



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.17.12.55-TDI

ESTUDO DOS RAIOS INTRANUVEM ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

Tagianne Patrícia da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 11 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46H5UC8>>

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
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.17.12.55-TDI

ESTUDO DOS RAIOS INTRANUVEM ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

Tagianne Patrícia da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 11 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46H5UC8>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Tagianne Patrícia da.
Si38e Estudo dos raios intranuvem através de câmeras de alta
velocidade e de sensores de campo elétrico / Tagianne Patrícia
da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2022.
xx + 76 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.17.12.55-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências
Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São
José dos Campos, 2022.

Orientador : Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

1. Intranuvem. 2. Câmeras rápidas. 3. Campo elétrico.
4. Luminosidade. I. Título.

CDU 551.594.221



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**
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE TAGIANNE PATRÍCIA DA SILVA**
BANCA Nº 045/2022, REG 427983/2020

No dia 11 de março de 2022, às 09h, 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 Mestra em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: “ESTUDO DOS RAIOS INTRANUVEM ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO.”

Membros da banca:

Dr. Marlos Rockenbach da Silva - Presidente - INPE
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba - Orientador - INPE
Dr. Kleber Pinheiro Naccarato - Membro Interno - INPE
Dr. Marco Antônio Ferro - Membro Externo - IAE



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Pinheiro Naccarato, Pesquisador**, em 14/03/2022, às 08:44 (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 **Marlos Rockenbach da Silva, Pesquisador**, em 14/03/2022, 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 **Marcelo Magalhães Fares Saba, Pesquisador**, em 14/03/2022, às 11:18 (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 **Marco antonio da silva ferro (E), Usuário Externo**, em 14/03/2022, às 12:20 (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 **9519730** e o código CRC **84A1C714**.

“Quem, de três milênios, não é capaz de se dar conta, vive na ignorância, na sombra, a mercê dos dias, do tempo”.

Johann Wolfgang von Goethe

AGRADECIMENTOS

Não há maneira mais apropriada de começar se não por aqueles que com toda dedicação e afeto permitiram de diversas maneiras que eu chegasse até aqui, então, eu agradeço aos meus pais, pelo apoio, pelo amor, pela confiança e por sempre e em qualquer circunstância acreditarem em mim.

Agradeço aos meus irmãos, porque não imaginaria um minuto da minha vida sem vocês, e tão pouco esse. Vocês sempre estão por perto para me apoiar e para me ensinar. Vocês e os nossos pais são a minha base.

Agradeço ao meu orientador Marcelo e aos meus amigos do mestrado, por tudo que pude aprender e que ainda posso aprender com vocês.

Aos meus amigos, os que conheço a mais de dez anos, ou que conheci nesses últimos anos, que sempre torcem por mim e esperam meu melhor. Aqueles que permanecem ao meu lado mesmo com a minha “falta de fé perturbadora”.

Ao Rafael e a onze anos de muita coisa. Em especial pelos últimos dois anos, por permanecer por perto e junto, mesmo não estando perto. Obrigada pelo seu apoio, pela sua companhia na vida. E por todas as vezes que essa amizade te obrigou a torcer por sonhos que a gente sabia que não iam me levar para o lugar que você queria que eu fosse.

Agradeço a pós-graduação do INPE e a coordenação do curso de Geofísica Espacial por todo apoio e suporte durante a minha formação.

À Capes pela bolsa que permitiu a execução e conclusão desse trabalho.

RESUMO

O presente estudo analisa vídeos de câmeras rápidas de raios intranuvem que ocorreram entre 2003 e 2018, em campanhas de aquisição de dados realizados pelo ELAT-INPE. Através desse estudo foi possível caracterizar os raios quanto ao tipo de intranuvem, se normal ou invertido, quanto a sua duração, a presença ou não de líderes de recuo e também características mais específicas como a reionização de ramos preexistentes, líderes conectivos e a reflexão da corrente. Os eventos observados foram comparados com os perfis de campo elétrico. Através de uma análise individual de 60 raios intranuvem foi possível estabelecer uma relação entre a duração do raio adquirida através da análise de vídeo e a duração do raio medido por campo elétrico. Um programa foi desenvolvido para produzir os perfis de luminosidade e foi usado para o estudo da luminosidade. Através dele foi possível encontrar períodos de corrente contínua, as condições necessárias para uma transferência de carga mais eficiente para o canal e observar oscilações de corrente contínua semelhantes a componentes M.

Palavras-chave: Intranuvem. Câmeras Rápidas. Campo Elétrico. Luminosidade

STUDY OF INTRACLOUD FLASHS WITH HIGH SPEED VIDEO CAMERAS AND ELECTRIC FIELD SENSORS

ABSTRACT

This study analyzes videos from high-speed cameras of intracloud lightning that occurred between 2003 and 2018, during data acquisition campaigns run by ELAT-INPE. Through this study it was possible to characterize the type of intracloud flash, whether normal or inverted, its duration, if it has or not recoil leader and more specific characteristics such reionization of branches, connective leaders and the current reflection. These observed events were compared with electric field profiles. Through an individual analysis of 60 intracloud, it was possible to establish a relation between the intracloud duration acquire though video analysis and the duration measured by electric field data. An algorithm was developed to produce luminosity profiles and was used to study the intracloud luminosity. Through it was possible to find periods of continuing current, the necessary conditions to an efficient charge transfer to the intracloud channel and to observe continuing current oscillation similar to M-component.

Keywords: Intracloud. High Speed Camera. Electric Field. Luminosity.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Perfil de temperatura da atmosfera.....	3
Figura 2.2 - Estágios da Cumulonimbus.	4
Figura 2.3 - Processo Colisional Termoelétrico.....	6
Figura 2.4 - Modelo Tripolar da Cumulonimbus.	7
Figura 2.5 - Origem e propagação de um raio descendente negativo.....	9
Figura 2.6 - Origem e propagação de um raio descendente positivo.....	10
Figura 2.7 - Ilustração das Componentes M e Multiplicidade	12
Figura 2.8 - Componente M e Multiplicidade num raio descendente.....	13
Figura 2.9 - Origem e propagação de um raio ascendente negativo.....	14
Figura 2.10 - Intranuvem observado a partir de LMA.	16
Figura 2.11 - Origem e Propagação de Intranuvem Normal ou Típico.....	17
Figura 2.12 - Estágios de um Intranuvem do tipo Normal.	18
Figura 2.13 - Origem e propagação de um intranuvem invertido.	19
Figura 2.14 - Densidade de cargas nos centros responsáveis pela formação e desenvolvimento de um intranuvem invertido.	20
Figura 2.15 - Esquema de distribuição de cargas e de campo elétrico para uma nuvem que possua maior densidade de cargas positivas na base da nuvem..	21
Figura 3.1 - Esquema de montagem e aquisição dos dados de campo elétrico.	25
Figura 3.2 - Perfil de campo elétrico adquirido através de um sensor de campo elétrico.....	26
Figura 3.3 - Diagrama de procedimento para obtenção das imagens dos vídeos de câmera rápida.	27
Figura 3.4 - Fluxograma de funcionamento do programa que calcula a luminosidade.....	28
Figura 3.5 - Imagem de fundo.	29
Figura 3.6 - Imagem com registro de raio.	29
Figura 3.7 - Perfil de Luminosidade.....	30
Figura 4.1 - Diagrama dos dados analisados.....	31

Figura 4.2 - Distribuição dos raios intranuvem de acordo com a sua classificação.	32
Figura 4.3 - Comparativo entre a classificação dos raios e a sua duração média.	33
Figura 4.4 - Reionização do líder negativo por meio de um líder de recuo que surge da origem do canal.	34
Figura 4.5 - Distribuição da duração medida através de vídeo para os raios intranuvem de acordo com sua classificação.	35
Figura 4.6 - Distribuição da duração medida através de campo elétrico para os raios intranuvem de acordo com sua classificação.	36
Figura 4.7 - Comparação da duração dos raios de acordo com campo elétrico e vídeo.	37
Figura 4.8 - Duração dos raios intranuvem de acordo com o tipo de vídeo.	38
Figura 4.9 - Duração por tipo de vídeo e por tipo de classificação do intranuvem.	39
Figura 4.10 - Raio R81.	42
Figura 4.11 - Raio R82.	43
Figura 4.12 - Raio R85.	43
Figura 4.13 - Reionização de ramo preexistente no raio R81	44
Figura 4.14 - Preexistência dos ramos no raio R81.	45
Figura 4.15 - Preexistência do canal no raio R85.....	46
Figura 4.16 - Reionização de ramo preexistente no raio R85.	47
Figura 4.17 - Formas de reionização de ramos preexistentes.....	48
Figura 4.18 - Espaçamento nas regiões de rompimento do canal do raio.	49
Figura 4.19 - Perfis de luminosidade para líderes de recuo que reionizam diferentes regiões do canal.	50
Figura 4.20 - Ramo estimulado se conectando a um líder de recuo.	51
Figura 4.21 - Composição de imagens do ramo estimulado no raio R81.....	52
Figura 4.22 - Canal preexistente no raio R81.....	53
Figura 4.23 - Conexão entre líder ascendente conectivo e líder descendente.	54
Figura 4.24 - Composição de imagens sobre a reflexão de líder de recuo no raio intranuvem R81.	56

Figura 4.25 - Seleção da região do raio R81 para análise de reflexão.....	57
Figura 4.26 - Perfis de luminosidade das partes do canal do raio R81 onde ocorre reflexão.	58
Figura 4.27 - Perfis isolados de luminosidade para cada seção da imagem onde ocorre a reflexão no raio R81.....	59
Figura 4.28 - Reflexão no raio R82.	60
Figura 4.29 - Composição de imagens referente a reflexão que ocorre no raio R85.....	61
Figura 4.30 - Reflexão em raio descendente.....	62
Figura 4.31 - Reflexão em raio ascendente.....	62
Figura 4.32 - Perfil de luminosidade e acumulado de luminosidade para o raio R81.....	64
Figura 4.33 - Perfil de acumulado de pixels para o canal do raio R81.	65
Figura 4.34 - Luminosidade e regiões de grande transferência de carga para o raio R82.....	66
Figura 4.35 - Luminosidade e regiões de grande transferência de carga para o raio R85.....	67
Figura 4.36 - Luminosidade da corrente contínua no raio R85.....	68
Figura 4.37 - Luminosidade x Tempo de um raio descendente positivo.	69
Figura 4.38 - Perfil de luminosidade e acumulado de pixels para um raio intranuvem do tipo invertido.	70

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CC	Corrente Contínua
CE	Campo Elétrico
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
GPS	Global Positioning System
IN	Raio Intranuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ips	Imagens por segundo
JPG	Joint Photographic Experts Group
LAC	Líder Ascendente Conectivo
LC	Líder Conectivo
LF	Low frequency
LLS	Lightning Location System
LMA	Lightning Mapping Arrays
LR	Líder de Recuo
VHF	Very High Frequency
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS RAIOS.....	3
2.1 Nuvens de tempestade.....	3
2.2 Eletrificação e polarização da Cumulonimbus.....	5
2.2.1 O líder bipolar bidirecional.....	7
2.3 Classificação dos raios.....	7
2.3.1 Raios descendentes negativos.....	8
2.3.2 Raios descendentes positivos.....	10
2.3.2.1 Líder de recuo.....	11
2.3.3 Raios ascendentes.....	13
2.4 Raios intranuvem.....	14
2.4.1 Raio intranuvem normal.....	17
2.4.2 Raio intranuvem invertido.....	19
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Análise estatística.....	22
3.2 A aquisição dos dados.....	24
3.2.1 Câmeras rápidas.....	24
3.2.2 Sensor de campo elétrico.....	24
3.3 O leitor de luminosidade.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1 Análise estatística.....	31
4.2 Características específicas.....	42
4.2.1 Reionização de ramo preexistentes.....	44
4.2.2 Líder conectivo.....	51
4.2.3 Reflexão de pulsos luminosos.....	55
4.2.4 Das características luminosas.....	63
5 CONCLUSÃO.....	71
5.1 Análise estatística.....	71
5.2 Características específicas.....	72

5.2.1	Reionização de ramo preexistente	72
5.2.2	Líder conectivo	72
5.2.3	Reflexão de corrente	72
5.2.4	Luminosidade.....	73
5.2.5	Sugestões para trabalhos futuros	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		74

1 INTRODUÇÃO

Os raios intranuvem são raios de difícil observação, já que seu desenvolvimento se dá dentro da nuvem de tempestade e poucas são as vezes em que esses líderes se tornam visíveis. No entanto, é o tipo mais comum de raio que ocorre numa tempestade, e correspondem a cerca de $\frac{3}{4}$ das ocorrências segundo (RAKOV, 2016).

Ao contrário dos raios descendentes e ascendentes que são danosos a estruturas e apresentam risco potencial aos seres vivos, os raios intranuvem, por não oferecem riscos diretos a estruturas e seres vivos são pouco estudados. Por outro lado, o estudo dos raios intranuvem pode contribuir muito para o entendimento da física da descarga atmosférica como, por exemplo, a iniciação dos raios, o desenvolvimento dos líderes, a presença de líderes de recuos, etc.

Além de serem mais frequentes, os raios intranuvem possuem uma duração que varia entre 245 ms e 660 ms, no entanto esses valores foram medidos entre as décadas de 60 e 80 em estudos que utilizaram apenas observações de variações de campo elétrico (RAKOV; UMAN, 2005).

Pela falta de informação a respeito desse tipo de raio, no *lightning location system* (LLS) os raios intranuvem não são registrados pelo sistema, ou são registrados como raios que tocam o solo.

Os raios intranuvem participam ativamente da produção de óxidos de nitrogênio (NO_x), que são gases poluentes responsáveis pela produção de ozônio, além de ser o principal causador do *smog* fotoquímico. A produção devido ao raio intranuvem corresponde a cerca de 20% da produção total de NO_x por raios por ano nos Estados Unidos (BOND et al., 2001).

Existem estudos de raios intranuvem através de sensores de *very high frequency* (VHF) e de *low frequency* (LF), e também através de *lightning mapping arrays* (LMA) que são realizados em conjunto com outros estudos que vão desde a comparação entre as etapas primárias de iniciação dos diversos tipos de raios como em Stolzenburg et al. (2021) até a associação com atividades que envolvam partículas mais energéticas (CHILINGARIAN et al. 2019).

O objetivo geral deste trabalho é estudar pela primeira vez os raios intranuvem através de câmeras rápidas e de dados adquiridos por sensores de campo elétrico, caracterizando o comportamento durante seus estágios ativo e final, além tratar dados estatísticos dessas características observadas.

Com o objetivo específico de analisar e entender características comuns que podem ser observadas nos raios intranuvem, foram analisados 113 raios intranuvem dentro de um período de 15 anos de dados, e a partir dessa amostra foi possível estudar duração desses raios através de câmeras rápidas e comparar o que foi adquirido por esses vídeos com a duração real desses raios através do campo elétrico. Também foi possível caracterizar esses raios intranuvem, em normal e invertido de acordo com a sua propagação, o que nos dá um melhor entendimento sobre seu comportamento e incidência.

Uma pequena amostra foi separada para um estudo mais específico de algumas características comuns entre eles. Uma característica comum é a de que alguns líderes de recuo não conseguem reionizar o canal principal e acabam por se propagarem por ramos preexistentes nesses canais. Há também outros líderes de recuo que ao se aproximarem do canal principal, estimulam o crescimento de líderes conectantes no próprio canal decaído onde eles se propagam. Além disso foi possível observar a reflexão da luminosidade de alguns líderes de recuo ao percorrerem o canal.

Por fim, a luminosidade dessa pequena amostra também foi estudada através de um algoritmo em linguagem *python*, desenvolvido para essa finalidade. Os perfis traçados para esses raios intranuvem nos dá as atividades que mais contribuíram com a luminosidade do raio, indicando períodos mais ativos e quais eventos relacionados.

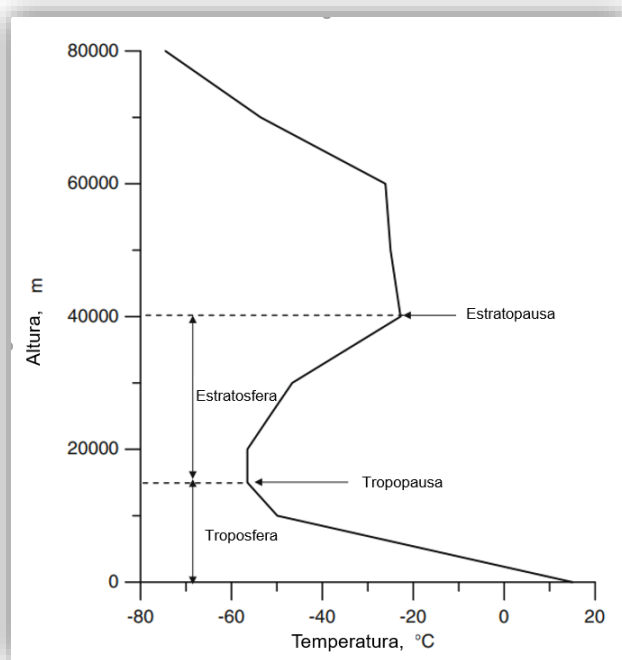
2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS RAIOS

2.1 Nuvens de tempestade

Os raios são formados dentro de nuvens de tempestades chamadas de Cumulonimbus. Elas apresentam uma extensão vertical, que pode atingir 18 km de altura, podendo atingir a tropopausa no seu estágio maduro. Horizontalmente, sua extensão pode variar entre 3km a 50 km (RAKOV, 2016).

Essas nuvens são formadas a partir do aquecimento das massas de ar pelo Sol. As massas de ar aquecidas são menos densas e tendem a subir na atmosfera, e são resfriadas por expansão adiabática. Durante o processo de ascensão e resfriamento, o ar úmido condensa, formando pequenas partículas de água. A ascensão se dá enquanto a temperatura acima da parcela de ar ascendente for menor. Quando o perfil de temperatura de atmosfera inverte, a partir da tropopausa, o movimento da parcela cessa (Figura 2.1)(BABA; RAKOV, 2016).

Figura 2.1 - Perfil de temperatura da atmosfera.

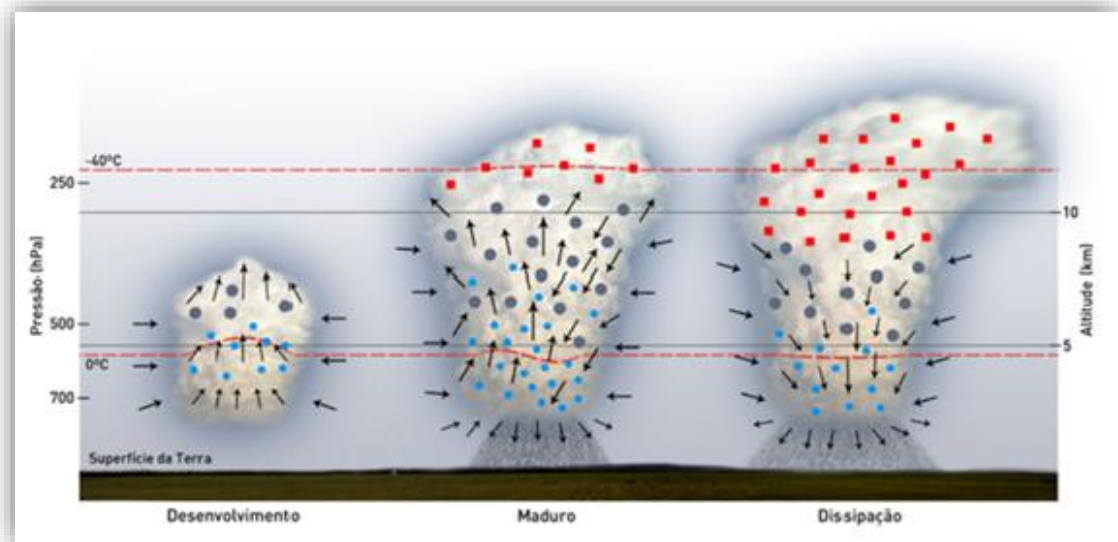


Varição da temperatura (°C) com a altura na atmosfera (m), onde troposfera e estratosfera estão em evidência, bem como os seus limites, tropopausa e estratopausa, respectivamente.

Fonte: Adaptado de Cooray (2015).

Como observado na Figura 2.2, a Cumulonimbus possui três estágios: o estágio de desenvolvimento, o maduro e o estágio de dissipação.

Figura 2.2 - Estágios da Cumulonimbus.



Estágios de desenvolvimento da nuvem Cumulonimbus. Escala a esquerda indica a pressão, em hPa, e a escala a direita indica a altura, em Km. As linhas isotermas de 0 °C e de -40 °C estão assinaladas pela linha tracejada em vermelho, já as setas indicam a direção das correntes de ar. Os círculos em azul claro indicam a presença de água super-resfriada e os círculos em cinza indicam a presença de cristais de gelo, enquanto os quadrados vermelhos indicam a existência de graupel.

Fonte: INPE (2020).

Durante o primeiro estágio as correntes ascendentes de ar são predominantes. No decorrer do desenvolvimento a nuvem ainda é composta apenas por água, proveniente da condensação do vapor, e algumas poucas gotas começam a se solidificar em cristais de gelo quando essa parcela atinge a isoterma de 0 °C. No entanto, não são todas as partículas de água que congelam, algumas ainda permanecem como gotículas de água super-resfriada. Essas gotas, ainda no estado líquido apresentam temperaturas menores que 0 °C (BABA; RAKOV, 2016).

A medida que o acúmulo de cristais de gelo cresce dentro da nuvem começam a surgir partículas mais pesadas como o graupel. Ele aparece devido a colisão entre esses cristais de gelo e gotas de água super frias, que possuem temperatura menor que 0 °C. As correntes ascendentes continuam a carregar vapor d'água para as regiões mais altas da nuvem, mas não conseguem mais manter essas partículas suspensas, e então elas começam a cair gerando correntes de ar descendente. Dessa forma a nuvem atinge o estágio maduro, onde ocorrem uma precipitação mais intensa e também os raios (LUDLAM; MASON, 1957).

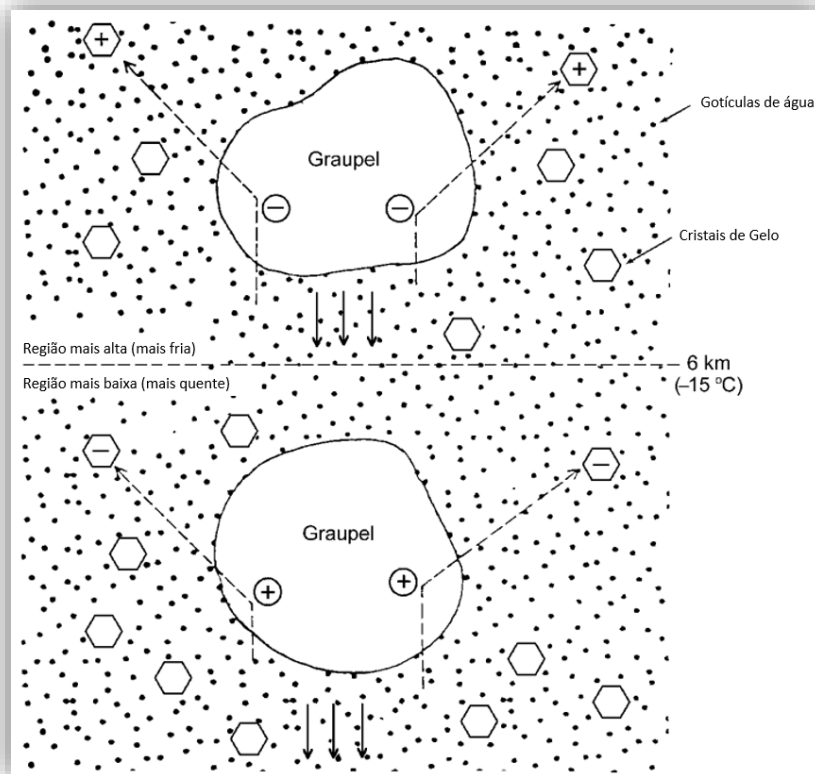
No estágio de dissipação, as correntes descendentes predominam sobre as ascendentes que não conseguem mais suprir a nuvem com vapor d'água. Logo a precipitação vai se tornando menos intensa como também as correntes descendentes, até que a nuvem de tempestade se dissipa (COORAY, 2015).

2.2 Eletrificação e polarização da Cumulonimbus

O processo colisional termoelétrico é o principal mecanismo de eletrificação da nuvem Cumulonimbus. Se trata da eletrificação de partículas individuais devido ao choque entre graupel e cristais de gelo na presença de gotículas de água super-resfriada. Essas colisões são causadas pela queda dos graupel, que são pesados, e essa queda ocorre em meio aos cristais de gelo e as partículas super-resfriadas que estão em suspensão no ar (COORAY, 2015).

Havendo a colisão entre graupel e cristais de gelo em regiões da nuvem com temperatura menor que -15 °C, graupéis assumem uma carga negativa após a colisão e os cristais de gelo assumem carga positiva. Contudo, se essas colisões ocorrem em regiões com temperatura maior que -15 °C, as cargas assumidas por eles serão o opostas, como pode ser observado na Figura 2.3 (WILLIAMS, 1988).

Figura 2.3 - Processo Colisional Termoelétrico.



Processo Colisional termoelétrico, ou mecanismo graupel-gelo: A linha tracejada indica a temperatura de inversão. Se a colisão entre graupel e cristais de gelo ocorrerem em regiões com temperatura maior que a temperatura de inversão (abaixo da linha tracejada), graupel admite carga positiva enquanto cristal de gelo adquirem carga negativa. Caso a colisão entre graupel e cristais de gelo ocorra em regiões mais frias (acima da linha tracejada), cristais de gelo admitem carga positiva enquanto graupel adquire carga negativa. O processo de colisão deve ocorrer na presença de gotículas de água super-resfriada (pontos pretos).

Fonte: Adaptado de Cooray (2015).

Carregados, graupéis e cristais de gelo sofrerão com a ação da gravidade e das correntes ascendentes de ar que ainda existem nessa etapa da formação da nuvem. As correntes ascendentes carregarão os cristais de gelo para locais superiores na nuvem e a gravidade fará com que graupéis se instalem em locais inferiores da nuvem. É através dessa separação de graupéis e cristais carregados que a Cumulonimbus se torna polarizada. Essa polarização pode se dar em diversas formas, mas o modelo tripolar, na Figura 2.4, é o suficiente para explicar a formação dos tipos de descargas (DWYER; UMAN, 2014).

Figura 2.4 - Modelo Tripolar da Cumulonimbus.

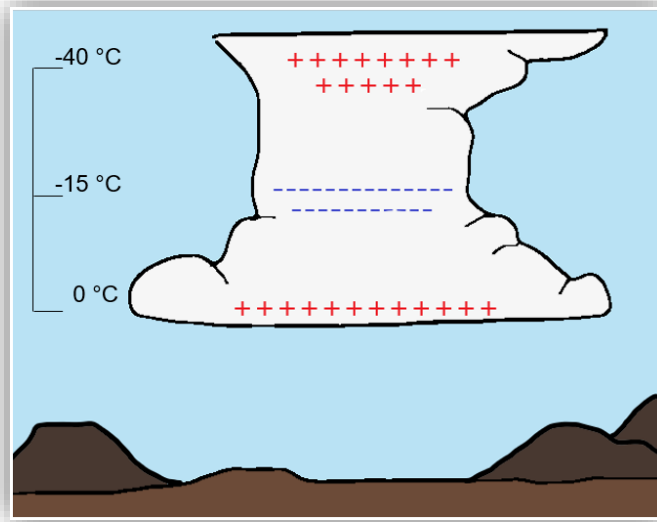


Ilustração da distribuição de cargas dentro de uma nuvem Cumulonimbus. A região próxima ao topo da nuvem apresenta a maior carga líquida positiva, e este é o centro principal de cargas positivas. Já a região central apresenta carga líquida negativa, e é chamado de centro principal de cargas negativas. Por fim, a região próxima à base da nuvem possui carga líquida positiva.

Fonte: Produção da autora.

2.2.1 O líder bipolar bidirecional

Ocorrendo a quebra da rigidez dielétrica do ar um canal de plasma quente e altamente condutor se origina (DWYER; UMAN, 2014).

Sofrendo a ação do campo elétrico externo, cargas positivas se acumulam na extremidade do canal de plasma que aponta para a mesma direção do campo, e as cargas negativas se acumulam na extremidade oposta (FERRO, 2008). As duas extremidades continuam se desenvolvendo alongando o canal de plasma condutor, dando origem ao líder bipolar bidirecional (DWYER; UMAN, 2014).

2.3 Classificação dos raios

Os raios podem ser classificados em dois grupos: aqueles que tocam o solo, que são cerca de 25% das ocorrências, e os que não tocam (os raios intranuvem) que correspondem aos outros 75% (RAKOV, 2016).

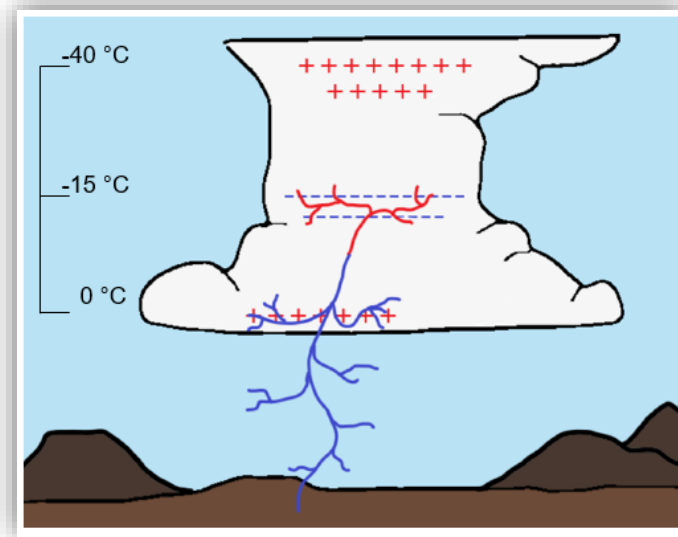
Os que tocam o solo podem ser classificados de acordo como o sentido de propagação do líder que os inicia. Eles podem ser descendentes e ascendentes. É a distribuição de cargas dentro da nuvem de tempestade, e conseqüentemente o campo elétrico gerado por essa distribuição, a responsável pela definição do movimento dos líderes que formarão os diferentes tipos de raios (STOLZENBURG; MARSHALL, 2009).

Os raios que tocam o solo podem ainda ser classificados como positivos ou negativos segundo a carga líquida transferida ao solo (MAZUR, 2016a). Desses 90% são raios descendentes negativos, menos de 10% são raios descendentes positivos e, menos de 1% são raios ascendentes (RAKOV, 2016).

2.3.1 Raios descendentes negativos

Considerando então, o modelo tripolar de distribuição de cargas dentro da Cumulonimbus mostrada na Figura 2.4, o líder bipolar bidirecional tem sua origem entre o centro principal de cargas negativas e o centro de cargas positivas na base da nuvem. A propagação do líder positivo se dá em direção ao centro de cargas negativas, a fim de neutralizá-las, e o líder negativo se propaga em direção a base da nuvem, neutralizando as cargas do centro de cargas positivas. Esse líder segue se propagando em direção ao solo, como pode ser visualizado na Figura 2.5 (DWYER; UMAN, 2014).

Figura 2.5 - Origem e propagação de um raio descendente negativo.



O líder bipolar bidirecional se origina entre os centros de cargas principal negativo e positivo da base da nuvem. O líder positivo, em vermelho, se propaga em direção ao centro de cargas negativas, enquanto o líder negativo, em azul, se propaga em direção ao centro de cargas positivas na base da nuvem e logo após em direção ao solo.

Fonte: Produção da autora.

A polaridade do raio é definida pela polaridade da carga que é transferida para o solo. Neste caso então, tocando o solo esse raio será um raio descendente com polaridade negativa (RAKOV, 2016).

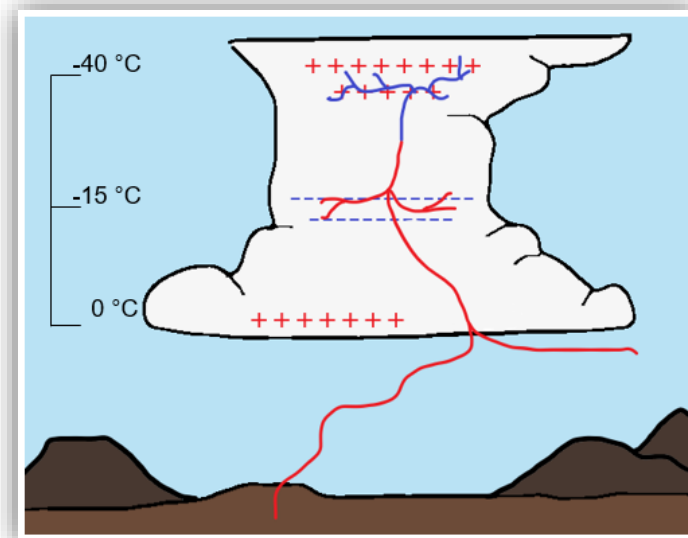
Toda vez que o raio toca o solo acontece uma descarga de retorno. A quantidade de descargas de retorno é uma característica conhecida como multiplicidade (NAG et al., 2017). Já a corrente contínua é a corrente que flui pelo canal do raio, mantendo-o ativo por um intervalo superior a 3 ms (BALLAROTTI; SABA; PINTO, 2005).

Raios descendentes negativos no Brasil, possuem multiplicidade de 3,9, e tem em média 1,7 pontos de contato com o solo. Com multiplicidade alta, apenas 20% dos raios negativos possuem apenas uma descarga de retorno. A duração média total de um raio nuvem-solo negativo é de 229 ms (SARAIVA et al., 2010). Os raios descendentes negativos apresentam também uma média de duração de corrente contínua de 31 ms (BALLAROTTI et al., 2012).

2.3.2 Raios descendentes positivos

Considerando que a formação do líder bipolar bidirecional pode ocorrer também entre o centro principal de cargas positivas e o centro principal de cargas negativas, como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 - Origem e propagação de um raio descendente positivo.



O líder bipolar bidirecional tem origem entre os principais centros de carga, o negativo na região central e o positivo no topo da nuvem. O líder negativo, em azul, se propaga em direção ao centro de cargas positivas, e o líder positivo, em vermelho, se propaga em direção ao centro de cargas negativas e depois ao solo.

Fonte: Produção da autora.

O líder negativo se propaga em direção ao centro de cargas positivas e se espalha por ele. Já o líder positivo se propaga em direção ao centro de cargas negativas e então segue em direção ao solo. Ao tocar o solo temos um raio descendente de polaridade positiva, que transfere carga negativa do solo para a nuvem.

No Brasil, os raios descendentes positivos têm multiplicidade de 1,2. Havendo uma segunda descarga de retorno ela geralmente terá outro ponto de contato no solo. Com uma multiplicidade pequena, cerca de 70% dos positivos tem apenas uma única descarga de retorno que tem duração média de 143 ms. A duração

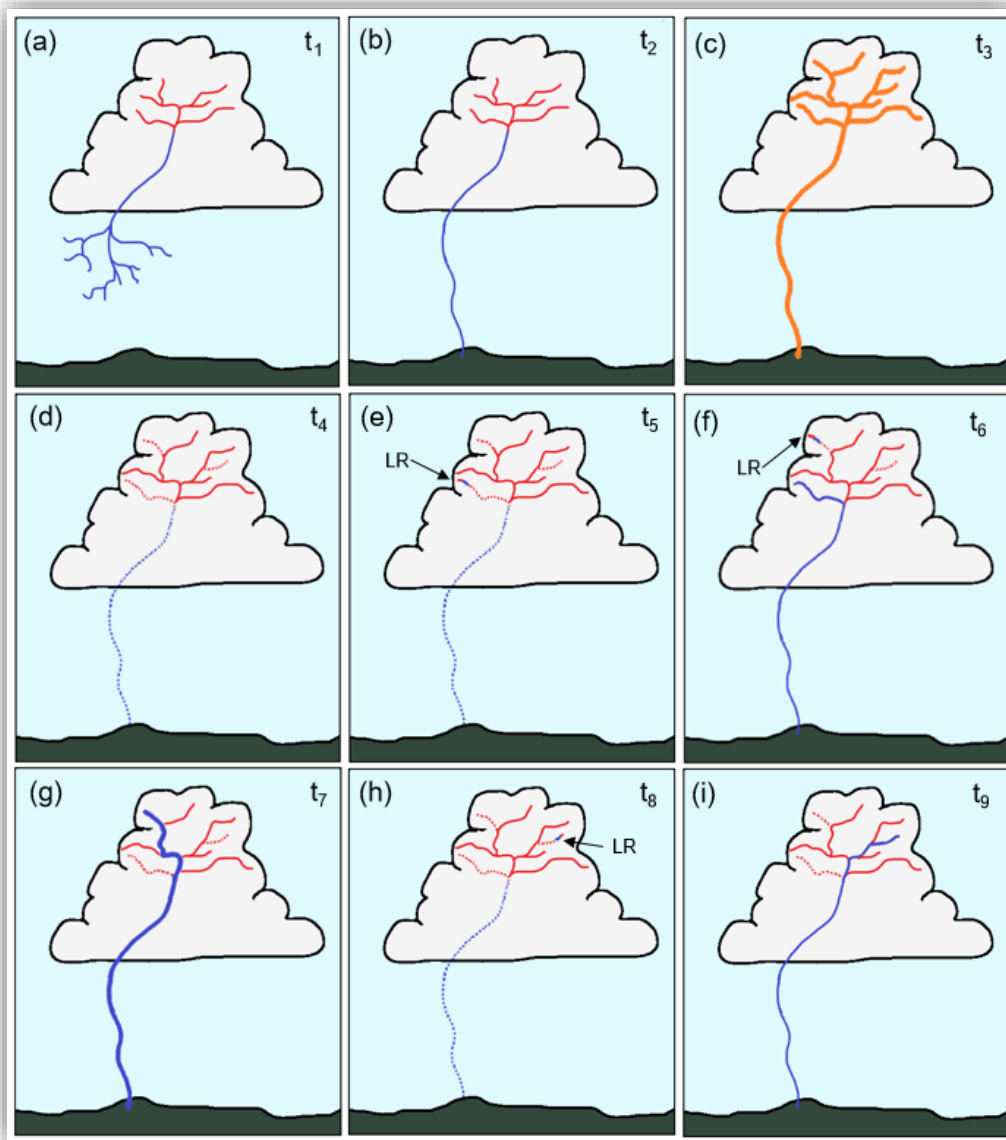
média total de um raio descendente positivo é de 177 ms, e a duração média da corrente contínua para esse tipo de raio é de 100 ms (SABA et al., 2010; PINTO JUNIOR. et al., 2009).

2.3.2.1 Líder de recuo

O líder de recuo é um elemento essencial e característico nos líderes positivos. São líderes auto-propagantes que se originam em um ramo decaído de um líder positivo e se propagam por ele o reionizando (MAZUR, 2016a).

Os líderes de recuo são responsáveis pela multiplicidade dos raios descendentes negativos e também pela componente M nas correntes contínuas que fluem nos canais dos raios negativos após uma descarga de retorno, exemplificado na Figura 2.7 e na Figura 2.8. Como não ocorrem em ramos decaídos de líderes negativos, observa-se a pequena multiplicidade de raios descendentes positivos (MAZUR, 2016b).

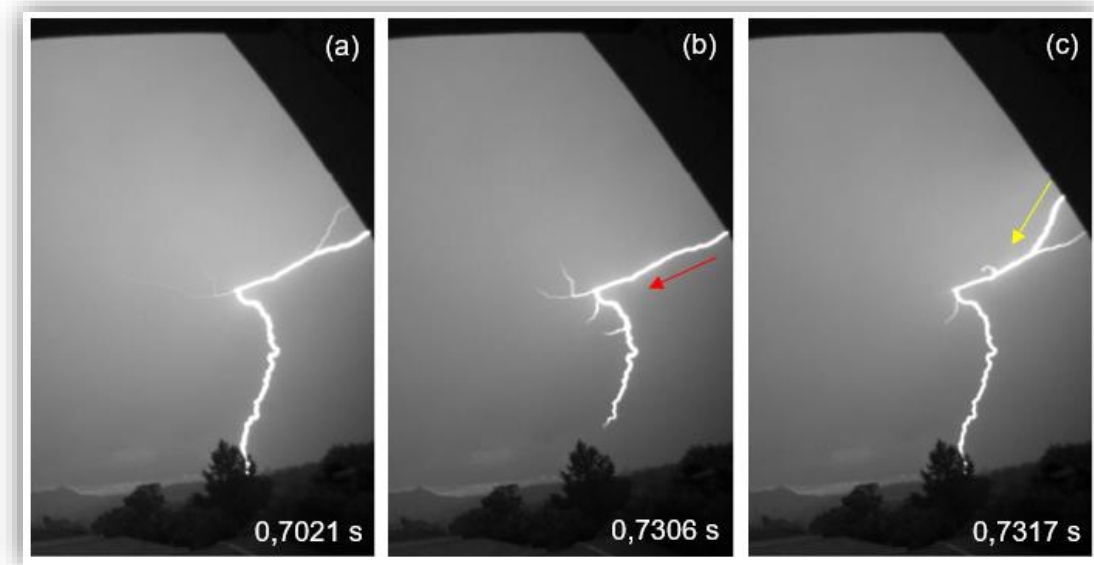
Figura 2.7 - Ilustração das Componentes M e Multiplicidade.



Em (a) está ilustrado o desenvolvimento do líder bipolar bidirecional, onde o líder negativo se propaga em direção ao solo (b), e quando atinge o solo ocorre a descarga de retorno (c). Em (d) há decaimento do canal da descarga de retorno e também de algumas ramificações no líder positivo. O líder de recuo surge em um desses ramos positivos decaídos (e) e reioniza o canal todo causando uma descarga de retorno subsequente em (f). Em (f) também notamos o surgimento de outro líder de recuo que percorre o canal enquanto ele ainda está ativo, intensificando sua luminosidade em (g). Essa é a chamada componente M. Em seguida (h) o canal decaí novamente, e outro líder de recuo surge e o reioniza causando outra descarga de retorno subsequente em (i). Com duas descargas de retorno subsequentes esse líder possui multiplicidade 3.

Fonte: Produção da autora.

Figura 2.8 - Componente M e Multiplicidade num raio descendente.



Em (a) observa-se o canal ativo após a primeira descarga de retorno de um raio descendente; (b) mostra a segunda descarga de retorno (descarga de retorno subsequente) desse raio, causada pelo líder de recuo indicado pela seta vermelha; e em (c) enquanto o canal ainda está ativo devido a (b), um segundo líder de recuo, indicado pela seta amarela, causa uma componente M.

Fonte: Produção da autora.

2.3.3 Raios ascendentes

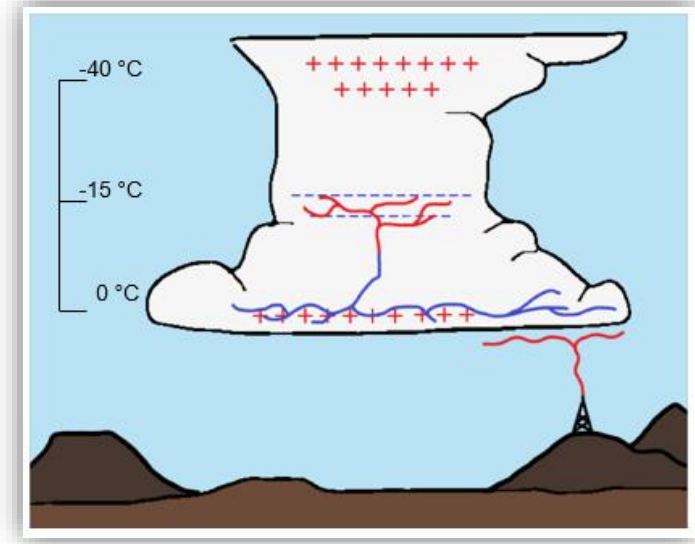
Os raios ascendentes se originam fora das nuvens de tempestades, mas a sua formação ainda depende intrinsecamente da distribuição das cargas dentro nuvem de tempestade (MAZUR, 2016a). Eles têm origem na extremidade de estruturas altas e se propagam em direção à nuvem.

Os raios ascendentes podem se iniciar sem a influência de outras descargas, mas na maioria das vezes são induzidos por processos que ocorrem dentro da nuvem. No processo de auto iniciação a região carregada da nuvem deve produzir campo elétrico suficiente para o início de um líder ascendente. Já no caso dos ascendentes induzidos, descargas na nuvem alteram o campo que inicia o raio ascendente (SCHUMANN et al., 2019).

A Figura 2.9 representa um exemplo de um raio ascendente induzido pelo desenvolvimento de um intranuvem. O raio intranuvem faz com que as cargas

sejam realocadas, gerando um campo intenso o suficiente para iniciar um raio ascendente.

Figura 2.9 - Origem e propagação de um raio ascendente negativo.



Raio ascendente negativo iniciado a partir de uma torre devido ao desenvolvimento de um raio intranuvem acima dessa torre.

Fonte: Produção da autora.

Para os raios ascendentes no Brasil, temos multiplicidade de 0,5, e uma duração média de 427 ms (SABA et al., 2016).

2.4 Raios intranuvem

Raios que se iniciam e se propagam apenas na nuvem ou imediações são chamados de raios intranuvem.

Em sua maioria os raios intranuvem ocorrem entre o centro principal de cargas negativas, no centro da nuvem, e o centro principal de cargas positivas, próximo ao topo da nuvem. Neles o líder negativo tem sua propagação ascendente e o líder positivo tem propagação descendente. Em alguns casos a propagação do líder bipolar bidirecional pode ocorrer de forma invertida. O líder negativo se

desenvolve de forma descendente, em direção ao centro de cargas positivas na base da nuvem, enquanto o líder positivo se desenvolve de forma ascendente, seguindo em direção ao centro principal de cargas negativas (RAKOV; UMAN, 2005).

Os raios intranuvem possuem sua propagação predominantemente na horizontal. Sua propagação vertical se dá apenas no estágio inicial e esse canal desenvolvido na vertical é um canal curto, pois logo os líderes começam a se espalhar horizontalmente (COLEMAN et al., 2003).

A Figura 2.10 nos mostra como se dá o desenvolvimento temporal de um intranuvem através de dados de LMA. Os pontos azuis indicam o desenvolvimento inicial do líder bipolar bidirecional. É possível notar nos gráficos de altitude por distância que esse líder tem sua origem próximo a 8 km de altura, se desenvolve pouco na vertical antes de se espalhar horizontalmente.

Figura 2.10 - Intranuvem observado a partir de LMA.

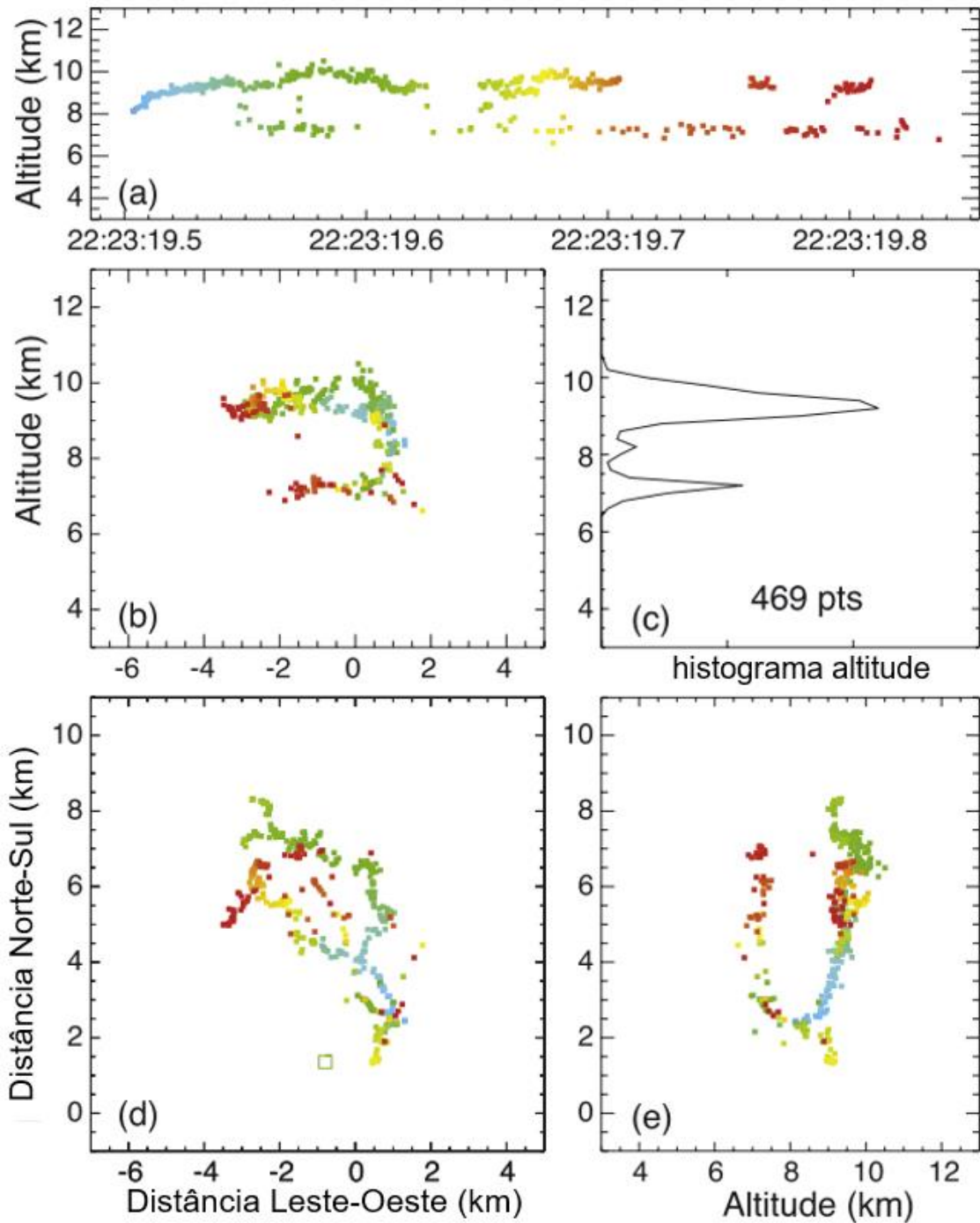


Imagem produzida através de dados de LMA para um raio do tipo intranuvem. As cores indicam o desenvolvimento temporal desse raio, onde as cores mais frias como azul e verde demonstram regiões do canal que se desenvolveram primeiro, e as cores mais quentes como amarelo, laranja e vermelho são as regiões que se desenvolveram por último, mais perto do fim do raio. O horário indicado no primeiro gráfico de altitude x tempo se encontra no formato hh:mm:ss.

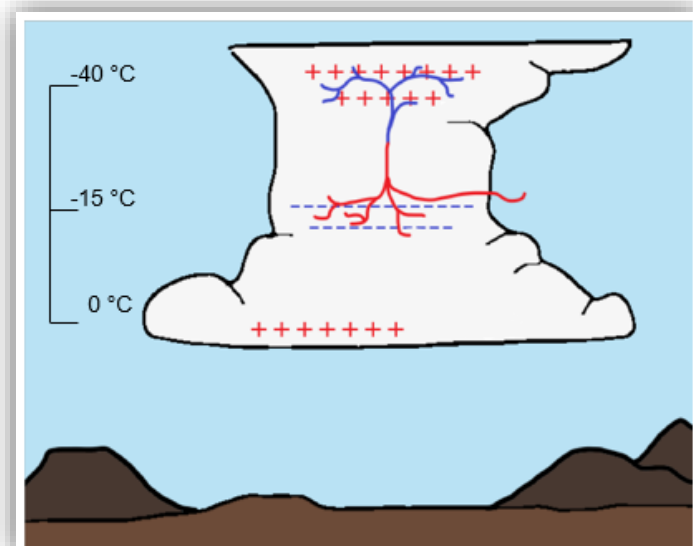
Fonte: Riouset et al. (2007).

O LMA detecta radiação VHF que é emitida pela propagação do líder negativo, assim a radiação VHF emitida pelo líder positivo se dá apenas após o surgimento de líderes de recuo (MAZUR, 2002).

2.4.1 Raio intranuvem normal

Uma vez originado entre os centros principal carga negativa e principal carga positiva, próximo ao topo da nuvem, o raio intranuvem recebe o nome de raio intranuvem normal (RAKOV; UMAN, 2005) ou raio intranuvem típico (MAZUR, 2016a). Na Figura 2.11 é possível identificar a origem do raio intranuvem normal.

Figura 2.11 - Origem e Propagação de Intranuvem Normal ou Típico.



Como nos raios descendentes positivos o líder bipolar bidirecional tem origem entre os principais centros de cargas positivas, próximo ao topo da nuvem, e negativas, no centro da nuvem, mas não se desenvolvem em direção ao solo.

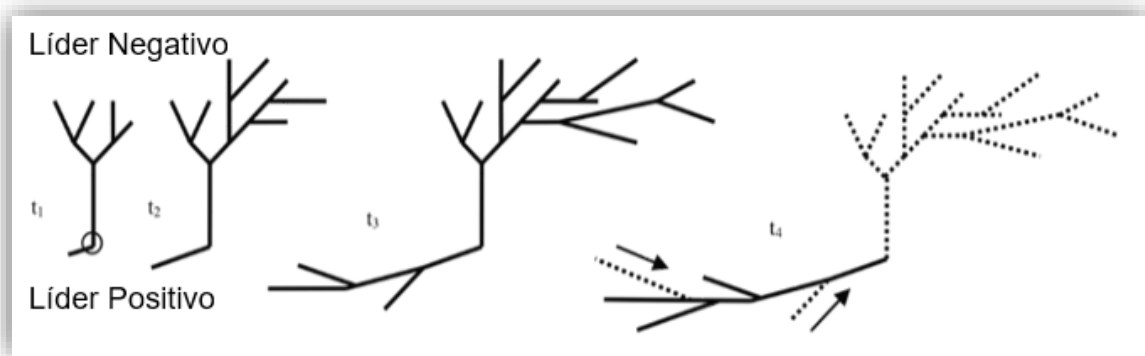
Fonte: Produção da autora.

Durante o desenvolvimento do líder bipolar bidirecional o líder positivo é o primeiro a se propagar. Depois de um tempo o líder negativo inicia sua propagação com uma velocidade maior. A propagação do líder negativo cessa e

o canal desse líder começa a decair durante o estágio que Mazur (2016a) chama de estágio de junção, enquanto a propagação do líder positivo continua. Com o decaimento do líder negativo, após 270 ms (em média) do início do raio, líderes de recuo começarão a surgir com mais intensidade na extremidade do líder positivo (MAZUR, 2016a).

O estágio de junção, representado na Figura 2.12, foi observado a partir do uso de interferômetros VHF.

Figura 2.12 - Estágios de um Intranuvem do tipo Normal.



O círculo em t₁ indica o ponto de início do intranuvem, t₂ e t₃ são os estágios ativos, de desenvolvimento e progressão, e t₄ corresponde ao estágio de junção e também demonstra o surgimento dos líderes de recuo.

Fonte: Adaptado de Mazur (2016a).

Caso se propague na parte inferior da nuvem, em locais onde seu canal se torne visível, o líder positivo apresentará movimento suave e contínuo, além dos líderes de recuo que surgem na sua extremidade, característicos de líderes positivos.

A possível visualização do líder positivo de um raio intranuvem normal pode ocorrer devido: a mudança das regiões dos centros de cargas durante o desenvolvimento da nuvem de tempestade; ou a um modelo mais complexo de distribuição de cargas; ou até mesmo devido a uma nuvem com o modelo tripolar invertido. A distribuição de cargas dentro da nuvem de tempestade pode ser mais

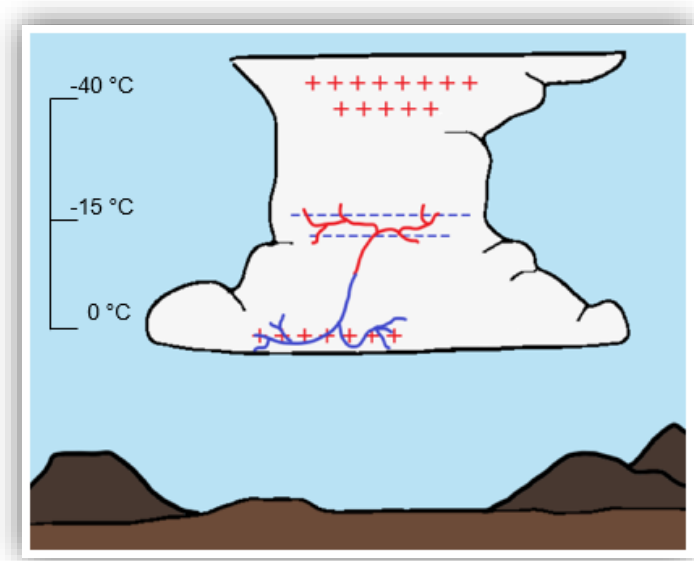
complexa e na maioria das vezes pode variar dentro de diferentes tempestades ou até mesmo durante os diferentes estágios de desenvolvimento dessa tempestade (CUI et al., 2008).

2.4.2 Raio intranuvem invertido

Já o intranuvem chamado invertido, tem sua origem entre o centro principal negativo composto por cargas negativas e o abaixo dele, o centro de cargas positivas da base da nuvem (NAG; RAKOV, 2009).

A propagação e os estágios de desenvolvimento ocorrem de forma semelhante ao do intranuvem normal, exceto pelas direções de propagação dos líderes, que se dá de forma invertida, e pode ser observado na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Origem e propagação de um intranuvem invertido.



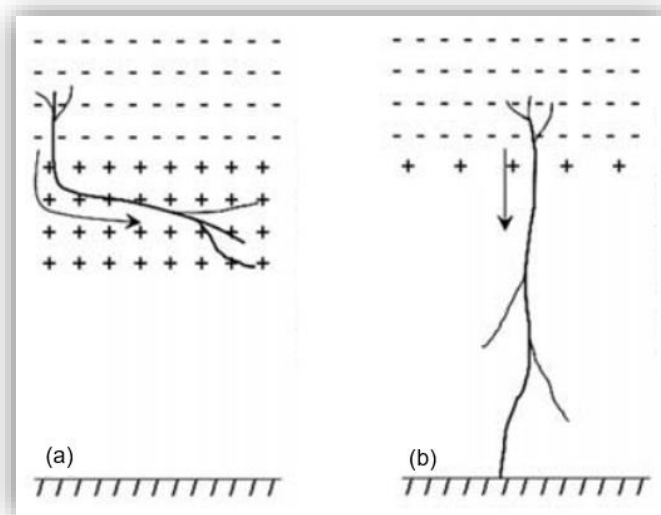
O líder bipolar bidirecional tem sua origem entre o centro de cargas negativas e o centro de carga de positiva, da base da nuvem. O líder negativo, em azul, se propaga em direção ao centro de cargas positivas próximo a base da nuvem, enquanto o líder positivo, em vermelho, se propaga em direção ao centro de cargas negativas.

Fonte: Produção da autora.

Durante a propagação raio intranuvem invertido na base da nuvem, ele apresentará movimento escalonado, característico de líder negativo.

Um fator favorável ao surgimento de intranuvem invertido é o centro de cargas positivas na base da nuvem apresentar uma densidade de cargas positivas (Figura 2.14 (a)) maior do que o que é observado normalmente (Figura 2.14 (b)) (NAG; RAKOV, 2009).

Figura 2.14 - Densidade de cargas nos centros responsáveis pela formação e desenvolvimento de um intranuvem invertido.

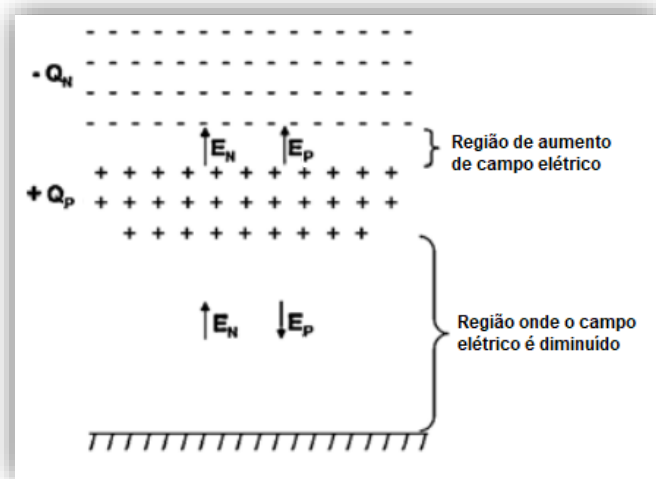


A figura (a) indica um centro de cargas positivas mais denso, na base da nuvem, do que na figura (b). Essa densidade de cargas positivas vai aumentar a possibilidade de o líder negativo se desenvolva próximo a essa região de cargas (a) e não em direção ao solo (b).

Fonte: Adaptado de Nag e Rakov (2009).

Uma maior densidade de cargas na base da nuvem modifica a intensidade do campo elétrico naquela região, de acordo com a Figura 2.15.

Figura 2.15 - Esquema de distribuição de cargas e de campo elétrico para uma nuvem que possua maior densidade de cargas positivas na base da nuvem.



E_N indica o campo elétrico devido as cargas negativas ($-Q_N$), já E_P indica o campo elétrico devido as cargas positivas ($+Q_P$). O aumento da quantidade de cargas positivas na base da nuvem ($+Q_P$) altera a intensidade dos campos elétricos resultantes, dentro da nuvem e entre a nuvem e o solo, contribuindo para o desenvolvimento do líder negativo do raio intranuvem invertido ocorra mais próximo a base da nuvem.

Fonte: Adaptado de Nag e Rakov (2009).

Esse centro de carga mais denso, aumenta a intensidade do campo elétrico entre ele e o centro principal de cargas negativas no meio da nuvem. Isso tem como consequência um queda na intensidade do campo elétrico entre a nuvem e o solo, fazendo com que ocorra na tempestade mais intranuvem invertidos do que descendentes negativos (CHILINGARIAN et al., 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Análise estatística

No período que compreende novembro de 2003 a dezembro de 2018, foram obtidos 170 registros de raios intranuvem em vídeos feitos por câmeras de alta velocidade.

Os 170 raios foram classificados inicialmente como intranuvem porque durante a análise do vídeo, não apresentarem conexão aparente de líder com o solo.

Os critérios de exclusão para a eliminação de raios que poderiam não ser raios intranuvem, foram: canal da descarga inteiramente difusa; luminosidade intensa e difusa próxima ao solo; e, raios do tipo nuvem-solo registrados pelos sensores de campo elétrico antes ou depois do registro do intranuvem. Esses critérios são importantes para que a amostra seja inteiramente composta por raios intranuvem, então eles são melhores explicados nos parágrafos que se seguem.

Foram descartadas descargas com canal inteiramente difuso ainda quando o seu desenvolvimento tenha ocorrido inteiramente dentro da nuvem. Como a nuvem contém uma densidade muito alta de vapor e de gotículas d'água, às vezes não é possível distinguir o canal principal, tão pouco suas ramificações, forma de propagação e a presença ou não de líderes de recuo, que são usados nessa pesquisa para tipificar o intranuvem. Assim, não há dados visuais que possam ser coletados nessa situação. O raio não deixa de ser classificado como intranuvem, mas não tem dados uteis a serem utilizados nesse trabalho.

Já a luminosidade intensa e difusa próxima ao solo, pode vir a ser um indicativo de que esse raio teve contato com o solo atrás de uma região onde ocorre a forte precipitação. Dada a natureza bidimensional das imagens, torna-se difícil mensurar a profundidade no qual essa luminosidade intensa possa ter ocorrido, levando uma descarga de retorno ser confundida facilmente com uma atividade intranuvem difusa. Então, para esses raios existe uma certa incerteza em classificá-los como raios do tipo intranuvem e foram também descartados

Enfim, para os raios que apresentam registro de campo elétrico no qual dentro de um segundo possui um pulso característico de descarga de retorno, o que é

observado como raio intranuvem é, na verdade, a outra extremidade do nuvem-solo que gerou uma descarga de retorno. Nesse caso o raio filmado é o líder oposto ao líder que teve contato com o solo.

Filtrando os intranuvem de acordo com essas condições temos que a amostra inicial de 170 intranuvem foi reduzida a 113.

Esses intranuvem foram registrados em diversas campanhas de aquisição de dados realizadas nas cidades de São Paulo – SP, São José dos Campos – SP, Santa Maria – RS e Uruguaiana – RS, ainda dentro do período mencionado anteriormente.

Para os 113 raios, os dados de sensores de campo elétrico também foram adquiridos quando disponíveis. Através dos vídeos foi calculada a duração desses raios, e também foi realizada a classificação do raio intranuvem a depender do tipo de propagação que este raio possuía.

Para a classificar o intranuvem como normal ou invertido, observamos o líder em sua parte inferior exposta na base da nuvem. Na ausência de dados de campo elétrico, considera-se tanto a presença de líderes de recuo um fator característico de líderes positivos, como também a propagação, que se realiza de maneira suave e contínua. Apresentando essas características esse intranuvem é do tipo normal. Já quando a propagação do líder na base da nuvem se dá de maneira escalonada e gradual, movimento característico de líder negativo, esse intranuvem foi classificado como invertido. No entanto, alguns raios intranuvem foram considerados com tipo inconclusivo, pois observou-se nos vídeos que o canal do líder já estava todo desenvolvido dentro da imagem, não sendo possível indicar a direção e a forma de propagação.

Dentro dessa amostragem de 113 raios intranuvem temos três raios com vídeos em melhor qualidade, que cobrem a maior parte da duração desses intranuvem, incluindo a propagação inicial acompanhados de dados de campo elétrico nítidos e com pouco ruído. Esses raios foram melhor detalhados e suas características relatadas nesse trabalho.

3.2 A aquisição dos dados

3.2.1 Câmeras rápidas

As câmeras rápidas usadas para adquirir esses dados estavam configuradas em diferentes taxas de aquisição, que variam de 1000 a 37819 imagens por segundo (ips). São elas: a Motion Scope PCI 8000S e a Photron Fast Cam, que fazem até 8000 ips; e as Phantoms, modelos V310 e V711, que fazem até cerca de 40000 ips.

Todas as câmeras possuem antenas com tempo GPS sincronizado e cada imagem que compõe o raio possui o tempo estampado com precisão de microssegundos. O início de gravação dos vídeos é dado de forma manual através de um *trigger*, que é acionado quando o raio é percebido pelo observador. (FERRO; SABA; PINTO, 2009)

As câmeras foram configuradas para adquirir imagens anteriores ao *trigger* (SABA; PINTO; BALLAROTTI, 2006) dessa forma pouca informação é perdida devido ao tempo de resposta do observador.

Outras configurações das câmeras levam em conta diversos fatores como área do sensor interno, a distância entre o possível local onde ocorrem os raios e a câmera, a quantidade de tempo em que a câmera adquiriu imagens e o ângulo de abertura da lente que foi utilizada para as aquisições dos vídeos. Todos esses fatores variaram durante as campanhas.

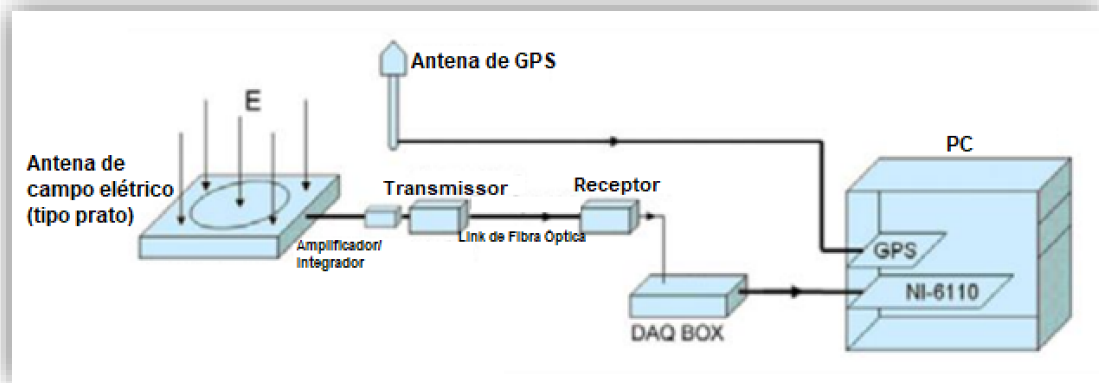
Cada sequência de imagens adquirida é armazenada em um computador para ser analisada posteriormente (SABA; PINTO; BALLAROTTI, 2006).

3.2.2 Sensor de campo elétrico

Os perfis de campo elétrico foram adquiridos com o uso de antenas de campo elétrico do tipo prato, com um integrador/ amplificador conectado a uma placa de aquisição de dados (modelo: NI PCI – 6110) e a uma caixa de aquisição de dados (modelo: DAQ BOX NI BNC-2110), e um receptor de GPS (modelo: Meinberg GPS168PCI) conectado a um computador (SABA et al., 2010).

A Figura 3.1 mostra o esquema de montagem das antenas de campo elétrico.

Figura 3.1 - Esquema de montagem e aquisição dos dados de campo elétrico.

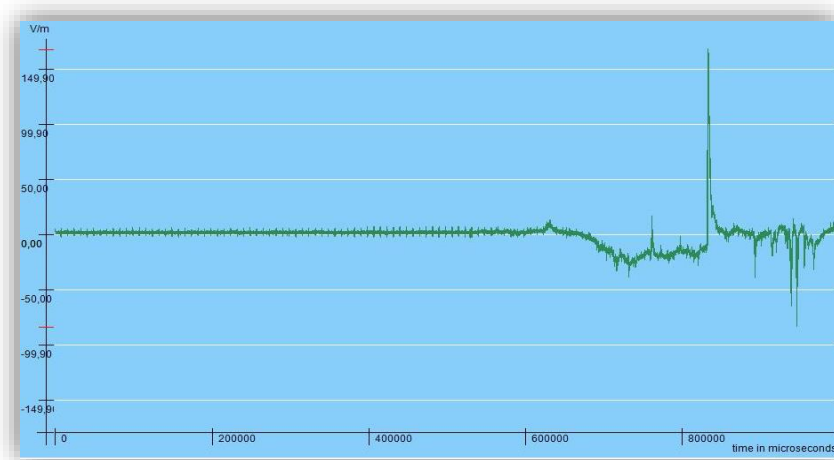


As perturbações no campo elétrico medidas através da antena, são amplificadas e integradas e transmitidas através de fibra óptica para a caixa de aquisição de dados (DAQ BOX) e então são armazenadas nos discos do computador (PC) junto com o seu respectivo horário adquirido através da antena de GPS.

Fonte: Adaptado de Schulz et al. (2005).

O campo elétrico adquire a uma taxa de 5 milhões de amostras por segundo e essa aquisição é contínua, ou seja, uma vez ligado a aquisição de dados de campo elétrico continua até atingir o máximo de armazenamento da mídia, ou até ser desligado. Os arquivos contendo a variação de campo elétrico no tempo são separados a cada um segundo e são sincronizados com os dados de GPS. (SCHULZ et al., 2005)

Figura 3.2 - Perfil de campo elétrico adquirido através de um sensor de campo elétrico.



Perfil de campo elétrico no tempo.

Fonte: Produção da autora.

3.3 O leitor de luminosidade

Para analisarmos a intensidade luminosa dos raios foi desenvolvido um código em linguagem *python* cuja funcionalidade do programa está relacionada à leitura das imagens que compõe o vídeo desse raio.

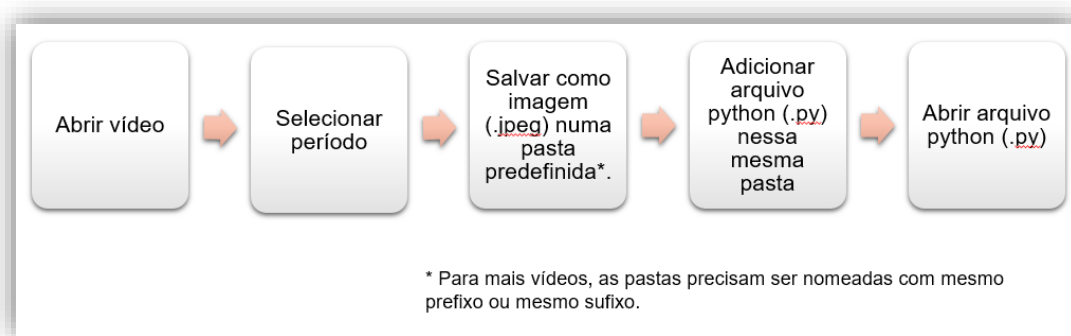
Cada vídeo de raio é salvo em imagens em formato JPG (*Joint Photograph Expert Group*) sendo esse recurso disponibilizado pelo programa da própria fabricante das câmeras. O código desenvolvido faz a leitura dessas imagens quantificando o valor de cada pixel que compõe cada imagem, formando uma matriz numérica. Esses valores têm como base a escala monocromática de tons de cinza.

Cada pixel que compõe a imagem pode assumir um valor na escala de cinza definida pelo número bits usados para compor essa imagem, logo esses valores podem variar em 2^8 valores, onde oito é o valor máximo de bits. Zero é o valor assumido por um pixel preto numa extremidade da escala, e 255 é o valor assumido por um pixel branco na outra extremidade da escala, portanto os tons de cinza variam dentro desse intervalo (BARELLI, 2019).

O código lê as imagens como matrizes numéricas, atribuindo para cada pixel um valor numérico correspondente à sua cor dentro da escala de cinza. Então soma-se a quantidade de pixels claros, acima de um valor predeterminado ajustado através de testes. Por exemplo, podemos somar todos os pixels da imagem que possuem valor maior ou igual a 50 e ter como resultado um gráfico mais detalhado. Se selecionamos pixels mais claros, com valor maior que 150, por exemplo, teremos gráficos com curvas mais suaves. Esses valores podem ser ajustados de acordo com a finalidade da análise. Somando pixels com valores baixos estaremos incluindo as alterações mais tênues de luminosidade, seja essas alterações de canais decaindo ou até mesmo de líderes de recuo menos intensos. Se utilizarmos apenas pixels com valores altos, apenas mudanças extremas de luminosidade serão analisadas. Em seguida, à cada imagem associa-se o resultado da soma do valor dos pixels selecionados.

O diagrama (Figura 3.3) indica o procedimento para se obter as imagens do vídeo e como devem ser armazenadas de forma que possam ser processadas pelo programa.

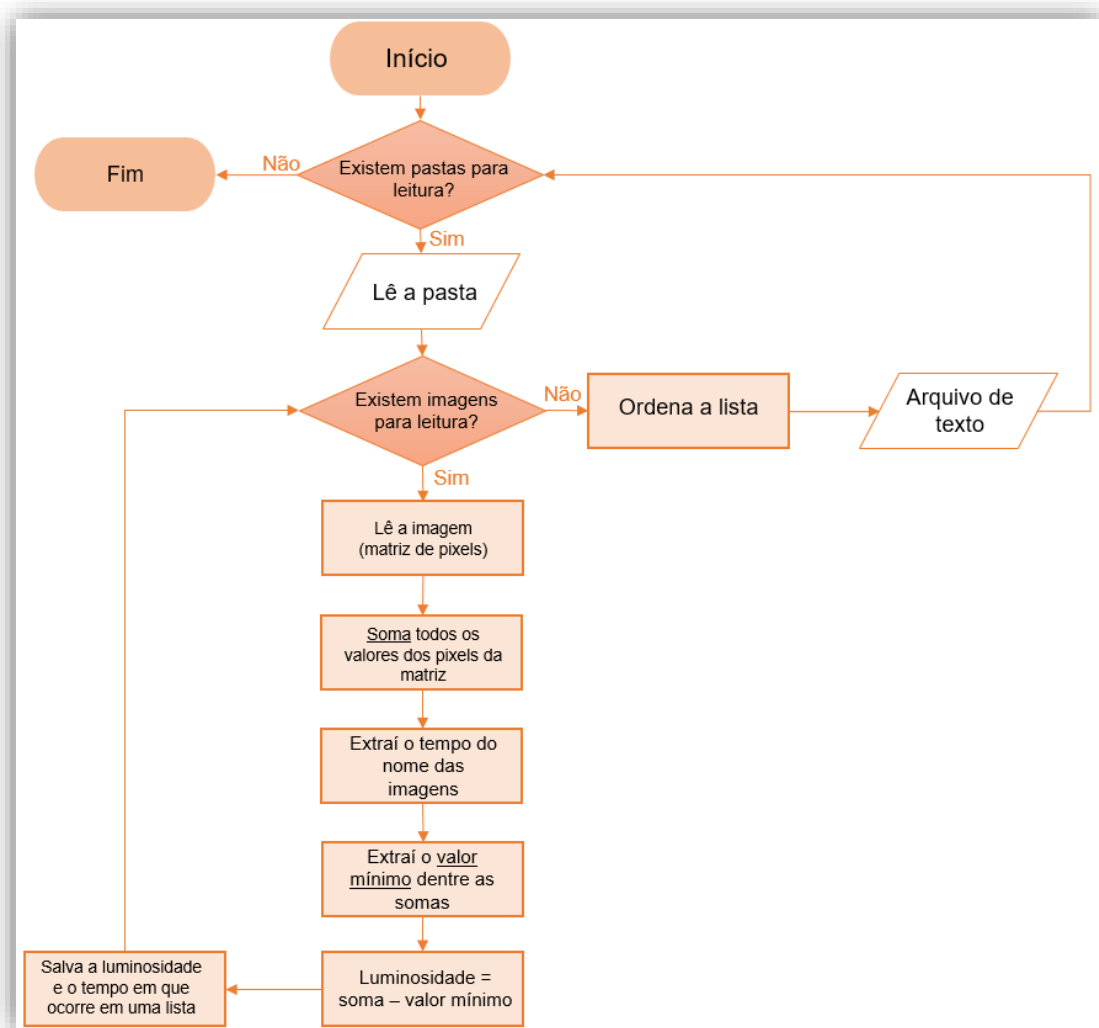
Figura 3.3 - Diagrama de procedimento para obtenção das imagens dos vídeos de câmera rápida.



Fonte: Produção da autora.

Já o fluxograma, da Figura 3.4, descreve o algoritmo seguido pelo programa.

Figura 3.4 - Fluxograma de funcionamento do programa que calcula a luminosidade.



O fluxograma descreve o algoritmo seguido pelo programa com a finalidade de produzir os perfis de luminosidade dos raios analisados.

Fonte: Produção da autora.

O programa seleciona uma imagem de fundo, que é uma imagem que não possui nenhum elemento visual que compõe a descarga atmosférica, com a menor quantidade de pixels claros, como por exemplo a Figura 3.5.

Figura 3.5 - Imagem de fundo.



Fonte: Produção da autora.

Selecionada essa imagem de fundo o programa realizará a soma de todos os valores dos pixels que a compõe e então esse valor é retirado, numericamente, de todas as imagens que compõe o raio, como na Figura 3.6.

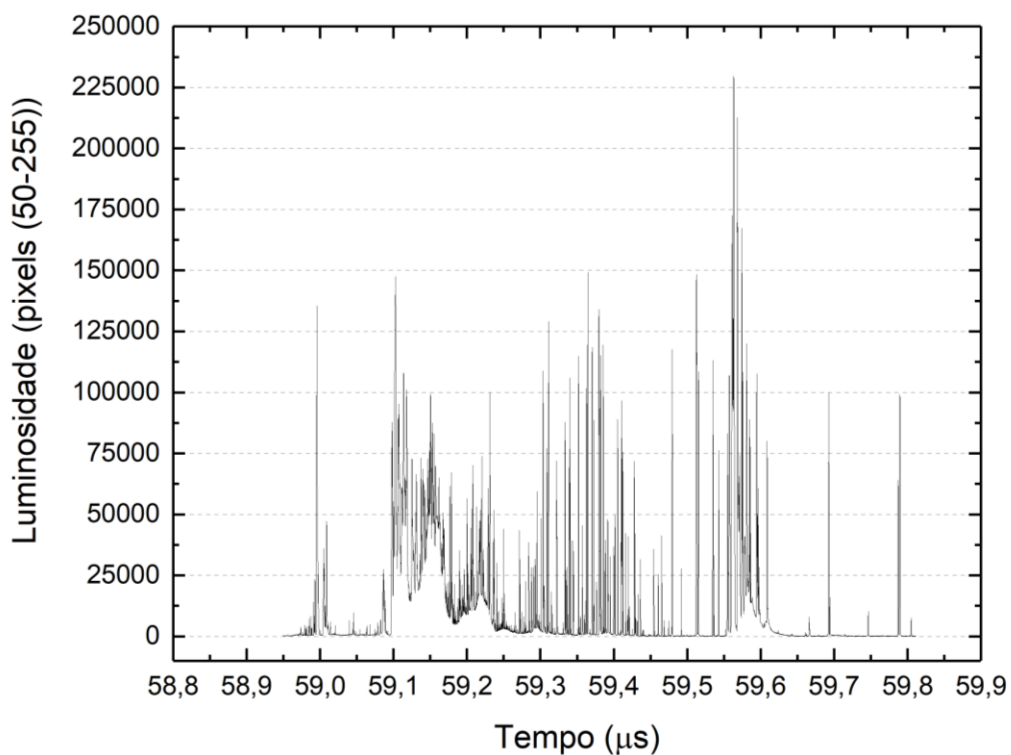
Figura 3.6 - Imagem com registro de raio.



Fonte: Produção da autora.

Logo, quando produzimos uma curva de luminosidade a partir dos dados gerados pelo programa, o gráfico de luminosidade por tempo corresponde a luminosidade produzida apenas por esse raio, como pode ser observado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Perfil de Luminosidade.



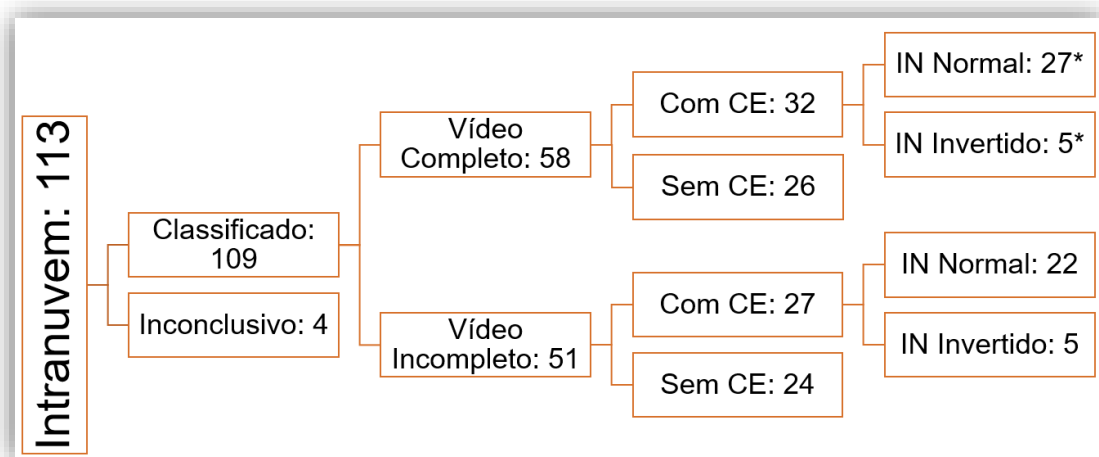
Fonte: Produção da autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise estatística

A análise estatística foi realizada seguindo o diagrama da Figura 4.1.

Figura 4.1 - Diagrama dos dados analisados.

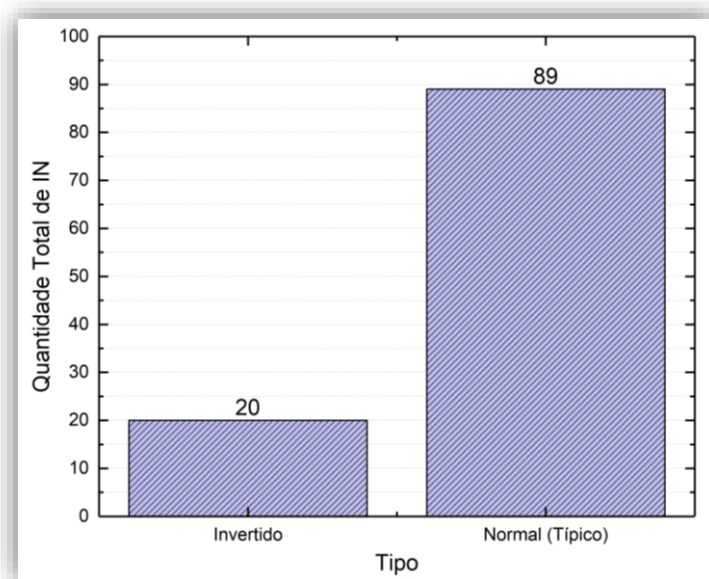


IN: raio intranuvem; CE: Campo elétrico. *Indica que há perda calculada dos dados de duração do raio durante a gravação, mesmo que o raio pareça ter seu completo desenvolvimento registrado pela câmera.

Fonte: Produção da autora.

Dos 113 raios estudados, 89 são do tipo normal, onde o líder visível na base da nuvem possui polaridade positiva; 20 são do tipo invertido, onde o líder visível na base da nuvem possui polaridade negativa (Figura 4.2); e em 4 raios não foi possível identificar a polaridade do líder visível.

Figura 4.2 - Distribuição dos raios intranuvem de acordo com a sua classificação.

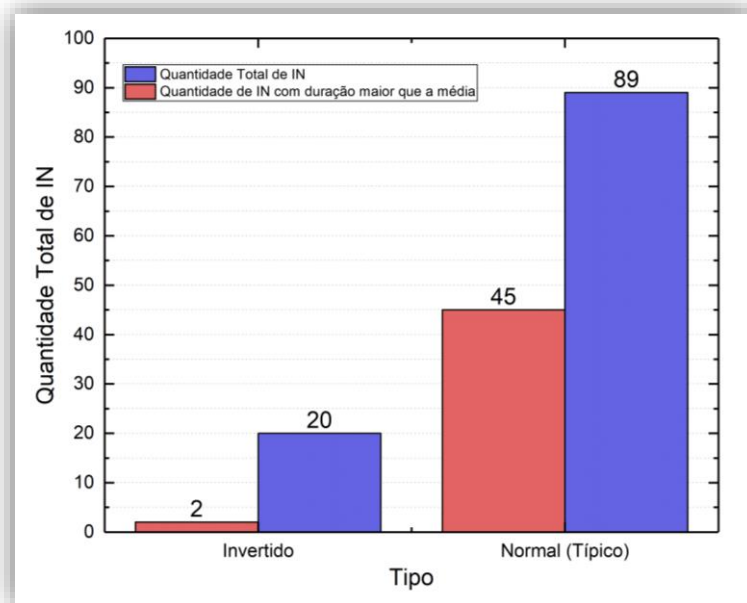


Fonte: Produção da autora.

A média geral de duração desses raios intranuvem é de 515 ms, com duração mínima de 28 ms e máxima de 1504 ms. Essa média foi adquirida através do vídeo, a partir do momento em que o canal surge na nuvem até o momento de completo decaimento do canal.

Observando a Figura 4.3 nota-se que 51% dos intranuvem do tipo normal possuem duração maior que a média geral, enquanto nos invertidos apenas 10% duram mais que 515 ms. O próprio processo de desenvolvimento dos raios intranuvem pode explicar essa discrepância.

Figura 4.3 - Comparativo entre a classificação dos raios e a sua duração média.

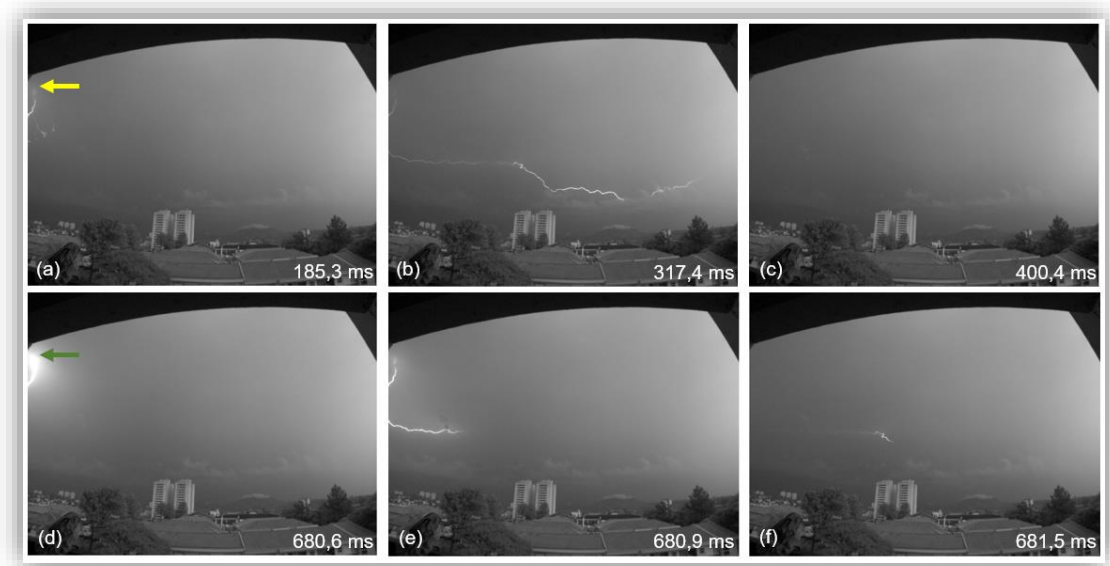


Fonte: Produção da autora.

Com o decaimento do canal vertical (MAZUR, 2016a), onde existe a conexão entre os líderes positivos e negativos do raio, os líderes de recuo (LR) que surgem somente na extremidade positiva e que mantem essa extremidade ativa, raramente possuem energia suficiente para reionizar o canal principal (CP) e consequentemente o líder negativo. Então a extremidade negativa tende a se manter menos tempo ativo que a extremidade positiva dos raios intranuvem.

Em alguns poucos casos, os LR possuem energia suficiente para reionizar não apenas os canais do líder positivo, mas também para seguir reionizando o canal vertical e também o líder negativo decaído. Um exemplo pode ser observado na Figura 4.4, onde de (a) e (b) temos o desenvolvimento inicial do líder negativo, e após o decaimento do líder em (c), observamos que ele é reionizado a partir da sua origem da nuvem (imagens de (d) a (f)).

Figura 4.4 - Reionização do líder negativo por meio de um líder de recuo que surge da origem do canal.

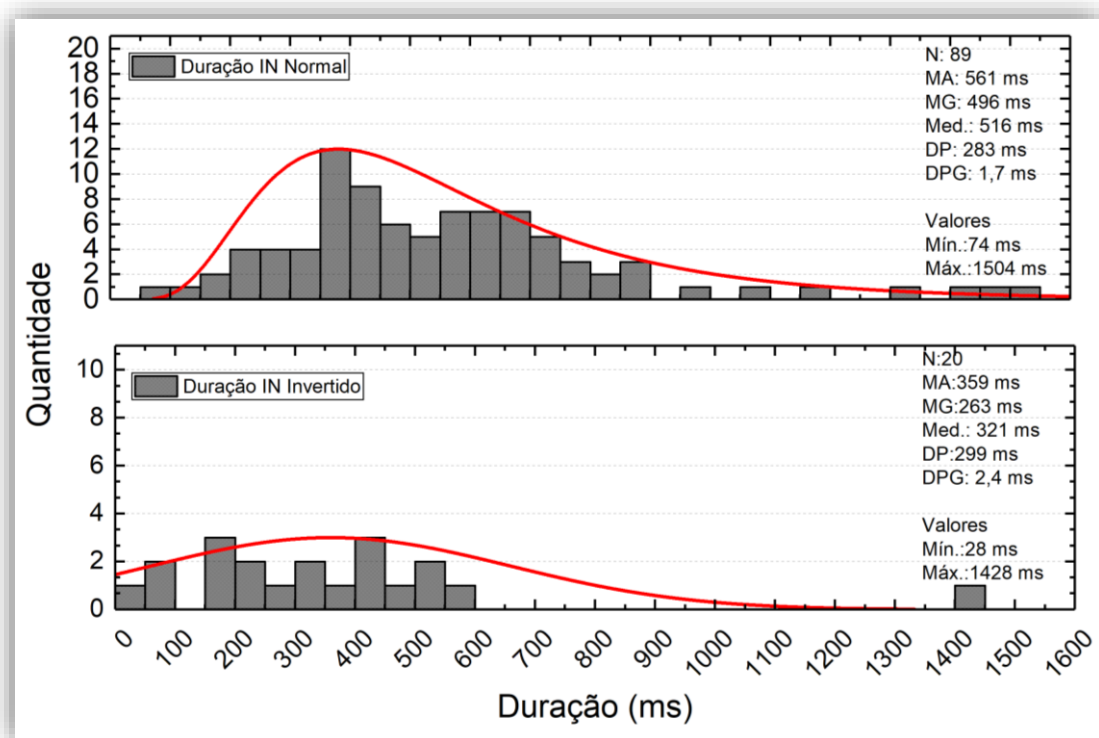


A seta amarela em (a) indica o líder negativo e o início de sua propagação na base da nuvem; (b) e (c) ilustram o desenvolvimento e decaimento do líder negativo, respectivamente. Em (d) a seta verde indica o aparecimento de uma intensificação vinda da nuvem, causada por um líder de recuo (que ocorre no líder positivo que se encontra dentro da nuvem), em (e) e (f) temos a reativação do líder e o início do seu decaimento, respectivamente.

Fonte: Produção da autora.

Quanto a duração do raio intranuvem, podemos observar na Figura 4.5 a distribuição de duração tanto para o intranuvem do tipo normal quanto para o intranuvem do tipo invertido.

Figura 4.5 - Distribuição da duração medida através de vídeo para os raios intranuvem de acordo com sua classificação.



A quantidade de raios intranuvem das amostras estão representados pela letra N. Já as médias aritméticas e geométricas são representados por MA e MG, respectivamente. O desvio padrão e o desvio padrão geométrico são representados por DP e DPG. Por fim, MED indica a mediana da amostra.

Fonte: Produção da autora.

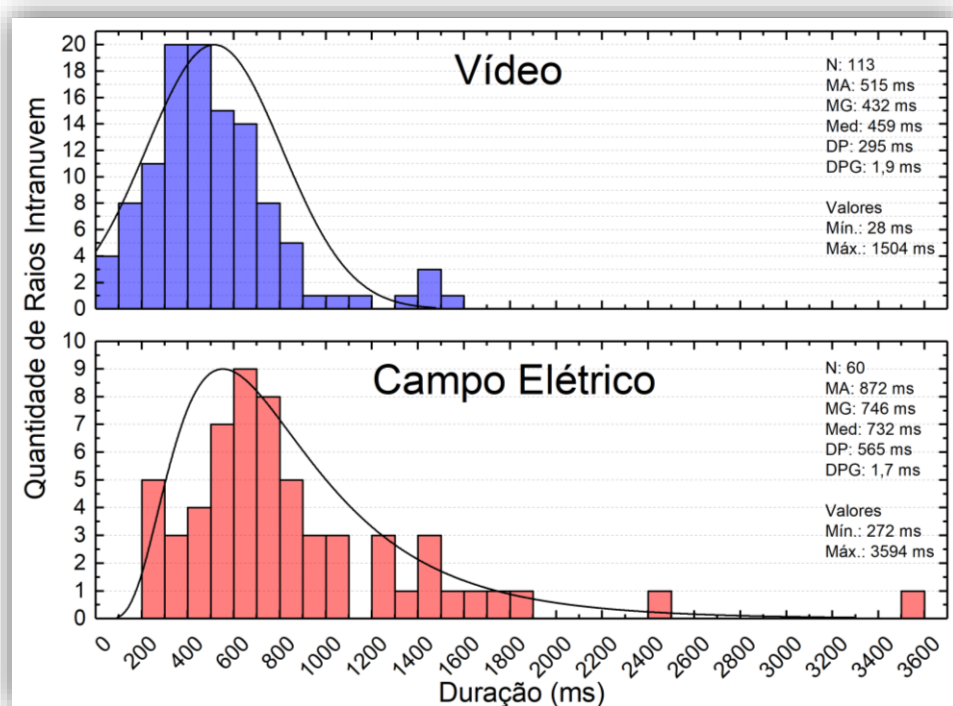
A média de duração de um intranuvem do tipo normal (561 ms) se aproxima mais da média geral (515 ms), enquanto a média de duração do intranuvem do tipo invertido (360 ms) é 30% menor.

Apesar da amostra principal desse trabalho ser de 133 raios intranuvem, apenas 60 possuem dados de campo elétrico legível. Alguns dos raios não possuem um perfil de campo elétrico e outros que possuem apresentam ruídos que não permitem a distinção entre o ruído e perturbação de campo elétrico causado por esse raio.

Com os 60 perfis de campo elétrico foi possível estimar a duração de cada intranuvem e então comparar com a duração obtida através dos vídeos.

Na Figura 4.6 temos a distribuição da duração dos raios no campo elétrico.

Figura 4.6 - Distribuição da duração medida através de campo elétrico para os raios intranuvem de acordo com sua classificação.



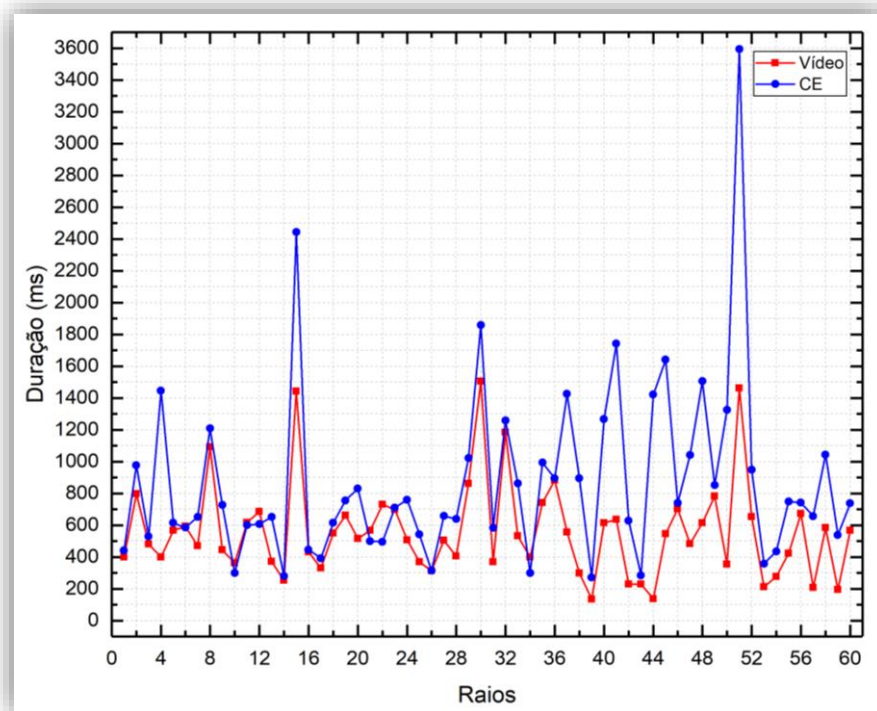
A quantidade de raios intranuvem das amostras estão representados pela letra N. Já as médias aritméticas e geométricas são representados por MA e MG, respectivamente. O desvio padrão e o desvio padrão geométrico são representados por DP e DPG. Por fim, MED indica a mediana da amostra.

Fonte: Produção da autora.

Boa parte do desenvolvimento do intranuvem se dá dentro da nuvem aparecendo difuso e com visibilidade diminuída devido à grande quantidade de partículas de água. Além disso os líderes do raio intranuvem possuem grande desenvolvimento horizontal. Portanto, mesmo sendo difuso, a quebra de rigidez inicial e parte do desenvolvimento desse raio pode não ocorrer dentro do campo de visão da câmera.

A seguir, na Figura 4.7, o gráfico de linha compara, para cada raio, a sua duração dada pelas imagens no vídeo (linha vermelha) com sua duração dada pelo campo elétrico (linha azul).

Figura 4.7 - Comparação da duração dos raios de acordo com campo elétrico e vídeo.



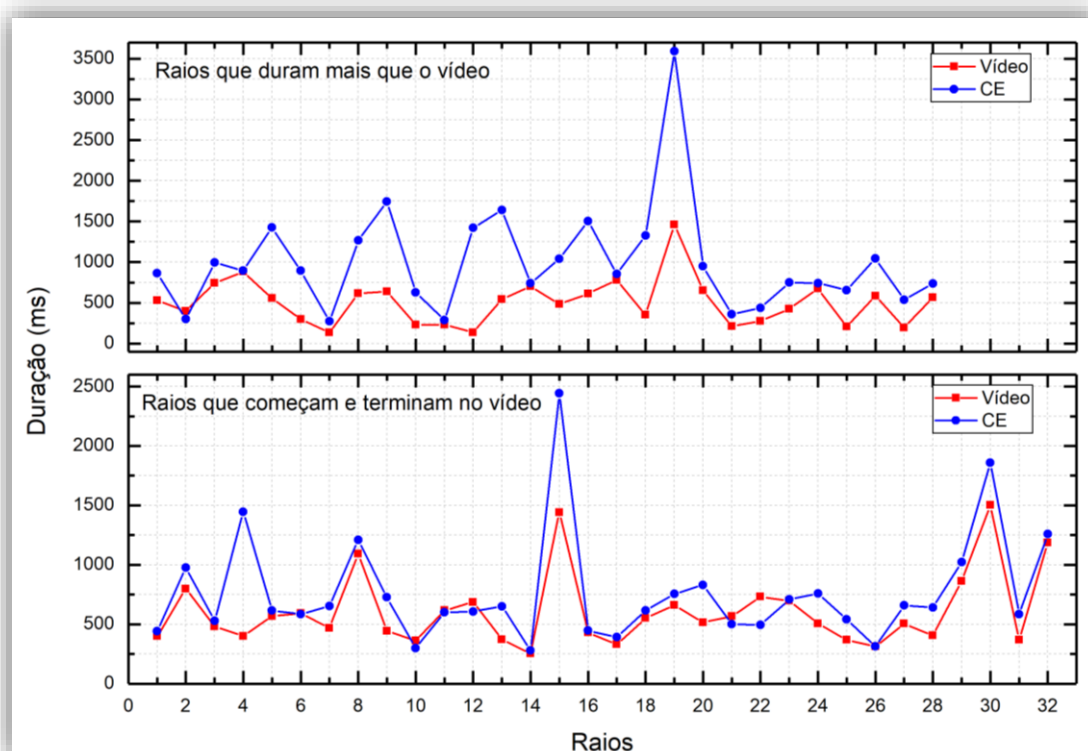
A linha azul indica a duração encontrada para os raios intranuvem durante a análise dos seus respectivos dados de campo elétrico. Já a linha vermelha indica a duração encontrada analisando as imagens dos vídeos de câmera rápida.

Fonte: Produção da autora.

Durante a análise dos vídeos também foi observado que houve dois tipos de registro, o primeiro tipo é quando o vídeo começa e o canal do raio já estava iniciado e/ou ainda quando o vídeo termina o canal do raio ainda estava ativo. A duração dos raios nessa situação está ilustrada no primeiro gráfico da Figura 4.8.

No segundo tipo esse raio possui, visualmente, todo o seu desenvolvimento registrado pelo vídeo, ou seja, ele começa e termina durante o registro do vídeo. E a duração desses raios pode ser analisada através do segundo gráfico da Figura 4.8.

Figura 4.8 - Duração dos raios intranuvem de acordo com o tipo de vídeo.



Fonte: Produção da autora.

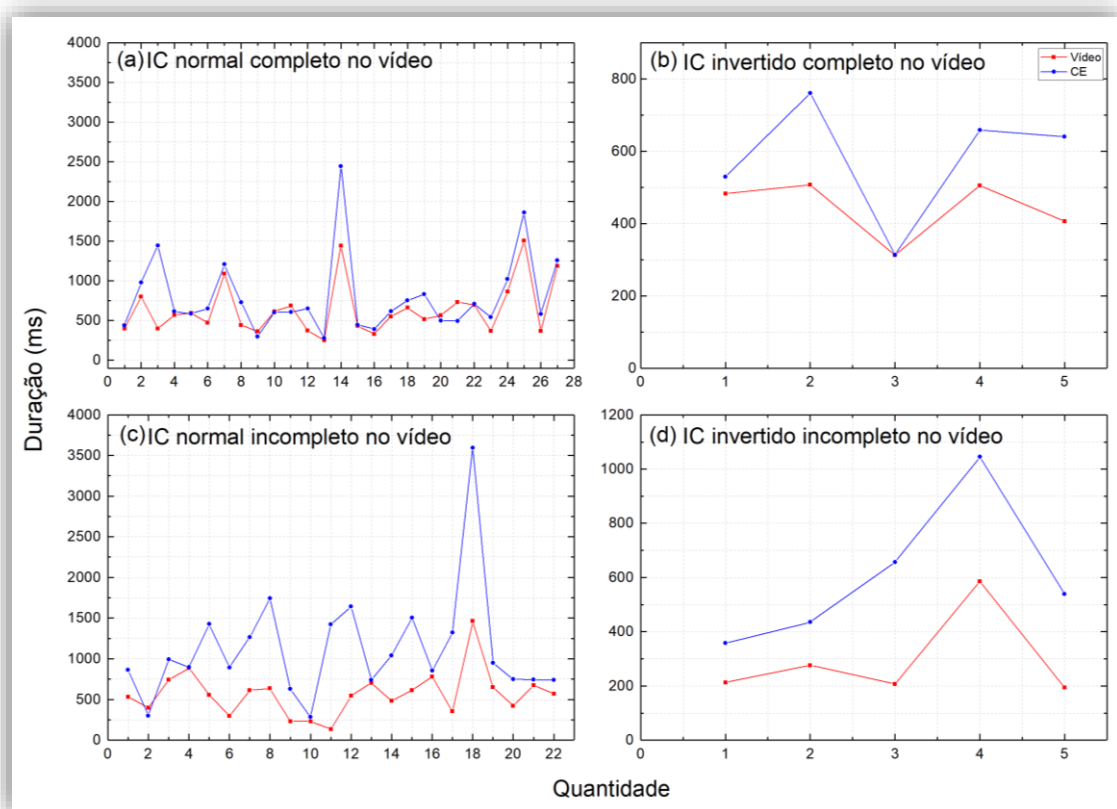
Com essa divisão, nota-se que a discrepância de duração é maior para os casos onde os raios já estavam acontecendo antes de começarem a serem filmados ou continuaram acontecendo após o término da filmagem.

Já para os raios que se desenvolvem totalmente dentro do vídeo, os raios 4 e 15 se sobressaem por demonstrar uma grande diferença entre a duração registrada pelo vídeo e pelo campo elétrico. Apesar da origem desse canal na nuvem estar registrado em vídeo, parte do desenvolvimento desses raios podem ter ocorrido

fora do campo de visão da câmera devido à grande extensão horizontal dos raios intranuvem.

Na Figura 4.9, a duração dos raios foi separada não só por tipo de registro como também por tipo de intranuvem.

Figura 4.9 - Duração por tipo de vídeo e por tipo de classificação do intranuvem.



Os gráficos comparam o tempo de duração do intranuvem para os valores obtidos em vídeo e através do campo elétrico para os raios: (a) intranuvem normais que são completos no vídeo, (b) intranuvem invertidos também completos no vídeo, (c) intranuvem normais incompletos no vídeo, (d) intranuvem invertido incompleto no vídeo.

Fonte: Produção da autora.

Os raios incompletos dentro do vídeo são assim devido a três fatores. O primeiro é pelo raio ter seu início fora da imagem que está sendo gravada pela câmera. Esse fator não pode ser controlado devido a imprevisibilidade e o período de duração de uma descarga atmosférica.

Os outros dois fatores tratam do período de duração da gravação. Ou a gravação acaba antes do fim do canal desse raio, ou a gravação começa após a propagação do líder em frente a câmera. Esse tempo de aquisição de imagens é programado previamente e leva em conta a capacidade de aquisição da câmera e também de outros fatores, como tamanho da imagem, a taxa de aquisição, tamanho do disco onde esses vídeos estão sendo salvos e taxa de transferência desses vídeos para esse disco, entre outros. Sendo então fatores complexos, mas possíveis de serem resolvidos.

Para os raios intranuvem que possuem duração completa dentro do vídeo foi estimado a porcentagem de perda a partir da média das razões entre a duração no campo elétrico (D_E) e a duração no vídeo (D_V).

Existem 32 raios que possuem campo elétrico e duração completa gravada em vídeo. Desses 32, 27 são do tipo normal e 5 do tipo invertido. Para cada um desses 32 raios intranuvem foi calculada a razão e então a média dessas razões de acordo com a Equação (4.1).

$$Média \frac{D_E}{D_V} = \frac{\sum D_E/D_V}{x} \quad (4.1)$$

Onde, D_E é a duração do raio no campo elétrico, D_V é a duração do raio no vídeo e x é a quantidade de raios intranuvem.

A Equação (4.1) foi aplicada para o total de raios intranuvem completos dentro do vídeo. Nesse caso, x é igual a 32 e a relação encontrada entre D_E e D_V é:

$$D_E^{total} = 1,283. D_V^{total} \quad (4.2)$$

Resultados iguais a (4.2) foram encontradas para os raios intranuvem normal (4.3) e invertido (4.4).

$$D_E^{normal} = 1,281. D_V^{normal} \quad (4.3)$$

$$D_E^{invertido} = 1,293. D_V^{invertido} \quad (4.4)$$

Os resultados de (4.3) e (4.4) indicam que a taxa de perda da câmera em relação a duração do raio obtida através de campo elétrico, independentemente do tipo desse raio intranuvem, é de 30%. Esse valor indica que, em média, os raios intranuvem duram 30% a mais do que está sendo registrado pela câmera.

Esses 30% de perda que a câmera possui em relação ao campo elétrico vem do desenvolvimento do líder que está oculto pela nuvem. O desenvolvimento desse líder pode se dar fora do campo de visão da câmera ou em regiões mais profundas da nuvem.

A Tabela 4.1 a seguir compara as informações que conhecemos acerca dos raios no Brasil com as informações obtidas através desse estudo.

Tabela 4.1 - Informações sobre a duração dos raios no Brasil.

Raio	Amostra	MA (DP)	MG (DPG)	Mediana	
Intranuvem	113	515 (295) ms	432 (1,9) ms	459 ms	Estudo Atual
Descendente Negativo	179	-	229 (1,1) ms	-	(SARAIVA et al., 2010)
	736	423 ms	-	300 ms	(SABA et al., 2016)
Descendente Positivo	40	177 ms	-	-	(PINTO JR. et al., 2009)
Ascendente Negativo	72	427 ms	372 ms	430 ms	(SABA et al., 2016)

Fonte: Produção da autora.

Através desse estudo observou-se que os raios intranuvem possuem duração mais longa que os raios que tocam o solo. Os raios intranuvem duram quase três vezes mais que os raios descendentes positivos, e duram cerca de 20% a mais que os descendentes negativos e os ascendentes negativos.

4.2 Características específicas

A fim de determinar características específicas relacionadas aos raios intranuvem, foi realizado um estudo mais detalhado em três raios intranuvem dos 113 da amostra final. Os critérios para escolha desses raios intranuvem foram a boa visibilidade dos canais e a qualidade dos dados de sensores de campo elétrico (pouco ruído).

Os raios R81, R82 e R85 ocorreram no dia 22 de janeiro de 2014, e aparecem nas fotos das Figura 4.10 a Figura 4.12.

Figura 4.10 - Raio R81.



Fonte: INPE (2014).

Figura 4.11 - Raio R82.



Fonte: INPE (2014).

Figura 4.12 - Raio R85.



Fonte: INPE (2014).

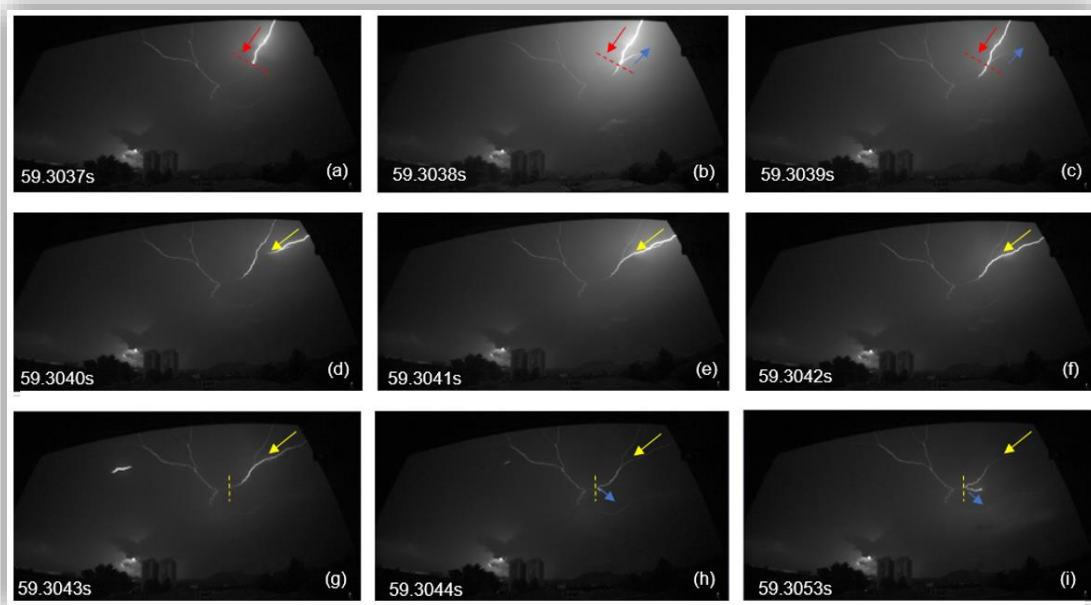
A análise específica desses vídeos aponta características comuns aos três raios em questão, mas que também são observadas em outros raios dessa pesquisa.

É possível observar reionização de ramos preexistentes, a conexão desses com LR e a reflexão de corrente que ocorre dentro do CP.

4.2.1 Reionização de ramo preexistentes

Ao se propagar por um canal decaído o LR o reioniza e aumenta a luminosidade desse canal. No entanto, dependendo do quanto esse canal se encontra decaído, esse LR não consegue prosseguir com a reionização. Se em um lugar do canal existiu uma bifurcação, o LR passa a se propagar pelo ramo que existia nessa bifurcação e não mais pelo CP.

Figura 4.13 - Reionização de ramo preexistente no raio R81.



(a) Líder de recuo percorrendo o canal do raio R81 reionizando ramos preexistentes; (b) parte do líder de recuo começa a se propagar pelo ramo preexistente; já em (c) o ramo começa a decair novamente; Em (d), (e), (f) e (g) outro líder de recuo aparece seguindo em direção ao canal principal; Em (h) e (i) é possível observar que um segundo ramo se reioniza por causa do segundo líder de recuo.

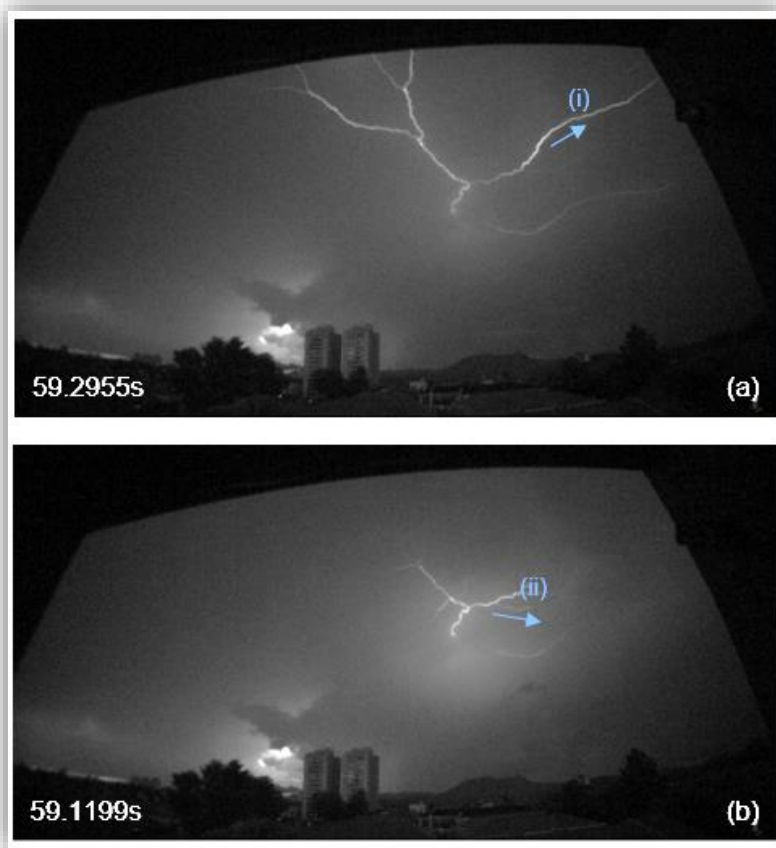
Fonte: Produção da autora.

Observa-se que nos frames de (b) a (d) da Figura 4.13, o primeiro LR não consegue se propagar efetivamente até a origem do CP, e nem mesmo o

segundo LR que percorre parte do caminho do primeiro consegue avançar significativamente, como podemos observar nos frames de (g) a (i). Nenhum dos dois LR conseguem efetivamente reionizar o CP todo.

Na Figura 4.14 podemos observar a preexistência dos canais que foram reionizados por esses líderes de recuo no raio R81.

Figura 4.14 - Preexistência dos ramos no raio R81.



Em (a) podemos observar o ramo (i) por onde parte do líder de recuo (seta vermelha - Figura 4.13) se propagou reionizando-o 8,3 ms depois; e em (b) observamos o ramo (ii) por onde parte do líder de recuo (seta amarela - Figura 4.13) se propagou 184,6 ms depois.

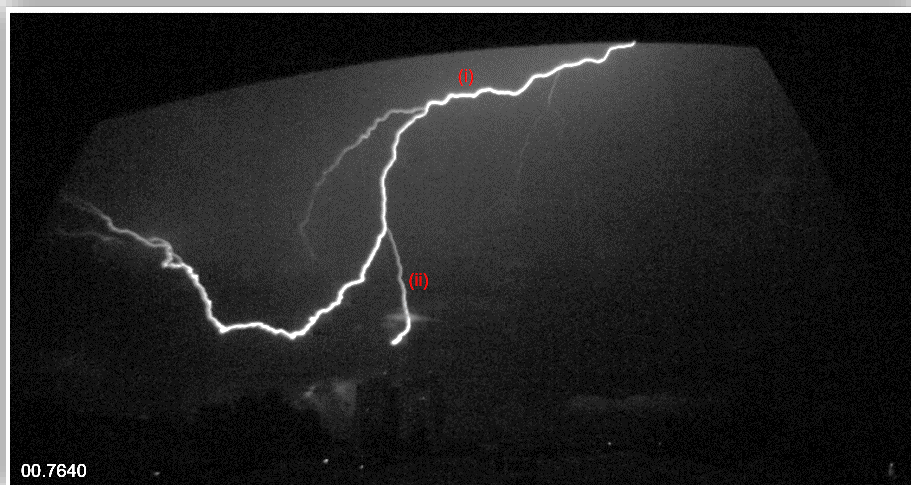
Fonte: Produção da autora.

Existem cerca de 48 reionização de ramos preexistentes visível no raio R81, onde 14 conseguem reionizar todo o canal. Para o raio R82, ocorrem cerca de 32 reionização de ramos preexistentes, considerando apenas o canal visível que

foi objeto de estudo. Das 32 reionização dos ramos, apenas sete conseguem reionizar todo o CP.

Já para o raio R85, ocorreram 56 reionização de ramos preexistente, onde apenas 8 conseguem reionizar todo o CP. Na Figura 4.15 temos o CP do raio R85 (i) e o ramo preexistente em (ii). Em seguida, na Figura 4.16 observamos a reionização do ramo preexistente.

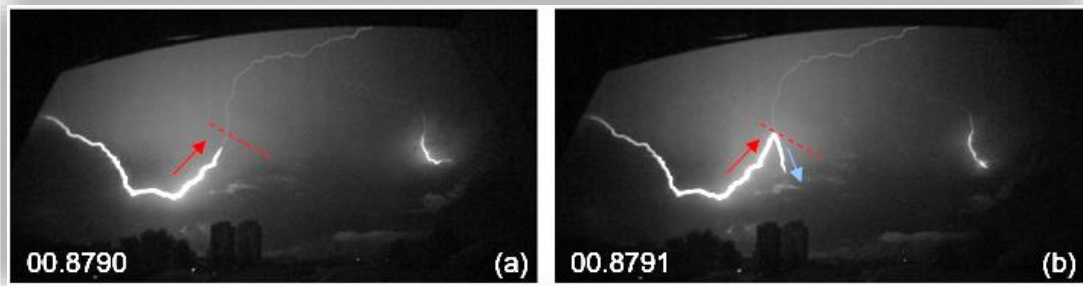
Figura 4.15 - Preexistência do canal no raio R85.



Temos em (i) canal principal e (ii) ramo preexistente.

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.16 - Reionização de ramo preexistente no raio R85.



(a) líder de recuo percorrendo parte do canal principal até que em (b) o líder de recuo reioniza o ramo preexistente.

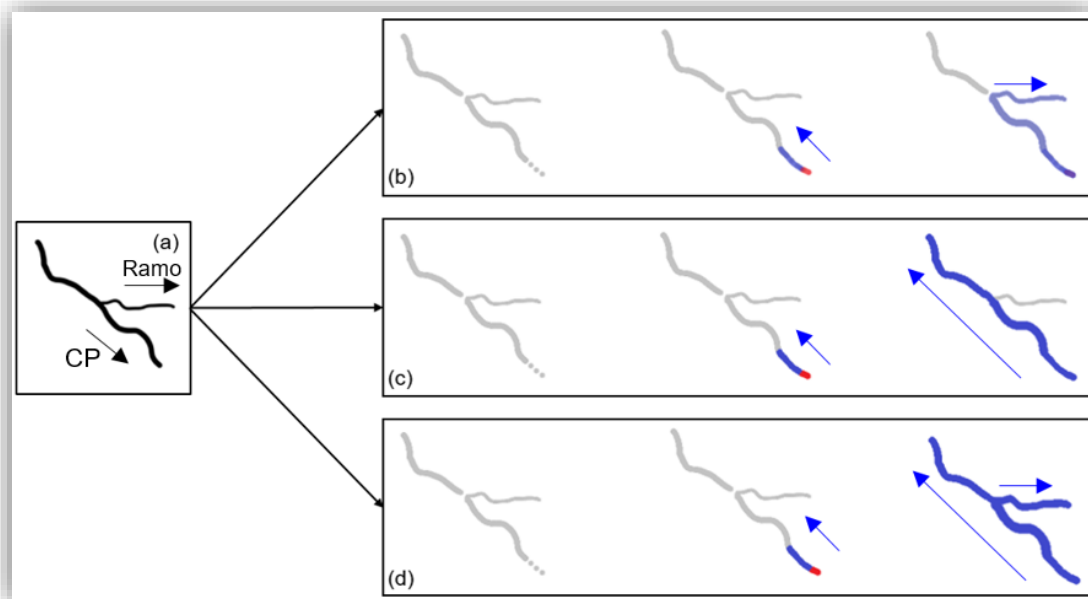
Fonte: Produção da autora.

Diferentemente do raio R81, onde o LR reioniza o ramo preexistente e avança um pouco além da bifurcação, no raio R85 o LR não ultrapassa essa bifurcação, reionizando apenas o ramo.

Em alguns casos de reionização de ramos preexistentes, o LR consegue reionizar todo o canal além dos ramos. A reionização do canal causada por esse LR é tão intensa que ramos preexistentes também são reionizados durante a sua propagação pelo CP.

Analisando as ocorrências nesses intranuvem foi possível observar que a reionização pode ocorrer de 3 formas distintas ilustradas na Figura 4.17, onde a reionização ilustrada em Figura 4.17 (b) é a mais comum.

Figura 4.17 - Formas de reionização de ramos preexistentes.

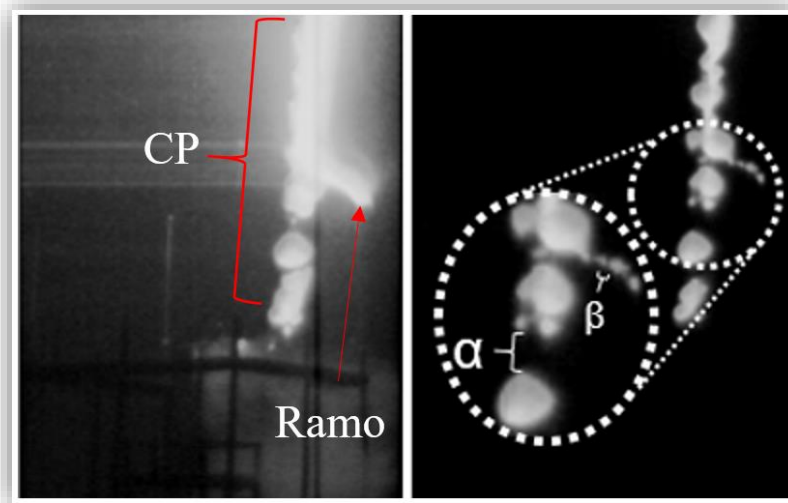


CP: Canal principal. Em (a) temos o canal antes do decaimento, as setas indicam a sua direção de propagação e a do ramo. (b) O líder de recuo pode não conseguir refazer o canal, mas apenas o ramo. Supõe-se então a existência de uma descontinuidade do canal próximo às bifurcações que geraram esse ramo, logo o líder de recuo não consegue refazer essa descontinuidade, sendo então mais fácil para ele seguir pelo ramo preexistente. Mas os líderes de recuo mais intensos podem reionizar o canal o principal (c), e também, além do canal principal reionizar os ramos (d).

Fonte: Produção da autora.

A existência dessas diferentes possibilidades de propagação dos LR pode ser explicada através dos resultados obtidos por Cruz (2022). Ao analisar LR do “tipo V”, Cruz (2022) indica que o CP admite um espaçamento maior nas regiões onde ocorre o rompimento do canal quando comparada com o espaçamento que corre na região de rompimento do ramo, como mostra a Figura 4.18.

Figura 4.18 – Espaçamento nas regiões de rompimento do canal do raio.



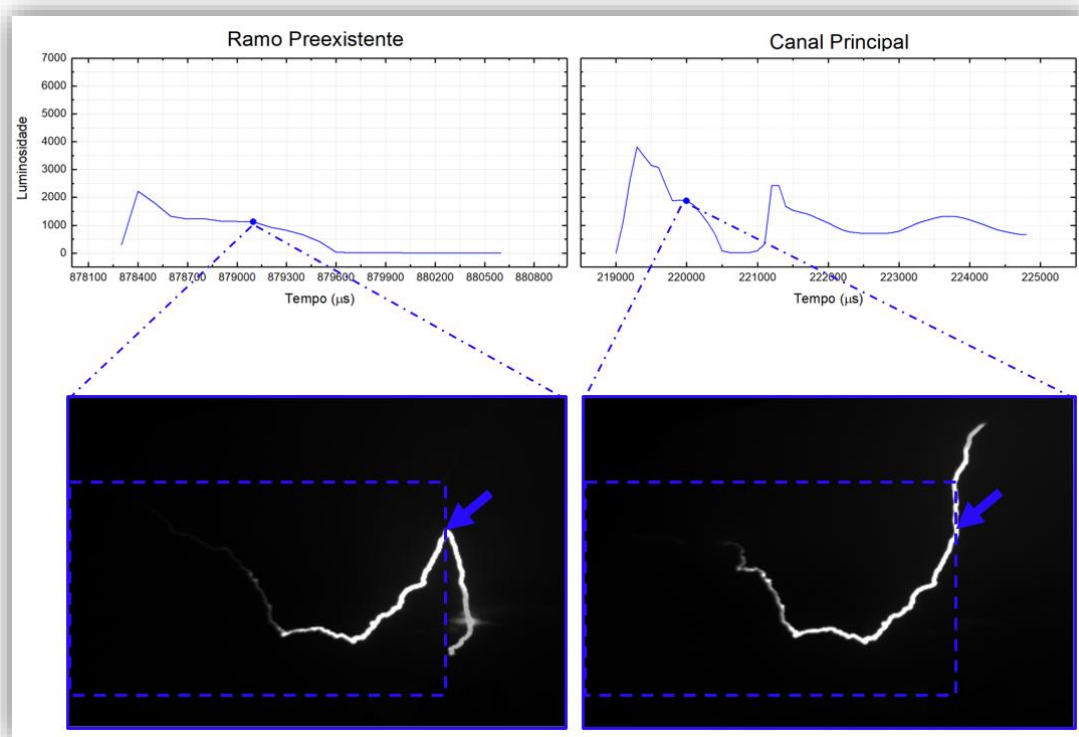
CP: Canal Principal. A figura indica o espaçamento nas regiões de rompimento do canal para o CP indicado por (α), e (β) para o ramo.

Fonte: Adaptado de Cruz (2022).

Dessa forma um LR com menos energia, consegue facilmente reionizar o ramo uma vez que o campo elétrico ali é muito mais intenso, no entanto para que o CP seja reionizado será necessário um LR com mais energia.

Para entender melhor a atuação do LR nessas situações, um gráfico de luminosidade no tempo foi traçado para um LR que reioniza o ramo preexistente e outro para um LR que reioniza o CP, ambos do raio R85 (Figura 4.19).

Figura 4.19: Perfis de luminosidade para líderes de recuo que reionizam diferentes regiões do canal.



O primeiro gráfico de luminosidade no tempo foi traçado para o líder de recuo que reioniza apenas o ramo preexistente. No segundo gráfico de luminosidade no tempo, a luminosidade do líder de recuo, que reioniza todo o canal principal, foi analisada. O ponto no gráfico indica o momento que o líder de recuo passa pela bifurcação, indica na imagem pela seta azul. O tracejado na figura delimita a parte da imagem que foi inserida no programa de luminosidade.

Fonte: Produção da autora.

A área tracejada delimita o canal, no raio R85, onde há a ocorrência dos líderes de recuo estudados. Essa delimitação é importante porque exclui uma área onde pode surgir outros LR que afetarão a luminosidade estudada. Já o período de tempo analisado compreende desde o seu surgimento na imagem até o decaimento da intensificação luminosa causada por ele.

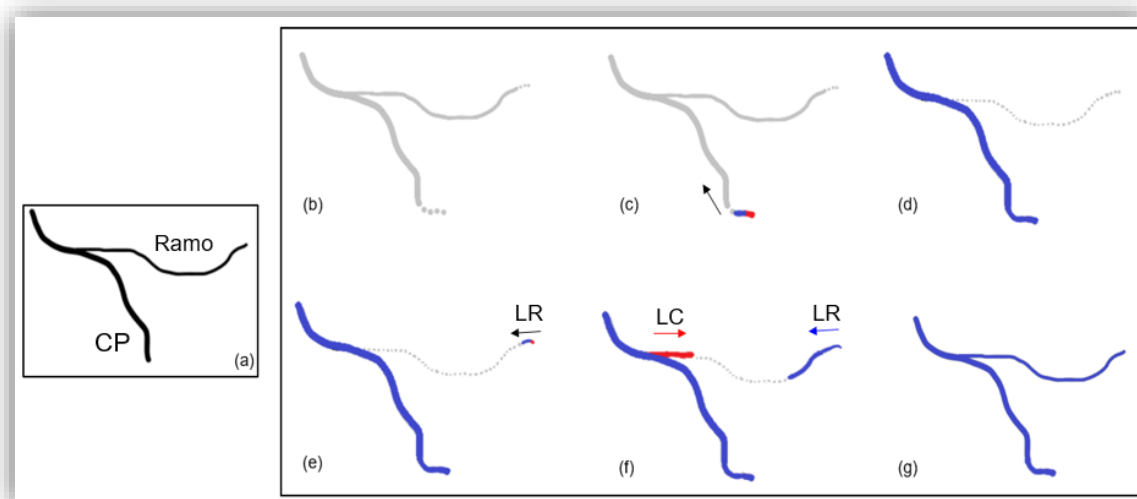
Os pontos nos gráficos indicam o momento em que o LR alcança a região da bifurcação entre o CP e a ramo. Observa-se que após atingir o ponto de bifurcação o LR que reioniza somente o ramo preexistente tem uma intensidade menor que o LR que reioniza o CP. A reionização de todo o canal estará sujeita

à intensidade desse LR. Um LR menos intenso só reionizará a ramificação enquanto que um LR mais intenso reionizará todo o canal.

4.2.2 Líder conectivo

Em alguns casos, a ocorrência dos ramos preexistentes pode ser estimulada por líderes de recuo (LR). Ao invés de reionizar o ramo preexistente, o líder de recuo induz o ramo a se reionizar através do surgimento de um líder na junção do ramo com o canal principal (CP). Chamamos esse líder de líder conectivo (LC). A Figura 4.20 ilustra essa situação.

Figura 4.20 - Ramo estimulado se conectando a um líder de recuo.

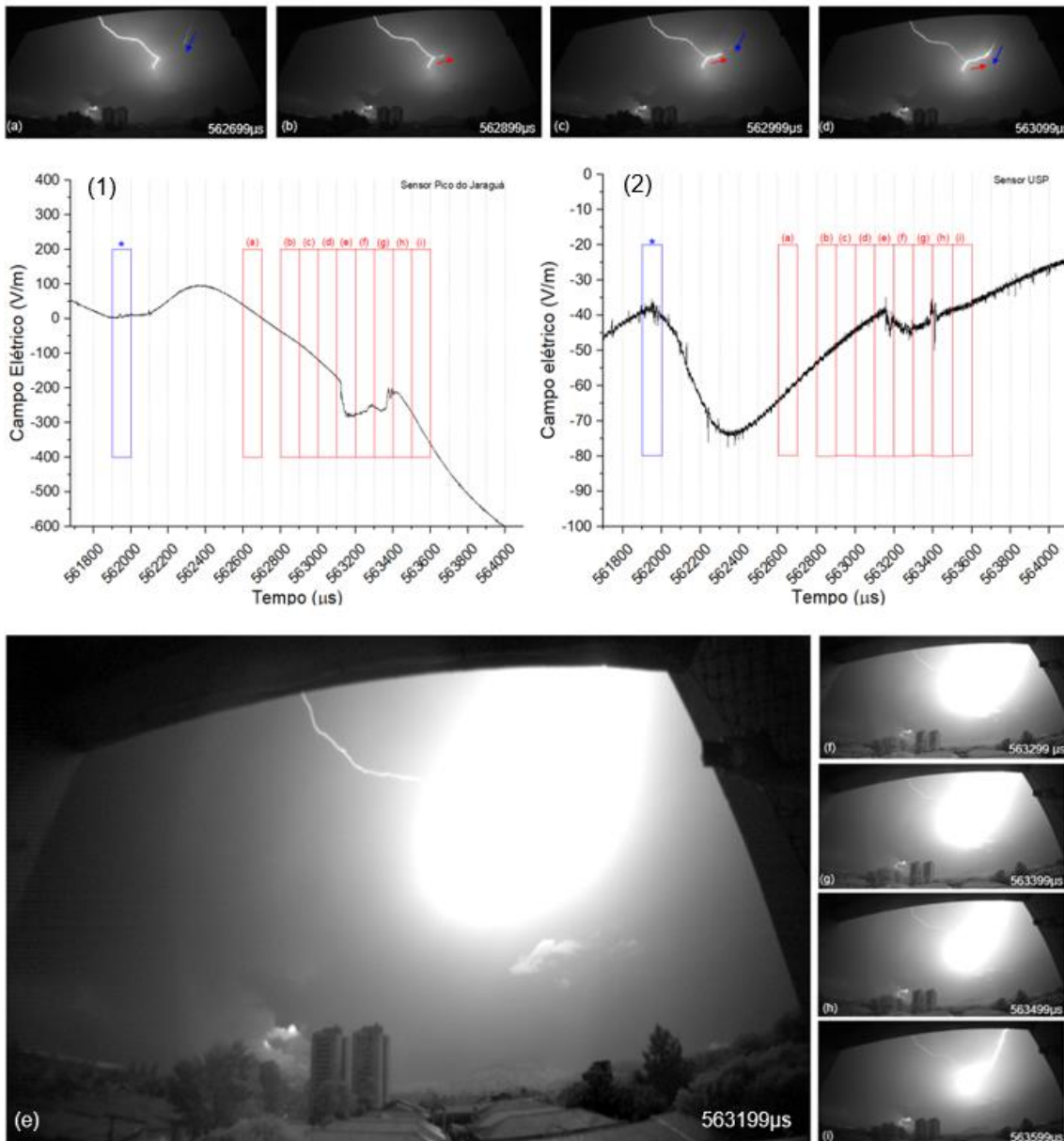


CP: Canal Principal; LR: Líder de recuo; LC: Líder Conectivo. Em (a) observamos os canais ativos do raio. As setas indicam a direção de propagação. Ocorrendo o decaimento do canal em (b) e em (c) nota-se a origem do líder de recuo que reioniza o canal principal e cria o LC. Em (e), observa-se o surgimento de um líder de recuo no ramo. À medida que esse líder de recuo se aproxima do canal principal, ele induz o surgimento de um líder conectivo, (f), que se conecta a ele (g).

Fonte: Produção da autora.

Na Figura 4.21 é possível observar a conexão entre o LR e o LC, ocorrido no raio R81, também é possível visualizar os perfis de campo elétrico para esse momento nas imagens (1) e (2).

Figura 4.21 - Composição de imagens do ramo estimulado no raio R81.



Em (a) é possível notar a aproximação do líder de recuo; em (b) a origem do líder conectivo a propagar-se em direção ao líder de recuo; em (d) momento antes do contato entre o líder conectivo e líder de recuo; (e) o momento de contato; em (f) o ápice da luminosidade da conexão entre líder de recuo e o canal principal; e em (i) canal formado por essa conexão se tornando distinguível da saturação luminosa.

Fonte: Produção da autora.

Para ambos os gráficos na Figura 4.21 o período indicado por (*) é a aproximação desse líder de recuo da região filmada. É possível identificar na sequência de frames que; (e) é o momento da conexão entre o LR e o LC; e, (f)

é momento luminoso mais intenso, com uma diferença de intensidade de quase 2000 pixels claros entre (f) e (g), identificado pelo programa que mede a luminosidade das imagens. Na Figura 4.22 temos uma imagem do canal que foi reionizado.

Figura 4.22 - Canal preexistente no raio R81.

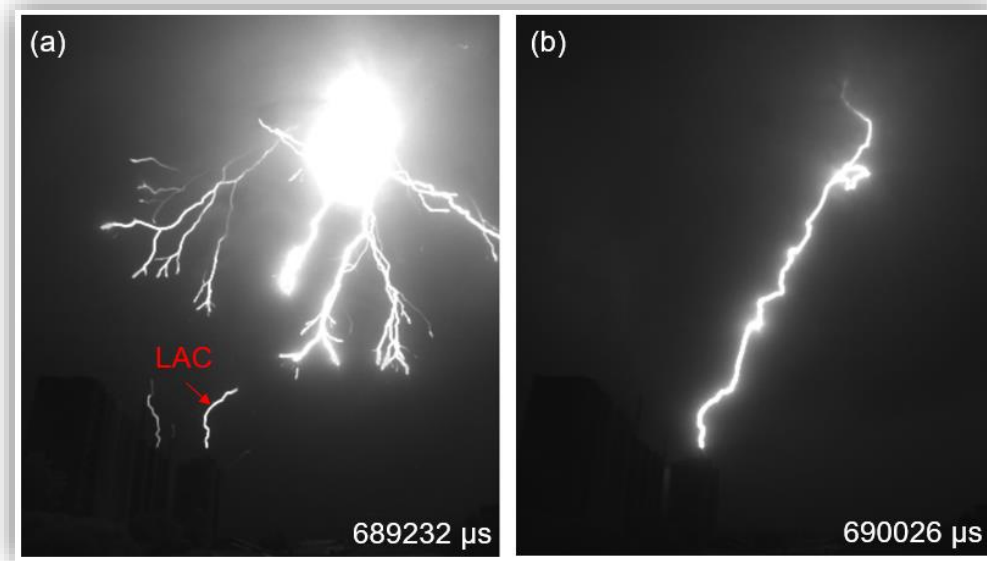


A seta vermelha indica a preexistência do canal formado pela conexão entre o líder conectivo e o líder de recuo.

Fonte: Produção da autora.

As conexões entre LC e LR são intensas e podem ser comparadas à conexão de líderes descendentes com líderes ascendentes conectivos (LAC) em raios nuvem-solo. LAC são líderes que se desenvolvem a partir de objetos aterrados com a finalidade de se conectar com o líder descendente que se aproxima do solo. Um exemplo pode ser observado na Figura 4.23.

Figura 4.23 - Conexão entre líder ascendente conectivo e líder descendente.



LAC: Líder Ascendente Conectivo. Em (a) temos o líder ascendente conectivo se desenvolvendo a partir de um para-raios, e em (b) o canal formado após a conexão.

Fonte: Produção da autora.

No raio descendente, o líder descendente (análogo ao LR no raio intranuvem) se aproxima do para-raios aterrado (análogo ao CP), intensificando o campo elétrico na região e contribuindo para o desenvolvimento do LAC (análogo ao LC no intranuvem).

Também foi observada a reionização de ramos decaídos causada por LR nos raios R82 e em R85.

É importante ressaltar que os LC não são eventos frequentes nesses raios. Observa-se que antes do LC ser estimulado por um LR, o CP deve estar ionizado, isto é, o canal de origem desse ramo deve estar ativo.

Foi observada apenas uma ocorrência de LC em cada um dos três raios analisados nessa seção. E isso se dá pelas condições em que ele ocorre. Mesmo havendo o surgimento de incontáveis LR durante o desenvolvimento do líder positivo, o canal principal ainda precisa apresentar as condições observadas:

- 1) Ter sido reionizado anteriormente por um LR;

2) Se manter ionizado enquanto outro LR se aproxima pelo ramo.

Logo, apesar da quantidade de LR surgindo nesses raios, não é comum que o CP apresente LC.

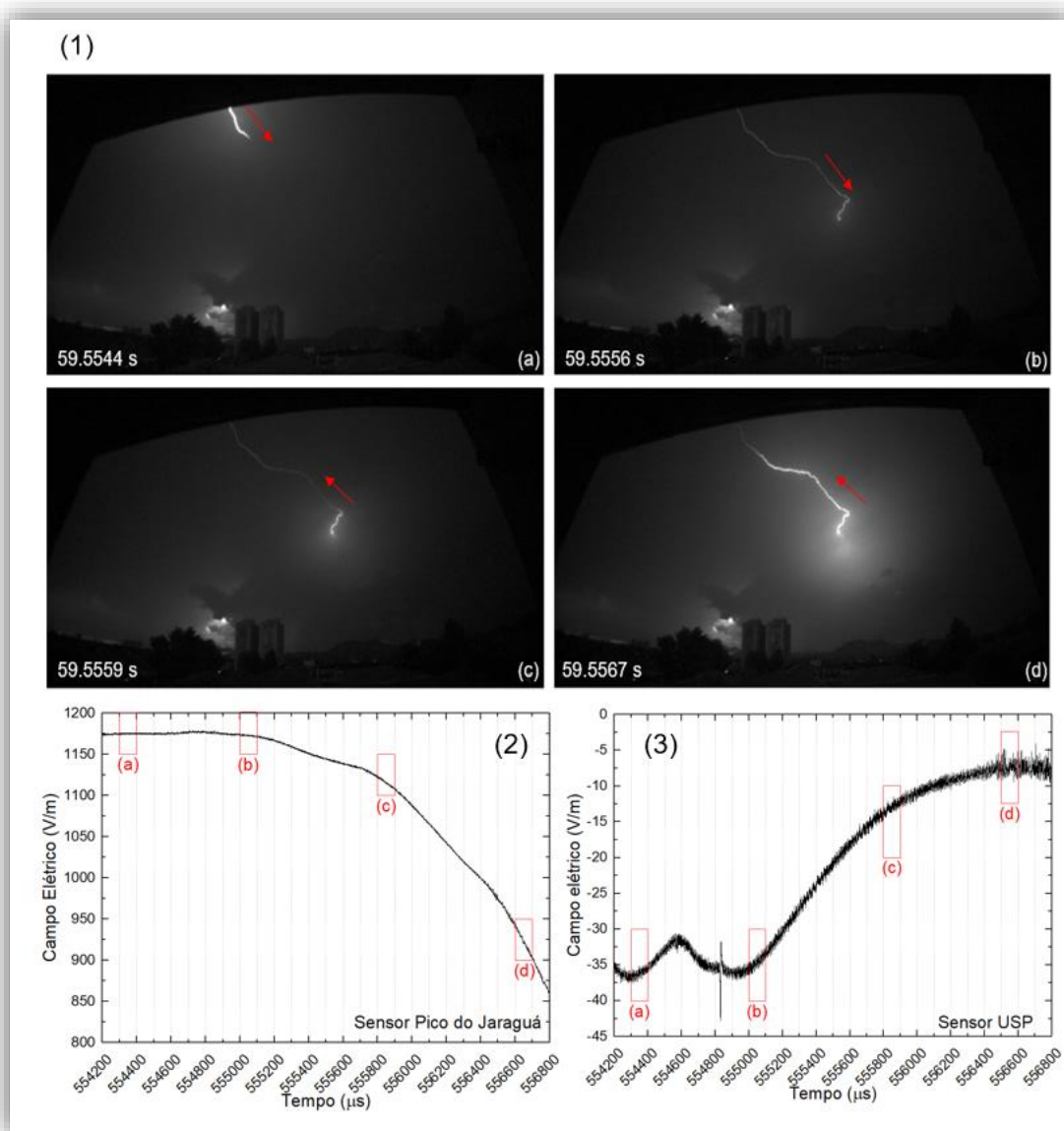
4.2.3 Reflexão de pulsos luminosos

Outra importante característica a ser ressaltada é a reflexão de pulsos luminosos (pulsos de corrente) dentro do canal parcialmente ionizado.

Existe uma relação entre a luminosidade do canal e a corrente que passa por ele. Há medidas experimentais feitas em laboratório por Zhou et al. (2020), que mostram a existência de uma relação linear entre essas grandezas.

Ao surgir na extremidade positiva do canal, o líder de recuo (LR) o reioniza. O pulso de corrente associado ao LR pode ser visto como um pulso de luminosidade que se desloca em direção a origem do canal, e depois retorna seguindo o caminho oposto ao de sua propagação, como pode ser observado na sequência de imagens abaixo, na Figura 4.24(1).

Figura 4.24 - Composição de imagens sobre a reflexão de líder de recuo no raio intranuvem R81.



Em (1) de (a) a (d), as setas indicam a direção de propagação da luminosidade. (a) a (d) também estão assinaladas em seus respectivos períodos nas imagens de campo elétrico (2) e (3).

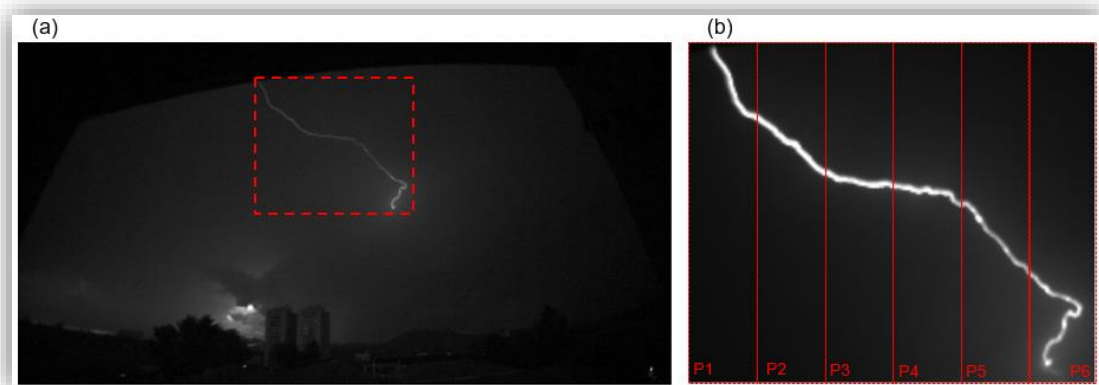
Fonte: Produção da autora.

Os retângulos, nos gráficos de campo elétrico, delimitam os períodos para cada frame da reflexão indicados na Figura 4.24 (1) de (a) – (d).

Para analisar a reflexão descrita na Figura 4.24, foi selecionada a região onde ocorre essa reflexão (Figura 4.25(a)), e está foi seccionada em 6 partes (Figura

4.25 (b)). Para cada uma dessas seções foi traçado o perfil de luminosidade (Figura 4.26) dentro do período 554,3 ms – 557,0 ms, que é o período de ocorrência da reflexão.

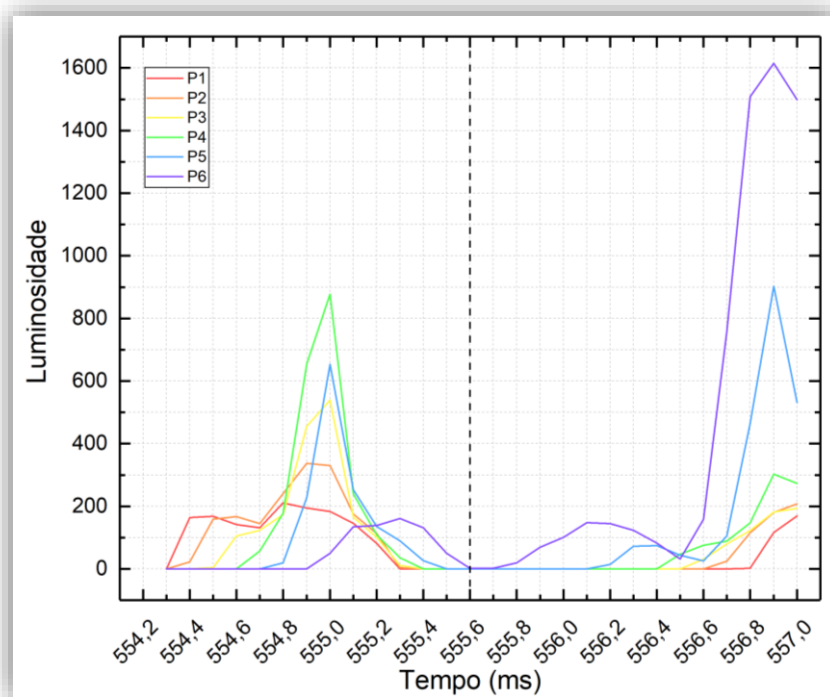
Figura 4.25 - Seleção da região do raio R81 para análise de reflexão.



O retângulo tracejado em (a) indica a região de recorte para análise da reflexão, e as regiões P1 a P6 em (b) foram analisadas através do leitor de luminosidade.

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.26 - Perfis de luminosidade das partes do canal do raio R81 onde ocorre reflexão.



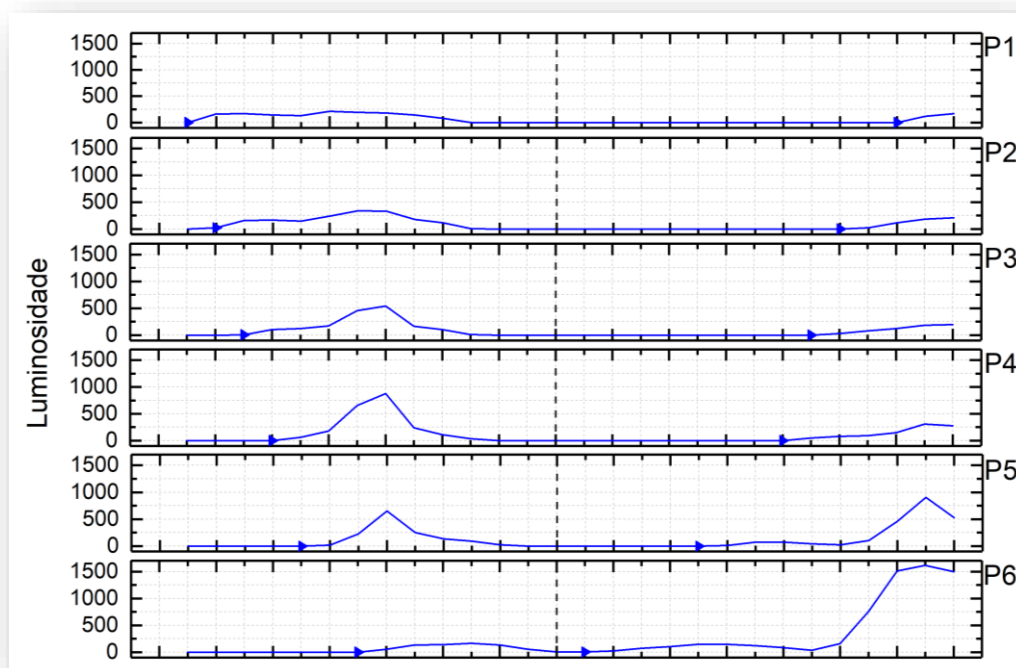
Perfis de luminosidade das seis regiões do canal onde ocorrem reflexão. A linha tracejada indica o momento em que o líder de recuo alcança a origem do canal.

Fonte: Produção da autora.

Observa-se que o trecho P1 é o primeiro a registrar um aumento da luminosidade. Esse aumento acontece sequencialmente (de P1 a P6) nos outros trechos do canal. Após o momento em que o LR alcança a origem do canal (indicado pela linha tracejada) o aumento da luminosidade se dá na ordem reversa (de P6 a P1) indicando assim a reflexão da corrente no canal.

Na Figura 4.27 podemos observar o perfil de luminosidade para cada seção separadamente. Uma seta foi usada para melhor visualizar o deslocamento do LR dentro do canal do raio e também a reflexão que ele sofre quando chega na origem do canal.

Figura 4.27 - Perfis isolados de luminosidade para cada seção da imagem onde ocorre a reflexão no raio R81.



Perfis de luminosidade para as seções P1 a P6, respectivamente. As setas azuis indicam o momento em que a luminosidade daquela região começa a aumentar, indicando o deslocamento da corrente.

Fonte: Produção da autora.

Líderes de recuo surgem na extremidade de líderes positivos e, sua ocorrência é maior após o decaimento da junção com a parte criada pelo líder negativo. Em sua maioria, os líderes de recuo não possuem energia suficiente para reionizar regiões interrompidas do canal. Então, durante o processo de reionização do canal do líder positivo esse LR se depara com a região de origem desse raio, onde o líder negativo já está decaído desde o estágio de junção. Logo, o LR não terá energia suficiente para reionizar o canal do líder negativo, então ele é refletido como uma onda.

Reflexões também ocorrem nos canais dos raios R82 e R85. A Figura 4.28 mostra uma reflexão que ocorre durante a propagação de um dos três LR, que ocorrem ao mesmo tempo, no raio R82.

Figura 4.28 - Reflexão no raio R82.



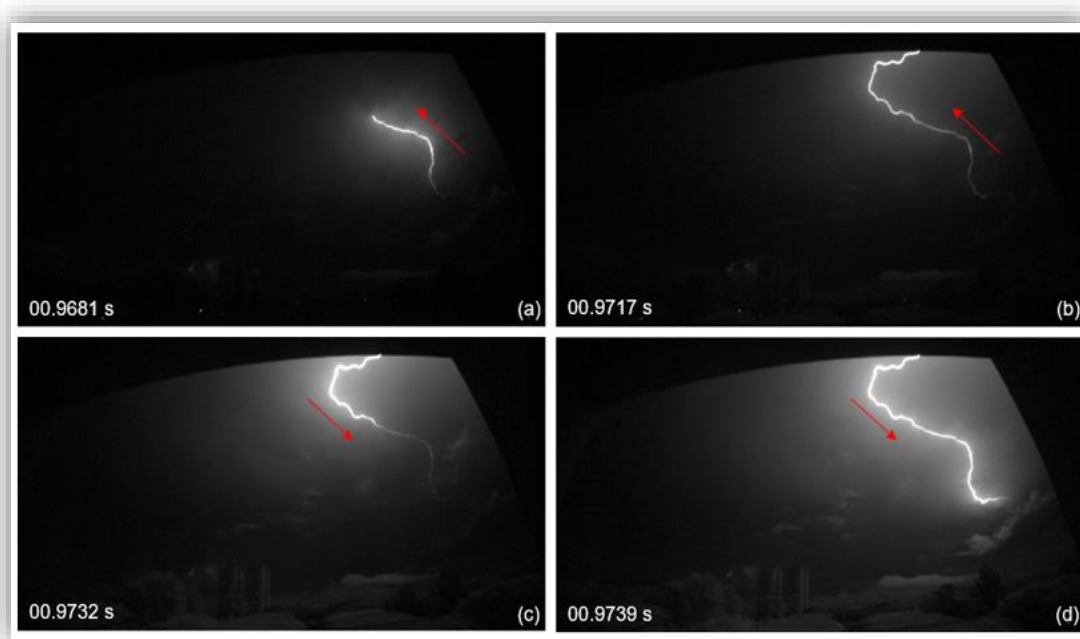
A seta vermelha indica a direção de propagação do líder de recuo em (a) e (b), e em (c) e (d), com a mudança na sua direção, a seta indica a ocorrência da reflexão.

Fonte: Produção da autora.

Já no raio R85 a reflexão também ocorre e pode ser observada na Figura 4.29

(1).

Figura 4.29 - Composição de imagens referente a reflexão que ocorre no raio R85.

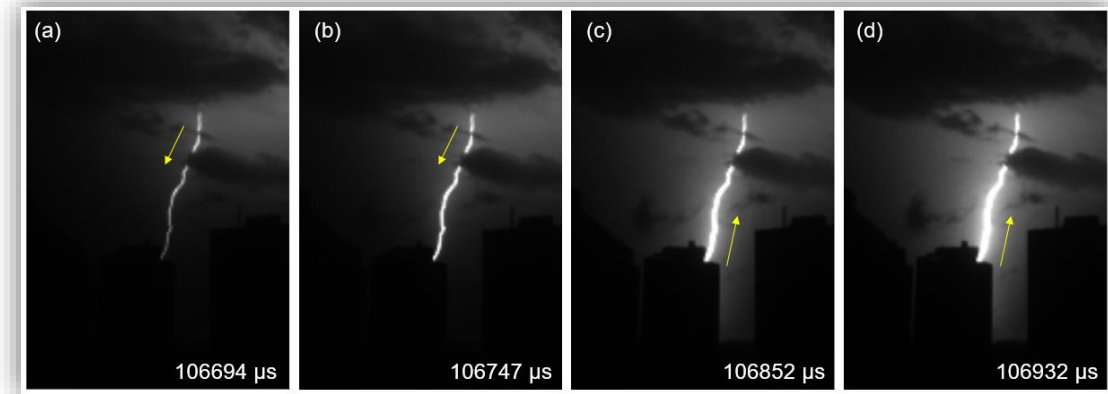


As imagens (a) – (d) indicam a reflexão ocorrida no raio R85, e as setas indicam a direção da luminosidade.

Fonte: Produção da autora.

As reflexões também podem ser observadas em canais de raios descendentes e ascendentes como mostra a Figura 4.30 e Figura 4.31, respectivamente.

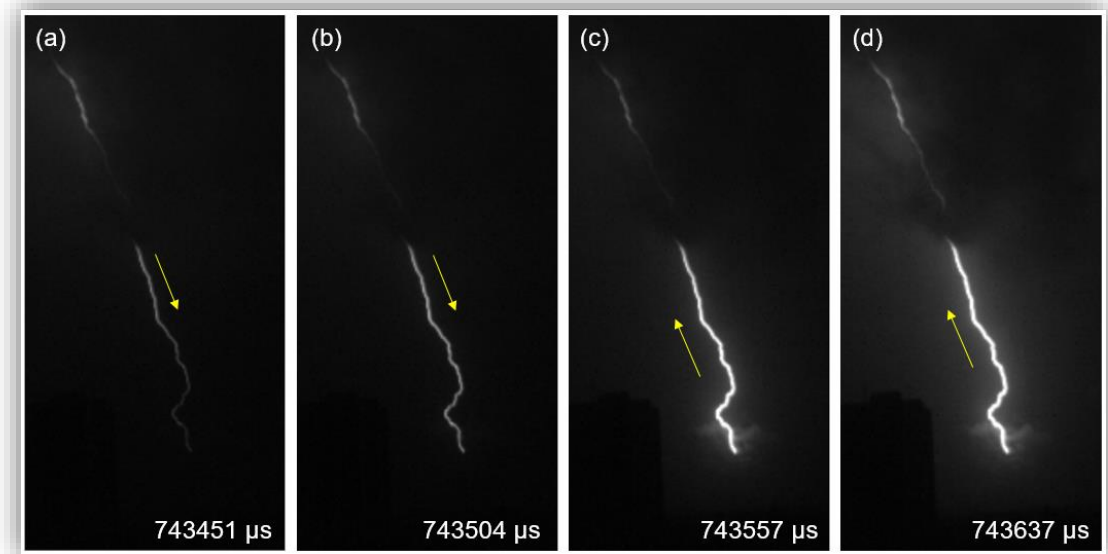
Figura 4.30 - Reflexão em raio descendente.



As setas amarelas indicam a direção da luminosidade nas imagens de (a) a (d).

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.31 - Reflexão em raio ascendente.



As setas amarelas indicam a direção da luminosidade nas imagens de (a) a (d).

Fonte: Produção da autora.

Essas reflexões em canais que tocam o solo são geradas por LR durante uma componente M, e são observadas através da intensificação da luminosidade do canal.

As reflexões dos pulsos de corrente/luminosidade têm sua origem na mudança abrupta de condutividade do meio pelo qual se propagam. Para os raios que tocam o solo, essa mudança de condutividade ocorre na interface do canal de plasma do raio com o ponto de contato no solo, e no caso dos raios intranuvem, na interface do canal de plasma com o ar virgem ou um canal decaído.

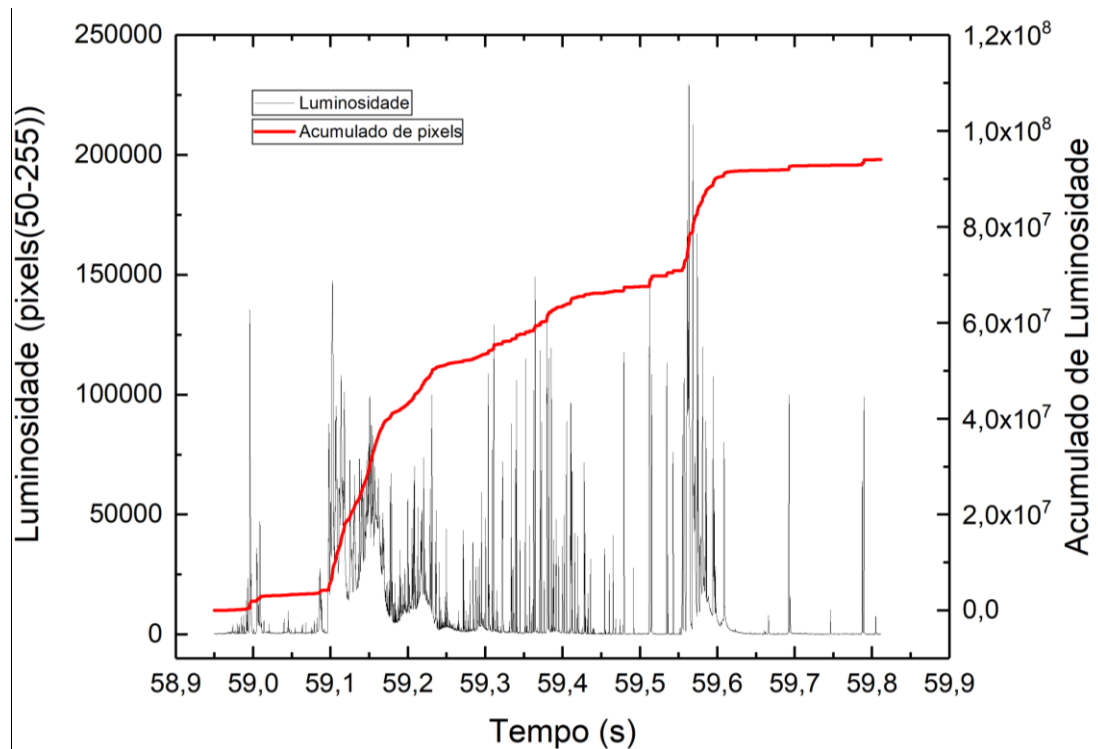
4.2.4 Das características luminosas

Para os três raios analisados foram traçados o perfil de luminosidade do canal no tempo e o acumulado de luminosidade ao longo do tempo.

O raio R81 fica aceso por 0,8618 s. Devido à saturação das imagens causadas por alguma conexão muito intensa com líderes de recuo houve uma perda de dados de 0,018%. Essa saturação foi calculada contabilizando a quantidade de pixels que admitiram valor igual a 255.

A Figura 4.32 mostra o perfil de luminosidade e o acumulado de luminosidade no canal do raio R81.

Figura 4.32 - Perfil de luminosidade e acumulado de luminosidade para o raio R81.

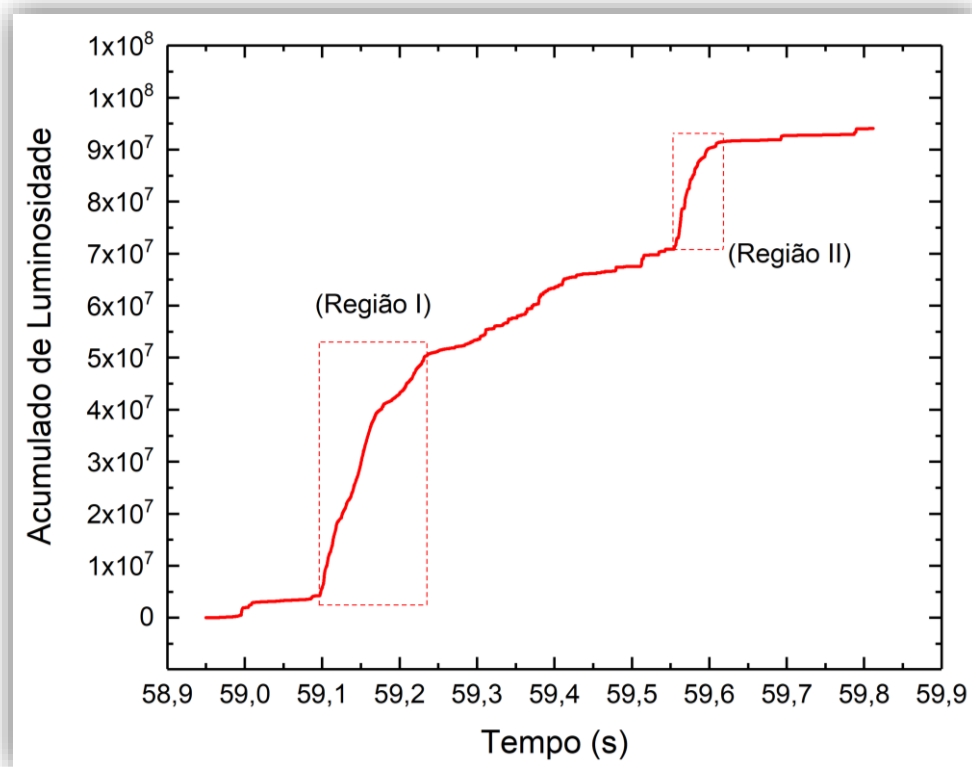


Fonte: Produção da autora.

No gráfico, a curva de acumulado de luminosidade é a somatória da luminosidade no tempo, ou seja, a integral da curva de luminosidade. Dada a relação entre luminosidade e corrente, a integral da corrente tem como resultado a carga total, logo a curva do acumulado indica a quantidade de cargas que está sendo transferida pelo o canal.

Existem duas regiões onde a variação no acumulado de luminosidade é mais intensa, e elas podem ser observadas na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Perfil de acumulado de pixels para o canal do raio R81.



Perfil de acúmulo de luminosidade que indica a quantidade de carga transferida para o canal do raio. As duas regiões assinaladas, onde a inclinação no gráfico é mais acentuada, indicam o período de transferência mais intensa de cargas para o canal.

Fonte: Produção da autora.

Toda vez que ocorre um líder de recuo (LR), é possível ver pequenos picos de luminosidade. No entanto, identifica-se no gráfico que o LR não contribui significativamente com a transferência de cargas. Entre 59,3 s e 59,6 s existe uma quantidade grande de LR ocorrendo nesse raio, mas se observa que eles por si só não alteram o acumulado de luminosidade (e consequentemente, a transferência de carga) de forma expressiva.

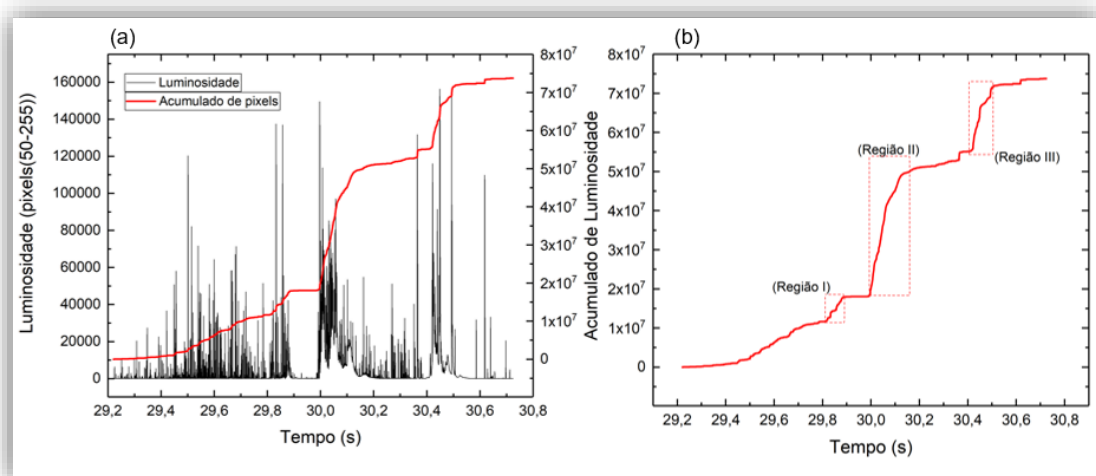
As duas regiões de maior intensidade na transferência de cargas para o canal ocorrem com o canal ativo. Analisando a Figura 4.32, a primeira região possui LR e uma corrente contínua (CC) de aproximadamente 150 ms. Já a segunda região, apresenta LR mais intensos que na primeira região e uma CC mais curta que a primeira, de aproximadamente 75 ms.

O raio R82 permanece aceso durante 1,5042 s e a perda de dados por saturação é de apenas 0,004%.

O raio 85 fica aceso por 1,4618 s com uma perda de dados por saturação de 0,045%, a maior entre os três raios estudados nesse trabalho. Para essas informações devemos considerar a proximidade visual entre o raio R85 e a câmera, tornando as atividades difusas menos intensas se comparada ao desenvolvimento de LR no canal, e a própria propagação e estabelecimento do canal desse raio.

O raio R82 e o raio R85, apresentam três regiões distintas de abrupta no acúmulo de luminosidade, como mostram as Figura 4.34 e Figura 4.35

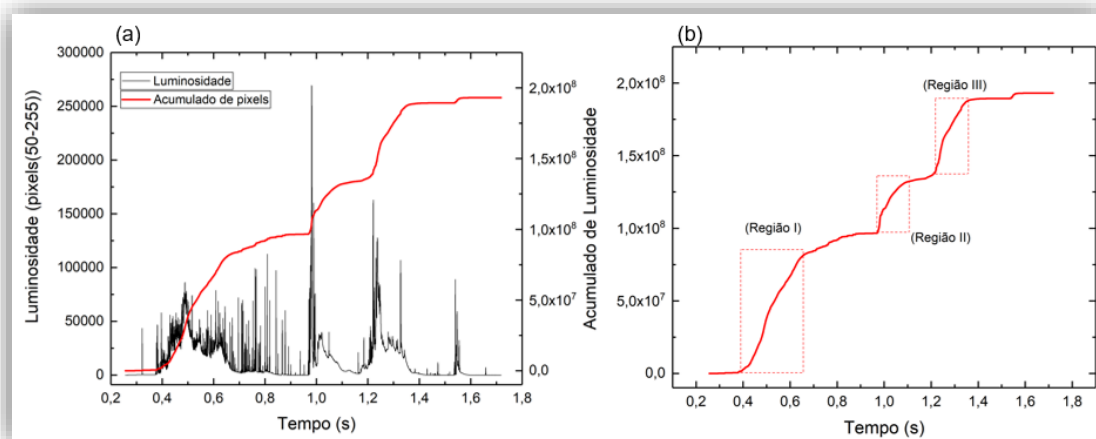
Figura 4.34 - Luminosidade e regiões de grande transferência de carga para o raio R82.



Em (a) temos o perfil de luminosidade para o raio R82, em (b) o acumulado de pixels, bem como as regiões de maiores transferências de carga para o canal do raio R82.

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.35 - Luminosidade e regiões de grande transferência de carga para o raio R85.



Em (a) temos o perfil de luminosidade para o raio R85, em (b) o acumulado de pixels, bem como as regiões de maiores transferências de carga para o canal do raio R85.

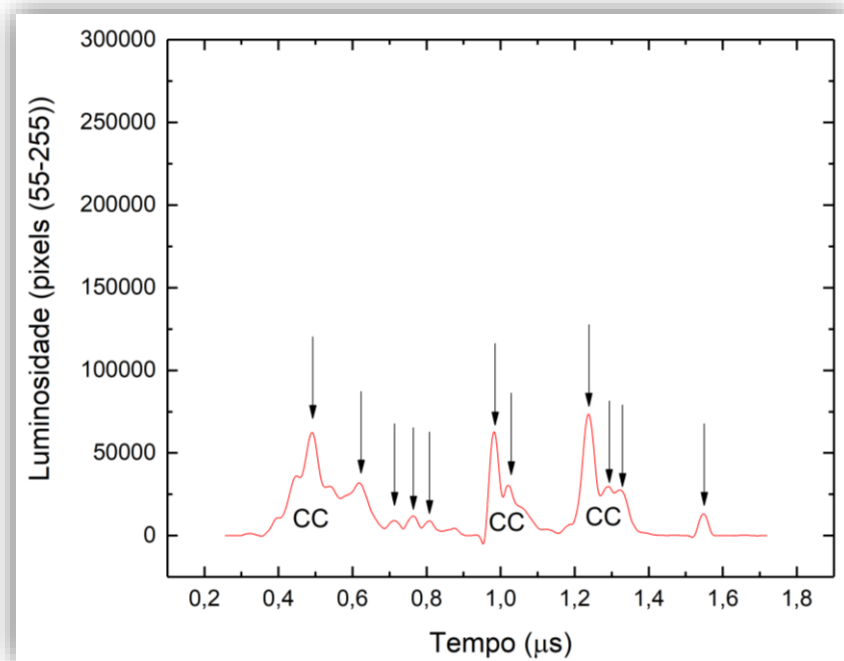
Fonte: Produção da autora.

Assim como no raio R81, nos raios R82 e R85 os LR quando ocorrem sozinhos nos raios, não afetam a transferência de cargas para o canal do raio. Também como o raio R81, as regiões de menor CC são associadas a LR mais intensos do que as regiões com CC mais longa. Isso fica mais evidente quando observamos a região I do raio R85, onde ele apresenta uma CC de quase 250 ms e os líderes de recuo não são tão intensos quanto nas regiões II e III desse mesmo raio.

Para que haja uma transferência significativa de cargas é preciso, portanto a presença da CC. A presença de LR durante a corrente contínua pode tornar essa transferência ainda maior. No entanto, nenhuma transferência significativa ocorrerá se houver apenas LR.

Para melhor visualizar a CC, foi usado um filtro de regressão polinomial de ordem dois no gráfico de luminosidade do raio R85. Essa regressão foi usada porque apresenta o melhor resultado de suavização para a curva de luminosidade. Na Figura 4.36, observa-se os períodos de CC no raio R85, bem como flutuações da luminosidade que ocorrem enquanto o canal está ativo.

Figura 4.36 - Luminosidade da corrente contínua no raio R85.

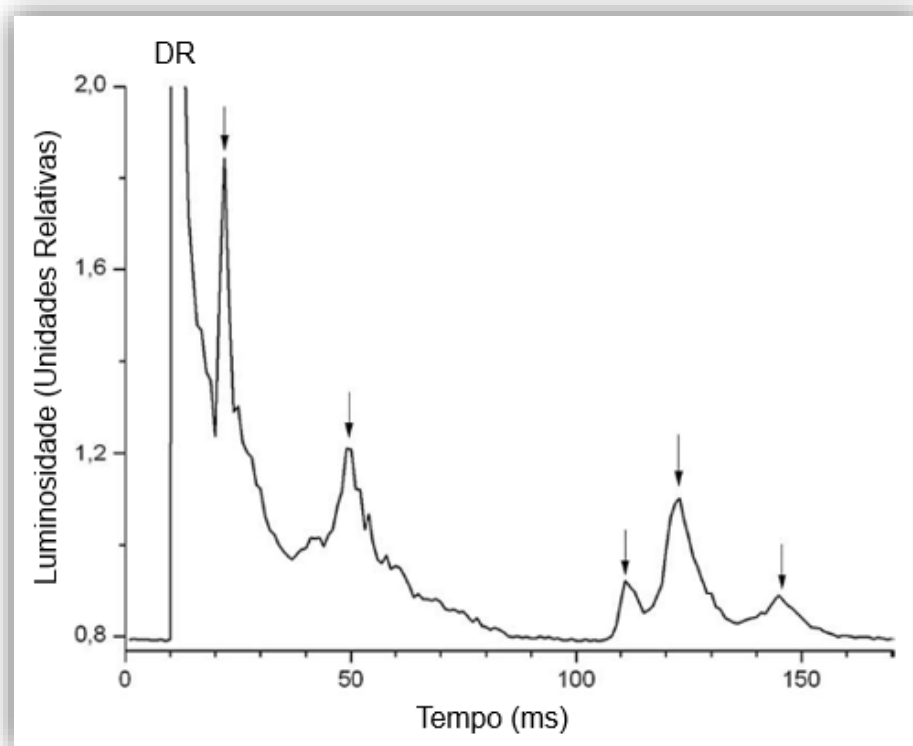


CC: Corrente Contínua. Regressão polinomial de segunda ordem aplicado sob o gráfico de luminosidade do raio R85, onde é possível observar os períodos de corrente contínua no canal. As setas indicam flutuações na luminosidade que ocorrem no canal durante as correntes contínuas.

Fonte: Produção da autora.

Uma análise semelhante é realizada no trabalho de Campos et al. (2009), como pode ser visto na Figura 4.37.

Figura 4.37 - Luminosidade x Tempo de um raio descendente positivo.



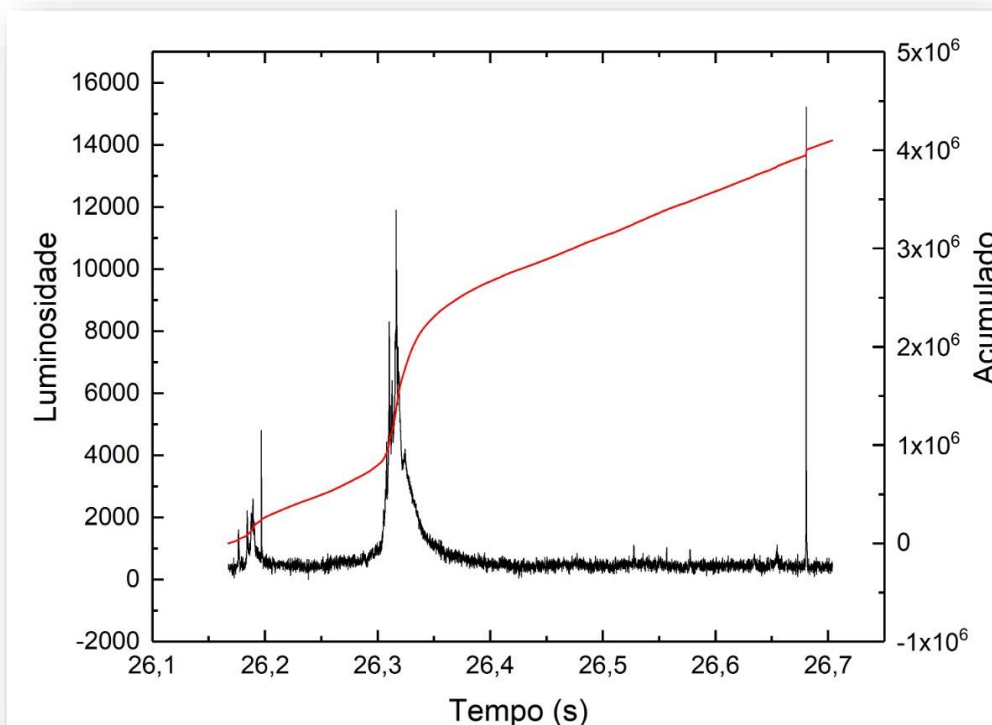
DR: Descarga de Retorno. Gráfico de Luminosidade por tempo de um raio descendente positivo. A área abaixo da curva indica a corrente contínua desse raio, e as setas indicam as flutuações na luminosidade produzida por essa corrente, chamadas de componentes M.

Fonte: Adaptado de Campos et al. (2009).

Flutuações na luminosidade quando observadas em raios que tocam o solo são chamadas de componentes M e são produzidas por LR, já as flutuações na luminosidade dos canais de raios intranuvem também são causadas por LR.

Na Figura 4.38, temos um perfil de luminosidade traçado para um raio intranuvem do tipo invertido. Para esse raio intranuvem também foi traçado o perfil de acumulado de luminosidade.

Figura 4.38 - Perfil de luminosidade e acumulado de pixels para um raio intranuvem do tipo invertido.



Fonte: Produção da autora.

A região de maior transferência de carga para o canal se encontra entre 26,30s e 26,35s, sendo esse um período de CC, onde o canal se manteve ativo e isso ocorreu durante do líder negativo. O último pico de luminosidade corresponde a um LR que consegue reionizar o canal desse líder negativo.

Para esse LR, observa-se no acumulado de luminosidade, um pequeno degrau, reforçando que os LR sozinhos, como nesse caso, sem a associação com a CC não contribuem com a transferência de carga.

5 CONCLUSÃO

Pela primeira vez no mundo, foi feita uma análise das características dos raios intranuvem através do uso de câmeras rápidas.

Informações sobre duração do raio intranuvem foram obtidas com a finalidade de abranger o nosso entendimento acerca da duração dos raios que ocorrem no Brasil. Essas informações podem ser utilizadas para a calibração de *Lightning Location System* (LLS), melhorando a performance desses sistemas na detecção de raios intranuvem.

5.1 Análise estatística

Através da comparação da duração do raio medido no campo elétrico com a duração medida no vídeo, foi possível determinar a quantidade de informações perdidas ao utilizar câmeras de alta velocidade para estudar raios intranuvem.

- Com aquisição de cerca de 78% da duração real do raio, as câmeras podem ser utilizadas para estudar esse tipo de raio;
- É possível estimar a duração de um raio intranuvem que não possua dados de campo elétrico através de (5.1):

$$Duração_{CE} = 1,28 \cdot Duração_V \quad (5.1)$$

onde CE = campo elétrico e V = vídeo.

Os raios intranuvem possuem maior média de duração (515 ms) quando comparados aos raios que tocam o solo no Brasil. Ajustando o valor médio de duração através da equação (5), observa-se que os raios intranuvem (660 ms) duram cerca de 50% mais que os raios ascendentes negativos (427 ms), que são dos raios que tocam o solo os que duram mais.

Essa duração maior juntamente com a predominância de raios intranuvem na atmosfera terá um papel maior do que o imaginado na química da atmosfera.

5.2 Características específicas

As principais características dos raios intranuvem são governadas por líderes de recuo. E a definição do tipo desse intranuvem é dada pela forma como os líderes se propagam.

Como não foram estudados anteriormente com câmeras de alta velocidade, as características discutidas nesse trabalho ainda não haviam sido observadas.

5.2.1 Reionização de ramo preexistente

Os raios intranuvem apresentam características recentemente estudadas em raios que tocam o solo, como os líderes de recuo do “tipo V”. Essa tendência de propagação do líder de recuo foi observada com frequência nos raios intranuvem estudados nessa análise.

5.2.2 Líder conectivo

Pode-se observar que nos raios intranuvem ocorrem líderes conectivos estimulados por líderes de recuo, que se assemelham líderes ascendentes conectivos, que ocorrem em estruturas no solo durante a aproximação de líder descendente nos raios nuvem-solo.

5.2.3 Reflexão de corrente

Durante a sua propagação os raios intranuvem apresentam comportamentos ainda não estudados em raios que tocam o solo, como a reflexão da corrente que ocorre dentro do seu canal.

A reflexão foi estudada através do leitor de luminosidade, onde foi possível identificar o deslocamento da luminosidade através do canal e também o seu retorno, confirmando a ocorrência da reflexão.

5.2.4 Luminosidade

Através do leitor de luminosidade foi possível observar como se dá o a reflexão de corrente, e entender melhor o papel dos líderes de recuo durante o desenvolvimento do raio intranuvem.

Ainda foi possível identificar as condições para uma transferência de carga mais efetiva no canal do raio, além de observar os períodos de corrente contínua e as oscilações de luminosidade nesses períodos, indicando um comportamento semelhante às componentes M que ocorrem em raios que tocam o solo.

5.2.5 Sugestões para trabalhos futuros

Para o estudo dos raios intranuvem, algumas configurações de câmera devem ser consideradas, como configurar um maior tempo de gravação e a utilização de lentes com maior abertura.

Utilizar dados de LMA (*lightning mapping array*) bem como de LLS (mais eficientes para intranuvem) para comparar os resultados que foram obtidos nessa pesquisa, uma vez que com LMA é possível entender melhor como ocorre o desenvolvimento do raio intranuvem dentro da nuvem de tempestade e o LLS adicionaria informação numérica para os picos de corrente.

Ainda é necessário se aprofundar na relação entre luminosidade e corrente, e como isso afeta o campo elétrico. Também é possível realizar uma comparação entre as componentes M, dos raios que tocam o solo, com as flutuações de corrente contínua que foram identificadas nos raios intranuvem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BABA, Y.; RAKOV, V. A. **Electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies**. [S.l.]: Wiley, 2016. ISBN (9781118275634).
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO, J. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 23, p. 1–4, 2005.
- BARELLI, F. **Introdução a visão computacional: uma abordagem prática com Python e OpenCV**. São Paulo: Casa do Código, 2019. 268 p. ISBN (978-85-94188-57-1).
- BOND, D. W.; ZHANG, R.; TIE, X.; BRASSEUR, G.; HUFFINES, G.; ORVILLE, R. E.; BOCCIPPIO, D. J. NO_x production by lightning over the continental United States. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 701–710, 2001.
- CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO, O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2/4, p. 416–424, 2009.
- CHILINGARIAN, A.; KHANIKYANTS, Y.; RAKOV, V. A.; SOGHOMONYAN, S. Termination of thunderstorm-related bursts of energetic radiation and particles by inverted intracloud and hybrid lightning discharges. **Atmospheric Research**, v. 233, 2019.
- COLEMAN, L. M.; MARSHALL, T. C.; STOLZENBURG, M.; HAMLIN, T.; KREHBIEL, P. R.; RISON, W.; THOMAS, R. J. Effects of charge and electrostatic potential on lightning propagation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. 9, p. 1–27, 2003.
- COORAY, V. **An introduction to lightning**. Uppsala: Springer Science and Business Media, 2015. 369 p. ISBN (9789401789387).
- CRUZ, I. T. **Líderes de recuo em raios ascendentes**. IBI: <8JMKD3MGP3W34T/46GLSC2>. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2022. Disponível em: <ibi:8JMKD3MGP3W34T/46GLSC2>. Acesso em: 16 mar. 2022.
- CUI, H.; QIE, X.; ZHANG, Q.; ZHANG, T.; ZHANG, G.; YANG, J. Intracloud discharge and the correlated basic charge structure of a thunderstorm in Zhongchuan, a Chinese Inland Plateau region. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2/4, p. 425–429, 2008.
- DWYER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, v. 534,

n. 4, p. 147–241, 2014.

FERRO, M. A. D. S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais**. 2008. 245p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

FERRO, M. A.; SABA, M. M. F.; PINTO, O. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2/4, p. 399–403, 2009.

LUDLAM, F. H.; MASON, B. J. The physics of clouds. In: BARTELSS, J. (Ed.). **GeophysicsII**. Berlin: Springer - Verlag, 1957. p. 1–1054.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, n. 10, p. 1393–1409, 2002.

MAZUR, V. **Principles of lightning physics**. London: IOP Publishing, 2016a. 183 p. ISBN (9780750311526).

MAZUR, V. The physical concept of recoil leader formation. **Journal of Electrostatics**, v. 82, p. 79–87, 2016b.

NAG, A.; RAKOV, V. A. Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 5, p. 1–5, 2009.

NAG, A.; RAKOV, V. A.; TSALIKIS, D.; CRAMER, J. A. Characterization of positive cloud-to-ground Lightning Discharges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 30., 2010. **Proceedings...** 2010, p. 1–15.

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A.; SABA, M. M. F.; NACCARATO, K. P. Cloud-to-ground lightning observations in Brazil. In: BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. (Ed.). **Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightning research**. [S.l.]: Springer Science and Business Media, 2009. p. 209–229.

RAKOV, V. A. **Fundamentals of lightning**. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 273 p. ISBN (9781139680370).

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 687 p. ISBN (9780415475976).

RIOUSSET, J. A.; PASKO, V. P.; KREHBIEL, P. R.; THOMAS, R. J.; RISON, W. Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 112, n. 15, p. 1–17, 2007.

SABA, M. M. F.; PINTO, J.; BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 23, p. 1–4, 2006.

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. High - speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 1–9, 2010.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; DE PAIVA, A. R.; HELSDON, J.; ORVILLE, R. E. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research**, p. 8493–8505, 2016.

SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; PINTO, O.; CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; CAMPOS, L. Z. S. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. 11, p. 1–9, 2010.

SCHULZ, W.; LACKENBAUER, B.; PICHLER, H.; DIENDORFER, G. LLS data and correlated continuous E-field measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 8., 2005, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 2005

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; HELSDON, J. H.; THOMAS, R.; ORVILLE, R. E. On the triggering mechanisms of upward lightning. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In: BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. (Ed.). **Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightning research**. [S.l.]: Springer Science and Business Media, 2009. p. 57–82.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; BANDARA, S.; HURLEY, B.; SIEDLECKI, R. Ultra-high speed video observations of intracloud lightning flash initiation. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v.133, n, D9, 2021.

WILLIAMS, E. R. The electrification of thunderstorms. **Scientific American**, v. 259, p. 88–99, 1988.

ZHOU, M.; FAN, Y.; WANG, J.; DING, W.; CAI, L.; LI, Q.; FAN, Y. Laboratory generated symmetrical-waveshape lightning current versus arc channel luminosity. **Journal of Electrostatics**, v. 108, e103503, 2020.