



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.27.16.40-TDI

OBSERVAÇÃO DE JATOS GIGANTES NO BRASIL E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS

Diego Rhamon Reis da Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Renato Galante Negri, aprovada
em 03 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46E8KH8>>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

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

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

Presidente:

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

Membros:

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.27.16.40-TDI

OBSERVAÇÃO DE JATOS GIGANTES NO BRASIL E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ASSOCIADAS

Diego Rhamon Reis da Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
Renato Galante Negri, aprovada
em 03 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46E8KH8>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Diego Rhamon Reis da.
Si38o Observação de Jatos Gigantes no Brasil e condições meteorológicas associadas / Diego Rhamon Reis da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2022.
xxii + 107 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.27.16.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.
Orientador : Dr. Renato Galante Negri.

1. Descargas elétricas. 2. Relâmpagos. 3. Jato gigante.
4. Meteorologia. 5. Sensoriamento remoto. I.Título.

CDU 551.594.22:528.8



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

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



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE DIEGO RHAMON REIS DA SILVA BANCA Nº 040, REG. 668466/2020.

No dia 03 de março de 2022, às 14h30, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi **APROVADO(A)** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador(es).

Novo título: “Observação de Jatos Gigantes no Brasil e condições meteorológicas associadas”.

Membros da Banca:

Dra. Simone Marilene Sievert Da Costa Coelho - **Presidente** (INPE/DISSM)

Dr. Renato Galante Negri - Orientador (INPE/DISSM)

Dr. Enrique Vieira Mattos -Membro Externo (UNIFEI/IRN)

Dr. Marcelo Saba - Membro Interno (INPE/ DISSM)

Dr. Nelson Jesuz Ferreira - Membro Interno/Suplente (INPE/CGCT)

Dr. Rachel Ifanger Albrecht - Membro Externo/Suplente (USP/IAG)



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Magalhães Fares Saba, Pesquisador**, em 17/03/2022, às 09:13 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Simone Marilene Sievert da Costa Coelho, Pesquisador**, em 17/03/2022, às 09:32 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Galante Negri, Chefe da Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos**, em 17/03/2022, às 09:53 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **eNRIQUE VIEIRA MATTOS (E), Usuário Externo**, em 17/03/2022, às 17:02 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9575532** e o código CRC **BEFCF824**.

Referência: Processo nº 01340.001374/2022-78

SEI nº 9575532

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente à minha mãe e à minha avó, pelo apoio dado durante meu Mestrado. Agradeço também aos colegas da Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET) do INPE pela convivência, embora cuja maioria infelizmente fiquei sem ver por causa da pandemia do coronavírus.

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Renato Galante e Prof. Dr. Enrique Mattos, por terem aceitado o desafio de orientar meu trabalho, principalmente ao Enrique, que, mesmo não conseguindo se efetivar oficialmente como orientador, permaneceu prestando todo o apoio necessário durante todo o meu trabalho. Sou grato também aos seus ensinamentos (em especial pelo grande apoio com a parte de programação) e paciência, além de acreditarem no meu potencial mesmo nos momentos difíceis que aconteceram durante a pesquisa.

Meus agradecimentos à Profa. Dra. Simone Sievert, pelo enorme acolhimento e apoio emocional, e aos membros da banca examinadora desta pesquisa, o Prof. Dr. Marcelo Saba e, mais uma vez, a Profa. Dra. Simone Sievert, pelas considerações pertinentes que permitiram melhor finalizar este trabalho.

Sou grato ao Diego Souza e ao Rogério Batista, do INPE, pelos treinamentos realizados com objetivo de ensinar a abrir e processar imagens de satélites.

Agradeço à rede BRAMON por todo o apoio desde que comecei a fazer parte da rede, e em especial aos operadores Leonardo Amaral, Cláudio Max, Vandson Guedes, Renato Poltronieri, Izaac Leite, Marcelo Zurita e Sérgio Mazzi por gentilmente cederem seus registros de GJs para este trabalho. Agradeço também à CLIMATEMPO e à STARNET por gentilmente cederem os dados de relâmpagos utilizados neste trabalho.

Agradeço ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo durante o Mestrado.

Por fim, de modo geral, meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a realização e o aperfeiçoamento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente trabalho analisou e determinou as características físicas de 13 *gigantic jets* (GJs) registrados em vídeo no Brasil ocorridos entre 2017 e 2021, as características físicas dos sistemas convectivos associados e as características físicas e elétricas dos relâmpagos que geraram os GJs. As características físicas dos GJs (duração, morfologia, altura dos topos) e dos sistemas convectivos associados (temperatura de brilho, taxa de expansão, estágio do ciclo de vida em que ocorreram os GJs), bem como dos relâmpagos (localização relativa ao sistema convectivo) observadas foram semelhantes e condizentes com estudos anteriores realizados em diversas regiões do planeta. As regiões de ocorrência de todos os sistemas convectivos associados os GJs estudados, exceto em um caso, estavam sob influência de anticiclones ou cristas tanto em 250 hPa quanto em 500 hPa, seja nas bordas ou nos seus centros ou eixos. Em 850 hPa e em superfície, a maioria dos casos apresentava a atuação de cavados ou baixas pressões, ou confluência dos ventos nas regiões de ocorrência dos GJs. Os resultados indicam que esta configuração atmosférica pode ser um fator importante na formação de nuvens profundas e na ocorrência de GJs. Todas as observações de GJs analisadas ocorreram durante o período noturno, devido às limitações dos instrumentos utilizados. A inexistência de registros diurnos de GJs até o momento não permite afirmar que a morfologia dos GJs, a profundidade dos sistemas convectivos e as condições atmosféricas na troposfera e na ionosfera favoráveis à ocorrência de GJs possam ser válidas também para o período diurno. Uma característica observacional sistematicamente encontrada nas ocorrências dos GJs estudados foi a presença de ventos fracos a moderados em altos níveis.

Palavras-chave: Descargas elétricas. Relâmpagos. Jato gigante. Meteorologia. Sensoriamento remoto. Tempestades.

OBSERVATION OF GIGANTIC JETS IN BRAZIL AND ASSOCIATED WEATHER CONDITIONS

ABSTRACT

This work analyzed and determined the physical characteristics of 13 gigantic jets (GJs) recorded on video in Brazil occurred between 2017 and 2021, the physical characteristics of the associated convective systems and the physical and electrical characteristics of the lightning that generated the GJs. The physical characteristics of the GJs (duration, morphology, top heights) and of the associated convective systems (brightness temperature, expansion rate, life cycle moment in which the GJs occurred), as well as of lightning (relative location to the convective system) observed were similar and consistent with previous studies conducted in different regions of the planet. The regions of occurrence of all convective systems associated with the GJs studied, except for one case, were under the influence by anticyclones or ridges, both at 250 hPa and 500 hPa, either at the edges or at their centers or axes. At 850 hPa and on the surface, most of the cases presented the action of troughs or low pressures, or wind confluence in the GJs occurrence regions. The results indicate that this atmospheric configuration may be an important factor in the formation of deep clouds and in the occurrence of GJs. All analyzed GJs observations occurred during the night period, due to the instrument's limitations. The absence of diurnal records of GJs does not allow us to affirm that the morphology of GJs, depth of convective systems and the atmospheric conditions in the troposphere and ionosphere favorable to the occurrence of GJs can also be valid for the daytime period. An observational characteristic systematically found in the occurrences of the GJs studied was the presence of light to moderate winds at high levels.

Keywords: Electric discharges. Lightning. Gigantic jet. Meteorology. Remote sensing. Storms.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Ciclo de vida de uma nuvem Cb típica: (a) estágio inicial, (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação.	7
Figura 2.2 - Processo de transferência e distribuição de cargas elétricas no interior de uma nuvem de tempestade de acordo com o processo colisional termoelétrico.....	11
Figura 2.3 - Representações idealizadas de uma estrutura (a) dipolar, (b) tripolar e (c) multipolar de cargas elétricas no interior de uma Cb.	12
Figura 2.4 - Tipos de relâmpagos de acordo com seus locais de formação e propagação.	13
Figura 2.5 - Ilustração de alguns dos processos que envolvem um relâmpago nuvem-solo negativo: (a) distribuição de cargas antes da iniciação do relâmpago, (b) quebra de rigidez preliminar, (c, d, e) líder escalonado, (f) processo de conexão com o solo, (g, h) primeira DR, (i) processos K e J (não abordados neste trabalho), (j, k) líder contínuo e (l) segunda DR.	15
Figura 2.6 - Evolução do líder escalonado e subsequente descarga de retorno observados por uma câmera de alta velocidade em São José dos Campos-SP, em 03/03/2021 às 01:10:34 UTC. O tempo nas imagens, em milissegundos, representa o tempo a partir do horário supracitado.....	15
Figura 2.7 - Representação esquemática dos TLEs conhecidos atualmente...	16
Figura 2.8 - Ciclo de vida do primeiro registro de um <i>gigantic jet</i> , realizado no Laboratório Langmuir, no Novo México, nos Estados Unidos, na noite de 24-25 de julho de 1996.....	20
Figura 2.9 - Cinco <i>gigantic jets</i> registrados sobre uma única tempestade, vistos a partir da Ilha de Reunião, no Oceano Índico, a leste de Madagascar, em 7 de março de 2010.	21
Figura 2.10 - <i>Gigantic jet</i> em fotografia colorida, registrado pela <i>Gemini Cloudcam</i> do <i>National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory</i> (NOIRLab), no Observatório <i>Mauna Kea</i> , no Havaí, em 24 de julho de 2017..	21

Figura 2.11 - Série de quadros (*frames*) desentrelaçados sucessivos de um registro de um GJ em vídeo, com uma taxa de 30 quadros por segundo: (a) LJ (*frames* 27 a 32) e FDJ (*frames* 33 e 34), (b) início do TJ, com grânulos, (c) desenvolvimento do TJ, com grânulos, (d) continuação do TJ, sem grânulos, e (e) novo aumento de brilho da parte inferior do tronco do GJ. 25

Figura 3.1 - Idealização de um *flash* no GLM composto por 2 grupos e 20 eventos relativos a um relâmpago detectado por uma rede *Lightning Mapping Array* (LMA). Os pontos (vermelhos, verdes e azuis) são fontes da LMA, e os quadrados são dados simulados do GLM. O tempo é indicado pela cor, com o vermelho ocorrendo primeiro, o verde depois e o azul por último. A radiância identificada pelo GLM é indicada pela escala de cinza. O centroide é indicado pelo "X". O tempo relativo à ocorrência do *flash* é o momento do primeiro evento (" t_0 "). O grupo vermelho e o azul são próximos o suficiente no tempo e no espaço para serem agrupados em um único *flash*. Os pulsos de LMA verdes não criaram um pulso óptico grande o suficiente para ser detectado pelo simulado pelo GLM. 33

Figura 3.2 - (a) Estimativa do azimute (*az*) da base de um dos GJs estudados com relação à posição da câmera que efetuou o registro; (b) reta traçada entre o local da câmera e um local consideravelmente distante, com ângulo correspondente ao azimute estimado em (a); (c) imagem de satélite correspondente ao momento do GJ. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera; a reta traçada representa o azimute encontrado em (a); os símbolos de "+" e "x" e a bolinha azul representam pontos geográficos obtidos através de detecções de relâmpagos por redes de detecções. 36

Figura 3.3 - Imagem do canal 13 (10,33 μm) do satélite GOES-16 às 04:00 UTC de 26/12/2020 exibida no QGIS (a) sem nenhum filtro de valores de TB, (b) descartando-se valores de TB superiores a 235 K e (c) descartando-se valores de TB superiores a 210 K. Em (d) é exibido o *shapefile* sobreposto à área mostrada em (c). 39

Figura 4.1 - Localização geográfica das estações da BRAMON (dados referentes ao ano de 2021) e de todos os eventos de GJs registrados no Brasil

até 2021. Os GJs estudados neste trabalho estão marcados com “x” e numerados de 1 a 13; os demais estão marcados com “+”.....	42
Figura 4.2 - Características físicas dos GJs estudados neste trabalho, e comparação com trabalhos anteriores realizados por diversos autores: (a) duração total e dos estágios LJ, FDJ e TJ dos GJs; (b) alturas máximas dos GJs nos estágios FDJ e TJ, além da ramificação secundária; (c) larguras máximas dos GJs nos estágios FDJ e TJ.	45
Figura 4.3 - Características físicas dos sistemas convectivos associados aos GJs estudados neste e em outros trabalhos, para os limiares de 235 e 210 K: (a) áreas; (b) temperaturas média e mínima dos topos; (c) taxas de expansão....	49
Figura 4.4 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ1 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ1. O círculo ao lado da sigla “CPV” indica o local da câmera que registrou o GJ1; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimuth correspondente à base do GJ1; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET.....	52
Figura 4.5 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16, correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ1, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ1 e (c) à dissipação do núcleo convectivo associado ao GJ1 e à propagação do sistema convectivo para sudoeste.....	54
Figura 4.6 - (a), (b) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ2 por duas câmeras diferentes (horário em UTC); (c) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ2. Os círculos ao lado das siglas “CMM” e “ROO” indicam os locais das câmeras que registraram o GJ2; as retas traçadas a partir dos locais do registro representam o azimuth correspondente à base do GJ2; a bolinha vermelha sobre a reta do azimuth, na longitude de aproximadamente 55,5°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de <i>flashes</i> pelo GLM.....	56
Figura 4.7 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ2, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ2 e (c) à dissipação do sistema convectivo.....	58

Figura 4.8 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ3 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ3. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ3; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ3; os símbolos de “+” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; a bolinha azul próxima à reta do azimute, na longitude de aproximadamente 58,5°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM. 61

Figura 4.9 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ4 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ4. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ4; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ4; os símbolos de “+” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas azuis próximas à reta do azimute, na longitude de aproximadamente 58,6°W, representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM. 63

Figura 4.10 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ5 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ5. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ5; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ5; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas vermelhas próximas à reta do azimute, na longitude de

aproximadamente 58,6°W, representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM. 65

Figura 4.11 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado aos GJs 3, 4 e 5, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ3, (c) ao sistema no momento do GJ4, (d) ao sistema no momento do GJ5 e (e) ao início da dissipação do sistema. 67

Figura 4.12 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ6 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondente ao momento do GJ6. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ6; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ6; o símbolo de “Δ” sobre o azimute do GJ representa o ponto geográfico escolhido para realizar as estimativas de distâncias e extensões verticais e horizontais do GJ6, devido à ausência de detecções de relâmpagos através de redes em solo e à ausência de dados do GLM. 69

Figura 4.13 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ7 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondente ao momento do GJ7. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ7; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ7; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; o símbolo de “x” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN. 71

Figura 4.14 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ8 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11, correspondente ao momento do GJ8. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ8; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ8; o símbolo de “x” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN. 73

Figura 4.15 - Imagens do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado aos GJs 6, 7 e 8, (b) ao núcleo

convectivo no momento dos GJs 6, 7 e 8 e (c) ao início da dissipação do núcleo convectivo associado aos GJs 6, 7 e 8.	74
Figura 4.16 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ9 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ9. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ9; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ9; a bolinha branca sobre a reta do azimute, na longitude de aproximadamente 57,6°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de <i>flashes</i> pelo GLM.	76
Figura 4.17 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ9, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ9 e (c) ao final da fase mais intensa do sistema convectivo associado ao GJ9.	78
Figura 4.18 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ10 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ10. O círculo ao lado da sigla “JPZ” indica o local da câmera que registrou o GJ10; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ10; as bolinhas brancas nas proximidades da reta do azimute representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de <i>flashes</i> pelo GLM.	79
Figura 4.19 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ10, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ10 e (c) ao início da dissipação do sistema convectivo associado ao GJ10.	81
Figura 4.20 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ11 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ11. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ11; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ11; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede	

ENTLN; as bolinhas azuis próximas à reta do azimute representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM..... 82

Figura 4.21 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ12 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ12. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ12; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ12; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; a bolinha azul próxima à reta do azimute representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM..... 84

Figura 4.22 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início de vários núcleos convectivos intensos, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ11, (c) ao sistema convectivo no momento do GJ12 e (d) ao início da dissipação do sistema convectivo associado aos GJs 11 e 12. 86

Figura 4.23 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ13 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ13. Os círculos ao lado das siglas “SMZ” e “CPJ” indicam os locais das câmeras que registraram o GJ13; a reta traçada a partir do local “SMZ” representa o azimute correspondente à base do GJ13; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas vermelhas próximas à reta do azimute representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM. 88

Figura 4.24 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ13, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ13 e (c) ao início da dissipação do sistema convectivo. 90

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Critérios para definição de um CCM, com base em imagens de satélite no infravermelho.	9
Tabela 3.1 - Eventos de <i>gigantic jets</i> registrados no Brasil até o momento. As datas correspondem aos registros considerando o horário UTC (<i>Coordinated Universal Time</i> , Tempo Universal Coordenado).....	28
Tabela 3.2 - Eventos de <i>gigantic jets</i> estudados neste trabalho. As colunas de data e hora (em UTC) referem-se aos eventos de GJs. As colunas de latitude (Lat), longitude (Lon), altitude (Alt) e ID referem-se à câmera. As colunas de azimute (Az) e elevação (El) referem-se aos valores destas coordenadas no ponto central da imagem da câmera.	29
Tabela 4.1 - Localização geográfica dos GJs estudados e distâncias correspondentes entre estes e os locais das câmeras associadas aos seus registros.....	41
Tabela 4.2 - Características físicas dos GJs estudados neste trabalho, e comparação com trabalhos anteriores realizados por diversos autores. O “número de amostras” refere-se à quantidade de estudos anteriores utilizada para os cálculos dos parâmetros dos GJs.	44
Tabela 4.3 - Características físicas e elétricas dos relâmpagos associados aos GJs estudados, a partir do sensor GLM (duração dos relâmpagos) e das redes ENTLN e STARNET.....	47
Tabela 4.4 - Características físicas dos sistemas convectivos associados aos GJs estudados neste e em outros trabalhos, para os limiares de 235 e 210 K. .	49

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Formação de nuvens	4
2.2 Eletrificação e estrutura elétrica das nuvens de tempestade.....	9
2.3 Relâmpagos.....	12
2.4 Eventos Luminosos Transientes (TLEs)	16
2.4.1 Tipos de Eventos Luminosos Transientes.....	16
2.4.2 Estudos sobre <i>gigantic jets</i>	21
3 DADOS E METODOLOGIA	27
3.1 Rede BRAMON	27
3.2 Dados de relâmpagos.....	30
3.2.1 ENTLN	30
3.2.2 STARNET	30
3.2.3 Sensor <i>Geostationary Lightning Mapper</i> (GLM)	31
3.3 Imagens de satélites	33
3.4 Caracterização física dos GJs	34
3.5 Caracterização física e elétrica dos relâmpagos associados aos GJs	37
3.6 Caracterização física dos sistemas convectivos associados aos GJs	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Caracterização física dos GJs	42
4.2 Caracterização física e elétrica dos relâmpagos associados aos GJs	46
4.3 Caracterização física dos sistemas convectivos associados aos GJs	47
4.4 Caracterização geral de cada evento associado aos GJs	51
4.4.1 GJ1 - 13/03/2017 23:09:53 UTC	51
4.4.2 GJ2 - 16/03/2018 22:44:53 UTC	55
4.4.3 GJ3, GJ4 e GJ5 - 20/04/2019	59
4.4.3.1 GJ3 - 20/04/2019 01:21:47 UTC	59
4.4.3.2 GJ4 - 20/04/2019 01:42:51 UTC	62

4.4.3.3	GJ5 - 20/04/2019 02:01:37 UTC	64
4.4.4	GJ6, GJ7 e GJ8 - 06/01/2020	68
4.4.4.1	GJ6 - 06/01/2020 23:14:06 UTC	68
4.4.4.2	GJ7 - 06/01/2020 23:18:47 UTC	70
4.4.4.3	GJ8 - 06/01/2020 23:21:00 UTC	72
4.4.5	GJ9 - 26/03/2020 04:30:24 UTC	75
4.4.6	GJ10 - 18/04/2020 00:12:53 UTC	78
4.4.7	GJ11 e 12 - 26/12/2020.....	81
4.4.7.1	GJ11 - 26/12/2020 04:00:28 UTC	81
4.4.7.2	GJ12 - 26/12/2020 04:18:01 UTC	83
4.4.8	GJ13 - 22/03/2021 07:35:16 UTC	87
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

Os relâmpagos sempre instigaram o ser humano, tanto devido aos seus mistérios quanto devido ao seu poder destrutivo. Estas intensas descargas elétricas, que ocorrem na atmosfera devido ao grande acúmulo de cargas de polaridades opostas dentro das nuvens, possuem uma duração muito rápida (em média menos de 1 segundo), e podem aparecer sem aviso (NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al., 1986). Eles podem ocorrer limitados ao interior das nuvens, mas também podem se propagar para o solo. Muitas pessoas no mundo já morreram ou tiveram graves sequelas ao serem atingidas por relâmpagos, e continuamente vários setores da economia, como a agropecuária e o setor elétrico, sofrem prejuízos (principalmente com mortes de animais e danos às redes de transmissão, respectivamente). No Brasil, por exemplo, mais de 100 fatalidades relacionadas a relâmpagos acontecem a cada ano (CARDOSO et al., 2014). Por esses e outros motivos, os relâmpagos vêm sendo massivamente estudados há várias décadas.

Os estudos dos relâmpagos podem auxiliar a sociedade de várias formas, como, por exemplo, i) na maneira em que os sistemas de proteção são projetados e operados (TOBIAS et al., 2001), ii) na previsão à curtíssimo prazo de tempo das tempestades severas (GATLIN; GOODMAN, 2010; SCHULTZ et al., 2009, 2011) e iii) na determinação de locais e épocas do ano mais propícios à ocorrência desse fenômeno (ODA et al., 2022).

As observações e relatos de relâmpagos são uma das mais antigas atividades humanas no planeta. Ao mesmo tempo, diversos relatos de relâmpagos “incomuns” ocorrendo acima das nuvens de tempestade também foram realizados ao longo da história. Porém, por motivos diversos, dentre eles a falta de uma documentação em forma de fotografia ou filme, estes relatos foram de certa forma desconsiderados pela comunidade científica (BOECK et al., 1998).

Até que, em 6 de julho de 1989, pesquisadores da Universidade de Minnesota, nos Estados Unidos, estavam conduzindo um experimento de calibração de vários sensores ópticos projetados para um voo de um foguete que realizaria sondagens. Como parte deste experimento, um destes pesquisadores, Dr. Robert Franz, estava testando uma câmera de vídeo de alta sensibilidade à luz,

gravando imagens de estrelas e de uma tempestade distante. Em um certo momento o monitor da câmera mostrou um duplo *flash* de luz acima do horizonte. Dr. Robert Franz e seus colegas então perceberam que haviam registrado algo incomum, e após algumas análises e uma busca na literatura, concluíram que se tratava de um "relâmpago ascendente" que provavelmente se originou de uma tempestade que estava além do horizonte. Pela primeira vez, estava documentado o "relâmpago incomum", fenômeno que por tanto tempo foi desconsiderado e que atualmente é conhecido como *sprite* (BOECK et al., 1998; FRANZ et al., 1990; WINCKLER et al., 1995).

A confirmação da existência dos *sprites*, além de sua aparência, chamou a atenção de muitos investigadores. O vídeo foi mostrado em diversos eventos e locais, incluindo a sede da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), emissoras de TV e a Força Aérea dos Estados Unidos (BOECK et al., 1998). Nos anos seguintes diversas pesquisas passaram a ser realizadas, e novos registros deste fenômeno foram produzidos. Ao mesmo tempo, também foram descobertos outros fenômenos similares, sendo posteriormente agrupados nos chamados Eventos Luminosos Transientes (*Transient Luminous Events* - TLEs).

Uma característica que enfatiza a importância dos estudos de TLEs é o fato de a maioria destes ser gerada por processos de ionização de gases, na sua maioria nitrogênio e oxigênio. Estes gases, quando ionizados, podem desencadear reações eletroquímicas que por sua vez podem alterar a composição química da média e alta atmosfera, produzindo, por exemplo, NO_x, que são gases que possuem grande potencial de afetar a camada de ozônio (ARNONE et al., 2008; AZAMBUJA, 2013).

Um TLE em particular, o jato gigante (*gigantic jet* - GJ), vem recebendo atenção recentemente, e um dos motivos é a sua raridade. Sendo registrado pela primeira vez somente em 1996 (STANLEY et al., 1996), os GJs já foram observados em diversos lugares do mundo, como Estados Unidos, Europa, Ásia, Oceania, leste da África e norte da América do Sul. Porém, somente em 2017 foi registrado o primeiro GJ no Brasil, e até o presente momento não há nenhum estudo publicado sobre os GJs que ocorreram neste país desde então.

Para estudar TLEs, como por exemplo os GJs, podem ser utilizadas diversas ferramentas, como imagens de câmeras de vídeo (com diversas configurações possíveis), fotômetros, redes de detecções de relâmpagos, imagens de satélite, imagens de radar, entre outros. As câmeras de vídeo fornecem um mapeamento completo da propagação do evento, tornando possível calcular suas dimensões físicas (tamanho e largura), enquanto redes de relâmpagos em solo permitem estimar as características (tipo - intra-nuvem ou nuvem-solo -, polaridade e pico de corrente) dos relâmpagos precursores do GJs. Em adição, o mapeamento através de imagens de satélites nos canais do infravermelho com adequada resolução temporal e espacial (o sensor *Advanced Baseline Imager - ABI - do Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES-16* -, por exemplo, possui resolução espacial e temporal de 2 km e 10 minutos, respectivamente) permite acompanhar a evolução do ciclo de vida da nuvem de tempestade que gerou determinado GJ, e permite também determinar parâmetros como tamanho, altura, excentricidade e taxa de crescimento. A sinergia de tal aparato experimental pode fornecer informações mais completas sobre as características dos GJs e com isso aprofundar esse conhecimento que ainda é bastante incipiente na comunidade científica nacional e internacional.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi analisar, pela primeira vez, eventos de *gigantic jets* ocorridos no Brasil. Para tal objetivo ser alcançado, foram estipulados os objetivos específicos:

- a) Analisar as características físicas dos GJs, como duração, altura dos topos e das bases e morfologia;
- b) Analisar as características dos relâmpagos associados aos GJs, como tipo de relâmpago, polaridade, pico de corrente, e local da nuvem em que o relâmpago ocorreu;
- c) Analisar as características físicas das nuvens de tempestade associadas aos GJs, como temperatura dos topos, estágio do ciclo de vida, área de cobertura, e possível sistema de escala sinótica associado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Formação de nuvens

As nuvens estão entre os principais fenômenos da atmosfera terrestre que ajudam a promover o equilíbrio térmico da Terra. Mudanças na cobertura de nuvens podem causar alterações no balanço global de radiação da Terra, através do chamado “*feedback* nuvem-radiação”. Este processo pode ser definido como sendo o impacto das variações das nuvens no clima da superfície terrestre devido às modificações do balanço de radiação e ao impacto das mudanças climáticas correspondentes na redistribuição global das nuvens (SOHN; SMITH, 1992). Slingo e Slingo (1988) sugeriram que os efeitos da interação entre radiação e nuvens podem ser tão importantes quanto a liberação de calor latente em termos de resposta atmosférica a uma fonte anômala de calor. As nuvens são muito importantes também no que tange à produção de precipitação, essencial para a manutenção do ciclo hidrológico, para a agricultura, e, em uma visão mais geral, para a manutenção da vida na Terra (VAN STAN II et al., 2020).

A formação das nuvens ocorre inicialmente a partir da ascensão de parcelas de ar na atmosfera, que se resfriam e se tornam supersaturadas (ou seja, quando ultrapassam a pressão de equilíbrio entre o vapor e a água líquida; em outras palavras, quando a umidade relativa do ar ultrapassa 100%) (WALLACE; HOBBS, 2006). A formação e a manutenção de uma nuvem dependem de alguns fatores, cujos principais são: i) quantidade de vapor d’água disponível na atmosfera, ii) grau de instabilidade vertical da atmosfera e iii) mecanismos denominados forçantes dinâmicos, como relevo, brisas e sistemas de escala sinótica (WALLACE; HOBBS, 2006).

As nuvens assim formadas podem conter partículas sólidas e líquidas de água em seu interior. A formação desses hidrometeoros ocorre no âmbito da microfísica da nuvem. Para isto existem dois processos de nucleação de gotículas e cristais de gelo possíveis: i) homogênea e ii) heterogênea. A nucleação homogênea consiste na formação de gotículas de água totalmente

puras (sem presença de aerossol) na atmosfera. Porém, esse processo é pouco provável de ocorrer, pois depende de valores de umidade relativa muito maiores do que 100%, o que não ocorre naturalmente na atmosfera (ROGERS; YAU, 1989). Sendo assim, o provável processo responsável pela formação dos embriões de uma gotícula d'água é o processo conhecido como nucleação heterogênea, que ocorre com a presença de núcleos de condensação (*Cloud Condensation Nuclei* - CCN). Os CCN são partículas (aerossóis) microscópicas na forma líquida ou sólida e que possuem afinidade com a água. Neste processo o vapor d'água se condensa sobre os CCN, e isto pode ocorrer mesmo com umidade relativa abaixo de 100% (ROGERS; YAU, 1989).

Em ambientes com temperaturas abaixo de 0°C, a nucleação resulta na formação de cristais de gelo, de forma semelhante à formação de gotículas d'água. Porém, esta nucleação ocorre nos núcleos de gelo (*Ice Nuclei*), diretamente pela deposição do vapor em cristais de gelo ou a partir de gotículas de água preexistentes que congelam naturalmente, por contato ou por imersão (HOOSE; MÖHLER, 2012). Se a temperatura do ar for inferior a aproximadamente -38°C, a nucleação poderá ocorrer mesmo sem a presença de núcleos de gelo; ou seja, poderá ser homogênea (PRUPPACHER; KLETT, 1997).

Nuvens que se formam e se mantêm completamente em regiões da atmosfera com temperaturas acima (abaixo) de 0°C são denominadas nuvens quentes (frias). Em regiões com temperaturas entre 0 e -15°C podem coexistir cristais de gelo e gotículas d'água super-resfriadas, e nuvens existentes nestas regiões são denominadas nuvens mistas (WALLACE; HOBBS, 2006). Além disso, as nuvens podem ser classificadas como estratiformes e convectivas. Nuvens estratiformes possuem dimensões horizontais muito maiores que suas dimensões verticais e suas correntes ascendentes são consideravelmente fracas, enquanto as nuvens convectivas possuem fortes correntes ascendentes e dimensões horizontais e verticais da mesma ordem de grandeza (ROGERS; YAU, 1989).

Dependendo da profundidade vertical de uma nuvem convectiva, esta pode conter tanto gotículas d'água, nas proximidades da sua base, quanto cristais de gelo, nas proximidades do seu topo. Quando uma nuvem com estas características produz relâmpagos, é denominada de *Cumulonimbus* (Cb) ou nuvem de tempestade (RAKOV; UMAN, 2003). As Cbs são as nuvens com maior espessura vertical existentes na atmosfera e podem produzir, além dos relâmpagos, chuva e ventos fortes, granizo e até mesmo tornados. Por terem o potencial de causar danos à sociedade, as Cbs têm sido estudadas há bastante tempo (WALLACE; HOBBS, 2006).

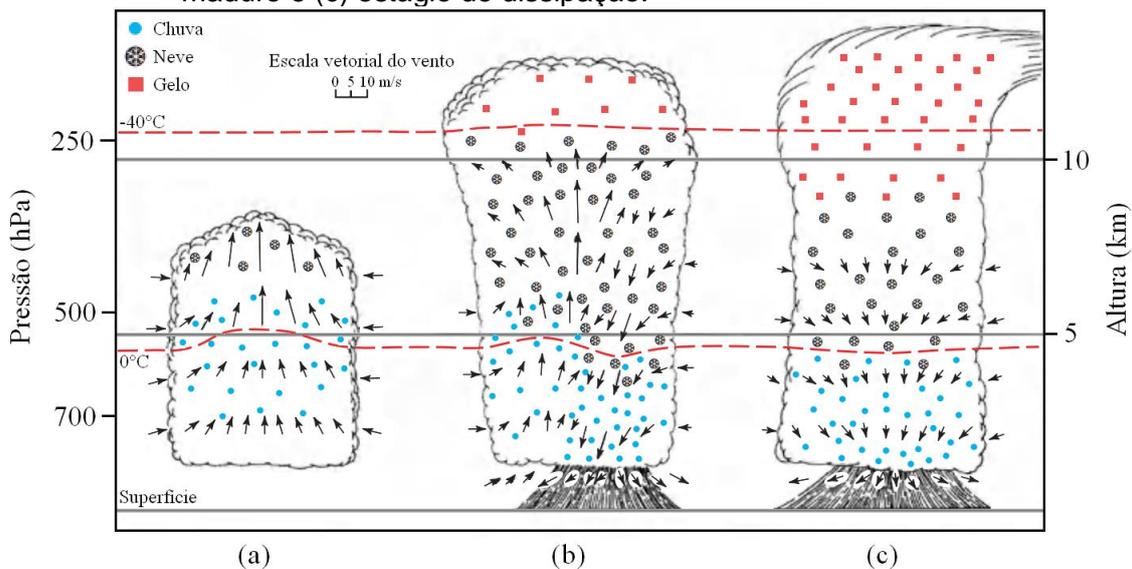
Em uma típica nuvem Cb podem ser encontrados vários tipos de hidrometeoros: gotículas de água líquida, gotículas de água líquida super-resfriada, gotas de chuva, cristais de gelo, grãos de gelo (*graupel*) e granizo. No interior de uma Cb um cristal de gelo, ao sofrer sucessivas colisões com gotículas de água super-resfriadas que congelam em sua superfície no momento das colisões, aumenta sua massa. Esse crescimento é denominado *riming* (incrustação). Essa denominação faz referência às estruturas formadas nas bordas dos cristais de gelo após a colisão com as gotículas super-resfriadas. Quando a forma original do cristal de gelo não é mais discernível, este é chamado de *graupel*. Quando um *graupel* cresce excessivamente, é denominado granizo (WALLACE; HOBBS, 2006).

Os cristais de gelo dentro de uma Cb também podem colidir entre si, principalmente devido aos diversos formatos (placa, coluna, estrela) que estes cristais podem possuir, o que resulta em velocidades terminais diferentes. Assim, eles crescem de tamanho, podendo resultar em cristais de neve que acabam por precipitar. O crescimento por colisão também pode ser influenciado pela eficiência de aderência entre dois cristais, que depende da temperatura e também dos seus formatos. Por exemplo, cristais com formato dendrítico ao colidirem se aderem facilmente devido às suas diversas ramificações (WALLACE; HOBBS, 2006).

As nuvens de tempestade também podem ser classificadas, de acordo com sua organização, em: i) unicelulares, ii) multicelulares e iii) supercelulares. As

tempestades unicelulares, também conhecidas como tempestades individuais, são as menores, e são produzidas a partir de convecção local. Normalmente estão em um ambiente com fraco cisalhamento vertical de vento (variação na intensidade e/ou direção do vento com a altura), possuem um tempo de vida curto, geralmente de 20 a 30 minutos, e raramente provocam granizo ou ventos destrutivos. A evolução do ciclo de vida de uma Cb individual é comumente dividida em estágio inicial (ou estágio *Cumulus*), estágio maduro e estágio de dissipação (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 1997a; WALLACE; HOBBS, 2006). O principal parâmetro para a divisão dos estágios de desenvolvimento é a proporção entre as correntes ascendentes e descendentes presentes na nuvem. Estes três estágios são mostrados na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Ciclo de vida de uma nuvem Cb típica: (a) estágio inicial, (b) estágio maduro e (c) estágio de dissipação.



Fonte: Adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

No estágio inicial (Figura 2.1a), denominado iniciação, a nuvem é composta inteiramente por gotículas d'água, podendo estar presentes gotículas super-resfriadas, e é dominada por correntes ascendentes. À medida que a nuvem se eleva na atmosfera, começam a se formar cristais de gelo no topo da nuvem e suas gotículas se tornam cada vez maiores, até que não conseguem mais se

sustentar no ar e começam a cair, gerando a precipitação que compõe as correntes descendentes. Nesse momento a Cb atinge seu estágio maduro (Figura 2.1b), onde ocorrem precipitações e ventos mais intensos, relâmpagos, granizo e até tornados. Após determinado tempo as correntes descendentes acabam por dominar sobre as correntes ascendentes, que desaparecem, e assim a Cb atinge o estágio de dissipação (Figura 2.1c). A partir desse momento, os relâmpagos cessam e a precipitação se torna cada vez mais fraca até desaparecer por completo, sobrando apenas parte do topo da nuvem, que por fim também desaparece (WALLACE; HOBBS, 2006).

Em contrapartida, as tempestades multicelulares são compostas por aglomerados de células em vários estágios de desenvolvimento, unidas entre si, cujo conjunto se move como uma única célula. Possuem um potencial de severidade mais alto, principalmente relacionado a altos índices de precipitação, e podem ser organizadas em formato mais ou menos circular (*cluster*) ou em forma de linha, dependendo do cisalhamento do vento (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 1997b; WALLACE; HOBBS, 2006).

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) são um tipo particular de tempestade multicelular. São formados por aglomerados de nuvens de tempestade quando diversas células convectivas se unem e se organizam em um sistema único, que possui um longo tempo de vida (até mais de 1 dia) e pode abranger uma área de centenas de quilômetros. Possuem duas regiões principais: i) a região convectiva, onde se encontram as células mais profundas e forte precipitação, granizo e às vezes tornados, e ii) a região estratiforme, onde se encontram as células em fase de dissipação, com chuva leve/moderada e de forma contínua (HOUZE JUNIOR, 2004). Um caso especial de SCM é o Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), definido pela primeira vez por Maddox (1980). Os CCMs são sistemas quase circulares com longo tempo de vida e com topos de nuvens extremamente frios no canal do infravermelho (IR) em imagens de satélite (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Critérios para definição de um CCM, com base em imagens de satélite no infravermelho.

	Características físicas
Tamanho	A: Escudo de nuvens com temperatura no IR $\leq -32^{\circ}\text{C}$ e área ≥ 100 mil km^2
	B: Região interna de nuvens mais frias, com temperatura $\leq -52^{\circ}\text{C}$ e área ≥ 50 mil km^2
Início	Quando as definições A e B de tamanho forem satisfeitas
Duração	Quando as definições A e B de tamanho forem mantidas por 6h ou mais
Extensão máxima	Quando o escudo contíguo de nuvens frias ($\leq -32^{\circ}\text{C}$) atingir o tamanho máximo
Forma	Excentricidade $\geq 0,7$ no momento da extensão máxima
Término	Quando as definições A e B de tamanho não forem mais satisfeitas

Fonte: Adaptada de Maddox (1980).

As Linhas de Instabilidade (LIs) fazem parte dos SCMs, mas diferem por terem uma estrutura em forma de uma estreita e comprida linha de células convectivas, mais ou menos contínua. As LIs podem durar várias horas e se formam de diversas maneiras, mas as principais são a partir de frentes frias e brisas (HOUZE JUNIOR, 1977; WALLACE; HOBBS, 2006).

Por fim, as tempestades supercelulares são as menos comuns, porém as mais perigosas. São compostas por uma grande célula única, cuja principal característica é a presença de uma corrente ascendente muito intensa e com rotação. Formam-se em ambientes com grande instabilidade atmosférica e forte cisalhamento vertical de vento e possuem grande potencial de produzir tempo severo, como chuva e ventos fortes, granizo e tornados (UNIVERSITY OF ILLINOIS, 1997c; WALLACE; HOBBS, 2006).

2.2 Eletrificação e estrutura elétrica das nuvens de tempestade

Desde 1752, quando Benjamin Franklin provou a existência de cargas elétricas no interior das nuvens de tempestade, muito se tem estudado sobre os processos que conduzem à eletrificação de uma nuvem e de que maneira os centros de cargas se organizam no seu interior. Porém, devido à grande complexidade e quantidade de variáveis envolvidas nestes processos, a temática de eletrificação das nuvens ainda demanda muita pesquisa.

Mesmo assim, várias teorias foram sendo construídas a respeito do processo de eletrificação das tempestades. A teoria mais aceita atualmente sugere que o principal mecanismo de separação e distribuição das cargas elétricas nestas nuvens é a colisão entre o granizo/*graupel* e cristais de gelo ou gotículas super-resfriadas, gerada pelas correntes ascendentes e descendentes e pela turbulência no interior da nuvem (WALLACE; HOBBS, 2006; WILLIAMS, 1988).

A primeira teoria foi proposta por Elster e Geitel (1913), que consideraram o granizo como uma esfera condutora. Neste mecanismo, o deslocamento do granizo ocorre no interior da nuvem, imersa em um campo elétrico denominado “de tempo bom”. Assim, as cargas elétricas seriam induzidas no granizo, onde sua parte superior (inferior) se torna negativa (positiva). Assim, quando a parte inferior do granizo colide com um cristal de gelo, cargas positivas são removidas do granizo (tornando-o carregado negativamente) e transferidas para o cristal de gelo (tornando-o carregado positivamente). O granizo, mais pesado, se acumula na base da nuvem, e os cristais de gelo permanecem em regiões mais altas, resultando em uma estrutura dipolar dentro da nuvem (Figura 2.3a). Esse processo é denominado colisional indutivo (JAYARATNE, 2003; MASON, 1988).

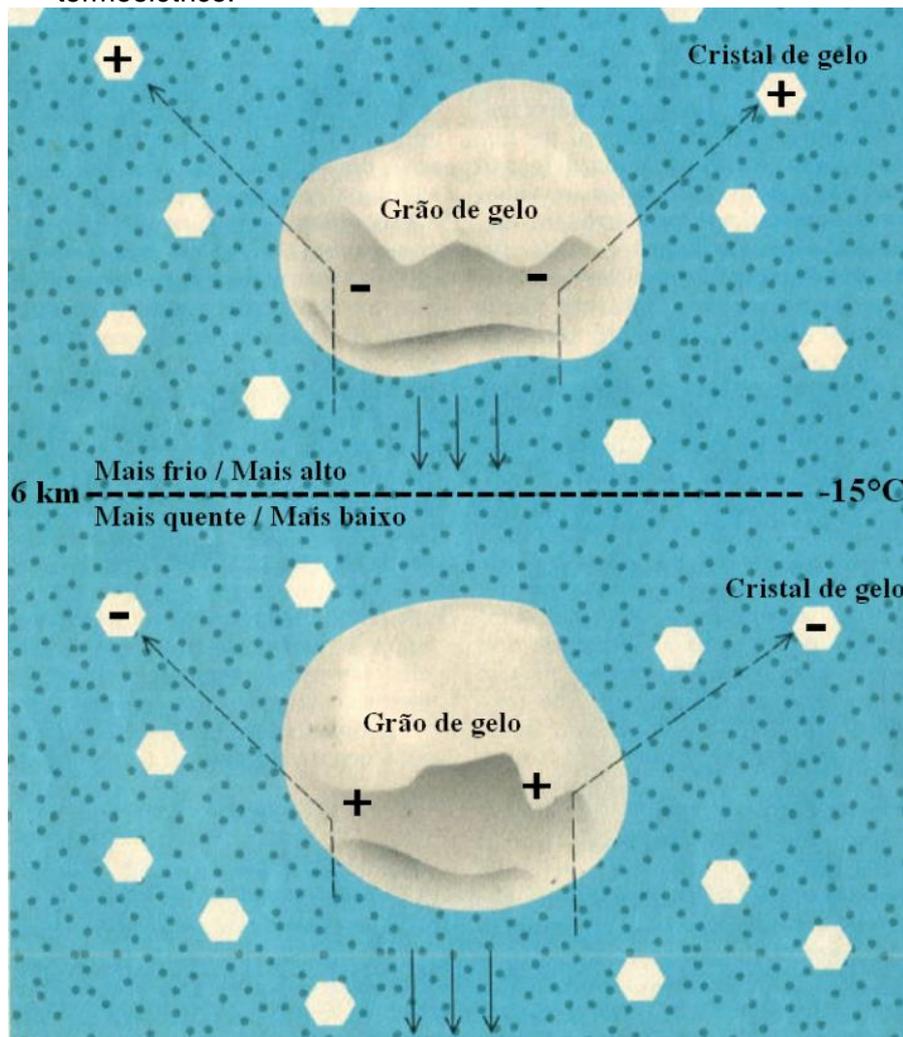
Neste tipo de estrutura, o centro de cargas positivas se situa próximo ao topo da nuvem e o centro de cargas negativas se situa aproximadamente na região de temperaturas entre -10°C e -15°C . Além disso, na borda superior (inferior) da nuvem existe uma “camada de blindagem” negativa (positiva), formada quando gotículas de água e cristais de gelo capturam íons da atmosfera no entorno da nuvem (IRIBARNE; CHO, 1980).

Porém, estudos posteriores sugeriram que o campo elétrico “de tempo bom” não seria suficiente para induzir cargas no granizo. Além disso, foi observada, em muitas ocasiões, uma estrutura tripolar dentro das Cbs, que não poderia ser explicada pelo processo colisional indutivo. Portanto, outros processos seriam responsáveis por esse fenômeno (TAKAHASHI, 1978). A partir da década de 50, passou-se a considerar um modelo diferente de estrutura elétrica de uma tempestade. Este modelo considera um processo denominado de colisional não-indutivo. O conceito envolvido no modelo não-indutivo é o processo

termoelétrico. Neste processo a polaridade das cargas que são removidas do granizo e transferidas para os cristais de gelo depende da temperatura do ar no local em que a colisão ocorre (TAKAHASHI, 1978; WILLIAMS, 1988).

A temperatura crítica em que ocorre a inversão da polaridade das cargas removidas do granizo é em torno de -15°C , em uma região situada em aproximadamente 6 km de altitude (WILLIAMS, 1988). Acima desta temperatura o granizo se torna carregado positivamente e os cristais, negativamente; abaixo desta temperatura ocorre o inverso (Figura 2.2). Como resultado, a distribuição de cargas resulta na estrutura tripolar no interior da tempestade (Figura 2.3b).

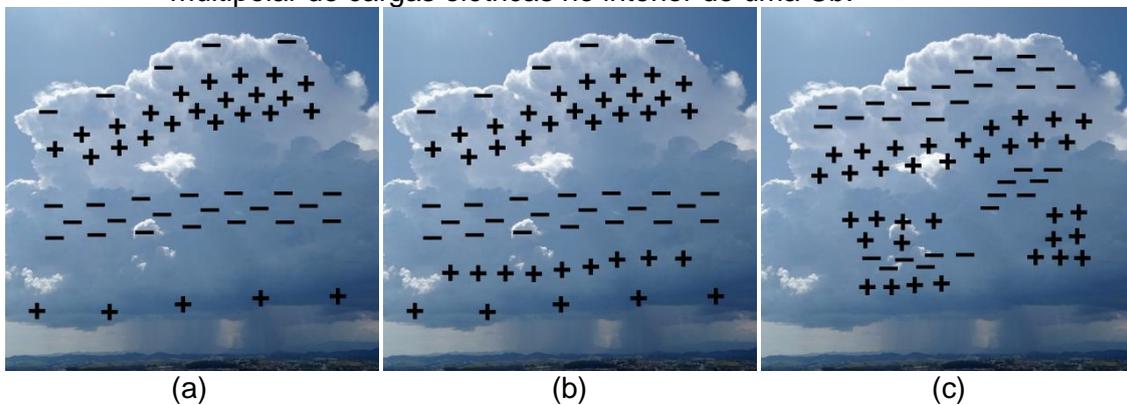
Figura 2.2 - Processo de transferência e distribuição de cargas elétricas no interior de uma nuvem de tempestade de acordo com o processo colisional termoelétrico.



Fonte: Adaptada de Williams (1988).

Nas últimas décadas vários estudos utilizando-se de balões estratosféricos verificaram que a estrutura de uma Cb pode ser bem mais complexa. Estes estudos propõem uma estrutura com vários centros de cargas negativas e positivas alternados entre si e com intensidades variadas, sendo assim chamada de multipolar (Figura 2.3c). Esta estrutura estaria dividida em quatro centros de cargas na região das correntes ascendentes e seis centros na região das correntes descendentes (STOLZENBURG et al., 1998).

Figura 2.3 - Representações idealizadas de uma estrutura (a) dipolar, (b) tripolar e (c) multipolar de cargas elétricas no interior de uma Cb.



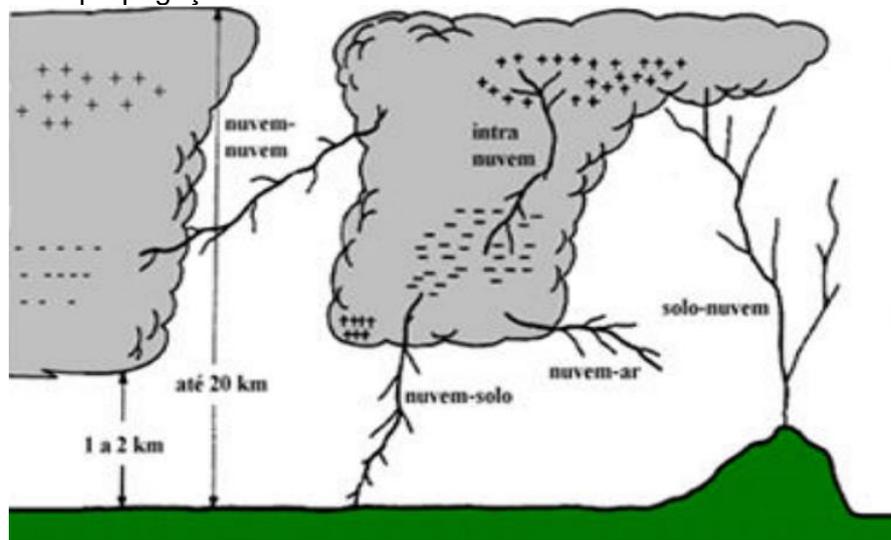
Fonte: Produção do autor.

2.3 Relâmpagos

Como discutido anteriormente, durante a evolução de uma nuvem de tempestade, centros de cargas elétricas são criados e se intensificam com o tempo. Porém, a capacidade de isolamento (rigidez dielétrica) do ar possui um limite, e quando o campo elétrico dentro da nuvem supera esse limite, ocorre uma intensa descarga elétrica entre dois centros de carga, denominada relâmpago (RAKOV; UMAN, 2003). Os relâmpagos (ou raios) são fenômenos com curta duração (da ordem de frações de segundo, em média), extensão de propagação da ordem de alguns quilômetros e altos valores de pico de corrente (podendo ultrapassar 300 mil *ampères*). Ocorrem em grande parte do globo, com maior frequência nas regiões tropicais e no verão (ALBRECHT et al., 2016; NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al., 1986).

Existem diversos tipos de relâmpagos, entre eles: i) intra-nuvem (IN): iniciam e terminam dentro da mesma nuvem; ii) entre-nuvens (EN): iniciam na nuvem e se propagam para uma nuvem vizinha; iii) nuvem-ar (NA): iniciam na nuvem e terminam nas suas vizinhanças, fora da área da nuvem; iv) nuvem-solo (NS): iniciam na nuvem e terminam no solo; v) solo-nuvem ou ascendentes (SN): iniciam no solo e terminam na nuvem (OGAWA, 1995). Uma ilustração destas formas de ocorrência de relâmpagos é mostrada na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Tipos de relâmpagos de acordo com seus locais de formação e propagação.



Fonte: Adaptada de Silva (2014).

Os relâmpagos IN são os mais frequentes, representando cerca de 70% do total. Isto se deve à diminuição da capacidade isolante do ar com altura e ao fato de dentro da nuvem os centros de cargas estarem mais próximos entre si. Porém, os relâmpagos mais estudados são os NS, provavelmente devido ao seu alto potencial de provocar prejuízo ao patrimônio e à sociedade (UMAN, 1987). Um relâmpago NS pode ser negativo, positivo ou bipolar. Cerca de 90% dos relâmpagos NS são negativos, 9% são positivos e apenas 1% são bipolares (RAKOV, 2003; WALLACE; HOBBS, 2006; WILLIAMS, 2001).

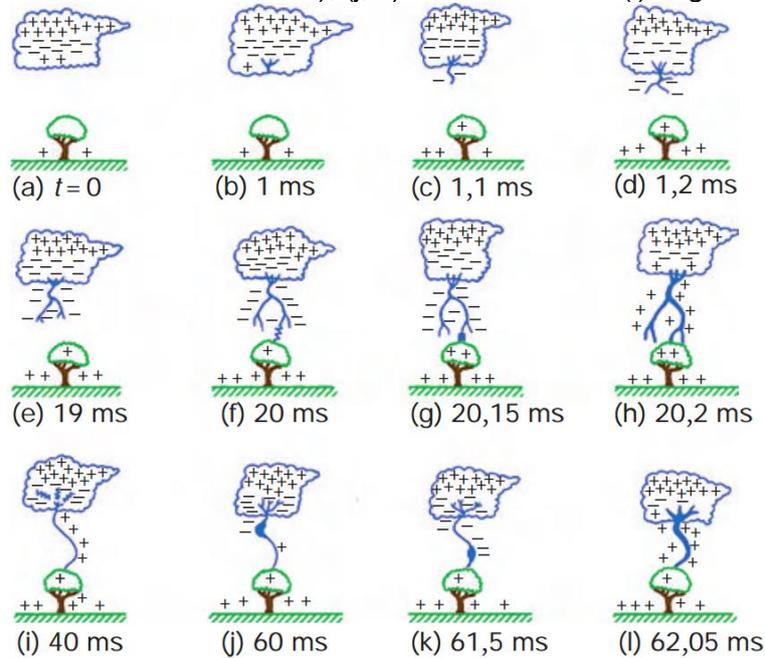
Com exceção dos relâmpagos ascendentes, todos os outros relâmpagos originam-se dentro da nuvem, a partir de pequenas descargas em um processo

denominado de “quebra de rigidez preliminar”. A partir desse momento, no caso dos relâmpagos NS negativos, estas descargas se propagam de forma intermitente, na horizontal e/ou em direção ao solo, em forma de “passos” discretos, cada um com algumas dezenas de metros de comprimento, com pausas de 20 a 100 microssegundos, sendo chamadas de líder escalonado (OGAWA, 1995).

Durante sua evolução, o líder escalonado vai percorrendo caminhos onde há relativamente maior condutividade elétrica no ar, formando diversas ramificações. À medida que se aproxima do solo, chegando a poucas dezenas de metros de distância deste, o campo elétrico na região do solo logo abaixo do líder escalonado aumenta de tal forma que a capacidade de isolamento do ar é rompida também nessa região. Assim, são geradas uma ou mais descargas que se originam do solo e propagam-se para cima, chamadas de líderes conectivos. Quando um destes líderes se conecta com o líder escalonado, ocorre um intenso transporte de cargas através de uma “onda” positiva de ionização que se inicia a partir do solo (ou logo acima deste) e se propaga para cima percorrendo todo o canal do relâmpago, com um terço da velocidade da luz, gerando boa parte da luminosidade visível ao olho humano. Esse fenômeno é denominado de descarga de retorno (DR) (OGAWA, 1995). O desenvolvimento de um relâmpago NS negativo é mostrado nas Figuras 2.5 e 2.6.

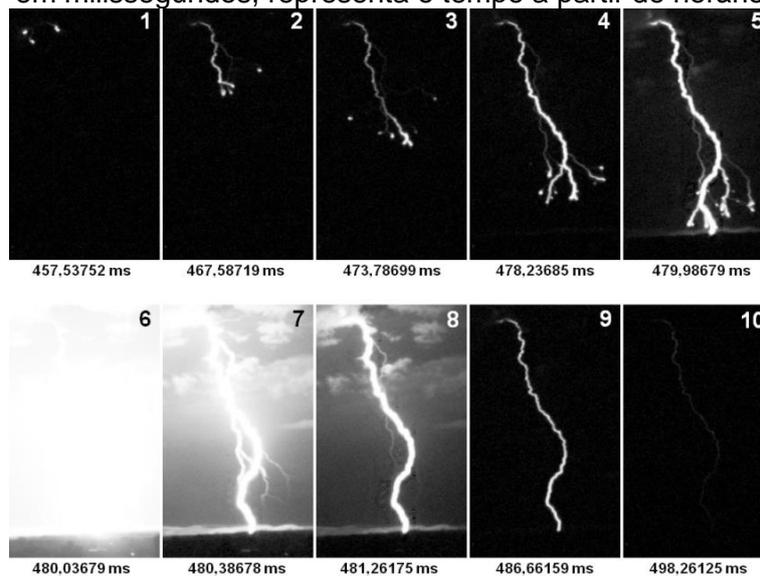
Normalmente, após alguns microssegundos, um novo líder (denominado líder contínuo) pode surgir, percorrendo o mesmo canal do líder escalonado (porém de forma muito mais rápida e sem ramificações nem “passos”), e chegar até o solo, gerando uma nova DR. Em geral, os relâmpagos NS negativos possuem de duas a quatro DRs enquanto a grande maioria dos relâmpagos NS positivos possui apenas uma (MAZUR, 2002; NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al., 1986; RAKOV, 2003; WALLACE; HOBBS, 2006).

Figura 2.5 - Ilustração de alguns dos processos que envolvem um relâmpago nuvem-solo negativo: (a) distribuição de cargas antes da iniciação do relâmpago, (b) quebra de rigidez preliminar, (c, d, e) líder escalonado, (f) processo de conexão com o solo, (g, h) primeira DR, (i) processos K e J (não abordados neste trabalho), (j, k) líder contínuo e (l) segunda DR.



Fonte: Adaptada de Wallace e Hobbs (2006).

Figura 2.6 - Evolução do líder escalonado e subsequente descarga de retorno observados por uma câmera de alta velocidade em São José dos Campos-SP, em 03/03/2021 às 01:10:34 UTC. O tempo nas imagens, em milissegundos, representa o tempo a partir do horário supracitado.



Fonte: Produção do autor.

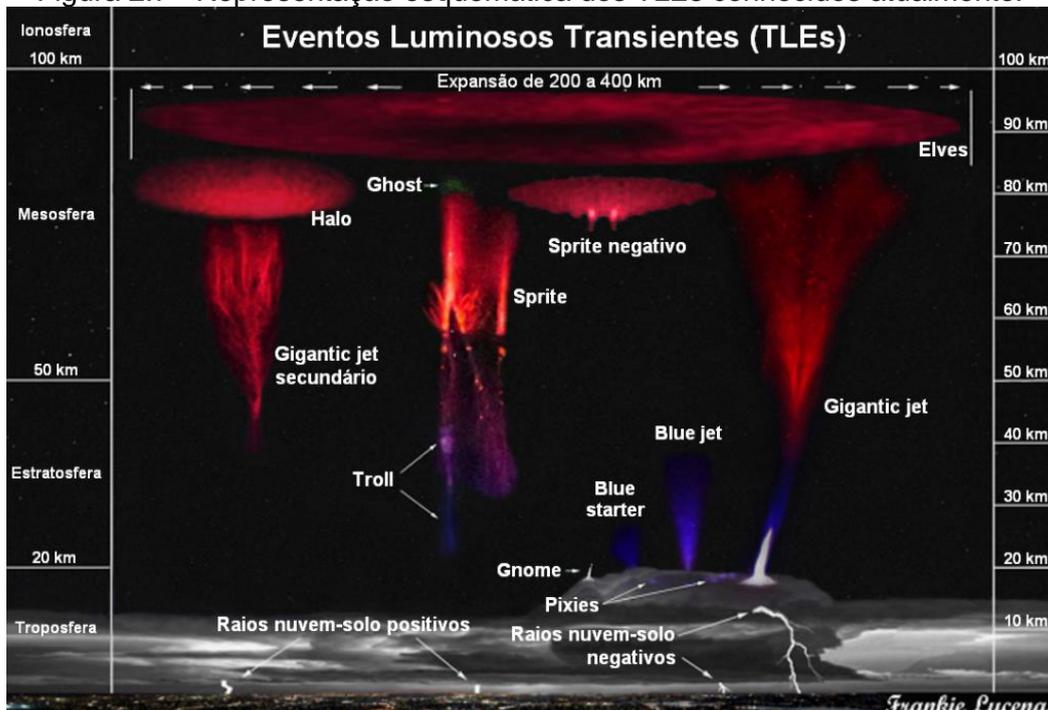
2.4 Eventos Luminosos Transientes (TLEs)

2.4.1 Tipos de Eventos Luminosos Transientes

Os relâmpagos e as Cbs também influenciam a atmosfera em níveis mais altos. Eles podem ser a fonte de disparo dos chamados Eventos Luminosos Transientes (*Transient Luminous Events* - TLEs). Os TLEs são fenômenos ópticos de curta duração (da ordem de milissegundos) excitados por campos elétricos quase-eletrostáticos transitórios estabelecidos na mesosfera após a ocorrência de relâmpagos do tipo NS, geralmente positivos (BOCCIPIO et al., 1995; LYONS, 1996; PASKO et al., 1997; SÃO SABBAS et al., 2003). Por muito tempo o conhecimento a respeito dos TLEs estava restrito apenas a relatos visuais esparsos, até que em 1989 Franz et al. (1990) documentaram o primeiro registro de um TLE através de uma câmera de TV sensível à luz. Algum tempo depois seu registro foi nomeado como *sprite*, sendo um dos diversos tipos de TLEs que vieram a ser documentados nos anos seguintes.

Além dos *sprites*, outros TLEs conhecidos atualmente são os halos, *elves*, *blue jets*, *blue starters*, *gigantic jets*, *trolls*, *pixies*, *ghosts* e *gnomes* (Figura 2.7).

Figura 2.7 - Representação esquemática dos TLEs conhecidos atualmente.



Fonte: Adaptada de Spaceweather.com (2020).

Sprite, um acrônimo de ***Stratospheric/mesospheric Perturbations Resulting from Intense Thunderstorm Electrification***, é o tipo mais comum de TLE. Os *sprites* são excitados por campos elétricos quase-eletrostáticos transitórios produzidos na mesosfera após a ocorrência de relâmpagos NS, geralmente de polaridade positiva (BOCCIPIO et al., 1995; LYONS, 1996; PASKO et al., 1997; PRICE et al., 2007; SÃO SABBAS et al., 2003). De acordo com sua morfologia, são divididos em tipo “coluna” (*C-type*) e tipo “cenoura” (*carrot-type*), ambos possuindo ramificações (*tendrils*) em sua parte inferior (HAYAKAWA et al., 2004; MYOKEI et al., 2009; STENBAEK-NIELSEN et al., 2013; WESCOTT et al., 1998a). Eles possuem uma vida curta (da ordem de dezenas ou algumas centenas de milissegundos), abrangem altitudes verticais de 30 a 90 km e normalmente têm dimensões laterais de algumas dezenas de metros a até 40 km, possuindo coloração vermelha em altitudes maiores que 50 km, que muda gradualmente para azul abaixo desta altitude (GERKEN et al., 2000; HAMPTON et al., 1996; SENTMAN et al., 1995; STENBAEK-NIELSEN et al., 2000).

Halos são TLEs que apresentam um brilho difuso avermelhado em forma de um disco horizontal que ocorre em altitudes de 65 a 80 km, e com um diâmetro horizontal de 50 a 100 km (MIYASATO et al., 2003; SOULA et al., 2010). Eles possuem um mecanismo de iniciação semelhante ao dos *sprites* e podem precedê-los após um relâmpago NS positivo ou aparecerem isoladamente, acompanhando um relâmpago NS de qualquer polaridade (BERING III et al., 2004; MIYASATO et al., 2002, 2003; SÃO SABBAS et al., 2010).

Elves, um acrônimo de ***Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources***, são rápidas expansões horizontais de emissões ópticas em forma de anel que ocorrem na base da ionosfera (entre 90 e 100 km de altitude), produzidas pelo pulso eletromagnético de intensos relâmpagos NS de qualquer polaridade (CHEN et al., 2008; FUKUNISHI et al., 1996; INAN et al., 1997; SURKOV; HAYAKAWA, 2020). São semelhantes aos halos, porém são muito mais estendidos horizontalmente, podendo atingir 300 a 700 km de diâmetro e 10 a 20 km de espessura, e

possuem um intervalo de tempo inferior a 0,1 milissegundo (ms) (BOECK et al., 1992; CHENG et al., 2007; FUKUNISHI et al., 1996; INAN et al., 1996; 1997).

Ghosts (**G**reen emissions from excited **O**xxygen in **S**prite **T**ops) são tênues brilhos verdes que aparecem acima de grandes *sprites* logo após sua ocorrência e desaparecem gradualmente, durando menos de 1 segundo (STENBAEK-NIELSEN et al., 2020). Eles foram analisados pela primeira vez em 2019 pelo caçador de tempestades Hank Schyma e pelo fotógrafo Paul Smith. Análises realizadas por Stenbaek-Nielsen et al. (2020) com um modelo baseado nas emissões de auroras no comprimento de onda de 557,7 nm indicaram que o brilho verde é provavelmente ocasionado pela excitação de átomos de oxigênio.

Trolls (**T**ransient **R**ed **O**ptical **L**uminous **L**ineaments) são manchas vermelhas que surgem após um *sprite* extremamente forte, nos *tendrils* mais baixos, perto do topo das nuvens (LYONS et al., 2000). Observações com câmeras de alta velocidade mostraram que os *trolls* consistem em uma série rápida de eventos, onde cada evento começa com o aparecimento de uma mancha vermelha com “caudas” vermelhas fracas, como os *tendrils* de um *sprite*, que “drena” para baixo. Cada evento seguinte começa mais alto que o anterior, produzindo assim uma espécie de “borrão” se propagando para cima do topo da nuvem até 40-50 km de altitude (SURKOV; HAYAKAWA, 2020).

Gnomes são pequenos e breves pontos de luz branca que apontam para cima a partir do topo da bigorna de uma nuvem de tempestade, causados quando fortes correntes de ar empurram o ar úmido acima da bigorna. Eles duram apenas alguns microssegundos, e têm cerca de 200 metros de largura e no máximo 1 km de altura. Não foi encontrada uma associação espacial ou temporal direta entre os eventos de *gnomes* e os eventos de relâmpagos dentro de uma nuvem de tempestade (LYONS et al., 2003).

Pixies são pontos de luz muito pequenos (cerca de 100 metros de diâmetro), brancos e de curta duração que aparecem no *overshooting top* (topo sobressalente, termo designado para uma parte do topo de uma nuvem de tempestade que ultrapassa a tropopausa) de uma Cb. Como os *gnomes*, eles

não parecem estar associados a um evento de relâmpago específico (SURKOV; HAYAKAWA, 2020).

Os jatos azuis (*blue jets* - BJs) são emissões ópticas de cor azul primária que se originam no topo de uma Cb e se movem para cima em um ângulo cônico até altitudes entre 18 e 40 km, e duram entre 200 e 300 ms (LYONS et al., 2000; SURKOV; HAYAKAWA, 2020; WESCOTT et al., 1995, 1998b). Normalmente, os BJs são mais brilhantes que os *sprites*, mas suas “cabeças” se movem mais lentamente. São difíceis de serem observados do solo, em parte devido ao espalhamento atmosférico que ocorre em comprimentos de onda mais curtos, neste caso, o azul (LYONS et al., 2000). Eles também não parecem estar associados a um evento de relâmpago específico; porém, curiosamente, a atividade de relâmpagos NS parece cessar por vários segundos em um círculo de 15 km após cada ocorrência de BJ (WESCOTT et al., 1998b).

Os *blue starters* (BSs) são um tipo de BJs, porém que se propagam para cima por apenas alguns quilômetros sobre o topo de uma Cb e terminam abruptamente em altitudes abaixo de 25 km (WESCOTT et al., 1996; HEAVNER et al., 2000).

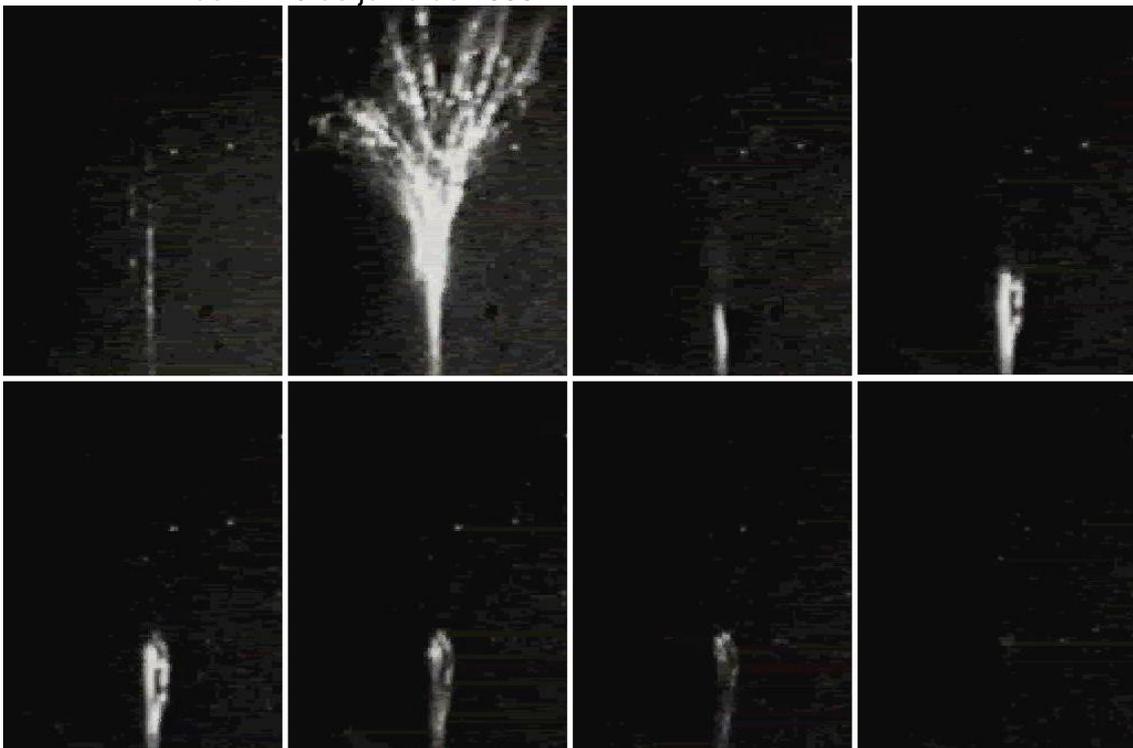
Os jatos gigantes (*gigantic jets* - GJs), são os TLEs mais raramente observados, com uma taxa de ocorrência global de cerca de 0,01 por minuto (CHEN et al., 2008). Consistem em descargas intensas de polaridade predominantemente negativa, que podem transportar mais de 100 *Coulombs* (C) de carga negativa para a ionosfera (CUMMER et al., 2009) e que se originam no topo de uma nuvem Cb e propagam até uma altitude terminal que varia entre 70 e 90 km, formando uma conexão elétrica entre o topo da nuvem e as camadas condutoras D e E da ionosfera (PASKO et al., 2002; SOULA et al., 2011; SU et al., 2003; VAN DER VELDE et al., 2007).

Os GJs possuem velocidade média de cerca de $1,0$ a $1,2 \times 10^6$ m s⁻¹ e tempo de vida que varia entre 417 e 650 ms (SU et al., 2003). Observações simultâneas ópticas e de Frequência Extremamente Baixa (ELF) baseadas em solo mostraram que os GJs são acompanhados pela geração de campos

magnéticos de baixa frequência (CHOU et al., 2011; CUMMER et al., 2009; LU et al., 2011).

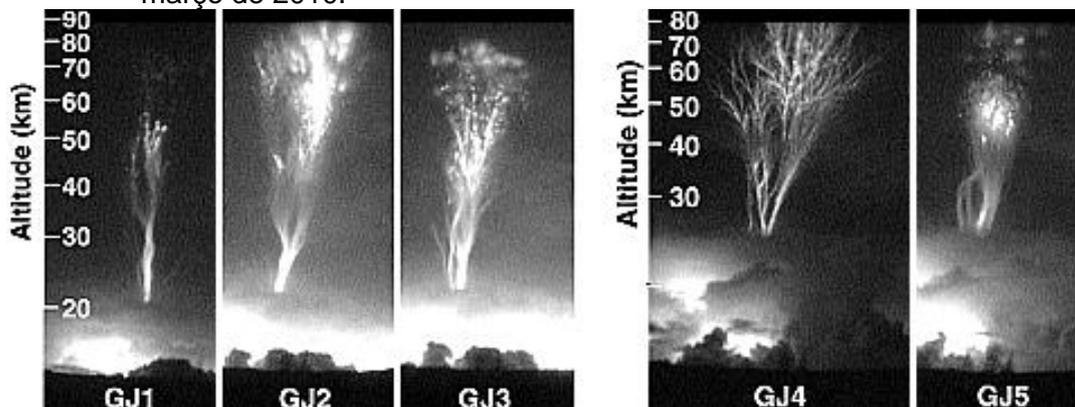
Apesar de sua rara ocorrência, desde seu primeiro registro (Figura 2.8) em 1996 (STANLEY et al., 1996) considerável atenção tem sido dada em observações e medições em solo (LU et al., 2011; SOULA et al., 2011; SU et al., 2003; VAN DER VELDE et al., 2007, 2010) e em aviões e satélites (CHEN et al., 2008; KUO et al., 2009). Na maioria das vezes eles são observados como um evento único em uma tempestade, mas já foram relatados casos com múltiplos GJs em uma mesma tempestade (Figura 2.9).

Figura 2.8 - Ciclo de vida do primeiro registro de um *gigantic jet*, realizado no Laboratório Langmuir, no Novo México, nos Estados Unidos, na noite de 24-25 de julho de 1996.



Fonte: Adaptada de National Aeronautics and Space Administration (1996).

Figura 2.9 - Cinco *gigantic jets* registrados sobre uma única tempestade, vistos a partir da Ilha de Reunião, no Oceano Índico, a leste de Madagascar, em 7 de março de 2010.



Fonte: Adaptada de Soula et al. (2011).

Figura 2.10 - *Gigantic jet* em fotografia colorida, registrado pela *Gemini Cloudcam* do *National Optical-Infrared Astronomy Research Laboratory* (NOIRLab), no Observatório *Mauna Kea*, no Havaí, em 24 de julho de 2017.



Fonte: Spaceweather.com (2017).

2.4.2 Estudos sobre *gigantic jets*

Os estudos sobre GJs são relativamente recentes (LAZARUS et al., 2015; LU et al., 2011; MEYER et al., 2013; PASKO et al., 2002; SU et al., 2003; VAN DER

VELDE et al., 2010; 2019). Como as observações de GJs são raras, é quase impossível obter medições *in situ* (por exemplo, com balões) para compreender a estrutura de carga que produz esses fenômenos. O conhecimento atual da estrutura de carga é obtido principalmente a partir de estudos de modelagem e análise de dados meteorológicos e de sistemas de localização de relâmpagos (*Location Lightning Systems* - LLS) (SOULA et al., 2011).

Os resultados de alguns estudos têm mostrado que a maioria dos GJs se origina em tempestades intensas com topos altos (14 a 18 km de altitude) e *overshooting tops*, e que se formam em ambientes predominantemente tropicais e marítimos. Houve um caso de um GJ em uma tempestade de inverno de topo baixo (6,5 km de altitude) sobre o Mar Mediterrâneo, mas que também exibia um *overshooting top*, já que a tropopausa local se situava em uma altitude de aproximadamente 6 km (VAN DER VELDE et al., 2010).

Alguns estudos observacionais, a partir da análise de dados meteorológicos de tempestades que produziram GJs, encontraram que a convecção associada possui valores de energia potencial convectiva disponível (*Convective Available Potential Energy* - CAPE) considerados moderados ou altos (1200 a 3500 J/kg) e valores de 10 dBZ de refletividade de radar atingindo altitudes de 14 a 17 km (LAZARUS et al., 2015; MEYER et al., 2013). Lu et al. (2011) observaram que os relâmpagos que originavam os GJs se assemelhavam a um relâmpago IN comum entre a região de cargas negativas, nos níveis médios da Cb, e a de cargas positivas, na parte superior. Porém, estes apresentavam uma "tentativa" de descarga para a atmosfera livre, no entorno da nuvem (relâmpago nuvem-ar), que precedia a ocorrência dos GJs.

Uma característica interessante dos GJs, que geralmente possuem dois ramos principais separados (o ramo menos intenso é chamado de ramificação secundária), é que esses ramos não se desenvolvem simultaneamente (VAN DER VELDE et al., 2019). Além disso, quando a localização da origem dos GJs nos topos das Cbs pode ser determinada com precisão, observa-se que eles parecem se originar no núcleo convectivo da tempestade, ou nas suas proximidades (CUMMER et al., 2009; HUANG et al., 2012; LAZARUS et al., 2015; LIU et al., 2015a; MEYER et al., 2013; SU et al., 2003).

Frequentemente GJs ocorrem durante ou próximo ao final de um "pulso" convectivo, que corresponde a um período de intensificação rápida da tempestade (LAZARUS et al., 2015; MEYER et al., 2013; SOULA et al., 2011). Também foi observado que os GJs surgem ao longo de um eixo que marca o centro da corrente descendente divergente da nuvem, e que algumas destas se formam em ambientes com grande velocidade horizontal dos ventos perto das altitudes de seus respectivos topos (BOGGS et al., 2016; LAZARUS et al., 2015; VAN DER VELDE et al., 2010).

Uma estrutura em forma de leque observada nos GJs, acima dos 40 km de altitude, é geralmente aceita como consistindo-se em *streamers* (filamentos ionizados com temperaturas relativamente baixas, menores do que 500 K) como os dos *sprites* do tipo "cenoura" (VAN DER VELDE et al., 2019). Além disso, alguns eventos mostram morfologia semelhante a um *streamer* já a partir do topo da nuvem: filamentos ascendentes abundantes, irregularidades no brilho, aparência entrelaçada e ramificações com ângulos em forma de "V" que também são observados em *streamers* de laboratório (KOCHKIN et al., 2014; NIJDAM et al., 2008; SOULA et al., 2011; SU et al., 2003). A parte inferior dos GJs apresenta uma cor azul/roxa nas fotografias, com gradativamente menos azul e mais vermelho acima de 35 km (LYONS et al., 2003; PENG et al., 2018; SOULA et al., 2011; WESCOTT et al., 2001). Essa mudança de cor também foi observada em *sprites* grandes (SENTMAN et al., 1995). A parte inferior dos GJs se expande lateralmente com o tempo e às vezes ramificações laterais se conectam novamente ao canal principal, como é observado no laboratório e em *sprites* (CUMMER et al., 2006; MONTANYÀ et al., 2010; NEUBERT et al., 2011; NIJDAM et al., 2009; SOULA et al., 2011; VAN DER VELDE et al., 2010).

Uma transição de brilho foi identificada (RIOUSSET et al., 2010) na porção inferior dos GJs observados por Pasko et al. (2002), onde ocorre a transição térmica de *streamer* para líder. Foi observado que as seções mais baixas de dois ramos separados do jato se fundiram com o tempo em um "tronco" brilhante. Em outros estudos, onde se têm registros de GJs próximos aos locais das câmeras, troncos brilhantes semelhantes foram encontrados entre 18 e 26 km, assemelhando-se às ramificações de relâmpagos nuvem-ar, e piscavam

simultaneamente com o relâmpago da nuvem e frequentemente reapareciam mais brilhantes no final do evento (BOGGS et al., 2019; EDENS et al., 2014; LIU et al., 2015a, b; LU et al., 2011; PASKO et al., 2002; PENG et al., 2018; SOULA et al., 2011; VAN DER VELDE et al., 2014).

A partir das diversas observações já realizadas, foi possível distinguir três estágios na evolução dos GJs: i) *leading jet* (LJ), ii) *fully developed jet* (FDJ) e iii) *trailing jet* (TJ) (SU et al., 2003).

O estágio LJ parece ter uma função na evolução de um GJ equivalente à do líder escalonado em um relâmpago NS, inclusive com velocidades semelhantes (velocidade média no tempo de $0,5$ a $2,0 \times 10^5$ m s⁻¹), embora tenham uma estrutura invertida e diferentes escalas espaço-temporais (SOULA et al., 2011; SURKOV; HAYAKAWA, 2020). Neste estágio o GJ começa no topo da nuvem e se desenvolve para cima (Figura 2.11a, *frames* 27 a 32), com uma duração média de cerca de 150 ms, conforme observado com câmeras de alta velocidade (SURKOV; HAYAKAWA, 2020).

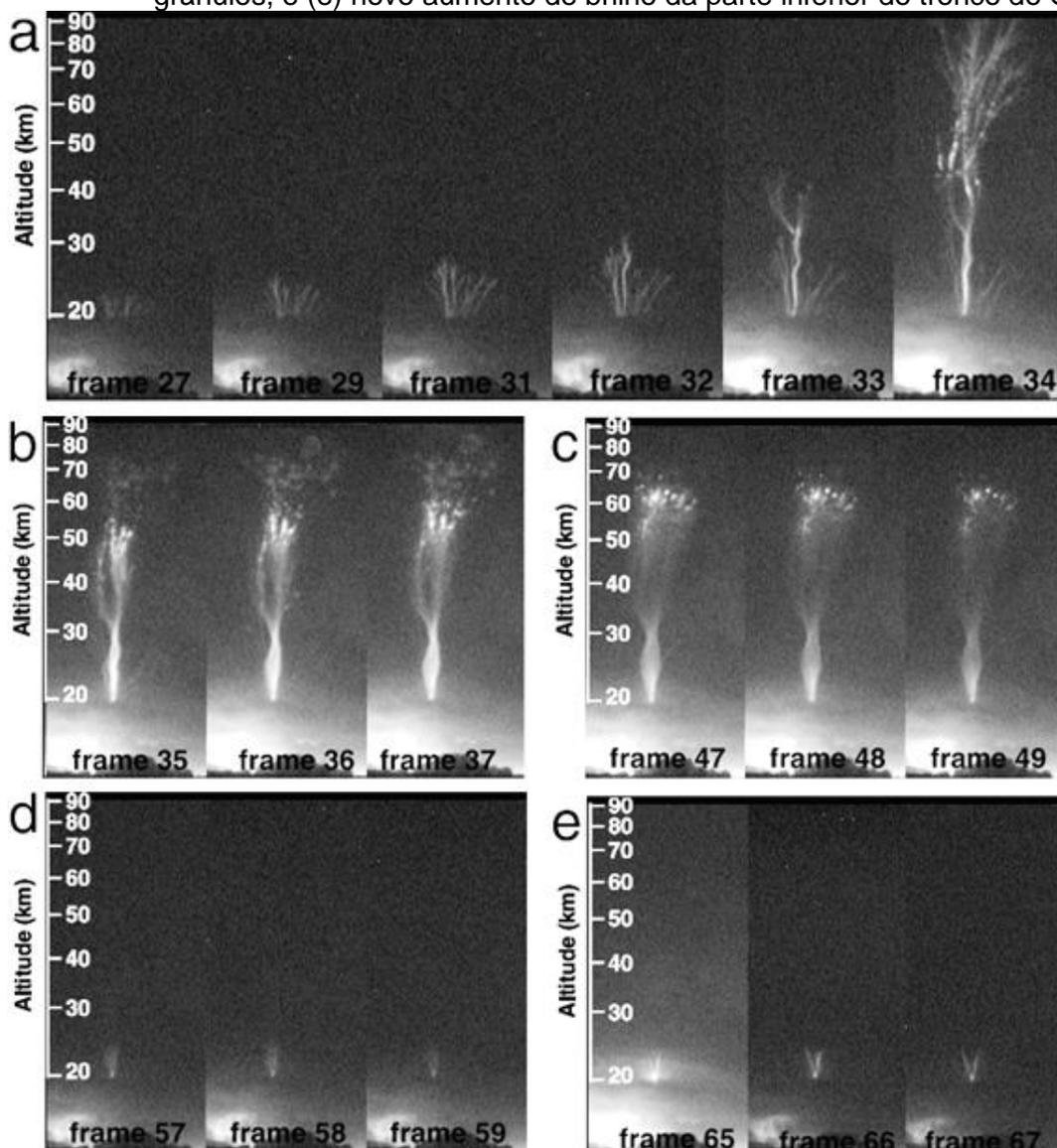
Porém, no final deste estágio, na parte superior do LJ, medições de alta resolução temporal mostraram um processo de escalonamento (VAN DER VELDE et al., 2019). O tamanho dos “passos” verticais variava de 2 a 5 km, e o intervalo entre eles era de 5 a 10 ms. Nesse processo, estimou-se uma velocidade ascendente de $0,4$ a $1,0 \times 10^7$ m s⁻¹, que é duas ordens de magnitude maior do que a velocidade média no tempo neste estágio, e que é semelhante à velocidade de *streamers* descendentes de *sprites* (KUO et al., 2009; VAN DER VELDE et al., 2019).

O início do estágio FDJ, que segue o estágio LJ anterior, ocorre em torno de 35 a 50 km de altitude (Figura 2.11a, *frame* 33) (SURKOV; HAYAKAWA, 2020). A partir desse momento a porção superior do GJ se propaga em direção à ionosfera sem interrupção, formando a estrutura ramificada divergente dos *streamers* negativos (Figura 2.11a, *frame* 34) (VAN DER VELDE et al., 2019).

Depois de atingir a ionosfera, a luminescência do GJ atenua gradualmente, caracterizando o estágio TJ (Figura 2.11b-e), que dura cerca de 200 ms. Ao mesmo tempo, é observado um aumento de brilho na região central do GJ

(Figura 2.11b), caracterizada pela “região de transição”, que se propaga para cima com uma velocidade decrescente de 10^5 para 10^3 m s⁻¹ conforme se aproxima de sua altitude máxima (SOULA et al., 2011; SU et al., 2003; VAN DER VELDE et al., 2007, 2019). Às vezes é observado um segundo aumento no brilho do canal inferior do GJ, após o término do estágio TJ (Figura 2.11e) (PASKO et al., 2002; SOULA et al., 2011; SU et al., 2003).

Figura 2.11 - Série de quadros (*frames*) desentrelaçados sucessivos de um registro de um GJ em vídeo, com uma taxa de 30 quadros por segundo: (a) LJ (*frames* 27 a 32) e FDJ (*frames* 33 e 34), (b) início do TJ, com grânulos, (c) desenvolvimento do TJ, com grânulos, (d) continuação do TJ, sem grânulos, e (e) novo aumento de brilho da parte inferior do tronco do GJ.



Fonte: Adaptada de Soula et al. (2011).

Em uma nuvem Cb com uma estrutura de carga típica, uma teoria proposta por Krehbiel et al. (2008) e Rioussset et al. (2010) indica polaridade positiva para os BJs (ou seja, transferindo carga positiva para fora da nuvem) e polaridade negativa para os GJs (ou seja, transferindo carga negativa para fora da nuvem). Baseada no processo de um líder bidirecional, esta teoria explica a propagação do GJ para fora da nuvem após o início da descarga como um processo intra-nuvem entre as regiões de carga principal desequilibradas. O GJ descarrega a região negativa da nuvem para a ionosfera simetricamente como um relâmpago NS negativo, enquanto o BJ descarrega a carga positiva do topo da nuvem para a estratosfera (SOULA et al., 2011).

Chou et al. (2010) observaram três categorias de GJs a partir da análise de observações do sensor *Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightning* (ISUAL) a bordo do satélite FORMOSAT-2, com base na cronologia e nas propriedades espectrais: i) GJs com polaridade negativa e com as fases típicas, ii) GJs que começam como BJs e com polaridade positiva e iii) GJs que podem ter polaridade negativa ou positiva.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1 Rede BRAMON

A Rede Brasileira de Monitoramento de Meteoros (*BRAzilian Meteor Observation Network* - BRAMON) é uma organização aberta, mantida por voluntários e sem fins lucrativos, que produz e fornece dados científicos através da análise de capturas de meteoros realizadas por estações de monitoramento mantidas por seus membros (BRAMON, 2021a). A BRAMON surgiu em 2014, e desde então vem se expandindo continuamente. O autor deste trabalho pertence à equipe da BRAMON desde fevereiro de 2015.

Uma preocupação da BRAMON é manter pelo menos dois operadores a uma distância de pelo menos 50 km entre si, com suas câmeras apontando para uma mesma região do céu. Isso permite que seja feita a triangulação das capturas, gerando parâmetros mais precisos dos meteoros (altitude inicial e final, magnitude de brilho, velocidade e ângulo de entrada na atmosfera, etc.).

Uma estação da BRAMON consiste no seguinte conjunto de componentes: i) câmera e lente com alta sensibilidade à luz, ii) placa de captura para receber a imagem da câmera, iii) *software* para detecção e registro dos meteoros e iv) computador para instalar a placa de captura e o *software* e guardar os registros.

Cada operador preenche no *software* diversos dados que ajudam nas análises de suas capturas. São eles: i) marca e modelo da câmera e da placa de captura, ii) marca, modelo, abertura e distância focal da lente, iii) localização da câmera (latitude, longitude e altitude, além do nome da cidade e do Estado onde se situa), iv) sigla (ID) da estação (escolhida pelo operador), v) nome do operador e vi) data e hora com precisão de milissegundos (sincronizadas via *internet*).

Além disso, nos primeiros dias de atividade da estação, o operador deve escolher uma captura com céu limpo e com a maior quantidade de estrelas visíveis, e criar uma “máscara de estrelas”. A princípio são preenchidos os parâmetros aproximados do apontamento da câmera (azimute, elevação e o campo de visão da câmera, em graus), e a partir daí ajustam-se as estrelas da captura escolhida às estrelas da carta celeste disponível no *software*. Realizado o ajuste, a máscara é salva, e a cada mudança no posicionamento da câmera, por menor que seja, deve ser feito o respectivo ajuste na máscara.

Assim, cada *pixel* da imagem irá possuir um par de coordenadas (azimute e elevação), que aparece no programa ao se passar o *mouse* sobre a imagem da captura (Figura 3.2). Esta configuração permite que o *software* faça as análises dos meteoros. Como o *software* na verdade foi concebido para detectar e registrar qualquer aumento súbito de luminosidade, outros processos também podem disparar capturas, como luzes de aviões, pássaros e insetos próximos e que estejam iluminados por fontes de luz, e também relâmpagos e TLEs.

Sendo assim, a BRAMON também registra e estuda os TLEs. Este é o principal motivo pelo qual praticamente todos os registros de GJs feitos no Brasil até o momento (Tabela 3.1) tenham sido realizados através das câmeras associadas à BRAMON. Apenas o GJ de 15/02/2020 foi registrado por outra rede, a Clima ao Vivo, que possui câmeras de monitoramento do céu espalhadas pelo Brasil.

Tabela 3.1 - Eventos de *gigantic jets* registrados no Brasil até o momento. As datas correspondem aos registros considerando o horário UTC (*Coordinated Universal Time*, Tempo Universal Coordenado).

Data	Nº de eventos	Localização da câmera
13/03/2017	1	Campina Grande-PB
19-20/03/2017	5	Bilac-SP
17/12/2017	1	
31/01/2018	1	
10/03/2018	1	Nhandeara-SP
16/03/2018	1	Rondonópolis-MT (duas câmeras)
04/03/2019	1	São José dos Quatro Marcos-MT
20/04/2019	3	
06/01/2020	3	
15/02/2020	1	Açailândia-MA
26/03/2020	1	São José dos Quatro Marcos-MT
18/04/2020	1	João Pessoa-PB
23/04/2020	1	
26/12/2020	4	São José dos Quatro Marcos-MT
22/03/2021	1	São Paulo-SP e São José dos Campos-SP
04/02/2022	1	São Paulo-SP
15/02/2022	2	São José dos Quatro Marcos-MT
Total	29	-

Fonte: Produção do autor.

Neste trabalho foram analisados os registros que foram melhor visíveis nas imagens, visto que alguns registros mostram somente parcialmente os GJs. Os detalhes dos registros escolhidos para análise são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Eventos de *gigantic jets* estudados neste trabalho. As colunas de data e hora (em UTC) referem-se aos eventos de GJs. As colunas de latitude (Lat), longitude (Lon), altitude (Alt) e ID referem-se à câmera. As colunas de azimute (Az) e elevação (EI) referem-se aos valores destas coordenadas no ponto central da imagem da câmera.

Data	Hora	Localização da câmera	Lat	Lon	Alt	ID	Az	EI	Câmera	Lente
13/03/2017	23:09:53	Campina Grande-PB	-7,22°	-35,90°	597 m	CPV1	253,3°	20,6°	PY-SH361	4mm F1.0
16/03/2018	22:44:53	Rondonópolis-MT	-16,46°	-54,63°	255 m	CMM1	265,0°	32,9°	Samsung SCB-2000	Computar F1.3
			-16,47°	-54,60°	266 m	ROO1	281,9°	40,4°	PY-SH361	Tecvoz F1.0
20/04/2019	01:21:47	São José dos Quatro Marcos-MT	-15,63°	-58,17°	241 m	ISL2	330,4°	42,1°	Samsung SCB-5003	4mm
	01:42:51									
	02:01:37									
06/01/2020	23:14:06	São José dos Quatro Marcos-MT	-15,63°	-58,17°	241 m	ISL1	54,4°	33,1°	Samsung SCB-5003	3-8mm F1.0
	23:18:47									
	23:21:00									
26/03/2020	04:30:24						60,0°	29,6°		
18/04/2020	00:12:53	João Pessoa-PB	-7,12°	-34,87°	65 m	JPZ4	292,7°	8,5°		Tecvoz F1.0
26/12/2020	04:00:28	São José dos Quatro Marcos-MT	-15,63°	-58,17°	241 m	ISL1	45,2°	28,3°		3-8mm F1.0
	04:18:01									
22/03/2021	07:35:16	São Paulo-SP	-23,60°	-46,52°	795 m	SMZ9	235,1°	16,3°	Pyxel CFP50	Megapixel F1.0
		São José dos Campos-SP	-23,22°	-45,91°	655 m	CPJ2	199,6°	43,8°	PY-SH361	Computar 2,9-8,2mm F1.0

Fonte: Produção do autor.

3.2 Dados de relâmpagos

Para analisar as características dos relâmpagos que originaram os GJs (polaridade, pico de corrente, duração, etc.), foram utilizados dados das seguintes fontes: i) *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN), ii) *Sferics Timing And Ranging NETwork* (STARNET) e iii) Sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite - 16* (GOES-16).

3.2.1 ENTLN

A ENTLN é uma rede de monitoramento e detecção de relâmpagos dos tipos IN e NS, contando com 65 sensores espalhados pelo Brasil (NACCARATO; PINTO, 2012). A ENTLN possui sensores atrelados a um sistema de banda larga com frequência de detecção que varia de 1 Hz a 12 MHz e utiliza o método *time of arrival* (tempo de chegada - TOA), que emprega três ou mais sensores, que determinam o instante em que a radiação eletromagnética emitida pelo relâmpago chega ao sensor. Através de uma diferença temporal relativa dos horários de chegada registrados, definem-se curvas hiperbólicas para cada par de sensores. O ponto de intersecção entre as curvas indica a possível localização do relâmpago (MATTOS, 2009; NACCARATO; PINTO, 2012). No presente trabalho são utilizados os dados de descarga de retorno, tendo como informações: latitude, longitude, data, horário preciso, pico de corrente e polaridade, fornecidos para fins de pesquisa pela empresa CLIMATEMPO.

3.2.2 STARNET

A STARNET é uma rede de monitoramento e detecção de relâmpagos do tipo NS, com monitoramento contínuo desde 2006. A STARNET é composta por um conjunto de antenas receptoras localizadas em regiões do Brasil, da América Central e da África. A rede opera na frequência de 7 a 15 kHz e detecta ruídos de rádio (*sferics*) emitidos pelos relâmpagos na atmosfera. Esses *sferics*

podem alcançar milhares de quilômetros nesse intervalo de frequência, se propagando no guia de onda delimitado pela superfície da Terra e pela ionosfera (LEE, 1986; MORALES, 2001, 2019; MORALES et al., 2014). Operando em conjunto, esse sistema localiza os relâmpagos através de um método desenvolvido por Lee (1986) chamado *arrival time difference* (diferença do tempo de chegada - ATD), que requer pelo menos 4 antenas para não haver soluções duvidosas (MORALES et al., 2014). Nesta faixa de frequência, porém, não é possível distinguir os relâmpagos IN dos NS, embora a maioria das detecções tenha como origem os relâmpagos NS. As detecções de relâmpagos da STARNET em tempo real podem ser visualizadas no *site* da rede: <https://raiosonline.iag.usp.br/index.php>.

3.2.3 Sensor *Geostationary Lightning Mapper* (GLM)

O GLM é o primeiro tipo de sistema de detecção de relâmpagos a ser lançado em um satélite geoestacionário. Estando operacional desde dezembro de 2017 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2022a), o GLM, que está a bordo do satélite GOES-16, fornece medições contínuas (a cada 2 ms) de relâmpagos totais (IN + NS, embora não faça distinção entre estes dois tipos) com uma área de cobertura de 54°N a 54°S e centrado atualmente na longitude de 75°W, o que inclui as Américas e os oceanos adjacentes. É projetado para detectar mais de 70% de todos os relâmpagos (em média) 24 horas por dia, com melhor desempenho previsto à noite (~90%) do que durante o dia (~70%), e como ainda é um novo instrumento, continua a passar por calibrações e validações (GOODMAN et al., 2013; RUDLOSKY et al., 2019).

O GLM é composto por um *Charge-Coupled Device* (CCD) de 1372 x 1300 *pixels*, que opera no infravermelho próximo (777,4 nm), possuindo uma resolução espacial de 8 km no nadir (ponto geográfico terrestre diretamente abaixo do satélite) a 14 km nas bordas (GOODMAN et al., 2013). As detecções do GLM são organizadas em: i) eventos, ii) grupos e iii) *flashes*.

Um evento é a unidade básica de dados do GLM, e é definido como sendo a ocorrência de um único *pixel* excedendo o limite de detecção do sistema,

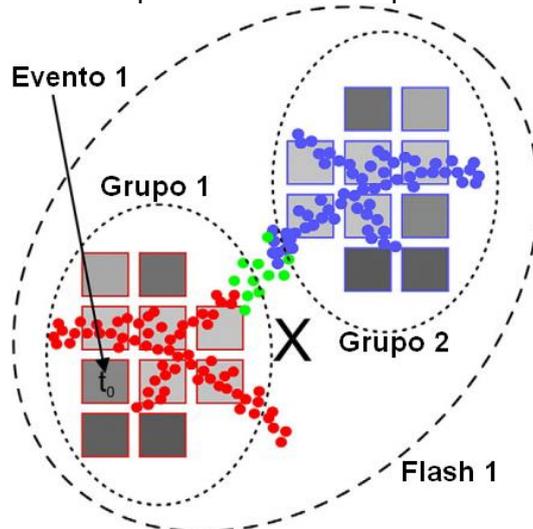
durante um único quadro (2 ms). Embora um evento possa ser considerado como um único pulso óptico devido a um relâmpago, é possível que vários pulsos que ocorram dentro dos 2 ms possam contribuir para um evento. Por isso não é utilizado o nome “pulso” ou “descarga” (ou outro nome semelhante), e sim o nome “evento”, que é mais abrangente (GOODMAN et al., 2013).

Um relâmpago geralmente ilumina mais de um *pixel* durante um único tempo de integração (2 ms). Como resultado, tem-se dois ou mais eventos no mesmo período. Quando esses eventos múltiplos são adjacentes uns aos outros (ou seja, quando eles se “tocam”, em um lado ou em uma das pontas dos *pixels*), eles são colocados em um único grupo. Assim, um grupo pode consistir em apenas um evento ou em vários eventos. Embora um grupo possa muitas vezes corresponder a um único pulso óptico de um relâmpago, também é possível que vários pulsos ocorrendo dentro dos 2 ms possam contribuir para um grupo (GOODMAN et al., 2013).

Um *flash* é definido como um conjunto de grupos separados sequencialmente no tempo por no máximo 330 ms e no espaço por no máximo 16,5 km. Um *flash* pode incluir apenas um grupo com um único evento ou pode consistir em muitos grupos, cada um contendo muitos eventos. A Figura 3.1 simula um evento de *flash* no GLM com seus grupos e eventos, em comparação com as fontes de radiação de frequência muito alta (*Very High Frequency* - VHF) individuais de um canal de um relâmpago que seria observado por uma rede do tipo *Lightning Mapping Array* (LMA) (GOODMAN et al., 2013).

Os dados do GLM utilizados neste trabalho são fornecidos no formato netCDF4, com arquivos contendo informações integradas em um intervalo de 20s, e foram extraídos do banco de dados *Comprehensive Large Array-data Stewardship System* (CLASS) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), disponível através do link <https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>. No presente trabalho são utilizados dados de eventos e *flashes* do GLM.

Figura 3.1 - Idealização de um *flash* no GLM composto por 2 grupos e 20 eventos relativos a um relâmpago detectado por uma rede *Lightning Mapping Array* (LMA). Os pontos (vermelhos, verdes e azuis) são fontes da LMA, e os quadrados são dados simulados do GLM. O tempo é indicado pela cor, com o vermelho ocorrendo primeiro, o verde depois e o azul por último. A radiância identificada pelo GLM é indicada pela escala de cinza. O centroide é indicado pelo "X". O tempo relativo à ocorrência do *flash* é o momento do primeiro evento (" t_0 "). O grupo vermelho e o azul são próximos o suficiente no tempo e no espaço para serem agrupados em um único *flash*. Os pulsos de LMA verdes não criaram um pulso óptico grande o suficiente para ser detectado pelo simulado pelo GLM.



Fonte: Adaptada de Goodman et al. (2013).

3.3 Imagens de satélites

Para permitir a visualização e a análise das características das nuvens de tempestade que produziram os GJs estudados, foram utilizados dados do canal infravermelho termal dos satélites geoestacionários GOES-16 e METEOSAT-11. As imagens do METEOSAT-11 foram utilizadas somente em parte das análises do evento de 06/01/2020, devido à falta de dados do GOES-16.

Referente ao satélite GOES-16, foi utilizado o canal 13 do sensor *Advanced Baseline Imager* (ABI), que opera na faixa de comprimentos de onda de 10,18 a 10,48 μm (centrada em 10,33 μm) e possui uma resolução espacial de 2 km (no nadir) e temporal de 15 ou 10 minutos, dependendo da data das imagens utilizadas (SCHMIT et al., 2017). As imagens também foram extraídas do banco de dados CLASS da NOAA, que disponibiliza as imagens convertidas para temperatura de brilho (TB).

Em relação ao satélite METEOSAT-11, foi utilizado o canal 9 do sensor *Spinning Enhanced Visible Infra-Red Imager* (SEVIRI), que opera na faixa de comprimentos de onda de 9,80 a 11,80 μm (centrada em 10,80 μm) e possui uma resolução espacial de 3 km (no nadir) e temporal de 15 minutos (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2022b). As imagens foram extraídas do banco de dados da *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), disponível através do link <https://data.eumetsat.int/>.

3.4 Caracterização física dos GJs

A partir dos registros em vídeo dos GJs estudados, foi realizada uma análise das características físicas de cada evento. Foram avaliadas as propriedades dos GJs, como duração de cada fase (LJ, FDJ e TJ), distância entre os GJs e os locais dos seus registros, alturas dos seus topos e bases, variações do brilho e estrutura morfológica (ramificações, grânulos, extensão horizontal máxima do fenômeno, etc.). Partindo de cada análise individual, foi realizado o processo de comparação dos GJs estudados, entre si e entre outros já estudados anteriormente.

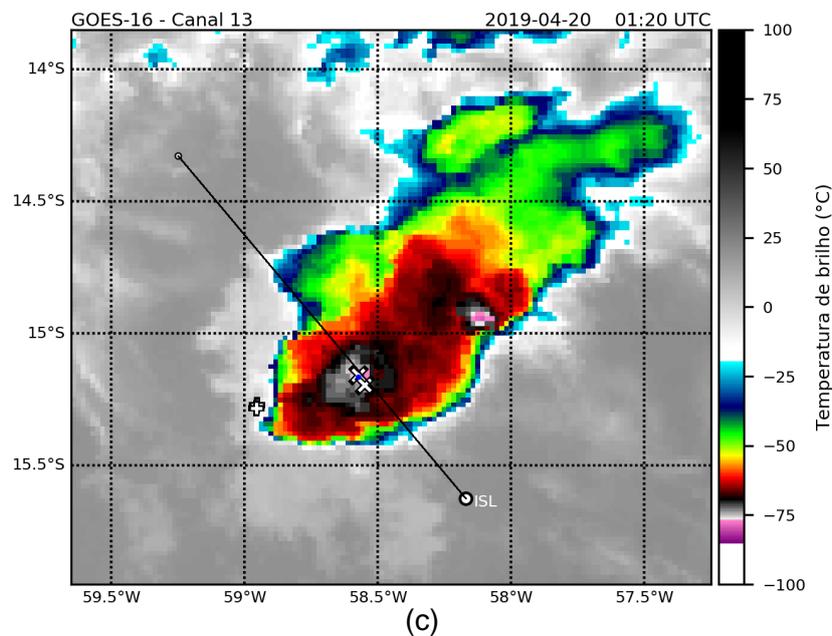
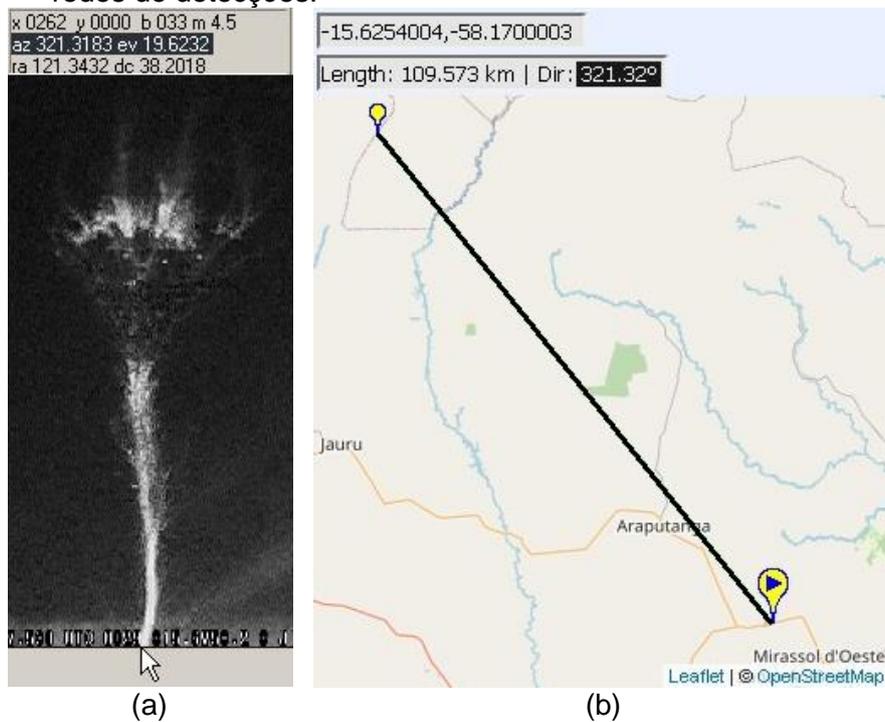
A análise da altura dos topos e das bases dos GJs, assim como das extensões horizontais de suas estruturas, foi realizada através da máscara de estrelas gerada pelo *software* utilizado pela BRAMON. Para isso, foi fundamental estimar a distância entre o GJ e o local da câmera. Esta informação é encontrada obtendo-se as coordenadas geográficas do(s) relâmpago(s) detectado(s) pela(s) rede(s) de relâmpagos no momento do GJ. Caso haja mais de uma descarga detectada no momento do GJ, em locais diferentes, existem duas maneiras complementares entre si de determinar qual destas detecções possui a maior probabilidade de ter gerado o GJ.

A primeira maneira é através da comparação entre a direção em que ocorreu o GJ e a direção em que ocorreram as detecções de relâmpagos, ambos com relação à posição da câmera, através da estimativa do azimute. Primeiramente estima-se o azimute do GJ na imagem da câmera através do *software*. Esta estimativa é realizada colocando-se o *mouse* sobre o ponto da imagem onde

encontra-se o centro da base do GJ, e anotando o azimute correspondente informado pelo programa (Figura 3.2a). Em seguida, dispendo de um mapa da região onde foi registrado o GJ, traça-se uma reta entre o local da câmera e um local qualquer, consideravelmente distante, com um ângulo que corresponda ao azimute estimado anteriormente (Figura 3.2b). Posteriormente, comparam-se as posições das detecções dos relâmpagos com a reta traçada, e a detecção com posição mais próxima da reta é a mais provável de ter gerado o GJ. Assim, traça-se outra reta, desta vez entre a detecção escolhida e a posição da câmera, e anota-se a distância entre elas. O passo seguinte é escolher no *software* o ponto onde localiza-se o topo do GJ no registro da câmera. Em seguida é realizada uma alteração no valor da sua altura (que por padrão, no *software*, é 100 km) até que a distância entre o GJ e a câmera dada pelo *software* se ajuste à distância estimada anteriormente. Assim, é realizada a estimativa da altitude do topo do GJ. O mesmo procedimento é realizado para a base e para qualquer outro ponto do GJ em que haja interesse.

A segunda maneira é utilizada para o caso em que haja mais de um ponto geográfico associado a detecções de relâmpagos, consideravelmente distantes entre si, ao longo da reta do azimute do GJ calculada anteriormente. Neste caso, anotam-se as distâncias entre cada ponto de detecção ao longo da reta e o local da câmera, e no momento da estimativa da altura do topo e da base dos GJs anotam-se os respectivos valores estimados para cada ponto de detecção. O ponto de detecção no qual o conjunto de valores de altura de topo e base se aproxime mais dos valores médios encontrados na literatura é considerado o mais provável de ter gerado o GJ analisado. Caso mais de um ponto satisfaça esta condição, é utilizada uma distância intermediária situada entre os pontos. Por exemplo, se dois pontos, um a 60 km de distância da câmera e outro a 80 km de distância, estão sobrepostos à reta do azimute do GJ, são realizados os cálculos para ambas as distâncias, e o resultado final para cada parâmetro calculado é a média dos dois valores encontrados para as duas distâncias consideradas.

Figura 3.2 - (a) Estimativa do azimute (az) da base de um dos GJs estudados com relação à posição da câmera que efetuou o registro; (b) reta traçada entre o local da câmera e um local consideravelmente distante, com ângulo correspondente ao azimute estimado em (a); (c) imagem de satélite correspondente ao momento do GJ. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera; a reta traçada representa o azimute encontrado em (a); os símbolos de "+" e "x" e a bolinha azul representam pontos geográficos obtidos através de detecções de relâmpagos por redes de detecções.



Fonte: (a), (c) Produção do autor; (b) Adaptada de SunEarthTools.com (2020).

3.5 Caracterização física e elétrica dos relâmpagos associados aos GJs

Com base nos dados de relâmpagos das redes ENTLN e STARNET e do sensor GLM do GOES-16, foi realizada a caracterização física dos relâmpagos associados aos GJs (tipo de relâmpago - IN ou NS -, localização, polaridade, pico de corrente, e quantidade de detecções). Além disso, estes dados foram sobrepostos às imagens de satélite para identificar em que local das nuvens (parte convectiva ou estratiforme) estes relâmpagos foram gerados.

3.6 Caracterização física dos sistemas convectivos associados aos GJs

Além da caracterização física dos GJs e dos relâmpagos associados, também foi realizada uma análise das características das nuvens de tempestade associadas aos GJs. Para isto, foram utilizadas imagens de satélite, que podem fornecer dados como temperatura dos topos, área de cobertura e tempo de vida, e se estas nuvens estavam associadas a algum sistema de escala sinótica, em conjunto com cartas sinóticas disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Após as análises individuais de cada nuvem, foram avaliadas as semelhanças e diferenças das propriedades entre elas e entre outras nuvens analisadas em estudos anteriores, sendo identificadas e analisadas de forma semelhante ao procedimento realizado para a caracterização física dos GJs.

Os cálculos dos parâmetros dos sistemas convectivos (estatísticas baseadas na temperatura de brilho e na área de cobertura) foram realizados através do *software* de manipulação de dados georreferenciados QGIS. No *software* foram utilizadas as imagens do satélite GOES-16 para calcular diversos parâmetros. No caso dos eventos estudados neste trabalho, foram calculados os dados de área de cobertura e temperaturas mínima e média dos sistemas convectivos. Em seguida foram realizados cálculos derivados destes dados, como taxa de expansão e variação das temperaturas médias e mínimas dos sistemas.

As estimativas das áreas e das temperaturas médias dos sistemas foram realizadas com base em dois limiares de TB: i) 235 K, para delimitar a área dos sistemas convectivos, e ii) 210 K, para delimitar a área dos núcleos convectivos.

Nas imagens, somente os *pixels* com valores abaixo de 235 K (210 K) foram levados em consideração nos cálculos para os sistemas (núcleos) convectivos. Estes dois limiares foram escolhidos com base no sistema de rastreamento de sistemas convectivos *Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters* (ForTraCC) (MACEDO et al., 2004; VILA et al., 2008). Para o cálculo da temperatura mínima dos sistemas foi utilizado somente o limiar de 235 K.

A variação da temperatura média (mínima) dos sistemas e dos núcleos convectivos (dada em °C/min) foi calculada através da Equação 3.1 (3.2), através dos dados fornecidos pelas imagens de satélite. A Equação 3.1 foi aplicada aos dois limiares de TB descritos anteriormente.

$$\Delta_{tempm\u00e9dia} = \frac{Tempm\u00e9dia2 - Tempm\u00e9dia1}{t_2 - t_1} \quad (3.1)$$

$$\Delta_{tempm\u00ednima} = \frac{Tempm\u00ednima2 - Tempm\u00ednima1}{t_2 - t_1} \quad (3.2)$$

Onde

$Tempm\u00e9dia2$ = TB média do sistema (núcleo) convectivo na imagem correspondente ao momento do GJ, em graus Celsius;

$Tempm\u00e9dia1$ = TB média do sistema (núcleo) convectivo na imagem imediatamente anterior à correspondente ao momento do GJ, em graus Celsius;

$Tempm\u00ednima2$ = TB mínima do sistema (núcleo) convectivo na imagem correspondente ao momento do GJ, em graus Celsius;

$Tempm\u00ednima1$ = TB mínima do sistema (núcleo) convectivo na imagem imediatamente anterior à correspondente ao momento do GJ, em graus Celsius;

$t_2 - t_1$ = Intervalo entre a imagem de satélite correspondente ao momento do GJ e a imagem imediatamente anterior, em minutos.

A taxa de expansão dos sistemas e núcleos convectivos (expressa em 10^{-4} min^{-1}) foi calculada através da Equação 3.3 e aplicada aos dois limiares de TB.

$$Taxa_{expans\u00e3o} = \left(\frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \right) \times \frac{1}{A_{m\u00e9dia}} \quad (3.3)$$

Onde

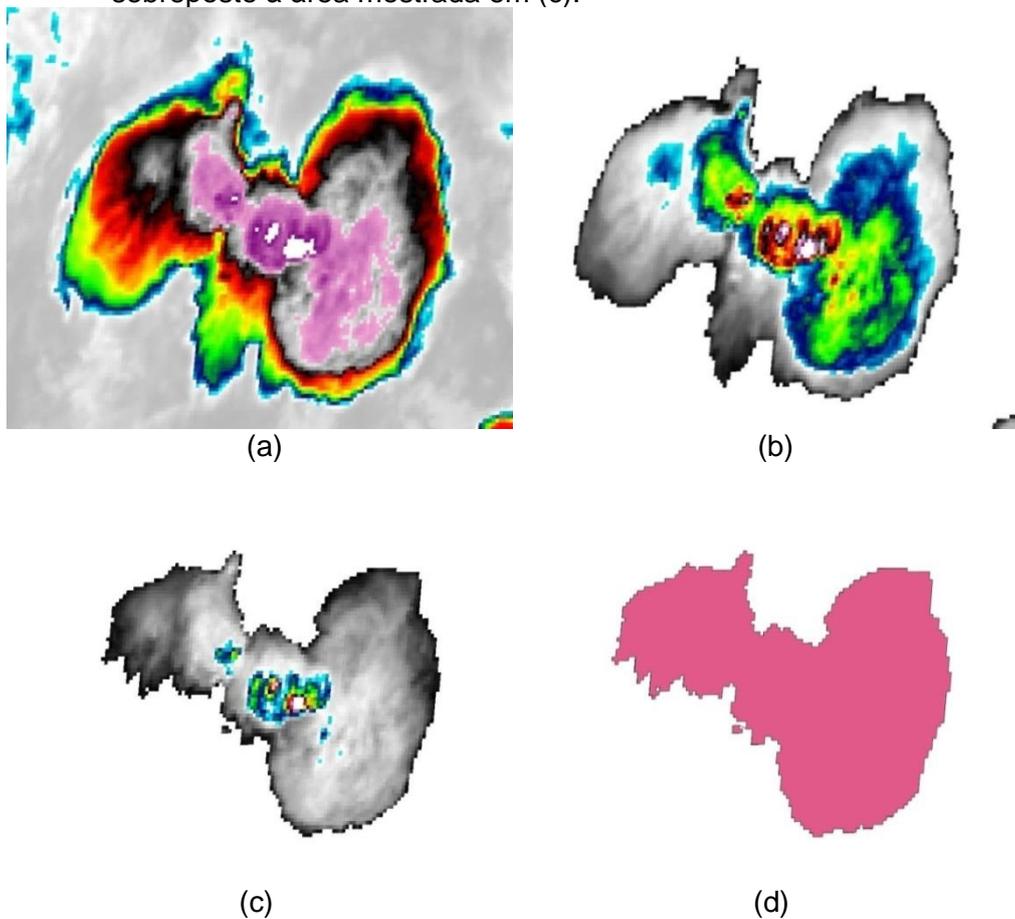
A_2 = Área do sistema (núcleo) convectivo na imagem correspondente ao momento do GJ (t_2);

A_1 = Área média do sistema (núcleo) convectivo na imagem imediatamente anterior à correspondente ao momento do GJ (t_1);

$A_{média}$ = Área média do sistema (núcleo) convectivo considerando seu tamanho nos tempos 1 (t_1) e 2 (t_2).

As áreas de cada sistema convectivo para cada limiar de TB (235 e 210 K) foram delimitadas através da adição de uma camada *shapefile* sobreposta às imagens de satélite, gerando-se um polígono que cobria as áreas delimitadas pelos limiares escolhidos. Assim, as estatísticas desejadas foram extraídas através do *shapefile*. A Figura 3.3 mostra um exemplo deste procedimento para o sistema convectivo ocorrido em 26/12/2020, que gerou dois GJs.

Figura 3.3 - Imagem do canal 13 (10,33 μm) do satélite GOES-16 às 04:00 UTC de 26/12/2020 exibida no QGIS (a) sem nenhum filtro de valores de TB, (b) descartando-se valores de TB superiores a 235 K e (c) descartando-se valores de TB superiores a 210 K. Em (d) é exibido o *shapefile* sobreposto à área mostrada em (c).



Fonte: Produção do autor.

Com relação às imagens de satélite utilizadas para a sobreposição dos dados de relâmpagos, foi realizada uma correção de paralaxe. Na meteorologia, paralaxe é a aparente mudança de posição de um objeto (para longe do nadir do satélite) resultante do ângulo de visão entre o satélite e o objeto (UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, 2006). Quanto mais afastado do nadir, maior a paralaxe. Além disso, para objetos com grande altura, como por exemplo, as nuvens de grande desenvolvimento vertical (Cbs), a diferença aumenta ainda mais quando se observa seus topos.

Para amenizar este problema, foi realizada a reprojeção de todas as imagens para uma projeção retangular (Mercator), exceto na utilização do QGIS. Além disso, nas imagens utilizadas para a se realizar sobreposição dos dados de relâmpagos foi realizado o remapeamento das imagens, aplicando-se um deslocamento fixo de 14 km de toda a imagem na direção do nadir do satélite para compensar o efeito de paralaxe dos topos das Cbs. O valor de 14 km foi escolhido por representar bem o limiar inferior dos topos de nuvens com convecção intensa, além de ter sido encontrado este valor (ou valores bastante próximos) em outros estudos de GJs (CUMMER et al., 2009; LAZARUS et al., 2015; VAN DER VELDE et al., 2007).

Todas estas análises permitiram identificar se há diferenças entre GJs registrados em diferentes regiões do Brasil, e se os GJs ocorridos no Brasil possuem características particulares em relação aos GJs que ocorrem em outras regiões do planeta. Também foi possível realizar este mesmo procedimento de comparação para os relâmpagos e para os sistemas convectivos associados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os eventos de GJs estudados, o local exato das bases dos GJs não pode ser estimado com precisão devido à sua obstrução pelo próprio topo da nuvem de tempestade originária. Assim, as alturas estimadas das bases dos GJs são um pouco mais elevadas do que a realidade. Além disso, em alguns casos, parte da base dos GJs se situou fora do campo de visão das câmeras.

A acurácia na estimativa destes parâmetros relaciona-se com a acurácia na estimativa da posição geográfica dos GJs. Como não houve triangulação em quase todos os registros de GJs estudados, o principal parâmetro para estimar a localização dos GJs foi a posição dos relâmpagos associados, obtida através das redes de detecções de relâmpagos. Além dessa consideração, pode haver de estas redes não detectarem o relâmpago associado a um evento específico devido a limitações das redes, como falha ou falta de sensores na região do evento ou relâmpago com intensidade abaixo do limite mínimo de detecção.

As localizações aproximadas das ocorrências dos GJs estudados estão listadas na Tabela 4.1, e sua distribuição geográfica é mostrada na Figura 4.1. Ao todo foram estudados 13 eventos de GJs.

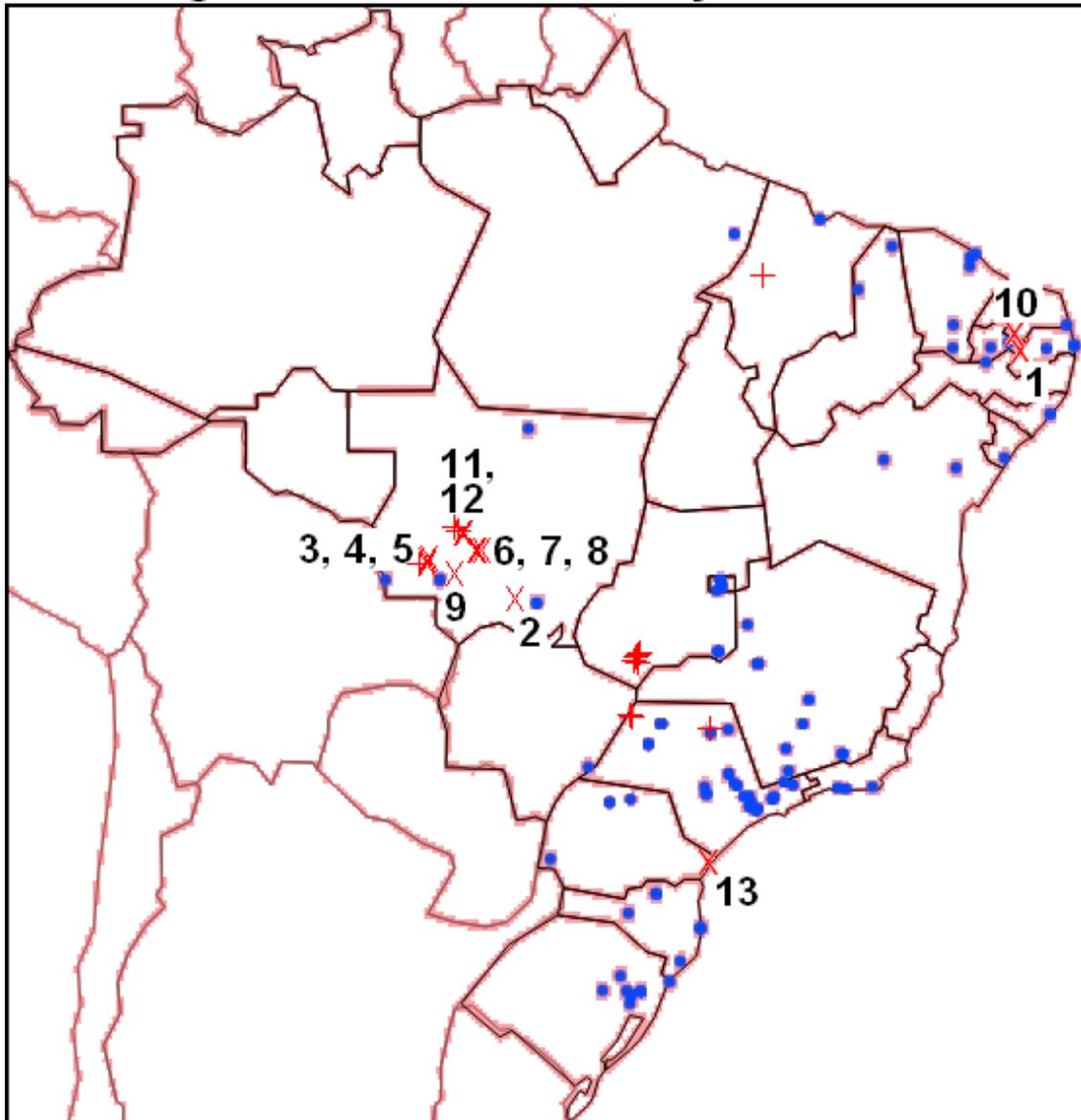
Tabela 4.1 - Localização geográfica dos GJs estudados e distâncias correspondentes entre estes e os locais das câmeras associadas aos seus registros.

Evento	Data/hora (UTC)	Localização aproximada do GJ	Localização da câmera	Distância GJ-câmera (km)
1	13/03/2017 23:09:53	Taperoá-PB	Campina Grande-PB	112
2	16/03/2018 22:44:53	Santo Antônio de Leverger-MT	Rondonópolis-MT	91
3	20/04/2019 01:21:47	Indiavaí-MT	São José dos Quatro Marcos-MT	65
4	20/04/2019 01:42:51			61
5	20/04/2019 02:01:37			58
6	06/01/2020 23:14:06	Denise-MT		148
7	06/01/2020 23:18:47			154
8	06/01/2020 23:21:00			161
9	26/03/2020 04:30:24	Cáceres-MT		59
10	18/04/2020 00:12:53	Caicó-RN	João Pessoa-PB	250
11	26/12/2020 04:00:28	Santo Afonso-MT	São José dos Quatro Marcos-MT	157
12	26/12/2020 04:18:01		Quatro Marcos-MT	160
13	22/03/2021 07:35:16	Guaraqueçaba-PR	São Paulo-SP	272
			São José dos Campos-SP	346

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.1 - Localização geográfica das estações da BRAMON (dados referentes ao ano de 2021) e de todos os eventos de GJs registrados no Brasil até 2021. Os GJs estudados neste trabalho estão marcados com “x” e numerados de 1 a 13; os demais estão marcados com “+”.

GJs registrados no Brasil + estações da BRAMON



Fonte: Adaptada de Bramon (2021b).

4.1 Caracterização física dos GJs

Para todos os GJs estudados, a duração do estágio *trailing jet* (TJ) foi maior que a soma das outras duas fases dos GJs (*leading jet* - LJ - e *fully developed jet* - FDJ) (Tabela 4.2; Figura 4.2a). Em média, as fases LJ, FDJ e TJ tiveram

duração de 47, 22 e 277 ms, respectivamente, e o GJs como um todo duraram em média 353 ms (Figura 4.2a).

O estágio LJ de alguns GJs estudados não foi visível, seja por presença de nebulosidade, seja por estarem fora do campo de visão das câmeras. Em alguns casos, ramificações foram visíveis partindo da base do GJ neste estágio.

Em todos os eventos os topos dos GJs apresentaram um formato cônico na fase FDJ (porém mais irregular no caso do GJ12), com ramificações em quantidade variável. Em um dos casos (GJ3), filamentos foram visíveis acima da altura limite das ramificações do topo do GJ.

Em todos os eventos os grânulos da fase TJ estavam presentes, também em quantidade variável. Em um dos casos (GJ8) houve uma interrupção e retomada do brilho dos grânulos, e em outro caso (GJ11) esse fenômeno ocorreu duas vezes.

Com exceção do estágio TJ, a duração total e dos outros estágios dos GJs estudados neste trabalho foi menor do que o observado em média na literatura utilizada para a realização deste trabalho (Tabela 4.2; Figura 4.2a), com destaque para os estágios LJ e FDJ, que tiveram duração em média 2,7 e 4,1 vezes menor, respectivamente. A duração média do estágio TJ estimada neste trabalho (277 ms) foi semelhante ao observado na literatura (274 ms) (Figura 4.2a). Com relação aos máximos e mínimos da duração dos estágios dos GJs, a menor duração do estágio TJ observada (136 ms) foi oito vezes maior do que a menor duração encontrada em estudos anteriores (17 ms), e a maior duração (783 ms) foi 1,3 vezes maior.

Com relação à altura máxima dos GJs nas fases FDJ e TJ, os resultados foram bem semelhantes ao encontrado na literatura (Tabela 4.2; Figura 4.2b), com ressalva na altura máxima no estágio FDJ, onde a parte visível do GJ3 alcançou 120,3 km de altura, consideravelmente acima do máximo observado em estudos anteriores (103,3 km). Com relação à altura da base dos GJs, os valores encontrados ficaram acima do observado na literatura (Figura 4.2b),

provavelmente devido à obstrução por nuvens e/ou devido à parte da base do GJ estar fora do campo de visão da câmara em alguns casos.

Com relação à largura máxima dos GJs nos estágios FDJ e TJ, os resultados médios encontrados neste trabalho também foram bastante próximos ao observado em estudos anteriores (Figura 4.2c).

Tabela 4.2 - Características físicas dos GJs estudados neste trabalho, e comparação com trabalhos anteriores realizados por diversos autores. O “número de amostras” refere-se à quantidade de estudos anteriores utilizada para os cálculos dos parâmetros dos GJs.

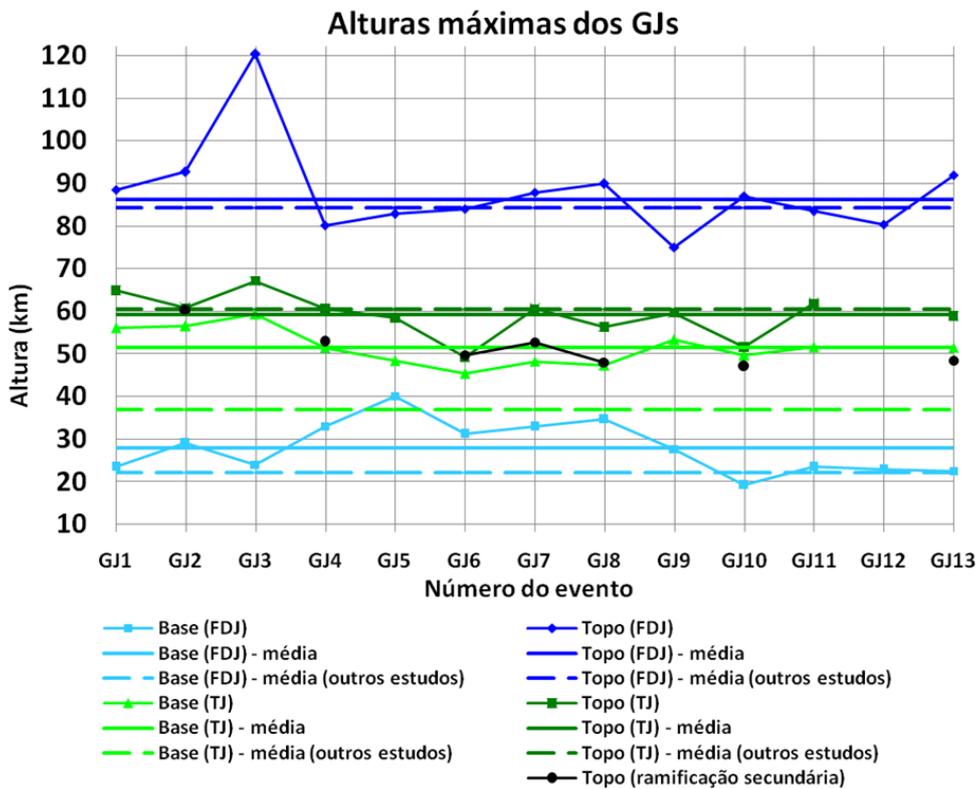
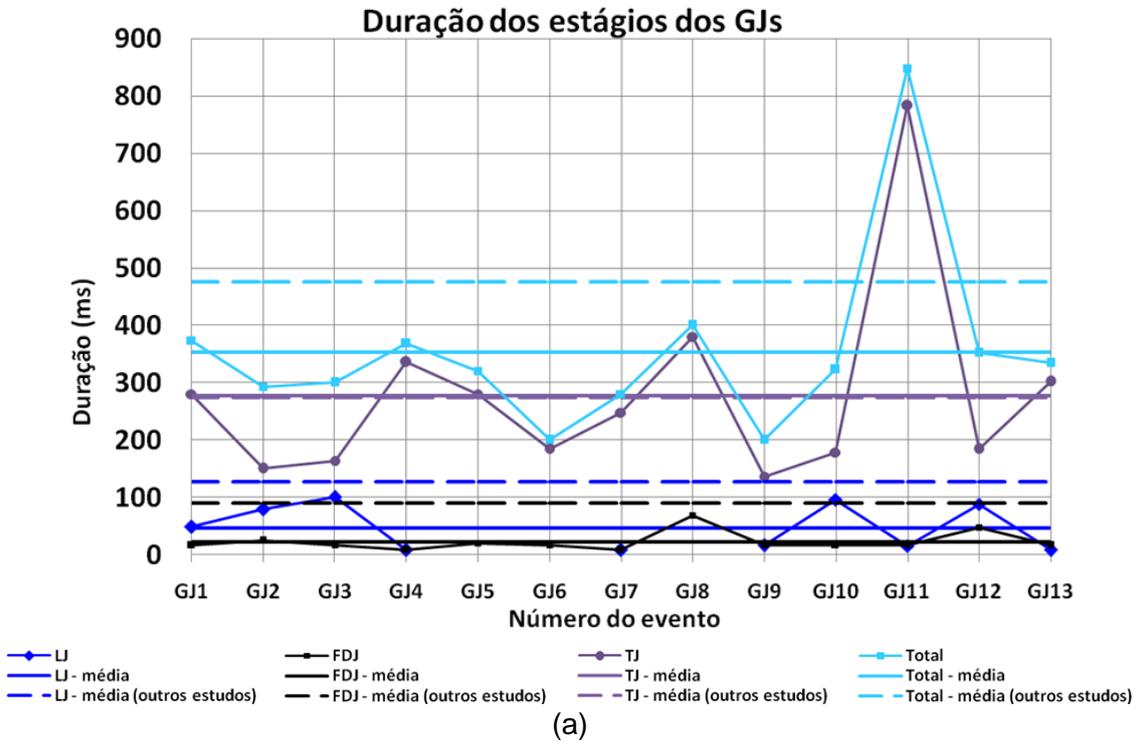
Evento	Duração aproximada (ms)				Alturas - FDJ (km)		Alturas - TJ (km)		Largura máxima (km)	
	LJ	FDJ	TJ	Total	Base	Topo	Base	Topo	FDJ	TJ
1	48	16	280	373	23,4	88,5	56,0	64,9	24,1	9,1
2	79	24	150	292	29,0	92,6	56,4	60,7	21,3	4,2
3	100	16	164	300	23,9	120,3	59,3	67,1	26,0	6,6
4	< 16	< 16	336	368	32,9	80,1	51,4	60,7	-	9,5
5	-	20	280	320	40,1	82,8	48,3	58,4	10,7	5,8
6	-	16	184	200	31,1	84,0	45,3	49,2	26,5	5,8
7	< 16	< 16	248	280	32,9	87,8	48,2	60,5	19,1	8,8
8	-	68	380	400	34,6	89,9	47,3	56,3	33,8	9,8
9	16	16	136	200	27,6	74,9	53,3	59,6	20,5	11,7
10	96	16	178	322	19,2	87,0	49,6	51,6	23,4	6,6
11	15	17	783	848	23,4	83,5	51,5	61,8	19,2	9,7
12	88	48	184	352	22,8	80,3	-	-	22,9	-
13	< 16	16	302	334	22,4	91,9	51,4	58,9	19,8	7,8
Média¹	47	22	277	353	28,0	86,2	51,5	59,1	22,3	7,9
Média²	127	90	274	476	22,2	84,2	37,0	60,4	23,0	7,7
Mínimo¹	8	8	136	200	19,2	74,9	45,3	49,2	10,7	4,2
Mínimo²	17	8	17	33	15,5	67,0	37,0	51,0	23,0	4,1
Máximo¹	100	68	783	848	40,1	120,3	59,3	67,1	33,8	11,7
Máximo²	234	184	601	900	39,0	103,3	37,0	68,0	23,0	11,0
Nº de amostras¹	10	13	13	13	13	13	12	12	12	12
Nº de amostras²	5	3	6	10	7	17	1	6	1	2

¹ = valores encontrados neste trabalho;

² = valores encontrados em trabalhos anteriores.

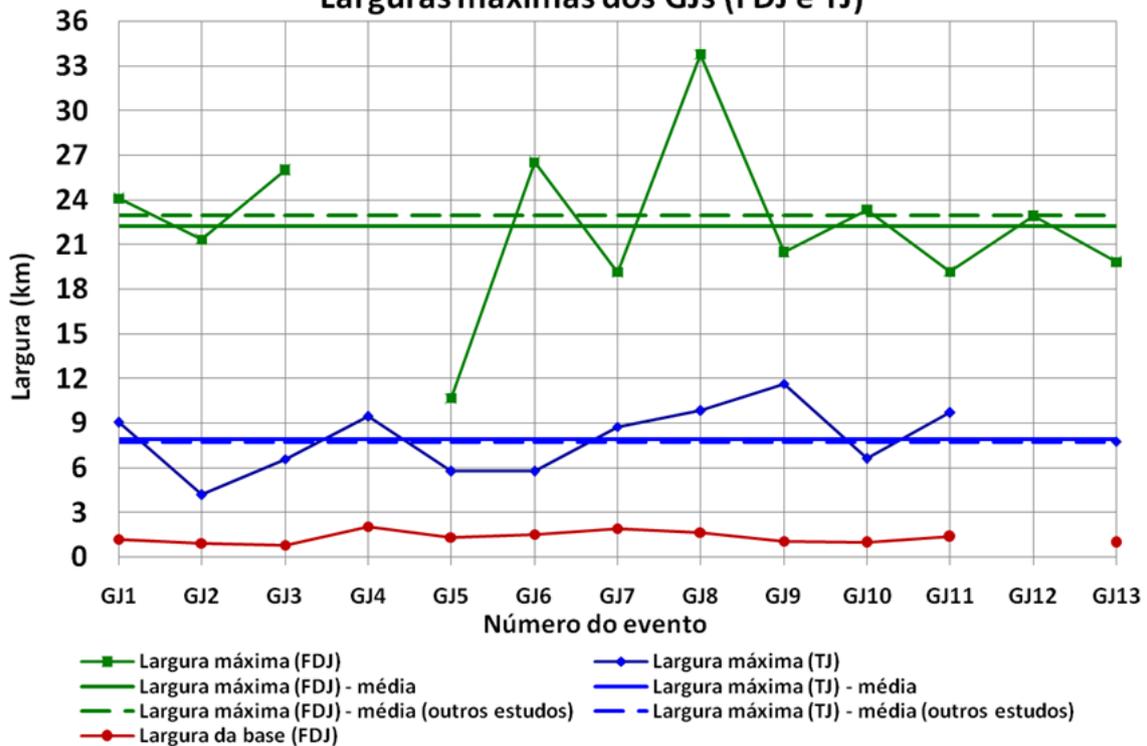
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.2 - Características físicas dos GJs estudados neste trabalho, e comparação com trabalhos anteriores realizados por diversos autores: (a) duração total e dos estágios LJ, FDJ e TJ dos GJs; (b) alturas máximas dos GJs nos estágios FDJ e TJ, além da ramificação secundária; (c) larguras máximas dos GJs nos estágios FDJ e TJ.



(continua)

Figura 4.2 - Conclusão.
Larguras máximas dos GJs (FDJ e TJ)



(c)

Fonte: Produção do autor.

4.2 Caracterização física e elétrica dos relâmpagos associados aos GJs

A rede de detecção de relâmpagos ENTLN detectou 62% dos eventos de GJs, a STARNET 54% e o sensor GLM 100% (excluindo-se o evento de 06/01/2020, em que não há dados disponíveis do GLM).

Com base nas informações das detecções de relâmpagos das redes ENTLN e STARNET e do sensor GLM, foi construída a Tabela 4.3. Os dados de duração dos relâmpagos foram estimados com base nos eventos de relâmpagos detectados pelo GLM.

Tabela 4.3 - Características físicas e elétricas dos relâmpagos associados aos GJs estudados, a partir do sensor GLM (duração dos relâmpagos) e das redes ENTLN e STARNET.

Tipo de raio	Polaridade	Quantidade de detecções	Pico de corrente		Duração (GLM)	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Intra-nuvem	-	10 (31,3%)	-	-	560 ms	2219 ms
Nuvem-solo	Negativa	9 (28,1%)	-4,2 kA (GJ11)	-33,3 kA (GJ13)		
	Positiva	4 (12,5%)	16,1 kA (GJ12)	31,2 kA (GJ3)		
	Sem dados	9 (28,1%)	-	-		

Fonte: Produção do autor.

Em todos os eventos estudados, os relâmpagos detectados pelas redes, tanto em solo quanto por satélite, se originaram na região de convecção mais intensa (com menores temperaturas de brilho) dos sistemas convectivos.

4.3 Caracterização física dos sistemas convectivos associados aos GJs

Todos os cálculos para a caracterização física dos sistemas convectivos associados aos eventos de GJs foram realizados utilizando-se o *software* QGIS. Para tal, considerou-se o horário mais próximo ao da ocorrência dos GJs disponível nas imagens de satélite, considerando-se também o tempo para o *scan* do sensor do satélite alcançar a região de atuação destes sistemas. Para o evento de 06/01/2020 (GJs 6, 7 e 8), não foi possível realizar as estimativas dos parâmetros físicos dos sistemas convectivos.

Com relação às áreas de cobertura dos sistemas convectivos no momento aproximado dos GJs, observou-se grande variação entre os casos estudados, com valores oscilando entre aproximadamente 2800 e 33400 km² para o limiar de 235 K e entre aproximadamente 200 e 22700 km² para o limiar de 210 K (Tabela 4.4; Figura 4.3a).

O sistema convectivo ocorrido em 26/12/2020 (associado aos GJs 11 e 12) possuiu uma área de abrangência consideravelmente maior que os demais sistemas estudados (Figura 4.3a), sendo em média 4,8 vezes maior, para o limiar de 235 K, e 7,5 vezes maior, para o limiar de 210 K. Este mesmo sistema

também foi o que apresentou as menores TBs mínima (-93,4°C) e média (-67,5°C para o limiar de 235 K e -74,4°C para o limiar de 210 K) observadas (Figura 4.3b).

O sistema com menor área foi o associado ao GJ1 (para o limiar de 235 K) e ao GJ9 (para o limiar de 210 K) (Figura 4.3a). O sistema associado ao GJ9 possuiu também as TBs mínima (-68,1°C) e média (-52,5°C para o limiar de 235 K e -65,2°C para o limiar de 210 K) mais altas (Figura 4.3b). Assim, concluiu-se que este sistema possuiu uma profundidade vertical consideravelmente menor que os demais.

Com relação à taxa de expansão dos sistemas convectivos, observou-se que todos eles estavam em expansão no momento dos GJs, como observado em estudos anteriores (Tabela 4.4; Figura 4.3c), exceto em um evento (GJ4), cujo sistema apresentou taxa de expansão levemente negativa ($-10 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$), e somente para o limiar de 235 K.

Para o limiar de 235 K, os dois sistemas convectivos com maior taxa de expansão (353 e $324 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$) estão associados aos dois únicos eventos registrados no Nordeste do Brasil, os GJs 1 e 10 (Figura 4.3c). Para o limiar de 210 K, a maior taxa de expansão ($620 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$) também foi observada no sistema associado ao GJ1.

Com relação à proporção entre as áreas dos sistemas convectivos para o limiar de 235 K e para o limiar de 210 K, observou-se que as áreas com temperaturas de brilho menores que 235 K são em média 5,5 vezes maiores que as áreas com temperaturas menores que 210 K. O sistema convectivo associado ao GJ9 possuiu uma área para o limiar de 235 K 37 vezes maior que a área para o limiar de 210 K, bastante diferente dos demais (que são em média 2 vezes maiores).

Com exceção da temperatura mínima dos topos, os outros parâmetros calculados neste estudo (temperaturas médias, áreas, taxas de expansão, etc.) não foram realizados em estudos anteriores dentro do levantamento bibliográfico realizado.

Tabela 4.4 - Características físicas dos sistemas convectivos associados aos GJs estudados neste e em outros trabalhos, para os limiares de 235 e 210 K.

Evento	1	2	3	4	5	9	10	11	12	13
Tb _{mín} (°C)	-77,2	-75,1	-79,7	-81,7	-78,2	-68,1	-78,4	-93,4	-90,4	-80,9
Área (km ²) - 235 K	2799	2990	10153	10497	12307	5860	3254	29081	33372	4706
Área (km ²) - 210 K	904	1076	3068	4874	6981	157	1616	18380	21873	2846
Proporção área 235 K / área 210 K	2,45	2,47	3,25	2,16	1,70	36,69	1,73	1,52	1,48	1,52
Taxa de expansão (x 10 ⁻⁴ min ⁻¹) - 235 K	353	166	37	-10	75	33	324	76	66	175
Taxa de expansão (x 10 ⁻⁴ min ⁻¹) - 210 K	620	405	273	218	166	487	369	88	77	172
	Média ¹	Média ²	Mínimo ¹	Mínimo ²	Máximo ¹	Máximo ²				
Tb _{mín} (°C)	-80,30	-69,45	-93,45	-90,00	-68,06	-34,00				
Área (km ²) - 235 K	11502	-	2799	-	33372	-				
Área (km ²) - 210 K	6177	-	157	-	21873	-				
Proporção área 235 K / área 210 K	5,50	-	1,48	-	36,69	-				
Taxa de expansão (x 10 ⁻⁴ min ⁻¹) - 235 K	129	-	-10	-	353	-				
Taxa de expansão (x 10 ⁻⁴ min ⁻¹) - 210 K	287	-	77	-	620	-				

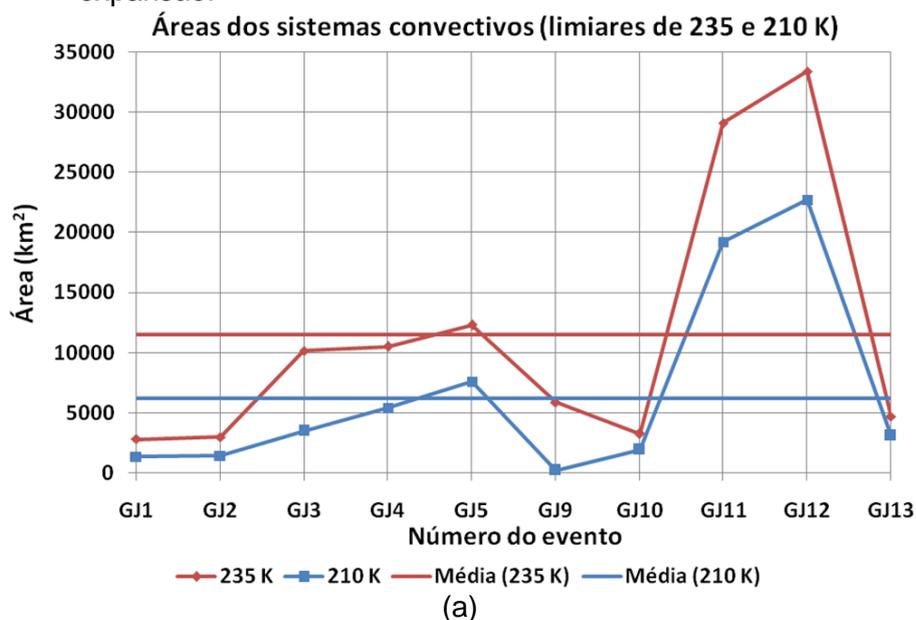
Tb_{mín} = Temperatura de brilho mínima.

¹ = valores encontrados neste trabalho (10 amostras);

² = valores encontrados em trabalhos anteriores (9 amostras).

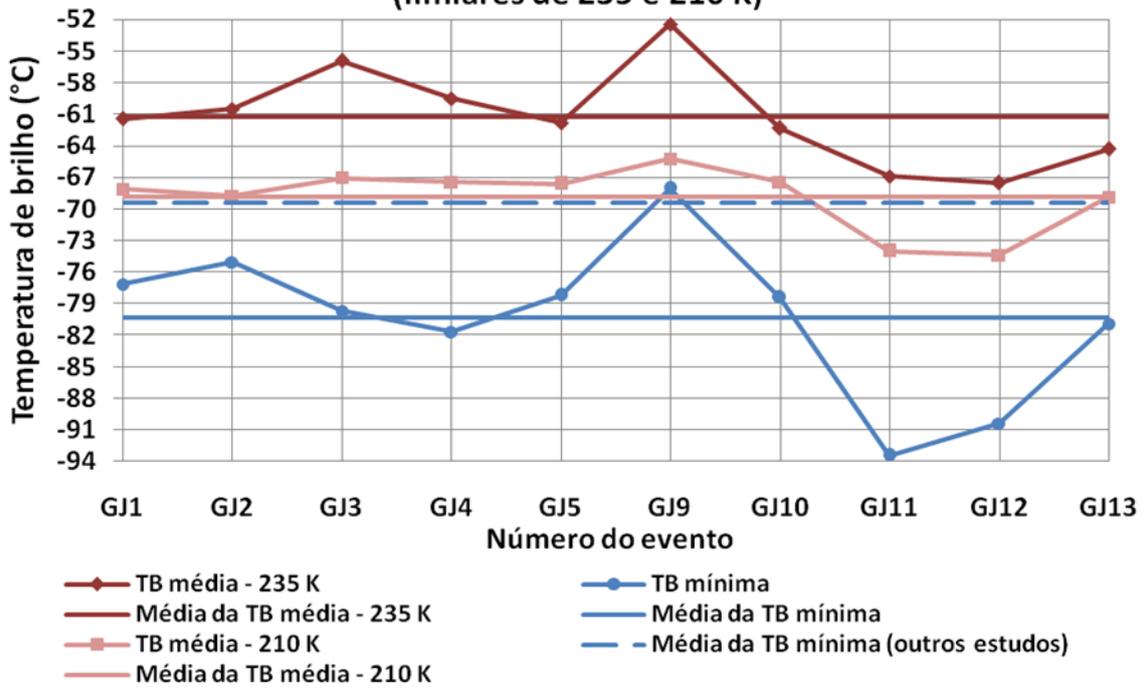
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Características físicas dos sistemas convectivos associados aos GJs estudados neste e em outros trabalhos, para os limiares de 235 e 210 K: (a) áreas; (b) temperaturas média e mínima dos topos; (c) taxas de expansão.

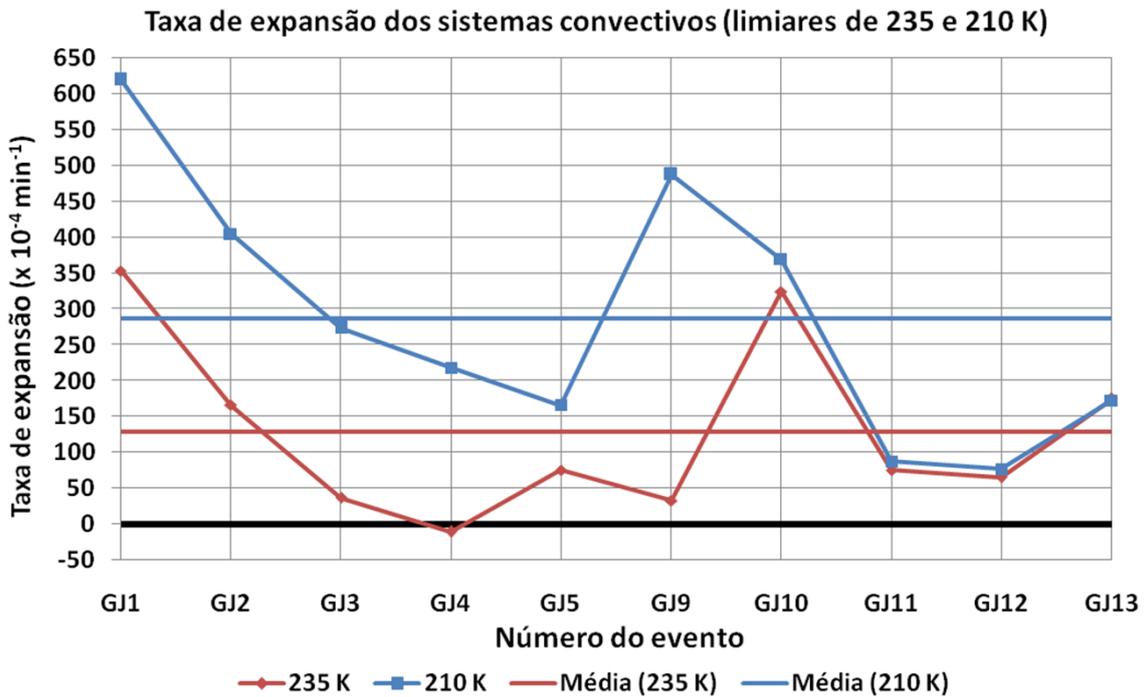


(continua)

Figura 4.3 - Conclusão.
Temperatura dos topos dos sistemas convectivos
 (limiares de 235 e 210 K)



(b)



(c)

Fonte: Produção do autor.

Com relação à evolução e ao ciclo de vida dos sistemas convectivos e seus núcleos convectivos associados, foram analisadas sequências de imagens de satélite, de forma visual. Foram utilizadas imagens do canal 13 do satélite GOES-16 com frequência de 15 minutos para os eventos associados aos GJs 1 e 2 e de 10 minutos para os demais eventos. Para o evento associado aos GJs 6, 7 e 8 foram utilizadas imagens do canal 9 do METEOSAT-11 entre 22:00 e 23:45 UTC, devido à falta de dados do GOES-16 neste período.

Ainda nesta fase de análise visual foi possível observar que, em todos os casos estudados, os ventos na alta troposfera, na região dos topos dos sistemas convectivos, possuíam velocidades variando entre fraca e moderada.

4.4 Caracterização geral de cada evento associado aos GJs

Esta seção é destinada à descrição das principais características observadas em cada evento de GJ registrado no Brasil. As características físicas dos GJs e dos sistemas convectivos associados foram analisadas, bem como as condições sinóticas atuantes na região onde cada sistema convectivo se desenvolveu.

4.4.1 GJ1 - 13/03/2017 23:09:53 UTC

Este foi o primeiro evento de GJ registrado no Brasil (Figura 4.4a). Foi observado a partir da cidade de Campina Grande-PB e possuiu duração de 373 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas em 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET (Figura 4.4b).

Durante sua fase inicial (LJ), com duração de 48 ms, o GJ apresentou diversas ramificações partindo da base do seu canal principal (Figura 4.4a, quadro 4), que permaneceram visíveis até a fase seguinte.

Na fase FDJ, o GJ apresentou um topo em formato cônico com diversas ramificações (Figura 4.4a, quadro 5) e uma extensão horizontal máxima de 24,1 km, atingindo aproximadamente 88,5 km de altura, partindo de uma base a 23,4 km de altura. Esta fase durou 16 ms.

Na fase final (TJ), os grânulos apresentaram um deslocamento vertical de aproximadamente 8,9 km (Figura 4.4a, quadros 7-19), com duração de 280 ms e com seus elementos mais elevados se deslocando de 56,0 km para 64,9 km de altura. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 9,1 km. Ao mesmo tempo foi possível observar um deslocamento da esquerda para a direita da parte mais brilhante da base do GJ, durante esta fase. Este deslocamento, que possuiu velocidade de propagação decrescente, foi visível a olho nu.

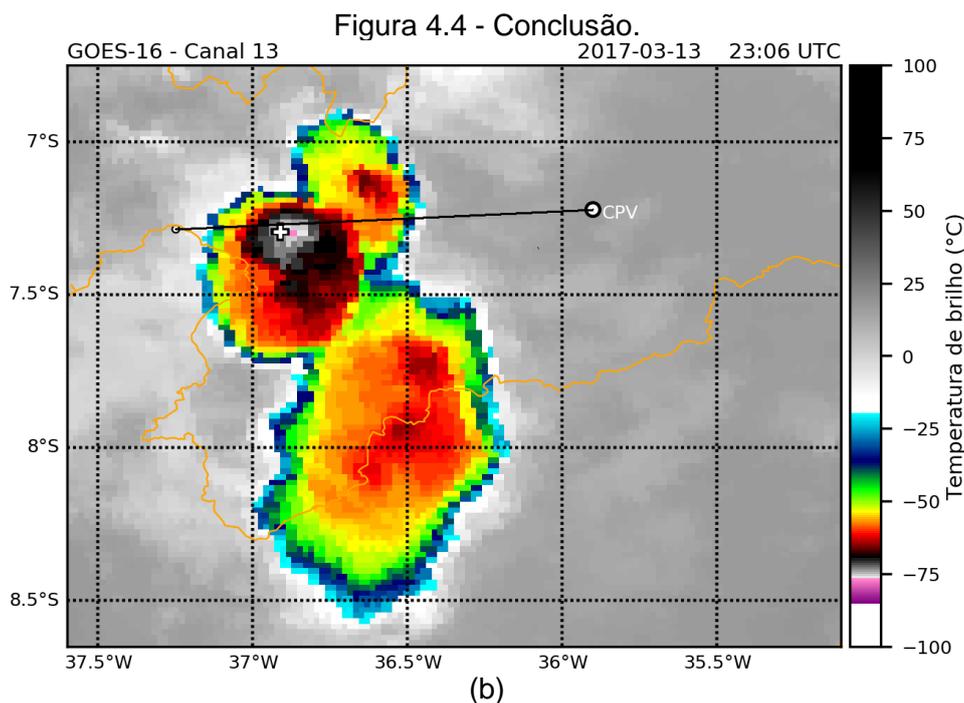
Também a partir da observação a olho nu, percebeu-se que a base do GJ apresentou uma coloração azulada, mas devido à ausência de filtro infravermelho nas câmeras que registraram os GJs, a coloração geral dos GJs estudados ficou alterada, com tons de lilás em toda a sua extensão vertical, visíveis nas câmeras que operavam no modo colorido de imagens.

Figura 4.4 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ1 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ1. O círculo ao lado da sigla "CPV" indica o local da câmera que registrou o GJ1; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ1; o símbolo de "+" representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET.



(a)

(continua)



Fonte: Produção do autor.

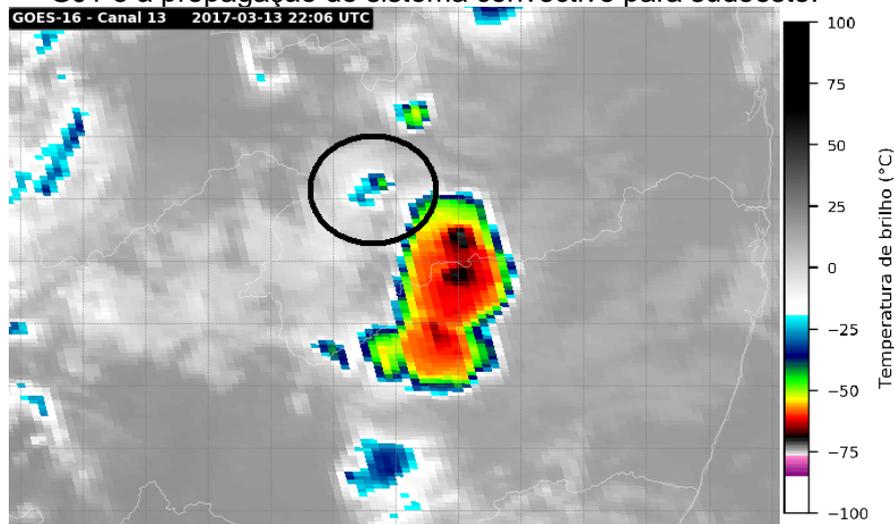
A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado ao GJ1 uma crista estava presente em 250 hPa, com seu eixo sobre a região de formação do sistema convectivo. Esta crista estava associada a um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) situado corrente acima, a sudoeste da crista, com centro sobre os estados de Tocantins e Goiás, que por sua vez estava associado a um anticiclone com características da Alta da Bolívia (AB), com centro situado entre o oeste da Bolívia e o Oceano Pacífico. O VCAN estava atuante também em 500 hPa. Neste nível, a região onde ocorreu o GJ1 estava sob a borda nordeste de um anticiclone. No litoral adjacente da região havia um cavado em 850 hPa.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência do GJ1 começaram a se formar às 20:21 UTC, a sudeste da região. O núcleo convectivo que gerou o GJ iniciou-se às 22:06 UTC (Figura 4.5a), tendo intensidade máxima às 23:06 UTC, aproximadamente no momento do GJ (Figura 4.5b). Às 23:51 UTC, durante sua dissipação, outro núcleo convectivo se formou a sudoeste, embebido na bigorna do núcleo anterior. Esta característica

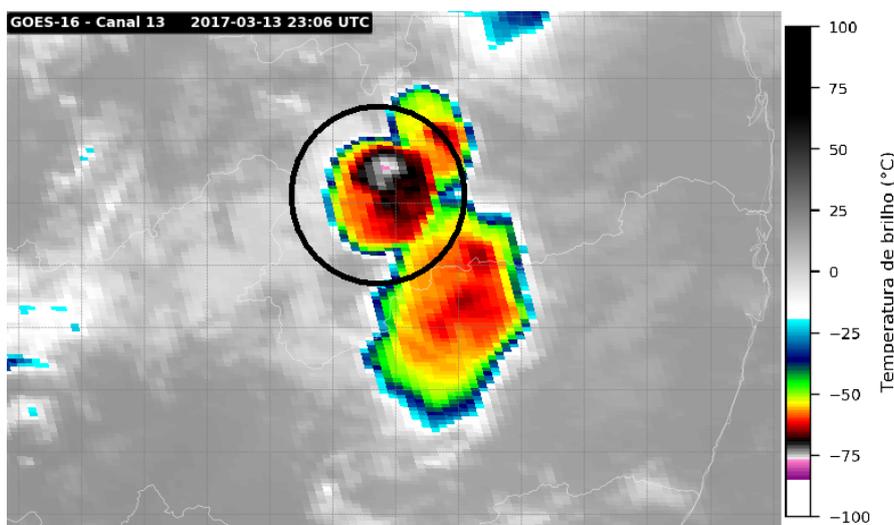
de formação de núcleos próximos e em sequência permaneceu, fazendo com que o sistema como um todo se propagasse inicialmente para sudoeste, até em torno das 01:06 UTC de 14/03 (Figura 4.5c), e posteriormente para noroeste.

Entre 03:51 e 05:36 UTC o sistema se intensificou e se expandiu consideravelmente, permanecendo estável até 08:06 UTC, quando passou a desintensificar e a não formar mais nenhum novo núcleo após às 11:06 UTC. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 14:06 UTC.

Figura 4.5 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16, correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ1, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ1 e (c) à dissipação do núcleo convectivo associado ao GJ1 e à propagação do sistema convectivo para sudoeste.



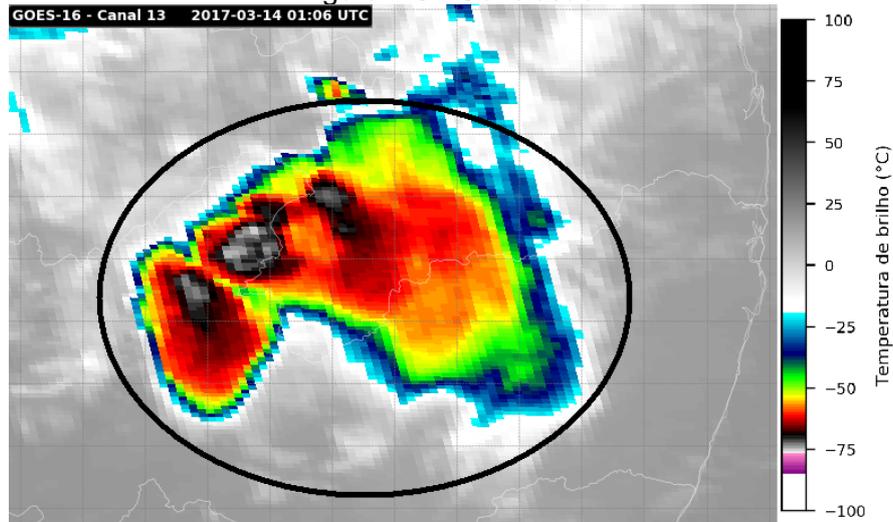
(a)



(b)

(continua)

Figura 4.5 - Conclusão.



(c)

Fonte: Produção do autor.

4.4.2 GJ2 - 16/03/2018 22:44:53 UTC

Este evento foi registrado por duas câmeras distantes 3 km entre si (Tabela 3.2), situadas na cidade de Rondonópolis-MT (Figura 4.6a, b). Os dados deste evento, exceto quando explicitado, são resultado da média das estimativas dos registros das duas câmeras. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas em 1 ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo sensor GLM do GOES-16 (Figura 4.6c), pois não houve detecção a partir de redes baseadas em sensores em solo. A duração deste GJ foi estimada em 292 ms.

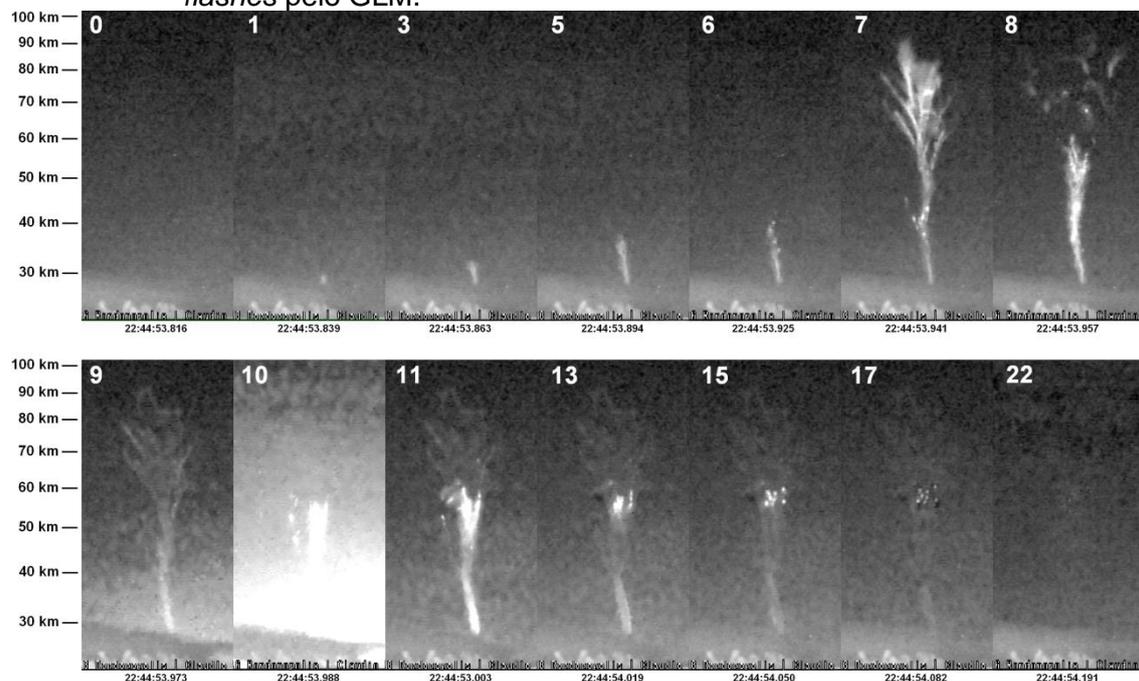
Durante sua fase inicial, com duração de 79 ms, o GJ apresentou alguns grânulos próximos à base do seu canal principal, visíveis principalmente próximo ao momento da fase FDJ (Figura 4.6a, quadro 3; Figura 4.6b, quadro 6).

Na fase FDJ, o topo em formato cônico com diversas ramificações e extensão horizontal máxima de 21,3 km alcançou 92,6 km de altura, partindo de uma base a 29,0 km de altura. Esta fase durou 24 ms, com os grânulos próximos à base do GJ permanecendo visíveis (Figura 4.6a, quadro 4; Figura 4.6b, quadro 7), desaparecendo logo no início da fase seguinte. Um grânulo isolado situado na mesma área das ramificações permaneceu visível por pelo menos 64 ms durante a fase seguinte (Figura 4.6a, quadros 5-8; Figura 4.6b, quadros 8-17).

Na fase TJ, os grânulos característicos desta fase possuíram um deslocamento vertical de 4,3 km, com duração de 150 ms e com seus elementos mais elevados se deslocando de 56,4 km para 60,7 km de altura (Figura 4.6a, quadros 5-14; Figura 4.6b, quadros 8-17). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 4,2 km, a menor dentre todos os GJs estudados. Ao mesmo tempo, foi possível observar um discreto deslocamento da esquerda para a direita da parte mais brilhante da base do GJ durante esta fase.

Durante a fase FDJ e no início da fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária, que se iniciou nas proximidades da base do GJ, se distanciou deste com a altura e se conectou novamente ao GJ a cerca de 60 km de altura, na mesma região dos grânulos da fase TJ (Figura 4.6a, quadros 7-10; Figura 4.6b, quadros 7 e 9-13). Esta ramificação durou 79 ms.

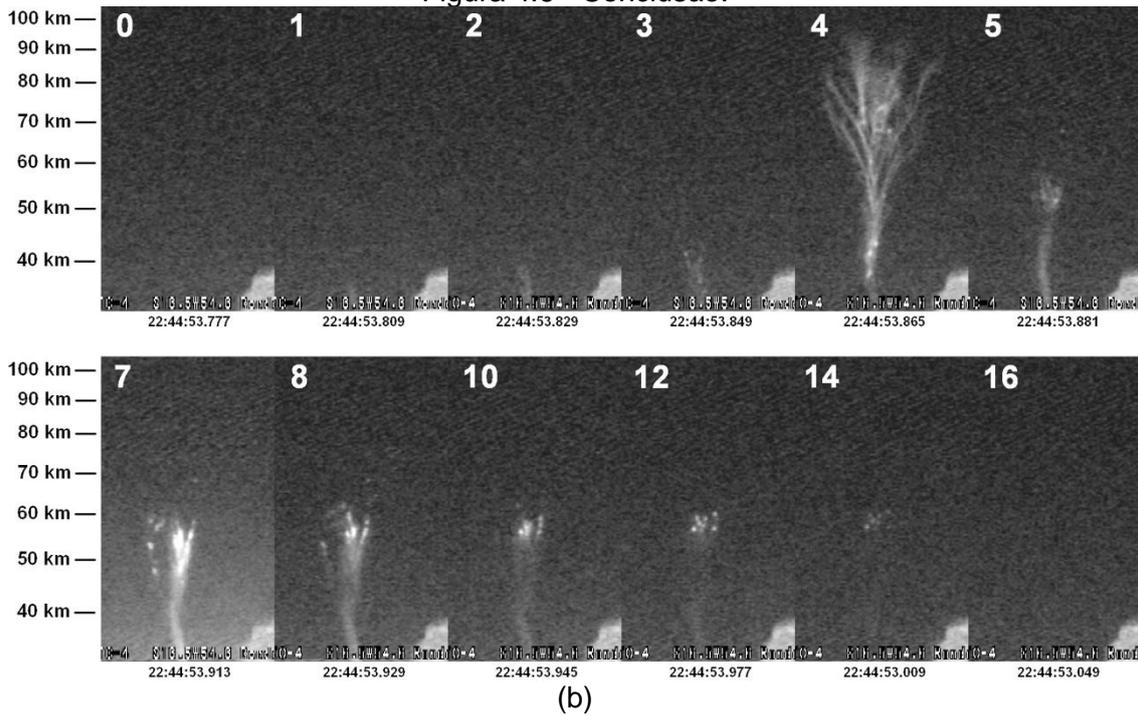
Figura 4.6 - (a), (b) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ2 por duas câmeras diferentes (horário em UTC); (c) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ2. Os círculos ao lado das siglas “CMM” e “ROO” indicam os locais das câmeras que registraram o GJ2; as retas traçadas a partir dos locais do registro representam o azimute correspondente à base do GJ2; a bolinha vermelha sobre a reta do azimute, na longitude de aproximadamente 55,5°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM.



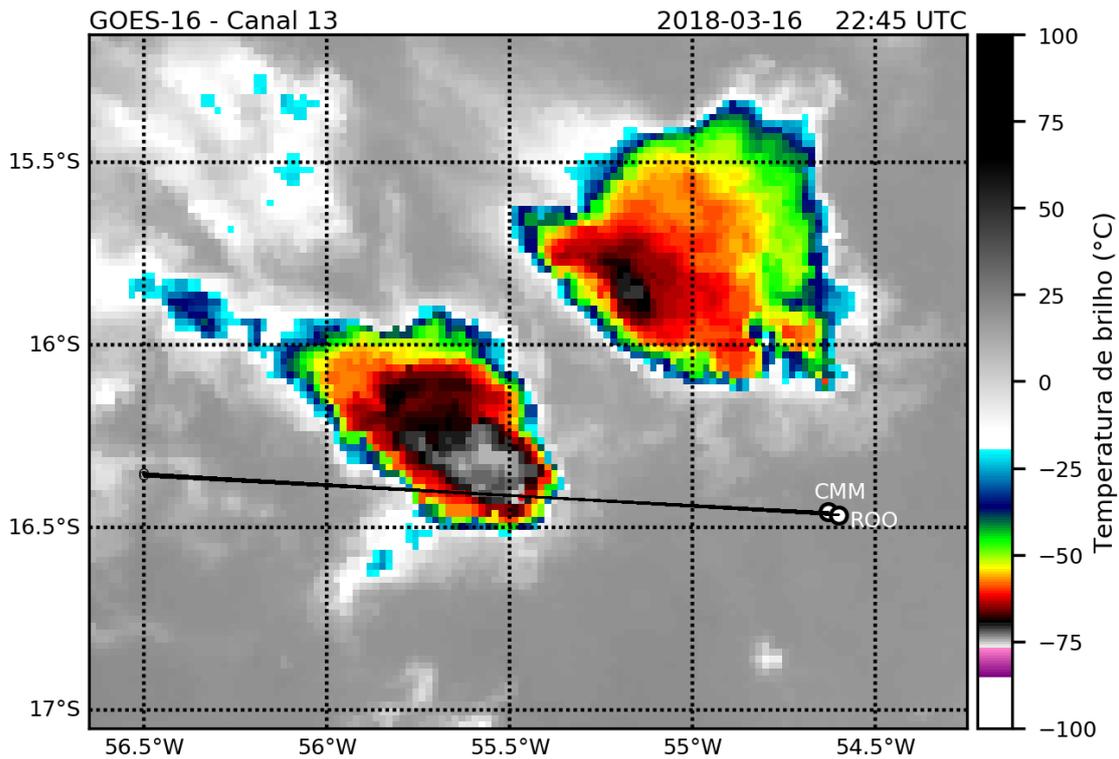
(a)

(continua)

Figura 4.6 - Conclusão.



(b)



(c)

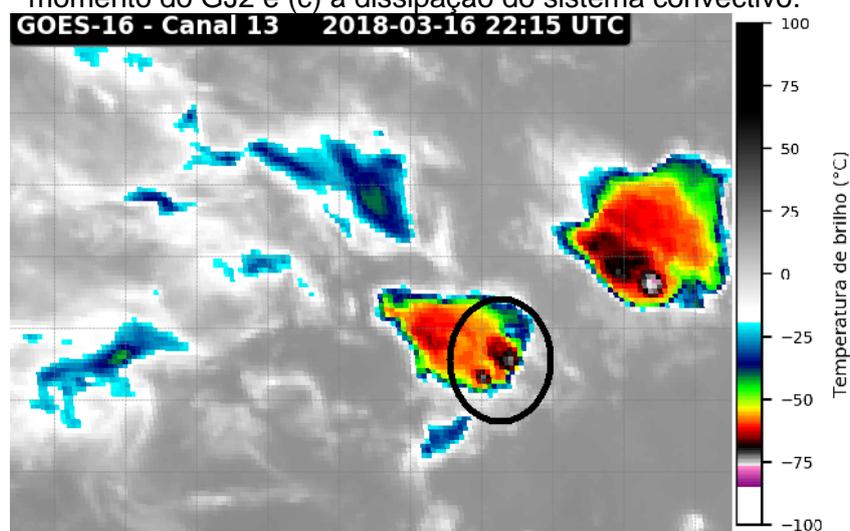
Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que

no momento de atuação do sistema convectivo associado ao GJ2 a região associada estava sob influência da borda nordeste de um anticiclone com características da Alta da Bolívia em 250 hPa, cuja abrangência era bastante ampla. Em 500 hPa a borda norte de um anticiclone atuava sobre a região. Em 850 hPa havia confluência dos ventos, advindos das regiões Nordeste e Norte do Brasil, e também do norte da Bolívia.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência do GJ2 começaram a se formar às 21:00 UTC, a leste/nordeste da região. O núcleo convectivo que gerou o GJ iniciou-se às 22:15 UTC (Figura 4.7a), a partir de dois pequenos núcleos parcialmente embebidos em núcleos anteriores, que se fundiram às 22:30 UTC, apresentando intensidade máxima nesse mesmo horário. Na imagem referente ao momento do GJ (22:45 UTC, Figura 4.7b), o núcleo se apresentou levemente menos intenso. Entre 23:00 e 23:45 UTC, novos núcleos convectivos um pouco mais intensos se formaram, embebidos na bigorna do núcleo anterior. Logo após, o sistema convectivo passou a desintensificar rapidamente e a não formar mais nenhum novo núcleo após às 00:15 UTC de 17/03 (Figura 4.7c). A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 02:30 UTC enquanto a bigorna de outro sistema próximo se unia a ela.

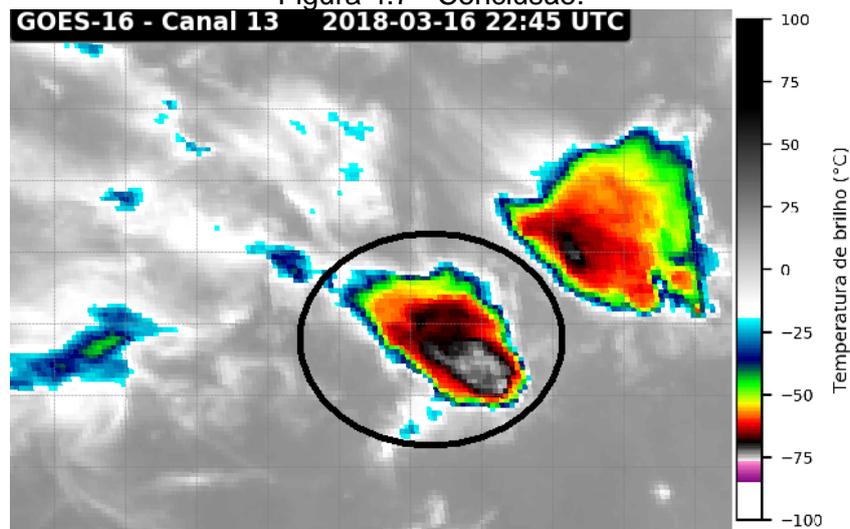
Figura 4.7 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ2, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ2 e (c) à dissipação do sistema convectivo.



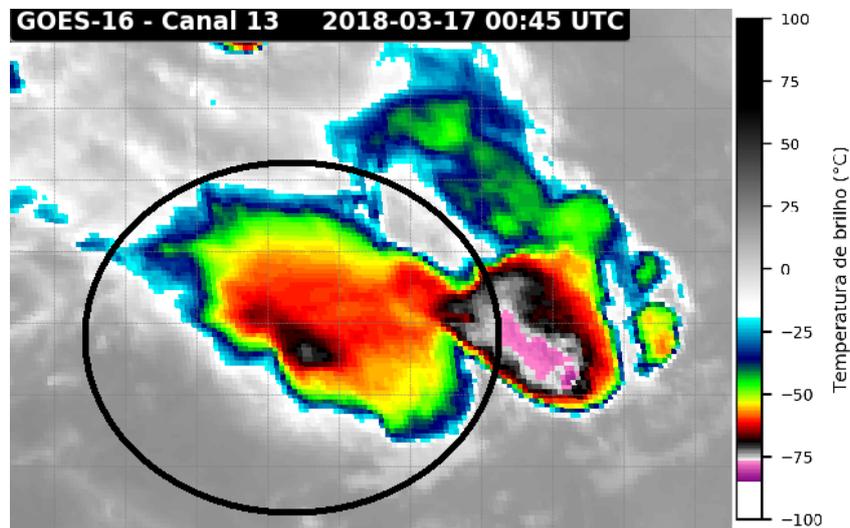
(a)

(continua)

Figura 4.7 - Conclusão.



(b)



(c)

Fonte: Produção do autor.

4.4.3 GJ3, GJ4 e GJ5 - 20/04/2019

Estes três eventos ocorreram em um intervalo de 40 minutos entre si e foram registrados a partir da cidade de São José dos Quatro Marcos-MT, e estavam associados a um mesmo sistema convectivo.

4.4.3.1 GJ3 - 20/04/2019 01:21:47 UTC

Este evento durou 300 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de

valores calculados para 2 pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN (Figura 4.8b).

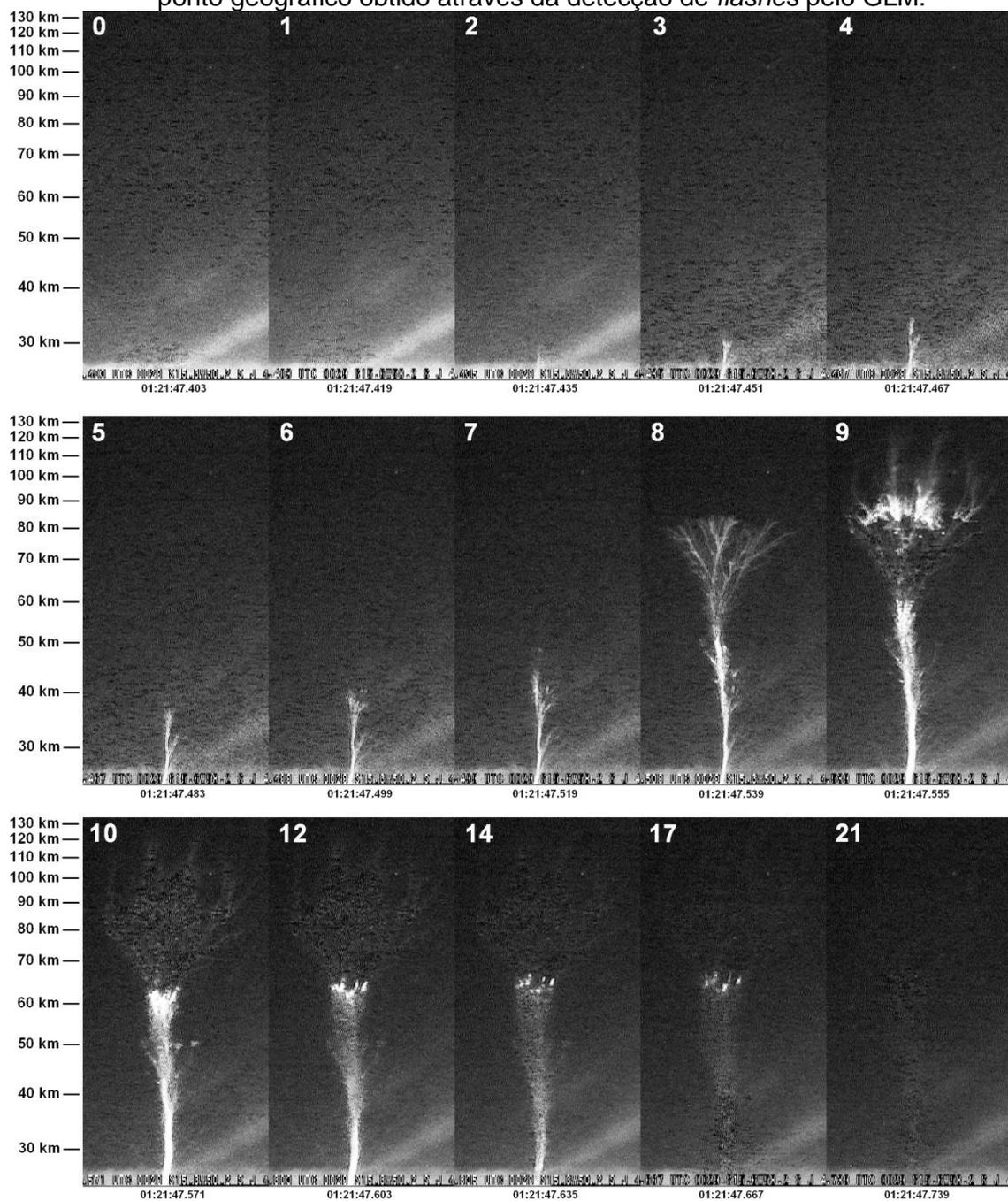
Durante a fase LJ algumas ramificações partiram da base do seu canal principal, permanecendo visíveis até a fase FDJ (Figura 4.8a, quadros 3-7). A duração da fase LJ deste evento (100 ms) foi a maior dentre os casos estudados.

Na fase FDJ, o topo em formato cônico com diversas ramificações e extensão horizontal máxima de 26,0 km atingiu aproximadamente 97,5 km de altura, partindo de uma base a 23,9 km de altura (Figura 4.8a, quadros 8-9). Esta fase durou 16 ms. A maior parte do brilho das ramificações se concentrou em sua parte superior. Assim como no GJ2, um grânulo isolado situado na mesma área das ramificações permaneceu visível até o final do ciclo de vida do GJ.

É importante ressaltar que a altura máxima de 97,5 km deste GJ foi estimada considerando-se o ponto onde se encerram a maioria das ramificações, em vez de se considerar o ponto onde se encerra a parte visível mais elevada do GJ, como foi feito nos outros eventos. A partir desta altura estimada neste caso, alguns filamentos são claramente visíveis, e aparentam estar ainda mais elevados (Figura 4.8a, quadro 9). Considerando esta hipótese, estimou-se que a altura máxima alcançada deste GJ foi de 120,3 km, muito acima do observado na literatura.

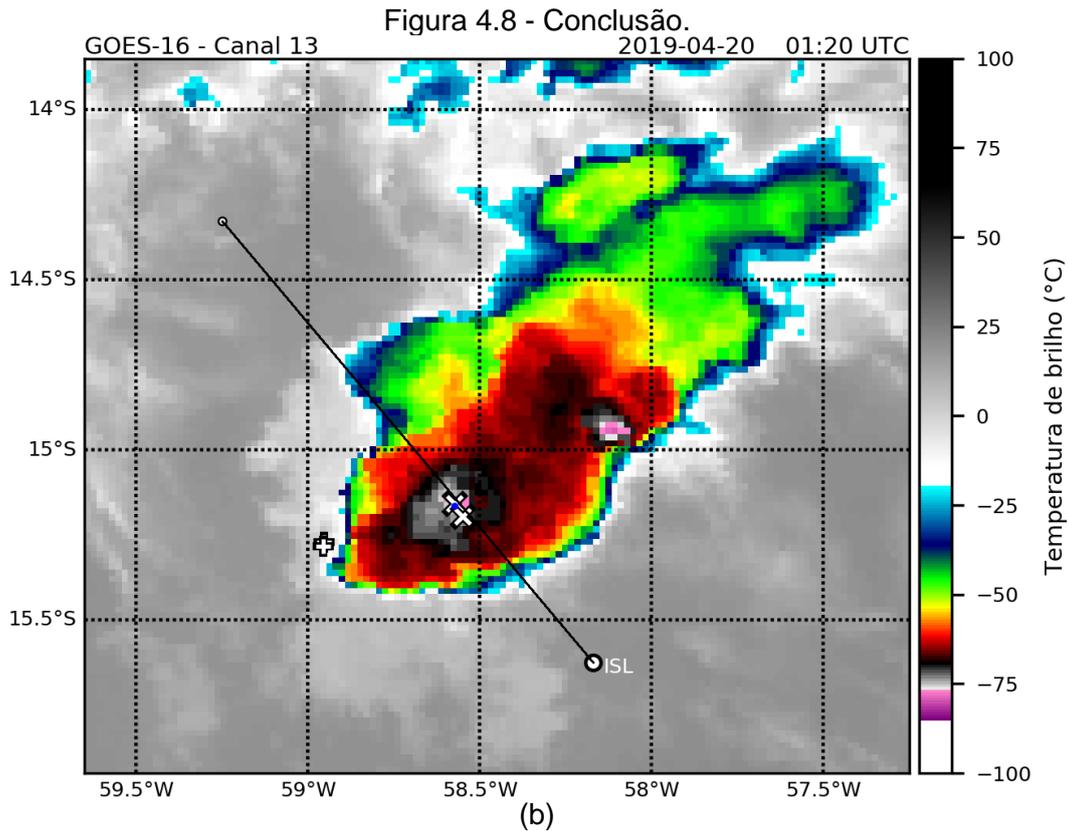
Na fase TJ, os grânulos, menos abundantes, apresentaram deslocamento vertical de 7,8 km e duração de 164 ms (Figura 4.8a, quadros 10-17). Seus elementos mais elevados se deslocaram de 59,3 km para 67,1 km de altura, a faixa de altura mais elevada observada dentre os eventos estudados. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 6,6 km.

Figura 4.8 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ3 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ3. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ3; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ3; os símbolos de “+” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; a bolinha azul próxima à reta do azimute, na longitude de aproximadamente 58,5°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM.



(a)

(continua)



Fonte: Produção do autor.

4.4.3.2 GJ4 - 20/04/2019 01:42:51 UTC

Este evento durou 368 ms. Sua visualização foi prejudicada por presença de nebulosidade entre o GJ e a câmera (Figura 4.9a). As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média dos valores calculados para 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN e para 1 ponto associado a *flashes* detectados pelo GLM (Figura 4.9b).

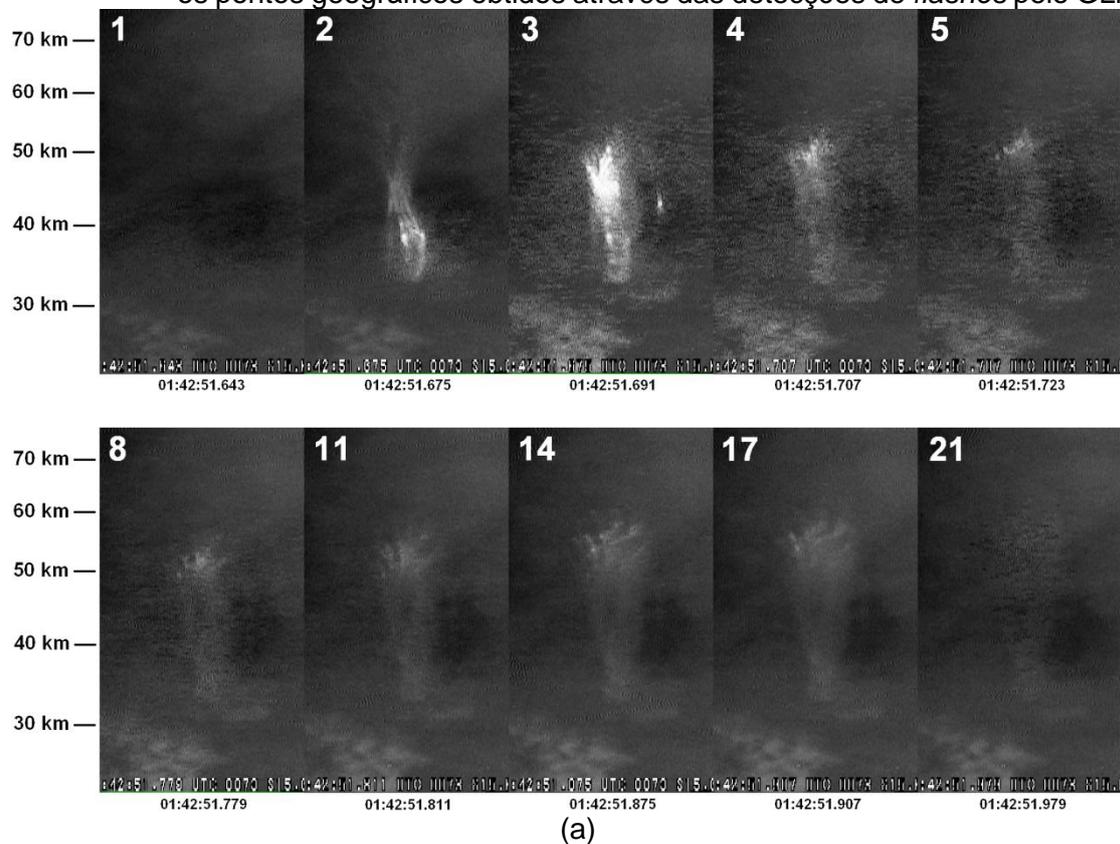
A fase LJ esteve visível somente como um tênue brilho na base do GJ em somente 1 quadro desentrelaçado do vídeo (duração menor que 16 ms), imediatamente antes da fase FDJ (Figura 4.9a, quadro 1).

Na fase FDJ, o topo com formato cônico também foi visível de maneira tênue, com duração inferior a 16 ms, atingindo 80,1 km de altura, partindo de uma base a 32,9 km de altura (Figura 4.9a, quadro 2). A base deste GJ possuiu a maior largura (2,1 km) dentre os casos estudados.

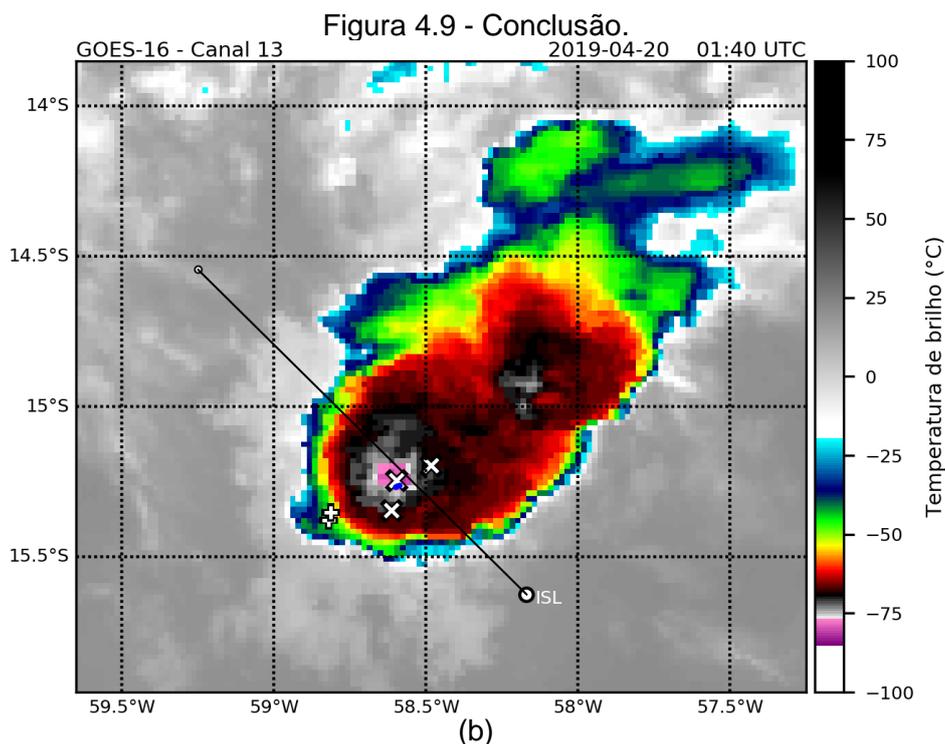
Na fase TJ, os grânulos, bastante abundantes, apresentaram um deslocamento vertical de 9,2 km, com duração total de 336 ms (Figura 4.9a, quadros 3-17). Seus elementos mais elevados se deslocaram de 51,4 km para 60,7 km de altura. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 9,5 km.

No início da fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária que se iniciou nas proximidades da base do GJ, se distanciou deste com a altura e se conectou novamente ao GJ a cerca de 53 km de altura, na região dos grânulos (Figura 4.9a, quadro 3). Esta ramificação durou menos de 16 ms.

Figura 4.9 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ4 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ4. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera que registrou o GJ4; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ4; os símbolos de "+" representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de "x" representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas azuis próximas à reta do azimute, na longitude de aproximadamente 58,6°W, representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM.



(continua)



Fonte: Produção do autor.

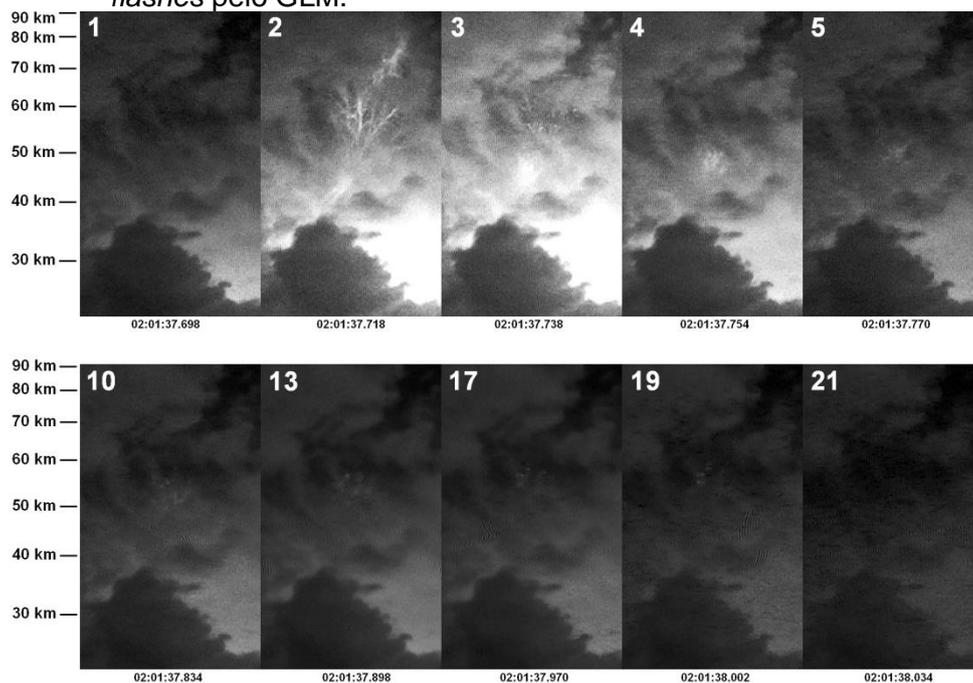
4.4.3.3 GJ5 - 20/04/2019 02:01:37 UTC

Este evento durou 320 ms. Sua visualização também foi prejudicada por presença de nebulosidade entre o GJ e a câmera (Figura 4.10a). As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de valores calculados para 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN e para 1 ponto associado a *flashes* detectados pelo GLM (Figura 4.10b).

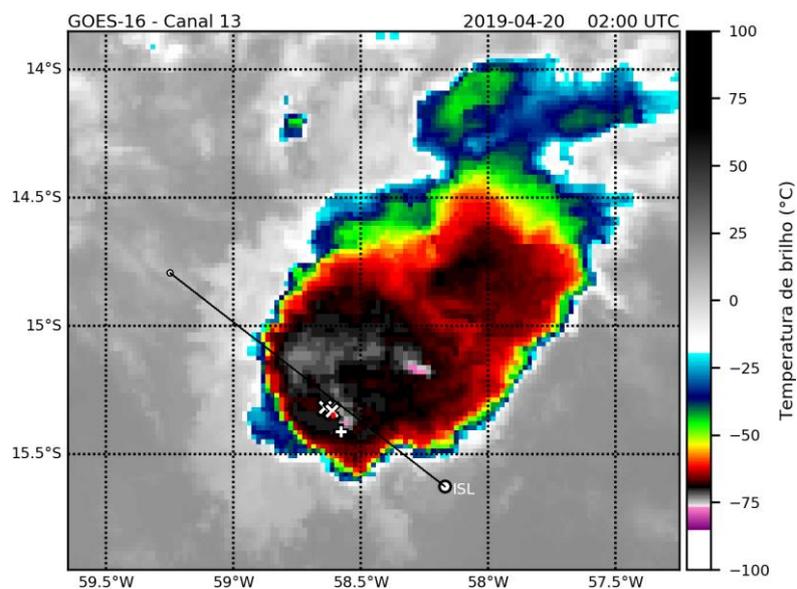
A fase LJ não foi visível neste evento. Na fase FDJ, seu topo, com duração de 20 ms, alcançou 82,8 km de altura, partindo de uma base a 40,1 km de altura (Figura 4.10a, quadro 2). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 10,7 km, a menor dentre os casos estudados.

Na fase TJ, seus grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 10,1 km, com duração de 280 ms (Figura 4.10a, quadros 3-19). Seus elementos mais elevados se deslocaram de 48,3 km para 58,4 km de altura. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 5,8 km.

Figura 4.10 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ5 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ5. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera que registrou o GJ5; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimuth correspondente à base do GJ5; o símbolo de "+" representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de "x" representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas vermelhas próximas à reta do azimuth, na longitude de aproximadamente 58,6°W, representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM.



(a)



(b)

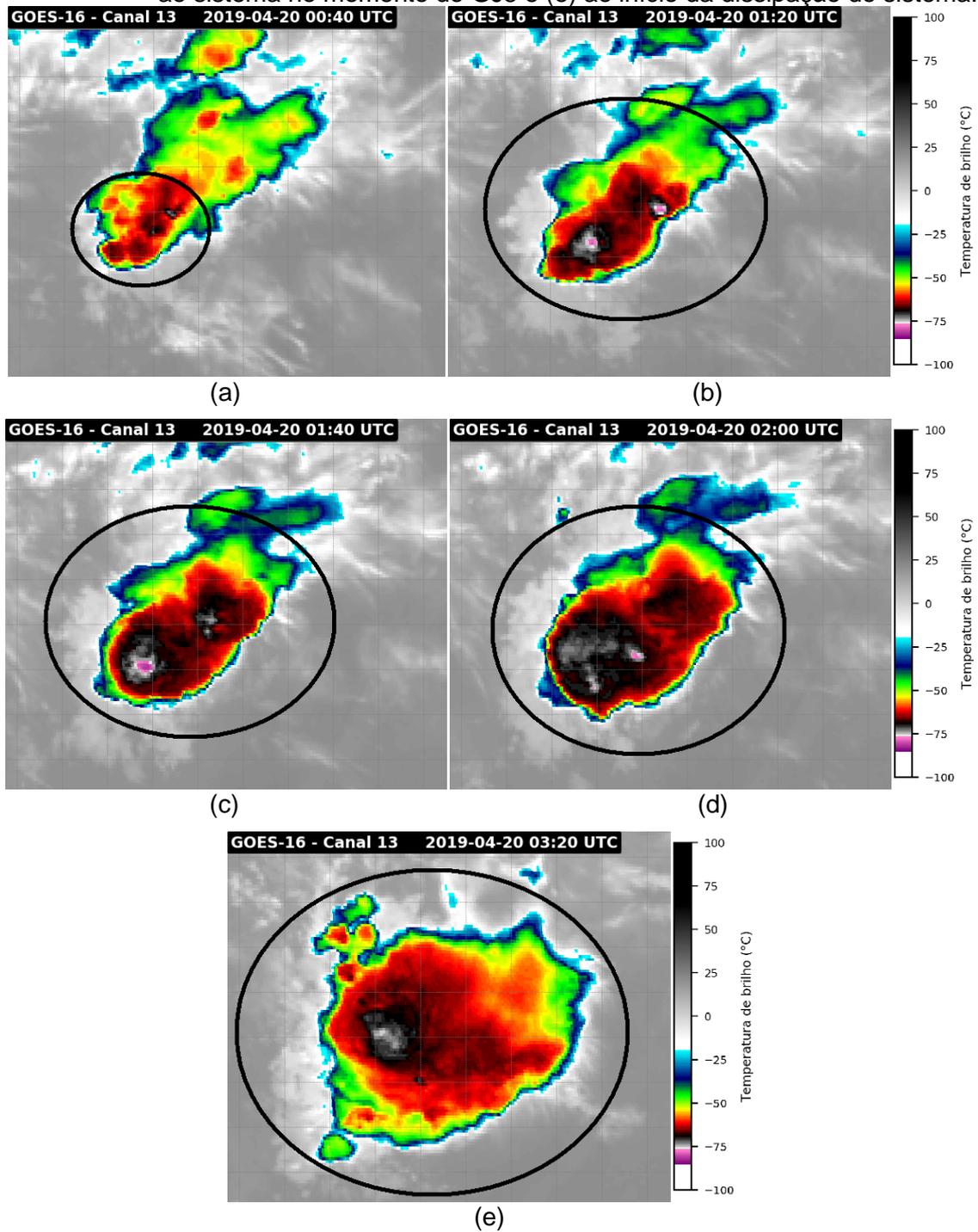
Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado aos GJs 3, 4 e 5 a região onde ocorreu a formação deste sistema estava sob influência da borda sudeste de um anticiclone com características da Alta da Bolívia em 250 hPa, nas proximidades de seu centro. Em 500 hPa o centro de um anticiclone, com perturbações no seu escoamento, atuava sobre a região. Em 850 hPa a região estava sob influência da borda norte/noroeste de um anticiclone, cujo centro se situava entre o sul do Mato Grosso do Sul, norte do Paraná e oeste de São Paulo.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência dos GJs começaram a se formar às 18:00 UTC de 19/04, a oeste da região. Devido ao constante crescimento de vários núcleos convectivos consecutivos, com lento deslocamento de norte para sul, não foi possível discernir com precisão o início do núcleo convectivo responsável pela ocorrência dos GJs. Porém, possivelmente isto ocorreu às 00:40 UTC de 20/04 (Figura 4.11a), quando houve uma intensificação do sistema convectivo, que passou a apresentar uma forma mais circular. Sua fase mais intensa se concentrou entre 01:20 e 02:10 UTC (Figura 4.11b, c, d), na mesma faixa de horários em que os três GJs ocorreram.

O sistema permaneceu aproximadamente estável até 03:20 UTC (Figura 4.11e), quando iniciou seu declínio. Finalmente, após 06:10 UTC, não houve mais a formação de novos núcleos. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 09:00 UTC.

Figura 4.11 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado aos GJs 3, 4 e 5, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ3, (c) ao sistema no momento do GJ4, (d) ao sistema no momento do GJ5 e (e) ao início da dissipação do sistema.



Fonte: Produção do autor.

4.4.4 GJ6, GJ7 e GJ8 - 06/01/2020

Estes três eventos ocorreram em um intervalo de apenas 7 minutos entre si, sendo registrados a partir da cidade de São José dos Quatro Marcos-MT, e estavam associados a um mesmo sistema convectivo.

4.4.4.1 GJ6 - 06/01/2020 23:14:06 UTC

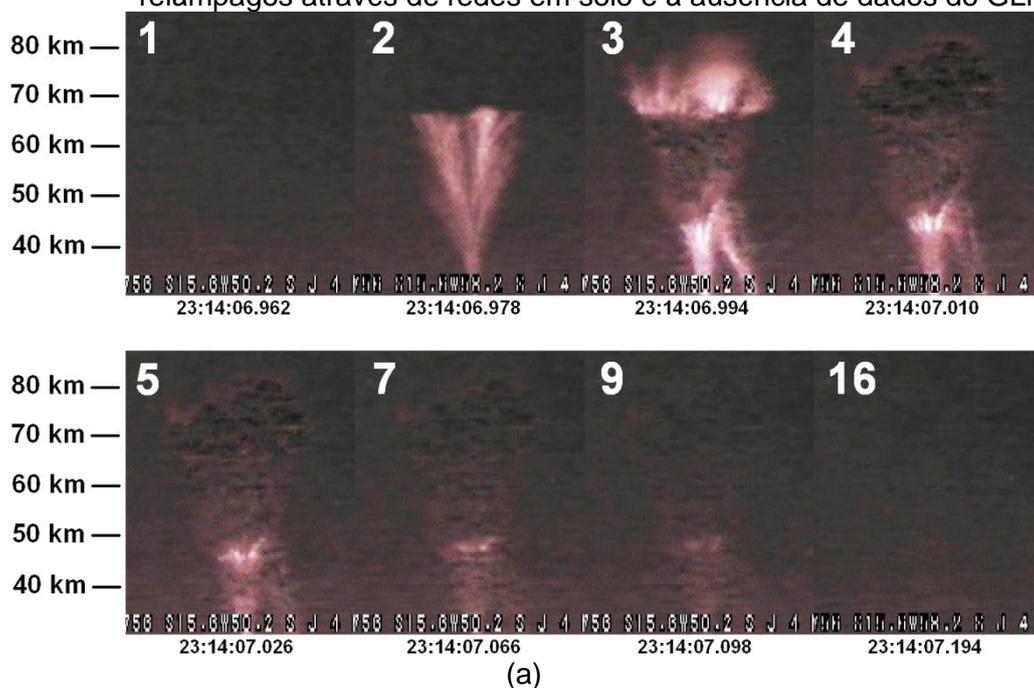
Este evento durou 200 ms, sendo um dos eventos com menor duração observados (Figura 4.12a). Neste evento não houve detecção em nenhuma das redes de relâmpagos baseadas em solo, e não há dados disponíveis para os sensores GLM e ABI do satélite GOES-16. Assim, as estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na posição da área com menores temperaturas de brilho no núcleo convectivo associado ao GJ, através de imagens do canal 9 do satélite METEOSAT-11 (Figura 4.12b). Neste caso, considerou-se razoável realizar as estimativas desta forma, pois o sistema convectivo associado apresentava um tamanho relativamente pequeno, o que diminui a margem de erro na posição provável de ocorrência do relâmpago associado ao GJ. Além disso, nos outros eventos estudados neste trabalho, as detecções de relâmpagos sempre aparecem nas áreas com menores temperaturas de brilho nos sistemas convectivos.

A fase LJ não foi visível neste evento. Na fase FDJ, seu topo, com duração de 16 ms, alcançou 84,0 km de altura, partindo de uma base a 31,1 km de altura (Figura 4.12a, quadros 2-3). Sua extensão horizontal máxima foi de 26,5 km.

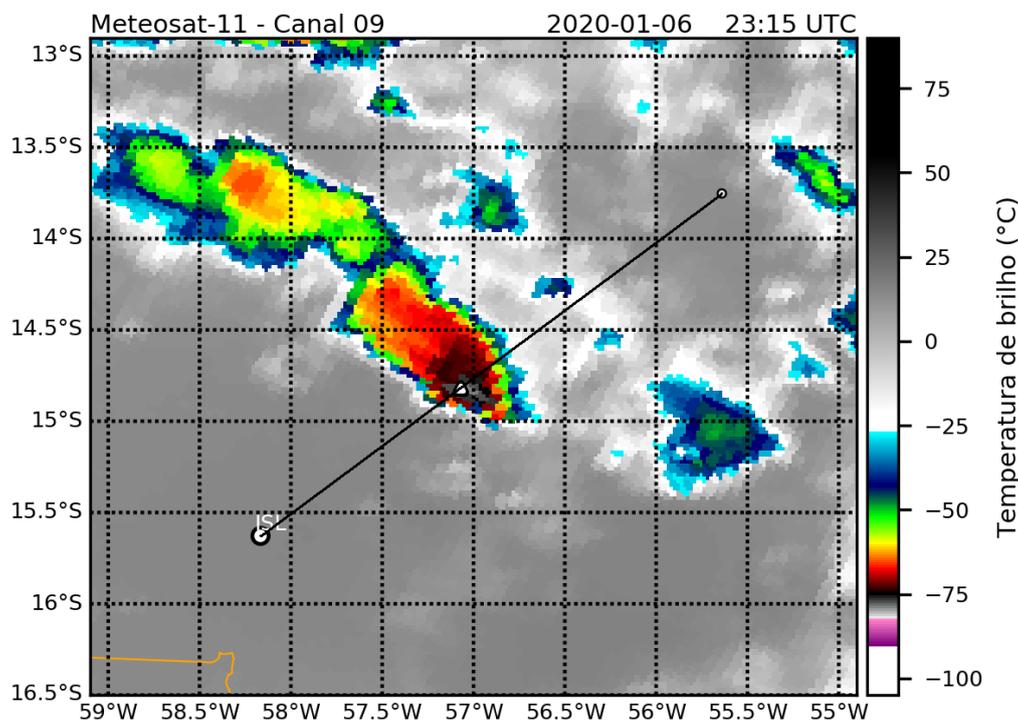
Na fase TJ, os grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 3,8 km, com duração de 184 ms (Figura 4.12a, quadros 3-9). Seus elementos mais elevados se deslocaram de 45,3 km para 49,2 km de altura, a faixa de altura mais baixa observada dentre os eventos estudados. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 5,8 km.

Durante a fase FDJ e no início da fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária, que se conectou ao GJ a cerca de 49,0 km de altura, na mesma região dos grânulos da fase TJ (Figura 4.12a, quadros 3-5). Esta ramificação possuiu uma duração de 32 ms.

Figura 4.12 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ6 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondente ao momento do GJ6. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ6; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ6; o símbolo de “Δ” sobre o azimute do GJ representa o ponto geográfico escolhido para realizar as estimativas de distâncias e extensões verticais e horizontais do GJ6, devido à ausência de detecções de relâmpagos através de redes em solo e à ausência de dados do GLM.



(a)



(b)

Fonte: Produção do autor.

4.4.4.2 GJ7 - 06/01/2020 23:18:47 UTC

Este evento durou 280 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de valores calculados para 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN e para 1 ponto obtido por detecções dos sensores da STARNET (Figura 4.13b).

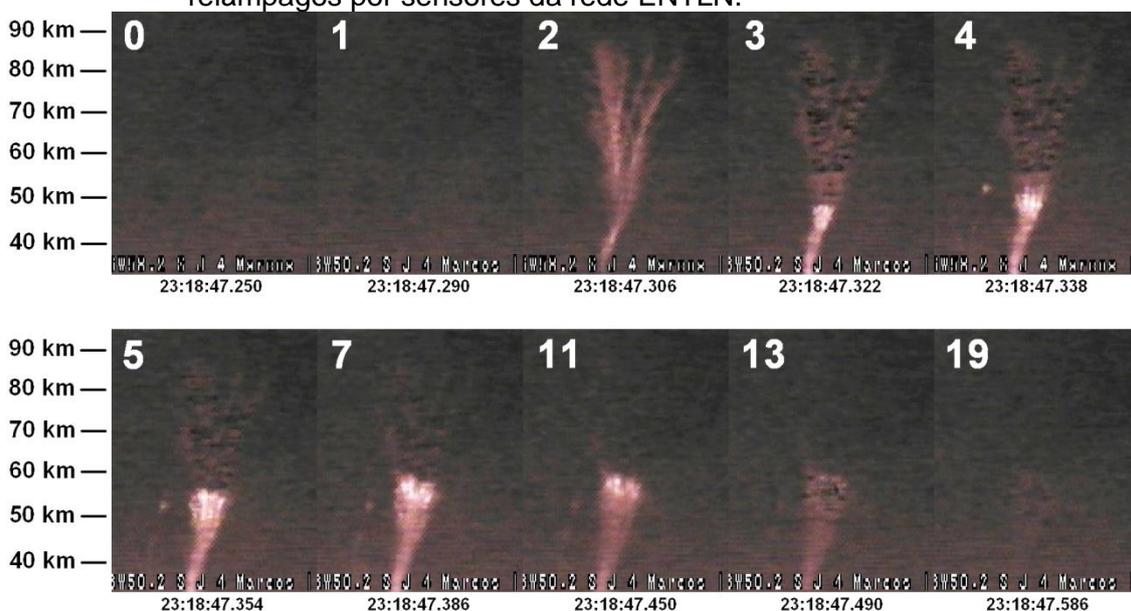
A fase LJ esteve visível somente como um tênue brilho na base do GJ em somente 1 quadro desentrelaçado do vídeo (duração inferior a 16 ms), imediatamente antes da fase FDJ (Figura 4.13a, quadro 1).

Na fase FDJ, o topo em formato cônico, com duração inferior a 16 ms, alcançou 87,8 km de altura, partindo de uma base a 32,9 km de altura (Figura 4.13a, quadro 2). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 19,1 km.

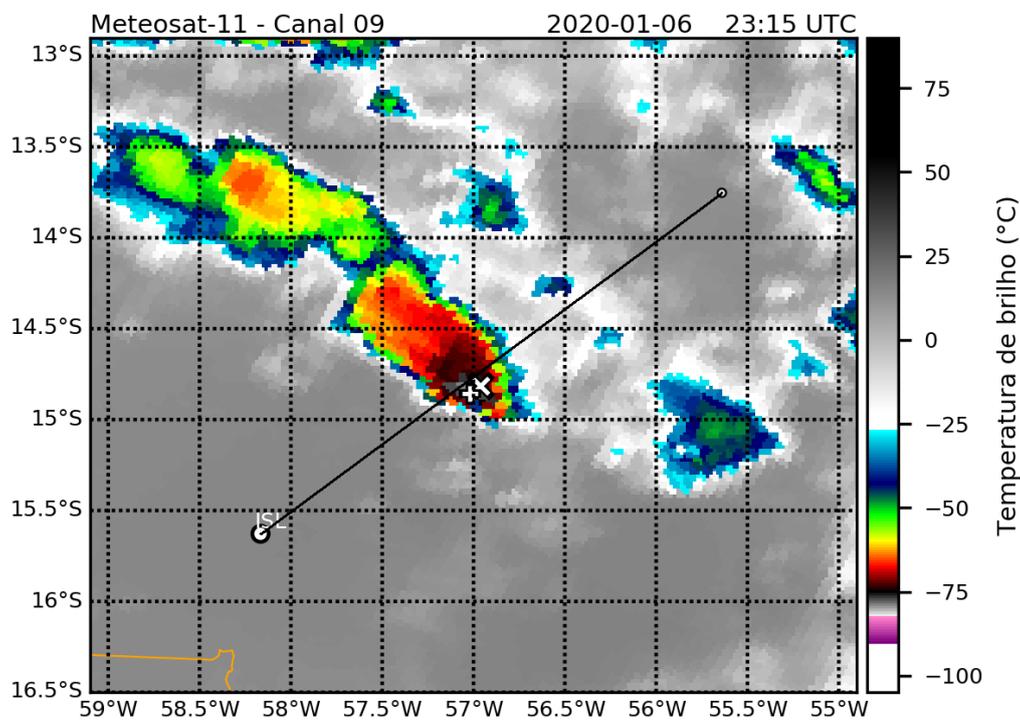
Na fase TJ, seus grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 12,3 km, o maior dentre os casos estudados, com seus elementos mais elevados se deslocando de 48,2 km para 60,5 km de altura (Figura 4.13a, quadros 2-13). A duração desta fase foi estimada em 248 ms e a extensão horizontal máxima dos grânulos foi estimada em 8,8 km.

Ainda na fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária, cujo topo alcançou 52,7 km de altura, na mesma região dos grânulos, embora sem ter ocorrido uma conexão visível com eles (Figura 4.13a, quadros 4-11). Esta ramificação possuiu uma duração de 64 ms.

Figura 4.13 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ7 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondente ao momento do GJ7. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera que registrou o GJ7; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ7; o símbolo de "+" representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; o símbolo de "x" representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN.



(a)



(b)

Fonte: Produção do autor.

4.4.4.3 GJ8 - 06/01/2020 23:21:00 UTC

Este evento durou 400 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas em 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN (Figura 4.14b).

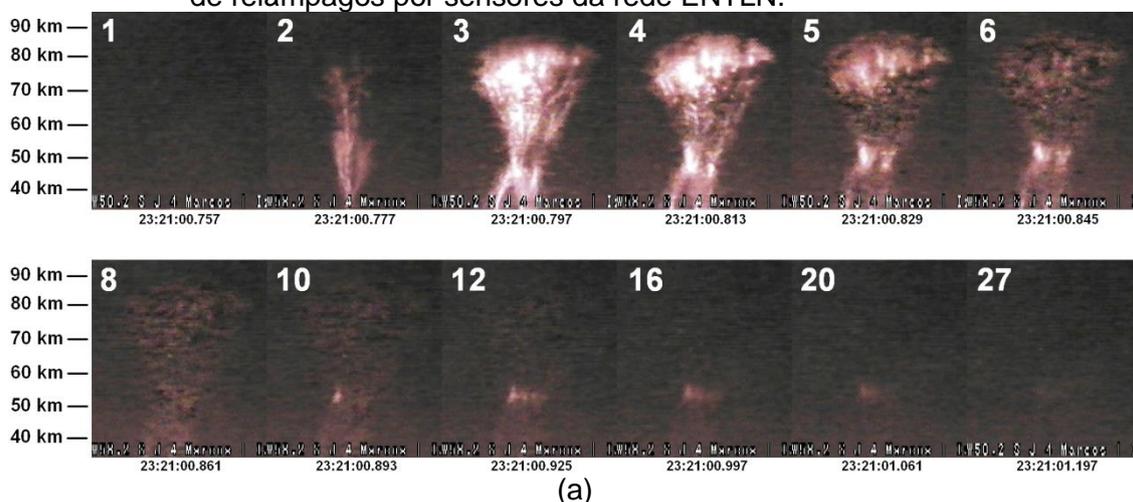
A fase LJ não foi visível nesse evento. Na fase FDJ, seu topo em formato cônico alcançou 89,9 km de altura, partindo de uma base a 34,6 km de altura. Suas ramificações se mostraram bem brilhantes e abundantes, e com vários grânulos (Figura 4.14a, quadros 2-6). Estas ramificações persistiram por 68 ms, a maior duração dentre os casos estudados. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 33,8 km, também a maior dentre os casos estudados.

Na fase TJ, seus grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 9,0 km, com seus elementos mais elevados se deslocando de 47,3 km para 56,3 km de altura (Figura 4.14a, quadros 4-20). A extensão horizontal máxima dos grânulos foi estimada em 9,8 km.

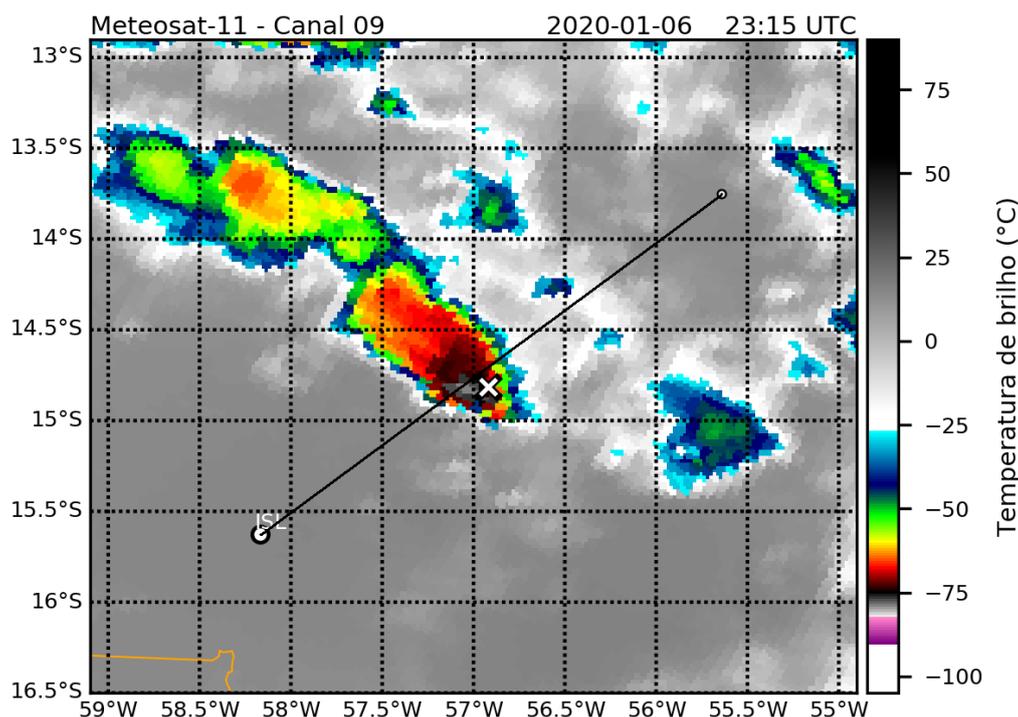
Após 64 ms do início da fase TJ, houve uma diminuição e interrupção no brilho dos grânulos (Figura 4.12a, quadro 8), que voltaram a ser visíveis 16 ms depois (Figura 4.14a, quadro 10), estendendo a duração total desta fase para 380 ms. Este fenômeno de interrupção e retomada do brilho na fase TJ de um GJ é denominado em inglês como "*rebrightening*".

Durante parte das fases FDJ e TJ foi possível também observar uma brilhante ramificação secundária, cujo topo se conectou aos grânulos da fase TJ a 47,9 km de altura (Figura 4.14a, quadros 3-6). Esta ramificação possuiu uma duração de 80 ms.

Figura 4.14 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ8 (horário em UTC); (b) imagem do canal 9 do satélite METEOSAT-11, correspondente ao momento do GJ8. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ8; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ8; o símbolo de “x” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN.



(a)



(b)

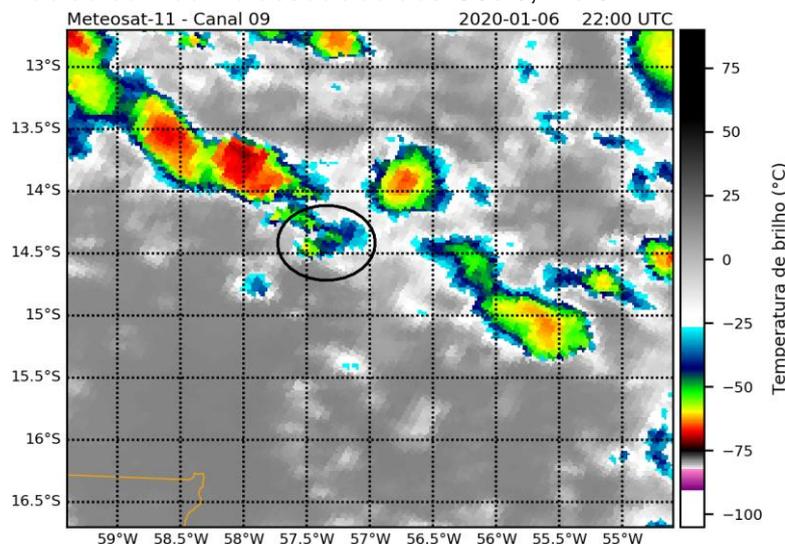
Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado aos GJs 6, 7 e 8 a região

onde ocorreu a formação deste sistema estava sob o centro de um anticiclone com características da Alta da Bolívia em 250 hPa. Em 500 hPa observou-se uma difluência no escoamento sobre a região, que estava nas proximidades de um anticiclone. Em 850 hPa a região estava sob influência de fortes ventos, com escoamento em direção ao sul do continente. Em superfície, uma área de baixa pressão atuava próximo à região dos GJs, sobre o Paraguai.

Os primeiros núcleos convectivos associados à da ocorrência dos GJs começaram a se formar às 16:50 UTC, a uma distância razoável da região, a noroeste. Devido ao constante crescimento de vários núcleos convectivos consecutivos, com rápida propagação de noroeste para sudeste, não foi possível discernir com precisão o início do núcleo responsável pela ocorrência dos GJs. Porém, provavelmente isto ocorreu às 22:00 UTC (Figura 4.15a). Entre 23:00 e 23:30 UTC (Figura 4.15b) houve uma rápida intensificação do sistema (esta faixa de horário coincide com a ocorrência dos três GJs), e o início do seu decaimento ocorreu logo após, às 23:45 UTC (Figura 4.15c). Finalmente, depois das 01:00 UTC de 07/01, não houve mais a formação de novos núcleos. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 04:00 UTC.

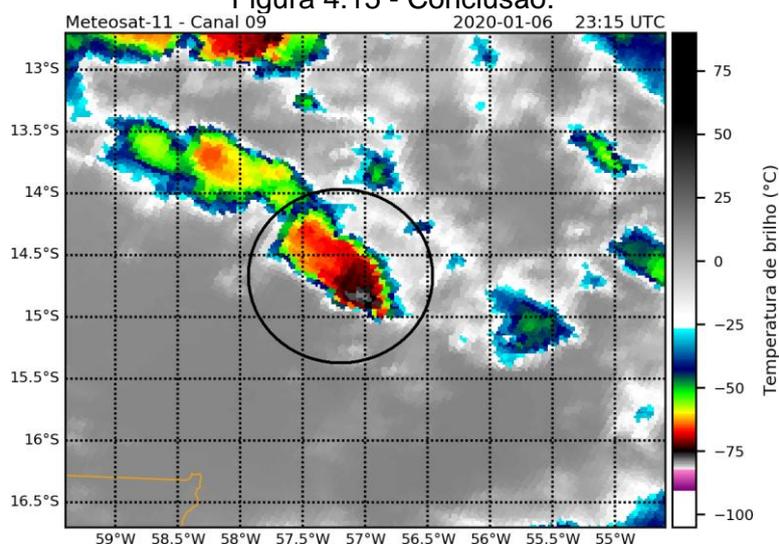
Figura 4.15 - Imagens do canal 9 do satélite METEOSAT-11 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado aos GJs 6, 7 e 8, (b) ao núcleo convectivo no momento dos GJs 6, 7 e 8 e (c) ao início da dissipação do núcleo convectivo associado aos GJs 6, 7 e 8.



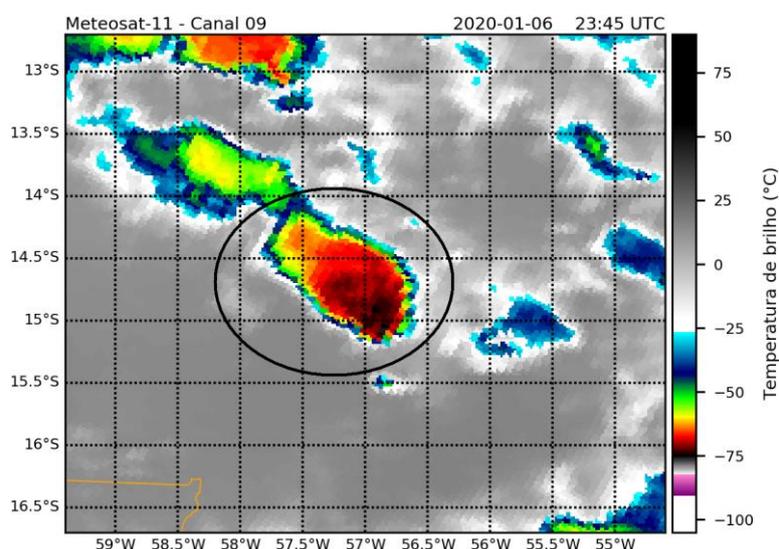
(a)

(continua)

Figura 4.15 - Conclusão.



(b)



(c)

Fonte: Produção do autor.

4.4.5 GJ9 - 26/03/2020 04:30:24 UTC

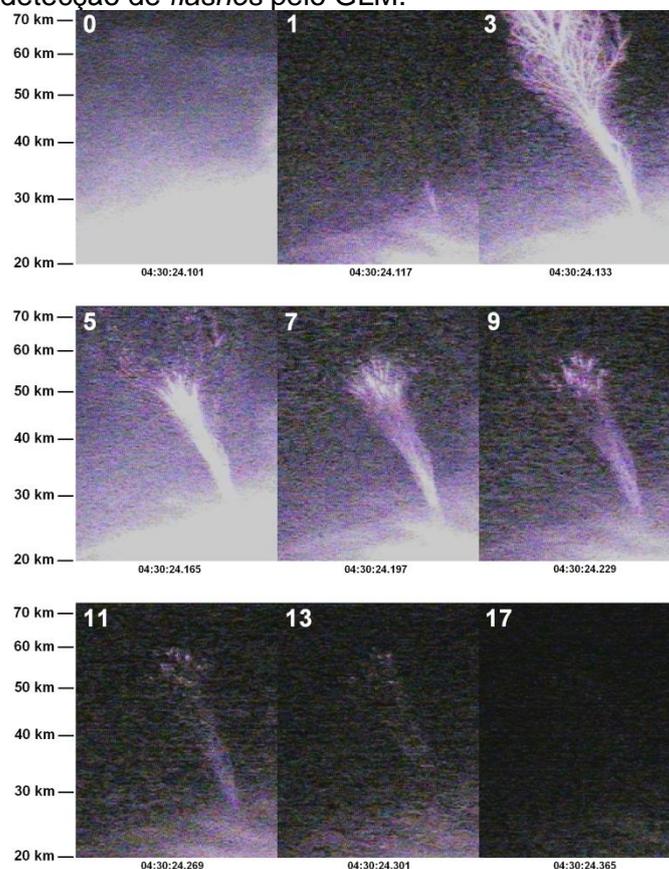
Este GJ, com duração de 200 ms, também foi registrado a partir da cidade de São José dos Quatro Marcos-MT. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas em 1 ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM (Figura 4.16b).

Durante a fase LJ, com duração de 16 ms, o GJ apresentou algumas ramificações partindo da base do seu canal principal, permanecendo visíveis até a fase FDJ (Figura 4.16a, quadro 1).

Na fase FDJ, seu topo em formato cônico com diversas ramificações e extensão horizontal máxima de 20,5 km, atingiu 74,9 km de altura, partindo de uma base a 27,6 km de altura (Figura 4.16a, quadro 3). Esta fase também durou 16 ms. Sua altura máxima mais baixa tem como causa o fato de a parte superior do GJ estar fora do campo de visão da câmera.

Na fase TJ, seus grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 6,3 km, com duração de 136 ms e com seus elementos mais elevados se deslocando de 53,3 km para 59,6 km de altura (Figura 4.16a, quadros 5-13). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 11,7 km, a maior dentre os GJs estudados.

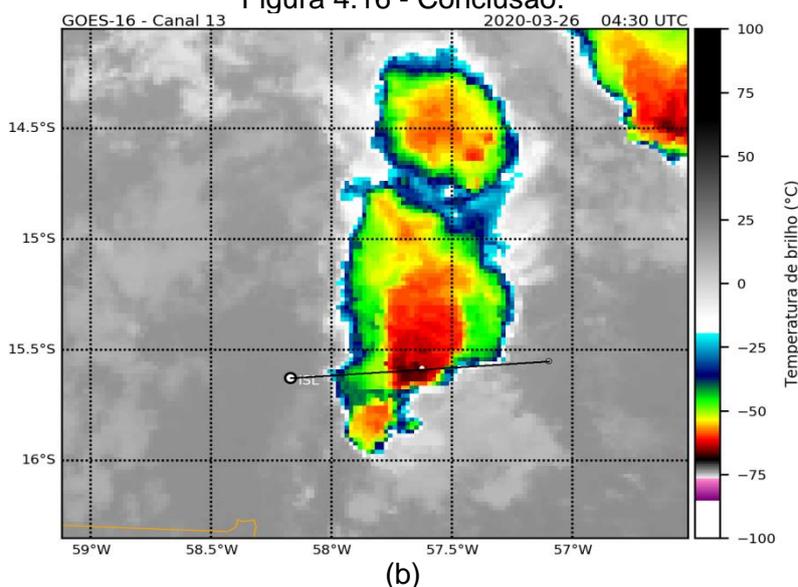
Figura 4.16 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ9 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ9. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera que registrou o GJ9; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ9; a bolinha branca sobre a reta do azimute, na longitude de aproximadamente 57,6°W, representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM.



(a)

(continua)

Figura 4.16 - Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

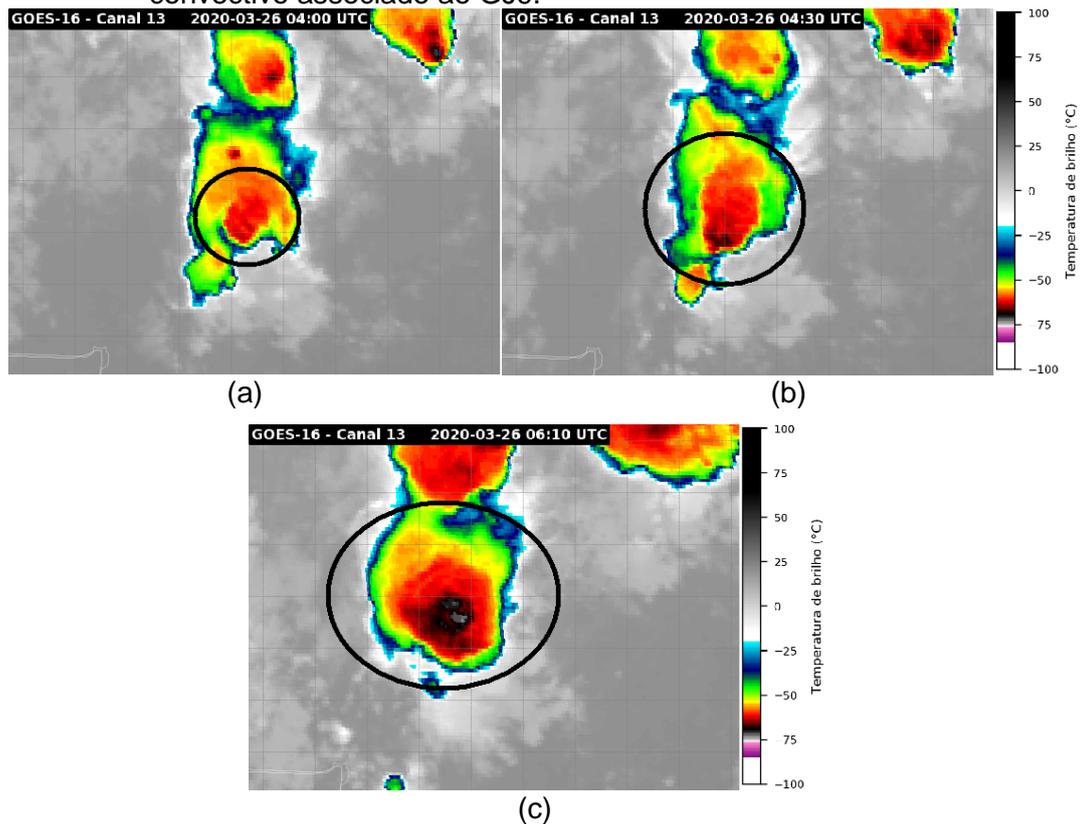
A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250 e 500 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado ao GJ9 a região da formação deste sistema estava entre a borda leste de um anticiclone, cujo centro se situava sobre o Oceano Pacífico, e o eixo de um cavado que se prolongava até o Oceano Atlântico adjacente ao Sul e ao Sudeste do Brasil, em 250 hPa e em 500 hPa. Em superfície, uma área de baixa pressão atuava próximo à região do GJ, com maior intensidade sobre o norte do Paraguai. A carta de 850 hPa não está disponível para a data deste evento.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência do GJ começaram a se formar às 23:10 UTC de 25/03, a leste/sudeste da região. Devido ao constante crescimento de vários núcleos convectivos consecutivos, com lento deslocamento de sudeste para noroeste, não foi possível discernir com precisão o início do núcleo responsável pela ocorrência dos GJs. Porém, possivelmente isto ocorreu entre 04:00 e 04:10 UTC de 26/03 (Figura 4.17a).

Entre 01:40 e 05:30 UTC, o sistema permaneceu aproximadamente estável em intensidade e tamanho. Esta faixa de horários inclui o momento do GJ (04:30 UTC, Figura 4.17b). Sua fase mais intensa se concentrou entre 05:40 e 06:10 UTC (Figura 4.17c), e logo depois ocorreu seu declínio, com nenhum núcleo

novo se formando após às 07:40 UTC. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 09:00 UTC, quando a bigorna de outro sistema próximo se sobrepôs completamente a ela.

Figura 4.17 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ9, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ9 e (c) ao final da fase mais intensa do sistema convectivo associado ao GJ9.



Fonte: Produção do autor.

4.4.6 GJ10 - 18/04/2020 00:12:53 UTC

Este evento foi registrado a partir da cidade de João Pessoa-PB, durando 322 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas em 1 ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM (Figura 4.18b).

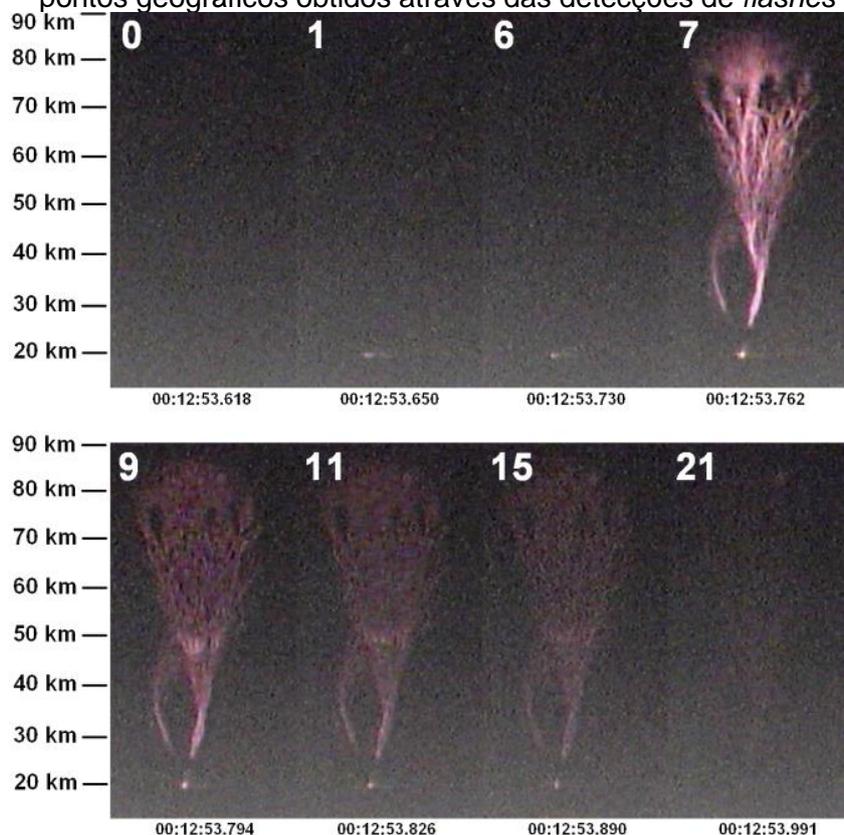
A fase LJ esteve visível somente como um tênue brilho na base do GJ, durante 96 ms (Figura 4.18a, quadros 1-6). Na fase FDJ, o topo em formato cônico com diversas ramificações e com duração de 16 ms alcançou 87,0 km de altura,

partindo de uma base a 19,2 km de altura (Figura 4.18a, quadro 7). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 23,4 km.

Na fase TJ, os grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 2,0 km, o menor dentre os casos estudados, com seus elementos mais elevados se deslocando de 49,6 km para 51,6 km de altura (Figura 4.18a, quadros 9-15). A duração desta fase foi estimada em 178 ms, e a extensão horizontal máxima dos grânulos foi estimada em 6,6 km.

Ainda na fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária com duração de 80 ms, cujo topo alcançou 47,0 km de altura, logo abaixo da região dos grânulos (Figura 4.18a, quadros 7-15).

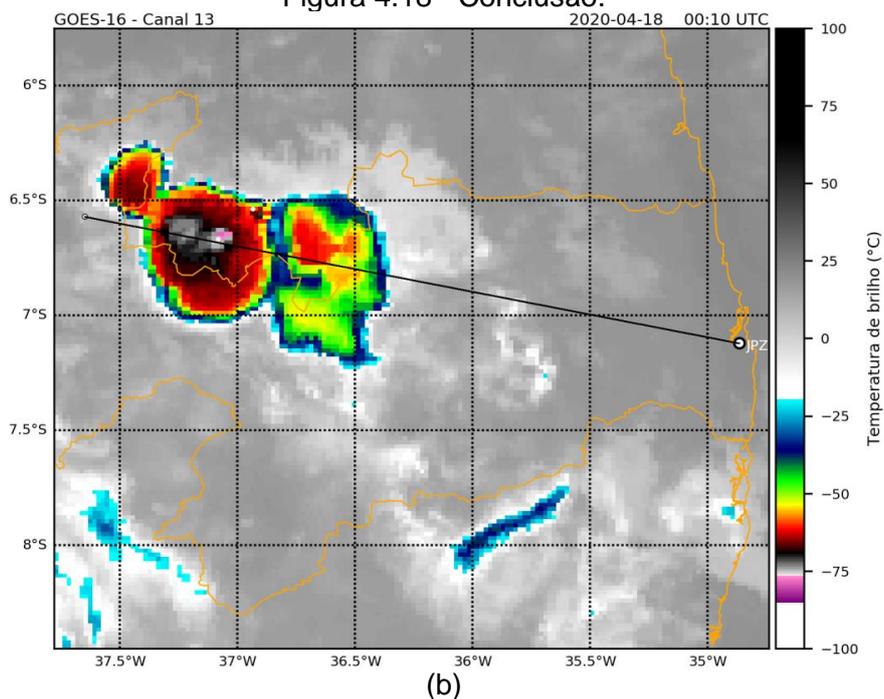
Figura 4.18 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ10 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ10. O círculo ao lado da sigla “JPZ” indica o local da câmera que registrou o GJ10; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimute correspondente à base do GJ10; as bolinhas brancas nas proximidades da reta do azimute representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM.



(a)

(continua)

Figura 4.18 - Conclusão.

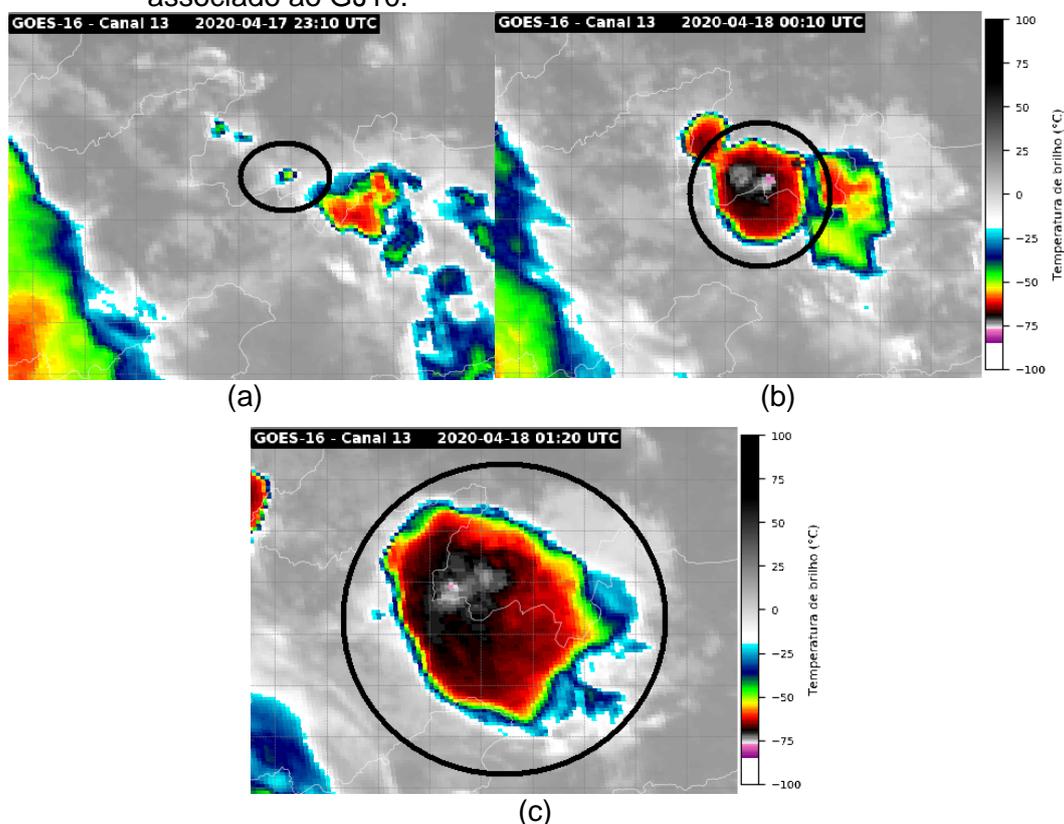


Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado ao GJ10 a região de estudo estava sob influência da borda norte de um pequeno VCAN em 250 hPa, cujo centro se situava sobre o Estado de Sergipe. Em 500 e em 850 hPa, observou-se pequenos cavados com seus eixos nas proximidades da região.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência do GJ começaram a se formar às 18:30 UTC de 17/04, com propagação de sudeste para noroeste. O núcleo convectivo que gerou o GJ iniciou-se às 23:10 UTC (Figura 4.19a) e intensificou-se rapidamente. A intensidade máxima do sistema ocorreu entre 00:10 e 01:10 UTC de 18/04, faixa de horário que inclui o momento do GJ (00:12 UTC, Figura 4.19b). A partir de 01:20 UTC iniciou-se sua dissipação (Figura 4.19c). Após 03:20 UTC apenas uma fração do sistema permaneceu ativa, com pequenos núcleos convectivos se formando e se propagando para oeste. Após 05:50 UTC não houve mais a formação de nenhum novo núcleo convectivo. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 07:10 UTC.

Figura 4.19 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ10, (b) ao núcleo convectivo no momento do GJ10 e (c) ao início da dissipação do sistema convectivo associado ao GJ10.



Fonte: Produção do autor.

4.4.7 GJ11 e 12 - 26/12/2020

Estes dois eventos ocorreram em um intervalo de 18 minutos entre si e foram registrados a partir da cidade de São José dos Quatro Marcos-MT, e estavam associados a um mesmo sistema convectivo.

4.4.7.1 GJ11 - 26/12/2020 04:00:28 UTC

Este evento durou 848 ms, sendo o mais duradouro dentre os casos estudados (Figura 4.20a). As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de valores calculados para 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN e para 1 ponto associado a *flashes* detectados pelo GLM (Figura 4.20b).

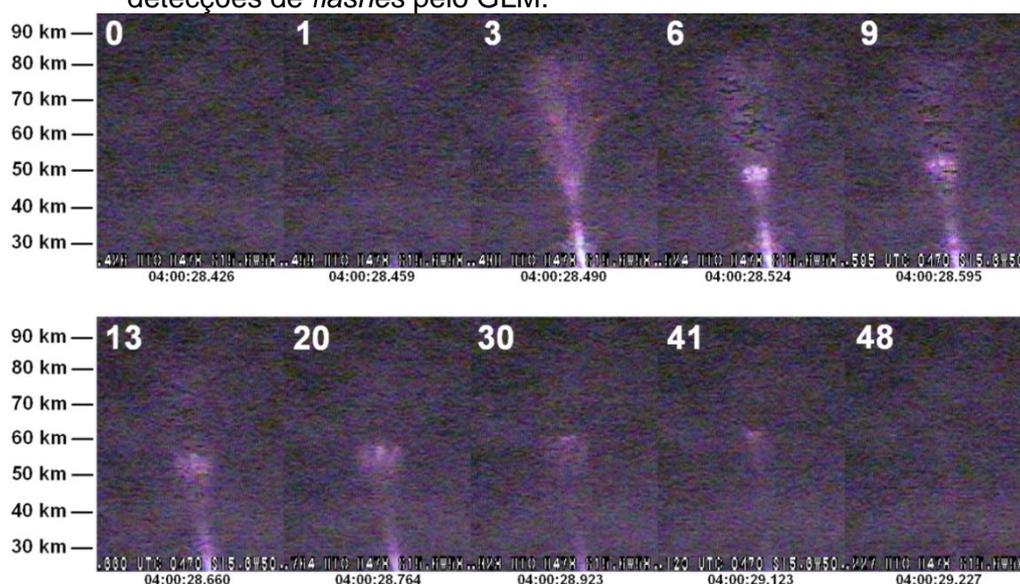
A fase LJ esteve visível somente como um tênue brilho na base do GJ durante 15 ms, imediatamente antes da fase FDJ (Figura 4.20a, quadro 1).

Na fase FDJ, o topo em formato cônico mais estreito e com duração de 17 ms alcançou 83,5 km de altura, partindo de uma base a 23,4 km de altura (Figura 4.20a, quadro 3). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 19,2 km.

Na fase TJ, os grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 10,2 km, com seus elementos mais elevados se deslocando de 51,6 km para 61,8 km de altura (Figura 4.20a, quadros 6-41). A extensão horizontal máxima dos grânulos foi estimada em 9,7 km.

Durante a fase TJ houve por duas vezes a interrupção e a retomada do brilho dos grânulos (*rebrightening*), o que estendeu bastante a duração desta fase (783 ms), e conseqüentemente, do GJ como um todo.

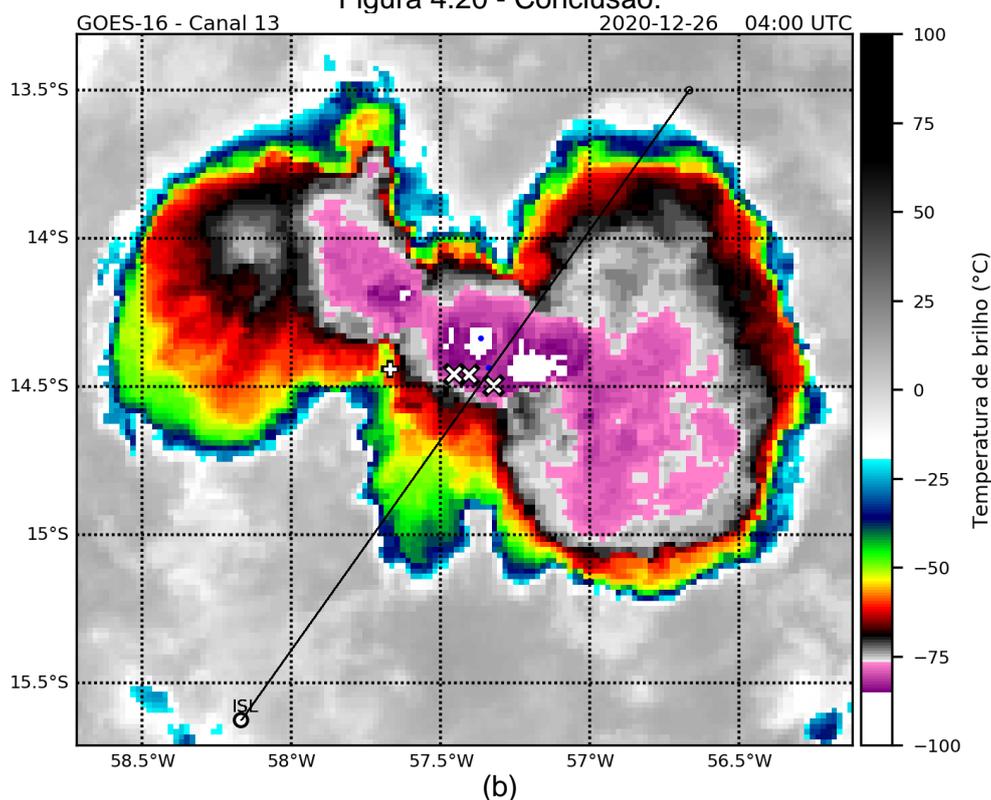
Figura 4.20 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ11 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ11. O círculo ao lado da sigla "ISL" indica o local da câmera que registrou o GJ11; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimuth correspondente à base do GJ11; o símbolo de "+" representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de "x" representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas azuis próximas à reta do azimuth representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM.



(a)

(continua)

Figura 4.20 - Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

4.4.7.2 GJ12 - 26/12/2020 04:18:01 UTC

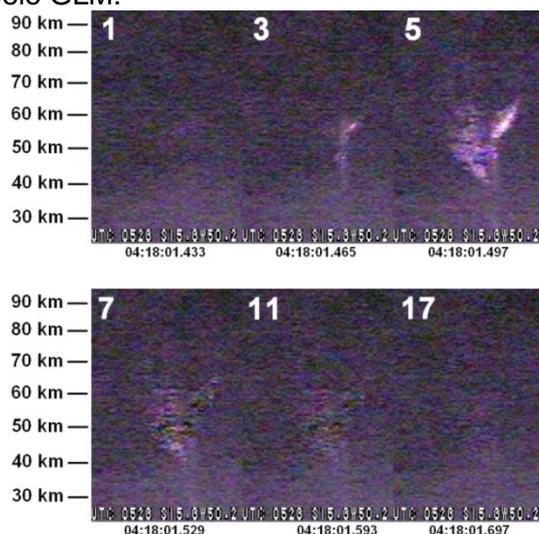
Este evento durou 352 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de valores calculados para 1 ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN e para 1 ponto associado a *flashes* detectados pelo GLM (Figura 4.21b).

A fase LJ esteve visível somente como um tênue brilho na base do GJ durante 88 ms, imediatamente antes da fase FDJ (Figura 4.21a, quadro 1).

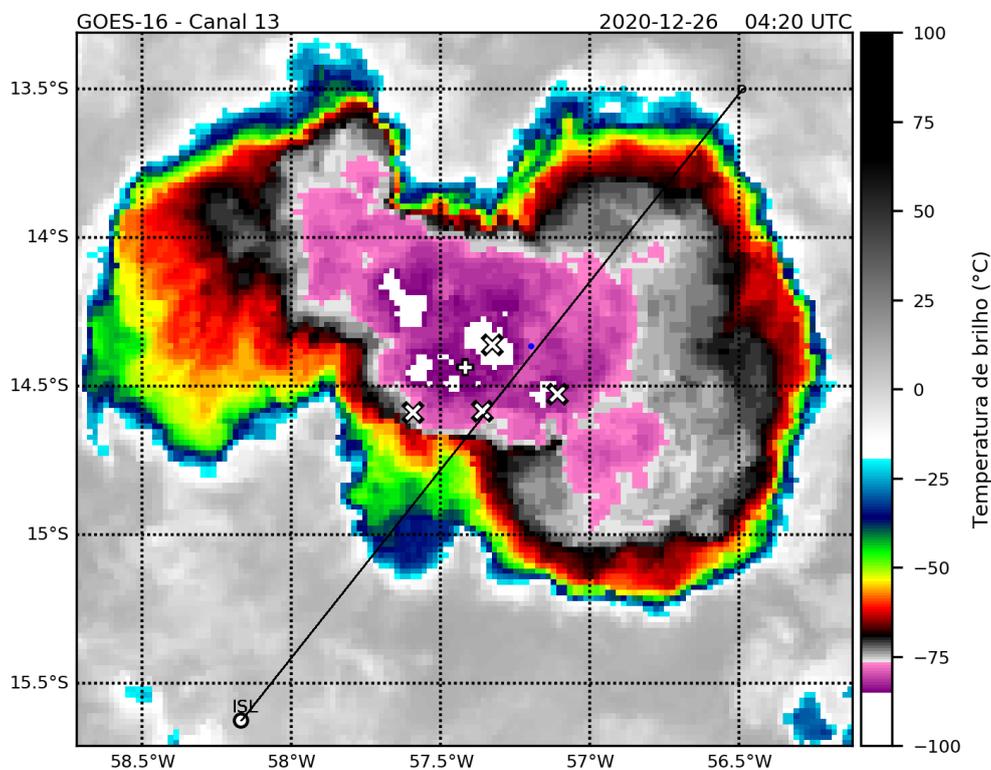
Na fase FDJ, o topo em formato cônico irregular e com duração de 48 ms alcançou 80,3 km de altura, partindo de uma base a 22,8 km de altura (Figura 4.21a, quadros 3-5). Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 23,0 km.

Na fase TJ, os grânulos foram visíveis somente como um tênue brilho durante 184 ms (Figura 4.21a, quadros 7-11).

Figura 4.21 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ12 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ12. O círculo ao lado da sigla “ISL” indica o local da câmera que registrou o GJ12; a reta traçada a partir do local do registro representa o azimuth correspondente à base do GJ12; o símbolo de “+” representa o ponto geográfico obtido através da detecção de relâmpagos por sensores da rede STARNET; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; a bolinha azul próxima à reta do azimuth representa o ponto geográfico obtido através da detecção de *flashes* pelo GLM.



(a)



(b)

Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas dos níveis de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema convectivo associado aos GJs 11 e 12 a região onde ocorreu a formação deste sistema estava sob influência de leve difluência no escoamento, na borda nordeste de um anticiclone com características da Alta da Bolívia em 250 hPa. Em 500 hPa uma leve difluência no escoamento também atuava sobre a região, que estava ao norte de um anticiclone com perturbações no escoamento. Em 850 hPa a região estava sob influência da confluência de ventos advindos do Norte e do Sudeste do Brasil. Em superfície havia uma área de baixa pressão atuando logo ao sul da região.

Os primeiros núcleos convectivos na região mais próxima à da ocorrência dos GJs começaram a se formar às 19:20 UTC de 25/12, a sudeste da região. A partir das 01:30 UTC de 26/12, vários núcleos intensos e próximos entre si começam a se formar rapidamente e ao mesmo tempo. Às 02:10 UTC foram observados 10 núcleos na região, com TBs mínimas variando entre -40 e -80°C (Figura 4.22a). Embora bastante próximos, esses núcleos ainda estavam totalmente separados entre si.

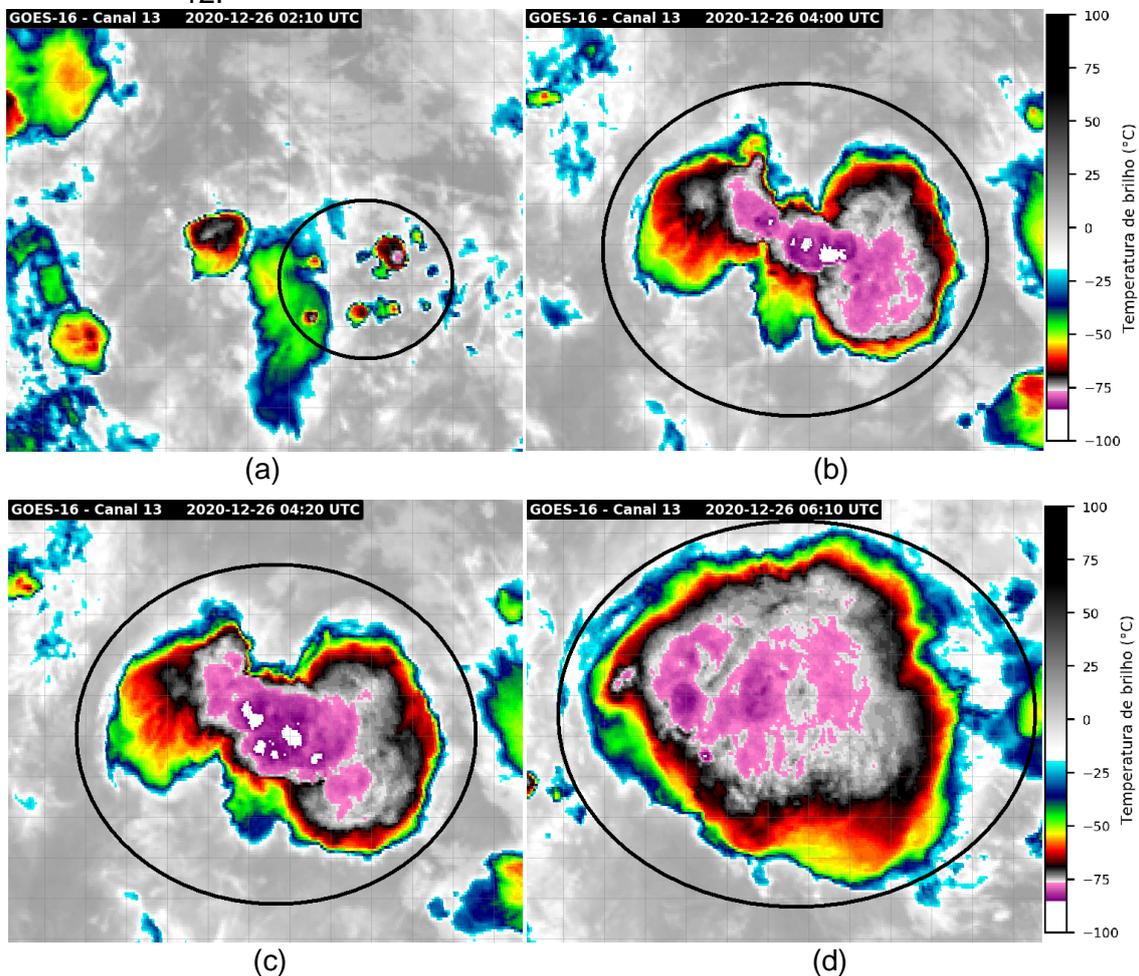
A partir de 02:30 UTC, ocorre a gradativa fusão de todos estes núcleos convectivos. Esta fusão se completa às 04:00 UTC, horário coincidente ao do GJ11 (Figura 4.22b). Nesse mesmo horário, é observada a menor TB observada dentre todos os eventos estudados (-93,45°C). Entre 03:50 e 04:30 UTC, faixa de horários que inclui a ocorrência dos dois GJs, o sistema convectivo se mantém com regiões com TBs inferiores a -90°C (Figura 4.22c). Até 05:00 UTC o sistema permanece em intensificação, quando se estabiliza e passa a possuir um aspecto mais circular.

Após 06:00 UTC inicia-se o decaimento do sistema (Figura 4.22d), e após 09:30 UTC não é observado o crescimento de nenhum outro núcleo convectivo. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 12:00 UTC.

Este sistema convectivo, provavelmente por se formar a partir da fusão de vários núcleos convectivos, atingiu uma área de cobertura consideravelmente maior do que os demais. Em comparação com os outros eventos, no momento

dos dois GJs gerados por este sistema sua área média entre os horários de ocorrência destes GJs, para o limiar de 235 K, foi estimada em 30167 km², cerca de 5 vezes maior do que a média das áreas dos outros eventos estudados. Para o limiar de 210 K, a diferença foi ainda mais expressiva: sua área foi 7,5 vezes maior do que a área média dos outros eventos.

Figura 4.22 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início de vários núcleos convectivos intensos, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ11, (c) ao sistema convectivo no momento do GJ12 e (d) ao início da dissipação do sistema convectivo associado aos GJs 11 e 12.



Fonte: Produção do autor.

4.4.8 GJ13 - 22/03/2021 07:35:16 UTC

Situado em latitudes subtropicais, este foi o GJ mais ao sul observado. Assim como o GJ2, também foi registrado por duas câmeras, neste caso localizadas em São José dos Campos-SP e em São Paulo-SP (Tabela 3.2). Somente o topo do GJ esteve visível na câmera de São José dos Campos; portanto, os cálculos para este evento consideraram apenas a câmera posicionada em São Paulo-SP (Figura 4.23a).

Este evento durou 334 ms. As estimativas das medições de distâncias e extensões verticais e horizontais deste GJ foram baseadas na média de valores calculados para 2 pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN (Figura 4.23b).

A fase LJ esteve visível somente em 1 quadro desentrelaçado do vídeo (duração menor que 16 ms), imediatamente antes da fase FDJ (Figura 4.23a, quadro 1).

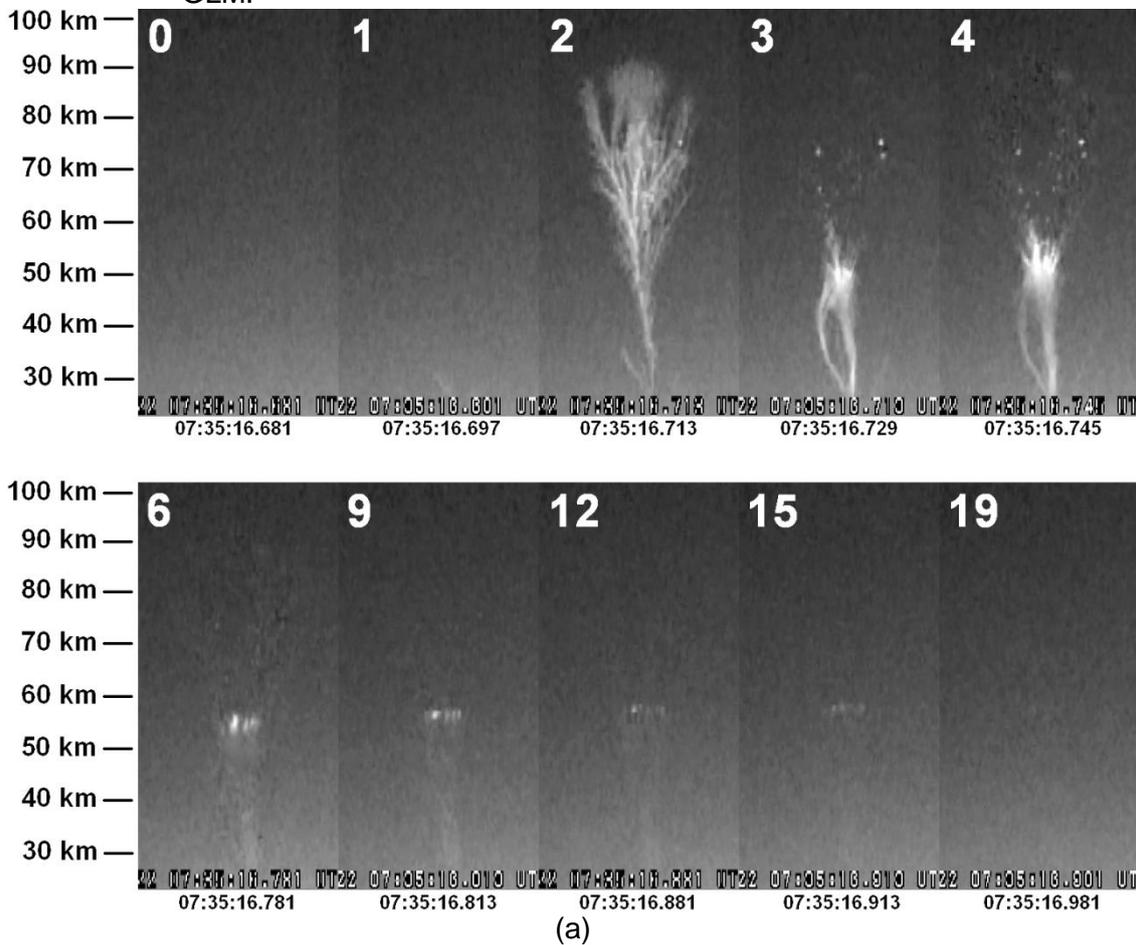
Na fase FDJ, o topo em formato cônico (Figura 4.23a, quadro 2) foi visível com diversas ramificações e alguns grânulos persistentes (Figura 4.23a, quadros 3-6), atingindo 91,9 km de altura e partindo de uma base a 22,4 km de altura, durando 16 ms. A extensão horizontal máxima do topo do GJ foi estimada em 19,8 km.

Na fase TJ, os grânulos apresentaram um deslocamento vertical de 7,5 km, com duração de 302 ms (Figura 4.23a, quadros 3-15). Seus elementos mais elevados se deslocaram de 51,4 km para 58,9 km de altura. Sua extensão horizontal máxima foi estimada em 7,8 km.

Na fase FDJ e no início da fase TJ foi possível também observar uma ramificação secundária que se iniciou nas proximidades da base do GJ, se distanciou deste com a altura e se conectou novamente ao GJ a cerca de 48 km de altura, logo abaixo da região dos grânulos (Figura 4.23a, quadros 2-4). Esta ramificação possuiu uma duração de 100 ms, a maior dentre os casos estudados.

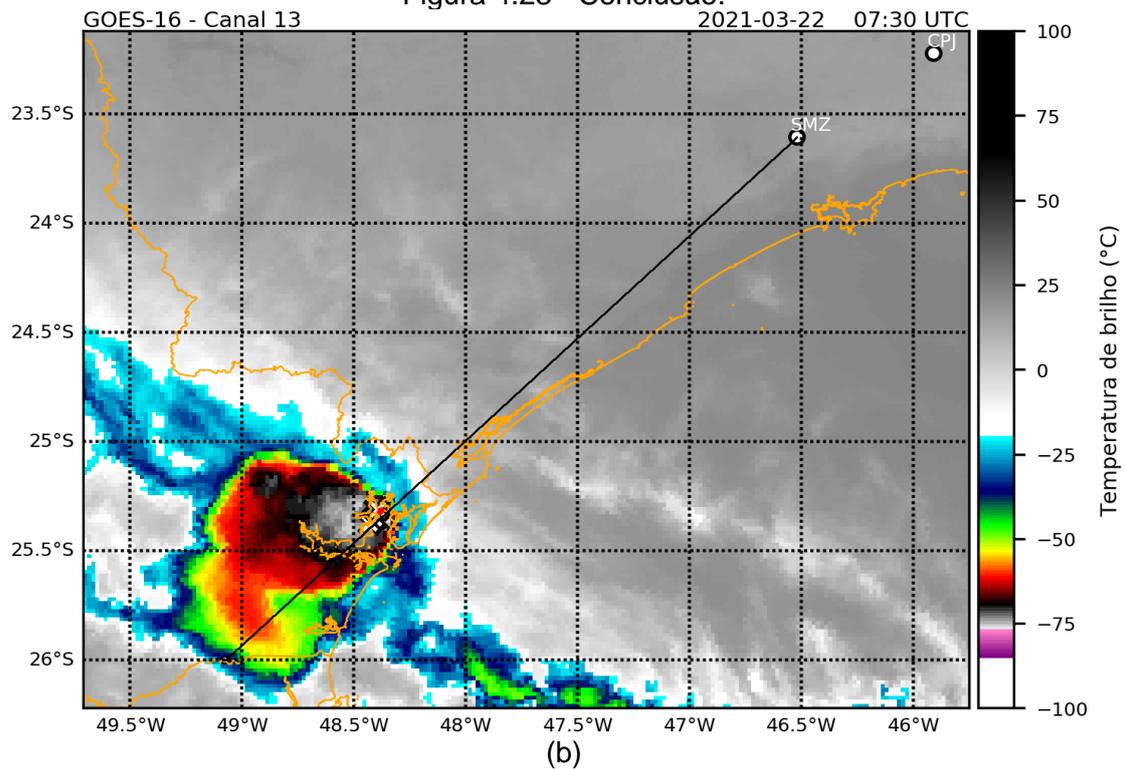
Ainda na fase FDJ e no início da fase TJ observou-se uma aparente ramificação terciária simetricamente oposta à ramificação secundária, mas que aparentemente não se completou (Figura 4.23a, quadros 2-4).

Figura 4.23 - (a) Sequência de quadros desentrelaçados de registro em vídeo do GJ13 (horário em UTC); (b) imagem do canal 13 do satélite GOES-16 correspondente ao momento do GJ13. Os círculos ao lado das siglas “SMZ” e “CPJ” indicam os locais das câmeras que registraram o GJ13; a reta traçada a partir do local “SMZ” representa o azimute correspondente à base do GJ13; os símbolos de “x” representam os pontos geográficos obtidos através da detecção de relâmpagos por sensores da rede ENTLN; as bolinhas vermelhas próximas à reta do azimute representam os pontos geográficos obtidos através das detecções de *flashes* pelo GLM.



(continua)

Figura 4.23 - Conclusão.



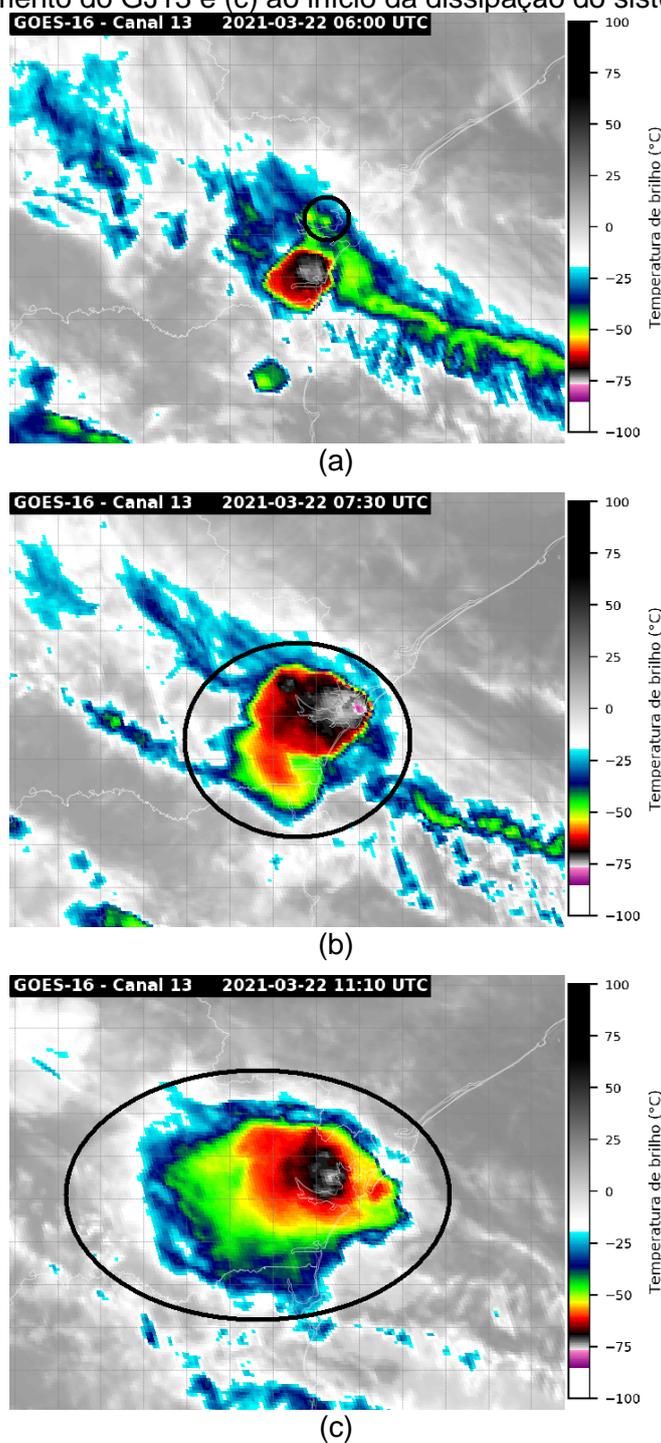
Fonte: Produção do autor.

A partir das cartas sinóticas de 250, 500 e 850 hPa e de superfície (Figuras não mostradas) disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, observa-se que no momento de atuação do sistema associado ao GJ13 a região de estudo se situava próxima do centro de um anticiclone em 250 hPa, em uma área com variação na velocidade meridional do vento. Em 500 e em 850 hPa a região estava sob a borda oeste de um anticiclone, em uma área com variação na direção do vento. Em 850 hPa o escoamento apresentava sentido sudoeste-nordeste a leste da região e sentido oposto a oeste. Em superfície a região estava entre a borda oeste de um anticiclone e a vanguarda de um sistema frontal.

Os primeiros núcleos convectivos na região próxima à da ocorrência do GJ começaram a se formar às 00:50 UTC, a oeste da região. O núcleo associado à ocorrência do GJ iniciou seu crescimento às 06:00 UTC (Figura 4.24a). Entre 07:40 e 10:20 UTC o sistema permaneceu estável em intensidade e tamanho. Portanto, o GJ ocorreu na transição entre os períodos de crescimento e de estabilidade do sistema (Figura 4.24b). Após 11:00 UTC iniciou-se seu declínio

(Figura 4.24c), com nenhum núcleo novo se formando após 11:20 UTC. A bigorna restante do sistema dissipou-se em torno das 15:30 UTC.

Figura 4.24 - Imagens do canal 13 do satélite GOES-16 correspondentes (a) ao início do núcleo convectivo associado ao GJ13, (b) ao sistema convectivo no momento do GJ13 e (c) ao início da dissipação do sistema convectivo.



Fonte: Produção do autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou e determinou as características físicas de 13 GJs registrados em vídeo no Brasil, ocorridos entre 2017 e 2021, sendo pioneiro por ser o primeiro a investigar GJs ocorridos em território brasileiro. Foram analisadas também as características físicas dos sistemas convectivos associados e as características físicas e elétricas dos relâmpagos que geraram os GJs.

Em geral, as características físicas dos GJs (duração, morfologia, altura dos topos) e dos sistemas convectivos associados (temperatura de brilho, taxa de expansão, estágio do ciclo de vida em que ocorreram os GJs) analisados neste trabalho, bem como dos relâmpagos (localização relativa ao sistema convectivo) se mostraram semelhantes e condizentes com estudos realizados nos últimos anos em diversas regiões do globo. Algumas características observadas neste trabalho se mostraram um pouco diferentes em comparação ao encontrado na literatura como, por exemplo, i) durações dos estágios LJ e FDJ dos GJs consideravelmente inferiores à média, em contraponto ao estágio TJ, cuja duração máxima observada foi 1,3 vezes maior que a duração máxima encontrada em estudos anteriores, ii) temperatura de brilho média dos sistemas convectivos 10°C inferior à média e iii) localização de ocorrência dos GJs sobre o continente em todos os casos. O destaque esteve na altura máxima encontrada no GJ3 (120,3 km), muito superior ao máximo encontrado nos estudos anteriores (103,3 km). Esta altura esteve relacionada a filamentos acima da altura limite das ramificações mais elevadas do GJ.

Existe a possibilidade de os posicionamentos geográficos dos dados de detecção de relâmpagos utilizados para estimar a altura do topo do GJ3 estarem incorretos. Porém, provavelmente não é o caso, pois os dados tanto da rede ENTLN quanto do GLM coincidem exatamente com o azimute do GJ e com a região do sistema convectivo com topos mais frios (Figura 4.8b), o que ocorre tanto nos outros eventos estudados neste trabalho quanto em estudos anteriores. Para que a altura do topo deste GJ estivesse dentro do observado em estudos anteriores (entre 67 e 103 km), seria preciso que o GJ tivesse

ocorrido nas proximidades da borda da Cb mais próxima da câmera, fora da região mais fria da Cb e fora da região de ocorrência do relâmpago associado, o que é pouco provável. Além disso, os filamentos observados neste GJ, acima das ramificações, não foram observados em nenhum outro evento analisado neste trabalho, e também em estudos anteriores.

Mais uma observação que reforça a hipótese de não haver incorreção nas estimativas dos parâmetros deste GJ é o fato de que os outros parâmetros relacionados à sua morfologia (como as alturas da base e do topo no estágio TJ e as larguras máximas nos estágios FDJ e TJ), assim como a altura máxima das ramificações deste GJ no estágio FDJ (97,5 km), estão dentro do que foi observado em outros eventos neste trabalho e em trabalhos anteriores.

Ainda sobre as características físicas dos GJs, não foram observadas, pelo menos em análise qualitativa, boas correlações entre estas e as características dos sistemas convectivos associados. Uma exceção é a duração total dos GJs, que possuiu uma boa correlação negativa com as temperaturas mínimas dos sistemas associados (ou seja, quanto mais baixa a temperatura mínima encontrada em um sistema, maior a duração total do GJ associado a esse sistema).

As regiões de ocorrência de todos os sistemas convectivos associados os GJs estudados (com exceção de apenas um caso - GJ10) estavam sob influência de anticlones ou cristas tanto em 250 hPa quanto em 500 hPa, seja nas bordas ou nos seus centros ou eixos. Em 850 hPa e em superfície, a maioria dos casos apresentava a atuação de cavados ou baixas pressões, ou confluência dos ventos nas regiões de ocorrência dos GJs.

Anticlones e cristas em altos níveis (em torno de 250 hPa) facilitam a difluência no escoamento e a divergência de massa nesse nível, contribuindo para a formação de instabilidades. Cavados e confluências no escoamento em baixos níveis (em torno de 850 hPa) facilitam o levantamento de parcelas de ar, o que também contribui para a formação de instabilidades. Além disso, anticlones em níveis médios (em torno de 500 hPa) geralmente implicam em ar descendente, o que dificulta a formação de instabilidades.

Sendo assim, qualquer forçante (principalmente a termodinâmica, mais intensa no verão, época que coincide com o período em que os GJs estudados ocorreram) que consiga fazer com que parcelas de ar em ascensão rompam a “barreira” imposta nos médios níveis, poderá desencadear a formação de instabilidades, com grande liberação de energia em curto espaço de tempo, levando a nuvens de tempestades profundas. E os GJs são quase sempre observados em nuvens profundas, incluindo os eventos estudados neste trabalho. Desta forma, é possível inferir a hipótese que de esta configuração atmosférica pode ser um fator importante na ocorrência de GJs.

Um ponto a destacar é que tudo o que foi observado e analisado sobre os GJs envolve o período noturno, devido às limitações dos instrumentos utilizados (câmeras CCD comuns). Como não há registros diurnos de GJs até o momento, o que certamente ocorre devido à sua baixa luminosidade ser totalmente ofuscada pela luz do dia, não podemos afirmar que a morfologia dos GJs, a profundidade dos sistemas convectivos e as condições atmosféricas na troposfera e na ionosfera favoráveis à ocorrência de GJs possam ser válidas também para o período diurno.

A partir do mapa com a distribuição dos GJs estudados neste trabalho (Figura 4.1), é possível observar uma alta concentração de ocorrência de GJs no Estado do Mato Grosso. Esta característica pode ser parcialmente explicada pelo fato de existirem cinco câmeras em uma mesma localidade do Estado (situadas na cidade de São José dos Quatro Marcos), e somente mais duas ou três em funcionamento, durante o período estudado neste trabalho, no restante da região Centro-Oeste do Brasil.

Três características observacionais importantes foram encontradas nas ocorrências dos GJs estudados: i) ventos fracos a moderados em altos níveis, ii) taxa de relâmpagos consideravelmente baixa para a profundidade e a velocidade de crescimento das nuvens (talvez em torno de 2 a 6 relâmpagos por minuto) e iii) relâmpagos com duração e brilho maior que a média, e com aparente corrente contínua. A primeira característica foi observada em praticamente todos os casos estudados, através das imagens de satélite.

A segunda e a terceira característica foram observadas em dois eventos de GJs (o GJ1 e um GJ recente, ocorrido na noite de 04/02/2022), de forma visual, sendo que estas características não foram observadas em nenhuma outra noite, somente nas duas noites em que ocorreram os dois GJs. Além disso, os dois GJs ocorreram em regiões completamente diferentes geograficamente, mas estas três características observacionais aparentemente se mantiveram.

Analisando o GJ mais recente observado, ocorrido em 04/02/2022 entre as cidades de Silveiras e Cachoeira Paulista-SP, foi observada antes da ocorrência do GJ, logo ao anoitecer, a grande profundidade das Cbs e a pouca quantidade de relâmpagos, principalmente com relação à Cb que posteriormente gerou o GJ. Esta Cb se destacou por ser mais parecida com a que gerou o GJ1, com relâmpagos com aparente corrente contínua e com brilho mais intenso que o comumente observado. Dessa forma, percebeu-se que havia uma chance razoável de ocorrerem GJs nessa Cb. No dia seguinte foi encontrado o registro de um GJ, realizado em São Paulo-SP, no banco de dados da BRAMON. Através da análise do vídeo, das imagens de satélite e de dados do GLM, concluiu-se que o GJ ocorreu exatamente a partir desta Cb, e mais uma vez sobre a área com menores TBs (em torno de -80°C).

Dessa forma, trabalhos futuros poderiam analisar mais profundamente as condições sinóticas e as características dos relâmpagos durante o ciclo de vida dos sistemas convectivos associados à GJs no Brasil, visando verificar as características observadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, R. I. et al. Where are the lightning hotspots on Earth? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 11, p. 2051-2068, 2016. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/11/bams-d-14-00193.1.xml>. Acesso em: 18 abr. 2021.
- ARNONE, E. et al. Seeking sprite-induced signatures in remotely sensed middle atmosphere NO₂. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 5, 2008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007GL031791>. Acesso em: 29 abr. 2021.
- AZAMBUJA, R. R. **Caracterização de tempestades produtoras de sprites na América do Sul**. 147 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/01.14.12.18/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.
- BERING III, E. A. et al. Observations of transient luminous events (TLEs) associated with negative cloud to ground (- CG) lightning strokes. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 5, 2004. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003GL018659>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- BOCCIPPIO, D. J. et al. Sprites, ELF transients, and positive ground strokes. **Science**, v. 269, n. 5227, p. 1088-1091, 1995. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/269/5227/1088.abstract>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- BOECK, W. L. et al. Lightning induced brightening in the airglow layer. **Geophysical Research Letters**, v. 19, n. 2, p. 99-102, 1992. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/91GL03168>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- BOECK, W. L. et al. The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 7-9, p. 669-677, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136468269800025X>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- BOEING SATELLITE DEVELOPMENT CENTER. **GOES N data book**. El Segundo, California, USA, 2006. 218 p. Rev B. CDRL PM-1-1-03. Disponível em: https://www.nesdis.noaa.gov/OPPA/pdf/goes_n_databook.pdf. Acesso em: 2 abr. 2021.
- BOGGS, L. D. et al. An analysis of five negative sprite-parent discharges and their associated thunderstorm charge structures. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 2, p. 759-784, 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JD024188>. Acesso em: 22 abr. 2021.

- BOGGS, L. D. et al. First observations of gigantic jets from geostationary orbit. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 7, p. 3999-4006, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019GL082278>. Acesso em: 27 jun. 2020.
- BRAMON. **A BRAMON**. 2021a. Disponível em: <http://www.bramonmeteor.org/bramon/a-bramon/sobre/>. Acesso em: 4 abr. 2021.
- BRAMON. **Estações e operadores**. 2021b. Disponível em: <http://www.bramonmeteor.org/bramon/a-bramon/estacoes-e-operadores/>. Acesso em: 9 abr. 2022.
- CARDOSO, I. et al. Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135, p. 374-379, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016980951200436X>. Acesso em: 29 abr. 2021.
- CHEN, A. B. et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A8, 2008. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008JA013101>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- CHENG, Z. et al. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 112, n. A6, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006JA011840>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- CHOU, J. K. et al. Gigantic jets with negative and positive polarity streamers. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A7, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JA014831>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- CHOU, J. K. et al. Optical emissions and behaviors of the blue starters, blue jets, and gigantic jets observed in the Taiwan transient luminous event ground campaign. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A7, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JA016162>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- CUMMER, S. A. et al. Submillisecond imaging of sprite development and structure. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 4, 2006. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL024969>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- CUMMER, S. A. et al. Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet. **Nature Geoscience**, v. 2, n. 9, p. 617-620, 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo607>. Acesso em: 22 abr. 2021.

- EDENS, H. E. et al. Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative leader. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 4, p. 1336-1342, 2014. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013GL059180>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- ELSTER, J.; GEITEL, H. Zur influenztheorie der niederschlagselektizität. **Physikalische Zeitschrift**, v. 14, p. 1287-1292, 1913.
- FRANZ, R. C. et al. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. **Science**, v. 249, n. 4964, p. 48-51, 1990. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/249/4964/48>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- FUKUNISHI, H. et al. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 16, p. 2157-2160, 1996. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96GL01979>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- GATLIN, P. N.; GOODMAN, S. J. A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 1, p. 3-22, 2010. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/27/1/2009jtech1286_1.xml. Acesso em: 21 fev. 2022.
- GERKEN, E. A. et al. Telescopic imaging of sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 17, p. 2637-2640, 2000. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GL000035>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- GOODMAN, S. J. et al. The GOES-R geostationary lightning mapper (GLM). **Atmospheric Research**, v. 125, p. 34-49, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809513000434>. Acesso em: 2 abr. 2021.
- HAMPTON, D. L. et al. Optical spectral characteristics of sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 1, p. 89-92, 1996. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95GL03587>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- HAYAKAWA, M. et al. Observation of sprites over the Sea of Japan and conditions for lightning-induced sprites in winter. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, n. A1, 2004. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JA009905>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- HEAVNER, M. J. et al. Sprites, blue jets and elves: optical evidence of energy transport across the stratopause. **Geophysical Monograph - American Geophysical Union**, v. 123, p. 69-82, 2000. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GM123p0069>. Acesso em: 22 abr. 2021.

- HOOSE, C.; MÖHLER, O. Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: a review of results from laboratory experiments. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 20, p. 9817-9854, 2012. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/12/9817/2012/>. Acesso em: 14 fev. 2021.
- HOUZE JUNIOR, R. A. Structure and dynamics of a tropical squall-line system. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 12, p. 1540-1567, 1977. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/105/12/1520-0493_1977_105_1540_sadoat_2_0_co_2.xml. Acesso em: 1 mar. 2021.
- HOUZE JUNIOR, R. A. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, n. 4, 2004. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004RG000150>. Acesso em: 28 fev. 2021.
- HUANG, S. et al. Optical and radio signatures of negative gigantic jets: cases from typhoon Lionrock (2010). **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. A8, 2012. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JA017600>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- INAN, U. S. et al. Space-time structure of optical flashes and ionization changes produced by lightning-EMP. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 2, p. 133-136, 1996. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95GL03816>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- INAN, U. S. et al. Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric flashes referred to as 'elves'. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 5, p. 583-586, 1997. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97GL00404>. Acesso em: 21 mar. 2021.
- IRIBARNE, J. V.; CHO, H. **Atmospheric physics**. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1980. 224 p. ISBN 978-94-009-8954-2.
- JAYARATNE, R. Thunderstorm electrification mechanisms. In: COORAY, G. V. (Ed.). **The lightning flash**. London, United Kingdom: IET, 2003. 574 p. ISBN 978-08-529-6780-5.
- KOCHKIN, P. O. et al. Experimental study of the spatio-temporal development of metre-scale negative discharge in air. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 14, 2014. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/47/14/145203/meta>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- KREHBIEL, P. R. et al. Upward electrical discharges from thunderstorms. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 4, p. 233-237, 2008. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo162>. Acesso em: 2 abr. 2021.

- KUO, C. et al. Discharge processes, electric field, and electron energy in ISUAL-recorded gigantic jets. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A4, 2009. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008JA013791>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- LAZARUS, S. M. et al. A thermodynamic, kinematic and microphysical analysis of a jet and gigantic jet-producing Florida thunderstorm. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 16, p. 8469-8490, 2015. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JD023383>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LEE, A. C. L. An experimental study of the remote location of lightning flashes using a VLF arrival time difference technique. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 471, p. 203-229, 1986. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49711247112>. Acesso em: 5 abr. 2021.
- LIU, N. et al. Upward electrical discharges observed above tropical depression Dorian. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 1-8, 2015a. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms6995>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LIU, N. et al. High-altitude electrical discharges associated with thunderstorms and lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 136, p. 98-118, 2015b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682615001121>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LU, G. et al. Lightning development associated with two negative gigantic jets. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011GL047662>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LYONS, W. A. Sprite observations above the US High Plains in relation to their parent thunderstorm systems. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 101, n. D23, p. 29641-29652, 1996. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JD01866>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LYONS, W. A. et al. Sprites, elves, halos, trolls, and blue starters above the STEPS domain. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 81, n. 48, 2000.
- LYONS, W. A. et al. Upward electrical discharges from thunderstorm tops. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84, n. 4, p. 445-454, 2003. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/84/4/bams-84-4-445.xml>. Acesso em: 22 mar. 2021.

MACEDO, S. R. et al. Monitoramento de sistemas convectivos de mesoescala atuantes no Brasil utilizando o FORTRACC (Forecast and Tracking of Active and Convective Cells). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, n. 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** 2004. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/yolanda/2004/06.25.15.49/doc/v2.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 11, p. 1374-1387, 1980. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26221473>. Acesso em: 28 fev. 2021.

MASON, B. J. The generation of electric charges and fields in thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 415, n. 1849, p. 303-315, 1988. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1988.0015>. Acesso em: 18 abr. 2021.

MATTOS, E. V. **Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas**. 243 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/attachment.cgi/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.01.13.07/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, n. 10, p. 1393-1409, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070502014123>. Acesso em: 8 mar. 2021.

MEYER, T. C. et al. Radar and lightning analyses of gigantic jet-producing storms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 7, p. 2872-2888, 2013. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jgrd.50302>. Acesso em: 23 abr. 2021.

MIYASATO, R. et al. Statistical characteristics of sprite halo events using coincident photometric and imaging data. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 21, p. 29-1-29-4, 2002. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2001GL014480>. Acesso em: 22 mar. 2021.

MIYASATO, R. et al. Energy estimation of electrons producing sprite halos using array photometer data. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 5, p. 573-581, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136468260200322X>. Acesso em: 22 mar. 2021.

MONTANYÀ, J. et al. High-speed intensified video recordings of sprites and elves over the western Mediterranean Sea during winter thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A4, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JA014508>. Acesso em: 23 abr. 2021.

- MORALES, C. A. **Continuous thunderstorm monitoring**: retrieval of precipitation parameters from lightning observations. 295 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - University of Connecticut (UCONN), Storrs, Connecticut, USA, 2001. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/250191324>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- MORALES, C. A. Thunderstorm efficiency regimes in South America as observed by STARNET and TRMM. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 21, p. 11428-11451, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD030950>. Acesso em: 13 abr. 2021.
- MORALES, C. A. et al. Sferics Timing And Ranging NETwork-STARNET: 8 years of measurements in South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 15, 2014, Norman, Oklahoma, USA. **Proceedings...** World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014. p. 15-20. Disponível em: http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Morales_193.pdf. Acesso em: 6 abr. 2021.
- MYOKEI, K. et al. A study of the morphology of winter sprites in the Hokuriku area of Japan in relation to cloud charge height. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 71, n. 5, p. 597-602, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682609000261>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new brazilian total lightning network (BrasilDAT). In: 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 31, 2012, Vienna, Austria. **Proceedings...** IEEE, 2012. p. 1-9. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6344294>. Acesso em: 2 abr. 2021.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Mesoscale lightning experiment**: Background - History - Techniques: GHRC lightning. [ca. 1996]. Disponível em: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/lightning/skeet/index.html>. Acesso em: 28 fev. 2022.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al. **The Earth's electrical environment**. 1 ed. Washington D. C., USA: National Academy Press, 1986. 279 p. ISBN 978-03-090-3680-1. Disponível em: <https://www.nap.edu/catalog/898/the-earths-electrical-environment>. Acesso em: 1 mar. 2021.
- NEUBERT, T. et al. The properties of a gigantic jet reflected in a simultaneous sprite: observations interpreted by a model. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A12, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JA016928>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- NIJDAM, S. et al. Stereo-photography of streamers in air. **Applied Physics Letters**, v. 92, n. 10, 2008. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2894195>. Acesso em: 23 abr. 2021.

NIJDAM, S. et al. Reconnection and merging of positive streamers in air. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, n. 4, 2009. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/42/4/045201/meta>. Acesso em: 23 abr. 2021.

ODA, P. S. S. et al. An initial assessment of the distribution of total Flash Rate Density (FRD) in Brazil from GOES-16 Geostationary Lightning Mapper (GLM) observations. **Atmospheric Research**, p. 106081, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809522000679>. Acesso em: 19 fev. 2022.

OGAWA, T. Lightning currents. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 1995. 432 p. ISBN 978-08-493-8647-3. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=MNPPPh7B3WTIC>. Acesso em: 8 mar. 2021.

PASKO, V. P. et al. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A3, p. 4529-4561, 1997. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96JA03528>. Acesso em: 23 abr. 2021.

PASKO, V. P. et al. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. **Nature**, v. 416, n. 6877, p. 152-154, 2002. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/416152a>. Acesso em: 26 mar. 2021.

PENG, K. et al. Triangulation and coupling of gigantic jets near the lower ionosphere altitudes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 8, p. 6904-6916, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JA025624>. Acesso em: 23 abr. 2021.

PRICE, C. et al. Schumann resonances in lightning research. **Journal of Lightning Research**, v. 1, p. 1-15, 2007. Disponível em: http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/Price_et_al_-_Schumann_Resonances_in_Lightning_Research.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

PRUPPACHER, H. R.; KLETT, J. D. **Microphysics of clouds and precipitation**. 2. ed. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997. 954 p. ISBN 978-07-923-4211-3.

RAKOV, V. A. A review of positive and bipolar lightning discharges. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 84, n. 6, p. 767-776, 2003. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/84/6/bams-84-6-767.xml>. Acesso em: 18 abr. 2021.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 687 p. ISBN 978-05-210-3541-5.

RIOUSSET, J. A. et al. Air-density-dependent model for analysis of air heating associated with streamers, leaders, and transient luminous events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A12, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JA015918>. Acesso em: 23 abr. 2021.

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. **A short course in cloud physics**. 3. ed. Waltham, Massachusetts, USA: Butterworth-Heinemann, 1989. 304 p. ISBN 978-07-506-3215-7.

RUDLOSKY, S. D. et al. Initial geostationary lightning mapper observations. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 2, p. 1097-1104, 2019. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018GL081052>. Acesso em: 2 abr. 2021.

SÃO SABBAS, F. T. et al. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 5, p. 525-535, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682602003267>. Acesso em: 21 mar. 2021.

SÃO SABBAS, F. T. et al. Observations of prolific transient luminous event production above a mesoscale convective system in Argentina during the Sprite2006 campaign in Brazil. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A11, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JA014857>. Acesso em: 27 jun. 2020.

SCHMIT, T. J. et al. A closer look at the ABI on the GOES-R series. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 4, p. 681-698, 2017. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/4/bams-d-15-00230.1.xml>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SCHULTZ, C. J.; PETERSEN, W. A.; CAREY, L. D. Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 12, p. 2543-2563, 2009. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/48/12/2009jamc2237.1.xml>. Acesso em: 21 fev. 2022.

SCHULTZ, C. J.; PETERSEN, W. A.; CAREY, L. D. Lightning and severe weather: A comparison between total and cloud-to-ground lightning trends. **Weather and Forecasting**, v. 26, n. 5, p. 744-755, 2011. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/26/5/waf-d-10-05026_1.xml. Acesso em: 21 fev. 2022.

SENTMAN, D. D. et al. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 10, p. 1205-1208, 1995. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95GL00583>. Acesso em: 21 mar. 2021.

SILVA, L. A. **Comparação de características visíveis de relâmpagos nuvem-solo negativos para diferentes dias de tempestade no sudeste do Brasil, observados por uma rede de câmeras de alta velocidade**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FL6DPS>. Acesso em: 7 fev. 2021.

SLINGO, A.; SLINGO, J. M. The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. I: introduction and initial experiments. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 114, n. 482, p. 1027-1062, 1988. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49711448209>. Acesso em: 18 abr. 2021.

SOHN, B.; SMITH, E. A. The significance of cloud-radiative forcing to the general circulation on climate time scales - a satellite interpretation. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 49, n. 10, p. 845-860, 1992. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/49/10/1520-0469_1992_049_0845_tsoct_2_0_co_2.xml. Acesso em: 17 abr. 2021.

SOULA, S. et al. Characteristics and conditions of production of transient luminous events observed over a maritime storm. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D16, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JD012066>. Acesso em: 27 jun. 2020.

SOULA, S. et al. Gigantic jets produced by an isolated tropical thunderstorm near Réunion Island. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D19, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JD015581>. Acesso em: 2 jul. 2020.

SPACEWEATHER.COM. **Gigantic jet lightning near Hawaii**. Dr. Tony Phillips. 2017. Disponível em: https://spaceweathergallery.com/indiv_upload.php?upload_id=137164. Acesso em: 1 abr. 2021.

SPACEWEATHER.COM. **Get ready for sprite season**. Dr. Tony Phillips. 2020. Disponível em: <https://spaceweatherarchive.com/2020/03/07/get-ready-for-sprite-season>. Acesso em: 23 mar. 2021.

STANLEY, M. et al. Observations of sprites and jets from Langmuir Laboratory, New Mexico. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 77, n. F69, p. A11A-7, 1996.

STENBAEK-NIELSEN, H. C. et al. Sprites and possible mesospheric effects. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 23, p. 3829-3832, 2000. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GL003827>. Acesso em: 21 mar. 2021.

STENBAEK-NIELSEN, H. C. et al. High-speed observations of sprite streamers. **Surveys in Geophysics**, v. 34, n. 6, p. 769-795, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-013-9224-4>. Acesso em: 25 mar. 2021.

STENBAEK-NIELSEN, H. C. et al. Analysis and modeling of sprite green ghosts. In: AGU FALL MEETING, 101, 2020. **Proceedings...** AGU, 2020. Disponível em: <https://www.essoar.org/doi/abs/10.1002/essoar.10504953.1>. Acesso em: 26 mar. 2021.

STOLZENBURG, M. et al. Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D12, p. 14097-14108, 1998. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD03545>. Acesso em: 1 mar. 2021.

SU, H. et al. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. **Nature**, v. 423, n. 6943, p. 974-976, 2003. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature01759>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SUNEARTHTOOLS.COM. **Medida em google map**: coordenadas de latitude longitude, endereço distância área. 2020. Disponível em: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_earth.php?lang=pt. Acesso em: 9 jul. 2020.

SURKOV, V. V.; HAYAKAWA, M. Progress in the study of transient luminous and atmospheric events: a review. **Surveys in Geophysics**, v. 41, p. 1101-1142, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-020-09597-2>. Acesso em: 27 jun. 2020.

TAKAHASHI, T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 8, p. 1536-1548, 1978. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA396784>. Acesso em: 18 abr. 2021.

TOBIAS, J. M. et al. **The basis of conventional lightning protection technology**: a review of the scientific development of conventional lightning protection technologies and standards. Army Communications-Electronics Commandfort Monmouth NJ, 2001. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/35/8/1520-0469_1978_035_1536_reaacg_2_0_co_2.xml. Acesso em: 22 fev. 2021.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. Orlando, Florida, USA: Academic Press, 1987. 377 p. ISBN 978-01-270-8350-6.

UNIVERSITY OF ILLINOIS. **Single cell thunderstorms**: also known as pulse thunderstorms. WW2010. Urbana, Illinois, USA: 1997a. Disponível em: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/sngl/ovr.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/sngl/ovr.xml). Acesso em: 21 fev. 2021.

UNIVERSITY OF ILLINOIS. **Multicell cluster storms**: a cluster of storms in varying stages of development. WW2010. Urbana, Illinois, USA: 1997b. Disponível em: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/clstr/home.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/clstr/home.xml). Acesso em: 21 fev. 2021.

UNIVERSITY OF ILLINOIS. **Supercell thunderstorms**: thunderstorms with deep rotating updrafts. WW2010. Urbana, Illinois, USA: 1997c. Disponível em: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/svr/type/spr/home.xml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/svr/type/spr/home.xml). Acesso em: 21 fev. 2021.

- UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON. **The problem of parallax**. CIMSS Satellite Blog, 2006. Disponível em: <https://cimss.ssec.wisc.edu/satellite-blog/archives/217>. Acesso em: 14 fev. 2022.
- VAN DER VELDE, O. A. et al. Analysis of the first gigantic jet recorded over continental North America. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D20, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007JD008575>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- VAN DER VELDE, O. A. et al. Multi-instrumental observations of a positive gigantic jet produced by a winter thunderstorm in Europe. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D24, 2010. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JD014442>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- VAN DER VELDE, O. A. et al. Gigantic jets observed from San Andrés island (southwest Caribbean). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 15, 2014, Norman, Oklahoma, USA. **Proceedings...** World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327189201_Gigantic_Jets_observed_from_San_Andres_island_southwestern_Caribbean. Acesso em: 23 abr. 2021.
- VAN DER VELDE, O. A. et al. Gigantic jet discharges evolve stepwise through the middle atmosphere. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-12261-y>. Acesso em: 27 jun. 2020.
- VAN STAN II, J. T. et al. **Precipitation partitioning by vegetation: a global synthesis**. Cham, Switzerland: Springer, 2020. 281 p. ISBN 978-30-302-9702-2. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-29702-2>. Acesso em: 29 abr. 2020.
- VILA, D. A. et al. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation. **Weather and Forecasting**, v. 23, n. 2, p. 233-245, 2008. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/23/2/2007waf2006121_1.xml?tab_body=fulltext-display. Acesso em: 29 out. 2021.
- WALLACE, M. J.; HOBBS, V. P. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2. ed. Academic Press, 2006. 504 p. ISBN 978-01-273-2951-2. Disponível em: ftp://ftp.aoml.noaa.gov/phod/pub/wang/TCs_References/Atmospheric_Science.pdf. Acesso em: 17 mar. 2020.
- WESCOTT, E. M. et al. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 10, p. 1209-1212, 1995. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95GL00582>. Acesso em: 25 abr. 2021.

WESCOTT, E. M. et al. Blue starters: brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 16, p. 2153-2156, 1996. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96GL01969>. Acesso em: 25 mar. 2021.

WESCOTT, E. M. et al. Observations of 'columniform' sprites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 7-9, p. 733-740, 1998a. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682698000297>.

Acesso em: 25 mar. 2021.

WESCOTT, E. M. et al. Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 60, n. 7-9, p. 713-724, 1998b. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682698000182>.

Acesso em: 25 mar. 2021.

WESCOTT, E. M. et al. New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 106, n. A10, p. 21549-21554, 2001. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000JA000429>. Acesso em: 23 abr. 2021.

WILLIAMS, E. R. The electrification of thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, n. 5, p. 88-99, 1988. Disponível em:

<https://www.scientificamerican.com/article/the-electrification-of-thunderstorm>.

Acesso em: 1 mar. 2021.

WILLIAMS, E. R. The electrification of severe storms. In: DOSWELL III, C. A. (Ed.). **Severe convective storms**. Boston, Massachusetts, USA: American Meteorological Society, 2001. 570 p. ISBN 978-19-357-0406-5. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-935704-06-5_13. Acesso em: 8 mar. 2021.

WINCKLER, J. R. Further observations of cloud-ionosphere electrical discharges above thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D7, p. 14335-14345, 1995. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95JD00082>. Acesso em: 24 abr. 2021.

Acesso em: 24 abr. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO OSCAR**: satellite: GOES-16. 2022a. Disponível em:

https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/goes_16. Acesso em: 10 fev. 2022.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO OSCAR**: details for instrument SEVIRI. 2022b. Disponível em:

<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/seviri>. Acesso em: 10 fev. 2022.