



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)

Felipe de Lima Mantovani (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bolsista
PIBIC/CNPq)

E-mail: felipe.mantovani@unesp.br

Marcelo Magalhães Fares Saba (INPE/DISSM, Orientador)

E-mail: marcelo.saba@inpe.br

Tagianne Patrícia da Silva (INPE/DISSM, Coorientadora)

E-mail: tagianne.silva@inpe.br

INPE
São José dos Campos
2023

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

Felipe de Lima Mantovani

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

INPE
São José dos Campos
2023

RESUMO

Os raios são fenômenos atmosféricos recorrentes em baixas latitudes, locais mais quentes e úmidos. Os primeiros estudos relacionados a este tipo de fenômeno baseavam-se na estimativa de sua ocorrência. Com o avanço da tecnologia, foi possível adquirir imagens, por intermédio de câmeras de alta velocidade, da propagação dessas descargas, além de dados físicos como sinal de campo elétrico, corrente elétrica e raios-x produzidos pelo canal do raio. Os raios podem ser classificados de duas maneiras: os que não tocam o solo (intranuvem); e os que mantêm contato com o solo (descendente e ascendente), podendo ainda ser de polaridade positiva ou negativa; a depender da polaridade da carga que está sendo transferida para o solo. Os raios analisados neste trabalho foram descendentes positivos. Esse tipo de descarga ocorre tipicamente no final de tempestades, e com menor frequência devido a distribuição de cargas no interior da nuvem. Este trabalho apresenta a classificação dos raios registrados durante os verões de 2003 a 2022 nas cidades de São Paulo, São José dos Campos (Brasil) e Utah (Estados Unidos) onde foram instaladas câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico próximos ao local do evento. Primeiramente foi desenvolvida uma tabela contendo o tipo de raio (intranuvem, descendente ou ascendente), a polaridade (negativa ou positiva) e o tempo de sua ocorrência (adquirido por meio de antena de GPS). Esses dados foram associados ao perfil de campo elétrico, para que a polaridade da descarga elétrica fosse confirmada. Em seguida, os dados da tabela foram confrontados com dados do sistema de localização de descargas (*lightning location system (LLS)*) que identifica hora e local das descargas e seus picos de corrente. Os picos de corrente associados aos raios registrados em vídeos foram adicionados à tabela que serão utilizados em análises futuras. Essas análises auxiliam no desenvolvimento da pesquisa referente a raios feita no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Palavras-chave: Raio Descendente Positivo. Câmera de alta velocidade. Campo elétrico.

STUDY OF LIGHTNING THROUGH VIDEO CAMERAS AND ELECTRIC FIELD SENSORS

ABSTRACT

Lightning is a very recurrent atmospheric phenomenon at low latitudes, between the tropics, warmer and wetter places. The first studies related to this type of phenomenon were based on the estimation of its occurrence. With the advancement of technology, it was possible to acquire images, through high-speed cameras, of the propagation of these discharges, in addition to physical data such as electric field signal, electric current and x-lightning produced by the lightning channel. lightning can be classified in two ways: those that do not touch the ground (intracloud); and those that maintain contact with the ground (downward and upward), and can still be of positive or negative polarity; depending on the polarity of the charge being transferred to the ground. The lightning analyzed in this work were positive descendants. This type of discharge typically occurs at the end of storms, and less frequently due to the distribution of charges within the cloud. This work presents the classification of lightning recorded during the summers from 2003 to 2022 in the cities of São Paulo, São José dos Campos (Brazil) and Utah (United States) where high-speed cameras and electric field sensors were installed near the site of the event. First, a table was developed containing the type of lightning (intracloud, downward and upward), the polarity (negative or positive) and the time of its occurrence (acquired through a GPS antenna). These data were associated with the ambient electric field, so that the polarity of the electric discharge was confirmed. Then, the data in the table were compared with data from the lightning location system (LLS) that identifies the time and place of the discharges and their current peaks. Current peaks associated with lightning recorded in videos were added to the table which will be used in future analyses. These analyzes help in the development of research related to lightning carried out at the National Institute for Space Research (INPE).

Keywords: Positive Cloud to Ground Lightning . High-speed camera. Electric field.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Cumulonimbus - Nuvem de Tempestade
- Figura 2.2: Distribuição das cargas elétricas dentro de uma nuvem de tempestade segundo as medições de Simpson e Scrase 1937, Simpson e Robinson 1941 e Williams 1989.
- Figura 2.3: Porcentagem de ocorrência conforme tipo de raios.
- Figura 2.4: Tipos de Descargas Atmosféricas
- Figura 2.5: Raio Intranuvem
- Figura 2.6: Raio Ascendente
- Figura 2.7: Raio Descendente Negativo
- Figura 2.8: Raio Descendente Positivo
- Figura 2.9: Gráfico apresentado em resposta a uma descarga elétrica pelo sensor de campo elétrico de um raio negativo.
- Figura 3.1: Locais de posicionamento dos equipamentos no Pico do Jaraguá
- Figura 3.2: Locais de posicionamento dos equipamentos no Banhado (SJC)
- Figura 3.3: Locais de posicionamento dos equipamentos no Deserto de Utah (EUA)
- Figura 3.4: Câmeras de alta velocidade *Phantom*.
- Figura 3.5: Câmeras fotográficas Nikon.
- Figura 3.6: Baterias organizadas em uma caixa de proteção
- Figura 3.7: Antena de campo elétrico utilizada e painel solar.
- Figura 3.8: Teste de Fibra Óptica com gerador de função e osciloscópio.
- Figura 4.1: Gráfico em resposta do Campo Elétrico de um raio negativo (a) e outro positivo (b), respectivamente.
- Figura 4.2: Diferentes raios encontrados nos vídeos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 Nuvens de tempestade	9
2.2 Tipo de raios	11
2.2.1 Raios intranuvem	13
2.2.2 Raios ascendentes	13
2.2.3 Raios descendentes	14
2.2.3.1 Raios descendentes negativos	14
2.2.3.2 Raios descendentes positivos	15
2.3 Campo Elétrico	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 Equipamentos e instalações	18
3.2 Lightning Location Systems	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5 CONCLUSÃO	26

1 INTRODUÇÃO

Os raios são fenômenos já observados desde eras antigas, onde os povos do norte acreditavam serem sinais de deuses e tribos no continente africano a orixá Iansã (SANTOS, 2019; MATHIAS, 2020). Ambos os conceitos estão associados a um fenômeno luminoso que se espalha nos ares podendo chegar até mesmo ao solo, causando grandes danos. Acompanhado dessa força luminosa que rasga os céus, conhecida hoje como raio, vinham as grandes nuvens de tempestade trazendo chuvas torrenciais, enchentes, granizo, ventos intensos e eventualmente os temíveis tornados.

Os primeiros estudos relacionados a este tipo de fenômeno baseavam-se na observação do campo elétrico, não sendo possível visualizar o canal do raio, com o tempo foram utilizadas câmeras de alta velocidade que permitiram observar a propagação dos raios. Assim, com o avanço da tecnologia e por meio de câmeras de alta velocidade foi possível adquirir imagens da propagação dessas descargas, além de dados físicos como variação de campo elétrico, corrente elétrica e raios-x. Utilizando-se dessas novas tecnologias e teorias, foi possível classificar os raios em dois grandes grupos: os que tocam o solo, descendente e ascendente, e os que não o tocam, intranuvem; e ainda podem ser de polaridade positiva ou negativa. Através dessa classificação mais estudos foram desenvolvidos e aprimorados para identificação de mais dados.

O Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) possui uma série de dados armazenados para análise de diversos pesquisadores. O grupo conta com equipamentos sofisticados para o registro dos raios, como câmeras de alta velocidade e sensores de campo e corrente elétrica, com a finalidade de registrar os processos físicos da propagação de raios ascendentes, descendentes e intranuvem.

Este trabalho apresenta informações de diversos vídeos analisados por diferentes câmeras de alta velocidade associadas a dados de campo elétrico, dando enfoque a classificação de raios do tipo descendente positivo, e a importância de organizar tais dados para prospecção de outras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Nuvens de tempestade

As nuvens são formadas através dos efeitos do calor irradiado pelo Sol que atinge a superfície da Terra. Este calor evapora a água e, por ser menos denso que o ar ao nível do mar, o vapor d'água sobe e ao encontrar regiões mais frias da atmosfera acaba condensando formando pequenas partículas de água que compõem as nuvens. Porém, as nuvens de

tempestade distinguem-se em seus aspectos. O nome técnico dado a essas nuvens é cumulonimbus (Figura 2.1), e têm sua formação a partir das cumulus; nuvens baixas que iniciam seu desenvolvimento em aproximadamente 1.000 m de altura (WALLACE; HOBBS, 2006).

Figura 2.1: Cumulonimbus - Nuvem de Tempestade



Cumulonimbus, também conhecida como Nuvem de Tempestade no céu.

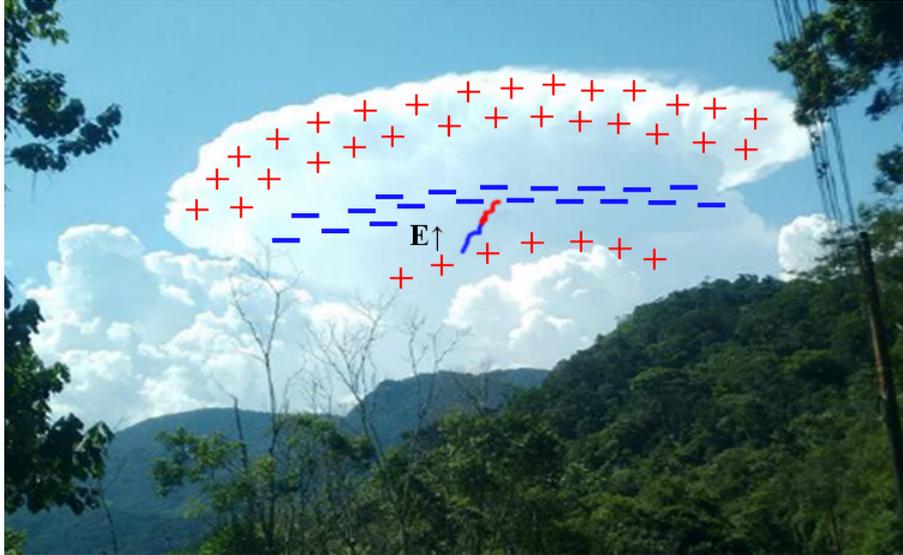
Fonte: Adaptado de LAURIA (2021).

Somente as cumulonimbus possuem as condições para gerar eletrização dentro das nuvens e assim gerar descargas elétricas (raios) (FERNANDES, 2006; FERRO, 2020). Previamente acreditava-se que nuvens de tempestades eram compostas por duas regiões horizontais carregadas eletricamente e dispostas uma sobre a outra (dipolo). Contendo uma concentração de cargas negativas na parte inferior da nuvem e outra região com cargas positivas na parte superior. Estudos feitos posteriormente através das medições do campo elétrico em função da altura dentro de uma nuvem de tempestade verificaram que devido ao perfil do campo elétrico deveria existir uma terceira região de polaridade positiva, de menor carga, abaixo da região negativa (Figura 2.2). Esta disposição de três regiões é denominada de tripolar (SIMPSON; SCRASE, 1937; SIMPSON; ROBINSON, 1941; WILLIAMS, 1989).

Assim, as cumulonimbus possuem grandes quantidades de cargas separadas em três centros, um grande centro positivo próximo ao topo da nuvem, um grande centro negativo na região central da nuvem e um centro menor positivo próximo a base; como pode ser observado na Figura 2.2. Havendo uma intensificação no campo elétrico, entre dois centros de cargas, ocorre a quebra de rigidez dielétrica do ar e os raios surgem e se desenvolvem,

horizontal e verticalmente, podendo se desenvolver para fora da nuvem de tempestade e atingir o solo eventualmente.

Figura 2.2: Distribuição das cargas elétricas dentro de uma nuvem de tempestade segundo as medições de Simpson e Scrase 1937, Simpson e Robinson 1941 e Williams 1989.



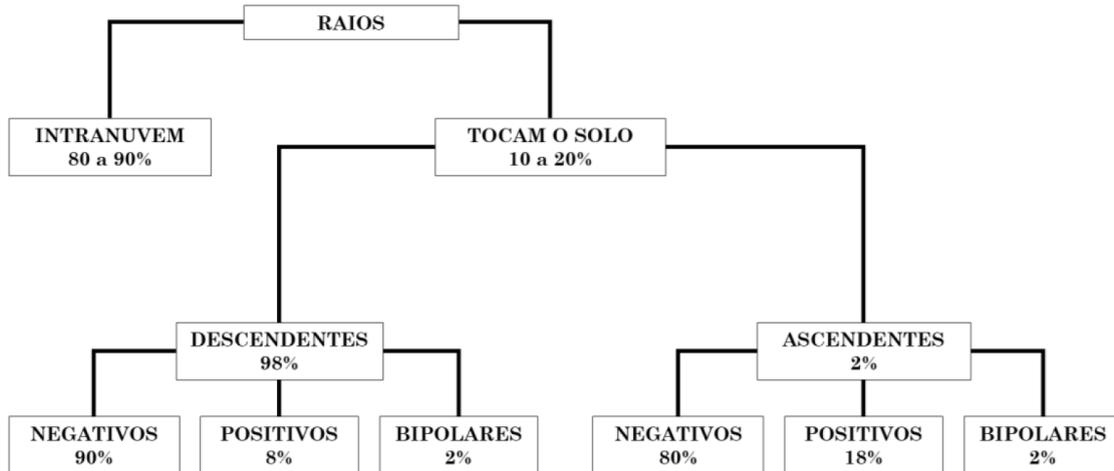
Distribuição de cargas dentro de uma *Cumulonimbus*, concentrando cargas positivas na região superior e inferior da nuvem, e negativas em seu centro; e o campo elétrico (E) devido às cargas negativas e as positivas.

Fonte: Adaptado de LAURIA (2021).

2.2 Tipo de raios

Existem dois tipos de classificação para os raios: os que tocam o solo (descendentes e ascendentes) e os que não tocam o solo (intranuvem). Os raios ascendentes e descendentes possuem polaridades positiva ou negativa, a depender da carga que é transferida para o solo (UMAN, 2012; AKINYEMI et al., 2014; ROMERO; PIANTINI, 2015). A Figura 2.3 esquematiza os tipos de raios, suas polaridades e frequência de ocorrência (RAKOV; UMAN, 2003).

Figura 2.3: Porcentagem de ocorrência conforme tipo de raios.

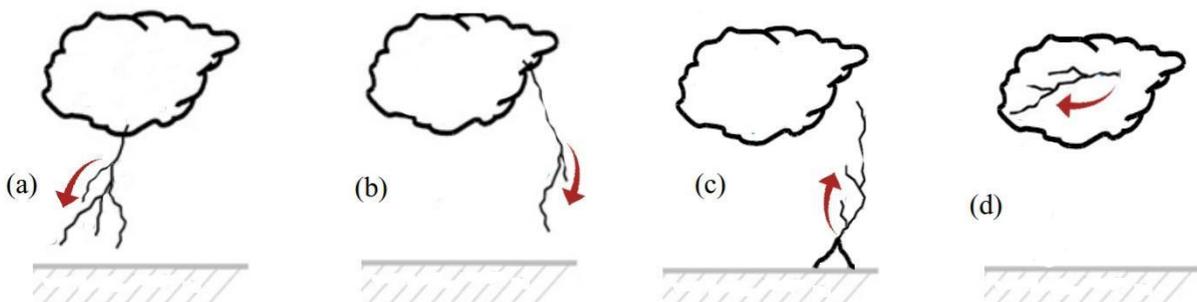


Fonte: Adaptado de LAURIA (2021).

Nota-se, como mostrado na Figura 2.3, que os raios que tocam o solo apresentam menor frequência em comparação com os intranuvem, durante a ocorrência de uma tempestade; dentre os que tocam o solo, os raios ascendentes são ainda menos frequentes.

Na Figura 2.4 vemos uma melhor ilustração do sentido das descargas elétricas sendo a, b e c, raios que tocam o solo, classificam respectivamente como: raio descendente negativo, raio descendente positivo e raio ascendente (positivo ou negativo), e em d vemos um raio intranuvem.

Figura 2.4: Tipos de Descargas Atmosféricas



Em (a) está ilustrado um raio descendente (nuvem-solo) negativo, em (b) um raio descendente (nuvem-solo) positivo, em (c) encontra um raio ascendente (solo-nuvem) e em (d) um raio intranuvem, que não tocar o solo.

Fonte: Adaptado de Rachidi and Rubinstein (2009).

2.2.1 Raios intranuvem

Descargas elétricas que ocorrem dentro da nuvem e que não chegam a tocar o solo são classificadas como raio intranuvem. Esses raios correspondem a cerca de 80 a 90% das ocorrências numa tempestade. (RAKOV; UMAN, 2003). A Figura 2.5, apresenta uma imagem de raio intranuvem se propagando próximo a base da nuvem de tempestade.

Figura 2.5: Raio Intranuvem



Fonte: INPE (2023).

2.2.2 Raios ascendentes

As descargas elétricas atmosféricas do tipo ascendente ocorrem a partir de estruturas altas (ANDERSON e ERIKSSON, 1980; UMAN, 1987; RAKOV, 2007). Surgem, em sua maioria, no final da tempestade em resposta à perturbação na nuvem causada geralmente por líderes negativos durante a propagação do raio intranuvem ou a raios descendentes positivos (SABA et al., 2016; SCHUMANN et al., 2019). Os raios ascendentes são os que possuem menor incidência nas tempestades; abrangendo apenas 1% de ocorrência em comparação com o intranuvem e descendentes (SABA et al., 2016) (Figura 2.6).

Figura 2.6: Raio Ascendente



Fonte: INPE (2023).

2.2.3 Raios descendentes

Os raios descendentes são considerados as descargas elétricas que se iniciam na nuvem de tempestade e se propagam em direção ao solo, também chamados de nuvem-solo. Os raios nuvem solo são de 10% a 20% dos raios que ocorrem numa tempestade, e constituem 99% do total de raios que envolvem o solo. Dentre eles 90% correspondem a raios descendentes negativos (transferem cargas negativas para o solo) e os demais 10% correspondem aos raios descendentes positivos (transferem cargas negativas para a nuvem) (FERRO, 2020).

2.2.3.1 Raios descendentes negativos

Toda vez que o raio toca o solo há uma descarga de retorno, a quantidade de descargas de retorno é uma característica conhecida como multiplicidade (NAG et al., 2009). Os raios descendentes negativos geralmente possuem multiplicidade de aproximadamente 3,8, com média de 1,7 pontos de contato com o solo (SARAIVA et al., 2010). Em geral, esses raios são mais ramificados e ocorrem geralmente no início da tempestade (RAKOV; UMAN, 2003). Além disso, os raios negativos também possuem corrente contínua, sendo essa a corrente que flui pelo canal do raio, mantendo-o ativo por um intervalo de tempo superior a 3 milissegundos (ms) (BALLAROTTI; SABA; PINTO, 2005); quando a duração da corrente contínua é superior a 40 ms essa é denominada corrente contínua longa (BROOK, et al. 1962), porém não tanto longas e aparentes quanto nos raios descendentes positivos.

Na Figura 2.7 apresenta um raio negativo e suas ramificações. Em uma fração de tempo pequena o mesmo raio tocou duas vezes pontos diferentes no solo.

Figura 2.7: Raio Descendente Negativo



Fonte: INPE (2023).

2.2.3.2 Raios descendentes positivos

Os raios descendentes positivos possuem uma multiplicidade considerada pequena de 1,2. Oposto aos raios descendentes negativos, os positivos ocorrem no final das tempestades, constituindo a minoria dos raios descendentes (UMAN, 1987; RAKOV; UMAN, 2003; RAKOV, 2007; SABA et al., 2010). Em geral, esses raios não são muito ramificados e em relação a corrente contínua (CC) os raios positivos apresentam CC longa em 75% dos casos, enquanto os negativos em apenas 30% (SABA et al., 2010). Na Figura 2.8 pode-se ver um raio descendente positivo.

Figura 2.8: Raio Descendente Positivo



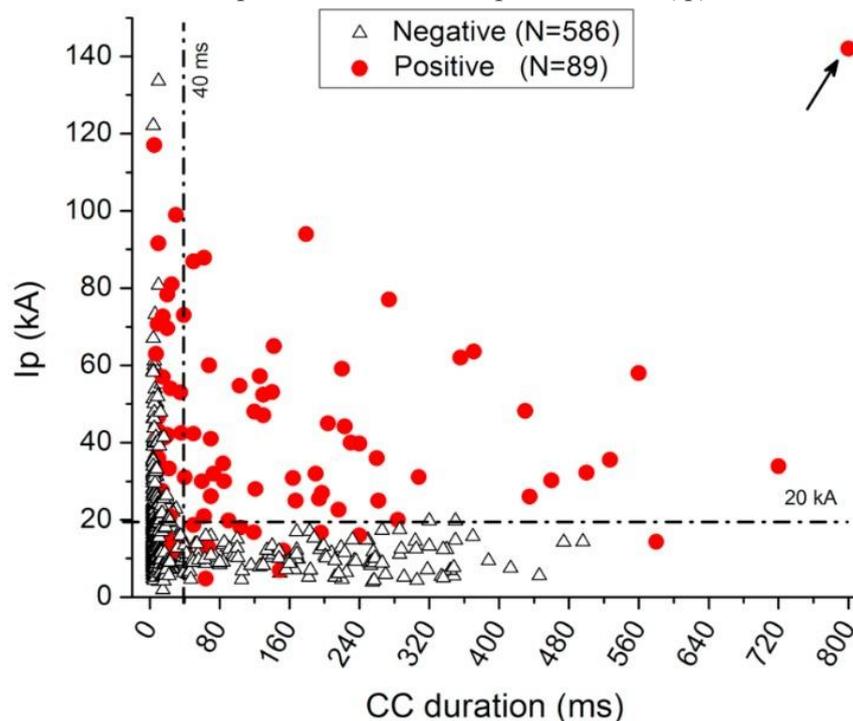
Fonte: INPE (2023).

Os líderes positivos geralmente produzem líderes de recuo (RLs) que retraçam o canal do líder positivo, intensificando a sua luminosidade. Embora os raios nuvem-solo (+CG)

positivos não sejam tão frequentes quanto os raios nuvem-solo negativos, suas características especiais de altos picos de corrente, grande quantidade de cargas transferidas para o solo e corrente contínua longa tornam a compreensão de seus parâmetros físicos uma questão importante (SCHUMANN, 2012). Apesar de não haver muita diferença entre as velocidades médias dos líderes negativos e dos líderes positivos, Campos et al (2014) observa que a velocidade de aproximação dos líderes positivos tende a aumentar à medida que se aproximam do solo, diferentemente dos líderes negativos.

Os raios positivos tendem a não respeitar a zona de exclusão de SABA (Saba et al. 2010). Enquanto os raios negativos com CC de duração maior que 40 ms apresentam pico de corrente abaixo de 20 kA, como pode ser visto representado por triângulos na figura (Figura 2.8), os raios positivos não apresentam esse mesmo padrão (pontos vermelhos). Logo, raios positivos com longa duração podem apresentar picos de corrente mais altos concomitantemente.

Figura 2.9: Gráfico de dispersão da corrente de pico estimada (I_p) versus duração CC



No gráfico acima, os triângulos representam os raios nuvem solo negativos, quando possuem CC menor que 40 ms podem apresentar qualquer valor de pico de corrente associado, mas quando apresentam valores de CC maiores que 40 ms, o pico de corrente não passa dos 20kA. Porém esse comportamento não é observado em raios positivos (pontos vermelhos), onde raios com CC muito longa podem sim apresentar picos de corrente muito altos.

Fonte: Saba et al. 2010

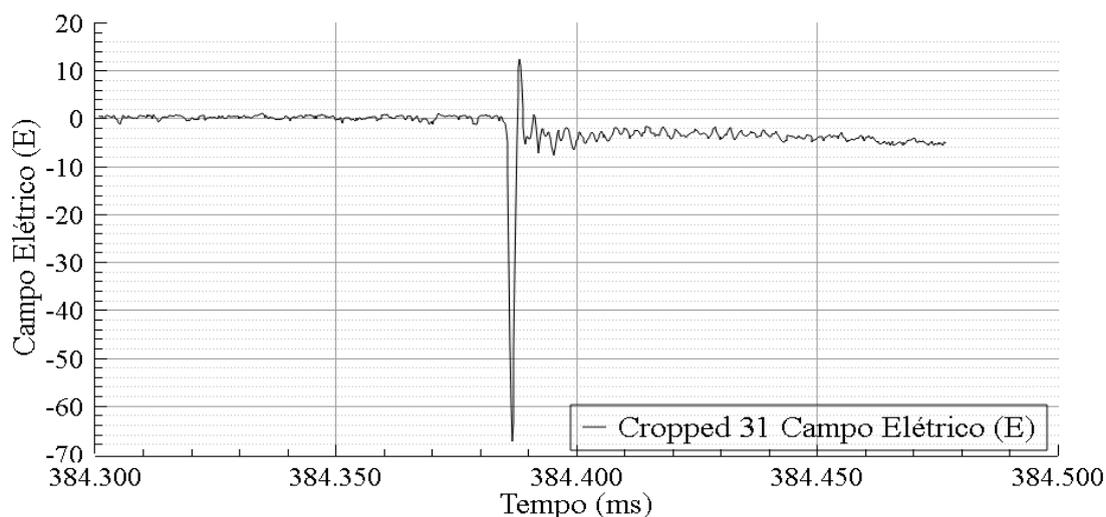
Picos de correntes altos associados a corrente contínua longas são responsáveis por grandes prejuízos a estruturas atingidas e até mesmo pela ocorrência de grandes incêndios florestais (DE SOUZA CAMPOS, 2005).

2.3 Campo Elétrico

Todas as descargas elétricas atmosféricas estão diretamente associadas ao rápido movimento de cargas elétricas. O estudo da medida da variação do campo elétrico, associada a esse movimento de cargas, auxilia no entendimento dos principais processos físicos do raio. Uma antena rápida tipo prato é usada para registrar as variações do campo elétrico causadas pela descarga elétrica atmosférica. Apresentando tempo de decaimento de 0,5 ms e taxa de aquisição de 5.000.000 amostras por segundo, resultando em um intervalo entre amostragens de 200 nanossegundos (ns).

Devido a essas características técnicas, a antena apresenta uma excelente resolução temporal, permitindo a reprodução da forma de onda do campo elétrico e visualizando a “assinatura” do campo elétrico (característica de cada um dos processos que compõem as descargas elétricas). Permite, também, medidas mais confiáveis da variação na amplitude do campo elétrico durante a ocorrência desses processos (FERRO, 2008). A Figura 2.9 apresenta a variação do campo elétrico produzido por um raio negativo, obtido através de uma antena de modelo tipo prato.

Figura 2.9: Gráfico apresentado em resposta a uma descarga elétrica pelo sensor de campo elétrico de um raio negativo.



Conforme visualizado na gráfico (a), a variação negativa de campo elétrico indica um raio nuvem-solo (descendente) negativo, sendo a variação abrupta do campo elétrico um indicativo do momento em que o raio toca o solo, onde ocorre a transferência de cargas muito rápida entre o canal do raio e o solo.

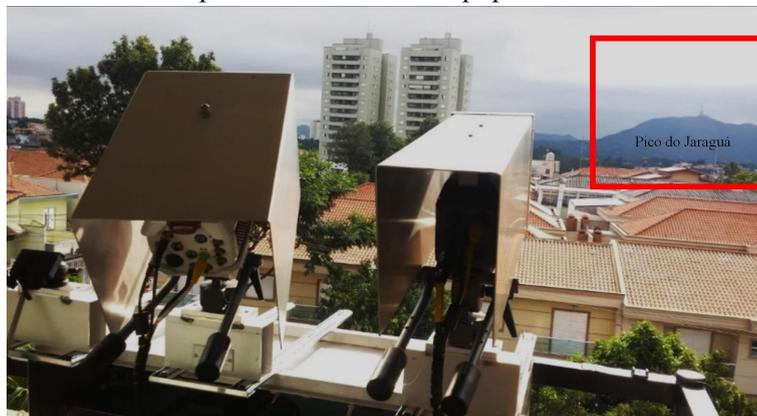
Fonte: Produção do Autor (2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos e instalações

A coleta dos dados do presente trabalho abrange os anos de 2003 a 2018, ocorrida na cidade de São Paulo (localizada no estado de São Paulo, Brasil), em São José dos Campos (localizada no estado de São Paulo, Brasil) e em Utah (Estados Unidos). Os equipamentos estavam localizados próximos ao Pico do Jaraguá - Cidade de São Paulo, no Banhado - Cidade de São José dos Campos (Figura 3.2) e no deserto de Utah nos Estados Unidos (Figura 3.3).

Figura 3.1: Locais de posicionamento dos equipamentos no Pico do Jaraguá



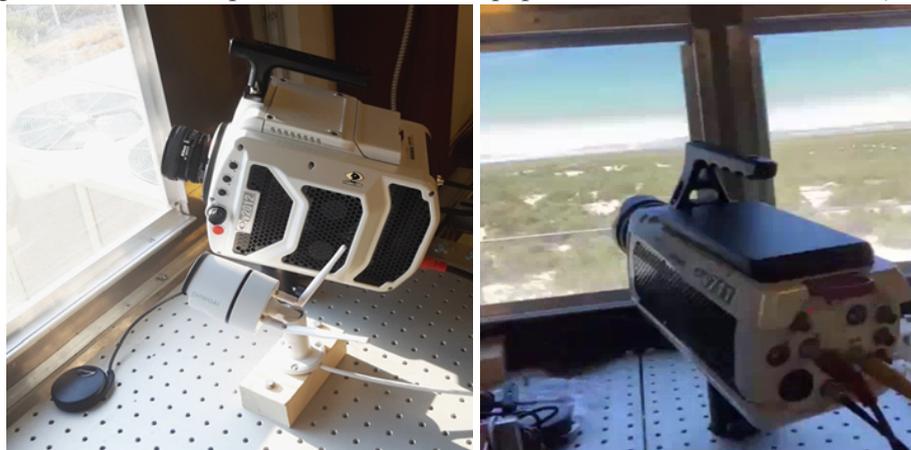
Fonte: INPE (2015).

Figura 3.2: Locais de posicionamento dos equipamentos no Banhado (SJC)



Fonte: INPE (2023).

Figura 3.3: Locais de posicionamento dos equipamentos no Deserto de Utah (EUA)



Fonte: INPE (2015).

Para o registro das descargas elétricas foram utilizados três tipos de câmeras:

- a) Câmeras de alta velocidade modelos: V711, V9, V2012;
- b) Câmeras Convencionais (30 fps): MV-CA013-20UM;
- c) Câmeras Fotográficas: D200, D300 e D800.

As câmeras de alta velocidade utilizadas no presente trabalho são da fabricante *Phantom Research*, Figura 3.4. Tais câmeras operam a uma taxa superior a 30.000 imagens por segundo (*frames per second – fps*). Além da mídia obtida pela gravação, também consta o horário de ocorrência da gravação com precisão de milissegundos obtido através de uma antena GPS (*Global Positioning System*). Os vídeos registrados dos eventos atmosféricos foram analisados no programa “*Phantom Camera Control Application*” utilizado para a análise das imagens e dados de hora.

Figura 3.4: Câmeras de alta velocidade *Phantom*.



Fonte: *Phantom Ametek*.

As câmeras fotográficas utilizadas, registram o momento das descargas, operando automaticamente sempre que havia variação na luminosidade do ambiente. A Figura 3.5

apresenta os modelos das câmeras Nikon D300 (a) e D800 (b), utilizando uma lente de amplificação.

Figura 3.5: Câmeras fotográficas Nikon.



Fonte: Nikon.

Além das câmeras de vídeo, foram instalados sensores de campo elétrico próximo aos equipamentos, ativados por um operador no início da tempestade. As medições da variação do campo elétrico foram feitas a partir da antena do tipo prato de dipolo simples abastecida por baterias de 12 Volts (Figura 3.6) ligadas a um painel solar (Figura 3.7) e, para leitura dos dados de campo elétrico, utilizou o programa *SciDavis*, no qual também permite a plotagem e melhor manipulação dos dados.

Figura 3.6: Baterias organizadas em uma caixa de proteção



As baterias estavam ligadas com uma placa solar que as alimentava, e com uma Antena de Campo Elétrico.

Fonte: Produção do autor (2023).

Figura 3.7: Antena de campo elétrico utilizada e painel solar.

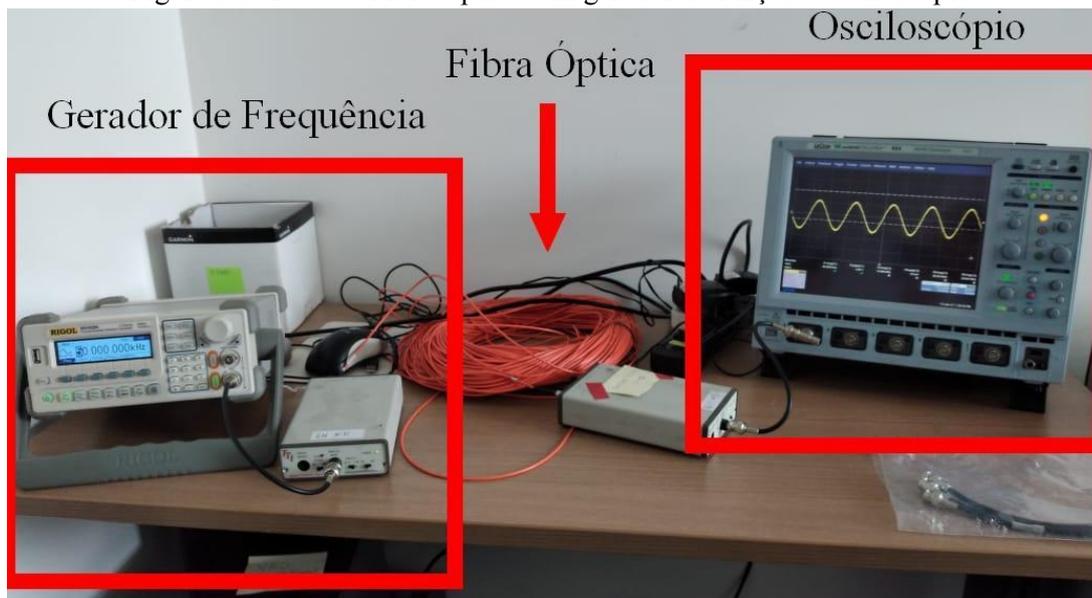


O painel solar está interligado com os aparelhos de medição que estão ligados à antena de campo elétrico tipo prato.

Fonte: INPE (2016).

A antena tipo prato mede a derivada do campo elétrico no tempo. O sinal obtido passa por um integrador, que fornece o sinal de campo elétrico. A frequência de operação do integrador vai de 300 Hz a 1,5 MHz (SCHUMANN, 2016). O módulo integrador é ligado a um link de fibra óptica que transmite os dados para o módulo de aquisição do computador, a fibra era previamente testada com o uso de um osciloscópio e um gerador de frequência para melhor obtenção de dados diminuindo possíveis falhas no cabo (Figura 3.8).

Figura 3.8: Teste de Fibra Óptica com gerador de função e osciloscópio.



Teste de fibra óptica, ligada entre o gerador de frequência e o osciloscópio para uso na antena de campo elétrico.

Fonte: Produção do autor (2023).

3.2 Lightning Location Systems

Todas as gravações foram obtidas em regiões geográficas cobertas pelos sistemas de localização de raios (LLS) Vaisala (BrasilDat no Brasil, NLDN nos Estados Unidos e ALDIS na Áustria). Esses sistemas são quase idênticos e mais informações sobre seu desempenho podem ser encontradas no trabalho de Schulz et al. (2005), Cummins e Murphy (2009) e Naccarato e Pinto (2009). Os dados dos sistemas de localização de descargas atmosféricas (LLS) foram usados para obter a polaridade da descarga, uma estimativa da corrente de pico (Ip) em cada descarga e as localizações dos pontos de impacto no solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

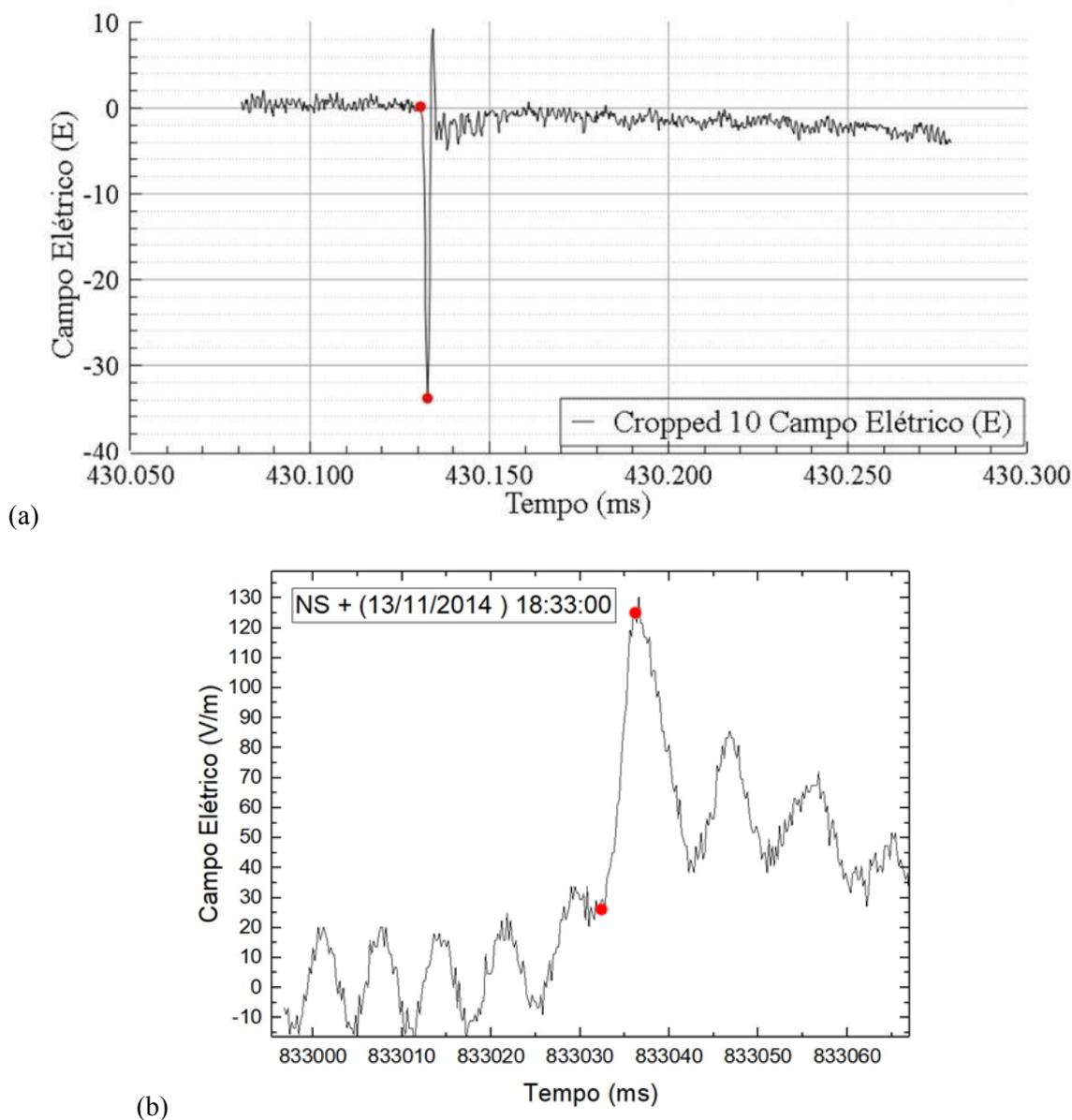
Foi realizada uma análise prévia dos dados de vídeo e campo elétrico reunindo diferentes informações em uma tabela do Excel em categorias como: raio, data, hora, tipo (intranvém, ascendente ou descendente), polaridade do raio (positivo ou negativa), quadro detectado no vídeo, dados de luminosidade e amplitude do campo elétrico. As análises foram executadas individualmente para cada vídeo e separadas na tabela por dia. Foi feita uma divisão organizada dos raios dentro de pastas e diários do plantonista, documento que reúne imagens e principais informações encontradas dos raios; como raios com maior intensidade de campo elétrico ou com muitas ramificações. Assim, padronizando e organizando todos os conteúdos de forma a facilitar a procura e qualificando os dados coletados até então.

A análise dos dados teve como enfoque a identificação dos raios positivos, que foram diferenciados principalmente pela visualização dos vídeos de câmera de alta velocidade. Nos registros de vídeo os raios descendentes positivos apresentavam menos ramificações, corrente contínua (CC) mais longa¹ e o desenvolvimento mais suave quando comparado aos raios negativos.

A polaridade do raio também poderia ser aferida através da forma de onda do campo elétrico, sendo possível associá-lo ao vídeo e assim verificar a polaridade desse raio. Como pode ser observado nas figuras abaixo, quando há variação de campo elétrico negativo isso indica que o raio é negativo e, quando essa variação for positiva, indica um raio positivo. O intervalo dentro dos pontos vermelhos indicados nas figuras 4.1, encontra-se o momento em que o raio apresenta uma grande intensidade luminosa no vídeo, que é geralmente quando ele toca o solo.

¹ A CC é identificada por meio da diferença entre o instante em que o raio toca o solo e o momento em que o canal do raio não é mais visível.

Figura 4.1: Gráfico em resposta do Campo Elétrico de um raio negativo (a) e outro positivo (b), respectivamente.



Conforme visualizado na gráfico (a), a variação negativa de campo elétrico indica um raio nuvem-solo (descendente) negativo, sendo a variação abrupta do campo elétrico um indicativo do momento em que o raio toca o solo, onde ocorre a transferência de cargas muito rápida entre o canal do raio e o solo. Enquanto no gráfico (b) a variação positiva de campo elétrico indica um raio nuvem-solo (descendente) positivo, sendo a variação abrupta de campo elétrico um indicativo do momento no qual o raio toca o solo, ocorrendo a transferência de cargas muito rápida entre o canal do raio e o solo.

Fonte: Produção do Autor (2023).

Os mesmos procedimentos de análise do vídeo, classificação e organização dos dados identificados nas descargas atmosféricas foram efetuados para o conteúdo disponível para os anos de 2003 a 2018. Registrado através de imagens e da tabela do Excel todas as informações possíveis, uma série de raios diferentes em formato e propriedades foram

encontrados; assim como no sensor de campo elétrico, classificados de acordo com o seu tipo (Figura 4.2): intranuvem, descendente positivo, descendente negativo e ascendente.

Figura 4.2: Diferentes raios encontrados nos vídeos.



Fonte: Produção do Autor (2023)

Logo após a análise do banco de dados, foram selecionados apenas os raios positivos, e por meio dos dados de LLS foi possível obter localização e pico de corrente dos líderes positivos.

5 CONCLUSÃO

Através desse trabalho foi possível concentrar, em um único arquivo, informações sobre diversas descargas nuvem solo positivas disponíveis através das medidas de vários sensores, como câmeras de alta velocidade, sensores de campo elétrico e o sistema de localização de descargas atmosféricas. Esses dados reunidos serão utilizados posteriormente para complementar dados da pesquisa de Campos et al. 2014, que na época possuía apenas uma amostragem de 29 raios nuvem-solo positivos. O intuito dessa pesquisa será, através de um maior banco de dados disponível, identificar melhor as possíveis relações entre pico de corrente e velocidade de aproximação do solo, e finalmente a existência de líderes de recuo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINYEMI, M. L. et al. Lightning a fundamental of atmospheric electricity. **IERI Procedia**, v. 9, p. 47-52, 2014.

ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. Lightning parameters for engineering application CIGRE **Electra** No. 69. 1980.

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.

Brook, M., N. Kitagawa, and E. J. Workman (1962), Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground, *J. Geophys. Res.*, 67, 649–659.

Cummins, K. L., and M. J. Murphy (2009), An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 51, 499–518, doi:10.1109/TEMC.2009.2023450.

DE SOUZA CAMPOS, Leandro Zanella; SABA, Marcelo Magalhães Fares. ESTUDO DA CORRENTE CONTÍNUA DE RELÂMPAGOS NATURAIS ATRAVÉS DE UMA CÂMERA RÁPIDA. 2005.

FERRO, Marco Antonio da Silva. CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS QUE APRESENTAM MÚLTIPLOS CANAIS. 2008. 245 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica Espacial, Inpe, São José dos Campos, 2008.

FERRO, M.A. S., Apostila lightning Physics. São José dos Campos, SP- INPE, s. d. 164p.

FERNANDES, Widinei Alves. Características dos relâmpagos gerados por nuvens de tempestades em ambientes sob a influência das queimadas em Rondônia. **São José dos Campos**, 2005.

KASEMIR HW. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *J. Geophys. Res.* 1960; 65: 1873-8.

LAURIA, P. B. Estudo de líderes ascendentes iniciados nos para-raios em resposta às descargas descendentes negativas. 2021. 132 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34R/44NRAE5>. (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.24.13.08-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2021. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34R/44NRAE5>>.

MATHIAS, Roberta Filgueiras. Sob os caminhos e as cores de Iansã. **Teoria e Cultura**, v. 15, n. 3, 2020.

Naccarato, K. P., and O. Pinto Jr. (2009), Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT), *Atmos. Res.*, 91, 546–563, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.019.

NAG, Amitabh et al. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D14, 2010.

NAG, A.; MURPHY, M. J.; SCHULZ, W.; CUMMINS, K. L. Lightning locating systems: insights on characteristics and validation techniques. *Journal of Geophysical Research: Earth and Space Science*, v. 2, p. 65–93, 2015.

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.; CUMMINS, K. L.; PLAISIR, M. N.; WILSON, J. G.; CRAWFORD, D. E.; BROWN, R. G.; NOGGLE, R. C.; RASSOUL, H. K. Inferences on upward leader characteristics from measured currents. *Atmospheric Research*, v. 251, p. 105420, 2023.

RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M. 4th International COST Symposium on Lightning Physics and Effects. 2009.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning physics and effects*. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p. ISBN 9781107340886.

RAKOV VA. Lightning phenomenology and parameters important for lightning protection, 9th International Symposium on Lightning Protection, 2007.

ROMERO, Fabio; PIANTINI, Alexandre. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. 2015.

SABA, M. M. F. A Física das Tempestades e dos Raios: Como as nuvens se formam? A origem de uma nuvem. Grupo de Eletricidade Atmosférica Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, Física na Escola, v. 2, n. 1, 2001.

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, Marcelo MF et al. Positive leader characteristics from high-speed video observations. *Geophysical Research Letters*, v. 35, n. 7, 2008.

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.; PAIVA, A. R.; HELSDON, J.; ORVILLE, R. E. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 121, p. 8493–8505, 27 jul. 2016.

SANTOS, Vagner José Rocha. O acará de Iansã na festa de Santa Bárbara: breves considerações sobre as comidas de uma festa religiosa popular em Salvador. **Revista Ingesta**, v. 1, n. 2, p. 26-37, 2019.

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 highspeed video observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 115, n. 11, p. 1–9, 2010.

SCHUMANN, Carina. Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico. **São José dos Campos: INPE**, 2012.

Schulz, W., K. Cummins, G. Diendorfer, and M. Dorninger (2005), Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system, *J. Geophys. Res.*, 110, D09101, doi:10.1029/2004JD005332.

SIMPSON, G. C.; ROBINSON, G. D. The distribution of electricity in thunderclouds, II. *Proceedings of the Royal society A* , v.177, p. 281-329, 1941.

SIMPSON, G. C.; SCRASE, F. J. The distribution of electricity in thunderclouds. I. *Proceedings of the Royal society A*, v.161, p. 309-352, 1937.

THOMSON, E. M. A theoretical study of electrostatic field wave shapes from lightning leaders. *J. Geophys. Res.* 1985; 90: 8125-35.

UMAN, M.A. **Lightning**. Courier Corporation, 2012.

UMAN, M.A. *The Lightning Discharge*. p.1- 377, San Diego: Academic Press, 1987.

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p.13.151-13.167,1989.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. 2. ed. [S.l]: Academic Press, 2006. 488 p. ISBN 9780127329512.