando uma configuração de salto no ZTD menos expressiva que no dia 7.

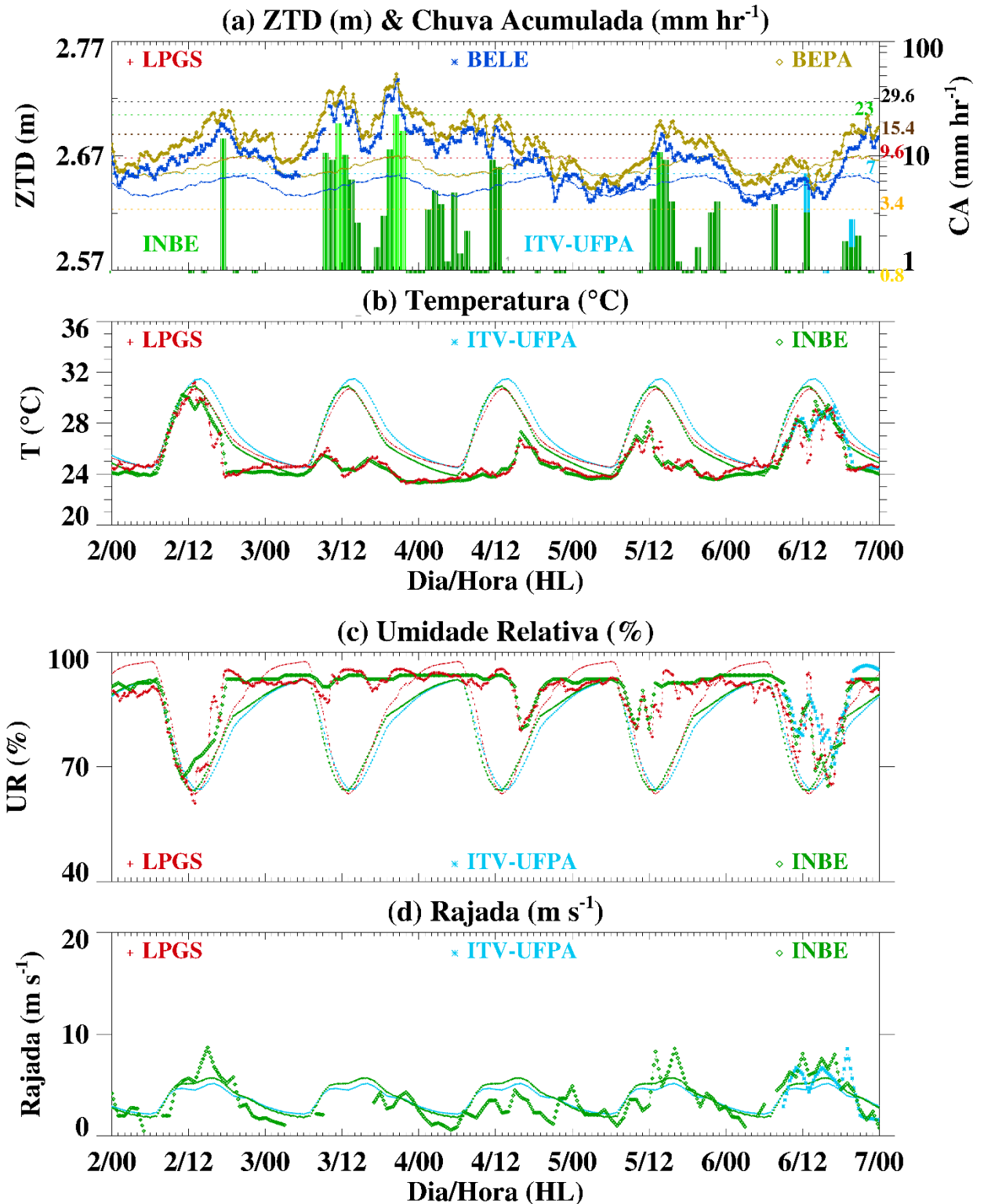
Já no dia 9, embora os picos de ZTD não tenham sido tão altos, o crescimento partiu de valores acima da média, contribuindo para precipitações relativamente altas.

4.3.2 Estudo de caso BE2

O estudo de caso BE2 apresentou vários eventos meteorológicos significativos, com variações irregulares nas curvas de ZTD. No entanto, apresentou rampas com crescimentos súbitos que estavam associados a precipitações, contribuindo para os extremos registrados em fevereiro de

Figura 20 – O mesmo que a Figura 19, exceto que para estudo de caso BE2 do dia 3 de fevereiro de 2018 das 20:00 às 21:00 HL.

ESTUDO DE CASO: 3 FEVEREIRO 2018 2000-2100 (HL)



Fonte: Elaborada pelo autor.

2018, conforme ilustrado na Figura 20. De acordo com o Inmet (2018), o mês de fevereiro daquele ano teve uma precipitação total de 671,6 mm de chuva em Belém, 60% acima da média climatológica para o mês. Entre os dias 3 e 4, houve um acumulado de precipitação de 132,3 mm em 24 horas, causando muitos transtornos à população. Esses extremos de precipitação, juntamente com as marés altas associadas à fase da Lua Cheia, podem ter contribuído para as inundações tanto na região circundante quanto nos rios, lagos, igarapés e canais interiores das cidades na RMBE.

As curvas de ZTD durante este período exibiram múltiplos saltos associados a precipitações significativas durante a pênstada. Antes das chuvas mais intensas do dia 3, as curvas apresentavam uma configuração de cavado, que evoluiu para um padrão de crista com três saltos consecutivos de ZTD, centrados num período de 6 horas de chuvas nas categorias moderada, forte, moderada-a-forte e leve, ocorridas entre 09:00 e 15:00 HL e provenientes de bandas de nebulosidade da ZCIT oceânica que atingiram a região de Belém na manhã (Apêndice I). A partir do início da tarde, as bandas de nebulosidade com topos mais frios, que contribuíram para a chuva convectiva em Belém e se estendiam para o sul, combinaram-se com as bandas de nebulosidade provenientes da ZCAS que atingiram as Regiões Sudeste, Nordeste, Norte e Centro-Oeste (Apêndices I a K; Inpe, 2018). Houve uma diminuição do ZTD, numa configuração de cavado na curva, coincidente com a ocorrência de apenas traços de precipitação por duas horas. O ZTD cresceu novamente de forma escalonada até um máximo, coincidindo com o pico da precipitação da pênstada que aumentou gradualmente em paralelo (Apêndice J). Esses picos de ZTD coincidiram com os horários de chuva mais intensa, indicando que variações repentinas e a manutenção em altos valores de ZTD têm uma relação preditiva com chuvas extremas. O decaimento de ZTD após ou concomitante com uma tempestade, seguido por outro crescimento súbito, também se mostrou preditivo de outro salto de ZTD e de precipitação. Após esses máximos de ZTD, houve uma tendência de decaimento com oscilações na forma de pequenos saltos até atingir um cavado no dia 5. Novamente, ocorreu um crescimento súbito em forma de salto, mantendo o ZTD em níveis intermediários, concomitante com um longo período de precipitação variando entre as categorias moderada, moderada-a-forte e leve.

As curvas de temperatura e umidade relativa do ar estiveram, respectivamente abaixo e acima das médias durante quase toda a pênstada.

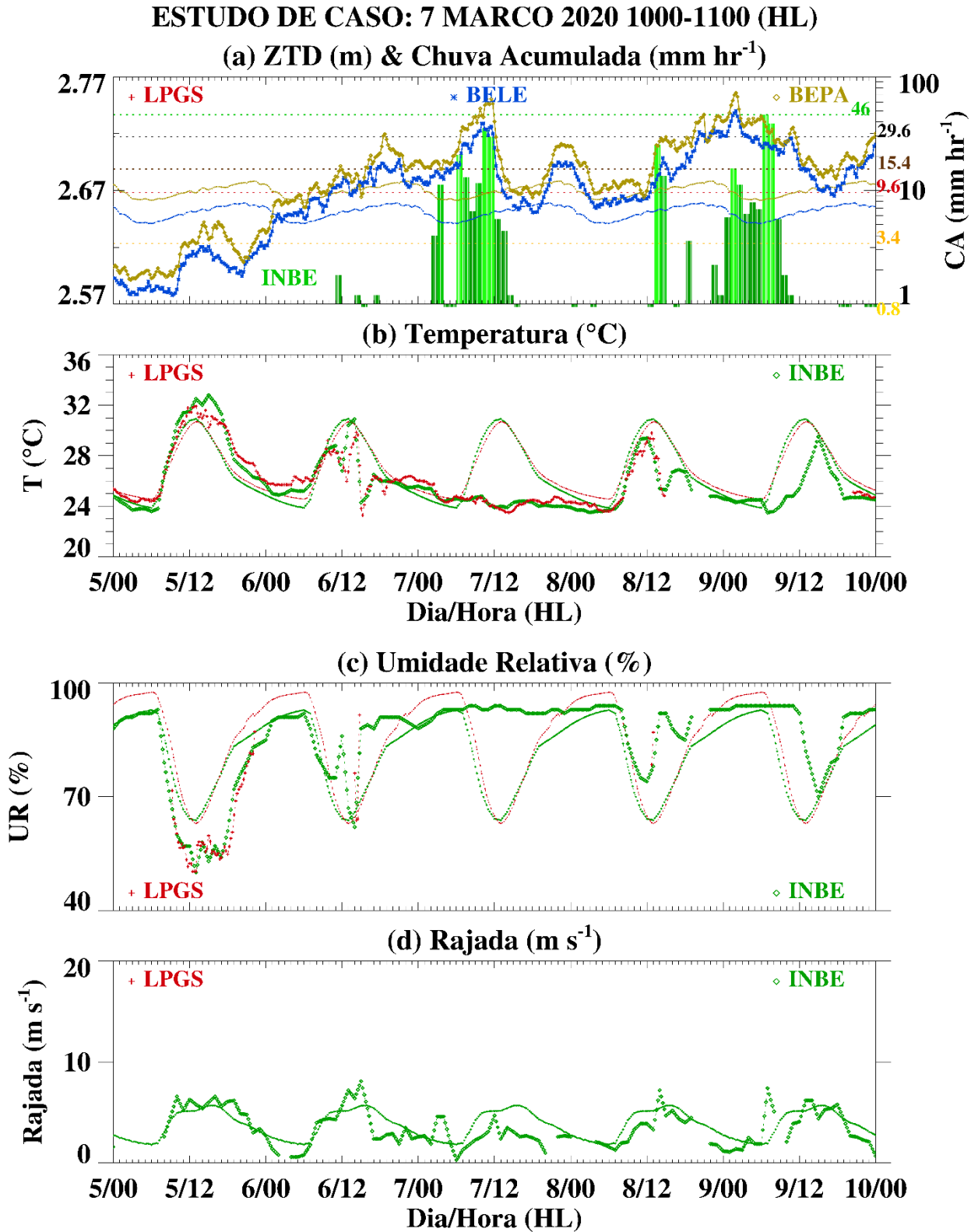
4.3.3 Estudo de caso BE3

O caso BE3, ilustrado na Figura 21, destaca dois períodos de chuvas extremas nos dias 7 e 9 de março de 2020, com durações de 14 e 13 horas, respectivamente. No dia 7, as chuvas mais intensas ocorreram entre 10:00 e 11:00 HL, atingindo 35 mm hr^{-1} , e entre 11:00 e 12:00 HL, com $29,6 \text{ mm hr}^{-1}$. As bandas de nebulosidade da ZCIT que causaram essas precipitações apresentavam mínimas temperaturas em torno de -50°C (Apêndice L), menos profundas do que no dia 9, quando as mínimas temperaturas chegaram a -55°C às 03:00 HL sobre Belém (Apêndice M), resultando em grandes acumulados noturnos até a manhã. Houve uma aparente desintensificação da ZCAS e da ZCIT no dia 7 em comparação com a configuração destes sistemas no dia 9 (Inpe, 2020). Esses eventos contribuíram significativamente para o total mensal de precipitação de 931,1 mm, o dobro da média histórica para março em Belém, conforme apontado pelo Inmet (2020). Os efeitos dessa chuva extrema foram profundos, causando alagamentos, transtornos em vários bairros e transbordamentos em rios, igarapés e canais, conforme relatado pelo DOL (Águas..., 2020).

No painel (a) da Figura 21, observa-se um padrão de crescimento médio de ZTD, alternando entre picos e cavados em meio às variações não lineares, ou seja, houve diversos picos e vales do ZTD das estações BELE e BEPA. A partir do dia 5, os valores de ZTD estiveram abaixo da média de março, mas se elevaram gradativamente e oscilaram até um pico secundário no final do dia 6. No início do 7 havia uma configuração de cavado na curva de ZTD aproximadamente 3 horas antes do início das chuvas. As curvas de ZTD alcançaram seus valores máximos já durante o período de 13 horas de chuvas após um crescimento súbito seguido de pequenos saltos até o pico. Os picos de chuva declinaram significativamente concomitante com o decaimento súbito de ZTD. Os registros de T e UR, conforme mostrado nos painéis (b) e (c) da Figura 21, estiveram abaixo e acima, respectivamente, da média de março, durante o dia 7.

No dia 8, entre 13:00 e 15:00 HL, houve registros de chuva significativa, novamente precedidos por um salto do ZTD, e o crescimento oscilatório nas duas estações culminando em um salto entre 01:00 e 02:00 HL do dia 9, marcando o máximo de ZTD para o período de cinco dias. As precipitações do dia 9, que coincidiram com a fase da Lua Cheia, acumularam 145 mm até às 10:30 HL. Os picos de ZTD na estação BELE e na estação BEPA antecederam os momentos mais intensos de chuva do período de estudo, com máximos entre 07:00 e 09:00 HL. Em ambos os eventos, foram registradas 2 horas de chuva de categoria muito-forte. No entanto, no evento do dia

Figura 21 – O mesmo que a Figura 20, exceto que para estudo de caso BE3 do dia 7 de março de 2020 das 10:00 às 11:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

7, os máximos de chuva ocorreram simultaneamente aos picos de ZTD, enquanto no evento do dia 9, os máximos de chuva, também de categoria muito-forte, ocorreram 4 horas após os máximos de ZTD, mas durante um período prolongado de alto ZTD.

Apesar do crescimento e declínio de ZTD antecedendo até mesmo chuvas leves, houve oscilações significativas de ZTD no dia 5 sem chuvas e entre os dias 7 e 8 com apenas traços de precipitação; além de um salto de ZTD no final do período de chuvas sem o prenúncio de mais chuvas. Todos esses casos evidenciam a complexidade das interações entre as oscilações de ZTD, as condições atmosféricas e as precipitações. Em particular, as curvas de ZTD no dia 5 estavam bem abaixo das médias mensais, assim como a umidade relativa registrada pela estação do INMET, confirmando que a atmosfera apresentava um menor conteúdo de umidade.

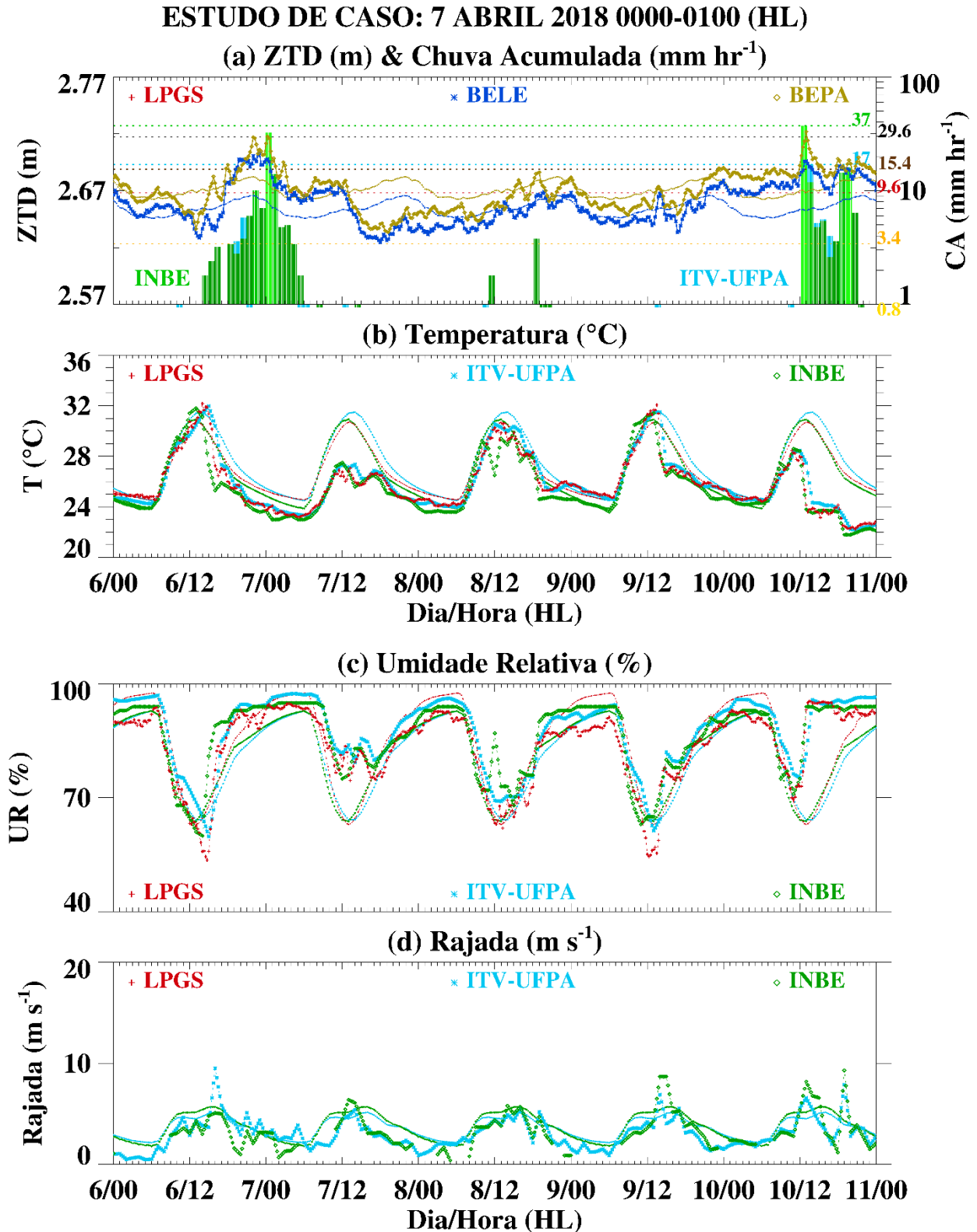
4.3.4 Estudo de caso BE4

O estudo de caso BE4, retratado na Figura 22, foca em dois períodos distintos de chuvas da categoria muito-forte em 6–7 e 10 de abril de 2018. Houve várias células de nebulosidade provenientes da ZCIT no nordeste do Pará e da ZCOU que estava configurada desde o sudeste do Brasil até a Amazônia (Apêndices N e O; Inpe, 2018b). Entre os dias 6–7, o pico de precipitação em Belém foi de $32,4 \text{ mm hr}^{-1}$ entre 00:00 e 01:00 HL, com Tbs mínimas de aproximadamente -50°C (Apêndice O); e no dia 10, houve um pico de CA de $37,2 \text{ mm hr}^{-1}$ das 12:00 às 13:00 HL em que as Tbs estavam mais baixas entre os dois períodos com aproximadamente -55°C (Apêndice P). Estes eventos causaram inundações e alagamentos com transtornos significativos na região metropolitana, especialmente considerando a fase Minguante da Lua durante estes eventos, que não era esperada a elevação dos corpos d'água para causar o transbordamento dos igarapés e canais.

No painel (a) da Figura 22, as curvas de ZTD das estações BELE e BEPA iniciam a pântada diminuindo de forma não linear até uma hora antes do início das chuvas. A partir dos valores mínimos, ocorre um crescimento e decaimento em forma de rampas quase lineares, especialmente na curva de ZTD da estação BEPA. Os múltiplos saltos do ZTD até o maior pico entre os dias 6–7 e os saltos menores durante o decaimento podem ter sido indicadores da continuidade das 16 horas de precipitação com apenas uma 1 hora de interrupção.

Após um declínio notável às 12:00 HL do dia 7, houve, na média, um crescimento gradual em meio às variações não lineares até um novo salto do ZTD em 10 de abril, imediatamente antes

Figura 22 – O mesmo que a Figura 21, exceto que para estudo de caso BE4 do dia 7 de abril de 2018 de 00:00 a 01:00 HL e 10 de abril de 2018 das 12:00 às 13:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

do máximo de precipitação. Novamente foi observado pequenos saltos nos altos valores de ZTD após o pico do dia 10 e relacionados com 9 horas de chuva significativa.

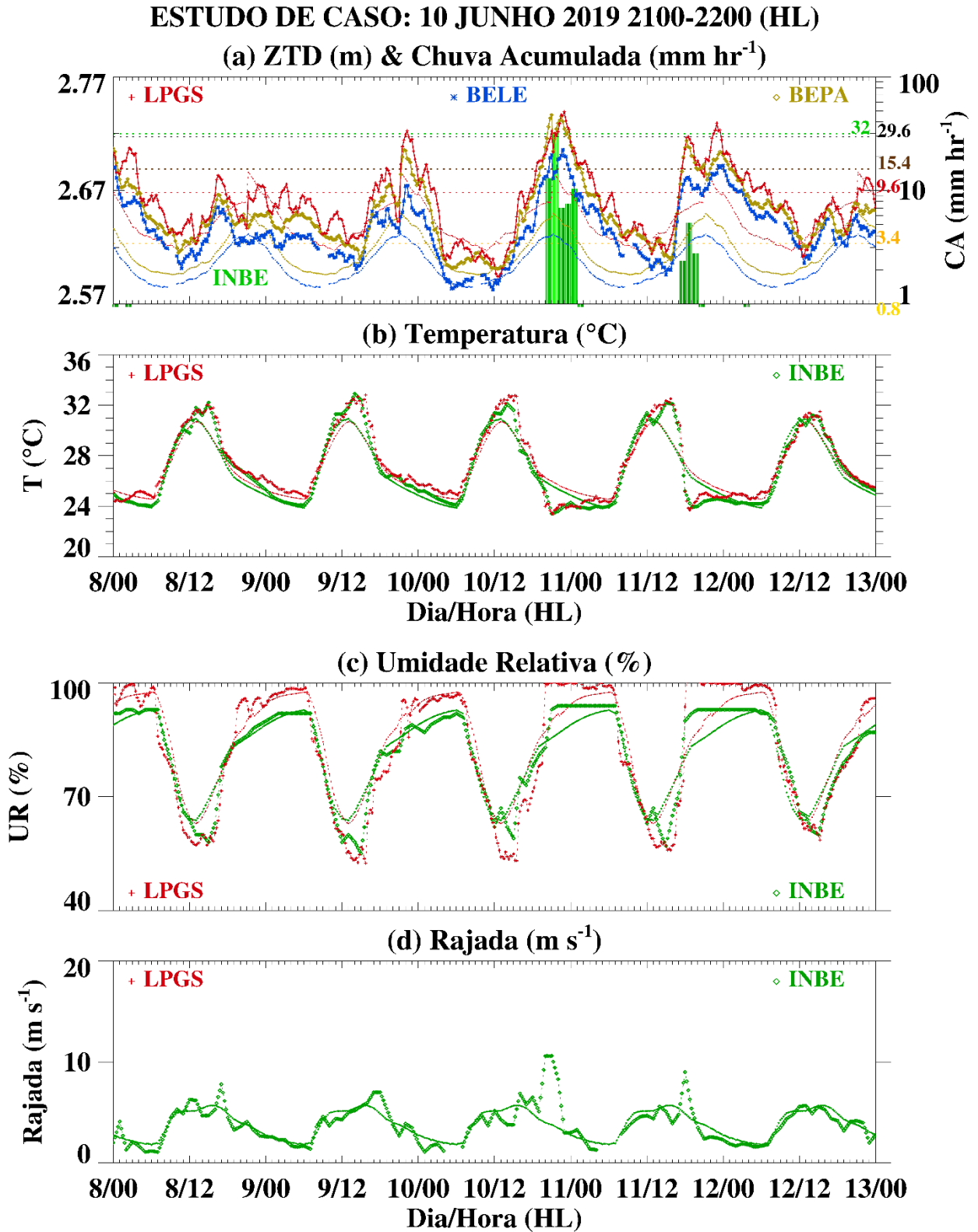
Ambos os estudos de caso, BE3 e BE4, demonstram períodos prolongados de precipitação intensa, com padrões semelhantes de crescimento súbito nas curvas de ZTD no início das chuvas e múltiplos saltos do ZTD durante os períodos de precipitação. Por outro lado, houve saltos do ZTD que ocorreram com pouca ou nenhuma precipitação. Entretanto, outra diferença notável foi observada na magnitude em torno dos máximos valores de ZTD, em que foram mais elevados nos eventos de março (caso BE3) em comparação com aqueles de abril (caso BE4), porém nos 4 períodos houve grandes volumes de precipitação.

Os estudos de caso BE1 a BE4, focados em meses chuvosos em Belém e influenciados pela ZCIT, revelaram uma relação preditiva entre as variações e os saltos de ZTD e a ocorrência de sistemas precipitantes extremos. Estes achados são fundamentais para a compreensão das dinâmicas meteorológicas da região e apontam para a importância do monitoramento contínuo do ZTD para a previsão de chuvas extremas. Os estudos subsequentes, de eventos ocorridos em alguns meses da estação menos chuvosa, buscam explorar essas relações em outros contextos meteorológicos, enfocando em linhas de instabilidade e outros sistemas convectivos de mesoescala.

4.3.5 Estudo de caso BE5

No estudo de caso BE5, as condições meteorológicas em Belém no dia 10 de junho de 2019 foram analisadas com base nos dados ilustrados na pênstada da Figura 23. Esse dia foi caracterizado por temperaturas do ar elevadas, variando entre 32 e 33°C, com umidade relativa relativamente baixa no período da tarde, rajadas de vento acima de 10 m s⁻¹ e ocorrência de trovoadas a partir do início do período noturno, resultando em uma precipitação total de 70,2 mm em um intervalo de 6 horas, a partir das 20:00 HL. Através das imagens de satélites, observou-se que SCMs alcançaram a região de Belém por volta 20:00 HL com as Tbs mais baixas entre -55°C e -60°C e com um deslocamento aproximadamente zonal de leste (Apêndice Q). Conforme relatado pelo Climatempo (2019b), a estação convencional do INMET registrou um total de 93 mm de chuva, contabilizadas das 09:00 HL do dia 10 às 09:00 HL do dia 11. Este volume representa o máximo acumulado em 24 horas para Belém em 2019 até aquela data e o segundo mais significativo para um único dia em junho desde 1967. O jornal O Liberal relata que a intensa chuva noturna causou transtornos signifi-

Figura 23 – O mesmo que a Figura 22, exceto que para estudo de caso BE5 do dia 10 de junho de 2019 das 21:00 às 22:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

cativos à população, incluindo alagamentos (Marco..., 2019). Este evento ocorreu durante a fase da Lua Crescente.

Neste estudo de caso, os dados da estação LPGS estavam disponíveis para comparação, embora sua curva de ZTD se apresentasse com mais não linearidades que as curvas de ZTD nas estações BELE e BEPA, que eram aproximadamente paralelas. No entanto, os valores mais elevados de ZTD, nas rampas ascendentes e descendentes, na estação LPGS estavam mais sincronizados com os das outras duas estações do que os valores médios e baixos (vide Figura 23, nas primeiras 10 horas do dia 8 e a partir das 21:00 HL do dia 8 até as 12:00 HL do dia 9). Foram observados vários picos de ZTD ao longo de toda a pênstada, sendo que os principais ocorreram nos períodos noturnos, com início do crescimento a partir das tardes dos dias 9 a 11. Os maiores valores de ZTD nas três estações foram registrados na noite do dia 10, e com um aumento notável de ZTD de mínimos para máximos ao longo de algumas horas.

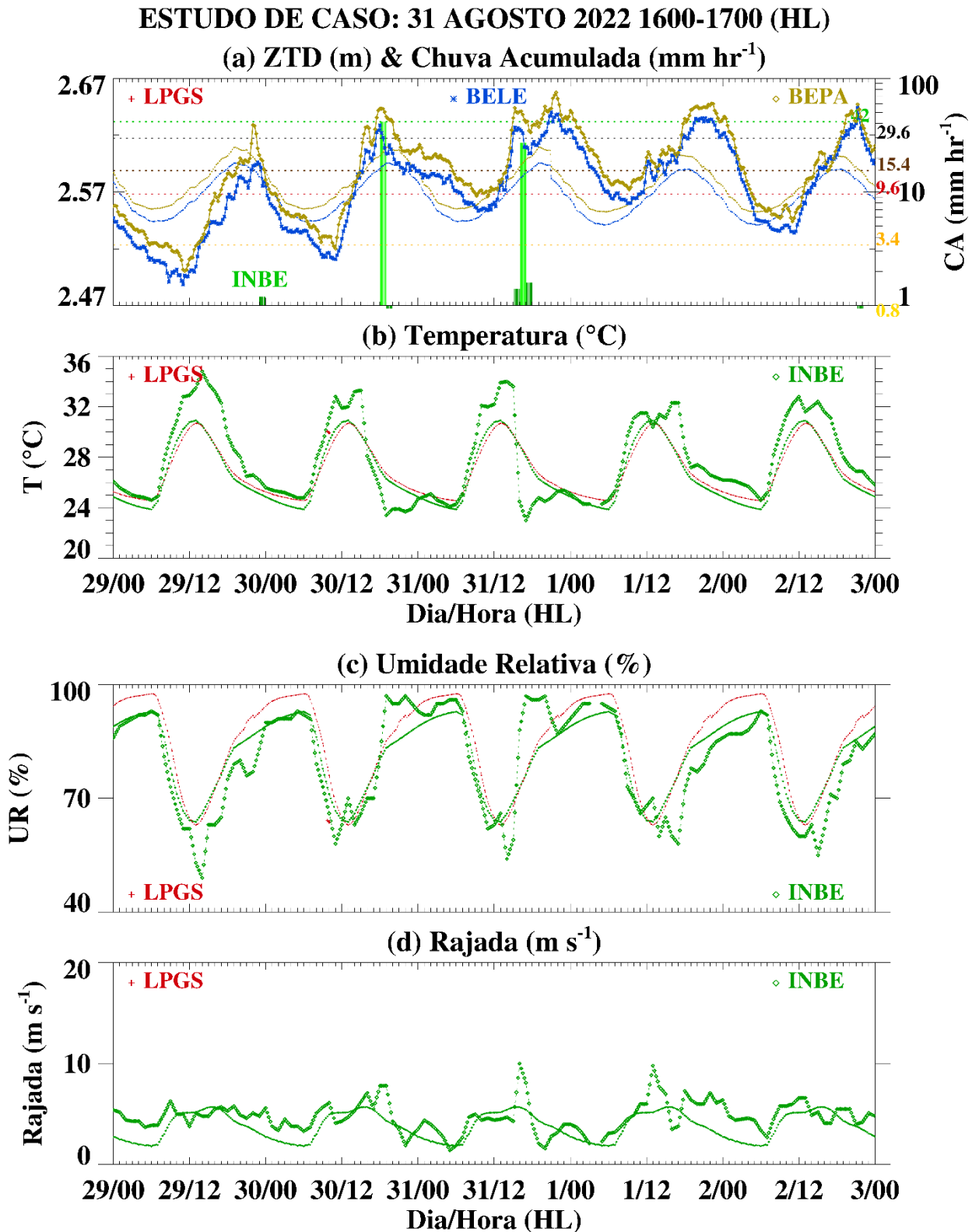
Dois principais saltos de ZTD foram observados na noite do dia 10: o primeiro ocorreu cerca de 15 minutos antes do pico de chuva na categoria muito-forte, e o segundo, durante um período de chuva na categoria moderada. Nos dias 9 e 11, embora tenha havido taxas de crescimento de ZTD semelhantes às do dia 10, especialmente no dia 11, os níveis de ZTD não alcançaram os máximos observados no dia 10. Possivelmente por este motivo que não foi registrada precipitação no dia 9 e apenas chuvas nas categorias leve e moderada no dia 11.

4.3.6 Estudo de caso BE6

O estudo de caso BE6, detalhado na Figura 24, concentra-se em dois eventos de chuvas intensas em 30 e 31 de agosto de 2022. No dia 30, das 18:00 às 19:00 HL, ocorreu uma hora de chuva na categoria muito-forte, totalizando 41,6 mm, embora as Tbs dos topos dos SCMs mais baixas, de aproximadamente -55°C , tenham ocorrido entre 16:00 e 17:00 HL (Apêndice R). No dia seguinte, das 16:00 às 17:00 HL, registrou-se uma chuva na categoria forte de 27,2 mm proveniente de outro SCM que atingiu Belém (Apêndice S). A tempestade do dia 31, além de causar enchentes e transbordamento de igarapés e canais, foi marcada por intensas rajadas de vento, resultando em danos estruturais, cortes de energia e destelhamentos, conforme relatado pelo DOL (Temporal..., 2022).

As curvas de ZTD durante os cinco dias de estudo oscilaram não linearmente entre os míni-

Figura 24 – O mesmo que a Figura 23, exceto que para estudo de caso BE6 do dia 31 de agosto de 2022 das 16:00 às 17:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

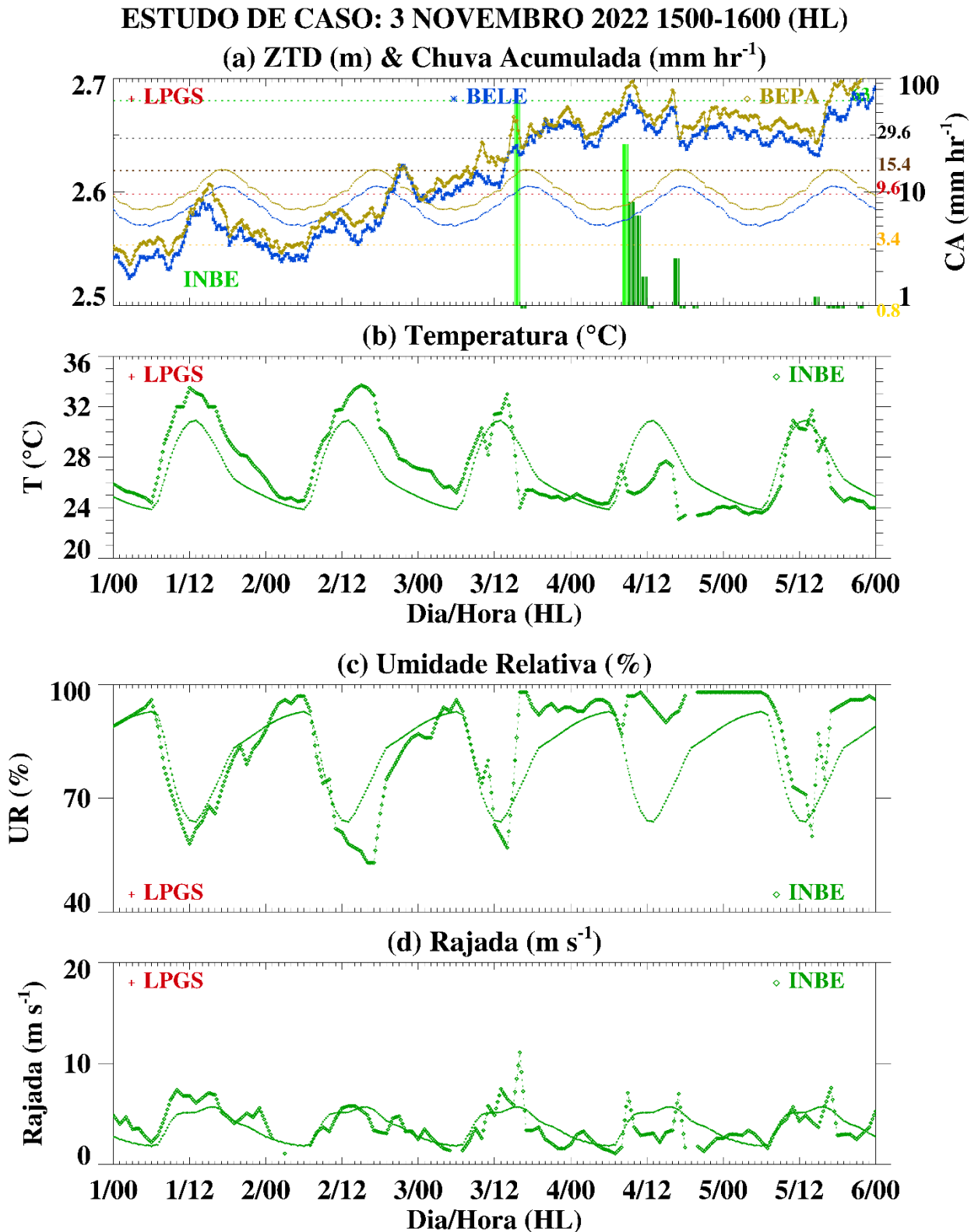
mos e máximos diários com saltos significativos associados aos máximos. Os crescimentos que culminaram em picos significativos nos períodos vespertinos antecederam as precipitações de maiores intensidades. No entanto, os máximos de ZTD dos dias 31 de agosto, 1º e 2 de setembro não tiveram precipitação associada, e assim como no estudo de caso BE5, somente o ZTD alto não é condição absoluta da formação de precipitação — outras condições meteorológicas devem ser levadas em consideração. Os valores elevados de ZTD observados entre a noite do dia 1º e a madrugada do dia 2, por exemplo, estiveram associados a uma temperatura do ar acima da média mensal e uma umidade relativa abaixo da média mensal, conforme registradas na estação meteorológica do INMET. Esses registros poderiam explicar a ausência de precipitação, pois não havia saturação do ar em superfície. Neste estudo de caso a fase da Lua estava na transição entre Nova e Crescente.

4.3.7 Estudo de caso BE7

O estudo de caso BE7, apresentado na Figura 25, foca em um evento de chuva muito-forte que ocorreu em 3 de novembro de 2022, das 15:00 às 16:00 HL, com um acumulado de 63,4 mm hr^{-1} . As Tbs mais baixas, de aproximadamente -60°C , estavam associadas com SCMs na forma de linhas de instabilidades que se estendiam irregularmente desde a região costeira do Nordeste brasileiro até a Venezuela (Apêndice T). Este evento provocou alagamentos significativos em várias áreas da cidade, conforme reportado pelo DOL (Ruas..., 2022). No dia seguinte, 4 de novembro, Belém enfrentou outra tempestade forte, com um máximo de 26,2 mm de precipitação entre 08:00 e 09:00 HL, acumulando um total de 48,2 mm até as 13:00 HL. Foi identificada uma ZCAS que se estendia desde o oceano Atlântico, passando pelas Regiões Nordeste e Norte do Brasil (Apêndice U; Inmet, 2024). Este segundo evento também causou transtornos consideráveis à população, principalmente devido a alagamentos em áreas urbanas, como relatado pelo DOL (Trânsito..., 2022).

A análise da configuração de ZTD no caso BE7 indica um padrão de crescimento não linear das curvas ao longo da pênstada, iniciando no dia 1º e culminando em saltos significativos de ZTD no dia 4. No dia 3, particularmente na estação BEPA, foi observado um aumento acentuado na forma de salto de ZTD pela manhã, seguido por um cavado e outro salto no período da tarde, que coincidiu com o início da intensa precipitação.

Figura 25 – O mesmo que a Figura 24, exceto que para estudo de caso BE7 do dia 3 de novembro de 2022 das 15:00 às 16:00 HL.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No dia 4, as configurações de ZTD nas duas estações assemelharam-se às observadas no dia 3, com um padrão de crista e cavado, e um crescimento notável em ZTD antecedendo o início da chuva. Neste dia, caracterizado por 5 horas de chuva, o aumento na curva de ZTD na estação BEPA coincidiu com o pico de chuva, enquanto os picos máximos de ZTD nas duas estações ocorreram durante as chuvas moderadas que se seguiram. No entanto, observou-se também que na tarde do dia 5 houve outro crescimento ainda maior do ZTD até o final do estudo de caso, porém somente foram registrados traços de precipitação. As curvas de ZTD, de um modo geral, apresentaram um crescimento gradual à medida que a Lua mudava da fase Crescente (dia 1/11) para a fase Cheia (dia 8/11).

Neste capítulo foi analisada a distribuição de precipitação em Belém, por meio dos dados provenientes das estações meteorológicas do INMET e do ITV em diferentes séries temporais, juntamente com dados de Tbs do topo de nuvens no canal IR para validar os dados de precipitação para fornecer suporte da investigação do ZTD, em três diferentes estações de GNSS, e a relação das chuvas extremas e a variação de ZTD na cidade de Belém.

Neste capítulo, procedeu-se nas primeiras seções à análise da distribuição de precipitação em Belém, utilizando dados oriundos das estações meteorológicas do INMET e do ITV. Essa análise foi realizada ao longo de diferentes séries temporais, integrando também dados de temperaturas de brilho no topo de nuvens, capturados pelo canal infravermelho. A inclusão dos dados de Tbs teve como objetivo a validação dos dados de precipitação, contribuindo para o suporte investigativo do ZTD em três distintas estações de GNSS. Adicionalmente, como conclusão do capítulo, a pesquisa enfocou na correlação entre chuvas extremas e as variações do ZTD na cidade de Belém através de estudos de caso.

No próximo capítulo são discutidos os resultados da relação entre o ZTD e IWV com dados de chuva através da investigação de séries temporais, médias, composições e de estudos de caso de eventos extremos de chuva nas cidades do Rio de Janeiro e da relação entre o ZTD com dados de chuva em Belém.

CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise dos dados de ZTD e IWV e os eventos de chuvas extremas no Rio de Janeiro e em Belém, através da aplicação de GNSS meteorologia, revela informações significativas sobre as variações de ZTD e IWV e como elas se relacionam com os eventos de precipitação. Embora as grandezas ZTD e IWV sejam uma representação da integração vertical do vapor d'água na atmosfera (Adams *et al.*, 2013), a relação entre essas variáveis sugere uma ligação robusta entre a dinâmica atmosférica e as condições meteorológicas severas, trazendo implicações importantes para a previsão de chuvas e para a mitigação de riscos associados a eventos extremos, especialmente em curto e curtíssimo prazos.

5.1 Discussão dos resultados

A investigação sobre o ciclo diurno médio de ZTD e IWV em três estações do Rio de Janeiro — RDJN, ONRJ e RIOD — revelou que suas curvas exibem comportamentos quase paralelos. A maior taxa de crescimento de ZTD (IWV) foi observada no meio da tarde, alcançando pouco mais de +1 (+0,1) mm [15min]⁻¹, com uma média aproximada de +0,8 (+0,08) mm [15min]⁻¹ nesse intervalo. Este pico de crescimento está vinculado ao ciclo diurno da radiação solar e ao transporte de vapor d'água para a atmosfera, sendo que a convecção se torna mais ativa no período da tarde. Esses processos, que aumentam a quantidade de vapor d'água na atmosfera, podem explicar por que, em média, os picos de ZTD (e IWV) e da precipitação ocorreram simultaneamente a partir do final da tarde. As cristas de ZTD e IWV começaram a declinar gradualmente após as 00:30, em paralelo com a diminuição das chuvas, progredindo até formarem cavados desde o meio da manhã até o início da tarde. Assim, foi observada uma amplitude média do ciclo diurno de ZTD (IWV) de 17 (2,3) mm. No entanto, foi observada uma discreta variação subdiurna de ZTD e IWV aproximadamente entre 04:00 e 07:00 HL, com uma possível relação com uma variação subdiurna da precipitação nestes horários. Observou-se uma correlação consistente entre o ciclo diurno de ZTD e IWV e o ciclo diurno das precipitações. É notório que o mínimo de IWV antecede o mínimo de ZTD por algumas horas, mas a sincronia entre o aumento mais acentuado desses indicadores de umidade e o crescimento das chuvas à tarde reflete uma resposta ao aquecimento solar diurno nos processos convectivos. Essa observação está em acordo com os achados de Baldysz *et al.* (2024),

que investigaram a variabilidade diurna do vapor d'água, precipitação e temperatura de brilho no topo das nuvens em diversas localidades tropicais. A persistência dos valores relativamente elevados de ZTD e IWV, que também coincide com a continuidade das chuvas noturnas, pode ser atribuída a fatores de larga escala, como a atuação de sistemas frontais, a ZCOU, a ZCAS, entre outros, conforme investigado por Dereczynski, Oliveira e Machado (2009), Pristo *et al.* (2018), Lopez *et al.* (2023) e Barcellos e Quadro (2019), Jones e Liebmann (2002, 2004), Andrade (2011), Reboita *et al.* (2012), Amorim *et al.* (2020) e outros estudos relevantes. Entretanto, é importante considerar também outros fatores que influenciam os ciclos diurnos e subdiurnos de ZTD, incluindo processos físicos de curta duração, como a convecção diurna, ondas atmosféricas, a circulação geral da atmosfera e o acoplamento entre as camadas baixa, média e alta da atmosfera, conforme destacado por Jin, Luo e Gleason (2009).

As análises das composições de séries temporais de ZTD e IWV em 4 períodos distintos de 6 horas (00:00 às 06:00 HL, 06:00 às 12:00 HL, 12:00 às 18:00 HL e 18:00 às 00:00 HL), revelaram padrões relacionados a eventos de precipitação, conforme ilustrado na Figura 5. Identificou-se um incremento gradual e quase linear nos valores de ZTD e IWV, assim como nas taxas de variação desses parâmetros, nas primeiras 4 horas das composições, exceto na composição com $t=0$ no intervalo das 00:00 às 06:00 HL. Aproximadamente de 1 a 2 horas antes do ápice da precipitação, registrou-se um crescimento mais acentuado de ZTD e IWV. Esse comportamento foi especialmente marcante entre 18:00 e 00:00 HL, intervalo que também apresentou a maior ocorrência de eventos de precipitação que atenderam aos critérios das composições. Durante esse período, as taxas de crescimento de ZTD (IWV) atingiram um pico de $+5,41 (+0,75) \text{ mm [15min]}^{-1}$, com uma média de $+4,81 (+0,69) \text{ mm [15min]}^{-1}$, ocorrendo entre 0,5 e 1,5 horas antes dos picos de ZTD e IWV. Após esses picos, observou-se uma inversão mais evidente na tendência, mudando de um aumento para uma redução. Este fenômeno indica o momento em que a atmosfera libera vapor d'água, facilita o crescimento de nuvens e subsequente precipitação. Estes resultados apresentam semelhanças com as descobertas de Adams *et al.* (2013) que observaram duas fases distintas no comportamento do PWV: uma elevação quase linear seguida por um crescimento não linear e mais acentuado do PWV antes de eventos de precipitação intensa em Manaus.

Os estudos de caso investigados na cidade do Rio de Janeiro exploraram nove eventos categorizados em três grupos de três eventos cada. Estes eventos possuem características semelhantes em relação às configurações das curvas de ZTD e IWV, correlacionadas com os

padrões de precipitação. Tais eventos ocorreram durante a estação chuvosa, de novembro a abril, período que responde por 71% do total anual de chuvas e 90% das ocorrências de eventos extremos de chuva na região, segundo Lima e Armond (2022).

Dos nove eventos significativos de chuva investigados, todos excederam o 95º percentil, com precipitações acumulando no mínimo 22 mm em 8 horas ou 30 mm em 24 horas em uma das quatro estações meteorológicas do sistema Alerta Rio. Para sete destes eventos, foram utilizados dados de ZTD e IWV das estações RDJN, ONRJ e RIOD, comparados ao ciclo diurno médio mensal do período de fevereiro de 2015 a agosto de 2018. Os dois eventos restantes se concentraram exclusivamente em dados de ZTD das estações ONRJ e RIOD, mas fora desse intervalo temporal específico.

Os casos RJ1, RJ2 e RJ3 se destacaram por apresentarem padrões de crescimento quase lineares, seguidos por rampas não lineares antes e depois dos picos de ZTD e IWV, um fenômeno com configuração similar àquela observada em dias convectivos na região de Belém por Adams *et al.* (2015). Esses três eventos exibiram ascensões de ZTD (IWV) partindo de médias ou valores abaixo das médias do ciclo diurno no início do estudo, levando a amplitudes significativas de 83 (12) mm, 71 (11) mm e 109 (15) mm, respectivamente, para RJ1, RJ2 e RJ3, impulsionadas por um crescimento vespertino sob a forma de semissenóides assimétricas de duração entre 3 e 5 horas. As configurações das curvas de ZTD (IWV) no caso RJ3 das estações RDJN e ONRJ também tiveram forma de semissenóide, embora as curvas nas três estações tenham ocorrido simultaneamente, a rampa ascendente de maior derivada na estação RIOD teve diferente configuração, cuja discussão é detalhada posteriormente.

Nas análises, as maiores variações temporais de ZTD (IWV) ocorreram nos pontos de inflexão das rampas ascendentes das semissenóides, registrando médias TVs de ZTD (IWV) de +9,12 a +12,8 (+1,08 a +1,83) mm [15min]⁻¹ e máximas TVs de ZTD (IWV) de +14,5 a +17,9 (+2,05 a +2,61) mm [15min]⁻¹. O intervalo entre as máximas TVs de ZTD (IWV) e os picos de ZTD (IWV) variou entre os casos e as estações, mas em média foi de 30–60 minutos. Os picos de ZTD e IWV precederam o início das precipitações fortes e muito-fortes entre 0–45 minutos, exceto uma precipitação forte na estação ARIR que ocorreu entre 15–30 minutos antes dos máximos de ZTD e IWV.

A estação RIOD, durante o estudo de caso RJ3, mostrou um comportamento diferente, caracterizado por uma rampa ascendente íngreme e quase linear, culminando nas maiores variações

temporais com média TV de ZTD (IWV) de +17,3 (+2,66) mm [15min]⁻¹ e máxima TV de ZTD (IWV) de +21,3 (+3,33) mm [15min]⁻¹ configurando um salto em ZTD e IWV. A precipitação nas categorias forte e muito-forte ocorreu imediatamente após o pico de ZTD/IWV e na subsequente rampa descendente, durando aproximadamente 45 minutos. Esses resultados corroboram com as configurações de fortes e súbitos aumentos de PWV, seguido de quedas também rápidas, predominantemente antes de intensos e extensos eventos de precipitação, identificadas e nomeadas como os “saltos de GPS-PWV” por Sapucci *et al.* (2019). Observações semelhantes foram realizadas por Campos *et al.* (2023) em Belém, evidenciando um padrão comparável na variação do PWV. Esse achado reforça a presença de mecanismos recorrentes na variação brusca do vapor d’água atmosférico em diferentes contextos meteorológicos, geográficos e climáticos, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada dos processos que regulam eventos de precipitação. Como exemplo, os estudos de Benevides *et al.* (2013, 2015) também identificaram um aumento alto e súbito do PWV antes dos eventos de precipitação severa. Além disso, outras pesquisas em diversas partes do mundo correlacionaram o PWV com a ocorrência de precipitação severa, como demonstrado por Bock *et al.* (2016), Rohm *et al.* (2013) e Champollion *et al.* (2004), entre outros.

Os casos RJ4, RJ5 e RJ6 apresentaram um aumento nos valores de ZTD e IWV que já estavam em níveis elevados. Isso indicou uma atmosfera já saturada, chegando a níveis extremos, semelhante aos exemplos de ocorrências de ZCOU ou ZCAS. Mesmo incrementos menos intensos em ZTD/IWV foram indicativos de eventos extremos de precipitação na cidade.

As configurações desses casos foram caracterizadas por rampas prolongadas ou escalonadas em uma estação e oscilações em forma de “protuberâncias” em outra estação simultaneamente. Por exemplo, nas estações RDJN/ONRJ, as marchas de ZTD/IWV apresentaram uma rampa alongada quase linear antes do pico, enquanto na estação RIOD, houve uma configuração de protuberâncias durante todo o período do estudo de caso RJ4. Essas configurações também se alternaram entre essas estações nos casos RJ5 e RJ6, indicando uma possível diferença na termodinâmica da atmosfera e/ou outras condições fisiográficas das estações de GNSS RDJN/ONRJ distantes da estação RIOD por 12 km. No entanto, ambas produziram simultaneamente precipitações de magnitudes e extensões semelhantes.

Outras características destacadas nesses casos incluem:

- (i) os altos valores de ZTD (IWV) de ~2,7 m (~63,8 mm) alcançados pela rampa alongada na estação ONRJ do caso RJ4 resultaram em menos precipitação (12 mm

na estação ARSC) em comparação com a configuração de protuberâncias, que tinha valores menores de ZTD (IWV) no máximo secundário de $\sim 2,65$ m ($\sim 56,4$ mm), antes do máximo absoluto no final do período, que teve alta precipitação com pico de $23,6$ mm $[15\text{min}]^{-1}$ e acumulação de 66 mm em 8 horas na estação ARSC;

- (ii) os extremos valores da máxima TV de ZTD (IWV) de $+14,2$ ($+2,1$) mm $[15\text{min}]^{-1}$ em apenas 30 minutos já em níveis elevados da penúltima rampa ascendente da estação RIOD do caso RJ6, com precipitações forte e muito-forte, prenunciaram precipitações ainda mais intensas após o pico extremo de ZTD (IWV) de $2,727$ m (70 mm). Paralelamente, a penúltima protuberância do máximo secundário de ZTD (IWV) na estação ONRJ, com precipitação forte na estação ARSC, também prenunciou precipitações ainda mais intensas e extensas após o pico extremo de ZTD (IWV) de $2,701$ m ($66,7$ mm).

Essas observações levantam questionamentos sobre o monitoramento e a compreensão das quantidades e dos incrementos significativos do vapor d'água, como ferramenta para entender e aplicar a complexa interação entre as variáveis atmosféricas e a precipitação. Também são indicativos de possíveis gatilhos e indicadores potenciais de eventos intensos de chuva.

Os resultados dos estudos de caso RJ7, RJ8 e RJ9 foram apresentados enfocando as observações de ZTD e IWV em relação aos eventos com perturbações em torno da alta umidade nos períodos estudados. Houve um padrão de elevação significativa nas curvas de ZTD e IWV, correlacionadas com períodos de chuva intensa. Essas elevações foram ilustradas por protuberâncias nas curvas ou rampas ascendentes, indicando períodos em que o vapor d'água atmosférico estava excepcionalmente alto, possivelmente devido à forte convergência de umidade, em baixos níveis da troposfera, causada pela presença de sistemas atmosféricos que promovem a alta acumulação de umidade.

O estudo de caso RJ7, ocorrido entre 19 e 20 de novembro de 2017, mostrou uma correlação direta entre as protuberâncias nas curvas dos elevados valores de ZTD/IWV e a ocorrência de chuvas em todas as quatro estações meteorológicas. Este evento é notável pelo prolongado período de altos valores de ZTD e IWV, sustentados por 24 horas, indicando um potencial para chuvas intensas e contínuas, como observado. Destaca-se uma sequência de duas protuberâncias, com os máximos de ZTD e IWV associados aos períodos de precipitações mais intensas no meio do período noturno. A sequência temporal dos eventos indica que as protuberâncias no ZTD e IWV

não só antecedem, mas também são consistentes com o aumento da precipitação. Isto é particularmente visível nas estações RDJN/ONRJ e RIOD, em que os picos de ZTD (IWV) de aproximadamente 2,67 m (60 mm) a 2,69 m (62,3 mm) correspondem a aumentos significativos na precipitação nas estações locais. O acompanhamento dessas elevações por chuvas de leve a forte, especialmente após os picos de ZTD (IWV), sugere uma correlação direta entre a saturação de vapor na coluna atmosférica e a ocorrência subsequente de precipitação.

No estudo de caso RJ8, ocorrido em 11 de janeiro de 2011, foram analisadas as curvas de ZTD nas estações RIOD e ONRJ e os dados de precipitação acumulada. Na cidade do Rio de Janeiro, apesar da ausência de devastação como na região serrana, houve precipitações contínuas de categorias leve e moderada desde a meia-noite até o meio da manhã, quando o ZTD oscilava em torno de um declínio até o início da tarde. As curvas de ZTD refletiram o ciclo diurno, com mínimos às 12:45 e 13:00 HL, e um aumento linear no início da tarde devido ao aquecimento solar. Protuberâncias significativas no ZTD foram observadas a partir das 19:00 HL na estação RIOD, com picos de 2,702 m às 20:15 HL e 2,676 m na estação ONRJ. Chuvas moderadas a fortes ocorreram principalmente nas rampas ascendentes e descendentes dessas protuberâncias, coincidindo com as máximas taxas de variação de ZTD. O estudo de caso RJ8 destaca uma série de eventos onde os picos de ZTD/IWV correspondem a momentos de chuva intensa e prolongada. É notável que os valores de ZTD/IWV aumentem antes dos principais eventos de chuva, alinhando-se com as observações de que um maior conteúdo de vapor d'água na coluna atmosférica pode anteceder e intensificar eventos de precipitação.

O estudo de caso RJ9 é de especial interesse devido ao volume extremo de chuva registrado nas quatro estações meteorológicas, causando transtornos significativos na cidade do Rio de Janeiro. As protuberâncias e rampas nos máximos das curvas de ZTD antes dos picos de precipitação indicam uma acumulação intensa de umidade, contribuindo para a severidade dos eventos de chuva. O crescimento adicional do já elevado ZTD/IWV, tanto na forma de protuberâncias quanto de rampas quase lineares após o máximo principal, também mostrou ser um prenúncio importante da continuidade da precipitação severa.

Os estudos de caso RJ7, RJ8 e RJ9 mostraram variações significativas nos valores de ZTD e IWV ao longo dos períodos de 24 horas. Estas variações foram marcadas por protuberâncias que indicaram aumentos e diminuições periódicas nas quantidades de vapor d'água total na coluna atmosférica. Em todos os três casos, houve um pico claro nos valores de ZTD e IWV que

geralmente precedeu ou coincidiu com períodos intensos de precipitação. Este padrão sugere que elevações em ZTD/IWV são bons indicadores antecedentes de eventos de chuva, devido à acumulação de umidade na atmosfera.

Esses casos também destacam a correlação significativa entre os valores elevados de ZTD/IWV e eventos de precipitação intensa. As protuberâncias nas curvas de ZTD/IWV, especialmente durante ciclos de alta umidade atmosférica causados pelo acoplamento de sistemas de escala sinótica e convectiva, servem como importantes indicadores para previsão de chuvas fortes. As estações de GNSS foram cruciais na detecção desses padrões, evidenciando a utilidade do monitoramento contínuo de ZTD e IWV para a meteorologia operacional. Os eventos de chuva associados aos estudos variam em intensidade e duração, refletindo a complexidade das interações entre a superfície e a atmosfera. Em casos com elevações mais acentuadas de ZTD e IWV, a precipitação tende a ser mais intensa e prolongada, destacando o potencial de inundações ou outros impactos hidrológicos adversos que tem acontecido na RMRJ.

A RMBE também está sujeita à ocorrência de eventos de chuvas intensas que com frequência causam um impacto significativo nas atividades cotidianas e na infraestrutura urbana. Para investigar essas relações, foi realizada uma análise comparativa dos dados de precipitação das estações meteorológicas do ITV (ITV-UFPA) e do INMET (INBE), das Tbs dos topos de nuvens no canal IR e dos dados de ZTD das estações de GNSS LPGS, BELE e BEPA. A correlação entre altos valores de ZTD e a ocorrência de chuvas intensas foi um ponto central dessa análise.

As análises das precipitações das estações ITV-UFPA e INBE, entre novembro de 2015 e dezembro de 2018, revelaram um ciclo diurno bem definido, com picos de precipitação no período vespertino. Notou-se que o máximo do ciclo ocorreu entre 15:00 e 16:00 HL em ambos os conjuntos de dados, tanto coincidentes quanto independentes, nas duas estações. O intervalo das 14:00 às 16:00 HL permaneceu o mais ocorrente da máxima precipitação nas médias trimestrais, exceto no trimestre de JJA, quando os picos se deslocaram para o período das 16:00 às 19:00, conforme os dados mais longos da estação INBE no período de 2010 a 2022. Esses achados estão alinhados com estudos anteriores, como os de Nechet (1984) e Santos (1993), que indicaram que as chuvas convectivas vespertinas em Belém começam a se formar no período da manhã.

No entanto, o pico de precipitação horária na estação ITV-UFPA representou 63% (em dados coincidentes) e 62% (em dados independentes) do registrado na estação INBE. Além disso, a precipitação anual média na estação ITV-UFPA foi de 2620 mm (dados coincidentes) e 2635 mm

(dados independentes), correspondendo a 82% e 79%, respectivamente, dos valores de 3185 mm e 3332 mm observados na estação INBE. Nota-se que a média anual na estação ITV-UFPA também apresenta diferenças consideráveis quando comparada com as normais climatológicas da precipitação das seguintes fontes: (i) da Embrapa com os dados de estação convencional no período de 1967–1996 (Bastos *et al.*, 1993); (ii) do INMET com os dados de estação convencional no período de 1991–2020 (Inmet, 2023); e (iii) da Normal Provisória do INMET (INBE, neste estudo) dos dados da estação automática no período de 2003–2022, que registraram, respectivamente, 3001 mm, 3308 mm e 3512 mm. Outros estudos das normais climatológicas da estação convencional do INMET para os períodos de 1941–1970 e 1971–2000, e a Normal Provisória de 2001–2015, relatadas por Oliveira *et al.* (2016), indicam uma tendência crescente de precipitação em Belém, com valores anuais de 2661 mm, 2925 mm e 3333 mm. Da mesma forma, o estudo de Santos (1993) revelou uma tendência de aumento total de 458,5 mm entre 1886 e 1991, embora tenha registrado uma tendência decrescente durante os eventos de El Niño.

Caso os valores relativamente baixos da média anual e do ciclo diurno da precipitação observados na estação ITV-UFPA se confirmem como realistas, é possível que reflitam diferenças nas condições meteorológicas e geográficas entre as localizações das estações ITV-UFPA e INBE. No entanto, a análise das Tbs do topo das nuvens, capturadas pelo canal IR no período de 2000 a 2015, com resolução temporal de 30 minutos e espacial de 4 km × 4 km, mostrou que a RMBE apresenta Tbs mais baixas nas áreas ao sul e oeste, em comparação com os setores norte e leste. A estação ITV-UFPA, localizada ao sul de Belém, está situada numa grade com Tbs ligeiramente mais baixas do que a grade da estação INBE. Além disso, o ciclo diurno sazonal médio das Tbs nas duas grades revelou um leve deslocamento temporal. O decaimento das Tbs, que começa no final da manhã e atinge o mínimo aproximadamente às 18:00 HL, e o aumento gradual a partir das 18:00 HL na grade da estação INBE ocorre de maneira ligeiramente antecipada em relação à redução e aumento das Tbs na grade da estação ITV-UFPA. Este padrão pode estar associado ao deslocamento médio, aproximadamente de nordeste, de bandas convectivas formadas paralelas à linha costeira norte e nordeste do estado do Pará e leste do estado do Amapá, que foram observadas nas médias das Tbs a cada 30 minutos. As bandas convectivas formadas no nordeste do estado do Pará atingem a região de Belém no período da tarde, contribuindo para os picos de precipitação convectiva, e passam primeiramente pela estação INBE. Esta observação é consistente com as composições de vapor d'água precipitável e temperaturas de brilho em dias convectivos

apresentadas por Adams *et al.* (2015) para o nordeste do estado do Pará. No entanto, é importante considerar que esta análise não descarta a possibilidade de que as Tbs mais baixas no sul e oeste de Belém possam ser resultantes de nuvens altas que não produzem precipitação, como, por exemplo, as nuvens Cirrus na retaguarda das tempestades, assim como ocorre em outras regiões tropicais.

Embora a faixa litorânea do norte da América do Sul seja considerada, em análises globais, como no estudo de Kikuchi e Wang (2008), como possuindo um regime de precipitação costeira terrestre, há variações tanto nos volumes quanto nos tipos de sistemas precipitantes entre as faixas litorâneas dos estados do Amapá e Pará (Mota, 2003). As médias totais e sazonais das Tbs a cada 30 minutos apontaram o setor leste e sudeste do estado do Amapá com os topos de nuvens mais elevados que sobre o oeste do Arquipélago do Marajó e sobre a região de Belém. Essas áreas com as Tbs mais baixas indicam uma maior atividade convectiva com nuvens mais eletrificadas em comparação com as regiões vizinhas.

Os estudos de Figueroa e Nobre (1990) já indicavam que as precipitações acima de 3000 mm ano⁻¹ ocorriam em três regiões da Amazônia Brasileira: (i) no setor noroeste, (ii) na região de Belém e leste da Ilha do Marajó, e (iii) no norte do estado do Amapá; e abaixo de 2500 mm ano⁻¹ para a região de Macapá. Similarmente, os estudos de Mota (2003), através de estimativas de precipitação por pluviômetros e satélites, mostraram que essas três regiões recebem os maiores volumes de precipitação anual do Brasil. Souza e Cunha (2010) apresentaram as normais climatológicas da precipitação na região de Macapá e na região ao norte e litorânea do Amapá com, respectivamente, 2600 e 2900 mm ano⁻¹. Os estudos de Nechet (1994a, 1994b) mostraram que as ocorrências de trovoadas entre Belém e Macapá tiveram, respectivamente, uma média de 163 e 41 dias por ano.

Esses estudos prévios corroboram os resultados deste trabalho que sugere que a natureza da chuva na região de Belém é mais convectiva do que no leste e sudeste do estado do Amapá que podem estar sob grande influência do regime de precipitação costeira marítima.

As análises das séries temporais dos dados de ZTD ao NMM das estações BELE, BEPA e LPGS em Belém também revelaram altos valores, compatíveis com a alta umidade característica das regiões equatoriais (Li *et al.*, 2012). O ciclo diurno médio de ZTD, no período de dezembro de 2018 a novembro de 2022, nas três estações apresentou um mínimo às 04:00 HL e um máximo por volta das 16:00 HL, com os máximos de precipitação na estação INBE ocorrendo no meio da tarde.

Porém, no período de julho de 2014 a novembro de 2022, o mínimo (máximo) do ciclo diurno médio de ZTD nas estações BELE e BEPA foi às 06:00 (19:00) HL. O ciclo diurno médio de ZTD nos trimestres mostrou uma configuração similar à média anual, exceto para o trimestre JJA, que, assim como a precipitação média, apresentou um deslocamento de 3 horas para a frente em relação ao ciclo diurno anual.

Observa-se que o ciclo diurno médio de ZTD nas estações do Rio de Janeiro apresenta características distintas, com o mínimo ocorrendo por volta das 14:00 HL e o máximo por volta das 22:00 HL. Este comportamento reflete a resposta ao ciclo diurno das variáveis atmosféricas e topofisiográficas, que difere significativamente do observado em Belém. Essas variações são importantes para a compreensão das dinâmicas atmosféricas regionais e para a calibração de modelos meteorológicos específicos para cada localidade.

As médias anuais do ZTD, para os dados coincidentes nas três estações, foram de 2,636 m para BELE, 2,639 m para BEPA e 2,661 m para LPGS. Esses valores sugerem uma consistência nos dados durante os períodos em que as séries temporais estavam disponíveis para todas as estações, apresentando curvas quase paralelas. No entanto, os dados da estação LPGS a partir do final da tarde até aproximadamente a meia-noite mostraram discrepâncias significativas (*outliers*) em relação ao ZTD das duas outras estações.

As diferenças nos valores de ZTD para as estações de GNSS em Belém podem indicar variações na umidade atmosférica na cidade. Por exemplo, observa-se um aumento de 2 a 3 mm na média anual de ZTD em BEPA em comparação com BELE, indicando um aumento na umidade atmosférica no sentido sul-sudeste da estação BELE. Além disso, a diferença bem mais significativa de 25 mm entre as médias anuais de ZTD nas estações BELE e LPGS pode representar uma variação substancial na umidade atmosférica entre o local da estação BELE e o sul de Belém, onde está localizada a estação LPGS. Essa diferença é ainda mais interessante considerando que a sub-região no sul de Belém apresenta valores mais baixos de Tbs do topo das nuvens, conforme discutido anteriormente.

Adicionalmente, até o momento, não se pode descartar a possibilidade de que os valores elevados de ZTD na estação LPGS em relação às outras duas estações e/ou os *outliers* observados entre o final da tarde e à meia-noite na estação LPGS sejam causados pelas estratégias de processamento e de filtragem utilizadas no programa Bernese Software, por erros instrumentais ou por outros erros sistemáticos. Essa hipótese foi levantada por Mota, Song e Stepniak (2019) ao

analisarem diferenças nas médias de ZTD das estações RDJN do sistema iGMAS e ONRJ da RBMC, instaladas no topo do mesmo prédio no ON do Rio de Janeiro (vide adicionalmente Stepniak; Bock; Wielgosz, 2018; Jarlemark *et al.*, 2010; King; Watson, 2010; Ning; Elgered; Johansson, 2011; Buehler *et al.*, 2012; Smith *et al.*, 2007). Essas suposições precisam ser consideradas e investigadas cuidadosamente para garantir a precisão dos dados, especialmente em relação à superestimativa de ZTD na estação LPGS quando comparados com os dados de outras estações. No entanto, esses dados continuam sendo valiosos para diversas análises, como as séries temporais comparativas e os estudos de caso realizadas nesta pesquisa. Com a continuidade da parceria da UFPA com o SHAO, foi realizada a atualização dos equipamentos da estação LPGS no ano de 2023, tornando possível a continuidade da investigação da variabilidade do vapor d'água nessa localidade de Belém.

As séries temporais que apresentaram o ciclo diurno médio de ZTD das estações BELE e BEPA no período de 2014–2022 tiveram uma amplitude média de 31 mm e 32 mm, respectivamente. Assim, a amplitude de ZTD em Belém foi aproximadamente o dobro daquela encontrada para o Rio de Janeiro. Esses resultados são consistentes com as análises de Jin, Luo e Gleason (2009), que mostraram a forte dependência das maiores amplitudes do ciclo diurno de ZTD nas latitudes equatoriais.

Os estudos de caso abordaram a relação entre a variação do ZTD e eventos de precipitação intensa em Belém, utilizando dados de três estações de GNSS e estações meteorológicas, focando em períodos pentadais e utilizando representações gráficas detalhadas. Quatro dos sete casos analisados ocorreram entre os meses de fevereiro e maio, durante a estação chuvosa, quando ZCIT exerce maior influência na precipitação da região (Hastenrath; Heller, 1977; Hastenrath; Lamb, 1977). Os outros três casos ocorreram nos meses de junho, agosto e novembro, na estação menos chuvosa, quando a região de Belém é tipicamente afetada por linhas de instabilidade, outros SCMs e sistemas atmosféricos de outras escalas (Garstang *et al.*, 1994; Greco *et al.*, 1994).

Os eventos meteorológicos estudados neste trabalho resultaram em grandes volumes de chuva que, somados às características topofisiográficas de Belém — uma cidade relativamente plana e de baixas altitudes, cercada por diversos e grandes corpos d'água e entrecortada por rios, lagos, igarapés e canais —, causaram inundações e alagamentos, gerando transtornos significativos para a população local. Essa situação é uma realidade cotidiana para os habitantes da cidade desde o século XVII, mesmo com as intervenções dos poderes públicos (Araújo Júnior, 2013).

No estudo de caso BE1, com o evento de precipitação mais expressivo da pênstada, ocorrido no dia 7 de maio de 2018, as estações ITV-UFPA e INBE registraram chuvas de 86 mm e 37 mm, respectivamente, com impactos notáveis na cidade, como inundações nas margens dos corpos d'água e alagamentos de vias. As curvas de ZTD das estações BELE e BEPA estiveram acima das médias mensais, indicando uma atmosfera mais úmida, porém as curvas de ZTD variavam não linearmente, antes e depois dos eventos mais significativos de chuvas. Observou-se um aumento súbito de ZTD aproximadamente uma hora antes do evento de chuva extrema, marcando uma rampa ascendente quase linear de rápido crescimento do vapor d'água na coluna atmosférica, seguido por uma diminuição repentina, indicando a condensação do vapor d'água e a consequente precipitação.

No estudo de caso BE2, que analisou os principais eventos entre os dias 2 e 5 de fevereiro de 2018, um mês que teve uma precipitação total 60% acima da média, as curvas de ZTD variavam, assim como no caso BE1, de forma não linear, porém mostraram crescimentos súbitos com múltiplos saltos associados às chuvas, com picos coincidentes com os horários de precipitação mais intensa. Isso reforça a relação preditiva entre o aumento dos valores já elevados de ZTD e a ocorrência de chuvas extremas associada à fase da Lua Cheia.

O estudo de caso BE3, que destacou dois períodos de chuvas intensas nos dias 7 e 9 de março de 2020, revelou um padrão de crescimento seguido de saltos significativos no ZTD concomitante com as chuvas mais intensas, exibindo um comportamento oscilatório e a manutenção de altos valores de ZTD durante os eventos de precipitação. No primeiro evento, as chuvas, que duraram várias horas, só cessaram após um decaimento brusco no ZTD. No segundo evento, embora as chuvas prolongadas tenham cessado, o ZTD permaneceu elevado e apresentou mais um pico sem precipitação relacionada. Os eventos de fortes chuvas, combinados com a elevação dos níveis d'água potencializados pela fase da Lua Cheia, aumentaram os transtornos à população.

No estudo de caso BE4, ocorrido em abril de 2018, foram observados múltiplos saltos de ZTD desde o início de um período de várias horas de precipitação no primeiro evento. No segundo evento, houve um salto significativo de ZTD que iniciou seu crescimento concomitantemente com o pico de precipitação, precedendo mais chuvas por oito horas.

O estudo de caso BE5, ocorrido em 10 de junho de 2019, foi caracterizado por altas temperaturas e umidade relativa relativamente baixa, mostrando que apenas os saltos de ZTD até

os picos mais destacados precederam os volumes extremos de chuvas. No estudo de caso BE6, que analisou eventos de 30 e 31 de agosto de 2022, os altos valores de ZTD estavam associados a chuvas intensas, embora também houvesse períodos com elevados valores de ZTD sem precipitação significativa, sugerindo a necessidade de considerar outras condições meteorológicas. Finalmente, o estudo de caso BE7, de novembro de 2022, mostrou padrões de crescimento e saltos na ZTD antes e durante os picos de chuva, reforçando a relação preditiva entre ZTD e precipitação intensa.

Nos casos analisados em Belém, as curvas de ZTD apresentaram variações não lineares. No entanto, quando se aproximavam dos eventos de precipitação significativa, as curvas se organizavam em uma ou mais rampas ascendentes quase lineares, seguidas por um pico e uma rampa descendente. Observou-se uma correlação consistente entre o aumento súbito do ZTD em direção ao pico — que precedia o início das chuvas, em aproximadamente até 2 horas, ou o máximo da precipitação — e os eventos de precipitação intensa quando os valores de ZTD já se encontravam elevados. A configuração das rampas ascendentes e descendentes nas curvas de ZTD observadas nos sete casos em Belém foi semelhante aos saltos de PWV apresentados por Sapucci *et al.* (2019) e Campos *et al.* (2023). Dependendo da duração dos eventos de precipitação, ocorriam múltiplos saltos de ZTD que acompanhavam os acumulados de chuvas, com os picos dos saltos precedendo ou ocorrendo concomitantemente com os máximos de precipitação. Essa configuração de salto também foi observada no Rio de Janeiro em um único caso estudado neste trabalho, ocorrido em 16 de março de 2015, no ZTD/IWV da estação RIOD.

Em alguns casos, o início das rampas ascendentes de ZTD antecedeu em até 2 horas o início das chuvas. Nos casos de múltiplos saltos de ZTD, o pico de ZTD precedeu ou coincidiu com os máximos de precipitação horária acumulada. No entanto, não foi possível determinar com precisão o intervalo temporal entre o início das rampas ascendentes ou os picos de ZTD e os máximos de precipitação. Essa limitação deve-se à frequência horária dos dados de precipitação e de outras variáveis meteorológicas, em comparação com a resolução temporal de 15 minutos dos dados de ZTD utilizados neste estudo. Além disso, a distância entre as estações pluviométricas e as antenas de GNSS pode resultar em falta de sincronização entre a precipitação medida e a coluna de vapor d'água estimada do mesmo sistema precipitante ou a fase da tempestade.

Os estudos realizados nas localidades de Belém e do Rio de Janeiro demonstraram que a evolução do ZTD e IWV, através de saltos, semissenóides ou protuberâncias, correlaciona-se

positivamente com a probabilidade de precipitação, especialmente em casos de chuvas severas (Benevides *et al.*, 2015). No entanto, observou-se que alguns saltos ou protuberâncias em altos valores de ZTD/IWV nem sempre resultaram em precipitação, indicando a necessidade de considerar a combinação de dados GNSS com outras variáveis atmosféricas e metodologias alternativas para reduzir a incidência de falsos alarmes (Benevides *et al.*, 2019).

A expansão das redes GNSS (Adams *et al.*, 2013, 2015) nas localidades estudadas poderá ampliar essas regiões com uma fonte de informações adicionais para o aprimoramento do conhecimento dos sistemas pretéritos e no monitoramento em tempo quase real do vapor d'água e suas variações, auxiliando na prevenção de chuvas severas e consequentes desmoronamentos, enchentes e alagamentos. A inclusão de equipamentos de recepção de dados de GNSS de baixo custo (Barindelli *et al.*, 2018; Stępniaik; Paziewski, 2022) pode ser agregada às redes convencionais, multiplicando os benefícios da aplicação de dados de GNSS meteorologia. A utilização de técnicas avançadas, como a tomografia troposférica para obter perfis verticais de refratividade, pode fornecer insights adicionais sobre os processos atmosféricos envolvidos (Song *et al.*, 2006; Champollion *et al.*, 2005; Champollion *et al.*, 2009; Adams *et al.*, 2011; Van Baelen *et al.*, 2011).

Os resultados obtidos neste trabalho constituem uma metodologia simples para a análise de dados de GNSS meteorologia e observações visuais, em que foram introduzidas as configurações de semissenóides e protuberâncias de ZTD e IWV no Rio de Janeiro, além da identificação de saltos nas curvas de ZTD em Belém, todos associados a precipitações intensas.

Recomenda-se que os dados de GNSS meteorologia disponíveis da RBMC, do iGMAS e de novos equipamentos que possam ser instalados sejam amplamente utilizados tanto pelas comunidades locais quanto em outras regiões. A expansão dessas análises para períodos mais longos é essencial para identificar as configurações propostas nas curvas de ZTD e IWV e definir limiares críticos de ZTD e IWV, bem como as taxas de variação desses parâmetros, podem ser úteis no monitoramento em tempo quase real e na meteorologia observacional. No entanto, análises mais complexas e elaboradas podem ser aplicadas para fornecer resultados mais robustos na previsão de eventos de precipitação severa, conforme sugerido por Sapucci *et al.* (2019). Essas abordagens são de extrema importância para o aprimoramento da aplicação do GNSS meteorologia nas rotinas de análise e previsão meteorológica.

5.2 Conclusões

Este estudo utilizou dados de GNSS meteorologia das estações do iGMAS e da RBMC para investigar as relações entre as variáveis úmidas ZTD e IWV e os eventos de chuvas intensas que afetaram as cidades do Rio de Janeiro e Belém. Através da análise de séries temporais de composições de ZTD/IWV no Rio de Janeiro, foram identificadas rampas quase lineares seguidas de rampas não lineares, com as maiores taxas de variação e os picos de ZTD/IWV ocorrendo, respectivamente, 1–2 horas e 0,5 hora antes dos máximos de precipitação, que foram predominantes entre 18:00 e 00:00 HL.

No Rio de Janeiro, foram analisados nove estudos de caso de chuvas intensas durante a estação chuvosa, identificando-se configurações nas curvas de ZTD/IWV, como: (i) ondulações nomeadas ‘semisenóides assimétricas’, com duração de 3–5 horas, formadas pelo rápido crescimento vespertino nas rampas não lineares a partir de baixos valores de ZTD (IWV), com uma taxa de variação média no ponto de inflexão de +11 (1,4) mm [15min]⁻¹ que precedeu o máximo de ZTD (IWV) entre 30–60 minutos, com as chuvas mais intensas ocorrendo entre 15–45 minutos após o máximo de ZTD (IWV); (ii) um salto de ZTD (IWV) com uma taxa de variação média de +17,3 (+2,66) mm [15min]⁻¹ e máxima de +21,3 (+3,33) mm [15min]⁻¹, com as chuvas mais intensas também ocorrendo entre 15–45 minutos após o máximo de ZTD (IWV); (iii) rampas alongadas e ondulações nomeadas ‘protuberâncias’ sequenciais escalonadas nas rampas ascendentes com duração de 1–2 horas, com as chuvas mais intensas ocorrendo próximas aos altos valores de ZTD (IWV) e nas rampas descendentes; e (iv) ‘protuberâncias’ ou rampas ascendentes nos valores de ZTD (IWV) já elevados pela atuação de sistemas meteorológicos com grande aumento da umidade atmosférica como a ZCOU ou a ZCAS.

A análise dos dados de precipitação das estações meteorológicas do ITV (ITV-UFPA) e do INMET (INBE) na região de Belém, entre novembro de 2015 e dezembro de 2018, revelou um ciclo diurno bem definido, com picos de precipitação majoritariamente no período vespertino, ocorrendo entre 15:00 e 16:00 HL em ambos os conjuntos de dados. O intervalo das 14:00 às 16:00 HL foi o mais frequente para a máxima precipitação nas médias trimestrais, exceto no trimestre de JJA, quando os picos se deslocaram para o período das 16:00 às 19:00 HL. Os picos de precipitação horária na estação ITV-UFPA foram cerca de 63% do registrado na estação INBE, e a precipitação anual média na estação ITV-UFPA correspondeu a 82% dos 3185 mm observados na estação

INBE. Essa diferença pode refletir variações nas condições meteorológicas e geográficas entre as duas estações, que devem ser melhor investigadas.

A análise das Tbs dos topos das nuvens, capturadas no canal IR entre 2000 e 2015, mostrou que a RMBE apresenta, nas médias totais, Tbs mais baixas nas áreas ao sul e oeste, em comparação com os setores norte e leste. A estação ITV-UFPA, localizada ao sul de Belém, está situada numa grade com Tbs ligeiramente mais baixas do que a grade da estação INBE. O ciclo diurno sazonal médio das Tbs revelou um leve deslocamento temporal entre as grades das estações ITV-UFPA e INBE. Esse padrão pode estar associado ao deslocamento médio de nordeste de bandas convectivas formadas paralelas à linha costeira, que atingem Belém no período da tarde, contribuindo para os picos de precipitação convectiva.

Observou-se também uma forte correlação entre altos valores de ZTD e eventos de chuvas intensas na RMBE. Os elevados valores de ZTD nas estações BELE, BEPA e LPGS indicaram uma atmosfera úmida, característica das regiões equatoriais. A diferença média de ZTD ao NMM entre as estações BEPA e BELE foi de 2 a 3 mm, enquanto entre LPGS e BELE foi de 25 mm.

Nos sete estudos de caso em Belém, foram analisados eventos com grandes volumes de precipitação, resultando na elevação dos níveis dos rios, igarapés e canais, alagamentos de vias e diversos outros transtornos à população. Durante os eventos ocorrentes na fase da Lua Cheia, o volume de precipitação e a elevação dos níveis dos corpos d'água foram ainda maiores, causando mais transtornos em comparação com outras fases. Três dos sete eventos ocorreram durante a estação menos chuvosa, com precipitação com pelo menos uma hora na categoria muito-forte, provenientes de SCMs, e de todas as categorias de precipitação durante várias horas na estação chuvosa, sob a principal influência da ZCIT. Foram utilizados dados de ZTD de três estações de GNSS e dados de três estações meteorológicas. Em todos os casos, as curvas de ZTD apresentaram variações não lineares antes e depois dos eventos de precipitação significativa. Quando se aproximavam dos eventos, as curvas de ZTD se organizavam em rampas ascendentes quase lineares com rápido crescimento, seguidas por picos e rampas descendentes, semelhantes aos 'saltos nas curvas de PWV' observados em estudos prévios. Os saltos de ZTD precediam o início das precipitações intensas ou, no caso de ocorrência de várias horas de precipitação, havia múltiplos saltos de ZTD que precediam ou ocorriam em meio aos picos da chuva acumulada.

A análise integrada de precipitação, ZTD e Tbs do topo das nuvens na região de Belém e arredores destacou a complexidade das interações entre os fatores meteorológicos e geográficos

que influenciam a precipitação. As elevações nos valores de ZTD são bons indicadores antecedentes de chuvas intensas, enquanto as Tbs do topo das nuvens podem ratificar a presença de nuvens convectivas profundas que contribuem para a intensidade dos eventos. Estudos adicionais, considerando variáveis sinóticas e locais, podem aprimorar a previsão de chuvas severas na região.

Ademais, a análise temporal mostrou que os picos de ZTD/IWV muitas vezes alinham-se com o início ou o pico da precipitação. Em alguns estudos de caso, observou-se como os máximos de ZTD/IWV no Rio de Janeiro e de ZTD em Belém não apenas sugeriram uma acumulação de umidade, mas também indicaram um possível mecanismo gatilho para a precipitação subsequente.

No entanto, as pesquisas conduzidas neste trabalho para as cidades de Belém e Rio de Janeiro revelaram que as curvas de ZTD/IWV podem também apresentar semissenóides, protuberâncias ou saltos em altos valores de ZTD/IWV sem resultar em precipitação, evidenciando a ocorrência de falsos alarmes. Portanto, recomenda-se a inclusão de equipamentos de recepção de dados de GNSS de baixo custo às redes convencionais, multiplicando os benefícios da aplicação de dados de GNSS meteorologia. Esses dados podem ser integrados a outros dados de sensoriamento remoto, como produtos de radar meteorológico e temperaturas de brilho nos canais infravermelho e de micro-ondas, para estudos mais detalhados, por exemplo, de composições das variáveis de sistemas em dias convectivos e não convectivos.

Recomenda-se também a instalação de uma estação meteorológica próxima a cada estação de GNSS, equipada com pelo menos os instrumentos para medir precipitação, pressão, temperatura e umidade relativa, com resolução temporal de 5 minutos. Isso permitirá o monitoramento e análise simultânea dos sistemas meteorológicos e suas fases, bem como das variações temporais dos parâmetros em cada localidade com mais detalhes.

A expansão das análises para períodos mais longos é essencial para a identificação das configurações importantes nas curvas de ZTD e IWV e os parâmetros de superfície. Isso facilitará a definição de limiares críticos desses parâmetros e suas relações com variáveis meteorológicas durante eventos extremos de precipitação.

Além disso, análises mais complexas podem fornecer resultados robustos na previsão de eventos de precipitação severa, conforme sugerido por estudos anteriores. Técnicas avançadas, como a tomografia troposférica, podem fornecer insights adicionais sobre os processos atmosféricos envolvidos.

Essas estratégias são essenciais para aprimorar o monitoramento e a previsão de eventos de precipitação extrema, com o objetivo de prevenir e mitigar os impactos de fenômenos meteorológicos adversos. Além de garantir a segurança e o bem-estar das comunidades afetadas, elas também fornecem suporte aos poderes constituídos na melhoria da infraestrutura das cidades sujeitas a eventos meteorológicos extremos.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, D.K.; FERNANDES, R.M.S.; MAIA, J.M.F. GNSS precipitable water vapor from an Amazonian rain forest flux tower. **J. Atmos. Ocean. Technol.**, v. 28, n. 10, p. 1192–1198, 2011. doi: 10.1175/jtech-d-11-00082.1.
- ADAMS, D.K.; FERNANDES, R.M.S.; KURSINSKI, E.R.; MAIA, J.M.; SAPUCCI, L.F.; MACHADO, L.A.T.; VITORELLO, I.; MONICO, J.F.G.; HOLUB, K.L.; GUTMAN, S.I.; FILIZOLA, N.; BENNETT, R. A dense GNSS meteorological network for observing deep convection in the Amazon. **Atmos. Sci. Lett.**, v. 12, n. 2, p. 207–212, 2011. doi: 10.1002/asl.312.
- ADAMS, D.K.; FERNANDES, R.M.S.; HOLUB, K.L.; GUTMAN, S.I.; BARBOSA, H.M.J.; MACHADO, L.A.T.; CALHEIROS, A.J.P.; BENNETT, R.A.; KURSINSKI, E.R.; SAPUCCI, L.F.; DEMETS, C.; CHAGAS, G.; ARELLANO, A.; FILIZOLA, N.; AMORIM, A.; ARAUJO, R.; ASSUNCAO, L.; CIRINO, G.; PAULIQUEVIS, T.; PORTELA, B.; SA, A.; SOUSA, J.; TANAKA, L. The Amazon dense GNSS meteorological network: A New Approach for Examining Water Vapor and Deep Convection Interactions in the Tropics. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 96, n. 12, p. 2151–2165, 2015. doi: 10.1175/bams-d-13-00171.1.
- ADAMS, D.K.; GUTMAN, S.I.; HOLUB, K.L.; PEREIRA, D.S. GNSS observations of deep convective time scales in the Amazon. **Geophys. Res. Lett.**, v. 40, n. 11, p. 2818–2823, 2013. doi: 10.1002/grl.50573.
- ÁGUAS de março castigam Belém com mais de 11 horas de chuva. **DOL**, 2020. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/para/576846/aguas-de-marco-castigam-belem-com-mais-de-11-horas-de-chuva?d=1>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C.; GONÇALVES, J. E. Eventos extremos de precipitação no litoral do Paraná (Baía de Paranaguá). **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 563–575, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-7786354040>.
- ANDRADE, F.M. **Influências remotas na previsibilidade, estrutura e ciclo de vida da Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 2011. Dissertação (Mestrado) - INPE-02.24.21.46-TDI, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/398H4P8>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- ARAÚJO JÚNIOR, A.C.R. Geomorfologia urbana e planejamento ambiental na cidade de Belém-PA. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 8, 2013, Rio de Janeiro-RJ. **Anais [...]**. Belo Horizonte-MG: ANPUR, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2013.
- ASKNE, J.; NORDIUS, H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. **Radio Sci.**, v. 22, n. 3, p. 379–386, 1987. doi: 10.1029/rs022i003p00379.

- AVELAR, A.S.; COELHO NETTO, A.L.; LACERDA, W.A.; BECKER, L.B.; MENDONÇA, M.B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. *In: MARGOTTINI, C., CANUTI, P., SASSA, K. (eds.). **Landslide science and practice***. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2013. p. 265-270. (Global Environmental Change, v. 4). doi: 10.1007/978-3-642-31337-0-34.
- BALDYSZ, Z.; NYKIEL, G.; BARANOWSKI, D.B.; LATOS, B.; FIGURSKI, M. Diurnal variability of atmospheric water vapour, precipitation and cloud top temperature across the global tropics derived from satellite observations and GNSS technique. **Clim. Dyn.**, v. 62, n. 3, p. 1965–1982, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-07005-0>.
- BARCELLOS, D.R.; QUADRO, M.F.L. Classificação de eventos extremos de precipitação quanto sua intensidade, persistência e abrangência na região das ZCAS. **Metodol. e Aprendizado**, v. 2, p. 76–81, 2019. doi: 10.21166/metapre.v2i0.1320.
- BARCELLOS, P.C. **Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: probabilidade e previsibilidade**. 2009. 209f. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- BARINDELLI, S.; REALINI, E.; VENUTI, G.; FERMI, A.; GATTI, A. Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers. **Earth, Planets and Space**, v. 70, n. 28, p. 1-18, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0795-7>.
- BASTOS, T.X.; PACHECO, N.A.; NECHET, D.; SÁ, T.D.A. Aspectos climáticos de Belém nos últimos cem anos. **Boletim da Pesquisa e Desenvolvimento**, Belém-Pará, EMBRAPA-CPATU, 2002. (Documentos, 128). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/389773>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- BENEVIDES, P.; CATALÃO, J.; MIRANDA, P. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 12, p. 2605–2616, 2015. <https://doi.org/10.5194/NHESS-15-2605-2015>.
- BENEVIDES, P.; CATALÃO, J.; MIRANDA, P.; CHINITA, M. Analysis of the relation between GPS tropospheric delay and intense precipitation. *In: REMOTE SENSING OF CLOUDS AND THE ATMOSPHERE, 18; e OPTICS IN ATMOSPHERIC PROPAGATION AND ADAPTIVE SYSTEMS, 16, 2013, Dresden, Germany. **Proceedings [...]***. Bellingham, Washington, EUA: The International Society for Optical Engineering – SPIE, v. 8890, 2013. 10.1117/12.2028732.
- BENEVIDES, P.; CATALAO, J.; NICO, G. Neural network approach to forecast hourly intense rainfall using GNSS precipitable water vapor and meteorological sensors. **Remote Sens.**, v. 11, n. 8, 966, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11080966>.
- BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T.A.; ROCKEN, C.; ANTHES, R.A.; WARE, R.H. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. **J. Geophys. Res.**, v. 97, n. D14, 15787–15801, 1992. doi: 10.1029/92jd01517.

- BIANCHI, C.E.; MENDOZA, L.P.O.; FERNÁNDEZ, L.I.; NATALI, M.P.; MEZA, A.M.; MOIRANO, J.F. Multi-year GNSS monitoring of atmospheric IWV over Central and South America for climate studies. **Ann. Geophys.**, v. 34, n. 7, p. 623–639, 2016. doi: 10.5194/angeo-34-623-2016.
- BOCK, O.; WILLIS, P.; WANG, J.; MEARS, C. A high-quality, homogenized, global, long-term (1993–2008) DORIS precipitable water data set for climate monitoring and model verification. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 119, n. 12, p. 7209–7230, 2014. doi: 10.1002/2013jd021124.
- BOCK, O.; BOSSER, P.; PACIONE, R.; NURET, M.; FOURRIÉ, N.; PARRACHO, A. A high-quality reprocessed ground-based GPS dataset for atmospheric process studies, radiosonde and model evaluation, and reanalysis of HyMeX Special Observing Period. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 142, n. S1, p. 56–71, 2016. doi: 10.1002/qj.2701.
- BOCK, O. *et al.* Use of GNSS tropospheric products for climate monitoring (Working Group 3). In: JONES, J., *et al.* **Advanced GNSS Tropospheric Products for Monitoring Severe Weather Events and Climate**. Springer, 2020. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13901-8_5.
- BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 111, n. B2, 2006. doi: 10.1029/2005jb003629.
- BONAFONI, S.; BIONDI, R.; BRENOT, H.; ANTHES, R. Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events: A review. **Atmospheric Research**, v. 230, p. 104624, 2019, ISSN 0169–8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104624>.
- BUEHLER, S.A.; ÖSTMAN, S.; MELSHEIMER, C.; HOLL, G.; ELIASSON, S.; JOHN, V.O.; BLUMENSTOCK, T.; HASE, F.; ELGERED, G.; RAFFALSKI, U.; NASUNO, T.; SATOH, M.; MILZ, M.; MENDROK, J. A multi-instrument comparison of integrated water vapour measurements at a high latitude site. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 12, n. 22, p. 10925–10943, 2012. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10925-2012>.
- CALVELLO, M.; PICIULLO, L. Assessing the performance of regional landslide early warning models: the EDuMaP method. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 16, n. 1, p. 103–122, 2016. doi: 10.5194/nhess-16-103-2016.
- CAMPOS, T.B.; MOTA, M.A.S.; SANTOS, S.R.Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 1, p. 182–194, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1433>.
- CAMPOS, T.B.; SAPUCCI, L.F.; EICHHOLZ, C.; MACHADO, L.A.T.; ADAMS, D.K. The Sensitivity of GPS precipitable water vapor jumps to intense precipitation associated with tropical organized convective systems. **Atmosphere**, v. 14, n. 2, p. 262, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14020262>.

CARVALHO, J.R.P.; ASSAD, E.D.; OLIVEIRA, A.F.; PINTO, H.S. Annual maximum daily rainfall trends in the Midwest, Southeast and Southern Brazil in the last 71 years. **Weather and Climate Extremes**, v. 5-6, p. 7–15, 2014. doi: 10.1016/j.wace.2014.10.001.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in Southeastern America and largescale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2).

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2).

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). **Riscos geo-hidrológicos**. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos/>. Acesso em: 27 nov. 2019.

CHAMPOLLION, C.; FLAMANT, C.; BOCK, O.; MASSON, F.; TURNER, D. D.; WECKWERTH, T. Mesoscale GPS tomography applied to the 12 June 2002 convective initiation event of IHOP_2002. **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 135, n. 640, p. 645–662, 2009. 10.1002/qj.386.

CHAMPOLLION, C.; MASSON, F.; VAN BAELEN, J.; WALPERSDORF, A.; CHÉRY, J.; DOERFLINGER, E. GPS monitoring of the tropospheric water vapor distribution and variation during the 9 September 2002 torrential precipitation episode in the Cévennes (southern France). **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 109, n. D24, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004897>.

CHAMPOLLION, C.; MASSON, F.; BOUIN, M. N.; WALPERSDORF, A.; DOERFLINGER, E.; BOCK, O.; VAN BAELEN, J. GPS water vapour tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment. **Atmos. Res.**, v. 74, n. 1–4, p. 253–274, 2005. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2004.04.003>.

CHEN, G.; HERRING, T.A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 102, n. B9, p. 20489–20502, 1997. doi: 10.1029/97jb01739.

CHUVA causa alagamentos em Belém na tarde deste domingo, 6: Bairros do Marco e São Brás foram os mais afetados. Algumas ruas ficaram completamente alagadas. **G1 PA**, Belém, 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/chuva-causa-alagamentos-em-belem-na-tarde-deste-domingo-6.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CLIMATEMPO. **Chuva de 8 e 9 de abril bate recorde histórico no Rio de Janeiro**. 2019a. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2019/04/09/chuva-de-8-e-9-de-abril-bate-recorde-historico-no-rio-de-janeiro-3797>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CLIMATEMPO. **Mais chuva para a região de Belém.** 2019b. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2019/06/11/mais-chuva-para-regiao-de-belem-5565>. Acesso em: 25 nov. 2019.

COELHO NETTO, A.L.; SATO, A.D.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.A.; SILVA, R.P. January 2011: The extreme landslide disaster in Brazil. *In*: MARGOTTINI, C., CANUTI, P., SASSA, K. (eds.). **Landslide science and practice**. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2013. p. 377–384. (Risk Assessment, Management and Mitigation, v. 6). doi: 10.1007/978-3-642-31319-6_51.

COHEN, J.C.P.; SILVA DIAS, M.A.F.; NOBRE, C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 11, p. 3163–3174, 1995. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2).

COSTA, H. **Enchentes no estado Rio de Janeiro** – uma abordagem geral. Rio de Janeiro: Semads, 2001, 160f.

D'ORSI, R.N.; PAES, N.M.; MAGALHÃES, M.A.; SILVA JUNIOR, L.R.; VALENTE, L.R.S. **Os 50 maiores acidentes geológico-geotécnicos na cidade do Rio de Janeiro entre 1966 e 2016.** Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro Diretoria de Estudos e Projetos Gerência de Programas Especiais 2016, 110f. Disponível em: http://www.sistema-alerta-rio.com.br/wp-content/uploads/2016/12/PDF_ESTRUTURA-DO-LIVRETO_50-MAIORES-ACIDENTES-A5.pdf. Acesso em: 25 nov. 2019.

DACH, R.; LUTZ, S.; WALSER, P.; FRIDEZ, P. (ed.). **Bernese GNSS software version 5.2; user manual**; Bern, Switzerland: Astronomical Institute, University of Bern: 2015.

DANIELSON, J.J.; GESCH, D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010). *In*: OPEN-FILE REPORT; **US Geological Survey**: Reston, VA, USA, 2011; doi: 10.3133/ofr20111073.

DAVIS, J.L.; HERRING, T.A.; SHAPIRO, I.I.; ROGERS, A.E.E.; ELGERED, G. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio Sci.**, v. 20, n. 6, p. 1593–1607, 1985. doi: 10.1029/rs020i006p01593.

DERECZYNSKI, C.P.; CALADO, R.N.; BODSTEIN, A. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 40, n. 2, p. 17–30, 2017. doi: 10.11137/2017_2_17_30.

DERECZYNSKI, C.P.; OLIVEIRA, J.S.D.; MACHADO, C.O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 24, n. 1, p. 24–38, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>.

DOURADO, F.; ARRAES, T.C.; SILVA, M.F. O megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro: as causas do evento, os mecanismos dos movimentos de massa e a distribuição espacial dos investimentos de reconstrução no pós-desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 35, n. 2, p. 43-54, 2013. https://doi.org/10.11137/2012_2_43_54.

FERREIRA, F.P.M.; CUNHA, S.B. Enchentes no Rio de Janeiro: Efeitos da urbanização no Rio Grande (Arroio Fundo)-Jacarepaguá. **Anu. Inst. Geociências**, v. 19, p. 79–92, 1996. https://doi.org/10.11137/1996_0_79-92.

FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitation distribution over Central and Western tropical South America. **Climanálise**, v. 5, n. 6, p. 36–44, 1990.

FORTE chuva provoca alagamento em Belém. **DOL**, 2018. Disponível em: <https://rbatv.dol.com.br/forte-chuva-provoca-alagamento-em-belem/>. Acesso em: 25 nov. 2019.

FORTES, L.P.S. Status of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC). *In*: BEUTLER, G., MELBOURNE, W.G., HEIN, G.W., SEEGER, G. (eds.). **GPS trends in precise terrestrial, airborne, and spaceborne applications**. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 1996. p. 85–88. (International Association of Geodesy Symposia, v. 115). doi: 10.1007/978-3-642-80133-4_13.

FORTES, L.P.S.; LUZ, R.T.; PEREIRA, K.D.; COSTA, S.M.A.; BLITZKOW, D. The Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC): operation and products. *In*: BRUNNER, F.K. (ed.). **Advances in positioning and reference frames**. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 1998. p. 73–78. (International Association of Geodesy Symposia, v. 118). doi: 10.1007/978-3-662-03714-0_11.

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

GRECO, S. *et al.* Amazon coastal squall lines, Part 2. Heat and moisture transports. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 4, p. 623–635, 1994.

HASTENRATH, S; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, n. 435, p. 77–92, 1977.

HASTENRATH, S.; LAMB, P. **Climatic atlas of the tropical Atlantic and Eastern Pacific oceans**. [Wisconsin]: University of Wisconsin Press, 1977, 177f.

HOFFMAN, J.A.J. **Climatic atlas of South America**. Geneva: Avenue Giuseppe-Motta, 1975. (WMO, 41).

HUELSING, H.K.; WANG, J.; MEARS, C.; BRAUN, J.J. Precipitable water characteristics during the 2013 Colorado flood using ground-based GPS measurements. **Atmos. Meas. Tech.**, v. 10, n. 11, p. 4055–4066, 2017. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4055-2017>.

IMAGENS mostram magnitude da chuva e dos estragos em Belém. **DOL**, 2018. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/para/noticia-506384-imagens-mostram-magnitude-da-chuva-e-dos-estragos-em-belem.html?d=1>. Acesso em: 25 nov. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **RBMC-Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>. Acesso em: 9 August 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Serviços para posicionamento geodésico**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico.html>. Acesso em: 9 set. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Avisos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: 27 nov. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil: Período 1991–2020**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 8 jul. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Nota Meteorológica: Fortes Chuvas Atingem Belém - Pa. 2020**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/fortes-chuvas-atingem-bel%C3%A9m-pa>. Acesso em: 22 nov. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Principais condições meteorológicas do clima e do tempo observadas em 2018**. 2018. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Condicoes-Meteorologicas-Tempo-Clima-Observadas-2018-INMET.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **ZCAS provoca muita chuva no Nordeste do Brasil!** Previsão para HOJE (04/11/2022). 2022. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=DAjxScAOpuo>. Acesso em: 27 jun. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DAS). **Banco de dados de imagens**. Disponível em: <https://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes/formulario.logic>. Acesso em: 27 jun. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Avisos meteorológicos vigentes para o Brasil**. 2019a. Disponível em: <https://tempo.cptec.inpe.br/avisos/>. Acesso em: 27 nov. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade: Previsão de Tempo 09/04/2019 - ZCOU provoca pancadas de chuva em parte do País**. 2019b. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=r9KGk20BXrM>. Acesso em: 27 dez. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade: Previsão de Tempo para os dias 12 e 13 de dezembro de 2016**. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JmupJv-CKUE>. Acesso em: 27 dez. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade:** Previsão do Tempo 20/11/2017 - ZCAS continua sua atuação em parte do País. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=btzpValXvsk>. Acesso em: 27 dez. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade:** Previsão do Tempo 04/02/2018 - ZCAS continua atuando em grande parte do País. 2018a. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=YpVILN74_HU. Acesso em: 27 jun. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade:** Previsão do Tempo 06/04/2018 - ZCOU segue atuando com pancadas de chuva em partes do País. 2018b. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=yp_FuD1IKNM. Acesso em: 27 jun. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão de tempo a serviço da sociedade:** Previsão de tempo 07/03/2020 - Pancadas de chuva no centro-norte do País. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=49iLEXVvImc>. Acesso em: 27 jun. 2024.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION-ICAO. **Manual of the ICAO Standard Atmosphere** (Extended to 80 Kilometres (262,500 Feet). Montreal, QC, Canada, 1993.

IWABUCHI, T.; MIYAZAKI, S.I.; HEKI, K.; NAITO, I.; HATANAKA, Y. An impact of estimating tropospheric delay gradients on tropospheric delay estimations in the summer using the Japanese nationwide GPS array. **J. Geophys. Res.**, v. 108, n. D10, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JD002214>.

JANOWIAK, J. E.; JOYCE, R. J.; YAROSH, Y. A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 82, n. 2, p. 205–218, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0205:ARTGHH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0205:ARTGHH>2.3.CO;2).

JARLEMARK, P.; EMARDSON, R.; JOHANSSON, J.; ELGERED, G. Ground-based GPS for validation of climate models: The impact of satellite antenna phase center variations. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 48, n. 10, p. 3847–3854, 2010. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2049114>.

JIN, S.; LUO, O.; GLEASON, S. Characterization of diurnal cycles in ZTD from a decade of global GPS observations. **Journal of Geodesy**, v. 83, n. 6, p. 537–545, 2009. <https://doi.org/10.1007/S00190-008-0264-3>.

KIKUCHI, K.; WANG, B. Diurnal precipitation regimes in the global tropics. **Journal of Climate**, v. 21, n. 11, p. 2680–2696, 2008. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2051.1>.

KING, M.A.; WATSON, C.S. Long GPS coordinate time series: Multipath and geometry effects. **J. Geophys. Res.**, v. 115, n. B4, 2010. doi: 10.1029/2009JB00654.

KODAMA, Y.M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992. doi: 10.2151/jmsj1965.70.4_813.

KODAMA, Y.M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the circulations for generating STCZs. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 71, n. 5, p. 581–610, 1993. doi: 10.2151/jmsj1965.71.5_581

KOUSKY, V.E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, v. 108, n. 4, p. 488–498, 1980. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2).

KOUSKY, V.E.; CAVALCANTI, I.F.A. Precipitation and atmospheric circulation anomaly patterns in the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 199–206, 1988.

LABORATÓRIO DE HIDROLOGIA E ESTUDOS DE MEIO AMBIENTE DA COPPE/UFRJ. Vulnerabilidade a Eventos Críticos. Elaboração do plano estadual de recursos hídricos do estado Rio de Janeiro. **Temas Técnicos Estratégicos**, v. 1, 2001, Rio de Janeiro. Disponível online: <http://www.agevap.org.br/downloads/Diagnostico-Vulnerabilidades-VoII-Corpo.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2019.

LEGATES, D.R. **A climatology of global precipitation**. [Delaware]: University of Delaware, 1987. 85f. (Publications in Climatology, v. 40, n. 1).

LEGATES, D. R.; WILLMOTT, C.J. Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. **Int. J. Climatol.**, v. 10, n. 2, p. 111–127, 1990. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3370100202>.

LI, G.; DENG, J. Atmospheric water monitoring by using ground-based GPS during heavy rains produced by TPV and SWV. **Advances in Meteorology**, v. 2013, n. 1, p. 1-12, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/793957>.

LI, H.; WANG, X.; WU, S.; ZHANG, K.; CHEN, X.; QIU, C.; ZHANG, S.; ZHANG, J.; XIE, M.; LI, L. Development of an improved model for prediction of short-term heavy precipitation based on GNSS-derived PWV. **Remote. Sens.**, v. 12, n. 24, 4101, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12244101>.

LI, W.; YUAN, Y.B.; OU, J.K.; LI, H.; LI, Z.S. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications. **Chin. Sci. Bull.**, v. 57, n. 17, p. 2132–2139, 2012. doi: 10.1007/s11434-012-5010-9.

LIMA, S.; ARMOND, N. Rainfall in Metropolitan Region of Rio de Janeiro: characterization, extreme events, and trends. **Sociedade & Natureza**, v. 34, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64770>.

LOPEZ, M.C.S.; PINAYA, J.L.D.; PEREIRA FILHO, A.J.; VEMADO, F.; REIS, F.A.G.V. Analysis of extreme precipitation events in the mountainous region of Rio de Janeiro, Brazil. **Climate**, v. 11, n. 73, 2023. <https://doi.org/10.3390/cli11030073>.

LOU, Y.; HUANG, J.; ZHANG, W.; LIANG, H.; ZHENG, F.; LIU, J. A New zenith tropospheric delay grid product for real-time PPP applications over China. **Sensors**, v. 18, n. 65, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18010065>.

MARCO ainda está alagado após fortes chuvas desta segunda: áreas com inundações críticas sofrem esta manhã: vizinhanças reclamam da constância do problema. **O Liberal**, 2019. Disponível em: <https://www.oliberal.com/belem/marco-ainda-est%C3%A1-alagado-ap%C3%B3s-fortes-chuvas-desta-segunda-1.158973>. Acesso em: 25 nov. 2019.

MORAES, D.S.; FRANCISCO FILHO, M. Contribuição das chuvas do período da tarde em Belém do Pará para os totais mensais e possíveis relações com a média climatológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 23, ago. 2018. ISSN 2237-8642. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/58364>. Acesso em: 22 nov. 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.58364>.

MOREIRA, F.S.A.; DIAS, G.F.M.; VITORINO, M.I.; SILVA, J.C.C. Efeitos da precipitação e topografia para o risco de inundações na cidade de Belém-PA. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 2716–2728, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.7.p2716-2728>.

MOTA, G.V. **Characteristics of rainfall and precipitation features defined by the tropical rainfall measuring mission over South America**. 2003. 194f. Tese (Doutorado) - The University of Utah, Salt Lake City, UT, 2003.

MOTA, G.V.; SONG, S.; STEPNIAK, K. Assessment of integrated water vapor estimates from the iGMAS and the Brazilian network GNSS ground-based receivers in Rio de Janeiro. **Remote Sens.** v.11, e2652, 2019. doi: 10.3390/rs11222652.

NECHET, D. Análise da precipitação em Belém-PA, de 1896 a 1991. **Boletim de Geografia Teórica**, Rio Claro, SP, v. 23, n. 45–46, p. 150–156, 1993.

NECHET, D. Variabilidade diurna de precipitação e de trovoadas em Macapá-AP. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, 1994, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1994a.

NECHET, D. Dias de trovoadas na Amazônia. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, 1994, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1994b.

NECHET, D. Variabilidade diurna da precipitação em Belém-PA. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 3, 1984, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1984, p. 204–211.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE; Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989, 421f.

NING, T.; ELGERED, G.; JOHANSSON, J.M. The impact of microwave absorber and radome geometries on GNSS measurements of station coordinates and atmospheric water vapour. **Adv. Space Res.**, v. 47, n. 2, p. 186–196, 2011. doi: 10.1016/j.asr.2010.06.023.

NING, T.; HAAS, R.; ELGERED, G.; WILLÉN, U. Multi-technique comparisons of 10 years of wet delay estimates on the west coast of Sweden. **J. Geod.**, v. 86, n. 7, p. 565–575, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0527-2>.

OLIVEIRA, M.C.F.; SOUZA JÚNIOR, J.A.; CRUZ, P.P.N.; SOUZA FILHO, J.D. Climatologia urbana da cidade de Belém-Pará, através das precipitações e temperaturas do ar, das normais climatológicas de 1941 a 1970, 1971 a 2000 e da normal provisória de 2001 a 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 803–819, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160054>.

PICIULLO, L.; CALVELLO, M.; CEPEDA, J.M. Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. **Earth-Sci. Rev.**, v. 179, p. 228–247, 2018. doi: 10.1016/j.earscirev.2018.02.013.

PINHEIRO, H.R.; ANDRADE, K.M.; MOURA, C.W. A maior catástrofe climática do Brasil sob a visão operacional do CPTEC/INPE. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4, 2011, João Pessoa-PB. **Anais [...]**. Rio de Janeiro-RJ: Sociedade Brasileira de Meteorologia-SBMET, 16–19 out. 2011. Disponível em: http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2011/11.23.16.17/doc/Pinheiro_A%20maior.pdf. Acesso em: 25 nov. 2019.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. Sistema Alerta Rio. **Dados pluviométricos**. Disponível em: <https://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/>. Acesso em: 25 nov. 2023.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. Sistema Alerta Rio. **Relatório anual de chuva para a cidade do Rio de Janeiro no ano de 2019**. Disponível em: http://www.sistema-alerta-rio.com.br/wp-content/uploads/2020/08/RELATORIO_ANUAL_CHUVA_2019.pdf. Acesso em: 25 nov. 2020.

PRIEGO, E.; JONES, J.; PORRES, M.J.; SECO, A. Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish mediterranean area. Geomatics, **Nat. Hazards Risk**, v. 8, n. 2, p. 282–294, 2017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1201150>.

PRISTO, M.V.J.; DERECZYNSKI, C.P.; SOUZA, P.R.; MENEZES, W.F. Climatologia de chuvas intensas no município do Rio de Janeiro. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 33, n. 4, p. 615–630, 2018. doi:10.1590/0102-7786334005.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de zonas de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. 123f. Dissertação (Mestrado) - INPE-6341-TDI/593, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

REBELO, M.S.; SOUZA, E.B.; LOBATO, R.R.C.; GOMES, D.J.C. Variabilidade espaço-temporal dos regimes pluviométricos sazonais na RMBE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. 2345–2359, 2023. 10.26848/rbgf.v16.5.p2345-2359.

REBOITA, M.S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didactica**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012. doi: 10.20396/td.v8i1.8637425.

ROHM, W.; YUAN, Y.; BIADEGLGNE, B.; ZHANG, K.; MARSHALL, J. Ground-based GNSS ZTD/IWV estimation system for numerical weather prediction in challenging weather conditions. **Atmospheric Research**, v. 138, p. 414–426, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.026>.

RUAS de Belém alagam após chuva na manhã desta quinta (3): Apesar de rápida, chuva foi suficiente para inundar vias e provocar transtornos a motoristas e pedestres. **DOL**, 2022. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/transito/779452/ruas-de-belem-alagam-apos-chuva-na-manha-desta-quinta-3?d=1>. Acesso em: 22 nov. 2022.

RÜEGER, J.M. Refractive index formulae for electronic distance measurements with radio and millimetre waves. **Unisurv Rep. S-68**, v. 109, p. 758–766, 2002. University of New South Wales, Sydney, Australia. School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, UNSW SYDNEY NSW 2052, Australia.

SAASTAMOINEN, J. Atmospheric correction for troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. In: THE USE OF ARTIFICIAL SATELLITES FOR GEODESY; **Geophysics Monograph Series**; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, v. 15, p. 247–251, 1972. doi: 10.1029/GM015p0247.

SANTOS, A.R.A. **Análise das tendências da chuva e das temperaturas extremas na região de Belém (PA)**. 1993. 124f. Dissertação (Mestrado) – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993. Disponível em: <http://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde-20181127-155546/>. Acesso em: 21 jul. 2023.

SAPUCCI, L. F.; SCHUBERT, D. V. S. Assimilação de produtos GNSS-meteorologia no LETKF: ZTD ou IWV Qual a Melhor Opção? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 3, 2012, UNESP, Presidente Prudente-SP. **Anais [...]**. Curitiba-PR: Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 25–27 de julho de 2012.

SAPUCCI, L.F.; MACHADO, L.A.T.; MENEZES, E.; CAMPOS, T.L.B. Aplicação do sinal GNSS em atividades nowcasting de tempestades severas no contexto da RBMC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 4, 2017, UNESP, Presidente Prudente-SP. **Anais [...]**. Curitiba-PR: Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 24–26 jul. 2017. Disponível em: http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2017_IV_SBG/_artigos/2017_SBG_C TIG_paper_79.pdf. Acesso em: 9 dez. 2019. .

SAPUCCI, L.F.; MACHADO, L.A.T.; SOUZA, E.M.; CAMPOS, T.B. Global positioning system precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting. **Meteorol Appl.**, v. 26, n. 1, p. 49–63, 2019. doi: 10.1002/met.1735.

SILVA JÚNIOR, A.R. **Indicadores de vulnerabilidade, risco socioambiental e educação ambiental para prevenção e mitigação de desastre natural na bacia hidrográfica do Tucunduba, Belém-PA.** 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

SILVA JÚNIOR, J.A.; COSTA, A.C.L. Relação entre os alagamentos na cidade de Belém-PA, a pluviosidade e o nível da maré. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém. **A Amazônia e o clima global: anais.** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia-SBMET, 2010. 1 CD-ROM.

SILVA JÚNIOR, J.A.; COSTA, A.C.L.; PEZZUTI, J.C.B.; COSTA, R.F.; CARVALHO, S.P. Eventos de precipitação e alagamentos na cidade de Belém-PA. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 4, 2011, João Pessoa-PB. **Anais [...]**. Rio de Janeiro-RJ: Sociedade Brasileira de Meteorologia-SBMET, 16–19 out. 2011.

SMITH, T.L.; BENJAMIN, S.G.; GUTMAN, S.I.; SAHM, S. Short-range forecast impact from assimilation of GPS-IPW observations into the rapid update cycle. **Mon. Weather Rev.**, v. 135, n. 8, p. 2914–2930, 2007. <https://doi.org/10.1175/MWR3436.1>.

SOUZA, E.B.; CUNHA, A.C. Climatologia de precipitação no Amapá e mecanismos climáticos de grande escala. *In*: CUNHA, A.C.; SOUZA, E.B.; CUNHA, H.F.A. (org.) **Tempo, clima e recursos hídricos: resultados do projeto REMETAP no Estado do Amapá.** Macapá: IEPA, 2010. cap. 10, p. 177–195. Disponível em: <http://livroaberto.ufpa.br/jspui/handle/prefix/418>. Acesso em: 22 de nov. 2022.

STEPNIAK, K.; PAZIEWSKI, J. On the quality of tropospheric estimates from low-cost GNSS receiver data processing. **Measurement**, v. 198, n. 111350, 2022. ISSN 0263–2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111350>.

STEPNIAK, K.; BOCK, O.; WIELGOSZ, P. Reduction of ZTD outliers through improved GNSS data processing and screening strategies. **Atmos. Meas. Tech.**, v. 11, n. 3, p. 1347–1361, 2018. doi: 10.5194/amt-11-1347-2018.

TEMPORAL e ventos fortes causam estragos em Belém: Chuva intensa veio acompanhada de ventanias que provocaram destruição e susto aos belenenses na tarde desta quarta-feira (31). **DOL**, 2022. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/para/769025/video-temporal-e-ventos-fortes-causam-estragos-em-belem?d=1>. Acesso em: 22 nov. 2022.

TRÂNSITO em tempo real: chuva causa alagamentos em Belém. **DOL**, 2022. Disponível em: <https://dol.com.br/noticias/transito/779608/transito-em-tempo-real-chuva-causa-alagamentos-em-belem?d=1>. Acesso em: 22 nov. 2022.

VAN BAELEN, J.; PENIDE, G. Study of water vapor vertical variability and possible cloud formation with a small network of GPS stations. **Geophys. Res. Lett.**, v. 36, n. 2, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GL036148>.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449f.

WEATHER SPARK. **Histórico de condições meteorológicas em 7 de maio de 2018 em Belém**. 2018. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/h/d/30136/2018/5/7/Condi%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-hist%C3%B3ricas-em-segunda-feira-7-de-maio-de-2018-em-Bel%C3%A9m-Brasil#metar-17-00>. Acesso em: 25 nov. 2019.

APÊNDICE A – Normais Climatológicas das precipitações mensais e anuais (mm).

Normal	Código	Nome	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
1967–1996	–	Embrapa ⁹	378,1	426,6	441,2	381,5	299,8	172,0	160,7	140,0	139,8	119,3	122,7	219,6	3001,3
1961–1990	82191	Inmet	385,5	412,5	447,1	353,4	305,5	155,3	155,5	126,4	144,8	114,6	118,2	203,0	2921,7
1981–2010	82191	Inmet	384,5	399,5	450,3	424,3	298,4	185,3	153,8	134,8	128,2	129,2	127,4	268,3	3084,0
1991–2020	82191	Inmet	393,8	437,8	506,3	465,5	323,6	205,8	156,0	128,7	120,1	135,8	151,4	283,5	3308,3
2003–2022	INBE*	Inmet	389,4	438,4	521,2	421,3	373,6	207,1	142,4	144,8	149,5	170,8	196,8	301,3	3511,7
2010–2022	INBE*	Inmet	388,7	437,8	514,7	459,6	369,6	203,0	148,9	154,8	148,9	178,3	205,0	287,8	3480,0
2015–2018	INBE*	Inmet	400,4	527,5	506,6	404,9	320,1	154,5	92,8	186,5	130,2	194,7	145,8	303,8	3332,5
2015–2018	ITV-UFPA*	ITV ¹⁰	366,5	459,7	467,1	264,9	289,2	192,0	126,3	108,6	67,3	87,0	84,9	216,4	2635,3

* Normais Climatológicas Provisórias para as estações INBE e ITV-UFPA.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Coordenadas geográficas das estações e informações adicionais dos dados:

Estação	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Estação	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Embrapa	Convencional	1,47 S	48,45 W	–	ITV-UFPA	Automática	1,474093 S	48,459393 W	–
Inmet (2023) ¹¹	Convencional	1,44 S	48,44 W	7,13	Inmet (INBE) ¹²	Automática	1,411228 S	48,439512 W	24,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

⁹ Normal Climatológica da Embrapa oriunda de Bastos *et al.* (2002). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/389773>.

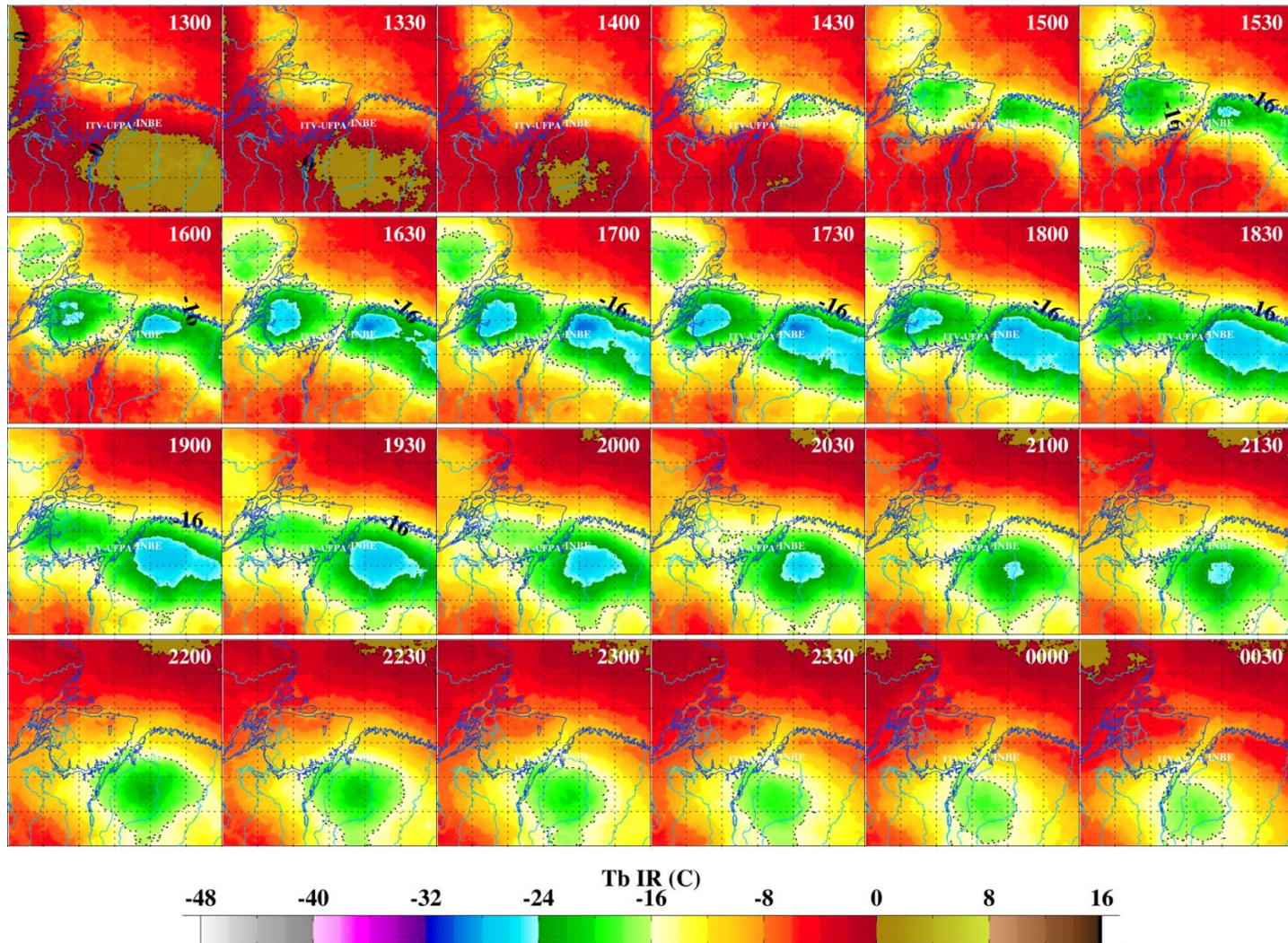
¹⁰ Dados meteorológicos pertencentes ao Instituto Tecnológico Vale em parceria com a Faculdade de Meteorologia no Campus do Guamá da Universidade Federal do Pará.

¹¹ Dados da estação convencional do INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>.

¹² Dados da estação automática do INMET. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>.

APÊNDICE B – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em DJF no período de 2000–2015.

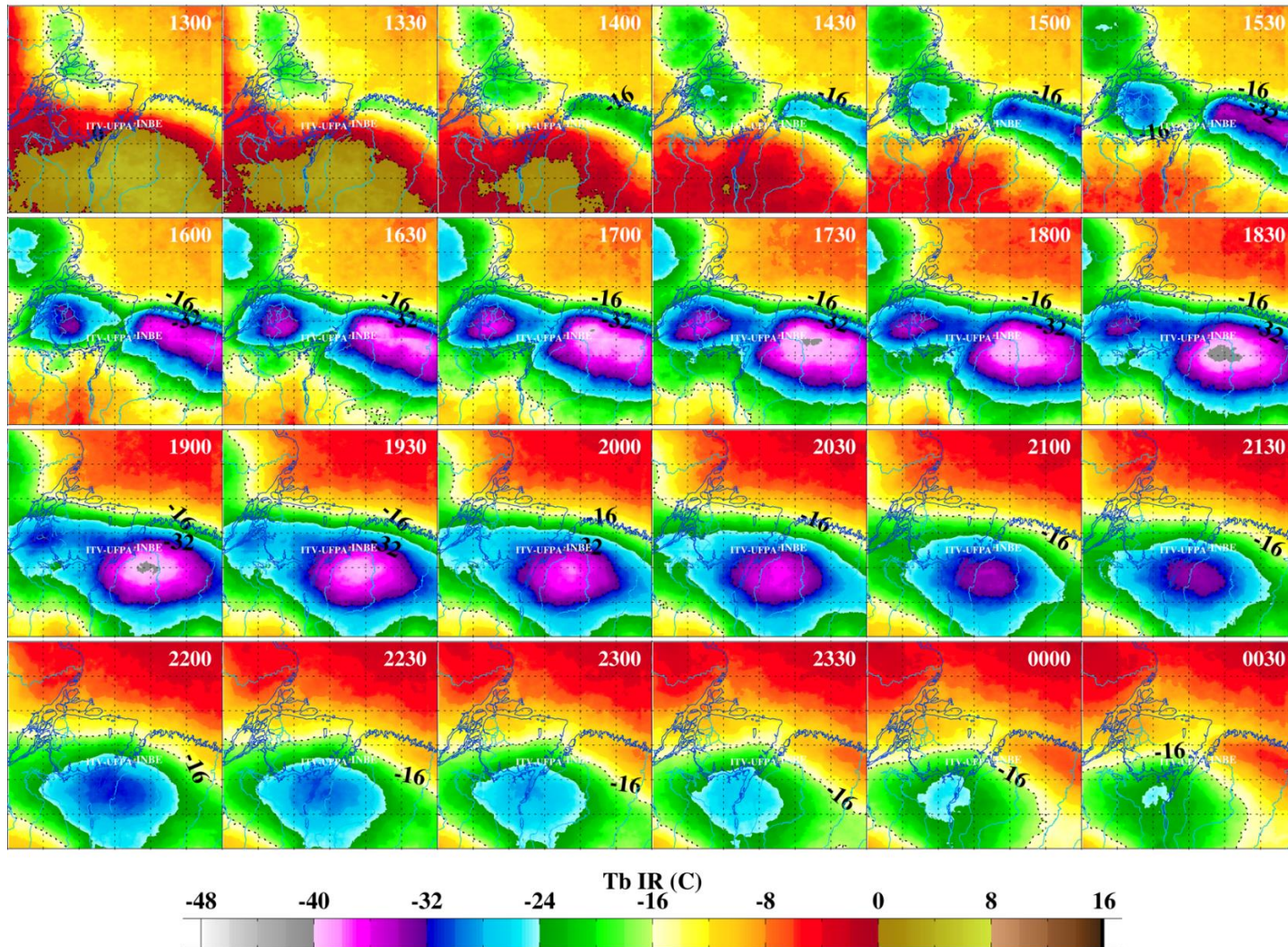
MEDIA SAZONAL Tb IR DJF: 2000-2015 1300-0030 HL - 52W46W04S02N



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em MAM no período de 2000–2015.

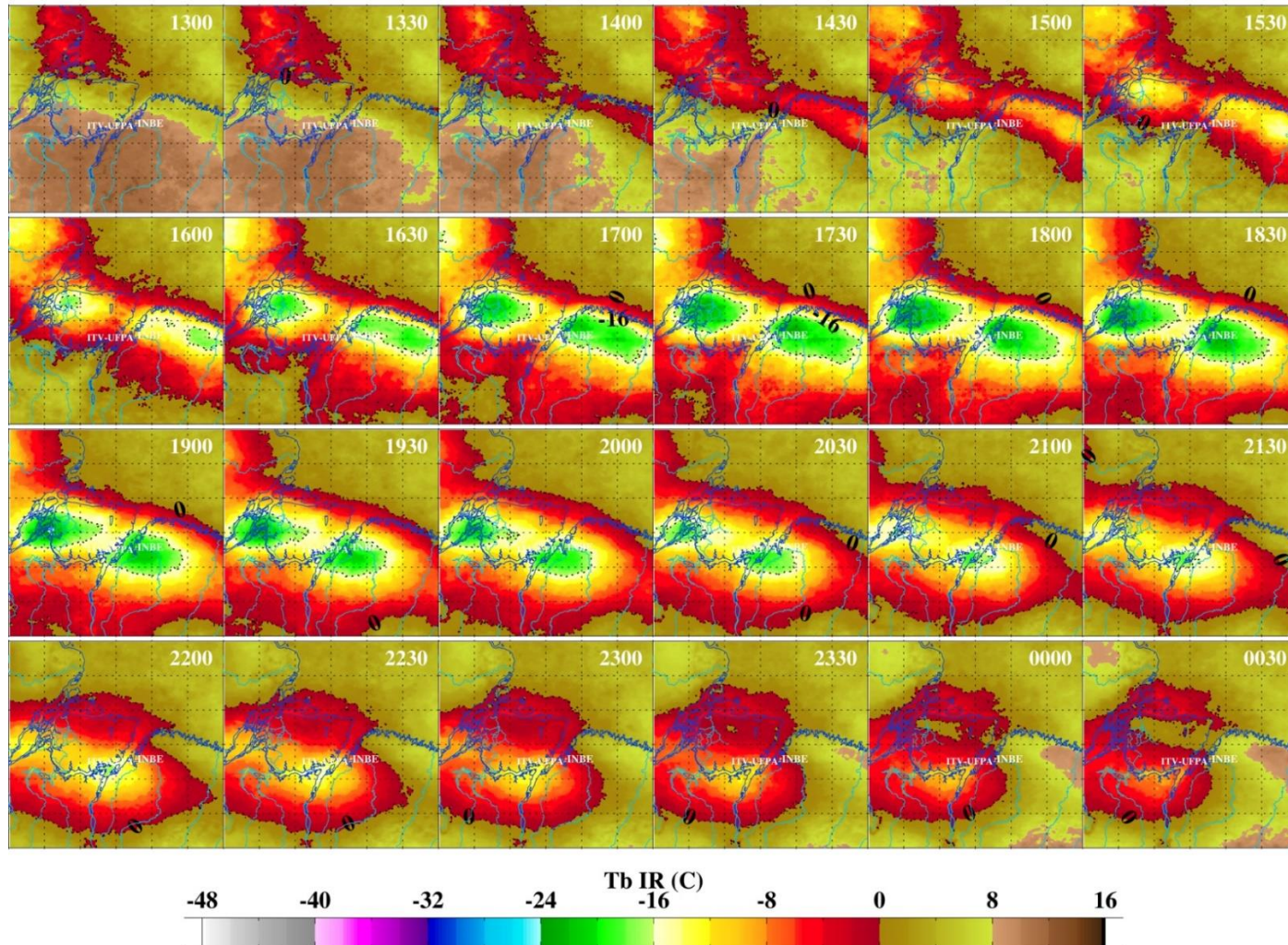
MEDIA SAZONAL Tb IR MAM: 2000-2015 1300-0030 HL - 52W46W04S02N



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE D – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em JJA no período de 2000–2015.

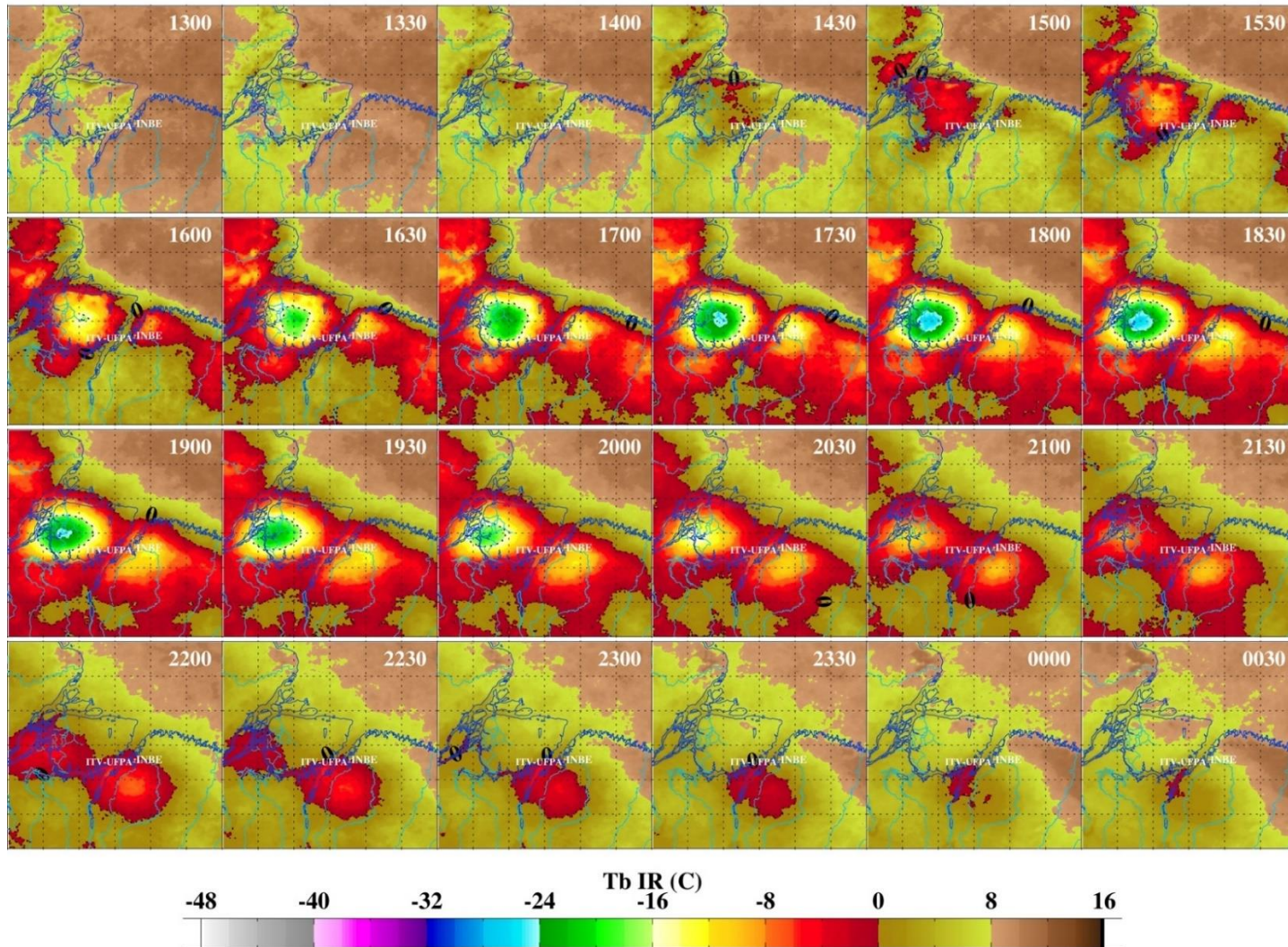
MEDIA SAZONAL Tb IR JJA: 2000-2015 1300-0030 HL - 52W46W04S02N



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE E – Média sazonal da Tb no Canal Infravermelho em SON no período de 2000–2015.

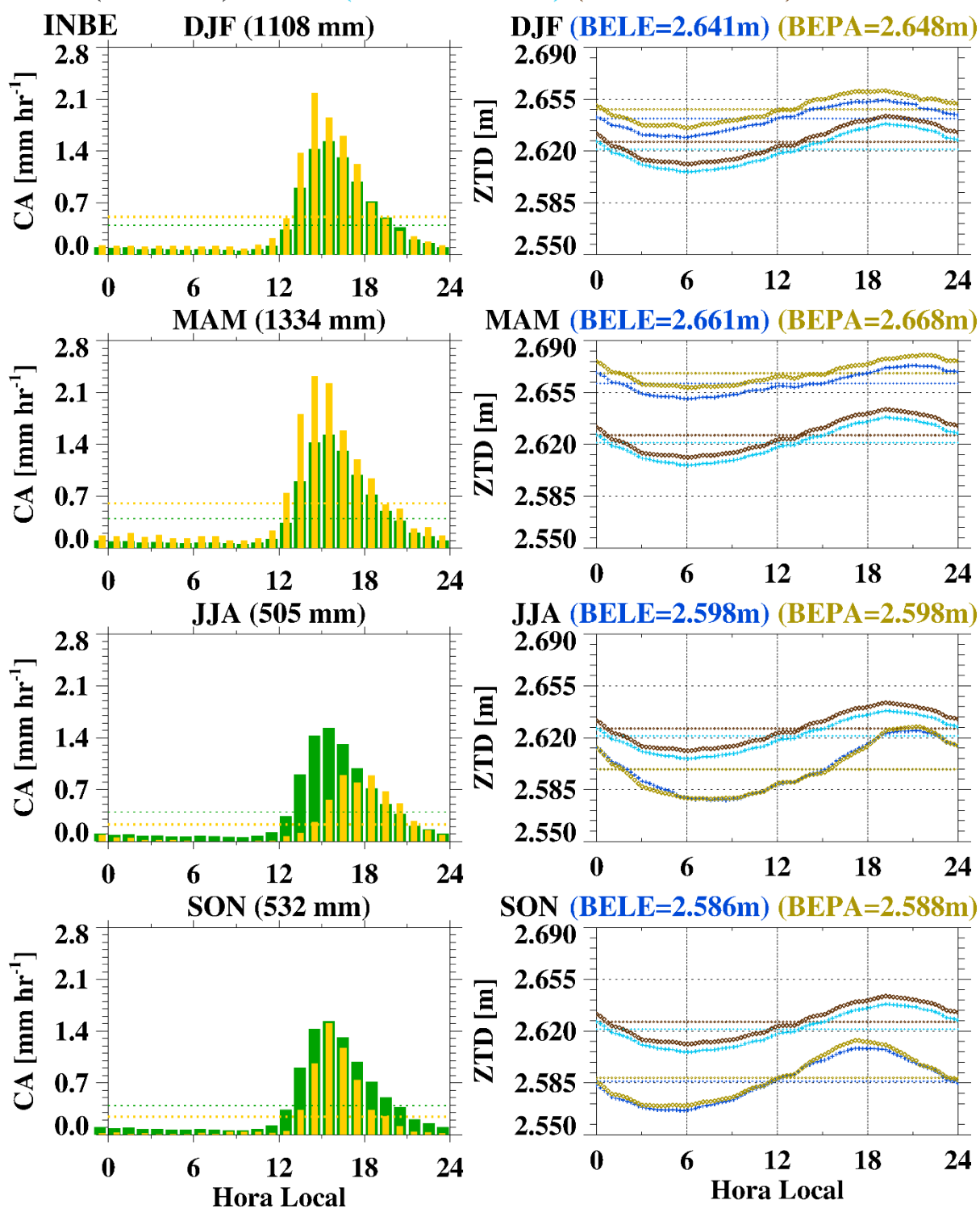
MEDIA SAZONAL Tb IR SON: 2000-2015 1300-0030 HL - 52W46W04S02N



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE F – Médias anual e sazonal e ciclo diurno da CA (INMET) e ZTD ao NMM (BELE e BEPA) no período de 2010 A 2022.¹³

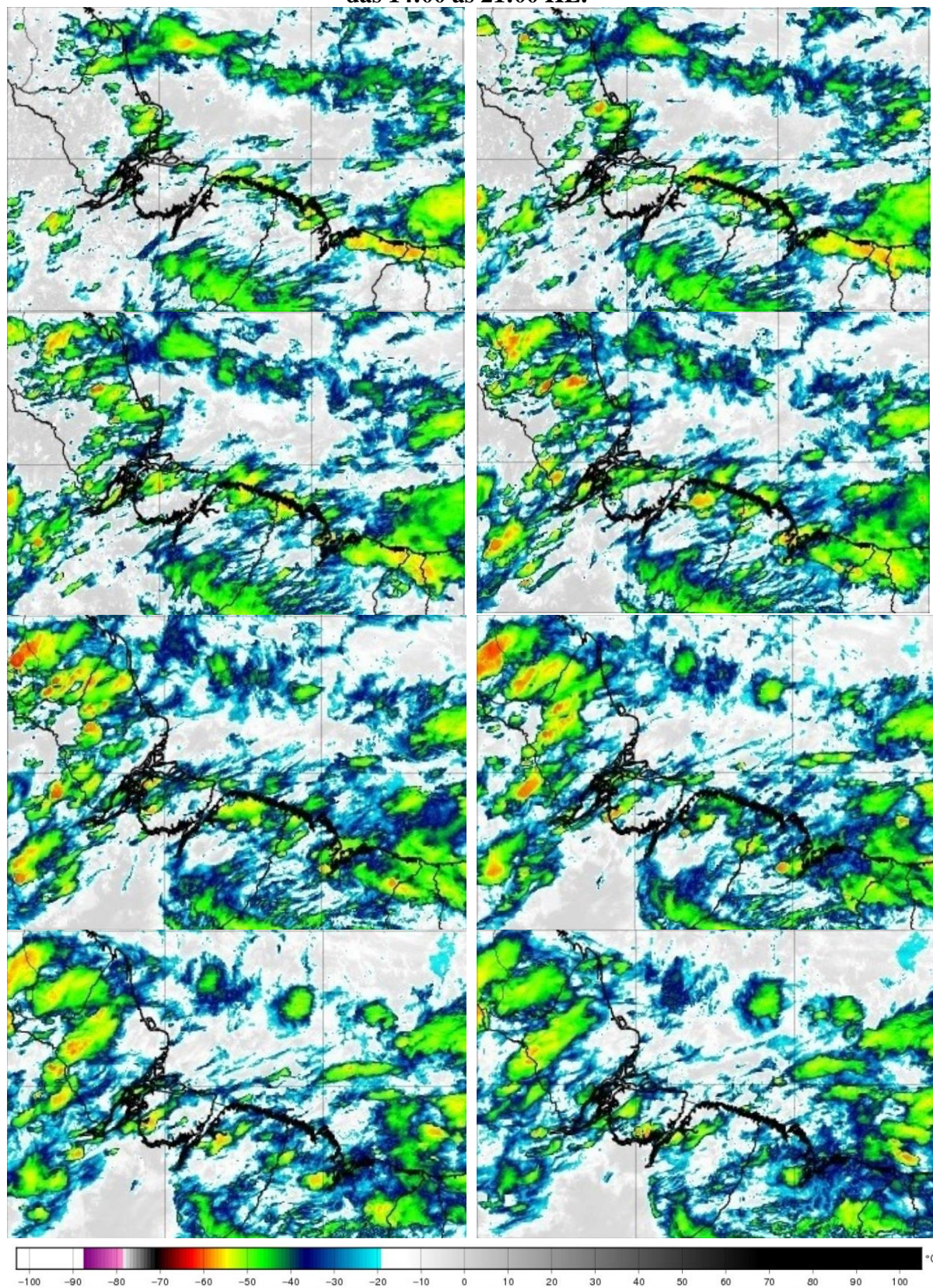
CA (3480 mm) E ZTD (BELE=2.621 m) (BEPA=2.626 m) : 2010-2022



Fonte: Elaborada pelo autor.

¹³ O mesmo que a Figura 18, exceto que para os horários disponíveis dos dados de ZTD e CA são independentes e a partir do período de janeiro de 2010 a dezembro de 2022.

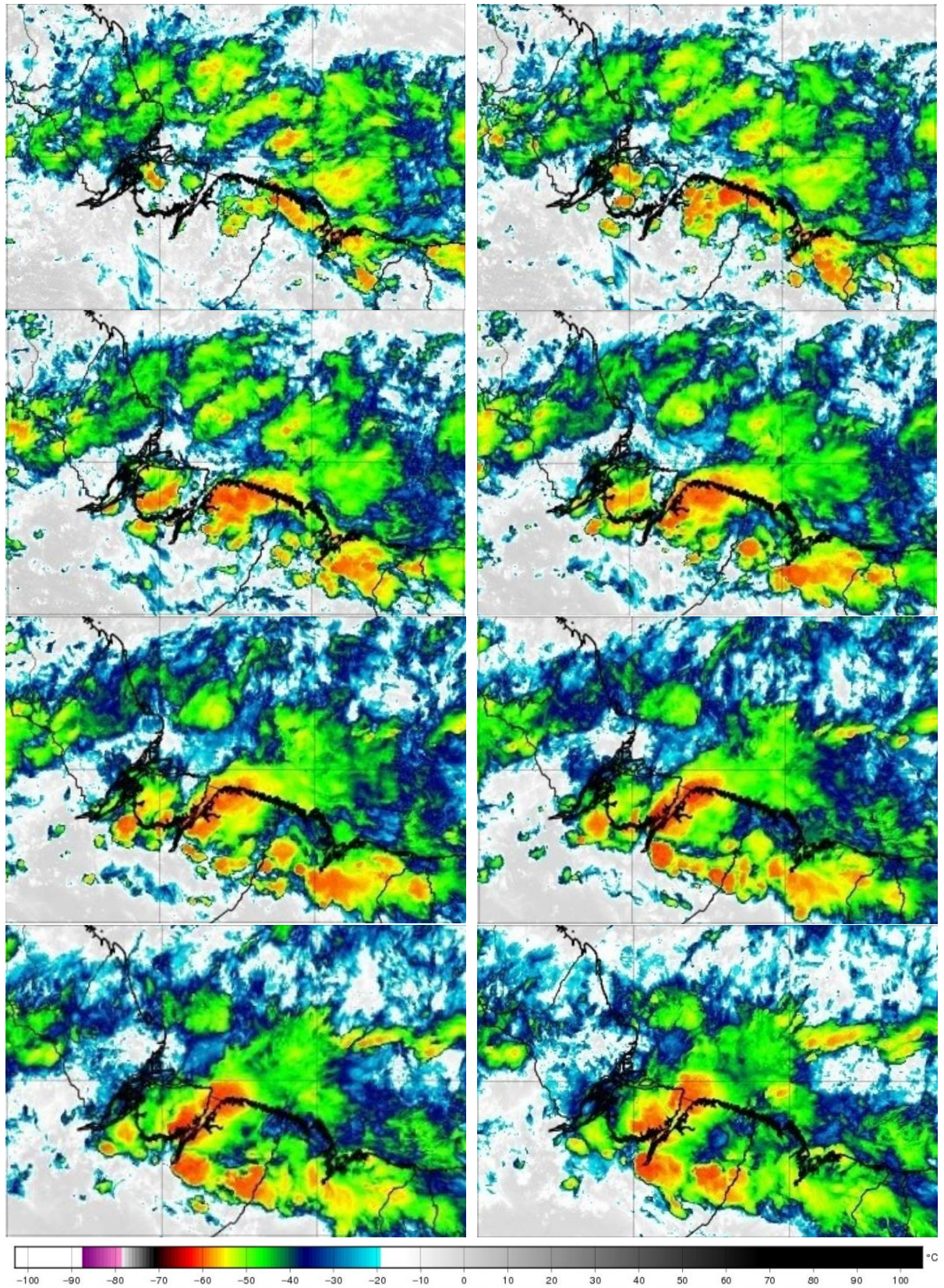
**APÊNDICE G – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 06/05/2018
das 14:00 às 21:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁴.

¹⁴ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

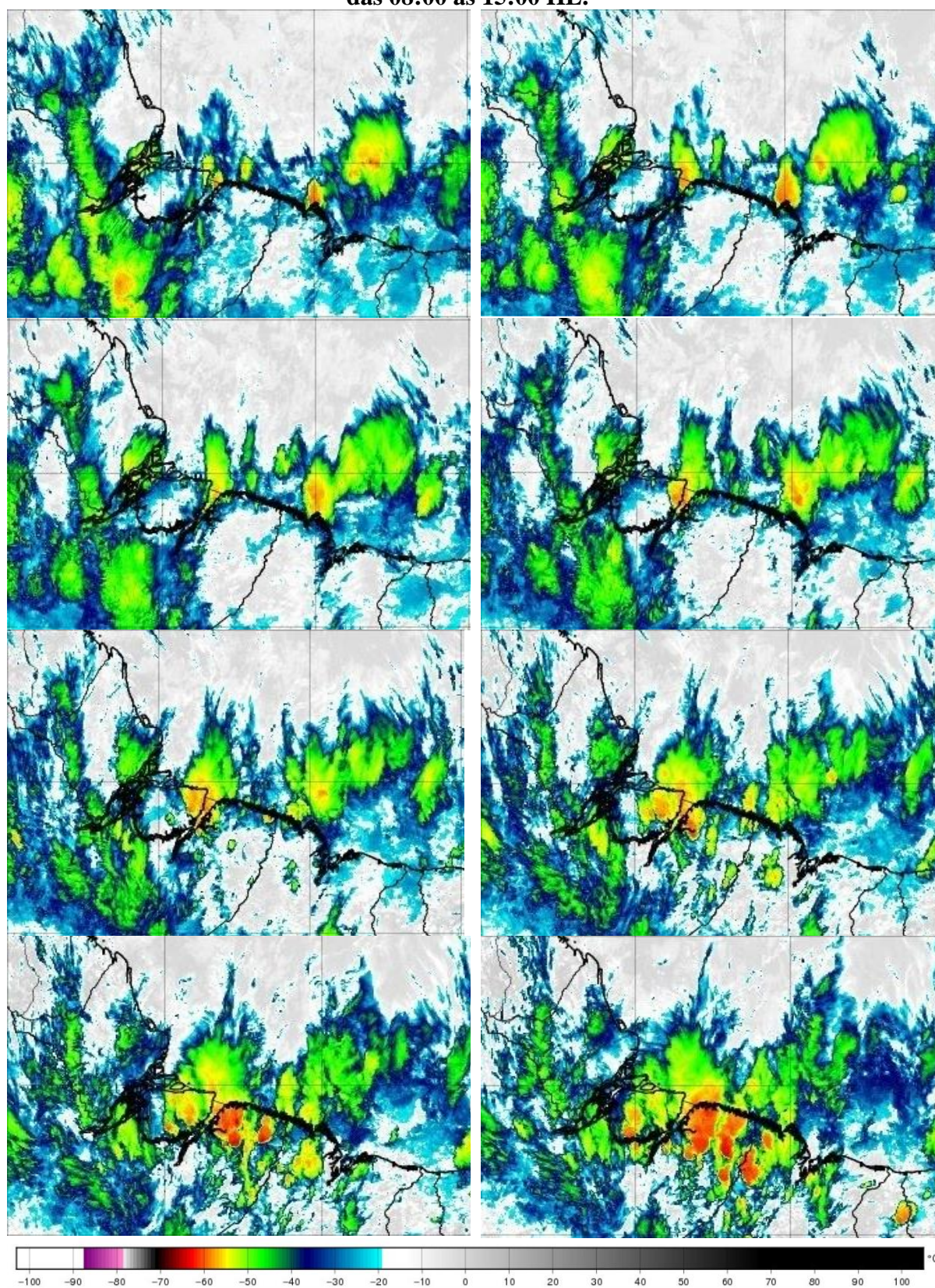
**APÊNDICE H – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 07/05/2018
das 14:00 às 21:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁵.

¹⁵ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

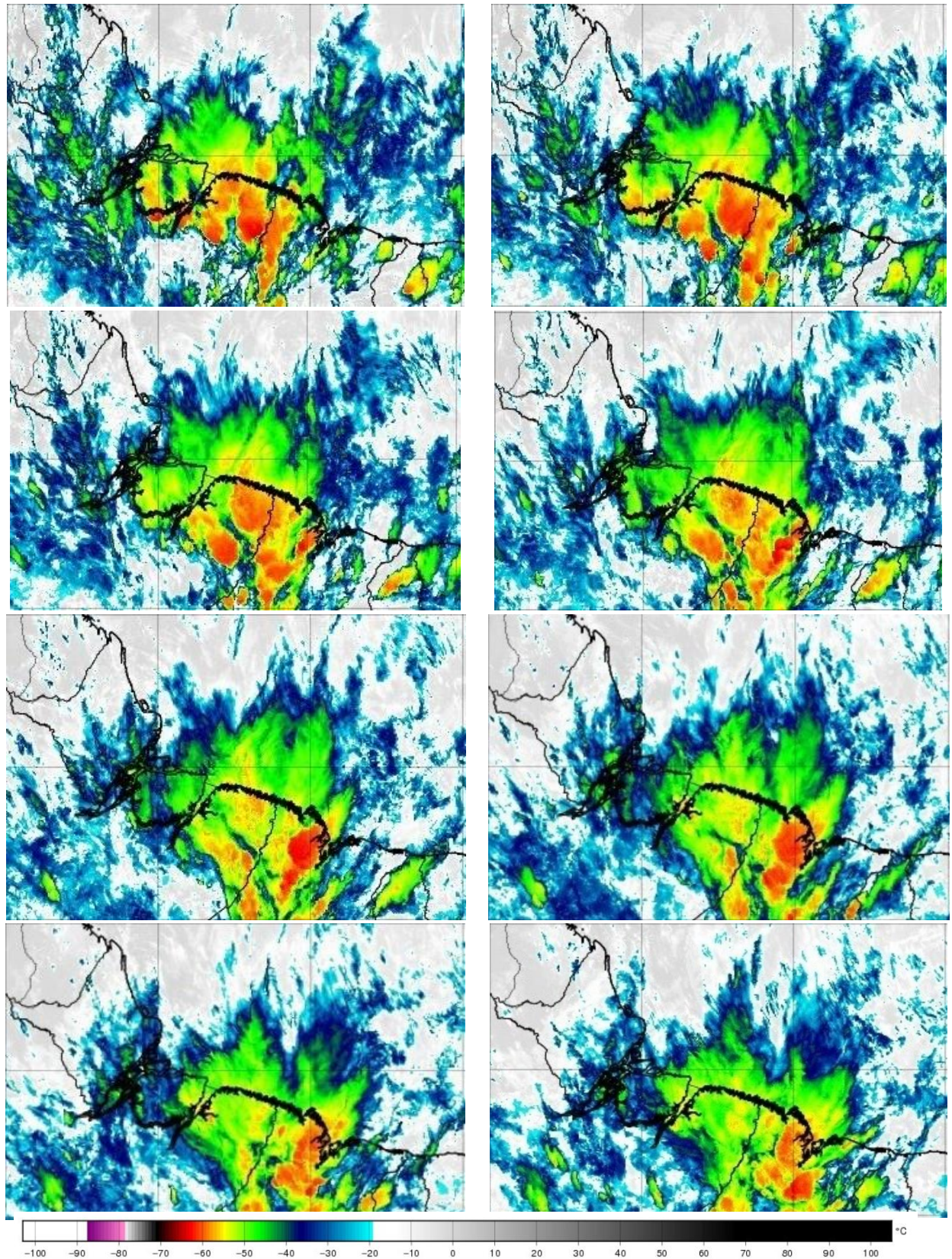
**APÊNDICE I – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 03/02/2018
das 08:00 às 15:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁶.

¹⁶ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

**APÊNDICE J – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 03/02/2018
das 16:00 às 23:00 HL.**

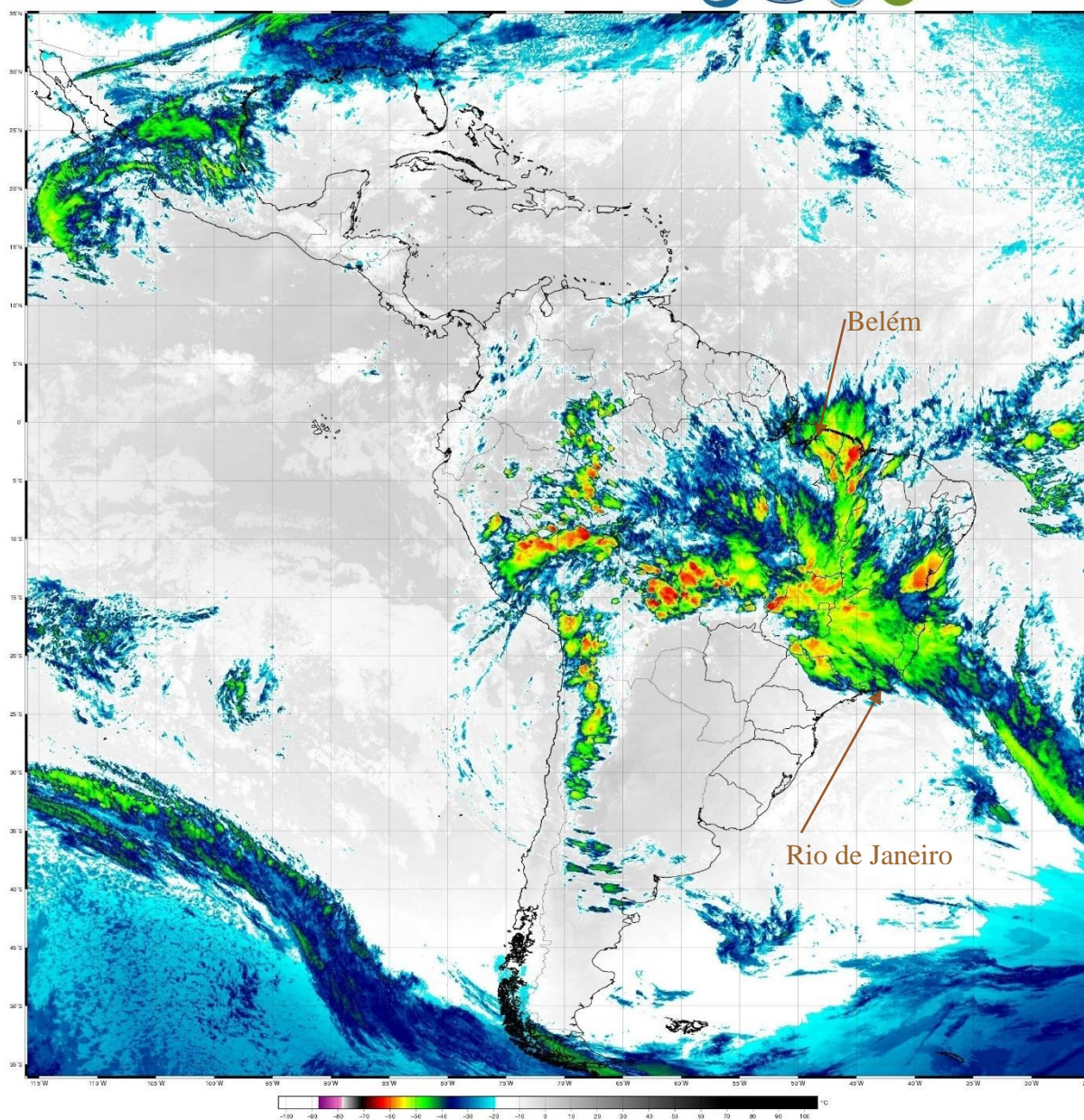


Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁷.

¹⁷ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

APÊNDICE K – Imagem do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 03/02/2018 às 20:00 HL.

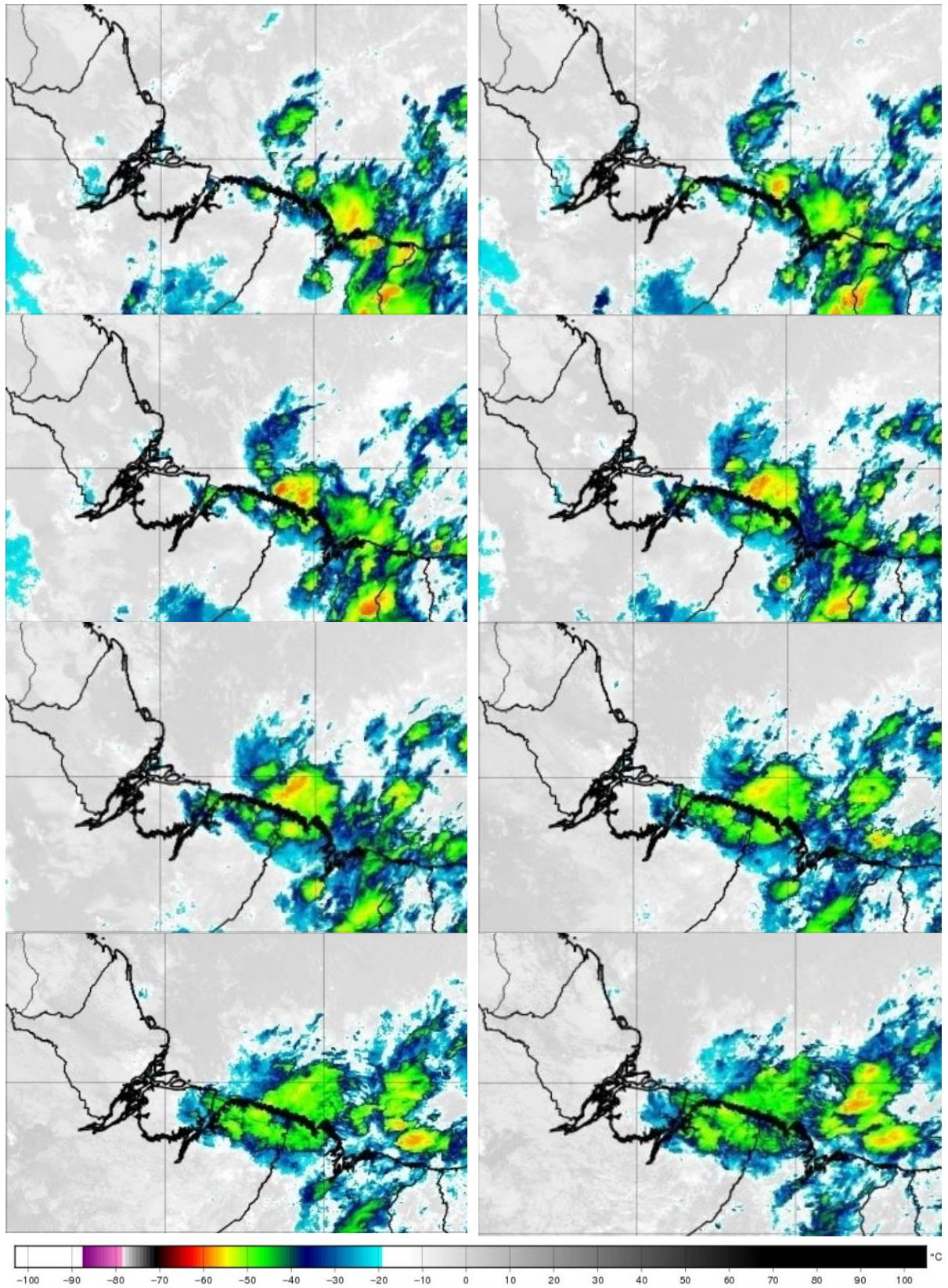
GOES16 - CANAL_12 (9.60 microns)
América Latina: 201802032300 - 201802032311 GMT



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁸.

¹⁸ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

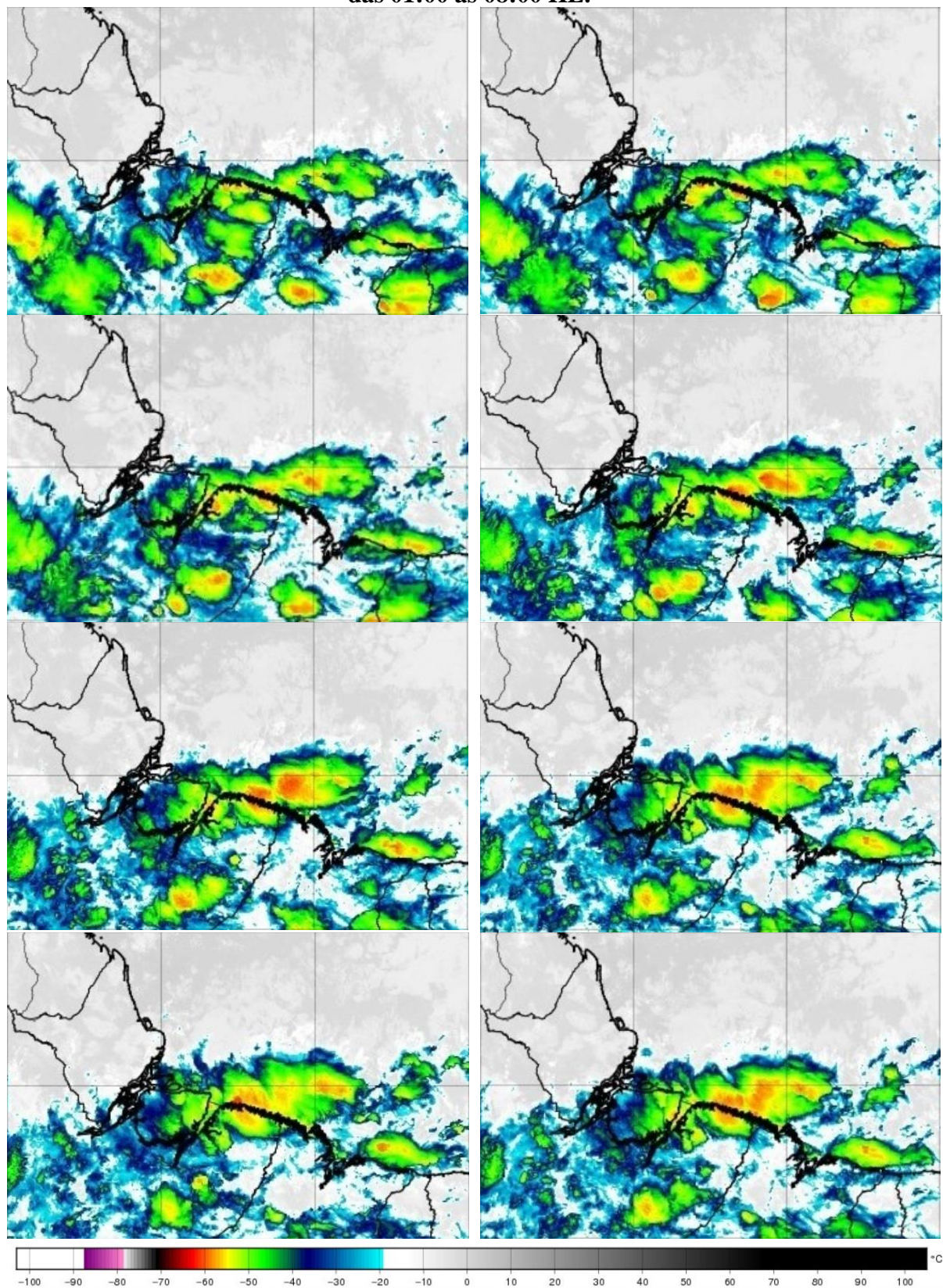
**APÊNDICE L – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 07/03/2020
das 05:00 às 13:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)¹⁹.

¹⁹ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

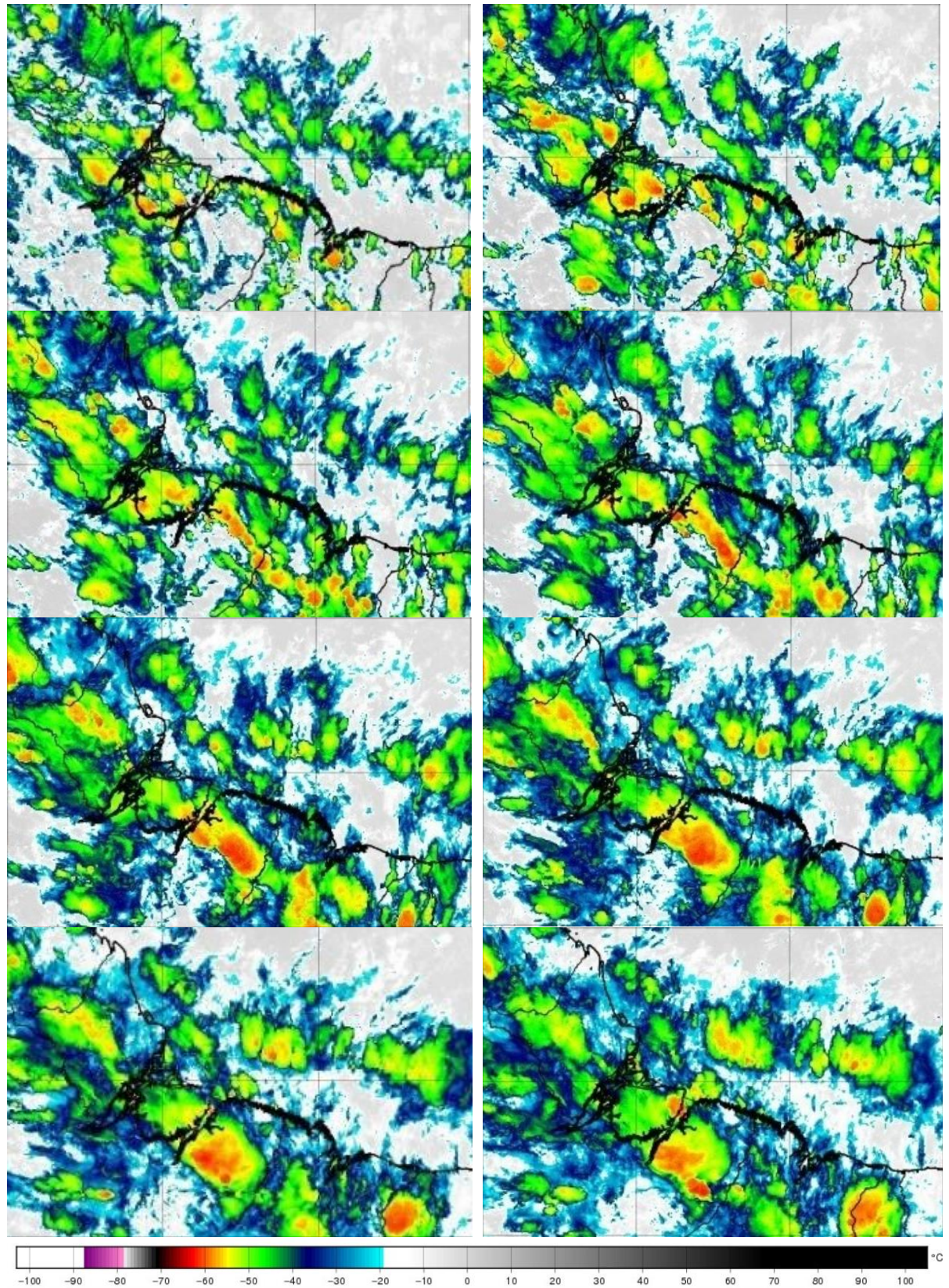
**APÊNDICE M – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 09/03/2020
das 01:00 às 08:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁰.

²⁰ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

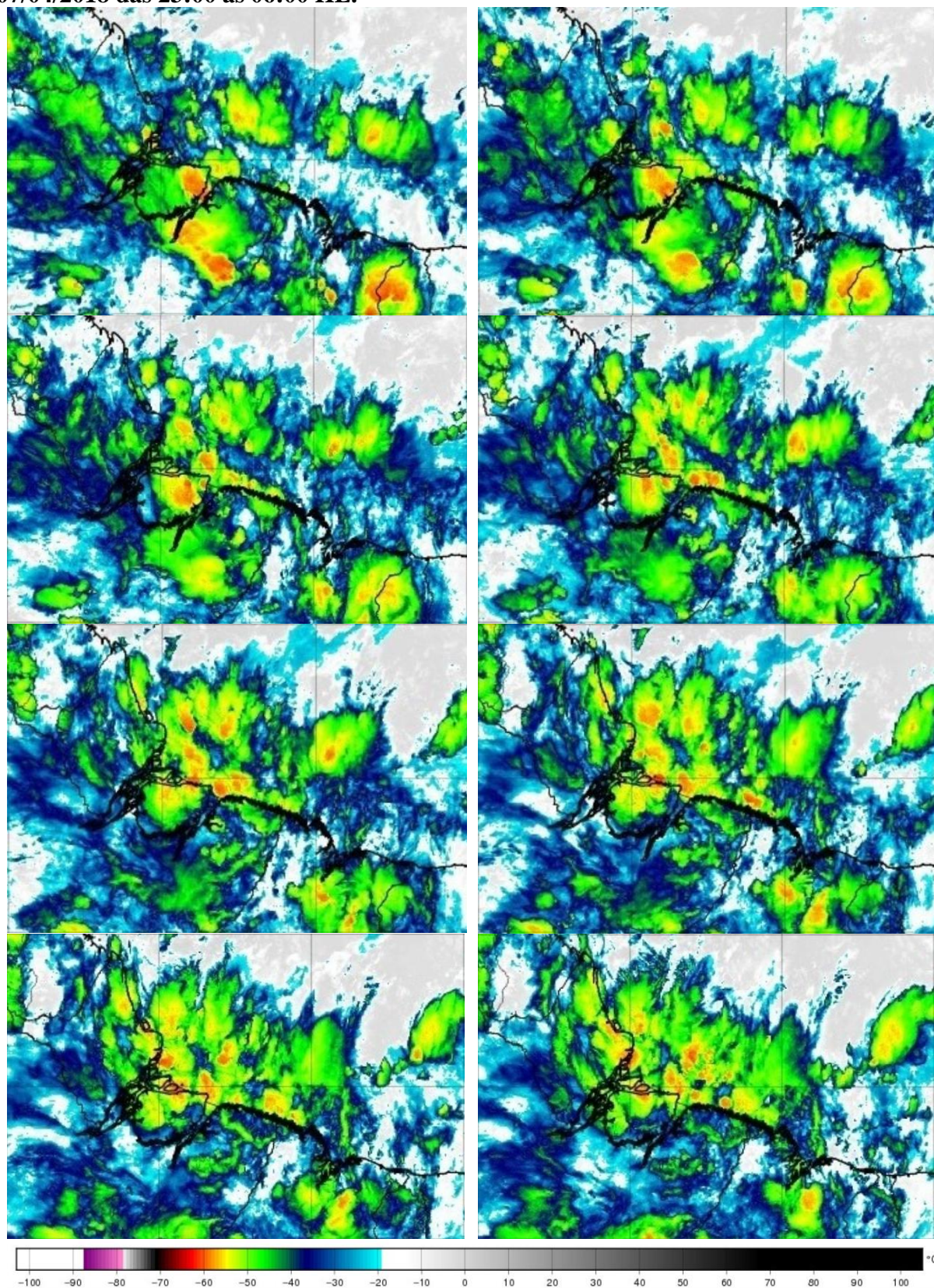
APÊNDICE N – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 06/04/2018 das 15:00 às 22:00 HL.



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²¹.

²¹ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

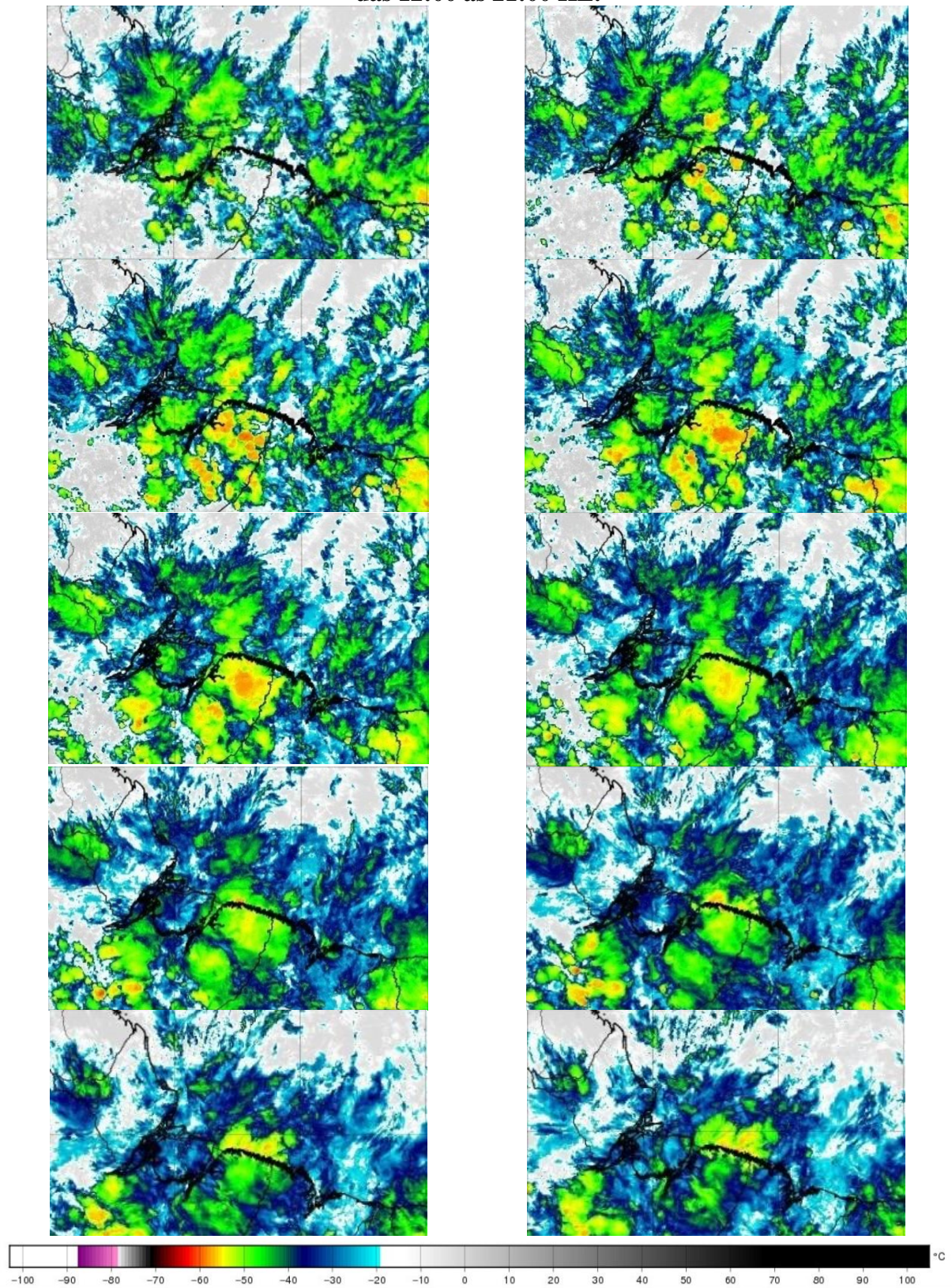
APÊNDICE O – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 06-07/04/2018 das 23:00 às 06:00 HL.



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²².

²² <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

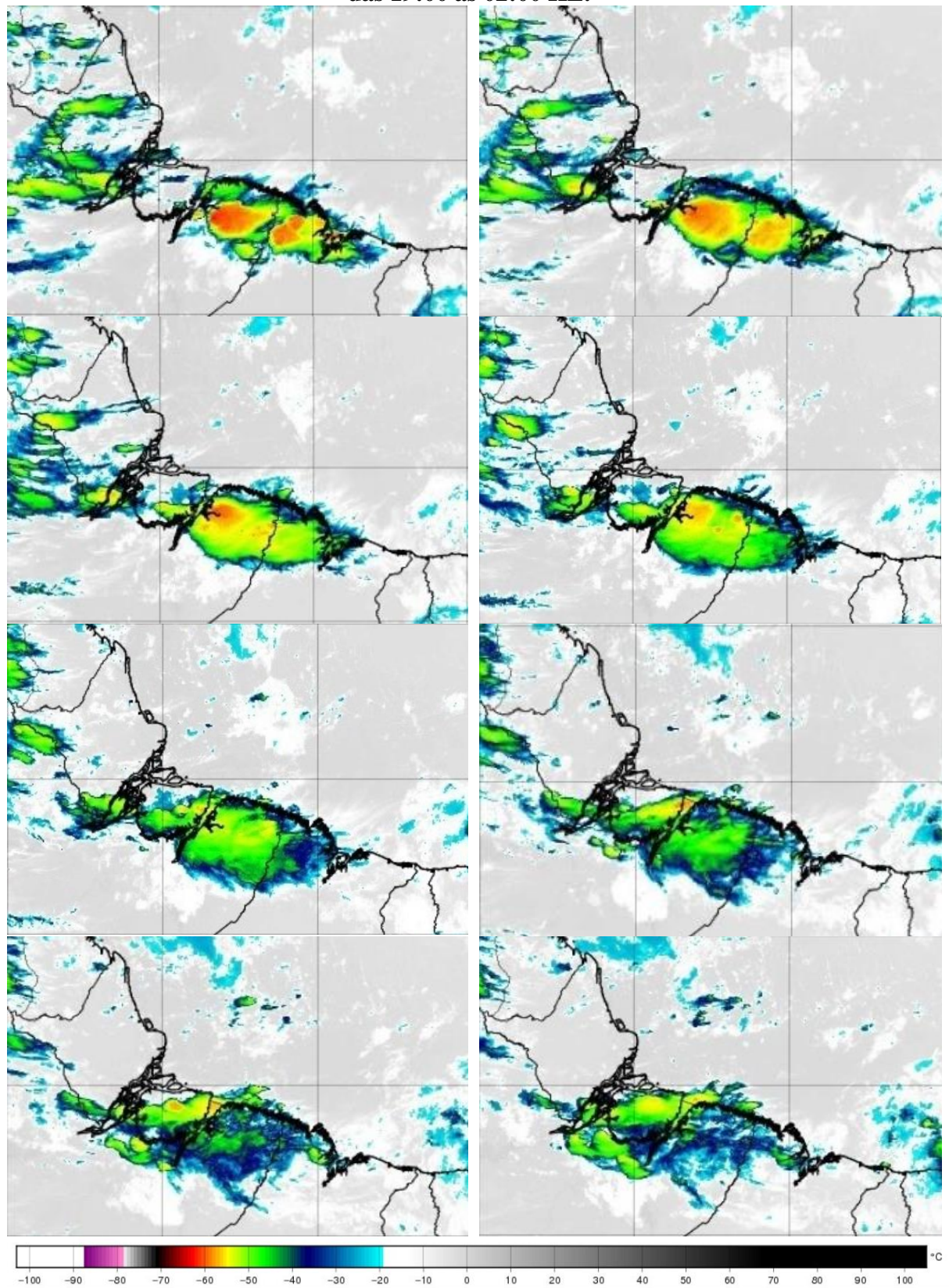
**APÊNDICE P – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 10/04/2018
das 12:00 às 21:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²³.

²³ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

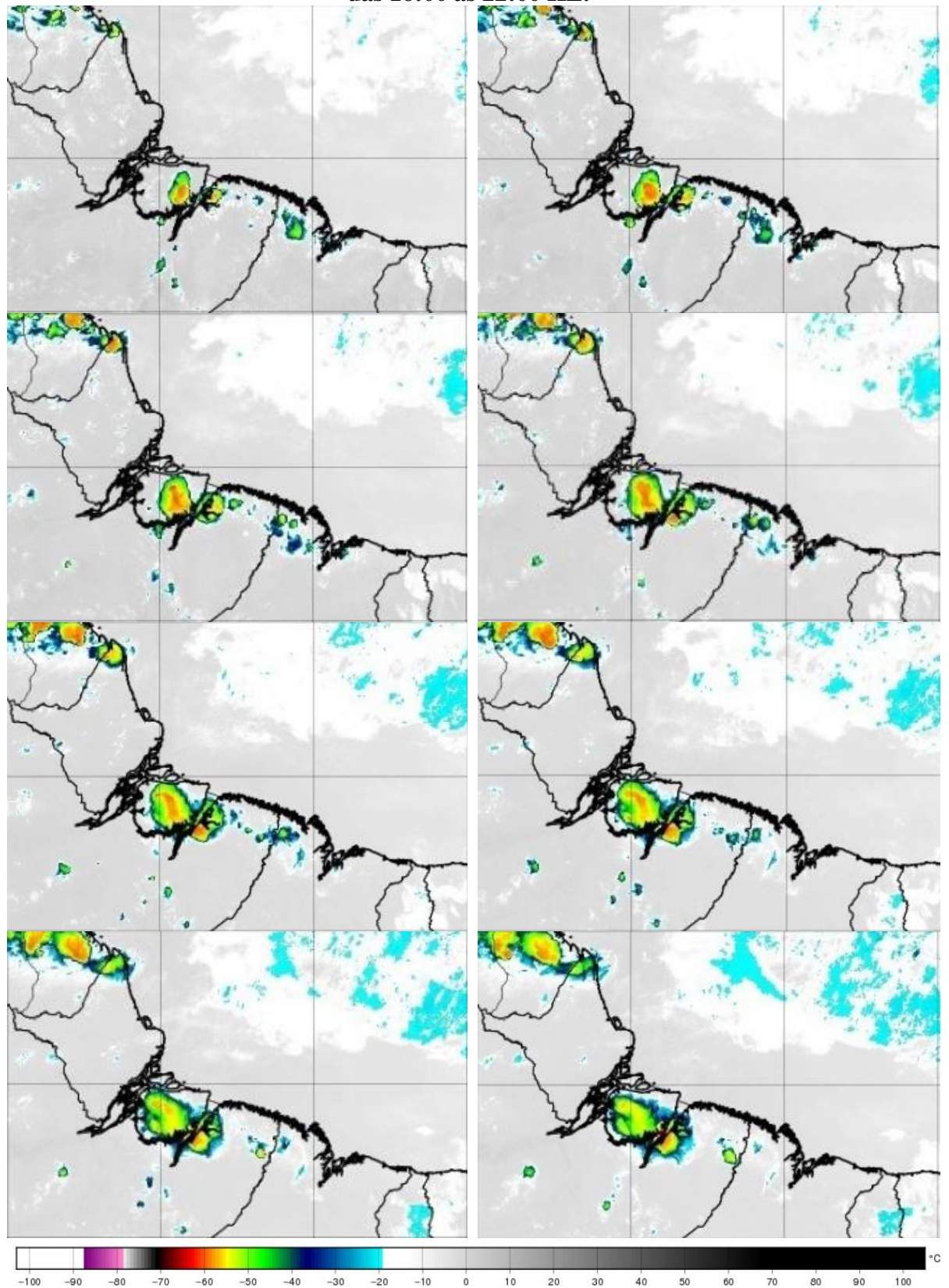
**APÊNDICE Q – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 10/06/2019
das 19:00 às 02:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁴.

²⁴ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

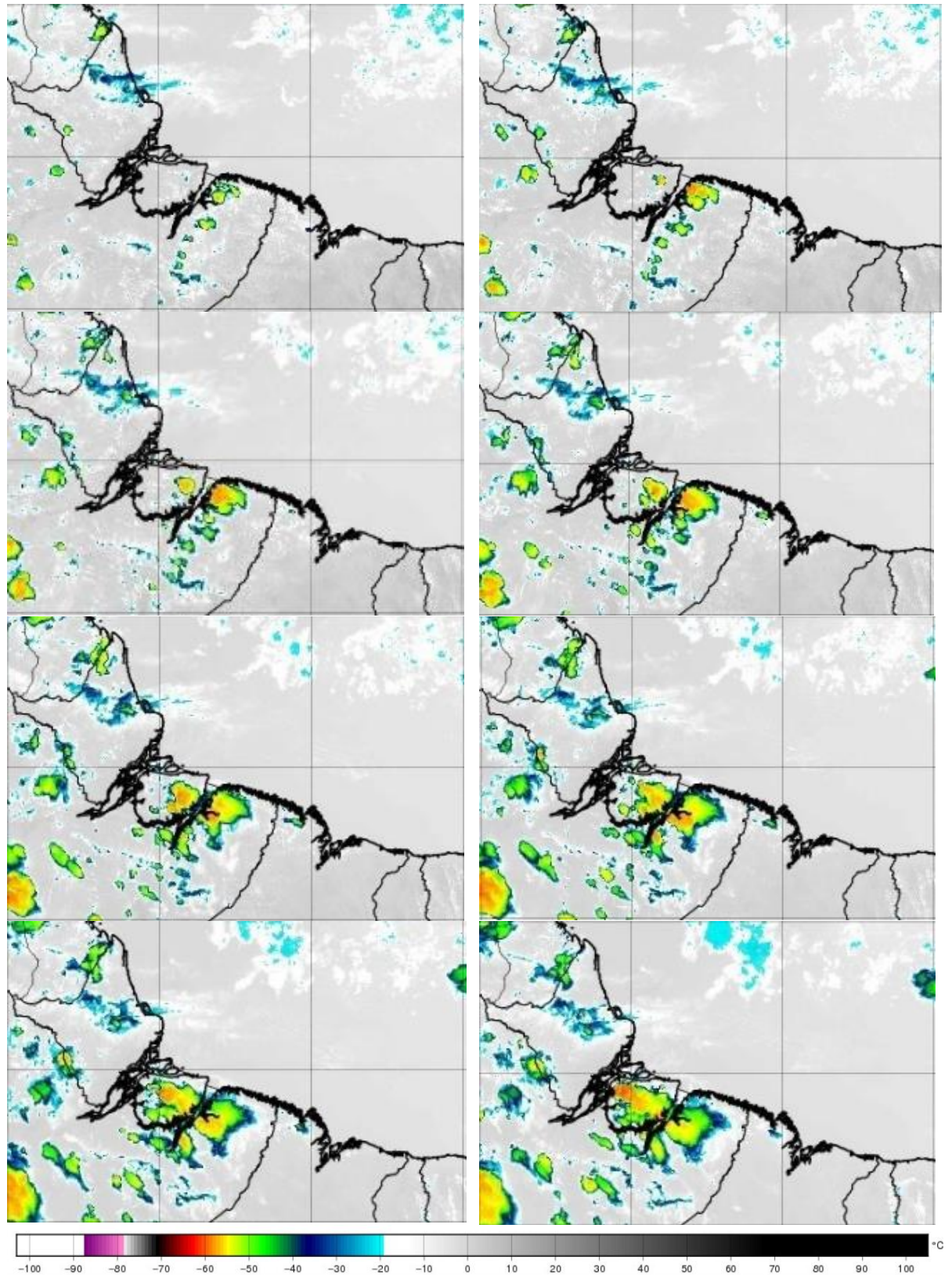
**APÊNDICE R – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 30/08/2022
das 16:00 às 22:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁵.

²⁵ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

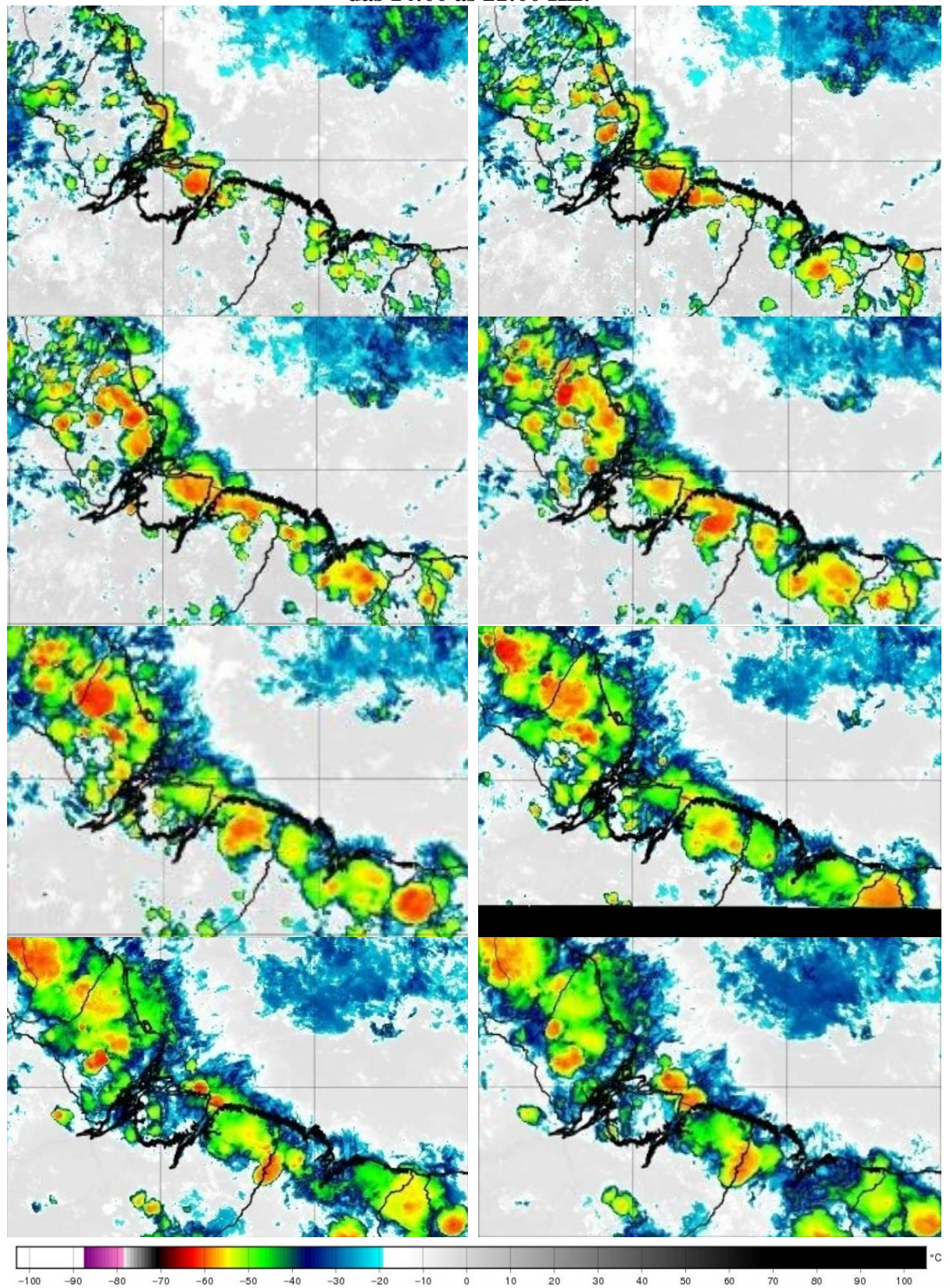
**APÊNDICE S – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 31/08/2022
das 14:00 às 17:30 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁶.

²⁶ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

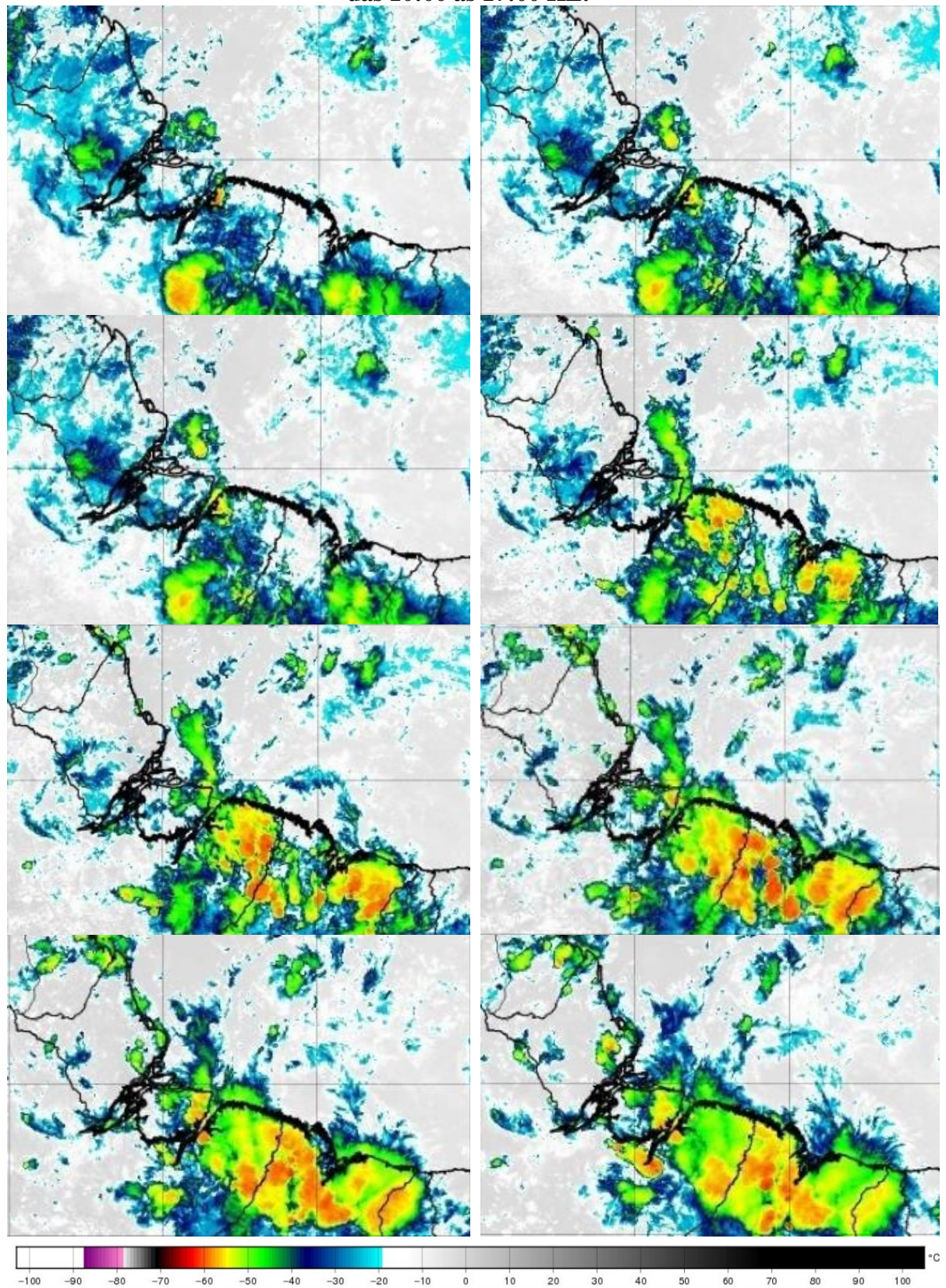
**APÊNDICE T – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) 03/11/2022
das 14:00 às 21:00 HL.**



Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁷.

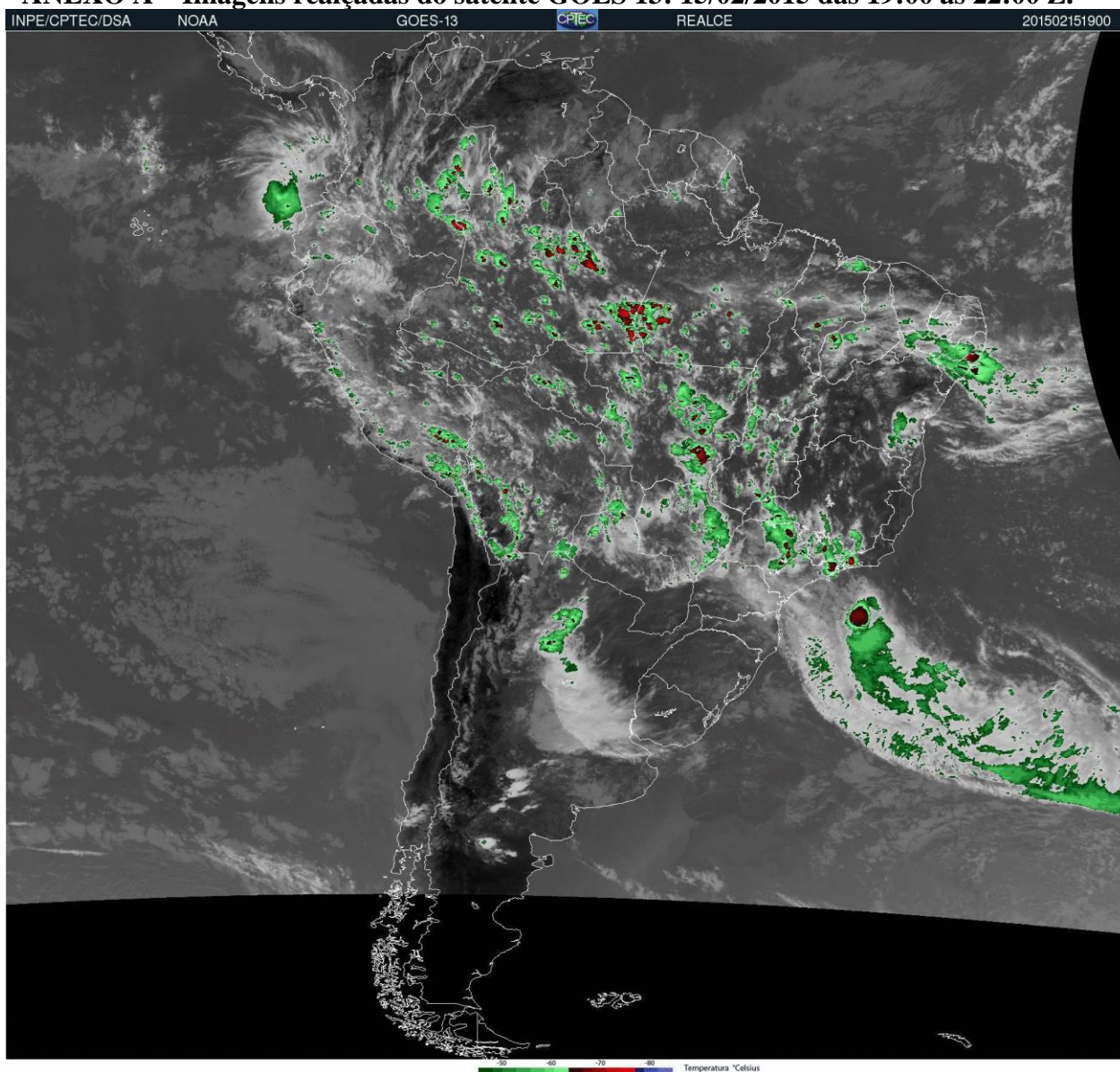
²⁷ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

**APÊNDICE U – Imagens horárias do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 µm) 04/11/2022
das 10:00 às 17:00 HL.**



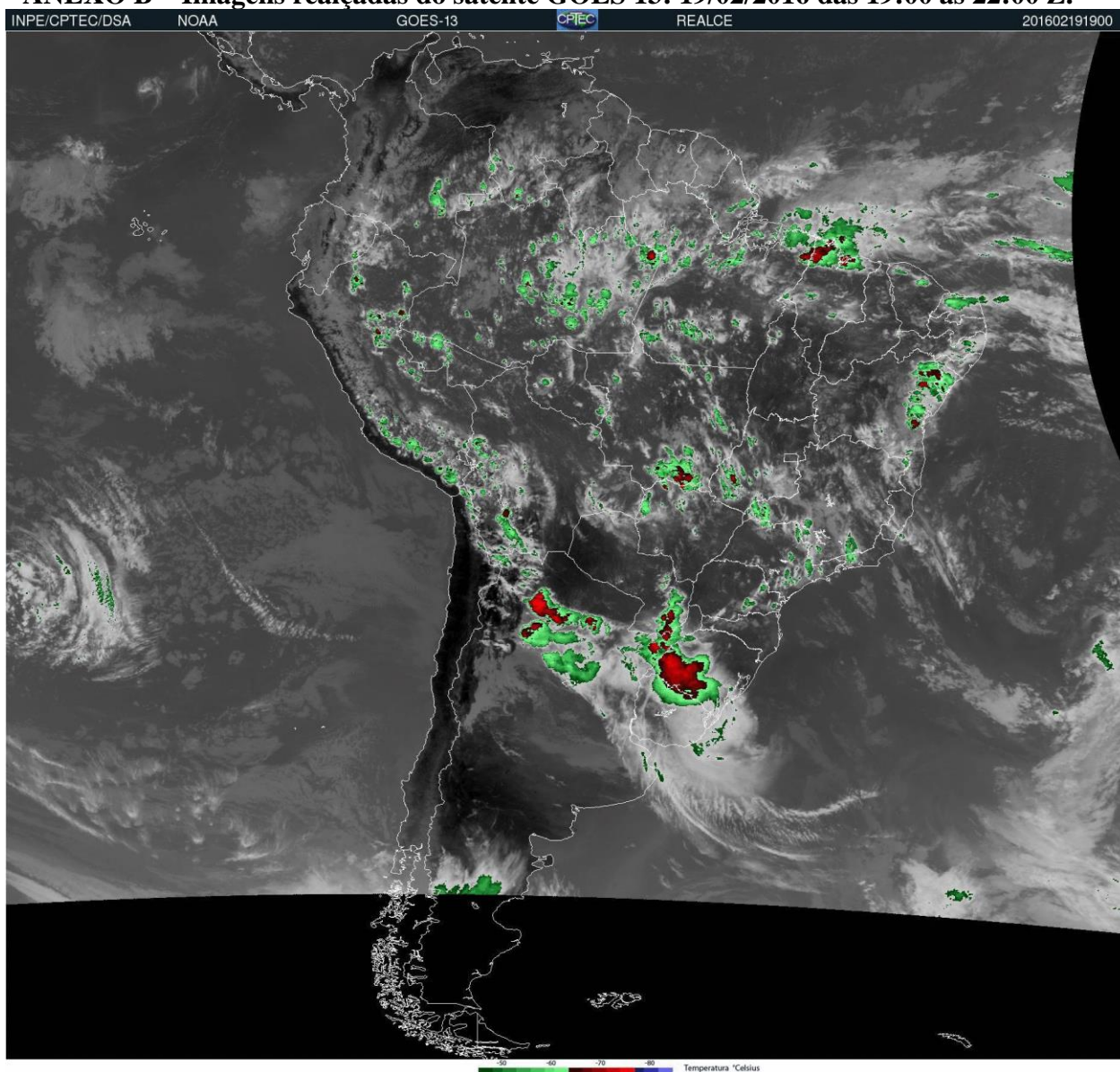
Fonte adaptada de INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁸.

²⁸ <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO A – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 15/02/2015 das 19:00 às 22:00 Z.

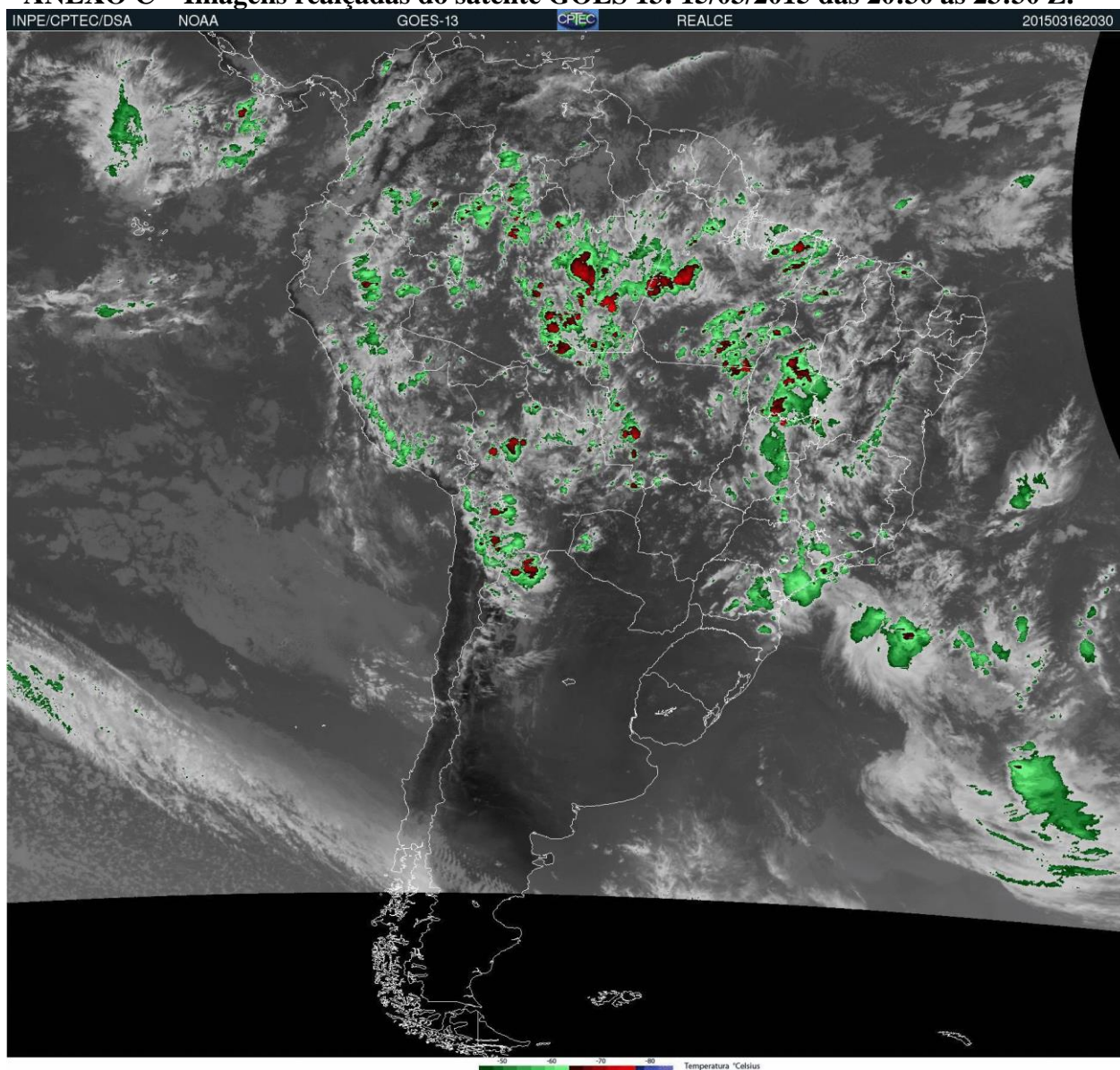
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)²⁹.

²⁹ Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO B – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 19/02/2016 das 19:00 às 22:00 Z.

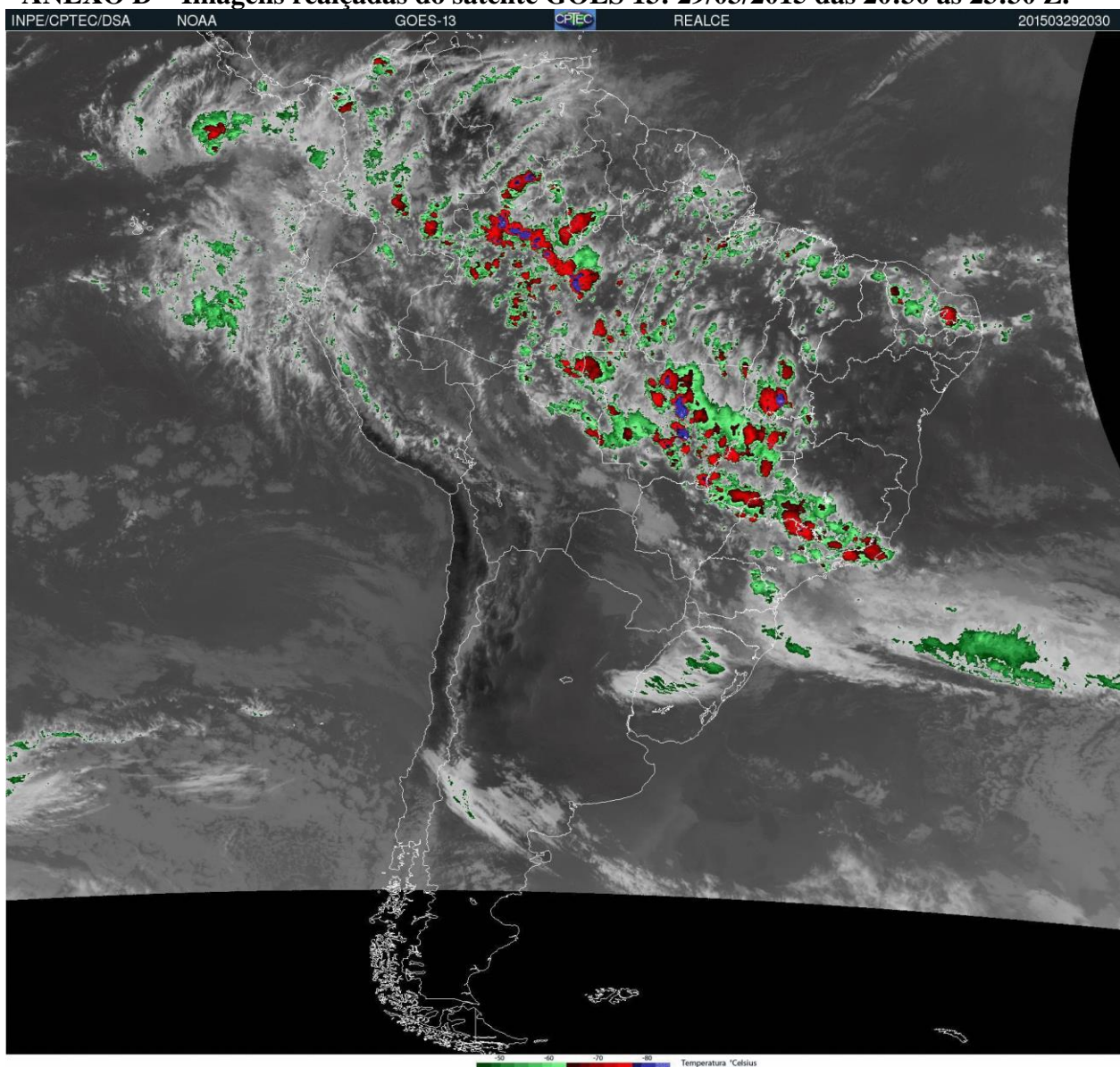
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³⁰.

³⁰ Disponível em: <https://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO C – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 15/03/2015 das 20:30 às 23:30 Z.

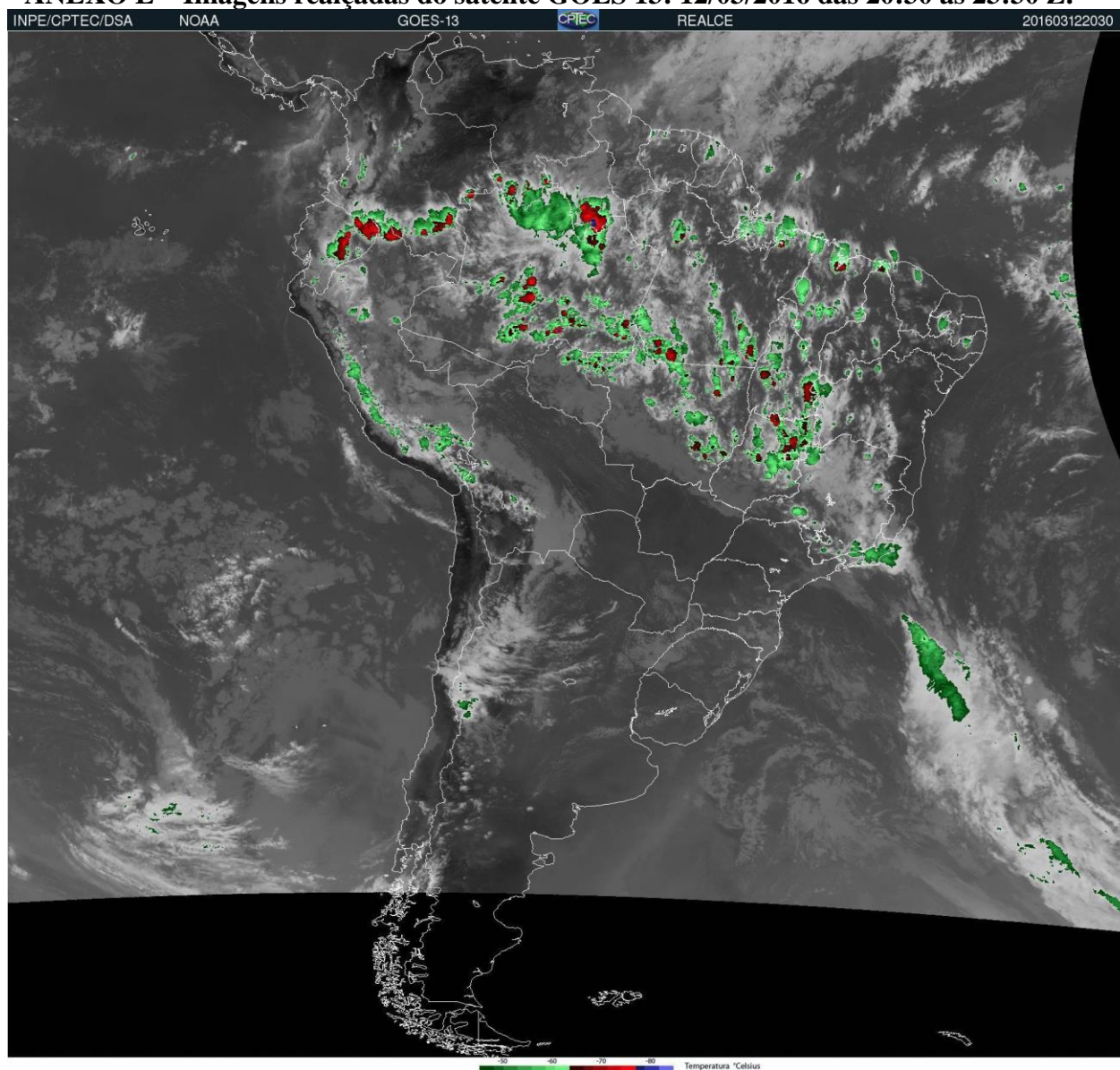
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³¹.

³¹ Disponível em: <https://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO D – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 29/03/2015 das 20:30 às 23:30 Z.

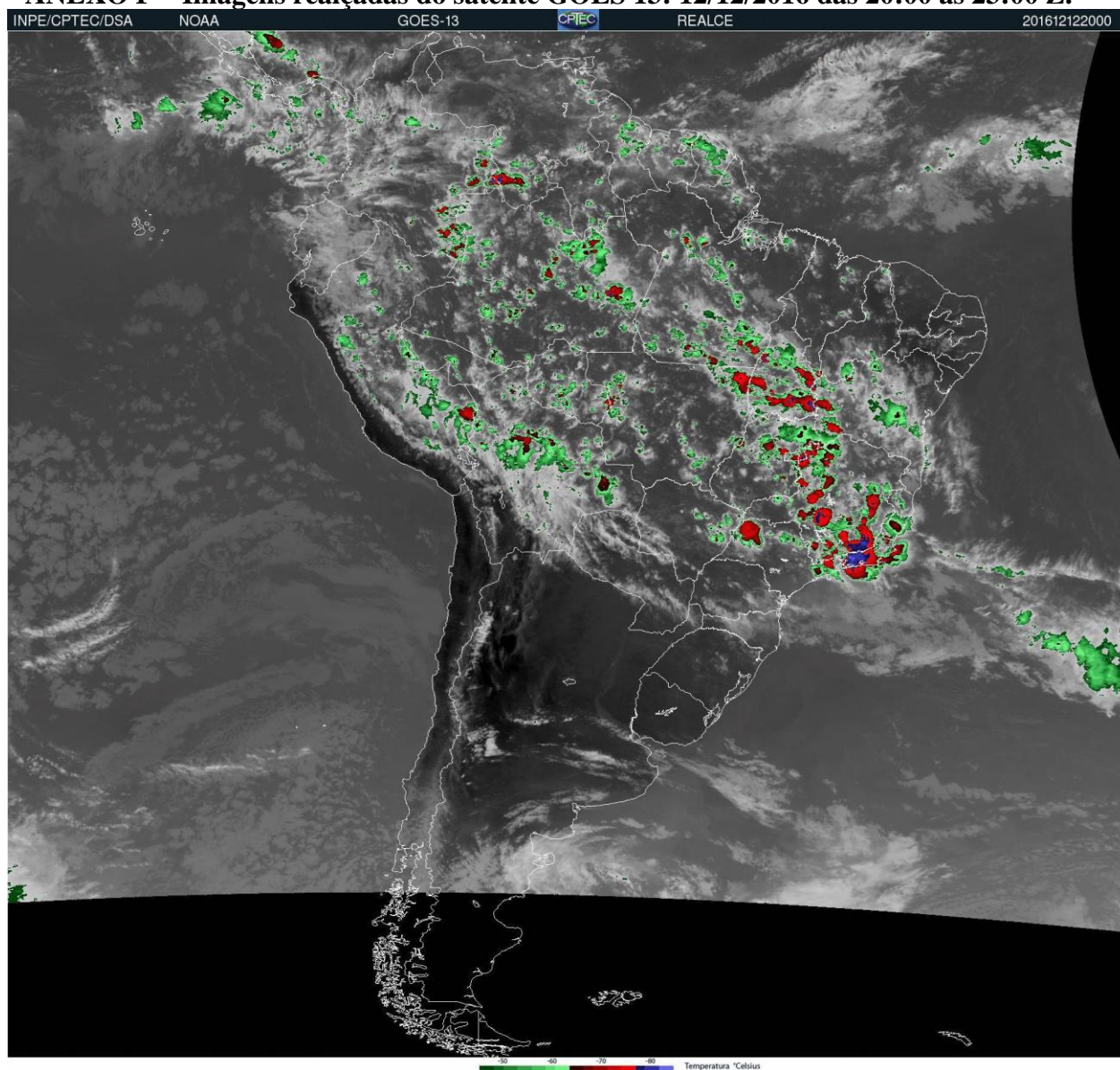
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³².

³² Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO E – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 12/03/2016 das 20:30 às 23:30 Z.

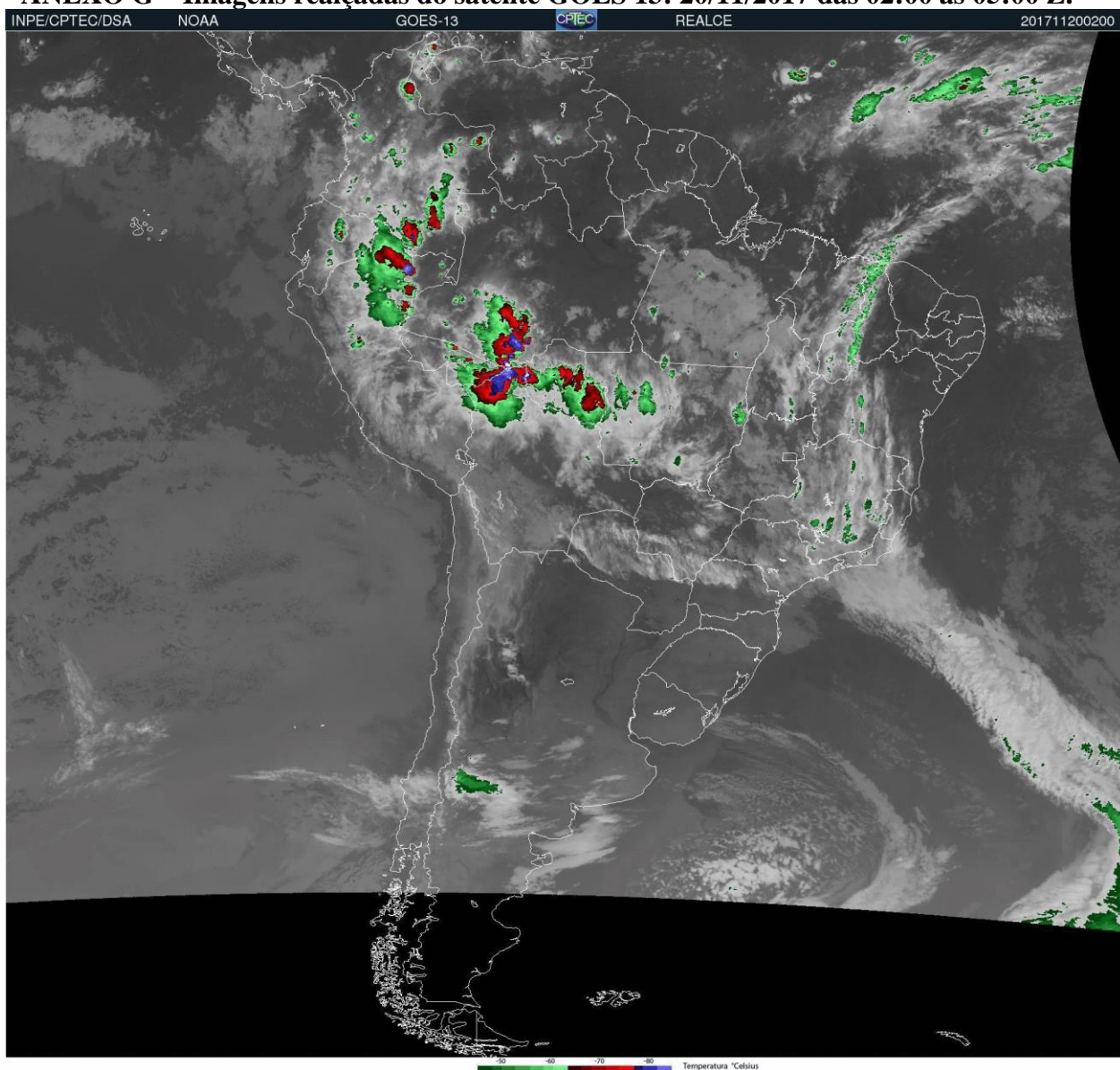
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³³.

³³ Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO F – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 12/12/2016 das 20:00 às 23:00 Z.

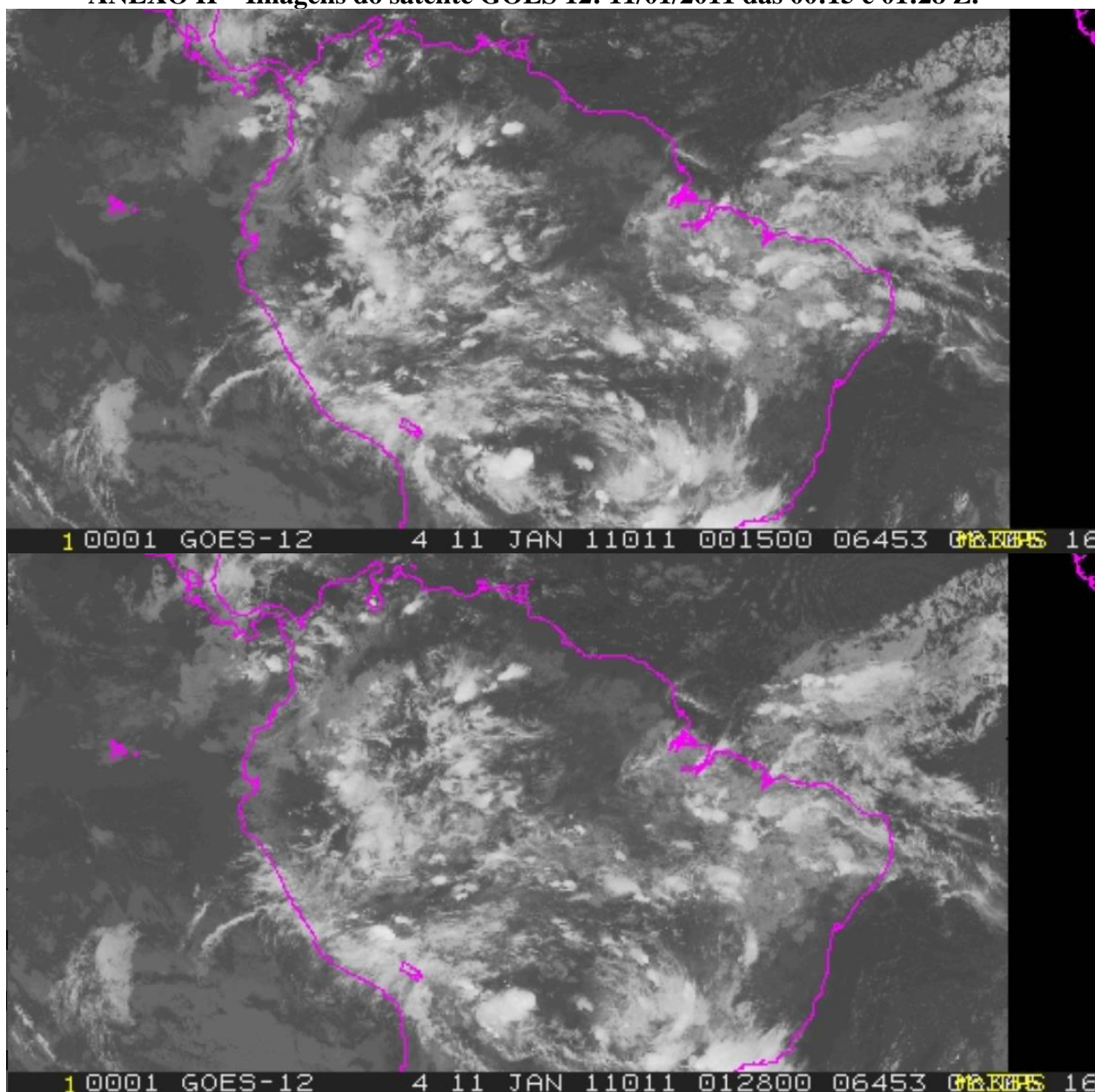
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³⁴.

³⁴ Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO G – Imagens realçadas do satélite GOES 13: 20/11/2017 das 02:00 às 05:00 Z.

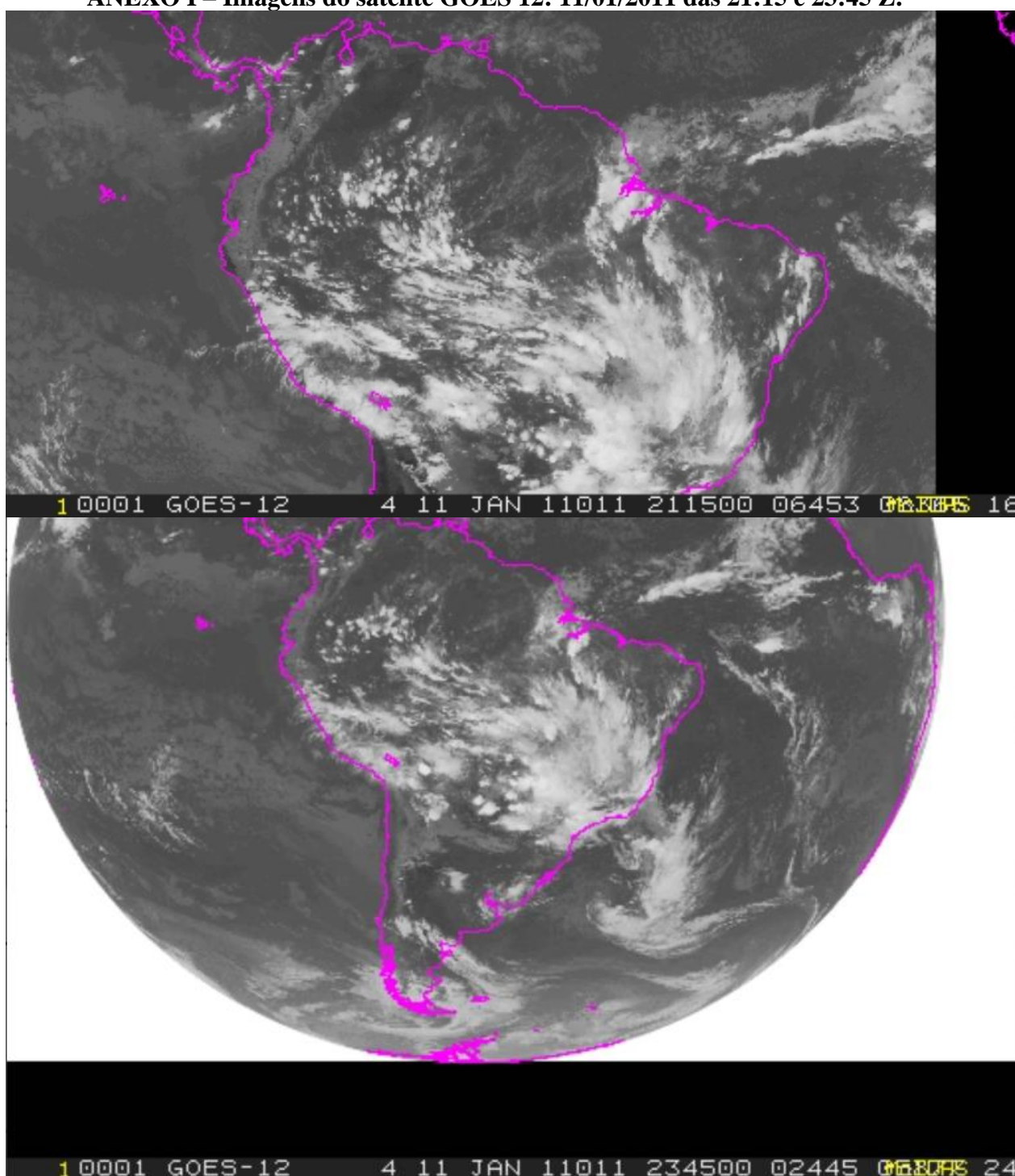
Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³⁵.

³⁵ Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO H – Imagens do satélite GOES 12: 11/01/2011 das 00:15 e 01:28 Z.

Fonte: Satellite Data Services - University of Wisconsin - Madison Space Science and Engineering Center (SSEC)³⁶.

³⁶ Disponível em: <https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/>.

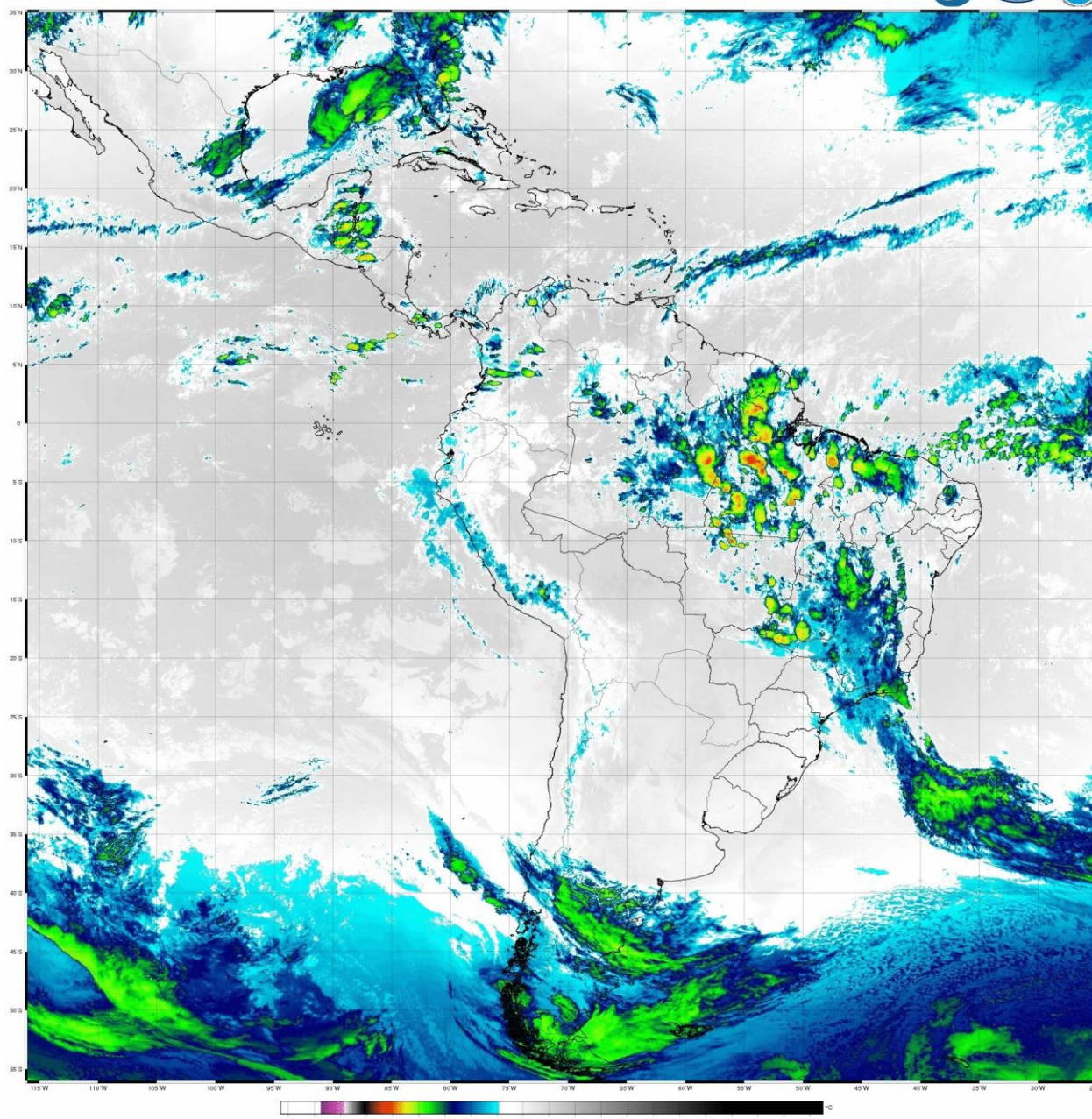
ANEXO I – Imagens do satélite GOES 12: 11/01/2011 das 21:15 e 23:45 Z.

Fonte: Satellite Data Services - University of Wisconsin - Madison Space Science and Engineering Center (SSEC)³⁷.

³⁷ Disponível em: <https://www.ssec.wisc.edu/datacenter/>.

ANEXO J – Imagens do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) - 09/04/2019 das 00:00 às 03:00 Z.

GOES16 - CANAL_12 (9.60 microns)
América Latina: 201904090000 - 201904090009 GMT

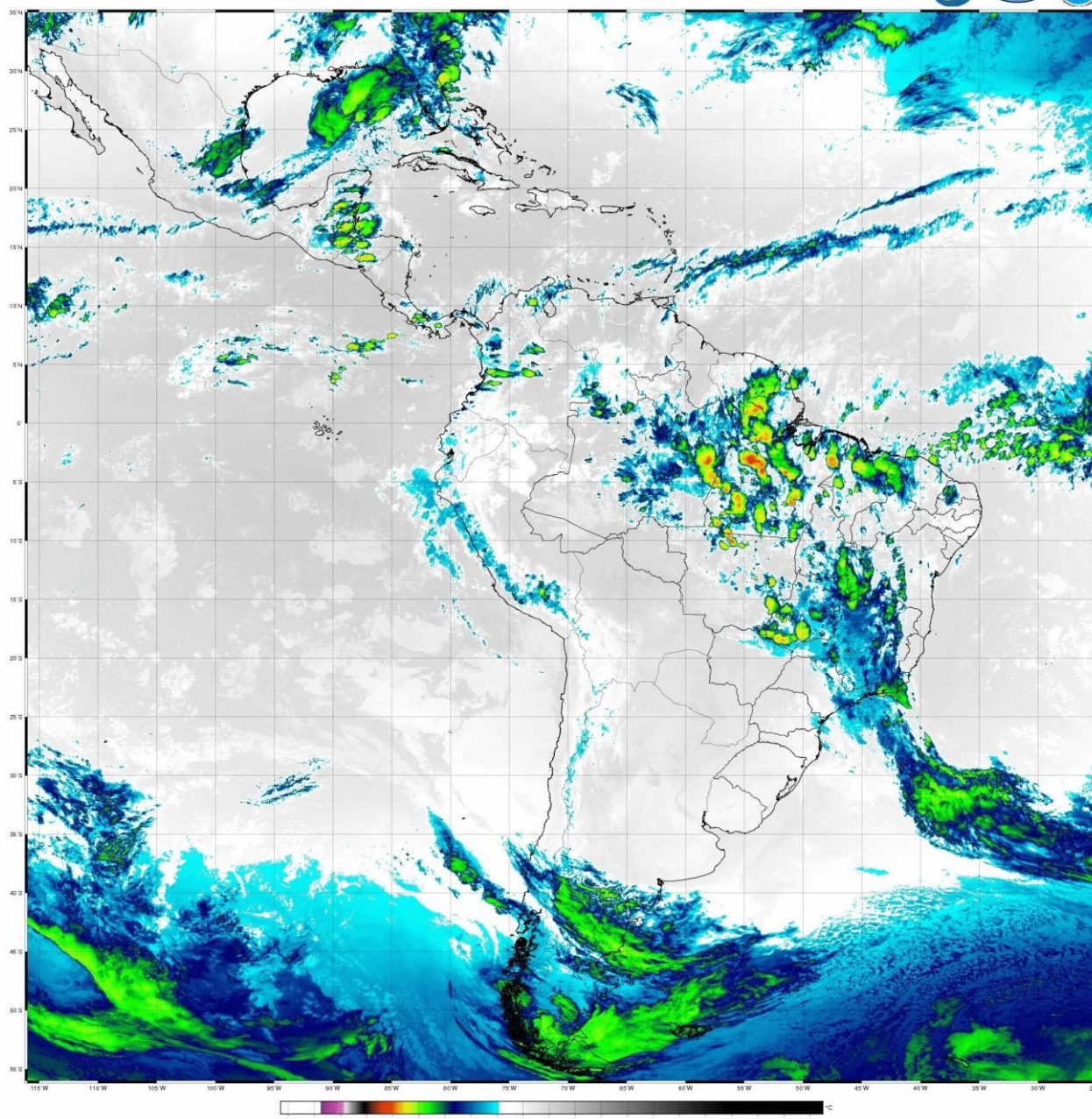


Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³⁸.

³⁸ Disponível em: <https://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.

ANEXO K – Imagens do satélite GOES 16: Canal 12 (9,6 μm) - 09/04/2019 das 08:00 às 11:00 Z.

GOES16 - CANAL_12 (9.60 microns)
América Latina: 201904090000 - 201904090009 GMT



Fonte: INPE-CPTEC-DSA (Inpe, 2024)³⁹.

³⁹ Disponível em: <https://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>.