



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

ESTUDO DOS RAIOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE VÍDEO E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE/CNPq)**

Giovane Beck Suss (Universidade Federal de São Paulo, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: gbsuss@unifesp.br

Tagianne Patrícia da Silva (INPE/DISSM,

Orientadora) E-mail: tagianne.silva@inpe.br

Marcelo Magalhães Fares Saba (INPE/DISSM,

Coorientador) E-mail: marcelo.saba@inpe.br

**INPE
São José dos Campos
2023**

ESTUDO DOS RAIOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE VÍDEO E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

Giovane Beck Suss

Relatório Final de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientado pela Doutoranda Tagianne Patrícia da Silva e Coorientado pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

Os raios podem ser divididos em dois grandes grupos: os que tocam o solo (raios descendentes e ascendentes) e os que não tocam o solo (raios intranuvem). Eles ainda podem ser divididos pela sua polaridade: positivos e negativos, dependendo da carga que é transferida para o solo. Os raios analisados nesse trabalho são descendentes positivos. Esses tipos de raios compõem aproximadamente 10% dos raios descendentes e normalmente ocorrem no final da tempestade devido a distribuição das cargas na nuvem. Além de possuírem uma corrente muito alta e com longa duração, são responsáveis por diversos danos as estruturas no solo e até mesmo incêndios. Este trabalho apresenta a classificação dos raios de 2012 a 2018 das cidades de São Paulo (Brasil), Kansas e Rapid City (Estados Unidos) onde foram instaladas câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico próximos aos locais de descargas dos raios. Os dados referentes aos raios descendentes positivos foram tabelados com as seguintes informações: o tipo de câmera usada, data e hora do evento (com o auxílio da antena de GPS instalado à câmera), tipo de raio (intranuvem, descendente ou ascendente), polaridade (positivo ou negativo) e o tempo de sua ocorrência (com o auxílio da antena de GPS). Após montar a tabela, foram analisados os vídeos desses mesmos raios a fim de observar a presença de Líderes de Recuo que se conectavam ao canal principal do raio ao longo do seu desenvolvimento em direção ao solo. A análise desse fenômeno é necessária para o entendimento do comportamento dos raios positivos à medida que estes se aproximam do solo, podendo ser utilizado posteriormente para o aperfeiçoamento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

Palavras-chave: Raio Descendente Positivo. Líder de recuo. Câmera de alta velocidade.

STUDY OF LIGHTNING THROUGH VIDEO CAMERAS AND ELECTRIC FIELDSSENSORS

ABSTRACT

Lightning can be classified in two ways: those who contact the ground (downward and upward); and those that do not touch the ground (intracloud). They can still be positive or negative, depending on the polarity of the charge being transferred to the ground. The lightning analyzed in this work were downward positive flashes. This type of discharge composes approximately 10% of the downward lightning and they normally occur at the end of storms due to the distribution of charges within the cloud. In addition to having a very high current with a long duration, they are responsible of several damages to structures and even fires. This work presents the classification of lightnings from 2012 to 2018 form the cities of São Paulo (Brazil), Kansas and Rapid City (United States) where high-speed cameras and electric field sensors were installed near the site of the electric discharges. The data relating to the positive Cloud to Ground lightnings were put on a chart containing the following information: the type of camera used, date and time of the event (acquired through a GPS antenna), type of lightning (intracloud, downward and upward), polarity (positive or negative) and the time of its occurrence (also acquired through a GPS antenna). Then, the dada in the chart were analyzed with the objective of finding the presence of Recoil Leaders that connected to the main channel of the lightning along its development to the ground. The analysis of this phenomenon is necessary for the understanding the behavior of positive downward lightning as they approach the ground, which can later be used in the improvement of lightning protection systems.

Keywords: Positive Cloud to Ground Lightning. Recoil Leaders. High-speed cameras.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura elétrica do modelo tripolar de uma nuvem.	11
Figura 2.2: Classificação dos raios a partir de sua origem e término	13
Figura 2.3: Propagação de um raio descendente negativo.	14
Figura 2.4: Origem e Propagação de um Raio Descendente Positivo.	15
Figura 2.5: Zona de Exclusão de Saba.....	16
Figura 2.6: Raio Ascendente Negativo.	17
Figura 2.7: Presença de um Líder de Recuo reionizando o canal rompido do Raio.	18
Figura 2.8: Formação do Líder de Recuo em Raios Descendentes Positivos.....	18
Figura 2.9: Desenvolvimento de uma componente M (Esquerda para a direita).....	19
Figura 3.1: Modelos das Câmeras Utilizadas.	20
Figura 3.2: Programa Cine Viewer da fabricante Phantom.	21
Figura 3.3: Pulsos Característicos das Descargas de Retorno dos Raios Descendentes.....	21
Figura 4.1: parte da tabela de informações obtidas através dos vídeos e sensores de campo elétrico.....	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 Formação das nuvens	11
2.2 Tipo de raios	12
2.2.1 Raios Descendentes negativos	12
2.2.2 Raios Descendentes positivos	13
2.2.3 Raios ascendentes	16
2.3 Líder de Recuo	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Equipamentos	19
3.1.1 Câmeras rápidas	19
3.1.2 Campo elétrico	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1. INTRODUÇÃO

Os raios são fenômenos presentes na Terra desde muito antes da evolução da vida em nosso planeta. Todas as civilizações antigas incorporaram raios e trovões em suas crenças religiosas como a ira dos deuses. Hoje sabemos que a todo o instante, existem aproximadamente 2.000 tempestades pela atmosfera da terra, atingindo o solo cerca de 100 vezes por segundo (COORAY, 2015).

Os primeiros estudos na área de eletricidade atmosférica eram realizados através do campo elétrico, mas com o avanço da tecnologia e com o uso de câmeras de alta velocidade, foi possível adquirir imagens que permitiam o estudo da propagação destas descargas.

Hoje, é possível classificar os raios de acordo com a região de sua ocorrência. Os que não tocam o solo são denominados raios intranuvem e os que estabelecem contato com o solo são identificados como raios nuvem-solo (descendentes) ou raios solo-nuvem (ascendentes). Eles ainda podem ser classificados pela sua polaridade, sendo positivos ou negativos, dependendo da carga líquida transferida para o solo (CRUZ, 2022). Os raios descendentes positivos, que são o foco do nosso trabalho, possuem pico de corrente alto e na maioria dos casos apresentam corrente contínua longa, quando sua duração é superior a 40 ms, tornando seu entendimento uma questão importante (FERRO, 2022; SABA et al., 2010).

A partir dos recursos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi possível realizar a análise dos dados referentes aos raios descendentes positivos, obtidos com o uso de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico. Este trabalho apresenta informações de diversos vídeos obtidos com diferentes câmeras de alta velocidade entre os anos de 2012 a 2018, dando ênfase a análise da ocorrência de líderes de recuo dos mesmos, a fim de obter informações para pesquisas futuras.

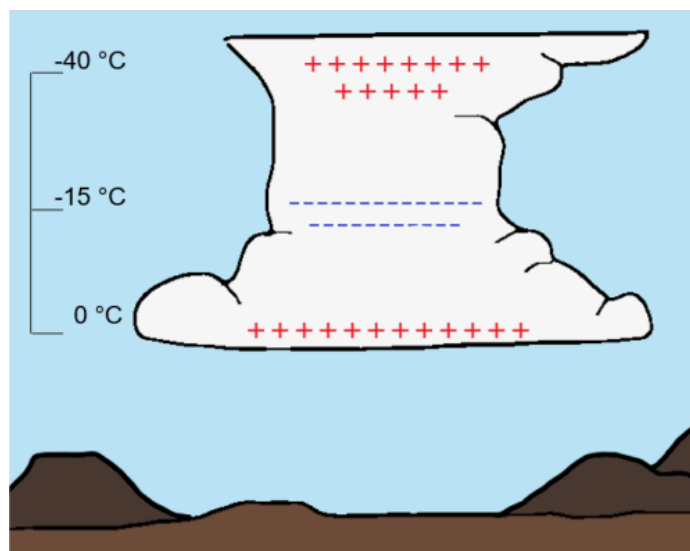
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Formação das nuvens

As nuvens de tempestade são chamadas de Cumulonimbus, que tem sua formação a partir das cumulus, que se iniciam em aproximadamente 1.000 m de altura. Estas nuvens começam a se formar a partir do aquecimento do chão pelo sol, que evapora a água. Como o vapor d'água é menos denso que o ar ao nível do mar, o vapor d'água se propaga até atingir alturas onde a pressão é baixa o suficiente para que ocorra sua expansão, e conseqüentemente, seu resfriamento. Com o resfriamento, a água presente no ar começa a condensar, formando partículas microscópicas de água que compõem as nuvens. Se existir um contínuo suprimento de ar úmido, ocorrerá um rápido desenvolvimento vertical, até chegar a altitudes mais altas onde a temperatura aumenta, causando o deslocamento horizontal, dando uma forma característica de bigorna à nuvem (FERRO, 2022).

Este tipo de nuvem possui uma estrutura tripolar (Figura 2.1), onde existem três centros de carga: uma carga positiva próxima ao topo, uma carga negativa abaixo da positiva, na região central da nuvem, sendo estas duas geralmente chamadas de centros de cargas principais. Existe um outro centro de carga positiva adicional e menor na parte inferior da nuvem, podendo nem sempre estar presente (RAKOV; UMAN, 2003).

Figura 2.1: Estrutura elétrica do modelo tripolar de uma nuvem.



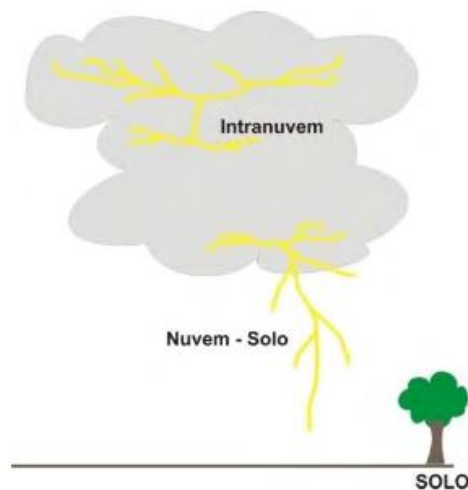
A região ao topo possui a maior quantidade de cargas positivas, sendo este o centro principal de cargas positivas. A região central apresenta cargas negativas, e é chamado de centro principal de cargas negativas. Por fim, a região na base da nuvem possui cargas positivas, mas está em menor quantidade comparado ao centro principal de cargas positivas.

Fonte: Silva (2022).

2.2 Tipo de raios

Os raios são classificados de acordo com a sua origem e propagação, sendo dividido em dois grupos: os que se originam e se propagam apenas na nuvem (raio intranuvem), que são cerca de 75% das ocorrências, e os que estabelecem contato com o solo (raios descendentes e ascendentes), que correspondem aos outros 25%. Os que estabelecem contato com o solo ainda podem ser classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo, sendo negativos, que compõem 90% das ocorrências e transferem cargas negativas, e positivos, que compõem os outros 10% e transferem cargas positivas (RAKOV, 2016). Na figura 2.2 podemos ver a classificação dos raios em função de sua origem e propagação.

Figura 2.2: Classificação dos raios a partir de sua origem e término



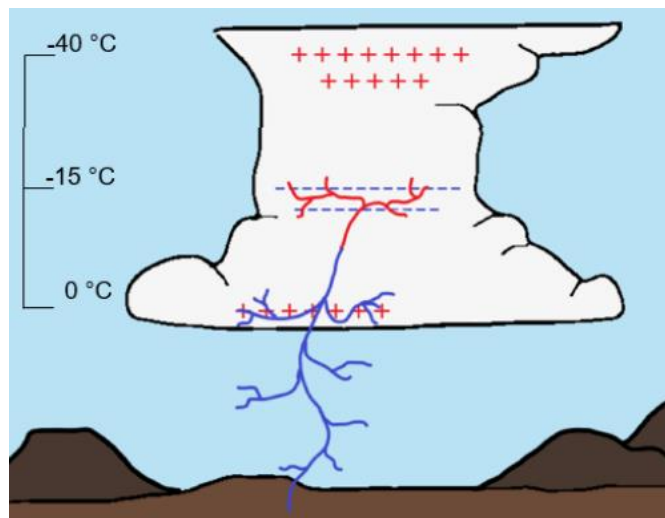
Fonte: Schumann (2012).

2.2.1 Raios Descendentes negativos

Descargas elétricas que tem origem na parte interna da nuvem e se propagam em direção ao solo, estabelecendo contato com o mesmo e transferem carga negativa são chamados de raios descendentes negativos, ou nuvem-solo negativos.

Os raios NS- (Nuvem-Solo negativos) são formados entre o centro menor de cargas positivas, localizado mais próximo à base da nuvem, e o centro de cargas negativas logo acima, fazendo com que a extremidade negativa se propague em direção a base da nuvem, neutralizando as cargas do centro de cargas positivas e se propagando ao solo quando esse centro de cargas possuir densidade baixa de cargas positivas (NAG; RAKOV, 2009). A extremidade positiva se propaga em direção ao centro de cargas de polaridade negativa, a fim de neutralizá-las (DWYER; UMAN, 2014). A figura 2.3 ilustra a propagação de ambas as extremidades na ocorrência de um raio NS-.

Figura 2.3: Propagação de um raio descendente negativo.



Fonte: Silva (2022).

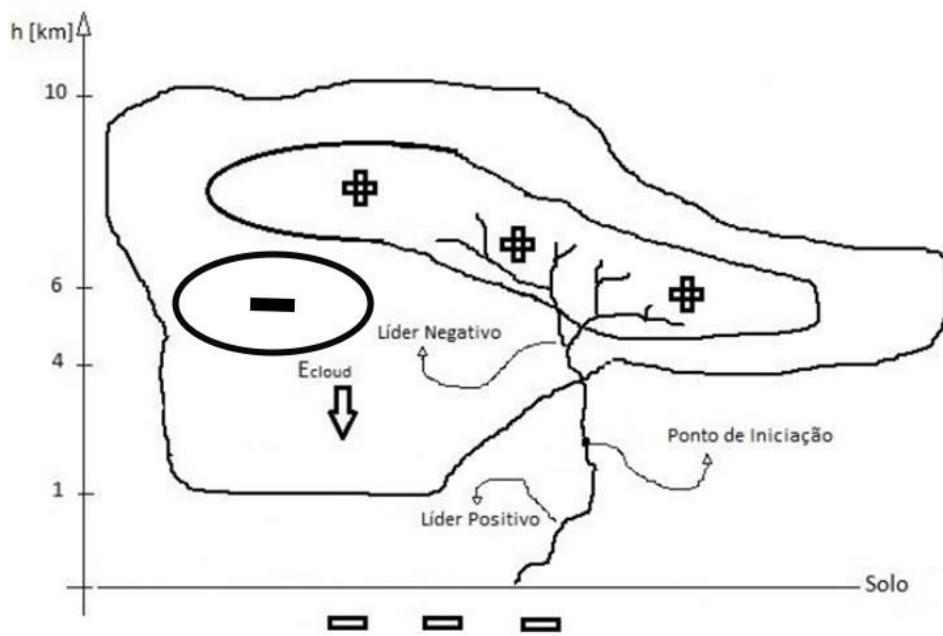
Após estabelecer contato com o solo, ocorre a descarga de retorno, caracterizado por uma intensa luminosidade que se propaga do solo em direção a nuvem. Durante a descarga de retorno, as cargas acumuladas no canal durante o seu desenvolvimento são transferidas para o solo (FERRO, 2022).

2.2.2 Raios Descendentes positivos

Descargas elétricas que se originam na nuvem e se propagam em direção ao solo, fazem contato com o mesmo transferindo cargas positivas são chamados de raios descendentes positivos, ou nuvem-solo positivos (NS+). Este tipo de raio compõe aproximadamente 10% das ocorrências de raios descendentes.

Os raios NS+ são formados da mesma forma que os NS-, mas eles se originam entre o centro principal de cargas positivas e o centro principal de cargas negativas. A figura 2.4 mostra a formação de um raio descendente positivo e como ele se propaga.

Figura 2.4: Origem e Propagação de um Raio Descendente Positivo.

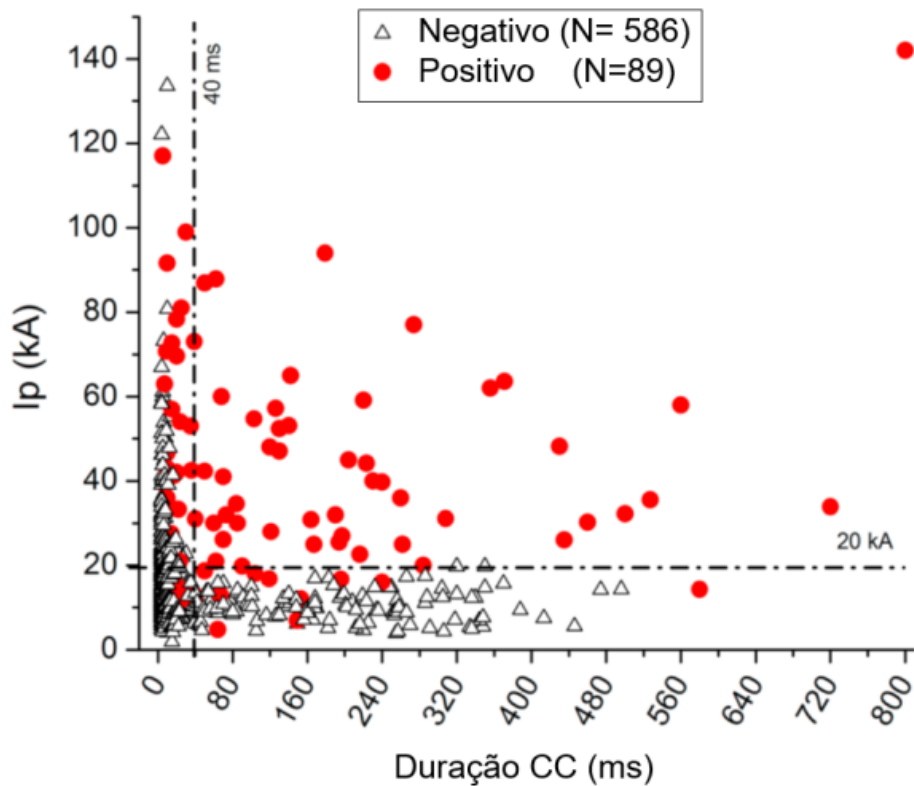


Fonte: Adaptado de Ferro (2022).

Segundo Rakov (2016), existem quatro situações que podem favorecer a ocorrência de tais descargas, sendo eles: (i) o estágio de dissipação da nuvem de tempestade, onde o centro de carga negativa já está parcialmente dissipado, restando apenas os centros positivos; (ii) Tempestades de inverno, que além de possuírem a base da nuvem mais próxima ao solo, o centro de cargas negativas inferior se encontra deslocado em relação as tempestades de verão; (iii) Tempestades fortes, onde a distribuição de cargas dentro da nuvem é mais complexa que a representada pelo modelo tripolar; (iv) E nuvens formadas sobre incêndios florestais ou contaminadas por fumaça.

Os raios positivos podem apresentar picos de corrente altos associados a uma longa duração como pode ser observado na figura 2.5 que indica a zona de exclusão de Saba.

Figura 2.5: Zona de Exclusão de Saba.



No gráfico acima, os triângulos representam os raios descendentes negativos, que quando possuem corrente contínua menor que 40 ms, podem apresentar qualquer valor de pico de corrente, mas quando a corrente contínua tem duração superior a 40 ms, o valor de pico de corrente é inferior a 20 kA. Porém, essa característica não é vista nos raios descendentes positivos (pontos vermelhos), onde raios com corrente contínua muito longa podem apresentar picos de corrente altos.

Fonte: Saba et al. (2010).

Segundo Saba et al. (2010), 75% dos raios NS+ tendem a apresentar corrente contínua com duração superior a 40 ms. As correntes contínuas desses raios também podem apresentar picos de corrente superior a 10 kA (RAKOV; UMAN, 2003). Essa característica torna os raios NS+ perigosos, pois podem ser responsáveis por danos a estruturas, como prédios e antenas de telecomunicação, até mesmo a iniciar incêndios florestais.

2.2.3 Raios ascendentes

Descargas elétricas que partem do solo e se propagam em direção as nuvens são chamadas de raios ascendentes, que podem ser positivos ou negativos. Eles tendem a ocorrer a partir de objetos altos (com altura superior a 100 m), ou a partir de objetos que estejam em lugares de altitude alta, como topo de montanhas (RAKOV; UMAN, 2003).

Os raios ascendentes, ou solo-nuvem, correspondem a 1% do total de raios que envolvem o solo, e sua baixa percentagem é consequência da necessidade da ocorrência simultânea de condições especiais, como um objeto que esteja a uma altitude superior a 100m e a intensificação do campo elétrico ambiente causada, geralmente, por uma descarga próxima à esta estrutura (FERRO, 2022; RAKOV, 2016; SCHUMANN, 2016). A figura 2.6 a seguir apresenta um raio ascendente negativo.

Figura 2.6: Raio Ascendente Negativo.

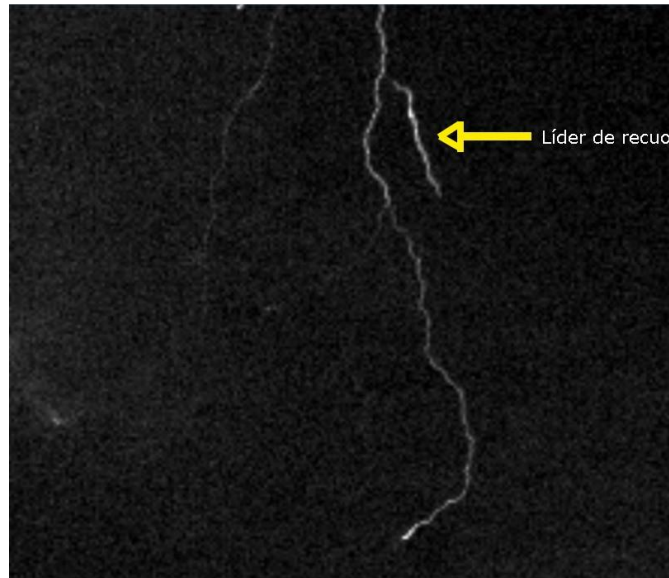


Fonte: INPE (2016).

2.3 Líder de Recuo

Os Líderes de Recuo são canais condutores flutuantes cuja extremidades tem polaridades opostas (MAZUR et al., 2013). Segundo Mazur (2016), os líderes de recuo se originam em canais decaídos dos líderes positivos, onde a extremidade negativa do líder de recuo reioniza parcialmente ou integralmente o canal do líder positivo. Na Figura 2.7 podemos ver a presença de um líder de recuo se propagando através de uma ramificação em direção ao canal principal de um raio descendente positivo.

Figura 2.7: Presença de um Líder de Recuo reionizando o canal rompido do Raio.

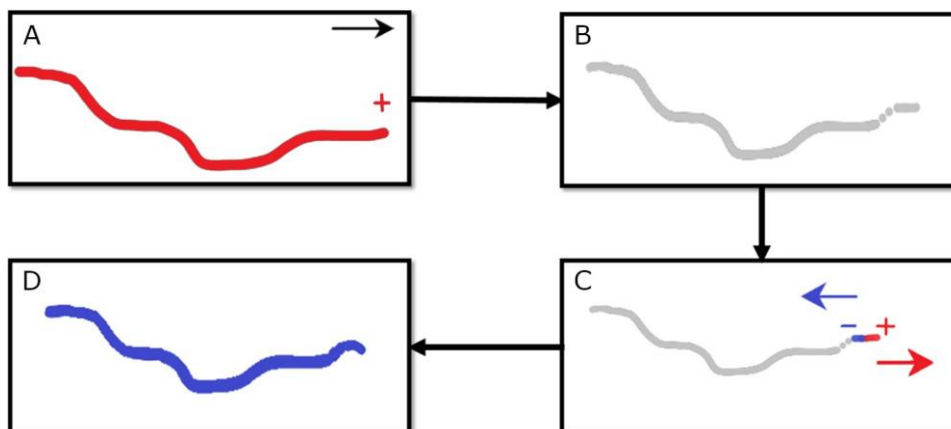


Fonte: Produção do Autor.

Os líderes de recuo se formam a partir da quebra do canal do líder positivo. À medida em que o líder positivo se desenvolve (Figura 2.8 (A)), ele se torna instável devido ao aumento no comprimento do canal. O aumento no comprimento no canal gera um aumento na resistência que dificulta a passagem de corrente, rompendo o canal nessa região (Figura 2.8 (B)) (FERRO, 2022).

Após o rompimento do canal, a parte rompida continua a apresentar a propagação da sua extremidade positiva (figura 2.8 (C)), injetando cargas negativas na extremidade oposta, próximo ao local do rompimento, fazendo com que essa extremidade, agora negativa, se propague pelo canal rompido em direção ao canal principal, reionizando o canal novamente (Figura 2.8 (D)) (FERRO, 2022).

Figura 2.8: Formação do Líder de Recuo em Raios Descendentes Positivos

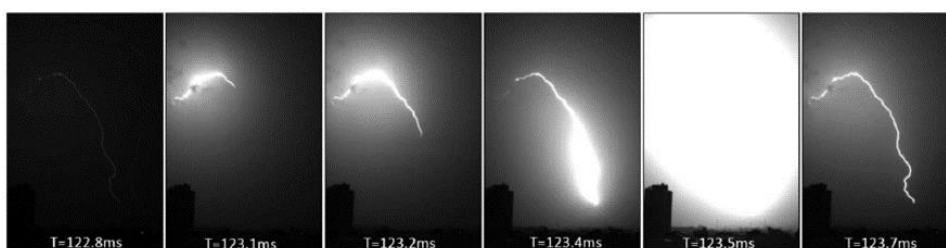


A) O raio positivo está se desenvolvendo para a direita, a medida em que sua resistência aumenta e vai se tornando instável; B) O canal do Raio Positivo se rompe; C) A extremidade positiva continua a se propagar, transferindo cargas para a outra extremidade que, conseqüentemente, se propaga pelo antigo canal D) O canal rompido se reioniza.

Fonte: Silva (2022).

Os líderes de recuo também são responsáveis pelas descargas de retorno subsequentes nos raios descendentes negativos, onde o raio toca o solo novamente utilizando o mesmo canal da primeira descarga. Eles também são responsáveis pela Componente M, caracterizada por uma intensificação luminosa no canal enquanto o raio apresenta corrente contínua (FERRO, 2022; MAZUR, 2016). A figura 2.9 apresenta o desenvolvimento de uma componente M.

Figura 2.9: Desenvolvimento de uma componente M (Esquerda para a direita).



Fonte: Saba et al. (2016).

Nos raios intranuvem, os líderes de recuo são responsáveis por manter o canal do raio ativo por mais tempo (MAZUR, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados um total de 147 vídeos de 2012 a 2018. Os vídeos foram gravados por câmeras de alta velocidade como a V711, V310, MIRO4 e V12. Os locais de aquisição dos vídeos foram as cidades de Rapid City e Kansas no Estados Unidos, e São Paulo no Brasil. Todos os vídeos analisados pertencem ao banco de dados do INPE.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Câmeras rápidas

As câmeras rápidas utilizadas têm a capacidade de registrar de 1.000 a 100.000 imagens por segundo (ips). Os vídeos registrados por estas câmeras possuem informação de tempo GPS estampado em cada imagem.

Os modelos das câmeras utilizadas foram: Phantom v711 (10.000 e 20.000 ips), Phantom v310 (10.000 ips), miro4 (1.000 ips) e Phantom V12 (6.000 ips) como mostrado na figura a 3.1 seguir.

Figura 3.1: Modelos das Câmeras Utilizadas.

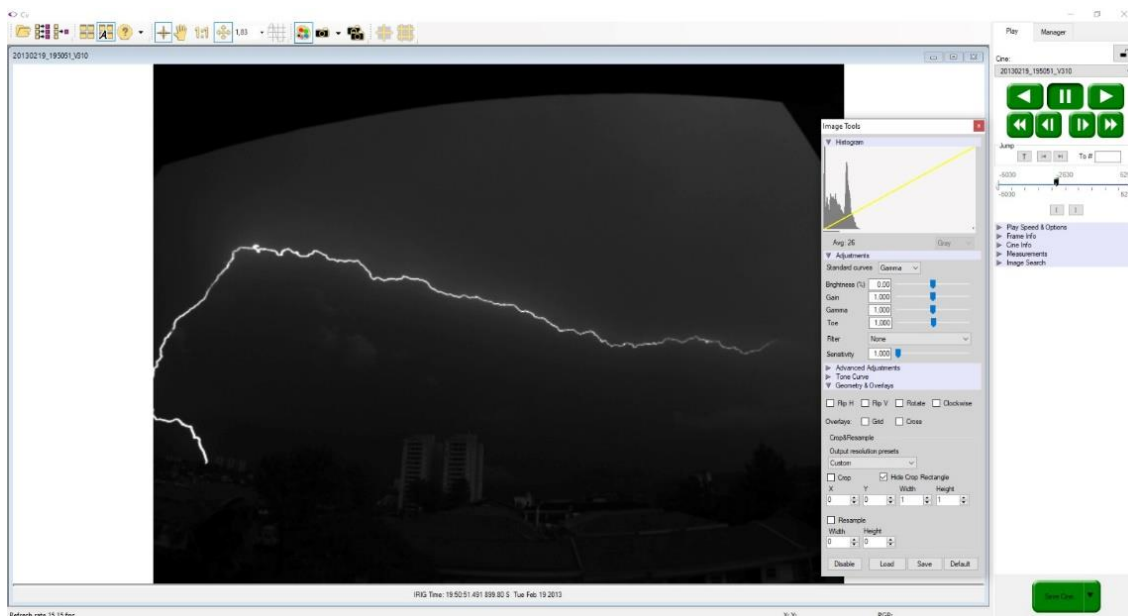


A) Phantom v310, B) Phantom v711, C) miro 4 e D) Phantom V12.

Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

O programa utilizado para a observação dos vídeos foi o Cine Viewer. Este programa foi desenvolvido pela Phantom, fabricante das câmeras utilizadas, e permite uma análise detalhada dos vídeos, como a observação de imagem por imagem. A figura 3.2 apresenta o programa utilizado.

Figura 3.2: Programa Cine Viewer da fabricante Phantom.



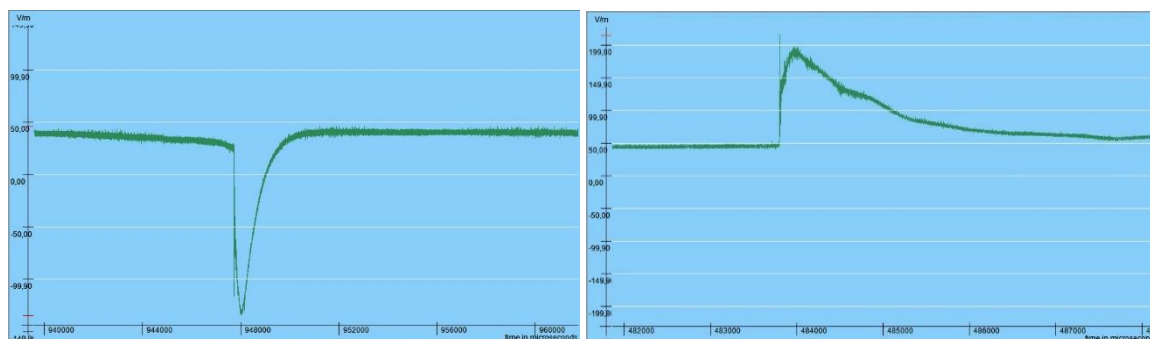
O vídeo apresentado acima é de um raio descendente positivo que ocorreu dia 19/02/2013 às 19:50:51.483809.

Fonte: Produção do Autor.

3.1.2 Campo elétrico

O campo elétrico foi utilizado para confirmar a polaridade dos raios positivos e negativos, pois a aproximação dos dois líderes com o solo causa variações no campo elétrico diferentes. Como pode ser observado na figura 3.3, quando há variação de campo elétrico negativa, isso indica que o líder que se propaga em direção ao solo é negativo enquanto uma variação positiva indica a aproximação de um líder positivo do solo.

Figura 3.3: Pulsos Característicos das Descargas de Retorno dos Raios Descendentes.



À esquerda temos de um raio descendente negativo, que ocorreu dia 19/02/2013 às 18:28:00.947762, com a variação de campo elétrico negativa e à direita de um raio descendente positivo, que ocorreu dia 19/02/2013 às 19:50:51.483809, com a variação de campo elétrico positiva.

Fonte: Produção do Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizada uma análise dos dados de vídeo e campo elétrico, reunindo diferentes informações em uma tabela Excel em categorias como: local, câmera, data, hora, tipo de raio, polaridade do raio (Positivo ou Negativo), imagem do momento de contato do raio descendente com o solo, presença de Líder de Recuo e a imagem onde se pode ver o mesmo.

A análise dos raios teve como foco analisar apenas os raios descendentes positivos, que foram identificados através da forma de onda do campo elétrico, permitindo diferenciar entre positivo e negativo. O objetivo desta análise foi identificar a presença de líderes de recuo nestes raios e observar se este fenômeno estava presente logo antes deste raio estabelecer contato com o solo. A imagem 4.1 apresenta parte da tabela feita para aquisição das informações.

Figura 4.1: parte da tabela de informações obtidas através dos vídeos e sensores de campo elétrico.

Local	Lightning	Camera	year	month	day	hour	min	sec,ms	ms	frame	vis	type	contact	poitroke	ordc	RL	Frame C	Frame 10
São Paulo	118	V310	2012	12	27	19	36	44,441	441	-3508	v	eg	1	a	S		-3528	-3528
São Paulo	119	V310	2012	12	27	19	43	52,505	505	-3486	v	eg	1	a	S		-3492	-3492
São Paulo	127	V310	2013	1	25	19	48	42,562	562	-4100	v	eg	1	a	S		-4185	-4141
São Paulo	140	V310	2013	2	1	20	4	4,066	66	-3966	v	eg	1	a	S		-3975	-3975
São Paulo	141	V310	2013	2	1	20	48	58,399	399	-3671	v	eg	1	a	S		-3672	-3672
São Paulo	176	V310	2013	2	19	19	50	51,484	484	-2707	v	eg	1	a	S		-2751	-2712
São Paulo	180	V310	2013	2	27	0	14	8,714	714	-2146	v	eg	1	a	N		-	-
São Paulo	6	V310	2013	12	5	20	37	15,395	395	-4602	v	eg	1	a	N		-	-
São Paulo	7	V310	2013	12	5	21	21	19,452	452	-3142	v	eg	1	a	S		-3145	-3145
São Paulo	13	V711	2014	1	5	20	48	21,944	944	-3191	v	eg	1	a	S		-3191	-3191
São Paulo	25	V711	2014	1	13	18	33	0,832	832	-6645	v	eg	1	a	S		-6647	-6647
São Paulo	29	V711	2014	1	14	23	23	32,23	230	-6243	v	eg	1	a	S		-6317	-6245
São Paulo	53	V711	2014	1	22	21	54	55,585	585	-2740	v	eg	1	a	S		-	-2743
São Paulo	54	V711	2014	1	22	21	57	52,117	117	-2125	v	eg	1	a	S		-	-2129
São Paulo	59	V711	2014	2	9	21	27	14,764	764	-2943	v	eg	1	a	S		-	-3230
São Paulo	61	V310	2014	2	13	22	27	37,047	47	-6281	v	eg	1	a	S		-	-6304
São Paulo	62	V310	2014	2	13	22	45	54,345	345	-3011	v	eg	1	a	S		-	-3041
São Paulo	63	V310	2014	2	13	22	56	8,115	115	-6288	v	eg	1	a	S		-	-6297
São Paulo	65	V310	2014	2	15	0	1	35,567	567	-3951	v	eg	1	a	S		-	-3954
São Paulo	66	V310	2014	2	15	0	7	6,955	955	-2355	v	eg	1	a	S		-	-2358
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	4,334	334	-2887	v	eg	1	a	S		-	-2892
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	4,7	700	779	v	eg	2	b	S		-	773
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	4,73	730	1076	v	eg	2	c	S		-	1076
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	4,756	756	1339	v	eg	2	d	S		-	1339
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	5,023	23	4004	v	eg	2	e	N		-	-
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	5,115	115	4925	v	eg	2	f	N		-	-
São Paulo	78	V711	2014	2	25	19	41	5,185	185	5622	v	eg	2	g	N		-	-

Fonte: Produção do Autor.

Após a análise dos dados fornecidos, foram registrados 147 vídeos de raios descendentes positivos na tabela, onde 67,4 % do total apresentou líder de recuo antes de tocar o solo, e 32,6 % do total não apresentando líder de recuo no momento anterior ao contato com o solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse trabalho, foi possível reunir informações relacionadas aos raios descendentes positivos através da análise de várias das imagens obtidas através de câmeras de alta velocidade e pelos dados dos sensores de campo elétrico, fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados obtidos e organizados na tabela produzida serão utilizados posteriormente para compreender os estágios finais de conexão com o solo do raio descendente positivo, as possíveis relações entre os Líderes de Recuo e a velocidade de aproximação desses raios com o solo ou estruturas no solo.

Esses resultados são de grande importância para a compreensão do processo de conexão do raio com o solo e estruturas com solo e para a criação de medidas de mitigação dos efeitos dessas conexões, como o estabelecimento de parâmetros que poderão ser utilizados no aprimoramento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas que são usados em prédios e em torres de telecomunicação, por exemplo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COORAY, V. **An Introduction to Lightning**. Uppsala, Sweden: Springer, 2015. 391 p. ISBN(9789401789387).

DWYER, J. R.; UMAN, M. A. **The physics of lightning**. **Physics Reports**, v. 534, n. 4, p. 147 - 241, 2013.

FERRO, M. A. S. **Afinal, o que, Raios, é isso**. Ed. Do Autor. São José dos Campos, SP: INPE, 2022. 210 p. ISBN 978-65-00-55553-0.

MAZUR. **Principles of Lightning Physics: Principles of Lightning Physics**. Ed. 20161201. National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, USA, 2016. 183 p. ISBN 978-0-7503-1152-6.

MAZUR, V. et al. Recoil leader formation and development. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 4, p. 763–768, ago. 2013.

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, 16 mar. 2009.

SILVA, T. P. **ESTUDO DOS RAIOS INTRANUVEM ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO**. 2022. 98 p. (INPE - 03.17.12.55-TDI). São José dos Campos, SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

RAKOV, V. A. **Fundamentals of Lightning**. [s.l.] Cambridge University Press, 2016. ISBN (9781139680370).

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

SABA, M. M. F. et al. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. 24, 2010.

SABA, M. M. F. et al. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research**, v. 121, n. 14, p. 8493–8505, 2016.

SCHUMANN, C. **CARACTERIZAÇÃO DOS RAIOS POSITIVOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO**. 2012. 135 p. (INPE - 04.23.13.25-TDI). São José dos Campos, SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

SCHUMANN, C. ESTUDO DOS RAIOS ASCENDENTES A PARTIR DE OBSERVAÇÕES DE CÂMERAS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL E DE MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO. 2016. 180 p. (INPE - 05.04.19.06-TDI). São José dos Campos, SP: Dissertação (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

TOUCEDO CRUZ, I. LÍDERES DE RECUO EM RAIOS ASCENDENTES. 2022. 120p. (INPE - 03.14.18.54-TDI) São José dos Campos – SP: Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.