



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**PESQUISAS SOBRE AS TEMPESTADES PRODUTORAS DE FADAS  
DETECTADAS COM A REDE COLABORATIVA LEONA.**

Caio Lucas Teixeira Ferraz de Oliveira

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pela Dra. Eliah Fernanda de Maria São Sabbas Tavares e coorientado pela Dra. Maria de Souza Custódio.

INPE

São José dos Campos

Setembro, 2022



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**PESQUISAS SOBRE AS TEMPESTADES PRODUTORAS DE FADAS  
DETECTADAS COM A REDE COLABORATIVA LEONA.**

Caio Lucas Teixeira Ferraz de Oliveira

Relatório de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pela Dra. Eliah Fernanda de Maria São Sabbas Tavares e coorientado pela Dra. Maria de Souza Custódio.

INPE

São José dos Campos

Setembro, 2022

## RESUMO

A atmosfera está dividida em camadas apenas para fins didáticos, na realidade as camadas apresentam acoplamentos de diferentes propriedades, um deles é o acoplamento eletrodinâmico. Um dos principais sinais desse acoplamento são EFEITOS Sinalizadores do Acoplamento Eletrodinâmico Atmosférico e Espacial (FADAS). As FADAS compreendem-se pelos Eventos Luminosos Transientes (ELTS) e pelas Emissões de Alta Energia de Tempestades (ALETS). Os ELTS mais conhecidos são os Sprites, Elves, Halos, Jatos azuis e Jatos gigantes, sendo os Sprites os mais estudados até então. As ALETS conhecidas atualmente são as emissões de nêutrons, os Flashes de Raio Gama Terrestres (FGTs), Raios-X e emissões de pares elétron-pósitron. A principal fonte desses fenômenos é a produção de descargas elétricas em nuvens de tempestades, ou cumulonimbus, cujas associações são os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs). Este trabalho buscou entender o mecanismo de geração dos ELTs estudando o ciclo de vida das tempestades que geraram os ELTs observados pela rede colaborativa LEONA nas noites 13-14/12/2018, 28-29/10/2019 e 01-02/11/2019. Para isso, mapas da temperatura do topo das nuvens das três tempestades, observadas no infravermelho (IR) pelo satélite GOES-16, foram analisados. Os resultados encontrados apontam para uma concordância com a literatura científica, uma vez que os ELTs foram observados predominantemente na região estratiforme dos sistemas. As tempestades com maior desenvolvimento convectivo, 501.029,00 km<sup>2</sup> e 316.515,00 km<sup>2</sup>, produziram mais ELTs do que a com menor desenvolvimento, 74.557,40 km<sup>2</sup>, respectivamente 438, 461 e 33. Nas tempestades maiores os ELTs ocorreram durante a etapa de amadurecimento tardio, demonstrando o papel da região convectiva em difundir cargas positivas para todo o sistema através da divergência das correntes ascendentes na tropopausa, eletrificando-o. Tanto os ELTs como as descargas NS<sup>+</sup> e NS<sup>-</sup> se localizaram em regiões com temperatura de brilho  $\leq -75$  °C nas tempestades maiores, na menor houve um padrão mais abrangente nas temperaturas de brilho associadas, que variaram entre -40 °C e -75 °C. Foram observados Elves apenas na noite de 28-19/10/2019, e eles não seguiram o padrão de temperatura dos demais ELTs desta noite, uma vez que tendo ocorrido praticamente acima de toda a cobertura de nuvens, uma vez que as temperaturas as eles associadas variaram de 0 °C à -70 °C. Nas três tempestades, a taxa de NS<sup>-</sup>, 268 NS<sup>-</sup>/min, 69 NS<sup>-</sup>/min e 26 NS<sup>-</sup>/min, maior que a taxa de NS<sup>+</sup>, 100 NS<sup>+</sup>/min, 20 NS<sup>+</sup>/min e 6 NS<sup>+</sup>/min, na etapa de produção de ELTs dá suporte a hipótese de que os NS<sup>-</sup> possuem uma influência na produção dos eventos que é maior do que se pensava anteriormente.

Palavras-chave: Eletricidade. Mesoescala. Tempestades. Descargas. Eventos Luminosos Transientes.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1: Imagens de um grupo de sprites coletadas com uma câmera CCD (linha superior) mostrando a região observada com um telescópio (linha inferior) com algumas centenas de metros de extensão lateral, mostrando detalhes das ramificações. ....  | 2  |
| Figura 1.2: Imagens de um grupo de sprite com ~50 km de extensão coletada com uma câmera CCD (linha superior) mostrando a região observada com um telescópio (linha inferior) mostrando a estrutura fina das ramificações e a intensidade de brilho em kR... 3                                      | 3  |
| Figura 1.3: Esquema da transição de avalanche eletrônica para streamers. ....   | 7  |
| Figura 1.4: Sequência de imagens com duração de 1 ms mostrando um elve na segunda e um halo na terceira.....  | 9  |
| Figura 1.5: Exemplos de halos documentados em agosto de 1999 por pesquisadores da Universidade do Alaska Fairbanks (UAF), com o início de um sprite visível no terceiro halo. ....  | 10 |
| Figura 1.6: Imagens monocromática do desenvolvimento de um Jato Gigante coletadas do observatório de Arecibo, Porto Rico. ....  | 10 |
| Figura 1.7: Estágio de cumulus. ....  | 12 |
| Figura 1.8: Etapa madura de uma cumulonimbus. ....  | 12 |
| Figura 1.9: Etapas de eletrificação da nuvem segunda a teoria convectiva. ....  | 15 |
| Figura 3.1: Imagem de um quadro com seus campos ainda entrelaçados, mostrando um grupo de sprites gravados na noite 29/10/2019 às 03:29:13 UT. O terceiro e quarto números são os milissegundos do primeiro e segundo campos.....   | 19 |
| Figura 3.2: Primeiro e segundo campos do quadro da Figura anterior, agora já desentrelaçados. Além da definição do horário preciso de cada campo, é possível notar que o sprite mais à esquerda torna-se visível com este processamento do dado, bem com a evolução tempo-espacial dos sprites..... | 19 |
| Figura 3.3: Mapa estelar ressaltando as estrelas do dia 29/10/2019 às 00:16:35 UTC. Os pontos verdes são pixels da CCD que estavam danificados.....   | 20 |
| Figura 3.4: Seção Star, do software StarStereo, utilizada nos ajustes do campo de estrelas calculado sobrepondo-o ao mapa estelar. Os pontos vermelhos são as estrelas teóricas já mapeadas. ....   | 21 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.5: Seção Stereo, do software StarStereo, utilizada para estimar ou triangular geolocalização de eventos. ....  | 22 |
| Figura 3.6: Mapa de temperatura de brilho IR, do canal 13 (10,35 $\mu\text{m}$ ), do GOES-16 para o dia 29/10/2019 às 03:00 UTC. Em magenta estão representados os relâmpagos NS+, e em preto os relâmpagos NS-. As estrelas magentas são as estações de observação da Rede LEONA que registraram os ELTs, e o cone vermelho é o campo de visada das câmeras.....   | 23 |
| Figura 4.1: Grupo de sprites observado na madrugada do dia 14/12/2018. Os sprites duraram dois campos, ou seja, ~33 ms. ....  | 25 |
| Figura 4.2: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 13-14/12/2018 entre 00 UTC e 10 UTC de 14/12/2018. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35 $\mu\text{m}$ do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de ~30 km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos..... | 26 |
| Figura 4.3: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40\text{ }^\circ\text{C}$ ) e convectiva ( $T \leq -60\text{ }^\circ\text{C}$ ) em 13-14/12/2018. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras. ....  | 27 |
| Figura 4.4: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.....  | 28 |
| Figura 4.5: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.....  | 28 |
| Figura 4.6: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.....  | 29 |
| Figura 4.7: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de halos da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.....  | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.8: Elve estriado observado na madrugada de 29/10/2019 às 02:13:48 UTC, com a Estação da Rede LEONA localizada em São Martinho da Serra, RS. ....  | 30 |
| Figura 4.9: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 28-29/10/2019 entre 23 UTC e 03 UTC. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35 $\mu\text{m}$ do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de $\sim 30$ km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos. .... | 31 |
| Figura 4.10: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40$ °C) e convectiva ( $T \leq -60$ °C) em 28-29/10/2019. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras. ....  | 32 |
| Figura 4.11: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.....  | 33 |
| Figura 4.12: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.....  | 33 |
| Figura 4.13: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.....  | 34 |
| Figura 4.14: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Elves da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.....  | 34 |
| Figura 4.15: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de halos da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.....  | 35 |
| Figura 4.16: Grupo de sprites colunas observados na madrugada do dia 02/11/2019. Os sprites duraram dois campos de 16,7 ms. ....   | 35 |
| Figura 4.17: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 01-02/11/2019 entre 23 UTC e 07 UTC. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35 $\mu\text{m}$ do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a  |    |

|   |    |
|---|----|
| localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de ~30 km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos. .... | 37 |
| Figura 4.18: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40$ °C) e convectiva ( $T \leq -60$ °C) em 01-02/11/2019. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras. ....   | 38 |
| Figura 4.19: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019.....   | 38 |
| Figura 4.20: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019.....   | 39 |
| Figura 4.21: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019. ....  | 39 |

## SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 1        | INTRODUÇÃO.....   | 1  |
| 1.1.     | Eventos Luminosos Transientes .....   | 2  |
| 1.1.1.   | Sprites .....   | 2  |
| 1.1.1.1. | Formação dos Sprites .....  | 4  |
| 1.1.1.2. | Efeitos dos Sprites na atmosfera .....  | 8  |
| 1.1.2.   | Emissões de Luz e Perturbações de Frequência Muito Baixa de Fontes de Radiação Eletromagnética – ELVES..... | 9  |
| 1.1.3.   | Halos.....  | 9  |
| 1.1.4.   | Jatos azuis e Jatos gigantes.....   | 10 |
| 1.2.     | Dinâmica de nuvens convectivas .....  | 11 |
| 1.2.1.   | Ciclo de vida individual de cumulonimbus .....  | 12 |
| 1.2.2.   | Formação de precipitação.....   | 13 |
| 1.2.3.   | Observação de cumulonimbus.....   | 14 |
| 1.2.4.   | Eletrificação de cumulonimbus .....   | 14 |
| 1.2.5.   | Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs).....  | 16 |
| 1.2.6.   | As tempestades geradoras de ELTs.....   | 17 |
| 2        | OBJETIVOS .....   | 18 |
| 3        | METODOLOGIA.....  | 18 |
| 4        | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....  | 24 |
| 4.1.     | Tempestade de 13-14/12/2018.....  | 24 |
| 4.2.     | Tempestade de 28-29/10/2019.....  | 30 |
| 4.3.     | Tempestade de 01-02/11/2019.....  | 35 |
| 5        | CONCLUSÃO.....  | 40 |
| 6        | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 41 |

## 1 INTRODUÇÃO

A atmosfera é dividida em camadas para melhor compreensão de sua estrutura. Essa divisão pode ser feita utilizando-se três parâmetros: o perfil de temperatura, a composição química e a densidade eletrônica. Na realidade as camadas da atmosfera são todas interligadas, se sobrepõem em diversas regiões e estão acopladas umas às outras por diversos processos físicos.

Nos anos 60, descobriu-se o primeiro mecanismo de acoplamento entre as camadas, envolvendo transporte de energia da troposfera para a média e alta atmosfera em forma de ondas de gravidade.

Em 1989, com a descoberta dos Sprites descobriu-se que há também um acoplamento eletrodinâmico entre as camadas, este apresenta sinais de sua existência pela ocorrência de fenômenos que são Efeitos Sinalizadores do Acoplamento EletoDinâmico Atmosférico e ESpacial (FADAS).

Dentre as FADAS há os Eventos Luminosos Transientes (ELTs) e as Emissões de Alta Energia de Tempestades (ALETs). Os ELTs são emissões luminosas de curta duração que ocorrem na média e alta atmosfera em função da atividade elétrica de nuvens de tempestade na troposfera. O primeiro evento foi descoberto de forma inesperada na noite entre 5 e 6 de julho de 1989 no estado de Minnesota, EUA (FRANZ et al., 1990), e foi denominado Sprite (SENTMAN et al., 1995). A luminosidade dos ELTs é de baixa intensidade, portanto não são visíveis de dia, apenas a noite, e raramente a olho nu; é necessária a utilização de câmeras de vídeo ou fotômetros com uma alta sensibilidade luminosa para a sua observação. Os ELTs mais estudados são os sprites, halos, jatos azuis, jatos gigantes e os Elves. As ALETs documentadas até o momento são os Flashes de Raios Gama Terrestres (FGTs), as emissões de Raio-X, de pares elétrons-pósitrons e de nêutrons.

A diferença entre os Eventos Luminosos Transientes e as Emissões de Alta Energia de Tempestades é o fato de que os ELTs são plasmas e as ALETs são partículas energéticas; os ELTs são gerados, por elétrons “frios” e acredita-se que as ALETs são geradas por elétrons relativísticos. Os resultados mais energéticos da interação de um elétron frio com um átomo são a excitação ou ionização do átomo. Já as interações dominantes dos elétrons relativísticos com os átomos são, principalmente, o

espalhamento Compton, a criação de pares, a interação Bremsstrahlung e a emissão de nêutrons.

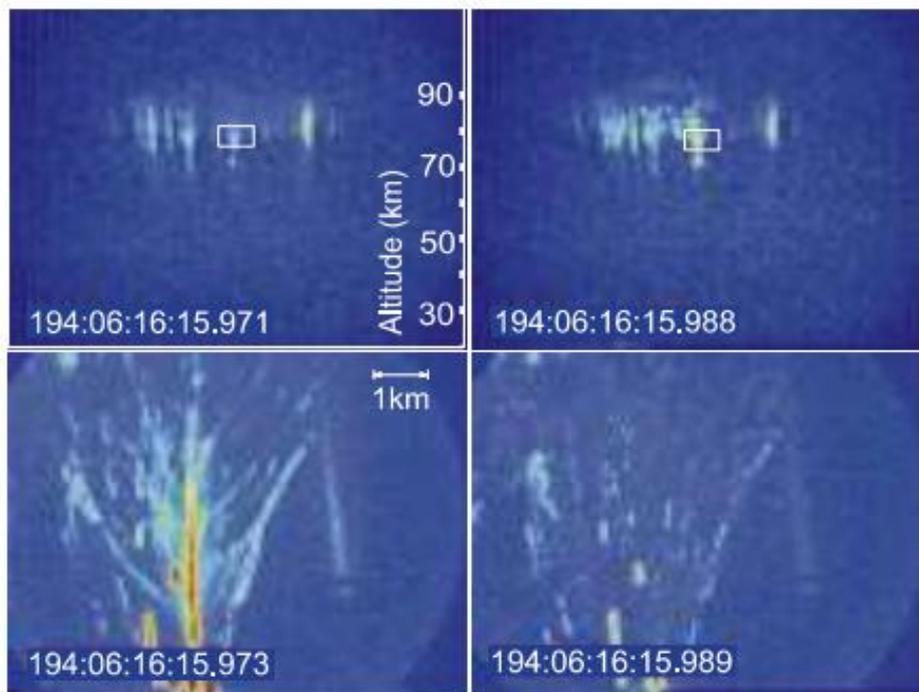
O presente trabalho foi centrado nos ELTs, em especial em ELTs observados pela Rede Colaborativa na América Latina para a Investigação de Eventos Luminosos Transientes e Emissões de Alta Energia de Tempestades – Rede LEONA, do INPE, e as tempestades que os geraram.

## 1.1. Eventos Luminosos Transientes

### 1.1.1. Sprites

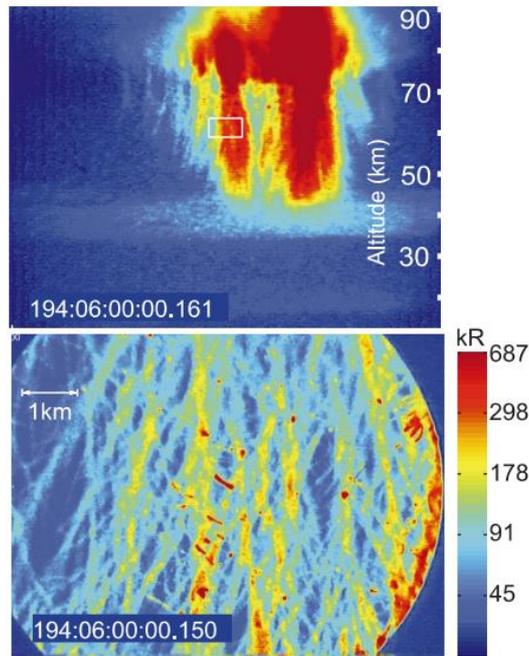
Os Sprites são ELTs que se estendem por toda a mesosfera. Segundo SENTMAN et al. (1995) o topo do Sprite pode chegar até  $90 \pm 4$  km de altitude, na base da ionosfera. A extensão lateral total dos sprites varia entre algumas centenas de metros (GERKEN e INAN et al.,2000), como na Figura 1.1, até ~40-60 km, como na Figura 1.1.

Figura 1.1: Imagens de um grupo de sprites coletadas com uma câmera CCD (linha superior) mostrando a região observada com um telescópio (linha inferior) com algumas centenas de metros de extensão lateral, mostrando detalhes das ramificações.



Fonte: Adaptado de Gerken e Inan (2000).

Figura 1.2: Imagens de um grupo de sprite com ~50 km de extensão coletada com uma câmera CCD (linha superior) mostrando a região observada com um telescópio (linha inferior) mostrando a estrutura fina das ramificações e a intensidade de brilho em kR.



Fonte: Adaptado de Gerken e Inan (2000).

Como pode-se ver nas Figura 1.1 e Figura 1.2, a morfologia dos Sprites é bastante complexa, com uma grande quantidade de canais de plasma do tipo streamers, que se apresentam como ramificações, dificultando as tentativas de classificações morfológicas.

A cor dos streamers muda gradualmente do vermelho para o azul, pois essas emissões em azul passam ser dominantes conforme a altitude diminui. Por serem emissões de maior energia que o vermelho, são mais rápidas, logo conseguem ser emitidas em regiões onde a colisão entre átomos é maior e mais frequente, ao contrário das emissões vermelhas que são desativadas colisionalmente (em inglês “quenched”).

Nas regiões de transição e no topo, denominado cabelo (em inglês “hair”), as emissões são mais avermelhadas, pois o livre caminho médio das partículas é maior, o que permite que ocorram emissões mais demoradas e de menor energia, que são mais abundantes e acabam por predominar.

#### 1.1.1.1. Formação dos Sprites

Os sprites são predominantemente gerados por relâmpagos positivos Nuvem-Solo (NS+), podendo também ser gerados por relâmpagos negativos Nuvem-Solo (NS-), ou Intra-Nuvem (IN) em menor proporção.

Os processos mecânicos de formação das nuvens de tempestades, as cumulonimbus, envolvendo convecção intensa dos hidrometeoros que as formam, separam as cargas elétricas dentro da nuvem que se organizam em camadas que são aproximadas por centros de carga (MENDES JR.; DOMINGUES, 2002). A aproximação mais simples da estrutura de carga das cumulonimbus é dipolar, com um centro de cargas negativo abaixo do positivo. A segunda mais simples é tripolar, na qual um pequeno centro de cargas positivo abaixo do centro negativo é considerado. As cargas elétricas são armazenadas nos hidrometeoros, predominantemente nas gotículas de água, cristais de gelo e granizo. Em um dado momento o campo elétrico da nuvem ( $\vec{E}_{nuvem}$ ) pode atingir um valor alto o suficiente tal que a rigidez dielétrica do ar é quebrada, dando início a uma descarga elétrica, que é denominada de relâmpago.

Os relâmpagos NS+, aos quais os sprites estão geralmente associados, extinguem cargas positivas na nuvem, resultando numa carga líquida negativa que gera um campo elétrico quase-estático em direção a elas mesmas. Essa variação temporal de densidade de cargas e a variação espacial da corrente elétrica pode ser descrita pela Equação 1.1, chamada de equação da continuidade. Nas modelagens de geração de sprites (BELL; PASKO; INAN, 1995; SÃO SABBAS, 2003; da SILVA, 2011; da SILVA E SÃO SABBAS, 2013; LUQUE; EBERT, 2009, entre outras referências), a densidade de carga e de corrente são geralmente decompostas em 2 componentes, conforme a Equação (1.1) abaixo:

$$\frac{\partial(\rho_0 + \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (j_0 + j_1) = 0, \quad (1.1)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade de carga original do dipolo da nuvem,  $\rho_1$  é a densidade de carga induzida na atmosfera,  $j_0$  é a densidade de corrente elétrica original do relâmpago que descarrega um dos centros de carga da nuvem e  $j_1$  é a densidade de corrente induzida na atmosfera. Sendo que a densidade de corrente depende da condutividade da atmosfera e do campo elétrico ( $J = \sigma E$ ).

Na atmosfera acima da nuvem, em função da rarefação do ar com a altitude, esse campo, que dura o tempo de relaxação no ar dessa região, se estende até a base da ionosfera noturna com intensidade reduzida (de acordo com a Lei de Gauss), sendo chamado de campo elétrico externo ( $\vec{E}_{externo}$ ) e sendo negativo, ou seja, em direção ao solo. Nessa região a nuvem e a ionosfera forma como que um capacitor de placas paralelas e na região onde os sprites são iniciados, ou seja, longe da nuvem, ele pode ser aproximado como um campo vertical.

A forma diferencial da Lei de Gauss é dada pela Equação 1.2, essa lei nos diz como o campo elétrico diverge da fonte, e que sua intensidade depende da densidade de carga da fonte.

$$\nabla \cdot E = \frac{(\rho_0 + \rho_1)}{\epsilon_0}, \quad (1.2)$$

onde  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ H/m}$  é a constante de permissividade elétrica no vácuo.

A resposta da atmosfera ao  $\vec{E}_{externo}$  é pela deriva de elétrons livres para cima, com a velocidade vertical da deriva dada pela Equação 1.3.

$$W = -\mu_e e E_z = -(\mu_{e,0} E_{k,0}) \frac{E_z}{E_k}, \quad (1.3)$$

onde  $\mu_e$  é a mobilidade eletrônica,  $E_z$  é o campo elétrico em altitude, na vertical,  $\mu_{e,0}$  é a mobilidade eletrônica ao nível do mar,  $E_k$  é o campo elétrico a partir do qual ocorre a quebra da rigidez dielétrica do ar em altitude e  $E_{k,0}$  é o campo elétrico limite da quebra de rigidez dielétrica ao nível do mar.

Esses elétrons livres, acelerados pelo campo elétrico externo, atingem energias iguais ou maiores ao limite necessário para ionização dos gases da atmosfera, o transporte, ou fluxo, de elétrons, isto é, a corrente elétrica é dada pela Equação 1.4.

$$\vec{\Gamma}_e = \mu_e n_e \vec{E} - D_e \vec{\nabla} n_e, \quad (1.4)$$

onde  $n_e$  é a densidade de elétrons e  $D_e$  é o coeficiente de difusão eletrônica.

A densidade de elétrons sofre variações em função de ionizações e captura de elétrons por átomos neutros, processo chamado de junção eletrônica (em inglês “attachment”), conforme a Equação 1.5.

$$\frac{dn_e}{dt} = (\nu_i - \nu_a)n_e, \quad (1.5)$$

onde  $\nu_i$  a frequência de ionização e  $\nu_a$  a frequência de attachment.

Como os elétrons se movem muito mais rapidamente que os íons produzidos, eles deixam para trás uma camada de carga positiva. A densidade de íons positivos é dada pela Equação da continuidade 1.6.

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \nu_i n_e, \quad (1.6)$$

onde  $n_p$  é a densidade de íons positivos.

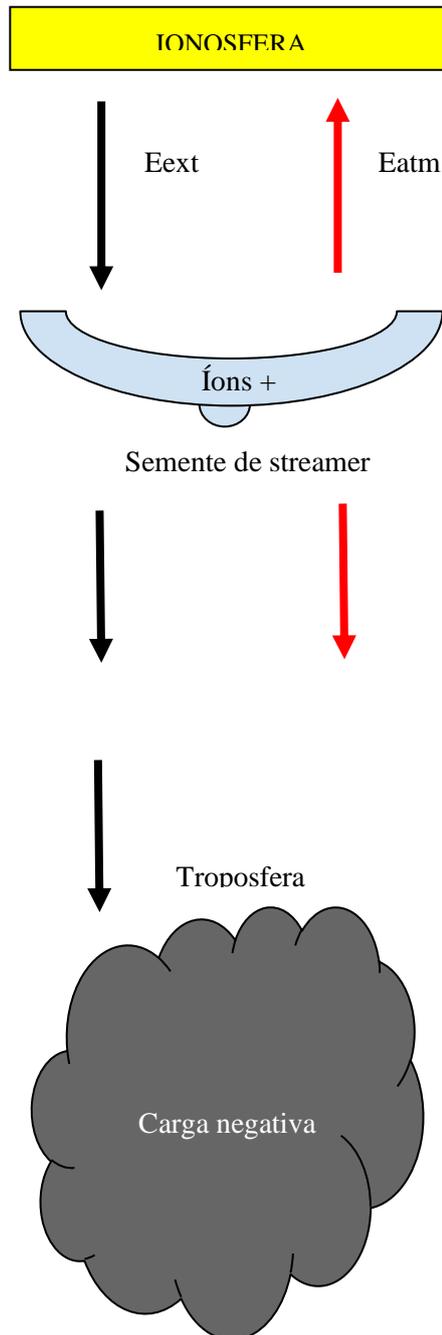
Há também átomos neutros cuja variação temporal da densidade também é descrita pela Equação da continuidade 1.7.

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = \nu_a n_e, \quad (1.7)$$

onde  $n_n$  é a densidade de átomos neutros.

A camada de carga positiva gera um campo elétrico atmosférico no sentido oposto ao campo elétrico externo em altitudes superiores à camada, cujo efeito é reduzir fortemente, ou blindar o campo na região acima dela, e intensifica o campo elétrico externo abaixo dela, conforme mostrado na Figura 1.3.

Figura 1.3: Esquema da transição de avalanche eletrônica para streamers.



Quando o  $\vec{E}_{externo}$  se torna maior que o limiar de quebra de rigidez dielétrica do ar acima de uma certa altitude, a taxa de produção de elétron por ionização colisional ultrapassa a taxa de perda por attachment. Esses processos resultam num aumento local de densidade eletrônica, criando uma espécie de semente eletrônica. Desse modo, a equação da continuidade para os elétrons pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\mu_e n_e \vec{E} + D_e \vec{\nabla} n_e) + (v_i - v_a) n_e, \quad (1.8)$$

Note que a Equação 1.8 é a Equação 1.5 com o detalhamento da corrente eletrônica, ou seja, o transporte de elétrons, definido na Equação 1.4.

A onda se inicia na base da ionosfera e propaga-se para baixo, atingindo regiões de maior densidade neutra e menor condutividade. A frente de onda torna-se cada vez mais afunilada e comprimida, chegando a ter, segundo simulações de da SILVA, (2011), ~300 m de raio.

Desse modo as condições para criação de streamers são satisfeitas e os streamers são iniciados. Essas condições são: (1)  $E > E_k$ ; (2) Uma semente de elétrons com densidade suficiente para iniciar os canais de plasma do tipo streamer; (3) A existências de elétrons livres à frente do streamer em quantidade suficiente para possibilitar a sua propagação (da SILVA e SÃO SABBAS, 2011). Podemos ver a representação da semente de streamer na Figura 1.3.

#### 1.1.1.2. Efeitos dos Sprites na atmosfera

Um dos efeitos dos sprites na atmosfera, mostrado por diversos trabalhos de modelagem computacional (por exemplo ENELL et al., 2008a; SENTMAN et al., 2008) é a alteração da química da atmosfera local, com a produção de diferentes gases que normalmente não existiriam ali e/ou aumento da concentração de gases já existente. Por exemplo, a produção de NO e suas variações,  $NO_x$ , através da ionização do nitrogênio molecular via impacto de elétrons, Reação 1.1, seguida pela oxidação do nitrogênio atômico, Reação 1.2.



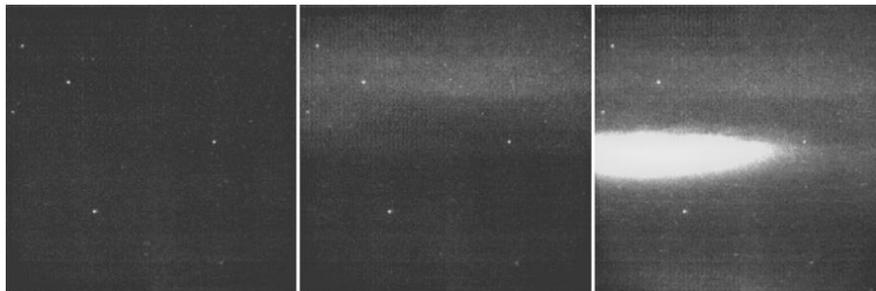
Os  $NO_x$  participam, em função da sua eventual precipitação, em ciclos catalíticos de destruição da camada de ozônio,  $O_3$ , na estratosfera.

### 1.1.2. Emissões de Luz e Perturbações de Frequência Muito Baixa de Fontes de Radiação Eletromagnética – ELVES

Descobertos e nomeados por FUKUNISHI et al., 1996, os elves possuem menor intensidade luminosa aparente do que os outros ELTs quando observados do solo, como na Figura 1.4, mas quando observados do espaço são bastante brilhantes e em 2008 se revelaram os mais frequentes dos ELTs (CHEN et al., 2008).

Os elves são os ELTs que possuem maior dimensão horizontal, em torno de 200-660 km (BARRINGTON-LEIGH; INAN, 1999). Eles são como um anel em expansão. Ocorrem em torno de 90 km de altitude, na base da ionosfera, e duram de alguns  $\mu$ s. Além disso, são gerados pela excitação colisional dos átomos excitados pela interação do plasma ionosférico com o pulso eletromagnético das descargas de retorno do relâmpago de qualquer polaridade (da SILVA, 2011).

Figura 1.4: Sequência de imagens com duração de 1 ms mostrando um elve na segunda e um halo na terceira.

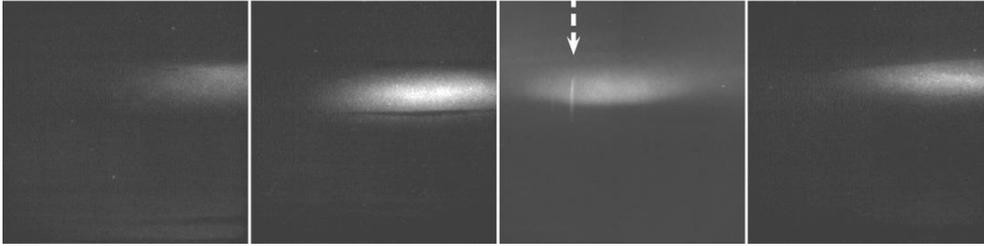


Fonte: MOUDRY et al. (2003).

### 1.1.3. Halos

Outro tipo de ELT é o halo. Halos possuem luminosidade difusa, acontecem separadamente ou acompanhando os sprites, na região do topo ou na altura da cabeça dos sprites. Eles são discoides, com 50 a 70 km de diâmetro, como na Figura 1.5, com duração de 2 a 10 ms. Também são chamados de sprite-halos, pois muitas vezes precedem ou acompanham os sprites (da SILVA, 2011).

Figura 1.5: Exemplos de halos documentados em agosto de 1999 por pesquisadores da Universidade do Alaska Fairbanks (UAF), com o início de um sprite visível no terceiro halo.



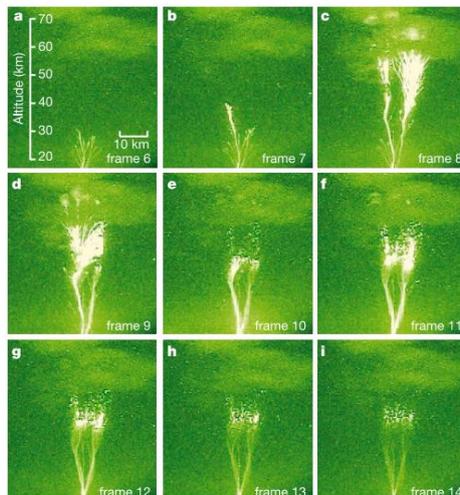
Fonte: MOUDRY et al. (2003).

#### 1.1.4. Jatos azuis e Jatos gigantes

Segundo PASKO et al. (2002), são jatos de plasma com intensidade luminosa em torno de 500 kR, com duração de 200-300 ms. Os Jatos Azuis atingem uma altitude terminal de 40-50 km e uma velocidade de propagação em torno de 100 km/h. São formados predominantemente por streamers positivos gerados pelo rápido crescimento de cargas no topo da nuvem.

Os jatos gigantes atingem 70-100 km de altitude, como na Figura 1.6, podendo chegar até a base da ionosfera. Ocorrem predominantemente na região tropical do planeta e durante a noite. Esses jatos se iniciam como relâmpagos Intra-Nuvem, com um líder negativo que se propaga para cima e escapa da nuvem.

Figura 1.6: Imagens monocromática do desenvolvimento de um Jato Gigante coletadas do observatório de Arecibo, Porto Rico.



Fonte: PASKO et al. (2002).

## 1.2. Dinâmica de nuvens convectivas

Segundo o Atlas Internacional de Nuvens, nuvem é um grupo de partículas visíveis de líquido ou gelo, ou de ambos, leves o suficiente para ficarem suspensas na atmosfera.

As nuvens são divididas primeiramente em gênero, depois em espécies e, em seguida, em variedades. Existem 10 **gêneros** de nuvens segundo VIANELLO e ALVES (2006), dentre elas estão: *Cirrus*, *Cirrocumulus*, *Cirrostratus*, *Altostratus*, *Nimbostratus*, *Stratocumulus*, *Stratus*, *Cumulus* e *Cumulonimbus*. Vários gêneros podem estar incluídos dentro de uma única **espécie**, como quando nuvens *Cirrocumulus*, *Altostratus* e *Stratocumulus* apresentam formação de lente, sendo uma espécie comum dos três chamada de *lenticularis*. Uma **variedade** é determinada de acordo com as características peculiares, podendo aparecer em vários gêneros, como por exemplo a *Stratus Undulatus* e a *Cirrostratus Undulatus* (VIANELLO e ALVES, 2006).

Por convenção, a altitude das nuvens foi dividida verticalmente em três camadas: superior, média e inferior, formando a classificação abaixo:

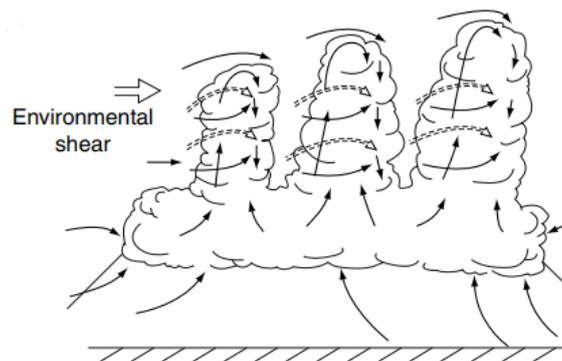
- a) Camada superior: *Cirrus*, *Cirrocumulus* e *Cirrostratus*;
- b) Camada média: *Altostratus*;
- c) Camada inferior: *Stratocumulus* e *Stratus*.

O Gênero de nuvens que produz relâmpagos e trovoadas são as cumulonimbus. Elas são nuvens de grande extensão vertical, sua base fica entre 300-3.000 m dependendo da umidade relativa próximo ao solo, e seu topo entre 9.000 e 18.000 m, dependendo da latitude e da altitude da tropopausa. Sua evolução local depende da presença de ar quente, umidade e um forte gradiente de temperatura vertical. Elas podem se deslocar de uma região para outra com velocidade de 100 km/h (VIANELLO; ALVES, 2006).

### 1.2.1. Ciclo de vida individual de cumulonimbus

Segundo BYERS (1951), há três fases de uma cumulonimbus: A fase de cumulus, a fase madura e a fase de dissipação. Durante da fase de cumulus, como na Figura 1.7, existem intensos movimentos ascendentes. A convergência de ar úmido na camada limite e seus movimentos ascendentes alimentam a formação de torres de cumulus.

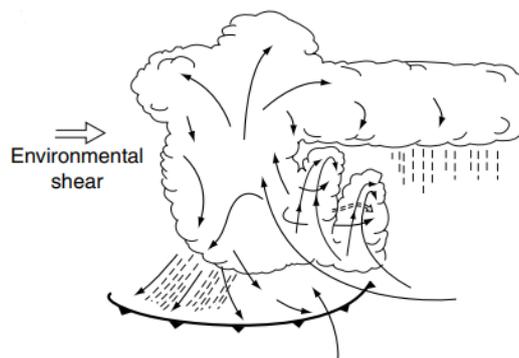
Figura 1.7: Estágio de cumulus.



Fonte: COTTON; BRYAN; VAN DEN HEEVER (2011).

Já na fase madura, há movimentos ascendentes, descendentes e precipitação. O resfriamento causado pela evaporação em baixos níveis forma uma “piscina” fria e uma frente com rajadas (mesofrente) que avança e levanta o ar quente e úmido. Além disso, a divergência dos movimentos ascendentes no topo da nuvem e perto da tropopausa, causam a formação da bigorna. Em alguns, casos pode estar presente uma cúpula de nuvens indicando que os movimentos ascendentes foram intensos suficientes para romper a tropopausa (overshooting), como na Figura 1.8.

Figura 1.8: Etapa madura de uma cumulonimbus.



Fonte: COTTON; BRYAN; VAN DEN HEEVER (2011).

Na fase de dissipação, há diminuição da precipitação convectiva e aumento da precipitação leve e estratiforme da nuvem da bigorna. Essa etapa é caracterizada por movimentos descendentes na região inferior, mas ainda restam bolsões de ar ascendente, principalmente no centro da nuvem. BYERS (1951) atribui a dissipação da tempestade ao fato de que a mesofrente está distante da tempestade originária, não podendo mais alimentar a tempestade.

### **1.2.2. Formação de precipitação**

Um dos principais componentes para a eletrificação da nuvem é a presença de hidrometeoros. Para ocorrer o processo de condensação é necessário a presença de vapor d'água em quantidade suficiente, bem como de núcleos de condensação. Esses núcleos são partículas constituídas de substâncias higroscópicas que possuem grande afinidade com o vapor (por exemplo: cloreto de sódio proveniente do mar). O vapor d'água se condensa e se deposita em volta dessas partículas formando a gotícula inicial. Esse núcleo de condensação só não é necessário quando o ar está saturado com umidade relativa (UR) de 105% ou mais (VIANELLO e ALVES, 2012).

Quando a parcela de ar se resfria, a umidade relativa aumenta, pois sua capacidade em reter vapor diminui. O processo de condensação se inicia antes de umidade relativa do ar atingir 100%, e a água se deposita em torno de núcleos de condensação maiores até o ar atingir os 100% de saturação. Em função de o vapor d'água se condensar preferivelmente em torno dos núcleos maiores, o número de gotículas na nuvem acaba sendo inferior ao número de núcleos de condensação.

Segundo VIANELLO e ALVES (2012), os núcleos de condensação ativos são da ordem de  $1 \mu m$ . Com base nesse valor é possível estimar que em três horas o diâmetro da gotícula deveria chegar a 1 mm. Este processo de condensação é muito mais lento do que o tempo em que chuvas são observadas após a formação inicial da nuvem. Outras teorias para o processo de formação de gotículas, como o processo de “colisão-coalescência”, também contribuem para explicar a formação das nuvens.

VIANELLO e ALVES (2012) dizem que o processo de “colisão-coalescência” ocorre em função das gotículas se moverem no interior da nuvem com diferentes velocidades. Dentro da vida da gotícula acontecem as chamadas “capturas diretas” nas quais uma gota grande captura outras gotas menores, ou gotículas, pela dianteira.

Também acontecem as “capturas de retaguardas”, pois na retaguarda da gota maior há uma região de baixa resistência do ar possibilitando que gotículas se dirijam para colidirem por trás da gota maior. Em média, necessita-se de cerca de um milhão de gotículas para formar uma gota.

As gotículas permanecem líquidas até  $-12^{\circ}\text{C}$ . Apenas quando a temperatura chega em  $-29^{\circ}\text{C}$  começa um regime misto de água e gelo, para temperaturas menores que isso o gelo predomina na nuvem.

### **1.2.3. Observação de cumulonimbus**

Segundo FERREIRA (2006), as *cumulonimbus* aparecem como nuvens individuais muito espessas e altas nas imagens de satélite nos canais de vapor d'água, visível (VIS) e infravermelho (IR), apresentando muito brilho. Se os ventos em níveis superiores forem fracos, a nuvem aparece em forma globular. Quando essas nuvens apresentam um topo muito alto e, portanto, correntes ascendentes mais fortes nesta região, adquirem uma textura rugosa. Essas texturas são mais visíveis nas imagens VIS durante o dia.

Um das técnicas utilizadas para localizar regiões de convecção intensa é o realce da imagem IR com cores que representam a temperatura de brilho captada pelo satélite. Essa técnica é boa, pois muitas tempestades possuem topos frios, mas são envolvidas por camadas de diferentes temperaturas. Vale ressaltar que nem toda tempestade alcança a tropopausa, que varia com a latitude, sendo mais baixa em altas latitudes ( $\sim 10$  km) e mais alta na região equatorial ( $\sim 15$ - $20$  km). Além disso, os topos nos trópicos tendem ser mais frios. Como nas médias e altas latitudes a tropopausa é mais baixa, o topo da nuvem não atinge temperaturas de brilho tão baixas. Há variação da altura da tropopausa também em função das estações do ano, no verão a tropopausa é mais alta, logo os topos das nuvens são mais altos e frios.

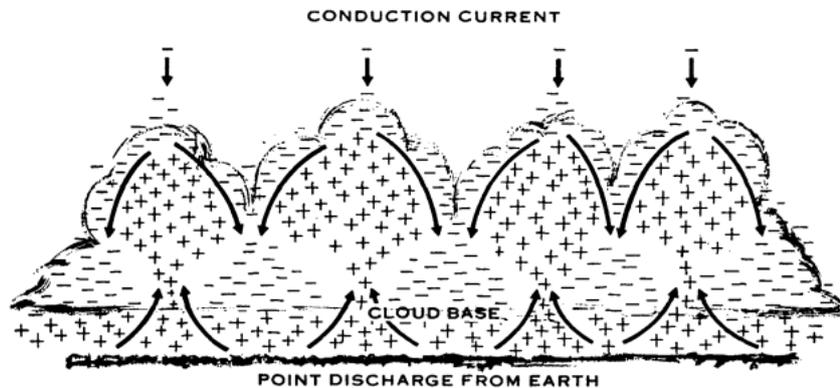
### **1.2.4. Eletrificação de cumulonimbus**

As teorias sobre eletrificação de nuvens ainda são pouco desenvolvidas. Atualmente as mais populares são a teoria de eletrificação por convecção e a teoria de eletrificação por indução (VONNEGUT, 1963).

A **teoria de eletrificação por convecção** nos diz que um campo elétrico de tempo bom estabelece uma concentração de íons positivos na troposfera inferior. No entanto, na formação de uma tempestade, as correntes ascendentes carregam as cargas positivas do ambiente da troposfera inferior até o interior da camada de nuvens.

Na troposfera superior há elétrons e íons negativos livres, que são produzidos na em alturas acima de 6 km por radiação cósmica e a radiação ionizante do sol. À medida que as torres de cumulus carregadas positivamente atingem regiões onde a mobilidade dos elétrons e íons negativos livres é maior, logo a condutividade do ar é maior, as cargas positivas atraem esses elétrons e íons livres negativos, fazendo com que o topo da nuvem fique carregado negativamente, como esquematizado na Figura 1.9.

Figura 1.9: Etapas de eletrificação da nuvem segunda a teoria convectiva.



Fonte: VONNEGUT (1963).

Nessa etapa, supostamente a nuvem seria neutralizada, mas isso não é observado, uma vez que as correntes descendentes levam os íons negativos para baixo na nuvem, enquanto os movimentos ascendentes continuam a carregá-la positivamente. Sendo assim, o carregamento da nuvem continua a crescer exponencialmente (VONNEGUT, 1963).

A **teoria de carregamento por indução** diz que quando um hidrometeoro colide e ricocheteia, o hidrometeoro maior se torna carregado negativamente e o menor carregado positivamente. Os pequenos hidrometeoros são arrastados para o topo da nuvem, enquanto os maiores são depositados na base da nuvem, com isso temos a polarização da nuvem (COTTON; BRYAN; VAN DEN HEEVER, 2011). Tal mecanismo de indução precisa de uma alta frequência de colisões entre as partículas,

sendo essa condição mais bem satisfeita por colisões gelo-gelo, mais do que colisões água-água e gelo-água (ILLINGWORTH; LATHAM, 1977).

Há ainda o **efeito da temperatura de inversão**. Se a interação entre o cristal de gelo e o granizo for em altitudes em que a temperatura é inferior a temperatura de inversão, o cristal de gelo, que é mais leve, irá subir com carga positiva e o granizo, que é mais pesado, irá descer com carga negativa. Se a interação ocorrer em altitudes em que a temperatura é superior a temperatura de inversão, o cristal de gelo irá subir com carga negativa e o granizo irá descer com carga positiva. O valor da temperatura de inversão está em torno de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (RODRIGUES; E. M. 2019).

### **1.2.5. Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs)**

Quando várias cumulonimbus se juntam em uma tempestade maior, elas são denominadas de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs). Os SCMs dominantes no planeta são as linhas de instabilidade, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e os Vórtices Convectivos de Mesoescala (VCMs).

As linhas de instabilidade são identificáveis por uma linha de células convectivas vigorosas de cem a várias centenas de quilômetros. Já os CCMs foram definidos por MADDOX (1980) como sendo um aglomerado de cumulonimbus quase circular, a partir de critérios baseados em imagens IR de satélite, como a área mínima de  $100.000\text{ km}^2$  para cobertura geral da nuvem, definida por um limiar de temperatura de brilho  $T \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a área mínima de  $50.000\text{ km}^2$  para a cobertura do interior convectivo, definida por um limiar de  $T \leq 52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , excentricidade  $\geq 0.7$  e duração mínima de 6 h de ambas as áreas.

MACHADO et al. (1998) estudaram os Sistemas Convectivos (SCs) em todo o globo, com observações dos sistemas por imagem IR de satélite de maneira semiautomática. Eles chegam a concluir que tempo médio de vida de um SC é cerca de 10 horas, mas sistemas na América do Sul podem durar em média ligeiramente mais, cerca de duas horas a mais, segundo VELASCO e FRITSCH (1987). As imagens IR de satélite são bastante utilizadas para o estudo de tempestades, pois apresentam grande alcance espacial, além de ser de fácil acesso em comparação aos dados de radar.

Pela diferença de características dos sistemas convectivos ao redor do globo, os limiares de temperatura de brilho utilizados para delimitar as regiões da nuvem

necessitam de uma análise detalhada, variando caso a caso, e não podem ser estabelecidos de forma absoluta. O limiar mais alto encontrado na literatura para definir a cobertura geral das nuvens do sistema é  $T \leq -28$  °C, pois a maioria das nuvens de convecção profunda fica no nível de 450 mb, que corresponde a uma altura troposférica de 6-9 km em médias latitudes (MACHADO et al, 1998).

VELASCO e FRITSCH (1987) estudaram SCMs, na América do Sul, em duas estações quentes, utilizando um limiar de temperatura  $T \leq -40$  °C, para definir a cobertura geral dos sistemas, e  $T \leq -63$  °C para definir a região convectiva. SÃO SABBAS et al. (2010) já utilizou  $T \leq -54$  °C, para região convectiva, e  $T \leq -34$  °C para a cobertura geral, no estudo de um sistema argentino. AZAMBUJA (2013) se baseou na metodologia de previsão de SCMs de VILA et al. (2008), considerando limiares de  $T \leq -38$  °C e  $T \leq -63$  °C para a cobertura geral e região convectiva, respectivamente.

#### **1.2.6. As tempestades geradoras de ELTs**

A literatura é escassa quanto aos trabalhos que buscam entender os sistemas convectivos e sua relação com a produção de ELTs, mas já houve alguns avanços. LYONS (1996) definiu que a região de produção dos Sprites fica na parte estratiforme do sistema durante a etapa de amadurecimento tardio da tempestade, quando grandes regiões estratiformes são formadas. LYONS et al. (2003) reafirma o papel importante da região estratiforme na produção de Sprites, e a maioria dos NS+, tipo de relâmpago que gera sprites, se origina na região estratiforme. No entanto, LYONS et al. (2003) sugere que não é o número absoluto de NS+ que está relacionado com a produção de Sprites, mas sim o número de NS+ com certas características específicas ainda não totalmente estabelecidas.

SÃO SABBAS e SENTMAN (2003) demonstraram que os NS+ geradores de Sprites estão em regiões mais quentes que os NS+ não geradores de Sprites. Eles notaram também que a produção máxima de Sprites aconteceu quando a cobertura máxima de nuvens da região mais fria ( $T \leq 52$  °C) foi atingida. No entanto, sugeriram que os NS- poderiam apresentar uma influência maior na produção de Sprites do que o relatado na literatura.

YANG et al. (2013) compararam duas tempestades produtoras de Sprites com uma tempestade que eles consideraram não produtora. Eles voltam a reforçar a ideia de

que os NS+ produtores de Sprites estão localizados na região estratiforme. Além disso, sugeriram que a corrente de pico média de NS+ em tempestades produtoras eram maiores do que as que não produziram sprites. Também notaram que as nuvens geradoras tiveram uma intensa convecção que foi capaz de gerar regiões estratiformes mais carregadas.

## **2 OBJETIVOS**

As metas principais deste Projeto de Iniciação Científica eram aprender o método de investigação científica, seus procedimentos para análise científica de dados, e aprender conhecimentos básicos disponíveis na literatura sobre FADAS, bem como sobre as tempestades que as produzem. Desse modo, o objetivo científico estabelecido foi entender como são gerados os Eventos Luminosos Transientes (ELTs), estudando o ciclo de vida de tempestade, que são suas fontes geradoras.

## **3 METODOLOGIA**

Para atingir as metas e objetivos propostos, no início da bolsa foi realizada uma revisão bibliográfica geral sobre FADAS, e uma extensa revisão bibliográfica sobre ELTs, nuvens de tempestade, Sistemas Convectivos de Mesoescala. Depois, foram selecionadas as três tempestades que produziram ELTs observados pela Rede Colaborativa LEONA nas noites 13-14/12/2018, 28-29/10/2019 e 01-02/11/2019, e foram estudados:

- Quais tipos de ELTs foram gerados;
- Que tipos de sistemas geraram os ELTs observados;
- Os tipos de descargas elétricas que os geraram;
- Quais etapas do ciclo de vida apresentavam produção de ELTs.

O estudo dos ELTs envolveu assistir e analisar os vídeos gravados com as câmeras da Rede LEONA durante as campanhas. Os ELTs foram identificados visualmente e depois pequenos vídeos de 2-3 segundos com esses eventos foram recortados. A morfologia dos eventos, ou seja, que tipo de ELT foi gravado, também foi identificada visualmente. Os vídeos são gravados a uma taxa de 30 quadros por segundo (do inglês, 30 “frames per second”, ou 30 fps), portanto um quadro tem uma duração de ~33 ms. Cada quadro possui dois campos (do inglês “fields”) entrelaçados constituídos

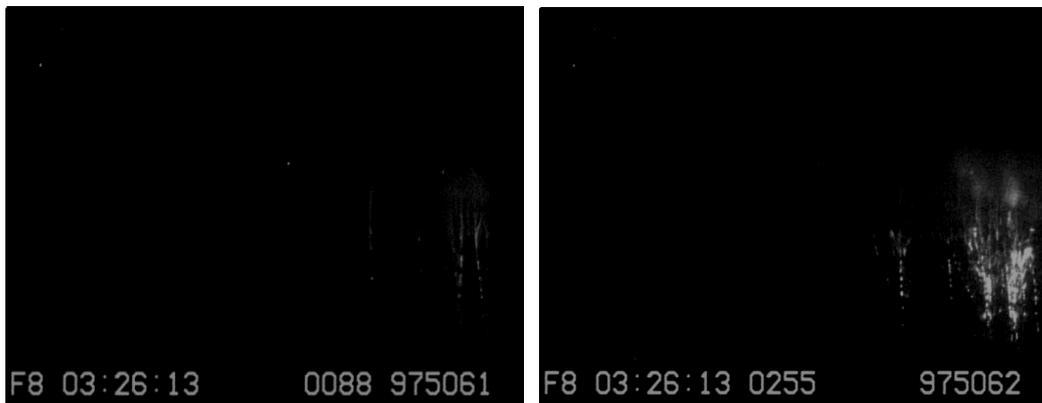
por grupos de linhas pares e ímpares, que são gravadas em instantes diferentes, portanto com uma duração de ~16,7 ms. A Figura 3.3 mostra o exemplo de um quadro. Os campos de cada quadro foram desentrelaçados, como na Figura 3.2, utilizando-se o software Adobe Premier, para obter-se a maior precisão temporal possível para cada evento, conforme fornecida pelo carimbo temporal GPS.

Figura 3.1: Imagem de um quadro com seus campos ainda entrelaçados, mostrando um grupo de sprites gravados na noite 29/10/2019 às 03:29:13 UT. O terceiro e quarto números são os milissegundos do primeiro e segundo campos.



Fonte: Rede LEONA/INPE.

Figura 3.2: Primeiro e segundo campos do quadro da Figura anterior, agora já desentrelaçados. Além da definição do horário preciso de cada campo, é possível notar que o sprite mais à esquerda torna-se visível com este processamento do dado, bem com a evolução tempo-espacial dos sprites.

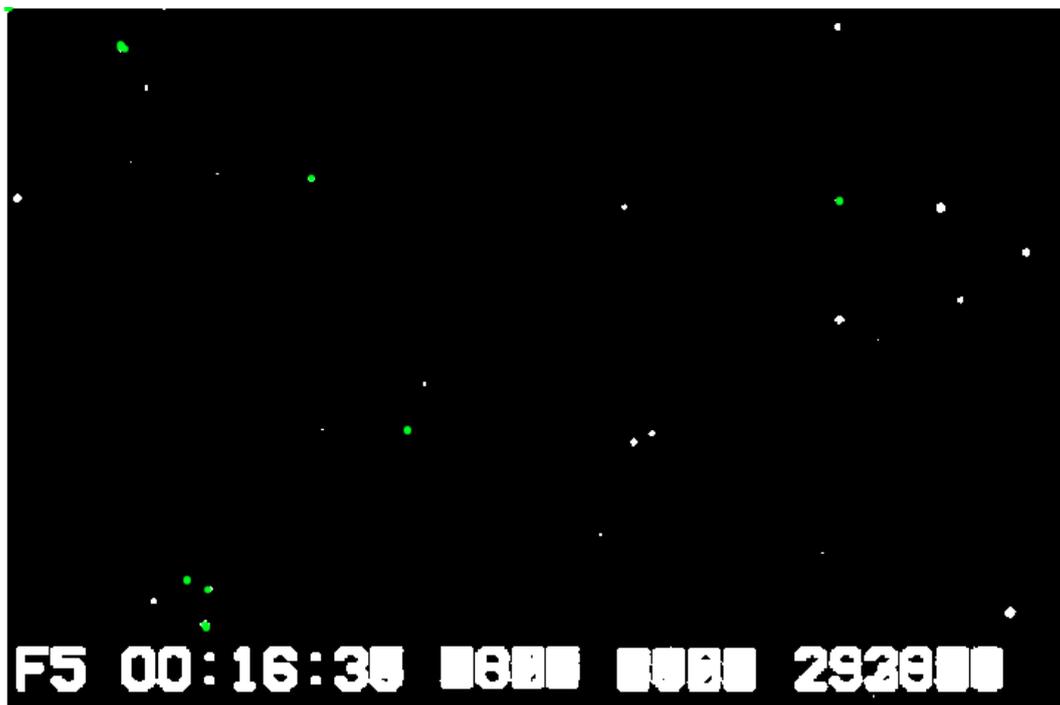


Fonte: própria.

Para localizar os eventos foi necessário utilizado o software StarStereo, desenvolvido por STENBAEK-NIELSEN et al. (1984) da Universidade do Alaska Fairbanks (UAF), e fornecido pela orientadora. Ele calcula o campo de estrelas correspondente ao campo inserido no software utilizando um catálogo estelar e dados da

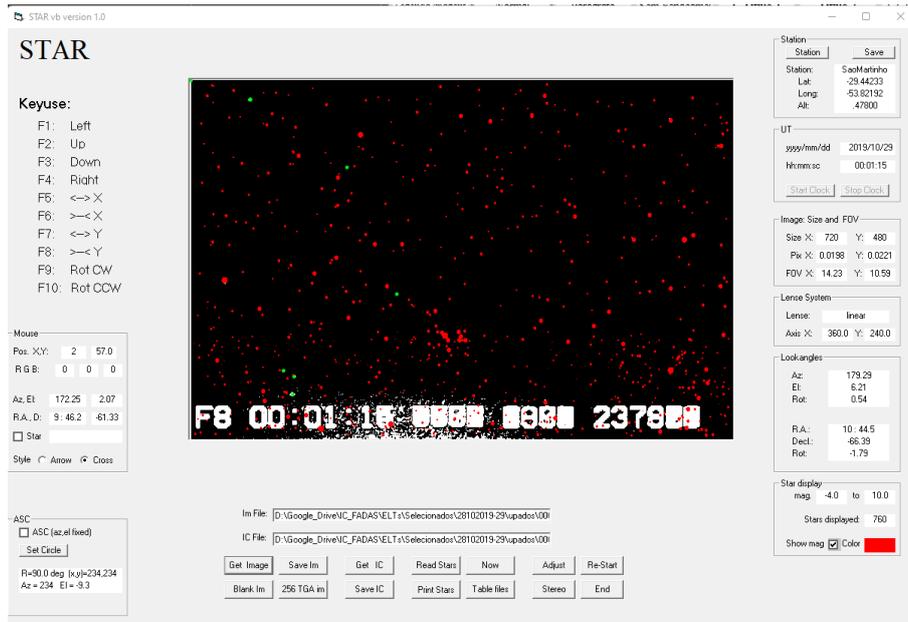
observação fornecidos pelo usuário: (a) o azimute e elevação da câmera, (b) seu campo de visada vertical e horizontal, calculado com base na CCD e lente da câmera que fez a observação, (c) e a geolocalização (latitude, longitude e altitude) da estação de observação. Para facilitar a identificação das estrelas presentes na imagem contendo um ELT, foram somados numa única imagem todos os campos desentrelaçados imediatamente anteriores ao campo do evento sem que o movimento das estrelas fosse perceptível na imagem final. Um exemplo da imagem criada, chamada de mapa estelar, é apresentado na Figura 3.3. A Figura 3.4 mostra ajuste de sobreposição do mapa estelar calculado pelo StarStereo na imagem no mapa estelar observado.

Figura 3.3: Mapa estelar ressaltando as estrelas do dia 29/10/2019 às 00:16:35 UTC. Os pontos verdes são pixels da CCD que estavam danificados.



Fonte: própria.

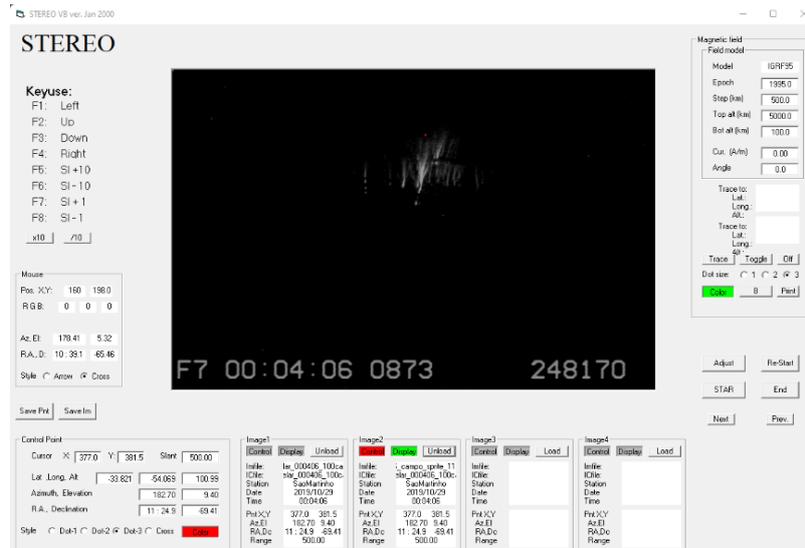
Figura 3.4: Seção Star, do software StarStereo, utilizada nos ajustes do campo de estrelas calculado sobrepondo-o ao mapa estelar. Os pontos vermelhos são as estrelas teóricas já mapeadas.



Fonte: própria.

Como não foi possível realizar observações de duas estações diferentes, não foi possível usar triangulação para obter a latitude, longitude e altitude exatas do ELTs. Dessa forma, a latitude e longitude foram estimadas fornecendo-se a altitude do topo dos eventos. A altitude foi escolhida por ser o parâmetro que varia menos e há medidas trianguladas precisas disponíveis na literatura, assumiu-se 88 km para o topo dos sprites, utilizando-se as medidas trianguladas por SENTMAN et al. (1995), e 100 km para o centro dos elves, seguindo-se a triangulação de WESCOTT et al., 2001. A Figura 3.5 mostra a seção Stereo do programa, utilizada para estimar a latitude e longitude e triangular a geolocalização dos eventos quando dados de duas ou mais estações estão disponíveis.

Figura 3.5: Seção Stereo, do software StarStereo, utilizada para estimar ou triangular geolocalização de eventos.



Fonte: própria.

Os dados da noite de 2018 foram coletados durante a campanha de observação de ELTs parte do projeto internacional RELAMPAGO na Argentina, e os dados de 2019 durante a campanha específica da LEONA nesse ano. Foram estudados os ELTs capturados pela LEONA, a temperatura de brilho IR do topo das nuvens e dados de relâmpago, isto é, sua latitude, longitude, pico de corrente e polaridade das descargas de retorno. Toda a análise dos dados foi realizada utilizando a plataforma MATLAB.

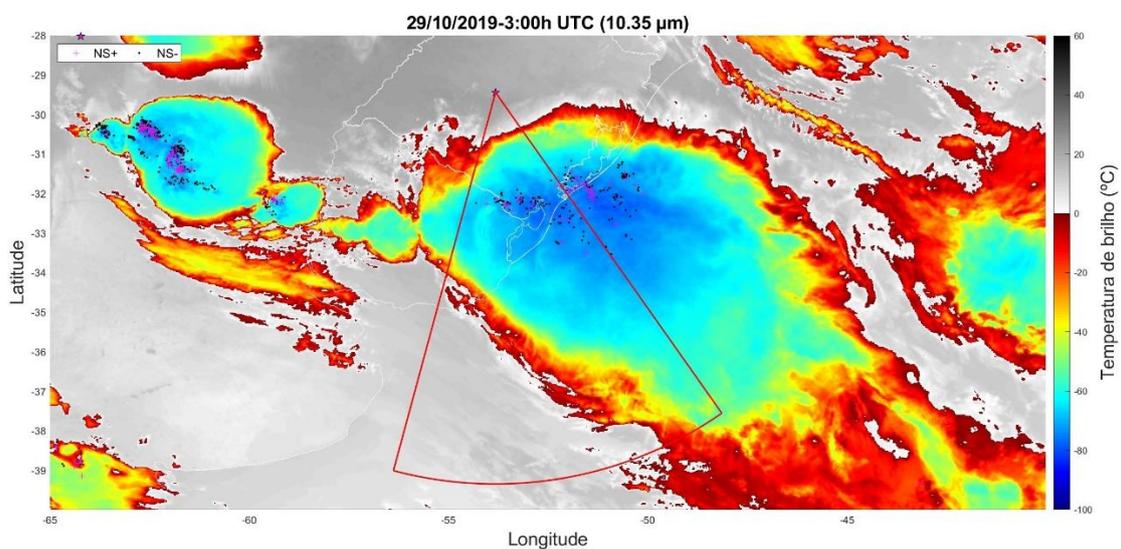
A Rede LEONA é uma rede com 8 estações para observação de ELTs espalhadas em pontos estratégicos pela América do Sul, no momento abrangendo o sul e sudeste do Brasil, Paraguai, Uruguai e noroeste da Argentina, e uma estação para observação de ALETs com um detetor de nêutrons. Cada estação de observação de ELTs conta com câmeras WATEC de alta sensibilidade luminosa, cujas imagens recebem um carimbo temporal no instante em que são geradas com dados de antenas GPS com uma acurácia temporal de 1  $\mu$ s.

Para compreender o processo de geração e eletrificação dos sistemas convectivos geradores desses ELTs, seu ciclo de vida e características que possam ser relevantes para a sua geração, o primeiro passo da metodologia foi identificar quais sistemas convectivos presentes nessas noites geraram os ELTs observados pela Rede LEONA. Para isso foram utilizadas as informações de apontamento das câmeras da

LEONA, ou seja, o azimute e elevação, registradas pelos pesquisadores e alunos que realizaram as observações. O passo seguinte foi definir o horário de início e o fim da tempestade, assim como sua localização. Isso foi feito analisando-se a temperatura do topo das nuvens dos sistemas convectivos geradores de ELT registradas pelo satélite GOES-16 no infravermelho. Figuras com mapas de temperatura de brilho foram plotadas e vídeos foram criados com essas figuras para melhor entendimento da evolução espacial e temporal da tempestade. Inicialmente foram utilizados os dados com projeção geoestacionária e posteriormente as matrizes de geolocalização e de temperatura IR foram convertidas para a projeção retangular.

O horário de início da tempestade foi definido como o horário em que a nuvem convectiva que deu origem ao sistema apareceu pela primeira vez, e o horário em que o último núcleo convectivo se dissipou foi considerado como o horário final. Uma vez definidos os horários de início e fim das tempestades e a região geográfica na qual elas ocorreram, as localizações dos relâmpagos nuvem-solo positivos e negativos foram sobrepostas aos mapas IR para identificar em qual parte dos sistemas eles ocorreram. Como as imagens de satélite em 2018 e 2019 foram fornecidas a cada 15 e 10 minutos, respectivamente, escolheu-se sobrepor a localização de relâmpagos registrados 7,5 e 5 minutos antes e depois do horário das imagens, respectivamente. A Figura 3.6 mostra um exemplo de mapa de temperatura de brilho plotado.

Figura 3.6: Mapa de temperatura de brilho IR, do canal 13 ( $10,35 \mu\text{m}$ ), do GOES-16 para o dia 29/10/2019 às 03:00 UTC. Em magenta estão representados os relâmpagos NS+, e em preto os relâmpagos NS-. As estrelas magentas são as estações de observação da Rede LEONA que registraram os ELTs, e o cone vermelho é o campo de visada das câmeras.



Em seguida foram definidos limiares de temperatura de brilho para calcular a área da cobertura geral da tempestade e da região convectiva. A região de cobertura geral foi definida como tendo temperatura de brilho  $\leq -40^{\circ}\text{C}$  e para a região convectiva foi definido a temperatura de brilho  $\leq -60^{\circ}\text{C}$ . Os limiares foram escolhidos com base na revisão dos artigos apresentados na introdução, adequados às características das três tempestades escolhidas. Posteriormente foi desenvolvido um algoritmo em MatLab para calcular a área da tempestade em cada mapa IR utilizando-se esses limiares. O software se baseou na lógica de algoritmo de “floodfill” utilizado para preenchimento de áreas delimitadas sem o “vazamento” da contagem para outras regiões. Também foram desenvolvidos softwares para calcular a quantidade de relâmpagos NS+ e NS- gerados pelos sistemas convectivos, e para identificar a temperatura do topo da nuvem no local onde ocorreu o relâmpago. Em função da conversão da projeção satélite para a projeção retangular foi utilizada a temperatura média dos quatro pixels imediatamente ao redor do pixel mais próximo da latitude e longitude da descarga elétrica. O mesmo procedimento foi utilizado para estimar a temperatura do topo das nuvens onde os ELTs ocorreram.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Tempestade de 13-14/12/2018**

Na noite de 13-14/12/2018, na região entre o Uruguai, Rio Grande do Sul (Brasil) e Argentina, cerca de 438 ELTs foram observados pela estação da Rede LEONA em Anillaco, Argentina. Dentre esses 438 ELTs, 409 eram Sprites e 29 Halos. A Figura 4.1 mostra um exemplo de um grupo de sprites observados nesta noite. Os eventos foram observados entre 03:00 UTC e 07:15 UTC do dia 14/12/2018. A câmera da estação de Anillaco permaneceu gravando das 01:30 UTC até 07:30 UTC.

Figura 4.1: Grupo de sprites observado na madrugada do dia 14/12/2018. Os sprites duraram dois campos, ou seja, ~33 ms.

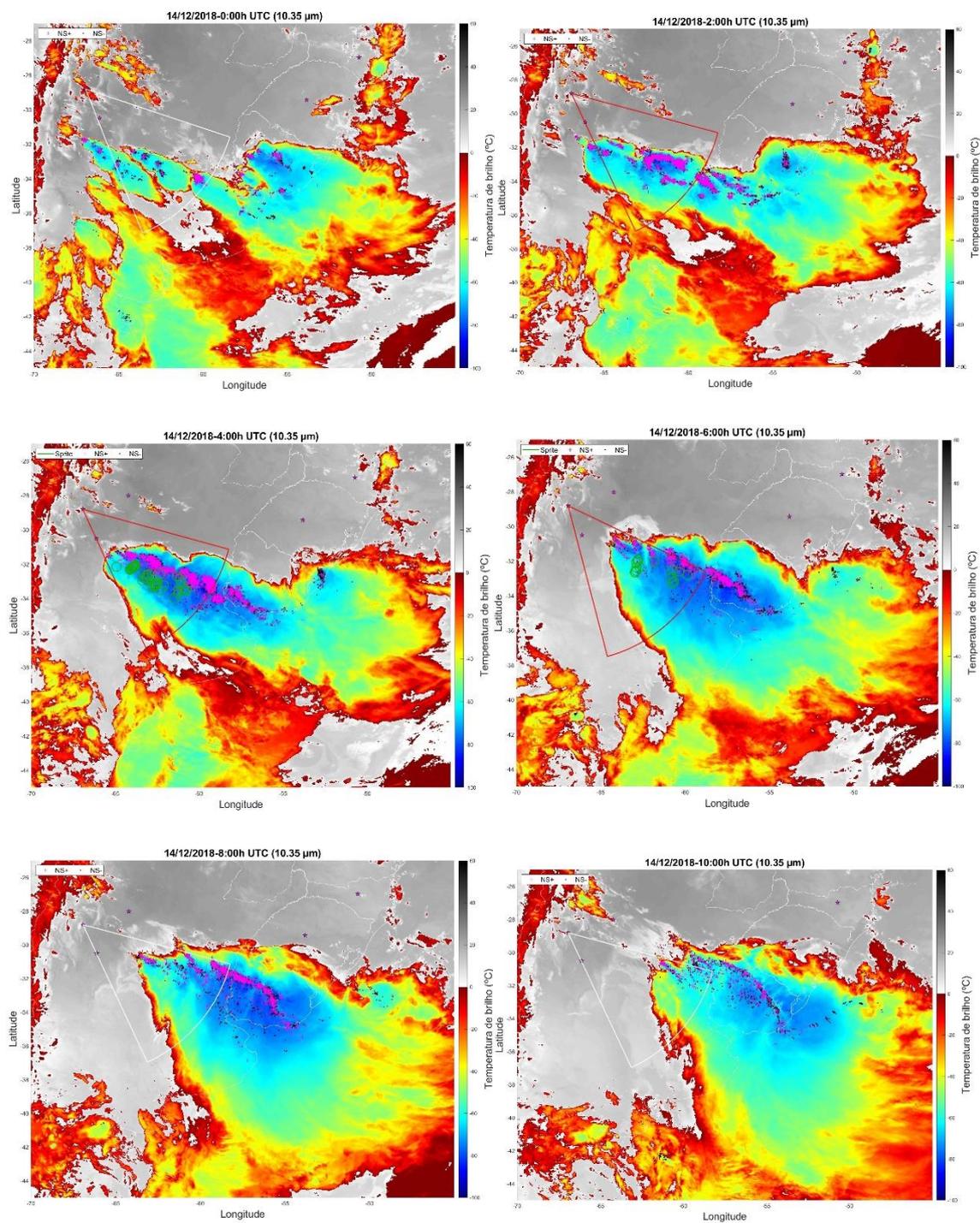


Fonte: própria.

Todos os ELTs foram gerados por um único sistema convectivo que teve início às 21:30 UTC do dia 13/12/2018 e terminou as 19:15 UTC do dia 14/12/2018. Na Figura 4.2 estão mostradas algumas etapas do desenvolvimento espacial e temporal do sistema. Nota-se que os ELTs ocorreram predominantemente próximos à região convectiva, ou seja, na região estratiforme.

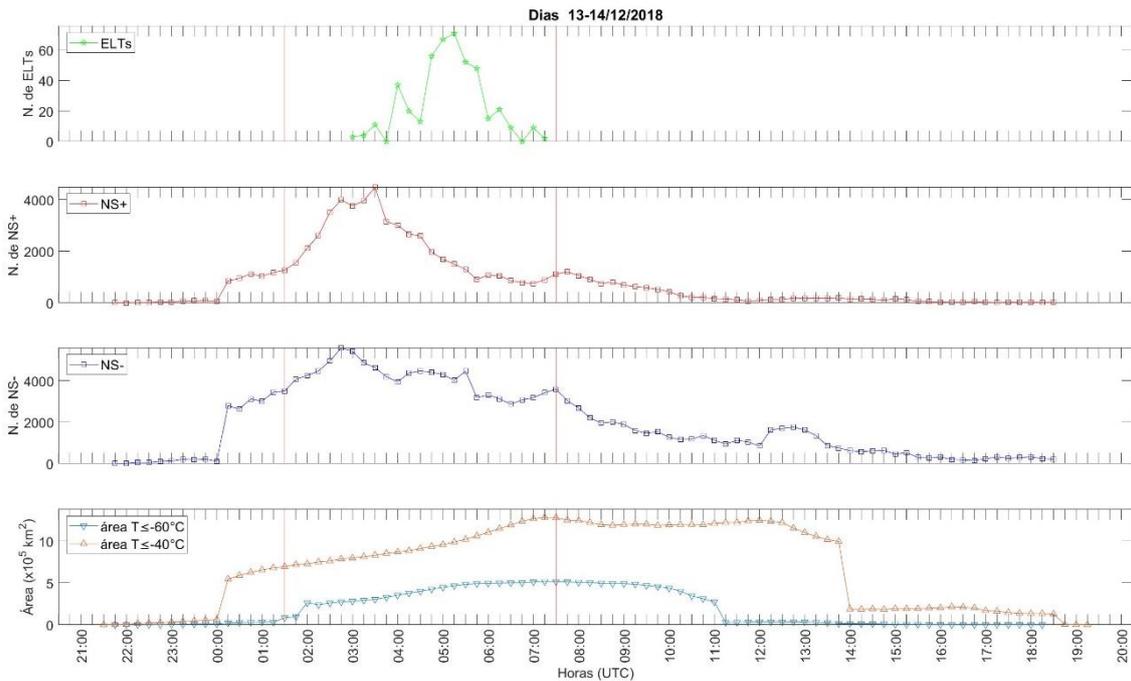
A Figura 4.3 mostra a evolução temporal do número de ELTs observados, descargas nuvem-solo positivas (NS+) e negativas (NS-), e a evolução da área convectiva ( $T \leq -60$  °C) e da cobertura geral ( $T \leq -40$  °C) da tempestade. Nota-se que houve a junção de três sistemas convectivos em 00:00 UTC, originando a alta taxa de crescimento da região de cobertura geral nesse horário, como é possível verificar comparando-se as duas primeiras imagens da Figura 4.2. O sistema atingiu a maturidade, com o máximo da região convectiva, uma área de 501.029,00 km<sup>2</sup>, em 05:30 UTC a região convectiva começou se dissipar. Os eventos foram gerados predominantemente na etapa de amadurecimento tardio do sistema, quando a região convectiva começa a se dissipar após ter atingido a sua área máxima, o que aumenta a região estratiforme, principal fonte de sprites em função de seu carregamento positivo, e a cobertura geral do sistema.

Figura 4.2: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 13-14/12/2018 entre 00 UTC e 10 UTC de 14/12/2018. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35  $\mu\text{m}$  do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de  $\sim 30$  km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos.



Fonte: própria.

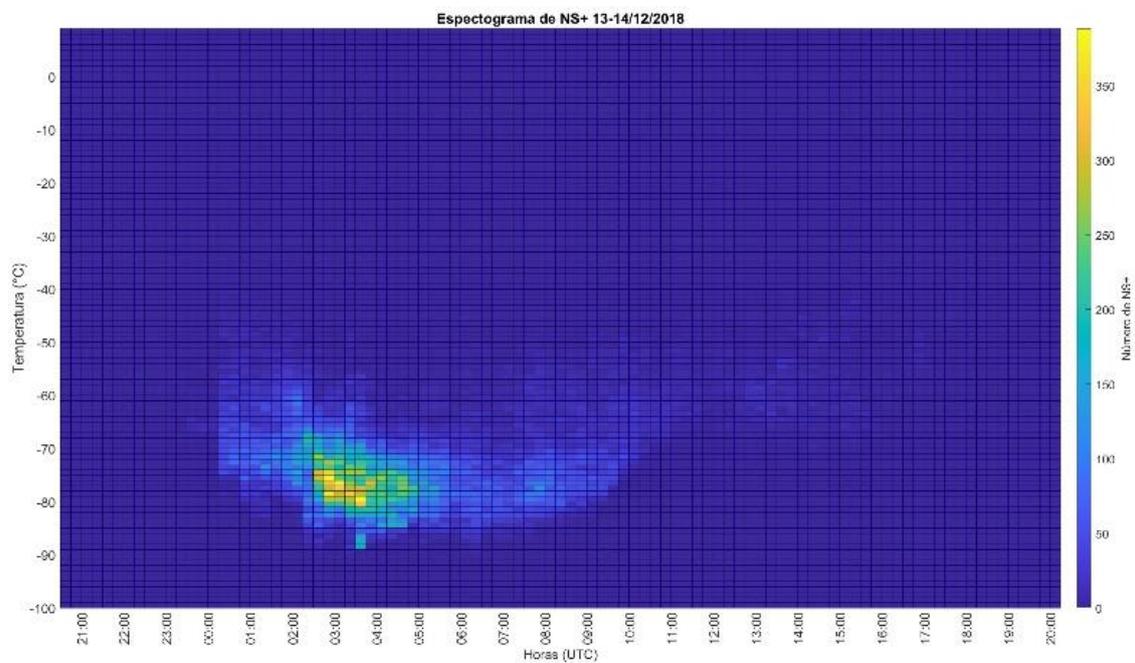
Figura 4.3: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40\text{ }^\circ\text{C}$ ) e convectiva ( $T \leq -60\text{ }^\circ\text{C}$ ) em 13-14/12/2018. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras.



Fonte: própria.

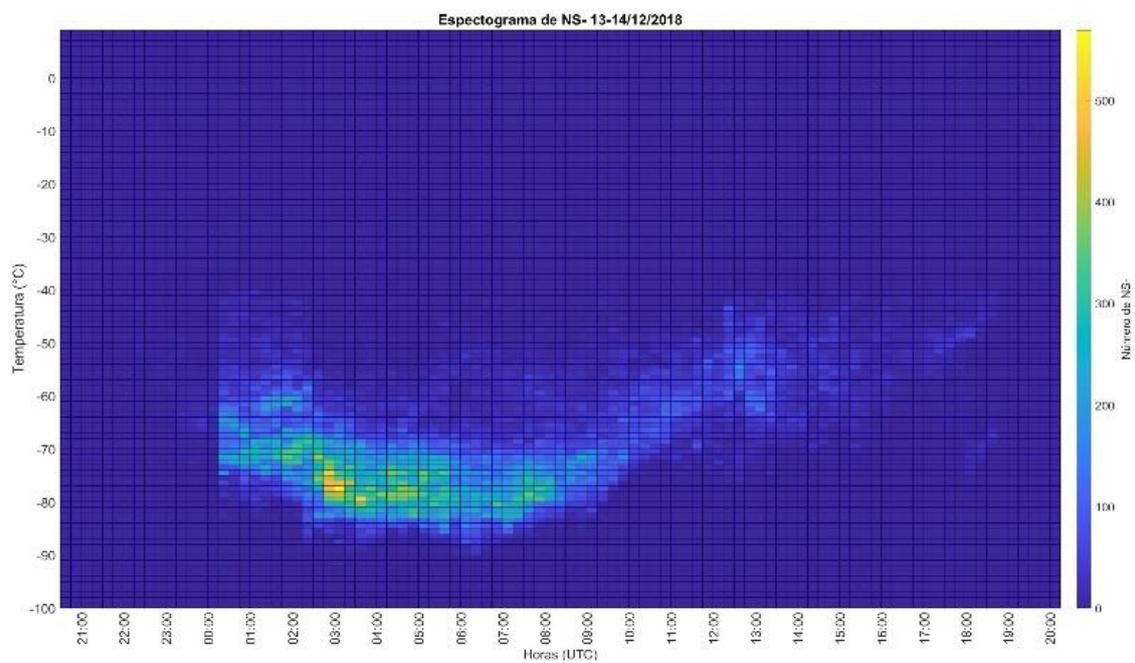
O período da produção de ELTs na etapa de amadurecimento tardio do SCM, e a sua localização predominante na região estratiforme demonstram uma influência significativa da região convectiva na eletrificação de todo o sistema. A Figura 4.3 também mostra que a taxa de NS- (268 NS-/min) foi maior que a taxa de NS+ (100 NS+/min) quando ocorreu o pico de produção de eventos (~5 ELTs/min). No início da tempestade tanto os relâmpagos NS+ e NS- ocorreram em regiões da nuvem com temperatura de brilho em torno de  $-70\text{ }^\circ\text{C}$ , no entanto, com a intensificação da atividade convectiva e o resfriamento de todo o sistema, as temperaturas de brilho das regiões geradoras das descargas elétricas diminuíram para  $-75\text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 4.4 e Figura 4.5), nesta fase de máxima convecção foi quando ocorreu o pico da atividade elétrica da nuvem com a máxima taxa de relâmpagos. Às 09:00 UTC a temperatura de brilho do topo das nuvens começou a crescer e a região convectiva começou a se dissipar.

Figura 4.4: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.



Fonte: própria.

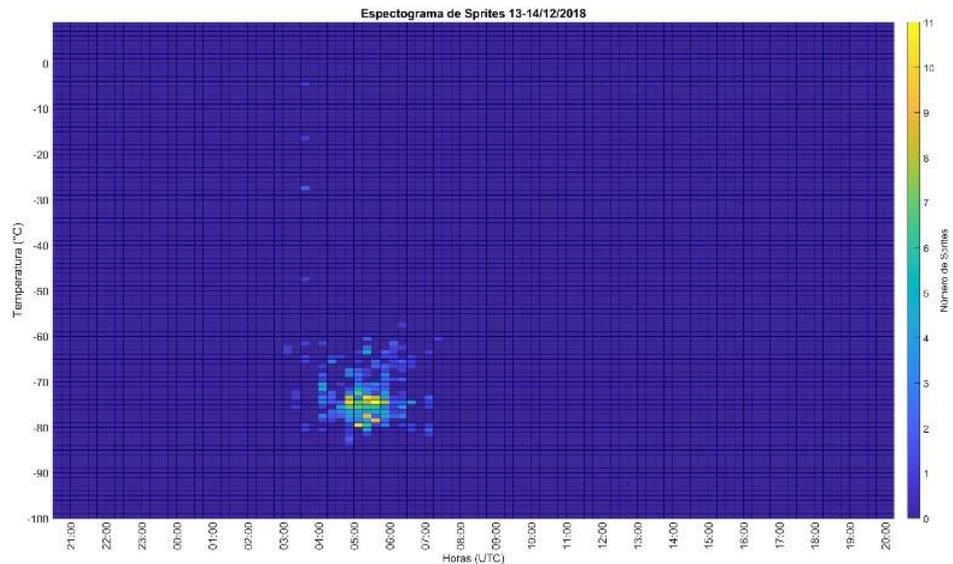
Figura 4.5: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.



Fonte: própria.

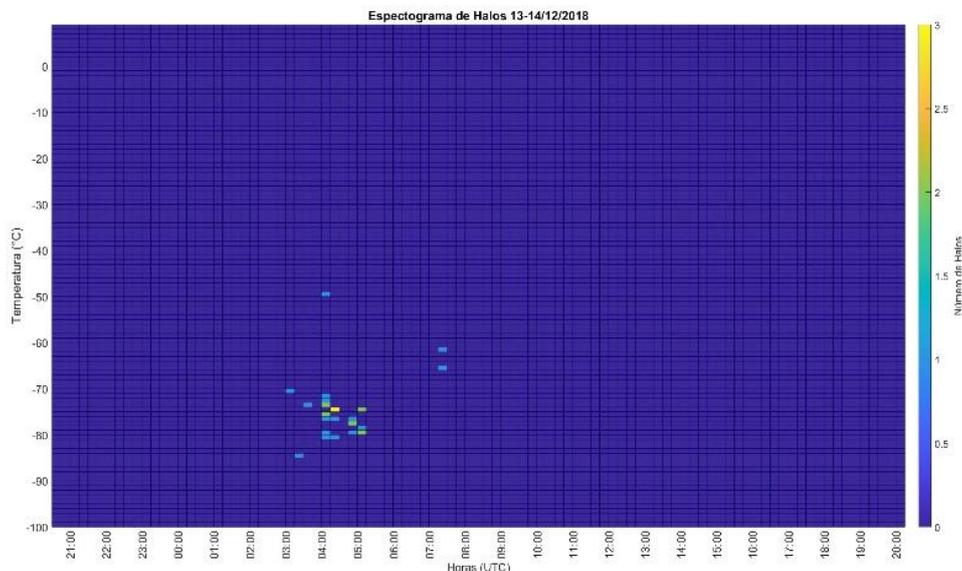
Comparando os espectrogramas das Figura 4.5 e Figura 4.6 é possível notar que os sprites ocorreram predominantemente nas regiões com temperatura de brilho em torno de  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$  e se originam quando as descargas elétricas apresentam a mesma temperatura de brilho ( $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Os halos apresentam o mesmo padrão de temperatura de brilho que os sprites e as descargas elétricas (Figura 4.7).

Figura 4.6: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.



Fonte: própria.

Figura 4.7: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de halos da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 13-14/12/2018.



Fonte: própria.

## 4.2. Tempestade de 28-29/10/2019

Na noite de 28-29/10/2019, na região entre o Uruguai, Rio Grande do Sul (Brasil) e Argentina, cerca de 461 ELTs foram observados pela estação da Rede LEONA em São Martinho da Serra, Rio Grande Sul, Brasil. Dentre esses 461 ELTs, 451 eram Sprites, 9 eram Elves e 1 era Halo. Os eventos foram observados entre 23:00 UTC e 04:10 UTC. A câmera da estação de São Martinho da Serra permaneceu gravando das 23:00 UTC até 05:20 UTC. A Figura 4.8 mostra um dos elves observados na campanha, acredita-se que as estrias que aparecem no elve sejam originárias de uma perturbação causada por uma onda de gravidade gerada pela oscilação da tropopausa em função do movimento convectivo da tempestade.

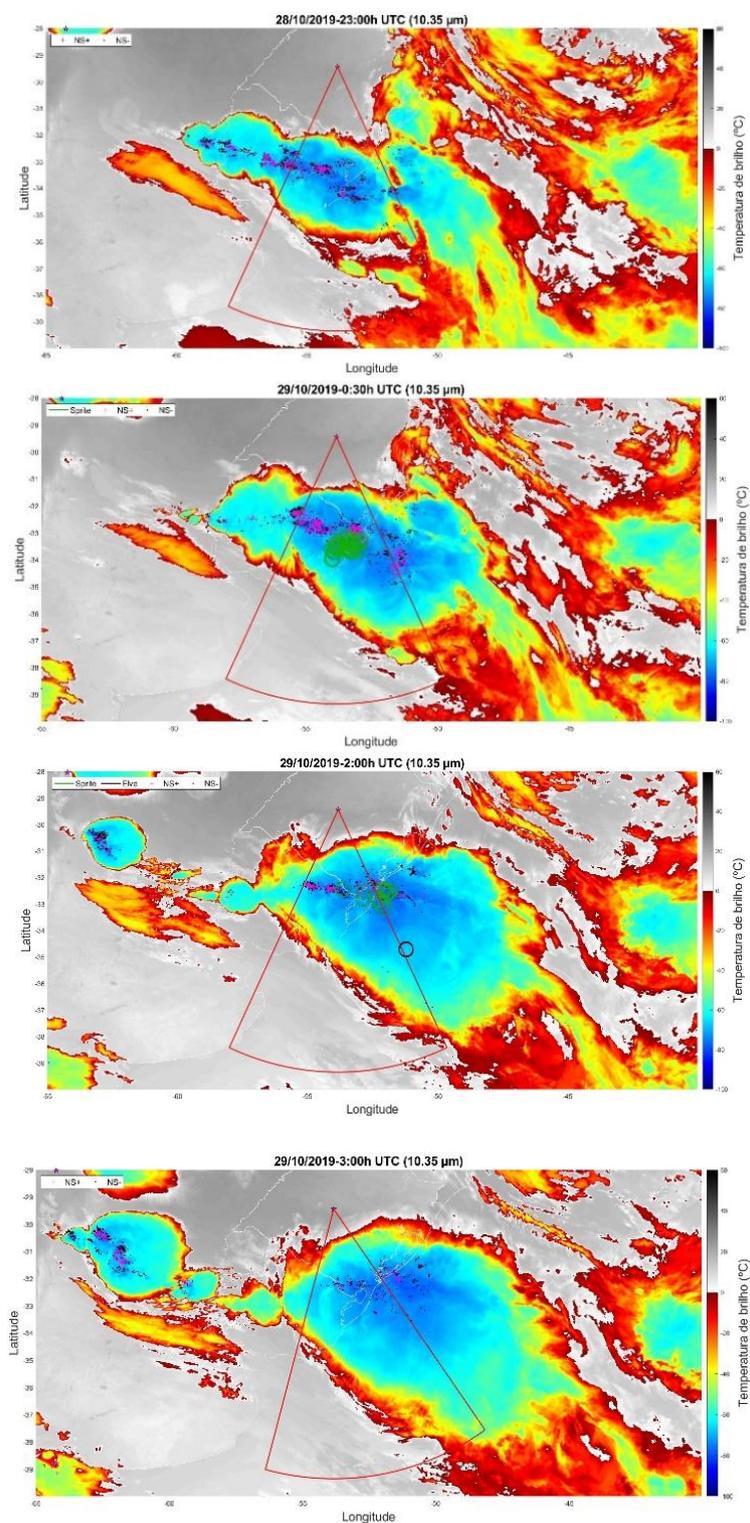
Figura 4.8: Elve estriado observado na madrugada de 29/10/2019 às 02:13:48 UTC, com a Estação da Rede LEONA localizada em São Martinho da Serra, RS.



Fonte: própria.

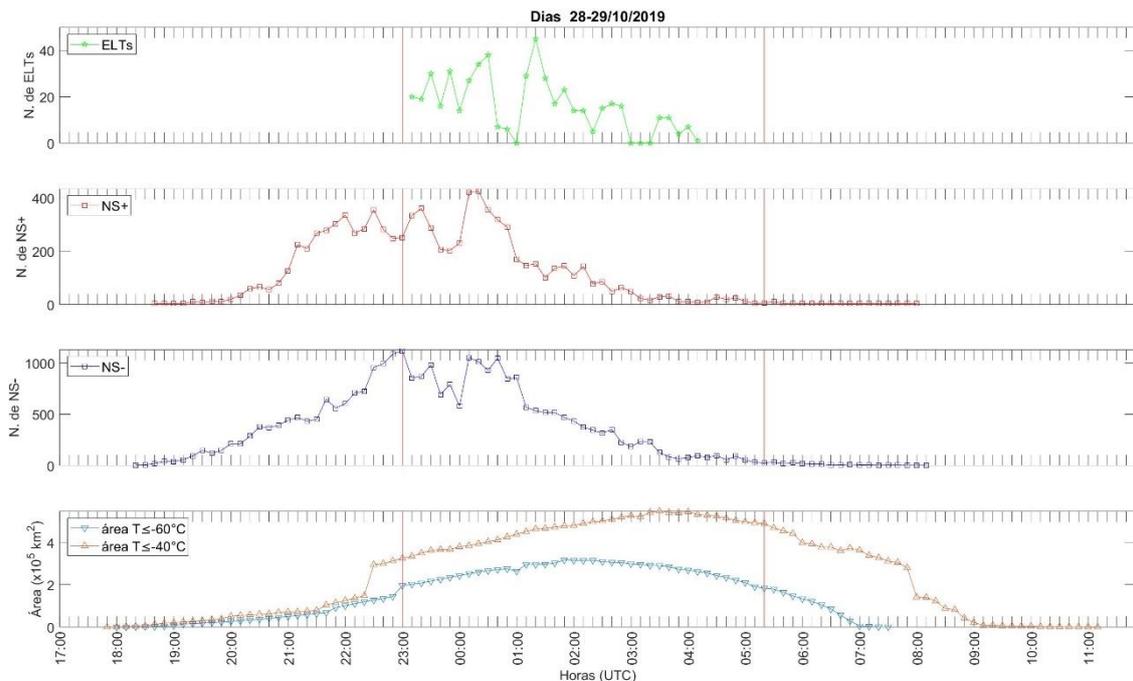
O sistema teve início às 17:45 UTC do dia 28/10/2019 e terminou as 11:10 UTC do dia 28/10/2019. Na Figura 4.9 estão mostradas algumas etapas do desenvolvimento espacial e temporal do sistema. Neste SCM os ELTs também ocorreram predominantemente na região estratiforme.

Figura 4.9: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 28-29/10/2019 entre 23 UTC e 03 UTC. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35  $\mu\text{m}$  do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de  $\sim 30$  km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos.



A Figura 4.10 mostra a evolução temporal do número de ELTs, NS+, NS- e da área do sistema. É possível notar que novamente os ELTs ocorreram durante etapa de madura do sistema. A região convectiva do sistema atingiu sua área máxima às 02:00 UTC (316.515,00 km<sup>2</sup>), iniciando o processo de dissipação que aumentou a região estratiforme. Analogamente, a taxa de NS-, ~69 NS-/min, era maior que a de NS+, 20 NS+/min, quando os ELTs foram produzidos.

Figura 4.10: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40$  °C) e convectiva ( $T \leq -60$  °C) em 28-29/10/2019. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras.

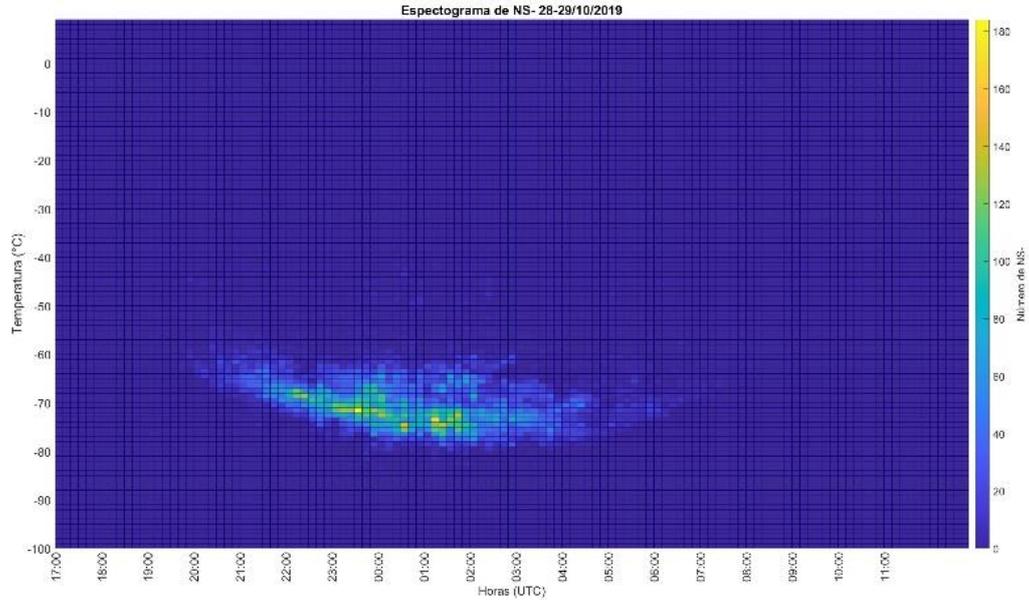


Fonte: própria.

Os espectrogramas da Figura 4.10 e Figura 4.12 mostram que as descargas elétricas tiveram o mesmo padrão encontrados na noite de 13-14/12/2018, elas se concentraram na região de temperatura -65 °C no início da noite, e de temperatura -75 °C no período da máxima atividade convectiva, sendo a mesma temperatura de brilho em que as descargas da noite 13-14/12/2018 foram encontradas. Nesta noite, 28-29/10/2019, a maioria dos Sprites também ocorreu em regiões com temperatura de brilho em torno de -75 °C, e durante etapa com maior atividade convectiva, 00:00 – 05:00 UTC (Figura 4.13). O espectrograma dos elves (Figura 4.14) mostra que os elves ocorreram numa região mais ampla sobre a tempestade, pois a faixa de temperatura de brilho variou de 0 °C até -70 °C. Nesta noite foi detectado apenas um Halo, na região

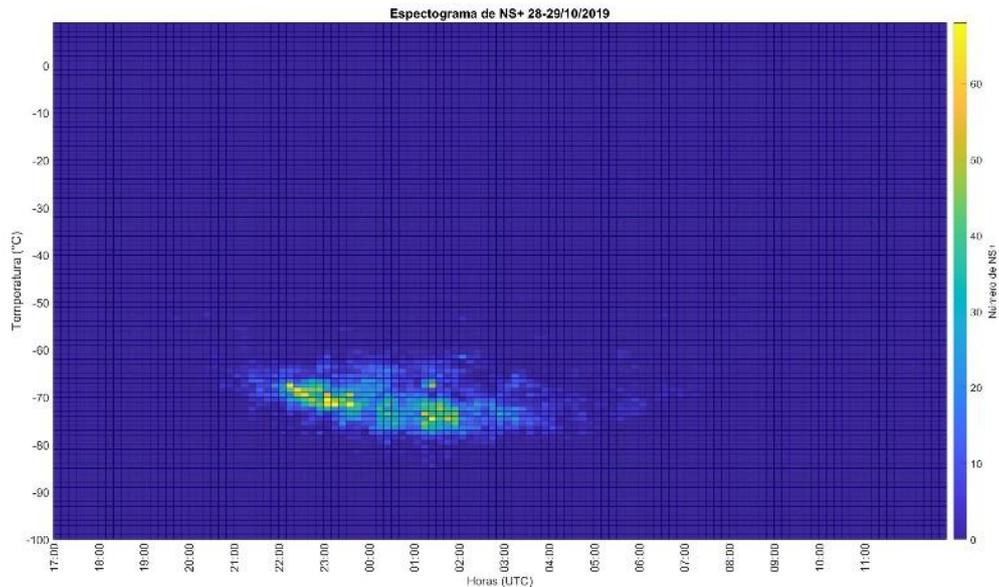
com temperatura de brilho média de  $-75$  °C, mantendo o padrão da temperatura de brilho das descargas elétricas e dos sprites.

Figura 4.11: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.



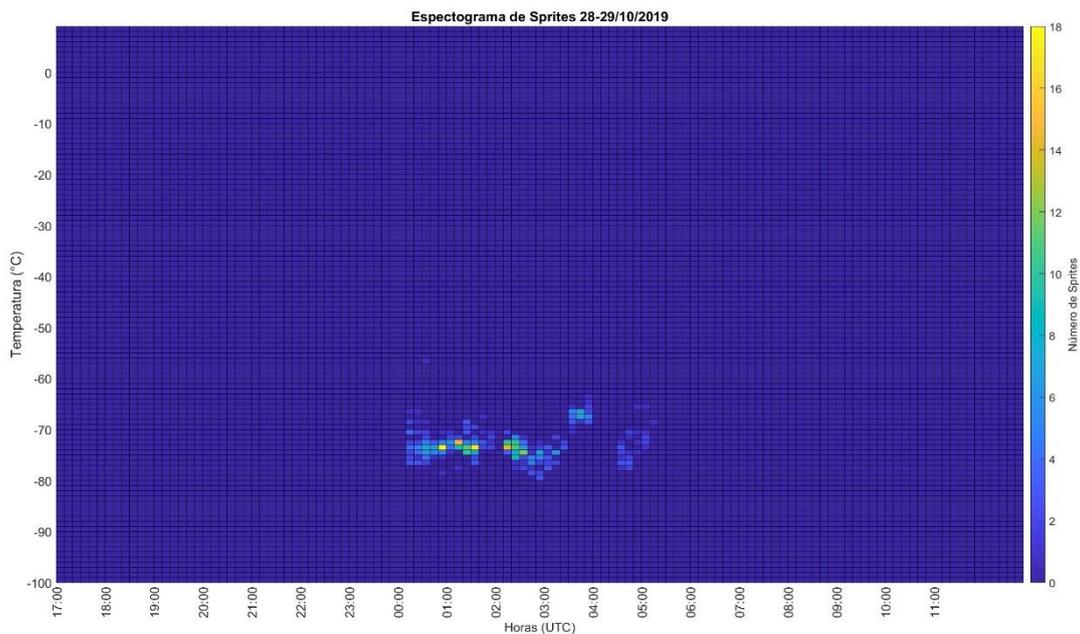
Fonte: própria.

Figura 4.12: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.



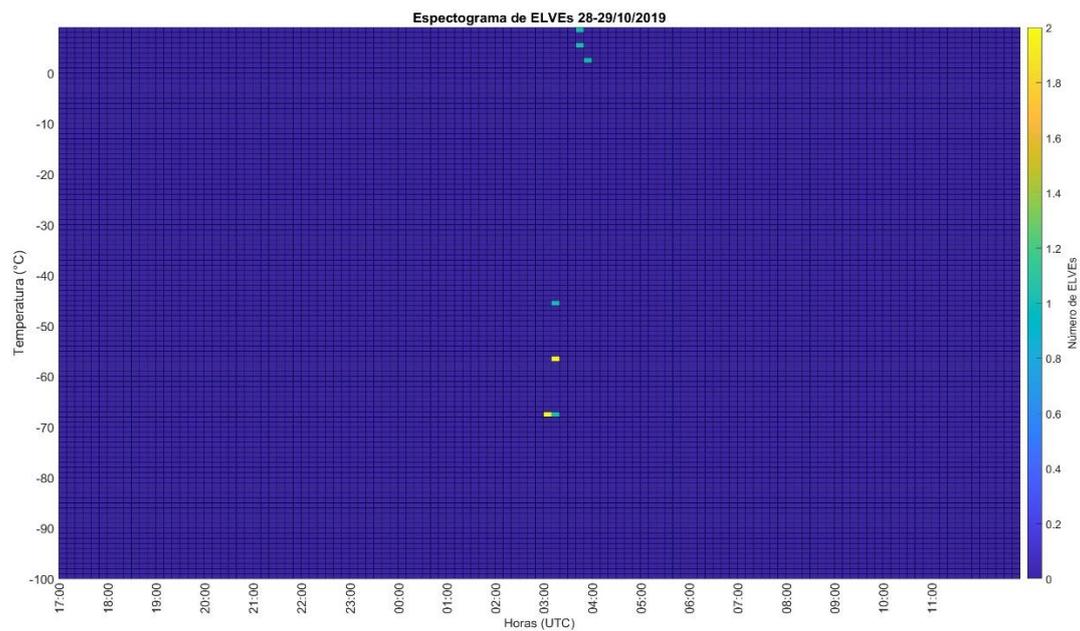
Fonte: própria.

Figura 4.13: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.



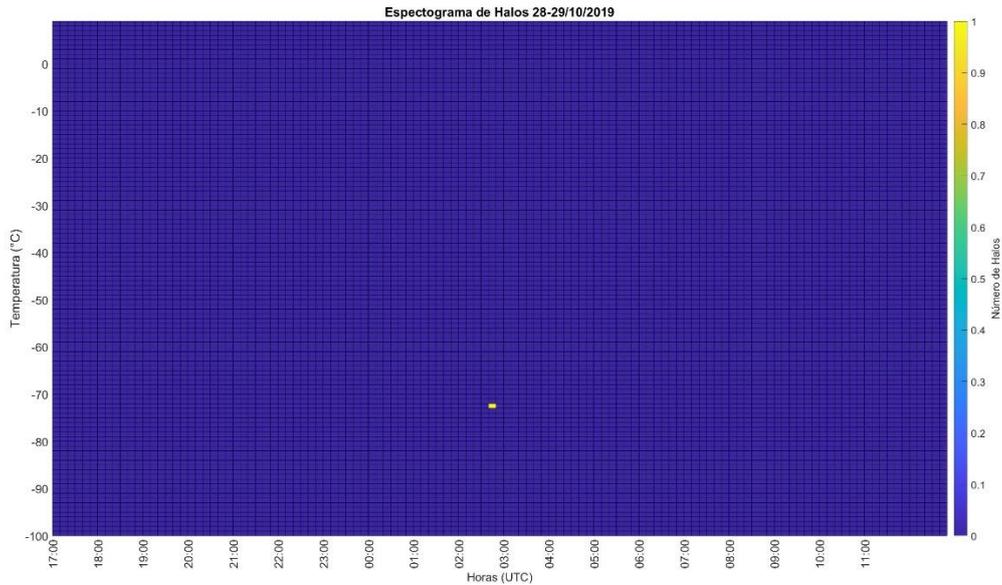
Fonte: própria.

Figura 4.14: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Elves da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.



Fonte: própria.

Figura 4.15: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de halos da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 28-29/10/2019.

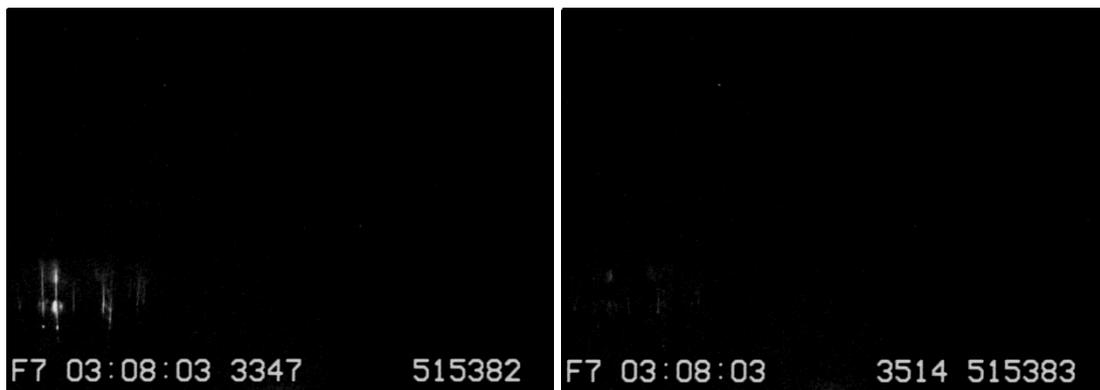


Fonte: própria.

### 4.3. Tempestade de 01-02/11/2019

Na noite do dia 01-02/11/2019, na região entre o Uruguai e Rio Grande do Sul (Brasil) foram observados pela estação de observação de São Martinho da Serra, Brasil, cerca de 32 ELTs, sendo todos sprites. A Figura 4.16 mostra um exemplo de um grupo de sprites observados na campanha. Os Eventos foram observados entre 03:30 UTC e 08:00 UTC do dia 29/10/2019. A câmera da estação de São Martinho permaneceu gravando das 01:30 UTC até 08:10 UTC.

Figura 4.16: Grupo de sprites colunas observados na madrugada do dia 02/11/2019. Os sprites duraram dois campos de 16,7 ms.

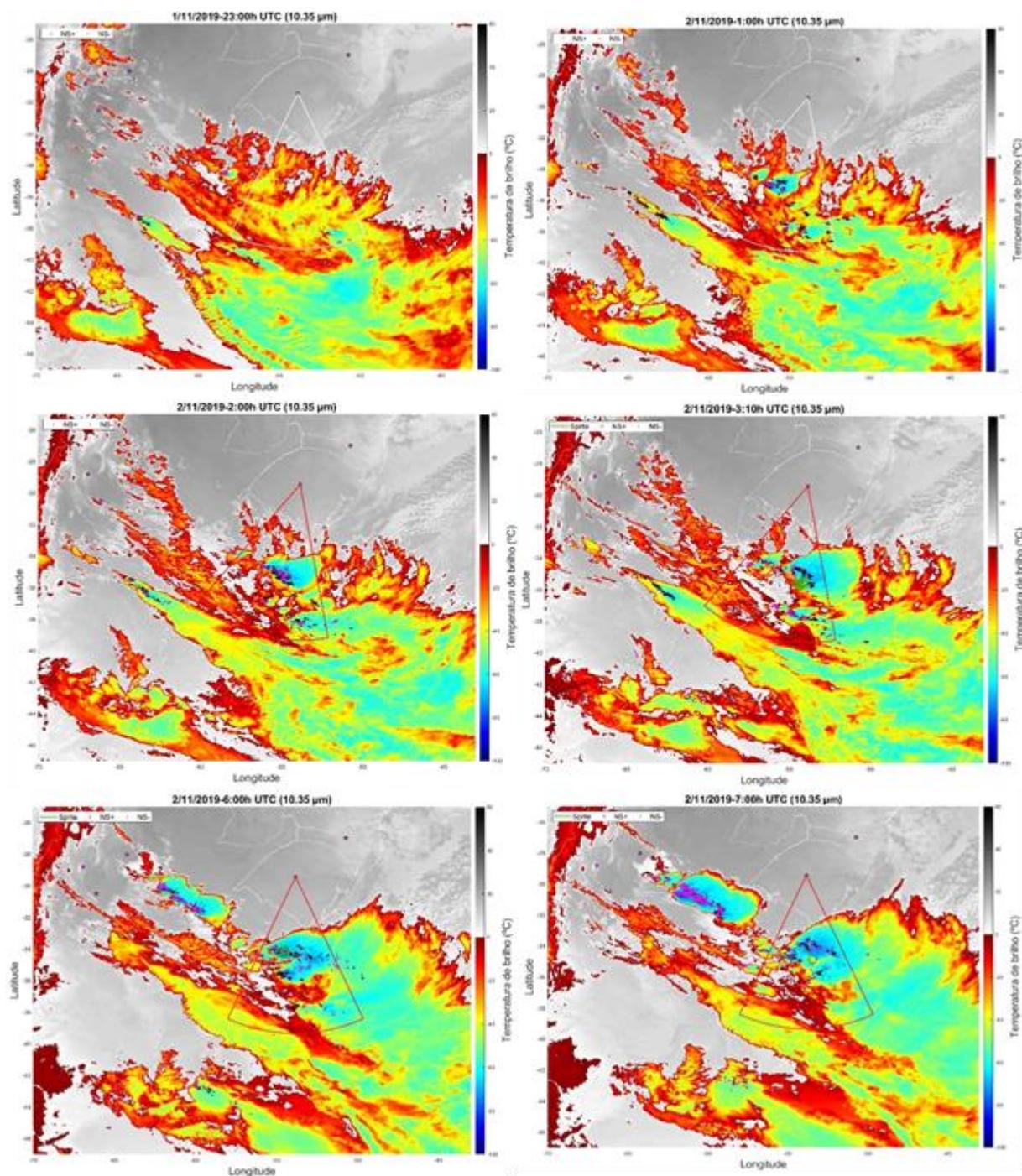


Na Figura 4.18 está o gráfico da quantidade de ELTs, NS+, NS-, área da região de cobertura geral ( $T \leq -40$  °C) e convectiva ( $T \leq -60$  °C). Nesta tempestade a atividade convectiva representada pela área da região convectiva foi menos intensa do que as tempestades anteriores, chegando no máximo de 74.557,40 km<sup>2</sup>. No entanto, os eventos ainda aparecem predominantemente na etapa temporal de máximo da região convectiva. Nota-se que taxa de NS- (26 NS-/min) permanece acima da taxa de NS+ (6 NS+/min), assim como as tempestades anteriores, quando há a observação de eventos.

A baixa produtividade de eventos desse sistema pode ser associada a menor intensidade da região convectiva que não foi capaz de eletrificar todo o sistema para produzir descargas elétricas com o momento de carga necessário para produção dos eventos.

Na Figura 4.17 estão os mapas de temperatura de brilho demonstrando a evolução espacial do sistema que surgiu dentro de um sistema maior já em fase da dissipação. A tempestade surge sobre a fronteira sudoeste do Uruguai e se desloca para leste em direção ao oceano. A Figura 4.19 mostra o espectrograma das temperaturas de brilho associadas aos NS+ (NS + mesmo ou NS-?). É notável um padrão mais abrangente nas temperaturas de brilho a eles associadas, que se distribuem entre -40 °C e -75 °C. Esse mesmo padrão é observado para os NS- na Figura 4.20, com uma pequena concentração de relâmpagos NS+ ocorrendo na região com temperatura de brilho em torno de -65 °C. Os sprites, na Figura 4.21, também ocorreram sobre regiões com uma ampla faixa de temperatura de brilho, entre -20 °C e -75 °C, com uma maior concentração nas regiões com -65 °C, de modo análogo às descargas elétricas.

Figura 4.17: Desenvolvimento espaço-temporal do SCM gerador dos ELTs observados em 01-02/11/2019 entre 23 UTC e 07 UTC. A temperatura IR medidas pelo canal 10,35  $\mu\text{m}$  do GOES-16 está representada pela escala de cor, sobreposta a ela estão a localização dos NS+, em magenta, e dos NS-, em preto. Os ELTs estão representados como círculos verdes e o campo de visada da câmera desligada, em branco, e ligada, em vermelho. Os círculos verdes estão na escala de  $\sim 30$  km equivalente ao erro associado ao método de localização dos eventos.



Fonte: própria.

Figura 4.18: Evolução temporal da taxa de ocorrência de ELTs, NS+, NS-, da cobertura geral ( $T \leq -40$  °C) e convectiva ( $T \leq -60$  °C) em 01-02/11/2019. As barras em vermelho marcam o início e o fim da gravação das câmeras.

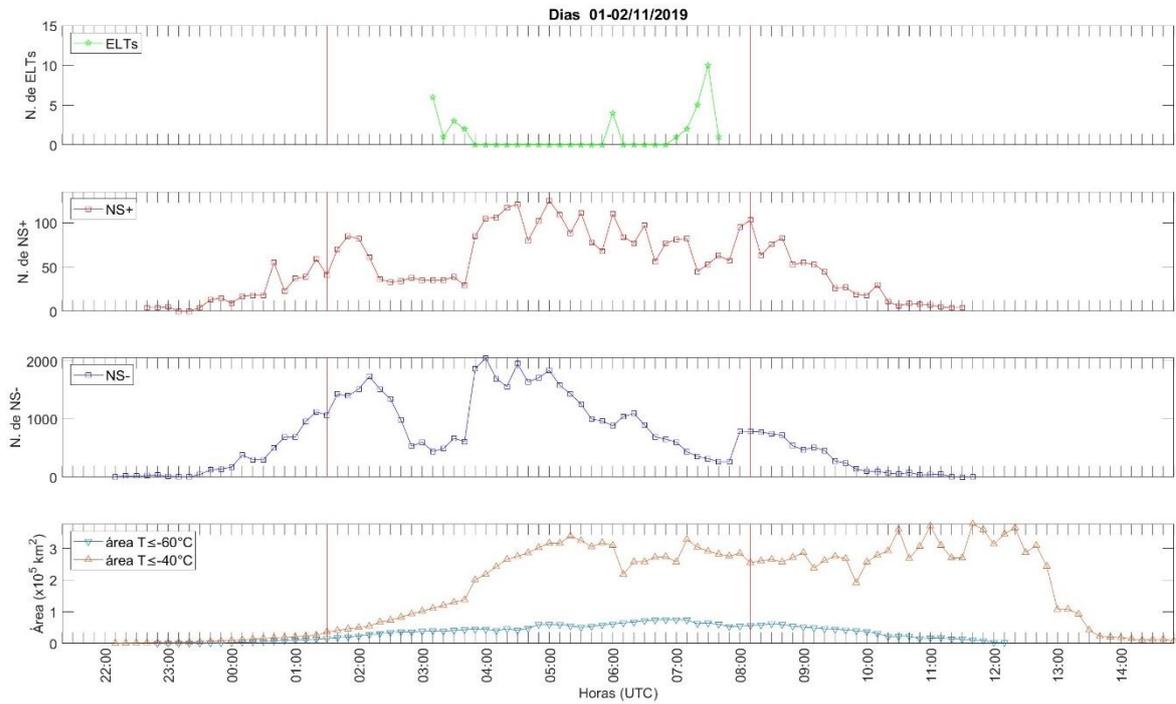


Figura 4.19: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS+ da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019.

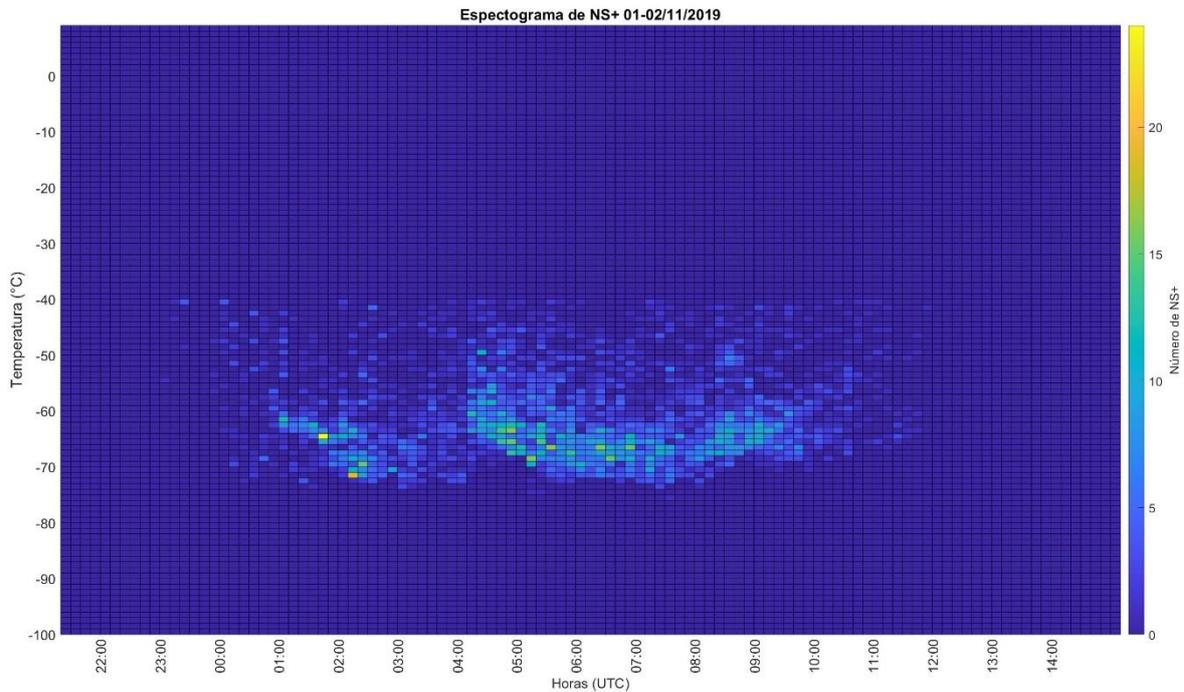


Figura 4.20: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de NS- da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019.

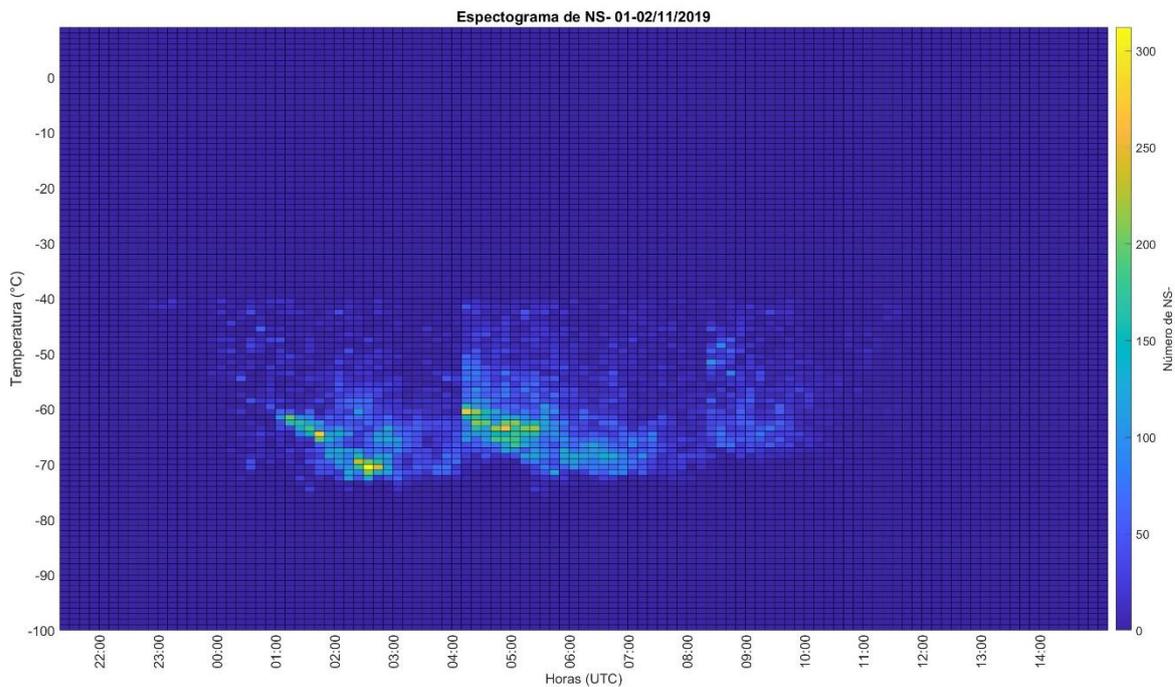
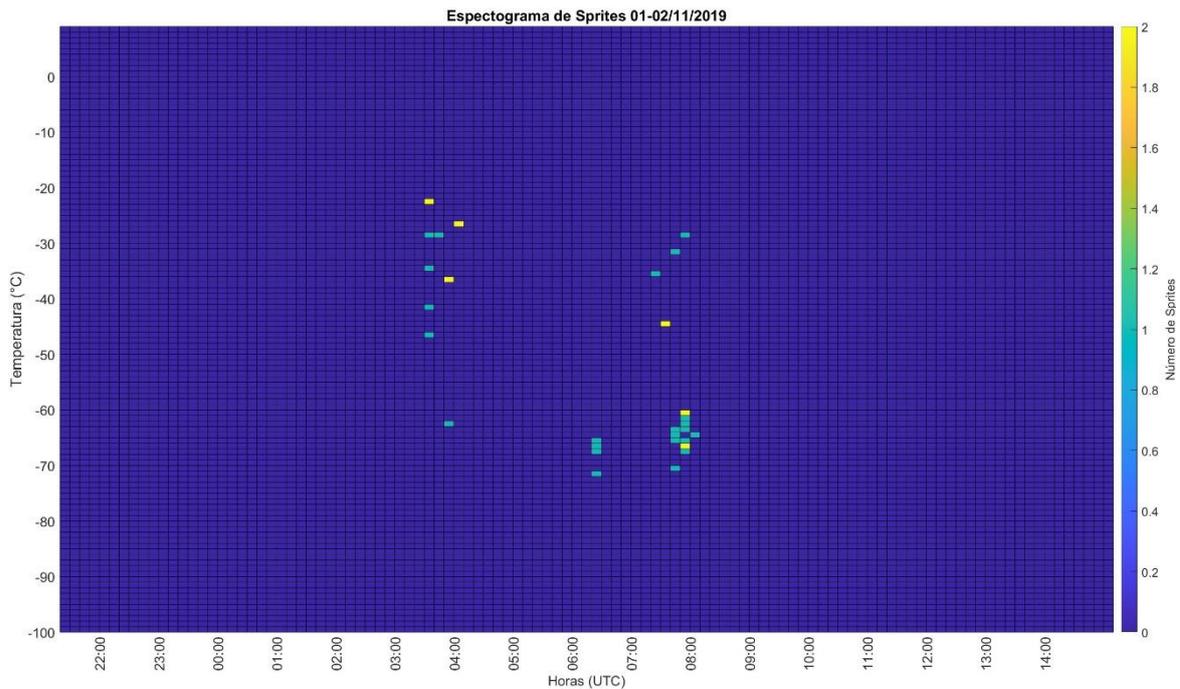


Figura 4.21: Espectrograma da evolução temporal da temperatura da região de ocorrência de Sprites da tempestade produtora de ELTs observados com a Rede LEONA em 01-02/11/2019.



## 5 CONCLUSÕES

Foram observados 892 Sprites, 9 Elves e 30 Halos nas três tempestades. As duas tempestades com maior desenvolvimento convectivo produziram mais ELTs que a menor, e em todas elas os Eventos Luminosos Transientes ocorreram predominantemente na região estratiforme desses Sistemas Convectivos de Mesoescala.

Os ELTs ocorreram durante a etapa de amadurecimento tardio dos SMCs nas três noites de tempestades, quando a região convectiva já tinha atingido sua área máxima, demonstrando a influência da região convectiva na eletrificação de todo o sistema e possivelmente na ocorrência dos ELTs também. Sabe-se que as correntes ascendentes no interior das nuvens convectivas normalmente começam a divergir quando atingem a tropopausa e, como conservam o momentum, levam os cristais de gelo leve que formam o topo das nuvens e possuem carga positiva para as regiões estratiformes. Acredita-se que esses hidrometeoros formam um reservatório de carga positiva, o que possibilita uma alta ocorrência de NS+ com o potencial de gerar sprites acima dessa região. Os resultados deste trabalho confirmam estas hipóteses.

Observou-se que os ELTs, de um modo geral, ocorreram durante o período em que a taxa de ocorrência de NS- foi maior do que a taxa de ocorrência de NS+ em todas as noites, 268 NS-/min x 100 NS+/min, , 69 NS-/min x 20 NS+/min, e e 26 NS-/min x 6 NS+/min, respectivamente. Este resultado dá apoio à hipótese de São Sabbas (2003) de que a atividade elétrica total da tempestade, representada pela taxa de ocorrência de NS-, poderia ter uma influência maior na produção de ELTs do que relatado na literatura.

Nos dois SCM com grande desenvolvimento convectivo, 13-14/12/2018 e 28-29/12/2019, os relâmpagos, Sprites e Halos ocorreram em regiões com temperatura de brilho em torno de -75 °C, enquanto que na tempestade menor observou-se que os ELTs e relâmpagos foram gerados de forma mais difusa no sistema, haja vista a larga faixa de temperatura encontrada, de -40 a -75 °C. Elves ocorreram em diferentes regiões da tempestade, não tendo um região predominante.

Este trabalho de Iniciação de Científica contribuiu para o meu aprimoramento acadêmico e aprendizagem de diversos tópicos científicos desta área de pesquisa. No decorrer das atividades aprendi a ler artigos científicos e apresentar minhas

considerações sobre eles e resultados relevantes ao meu trabalho. Também aprendi a fazer conexões entre resultados da literatura, realizar mineração de dados de satélite e das gravações de vídeo utilizando a plataforma MATLAB e a linguagem Python. Aprendi a tratar as imagens dos ELTs utilizando o software Adobe Premier Pro, catalogar e interpretar a sua morfologia. Aprendi também conceitos técnicos quanto as características dos vídeos e dos editores de vídeos, a transformar dados de satélite com projeção geostacionária para uma grade retangular no MATLAB, a desenvolver algoritmos para processar dados para posterior análise, testar a qualidade e eficiência dos algoritmos criados, a analisar e interpretar gráficos, correlacionar os resultados obtidos com os da literatura e levantar hipóteses. Além disso, aprendi a construir apresentações orais e realizar resumos para congressos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTUR GONÇALVES FERREIRA. **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

AZAMBUJA, R. da Rosa. **Caracterização de tempestades produtoras de Sprites na América do Sul**. 2013. INPE, São José do Campos, 2013. Disponível em: <sid.inpe.br/mtc-m19/2013/01.14.12.18-TDI>. Acesso em: 3 jun. 2022.

BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 683–686, 1999.

BELL, T. F.; PASKO, V. P.; INAN, U. S. Runaway electrons as a source of red sprites in the mesosphere. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 22, n. 16, p. 2127–2130, 1995. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/95GL02239>>. Acesso em: 25 set. 2022.

BYERS, H. R. Thunderstorms. Em: **Compendium of Meteorology**. Boston, MA: American Meteorological Society, 1951. p. 681–693.

da SILVA, C. L. **Mecanismo de iniciação de sprites**. 2011. INPE, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/395MT45>>. Acesso em: 1 jun. 2022.

da SILVA, C. L.; SÃO SABBAS, F. T. Consequences of the application of the streamer fluid model to the study of the sprite inception mechanism. *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1902-1915, 2013.

CHEN, A. B.; KUO, C.-L.; LEE, Y.-J.; SU, H.-T.; HSU, R.-R.; CHERN, J.-L.; FREY, H. U.; MENDE, S. B.; TAKAHASHI, Y.; FUKUNISHI, H.; CHANG, Y.-S.; LIU, T.-Y.; LEE, L.-C. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [s. l.], v. 113, n. A8, p. n/a-n/a, 2008.

COTTON, W. R.; BRYAN, G.; VAN DEN HEEVER, S. C. Cumulonimbus Clouds and Severe Convective Storms. Em: **International Geophysics**. [s.l: s.n.]. v. 99p. 315–454.

ENELL, C.-F.; ARNONE, E.; ADACHI, T.; CHANRION, O.; VERRONEN, P. T.; SEPPÄLÄ, A.; NEUBERT, T.; ULICH, T.; TURUNEN, E.; TAKAHASHI, Y.; HSU, R.-R. Parameterisation of the chemical effect of sprites in the middle atmosphere. **Annales Geophysicae**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 13–27, 2008. Disponível em: <<https://angeo.copernicus.org/articles/26/13/2008/>>

FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; KUBOTA, M.; SAKANOI, K.; INAN, U. S.; LYONS, W. A. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 23, n. 16, p. 2157–2160, 1996.

ILLINGWORTH, A. J.; LATHAM, J. Calculations of electric field growth, field structure and charge distributions in thunderstorms. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 103, n. 436, p. 281–295, 1977. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710343606>>

LUQUE, A.; EBERT, U. Emergence of sprite streamers from screening-ionization waves in the lower ionosphere. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 2, n. 11, p. 757–760, 2009. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/ngeo662>>

LYONS, W. A. Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 101, n. D23, p. 29641–29652, 1996. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/96JD01866>>

LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; WILLIAMS, E. R.; CUMMER, S. A.; STANLEY, M. A. **Characteristics of Sprite-Producing Positive Cloud-to-Ground Lightning during the 19 July 2000 STEPS Mesoscale Convective Systems.** [s.l.: s.n.].

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life Cycle Variations of Mesoscale Convective Systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, [s. l.], v. 126, n. 6, p. 1630–1654, 1998. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(1998)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2)>

MADDOX, R. A. Mesoscale Convective Complexes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 61, n. 11, p. 1374–1387, 1980. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/26221473>>

MENDES JR., O.; DOMINGUES, M. O. Introdução à eletrodinâmica atmosférica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 3–19, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172002000100002&lng=pt&tlng=pt)>

PASKO, V. P.; STANLEY, M. A.; MATHEWS, J. D.; INAN, U. S.; WOOD, T. G. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. **Nature**, [s. l.], v. 416, n. 6877, p. 152–4, 2002.

RODRIGUES, E. M. Densidade de corrente de Maxwell no modelo do circuito elétrico global: nova modelagem da origem e da trajetória das descargas atmosféricas. 2019. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SÃO SABBAS, F. T.; SENTMAN, D. D. Dynamical relationship of infrared cloudtop temperatures with occurrence rates of cloud-to-ground lightning and sprites. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. n/a-n/a, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2002GL015382>>

SÃO SABBAS, F. T.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; BAILEY, M.; CUMMER, S.; AZAMBUJA, R. R.; SANTIAGO, J. P. C.; THOMAS, J. N.; PINTO, O.; SOLORZANO, N. N.; SCHUCH, N. J.; FREITAS, S. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. 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**, [s. l.], v. 115, n. A11, p. n/a-n/a, 2010. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2009JA014857>>

SENTMAN, D. D.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; MCHARG, M. G.; MORRILL, J. S. Plasma chemistry of sprite streamers. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 113, n. D11, p. D11112, 2008.

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 1205–1208, 1995. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/95GL00583>>

SILVA, C. L. Da. **Mecanismo de iniciação de sprites**. 2011. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [s. l.], 2011.

VELASCO, I.; FRITSCH, J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 92, n. D8, p. 9591, 1987. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JD092iD08p09591>>

VIANELLO, R.; ALVES, A. **Meteorologia Básica e Aplicações**. [s.l: s.n.].

VILA, D. A.; MACHADO, L. A. T.; LAURENT, H.; VELASCO, I. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. **Weather and Forecasting**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 233–245, 2008. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2007WAF2006121.1>>

VONNEGUT, B. Some Facts and Speculations Concerning the Origin and Role of Thunderstorm Electricity. Em: **Severe Local Storms**. Boston, MA: American Meteorological Society, 1963. p. 224–241.

WESCOTT, E. M.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; MOUDRY, D. R.; SABBAS, F. T. S. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, [s. l.], v. 106, n. A6, p. 10467–10477, 2001. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2000JA000182>>

YANG, J.; YANG, M.; LIU, C.; FENG, G. Case studies of sprite-producing and non-sprite-producing summer thunderstorms. **Advances in Atmospheric Sciences**, [s. l.], v. 30, n. 6, p. 1786–1808, 2013.