



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

**CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NÃO-
DETECTADOS PELA REDE BRASILEIRA DE DETECÇÃO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (BRASILDAT)**

Igor Augusto de Carvalho Godoi

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Kleber
Pinheiro Naccarato e coorientado pela Dra.
Amanda Romão de Paiva.

INPE

São José dos Campos

2020



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

**CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NÃO-
DETECTADOS PELA REDE BRASILEIRA DE DETECÇÃO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (BRASILDAT)**

Igor Augusto de Carvalho Godoi

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Kleber
Pinheiro Naccarato e coorientado pela Dra.
Amanda Romão de Paiva.

INPE

São José dos Campos

2020

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me sustentar e com sua graça me conceder aquilo que eu não sou merecedor.

A minha família e amigos que sempre me apoiaram e apoiam no desenvolvimento de meus estudos.

Ao Dr. Kleber Pinheiro Naccarato e a Dra. Amanda Romão de Paiva, que me privilegiaram com a oportunidade de participação desta pesquisa.

À CNPQ, que mantém financeiramente a bolsa PIBIC/INPE.

Ao Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST) que disponibilizou os vídeos que formam a base do Projeto.

RESUMO

O presente trabalho versa sobre o resultado do Projeto: “Características das descargas atmosféricas não-detectados pela Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT)”. Essa pesquisa consistiu em unir dados de descargas registradas por câmeras de alta velocidade em comparação com as informações fornecidas pela Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) e sensores de campo elétrico instalados na região de interesse. Em seguida, comparar os dados em busca de características que levaram a não detecção de alguns relâmpagos. Ao final da análise foram contabilizados 1533 (mil, quinhentas e trinta e três) ocorrências de descargas nuvem-solo, dos quais cerca de 54% foram detectados pela rede BrasilDAT, entre os anos de 2012 a 2019. A fim de buscar respostas acerca do motivo de várias descargas não terem sido detectadas, analisou-se: comportamento do campo elétrico e valores de pico de corrente elétrica da descarga. Esperava-se que os relâmpagos não detectados apresentassem pico de corrente elétrica baixo e tempo de subida suficiente grande. Diferente do esperado, pode-se supor que a Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) possui um déficit em detecção de descargas atmosféricas de caráter nuvem-solo com valores de pico de corrente positivos, independente dos valores de tempo de subida, que em sua maioria encontram-se entre 1,0 μ s e 2,0 μ s, como será mostrado nesse relatório. Embora os dois fatores comparativos tenham se mostrado eficientes nesta análise considera-se que outros fatores devam ser considerados em análises posteriores para um melhor aperfeiçoamento e aprimoramento da rede.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 – Frequência de ocorrência de relâmpagos em São Paulo.....	3
Figura 3-1 – Exemplo de Cumulonimbus.	4
Figura 3-2 – Modelo idealizado dos centros de carga elétrica dentro de uma nuvem de tempestade.	6
Figura 3-3 – Tipos de Relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.	8
Figura 3-4 – Processos de um relâmpago nuvem-solo.	9
Figura 4-1 – Torres do Pico do Jaraguá.....	10
Figura 4-2 – Relevo do Pico do Jaraguá.....	11
Figura 4-3 – Câmera Phantom V310.....	12
Figura 4-4 – Software da câmera Phantom.	13
Figura 4-5 – Localização dos sensores BrasilDAT em Abril de 2016.	14
Figura 4-6 – Exemplo de variação do Campo Elétrico, característica de um relâmpago descendente.....	15
Figura 4-7 – Localização dos instrumentos de medição. O indicador amarelo marca a localização Pico do Jaraguá, o azul a localização das câmeras e o vermelho a localização do sensor de Campo Elétrico.	16
Figura 5-1 – Planilha utilizada como base para este trabalho.	17
Figura 5-2 – Gráfico de campo elétrico.....	19
Figura 5-3 – Histograma comparativo de tempo de subida de descargas detectadas e não detectadas pela Rede BrasilDAT.....	20

Figura 5-4 - Gráfico de pico de corrente [kA] em função da corrente elétrica [V/m].....	21
Figura 5-5 – Histograma comparativo do pico de corrente de descargas detectadas e não detectadas pela Rede BrasilDAT.....	22

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AR	Relâmpago para o Ar
ARSI	Atmospheric Research Systems Inc.
BrasilDAT	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
CCI	Corrente Contínua Inicial
CEAG	Circuito Elétrico Atmosférico Global
COCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CRDF	Cathode-Ray Direction Finder
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EN	Relâmpago Entre-Nuvens
EM	Aspectos Eletromagnéticos
EPRI	Electric Power Research Institute
GAI	Global Atmospheric Inc.
GPS	Global Positioning System
IMPACT	Improved Accuracy from Combined Technology
IN	Relâmpago Intra-Nuvem
LF	Low Frequency
LLP	Lightning and Protection Inc.
LPATS	Lightning Positioning and Tracking System
MDF	Magnetic Direction Finder

NDLN	National Lightning Detection Network
NS	Relâmpago Nuvem-Solo
SN	Relâmpago Solo-Nuvem
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas
TOA	Time of Arrival Lightning Location Retrieval
VHF	Very High Frequency
WMO	World Meteorological Organization Extranet

SUMÁRIO

RESUMO	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	10
5. ANÁLISES E RESULTADOS	16
6. CONCLUSÕES	22
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. INTRODUÇÃO

A natureza possui suas características e singularidades que, muitas das vezes, desperta a curiosidade dos homens em estudar estes fenômenos e até mesmo reproduzi-los em laboratórios.

Isto não é diferente com os relâmpagos e trovões que desde a antiguidade desperta a curiosidade dos homens, devido sua beleza e até mesmo sua periculosidade, considerando que não dificilmente é perceptível o poder destrutivo destes fenômenos, como a destruição de árvores e em casos mais extremos a morte de animais e/ou pessoas.

Aristóteles, no século III a.C elaborou a primeira explicação com algum caráter científico que se conhece, referindo-se ao trovão como um som produzido pelo choque entre as nuvens e o relâmpago como incêndio exalado por essas nuvens (VIEMEISTER, 1961). Com a descoberta da natureza elétrica dos relâmpagos pelo cientista americano Benjamim Franklin (1706-1790), a pesquisa de descargas atmosféricas e seus fenômenos associados têm apresentado avanços significativos (IRIBARNE; CHO, 1980)

Embora a grande maioria dos relâmpagos ocorra no céu, ou seja, sem o contato com a superfície da Terra (intra-nuvens, entre-nuvens e no ar) (Rakov e Uman. 2003), a parte que atinge o solo é numerosa o suficiente para provocar danos relevantes, como, desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, avarias em torres de telecomunicações, em edifícios, queima de equipamentos eletrônicos, além de ser a segunda maior causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta, de acordo com estatísticas mundiais da Cruz Vermelha. (Pinto Jr. 2005).

Muitas têm sido as técnicas utilizadas para estudar os relâmpagos na Natureza. As tecnologias disponíveis permitem filmagens com câmeras de alta velocidade que captam mais que 10000 imagens por segundo, nas quais permitem observar todas as etapas de fenômeno físico (Ballarotti. 2005; Saba et al. 2003, 2004b); medição dos campos eletromagnéticos irradiados próximos e distantes do evento através de antenas capacitivas ou

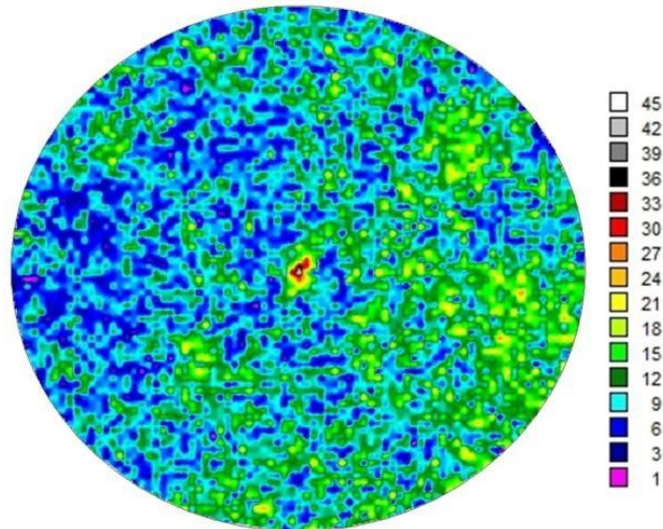
indutivas e raios induzidos artificialmente (Rakov e Uman. 2003; Solorzano. 2003), as quais permitem recuperar a informação da corrente que circula pelo canal, tais como, a intensidade de corrente da carga transferida para o solo (SOLORZANO, 2003), do campo elétrico da nuvem e da descarga (FERRO et al., 2012) e medição da luminosidade do canal a partir de sensores ópticos (Chowdhuri et al. 2005).

Contudo, essas medidas e registros de relâmpagos abrangem somente um certo local pontual, encontram-se, restritas às regiões onde as medidas são realizadas. Para escalas mais amplas, os sensores ópticos instalados em satélites fornecem dados para o estudo dos relâmpagos numa escala global, determinando a frequência e os locais de ocorrência dos relâmpagos; as mesmas informações são fornecidas pelas redes detecção em escala continental.

As tecnologias empregadas nos sistemas de localização de descargas atmosféricas utilizam a faixa de frequência baixa (LF - Low Frequency - entre 30 a 300 kHz) para detectar os relâmpagos que atingem o solo e a faixa de frequência alta (VHF- entre 30 a 300 MHz) para detectar os relâmpagos intra-nuvem.

Através das análises feitas pelos dados gerados da rede RINDAT entre 1999 até 2011 foi constatado uma maior incidência de descargas atmosféricas sobre o Pico do Jaraguá na cidade de São Paulo (análise feita em áreas de 250m x 250m sobre a região urbana de São Paulo), onde a média de descargas atmosféricas é de 15 relâmpagos por km² por ano. Observa-se que na Figura 1.1, há uma incidência mais elevada de relâmpagos centralizada na figura, localizado o Pico do Jaraguá, comparada com os arredores (SABA et al, 2012).

Figura 1-1 – Frequência de ocorrência de relâmpagos em São Paulo.



FONTE: SABA (2012)

Em continuidade a trabalhos anteriormente produzidos, que buscavam analisar a eficiência dos instrumentos de detecção de relâmpagos em uma determinada região, considerou-se a necessidade e a importância de analisar fatores que levavam a não detecção de relâmpagos na mesma região anteriormente analisada. Investigar os fatores que levam a ineficiência de detecção das redes possibilita a melhoria e aperfeiçoamento destes sistemas de detecção de descargas atmosféricas.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O trabalho tem por objetivo analisar as características das descargas atmosféricas não-detectadas pela Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) a partir dos dados gerados por estas redes em comparação com imagens de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico instalados em uma dada região de São Paulo. Mais especificamente, as câmeras estavam instaladas no distrito de Pirituba / SP e os sensores de campo elétrico no prédio do Campus da Universidade de São Paulo – Butantã / SP.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. NUVENS

Uma nuvem de tempestade é produzida a partir do vapor d'água e desenvolve-se na troposfera, podendo atingir até a tropopausa (NACCARATO, 2001). Este vapor d'água se condensa devido a expansão do ar quente em convecção (apud ALBRECHT, 2004) no lugar em que passa do estado de vapor para o estado líquido e sólido em determinadas alturas da atmosfera, adquirindo formas como gotas de água, gotículas de água super-resfriadas, cristais de neve, granizo leve, pedras de granizo e cristais de gelo em função da altitude, da temperatura e da umidade relativa da atmosfera (NACCARATO, 2001). Pelos estudos realizados pela Classificação Internacional das Nuvens (WMO), há diversos tipos de nuvens, mas as que estão relacionados aos relâmpagos, chamadas nuvens de tempestades, são conhecidas como Cumulonimbus (Figura 3.1), onde são caracterizadas pela sua grande altitude vertical, pelo seu formato de bigorna (apud LIMA, 2005 p.4), possuindo em seu topo uma expansão horizontal devido aos ventos superiores (COTTON e ANTHES 1989 apud HOUZE, 1993). Dispõe, em média, uma base entre 700 e 1500 metros, e seus topos podem chegar até 20 quilômetros de altura (sendo a média de 9 a 12 km).

Figura 3-1 – Exemplo de Cumulonimbus.



Fonte: CARN (2009)

3.2 RELÂMPAGOS

Desse processo, forma-se uma nuvem a qual pode continuar se desenvolvendo até atingir um estágio maduro, quando então surgem as chamadas células de tempestade (NACCARATO, 2001). Uma nuvem de tempestade pode ser constituída por várias células eletrificadas (apud Pinto. 1987 apud MacGorman e Rust. 1998 apud Pinto Jr. e Pinto. 2000). A eletrificação dessas células é causada pelas colisões mútuas e fricções da água em suas várias fases no interior da nuvem em função dos fortes movimentos ascendentes e descendentes de ar, na qual fazem surgir grandes centros de carga positivos e negativos como resultado da geração e separação de cargas através de processos micro e microfísicos ainda pouco conhecidos (Saunders. 1995 apud Williams. 1988, 1995 apud Pinto Jr. e Pinto. 2000). Os processos físicos relativos a separação de cargas dentro das nuvens ainda são alvo de muitas discussões no meio científico, porém atualmente o processo de eletrificação colisional não- indutivo é o mais aceito para explicar a estrutura elétrica tripolar das nuvens de tempestades (NACCARATO, 2006).

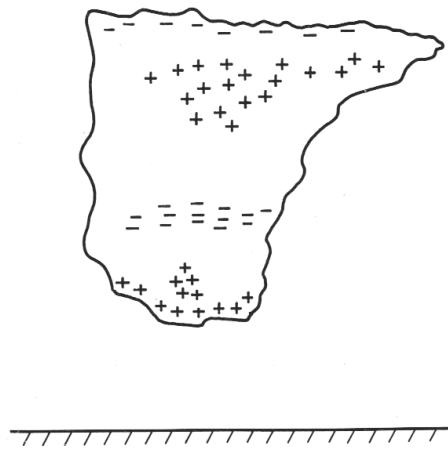
Com o acúmulo de cargas, o campo elétrico intensifica-se dando origem às descargas atmosféricas ou relâmpagos, causados pela ruptura dielétrica do ar no interior da nuvem de tempestade (NACCARATO, 2001). As extensões vertical e horizontal das nuvens variam em função da região do globo e das estações do ano. Mais especificamente, os fatores que regulam suas dimensões e suas características físicas, elétricas e morfológicas são a latitude, a topografia da superfície, o perfil de temperatura atmosférico e a circulação dos ventos. Da mesma forma, por terem sua origem nas nuvens eletrificadas, os relâmpagos também apresentam uma ampla variedade de características dependendo desses mesmos fatores (Uman. 1987 apud Pinto Jr. e Pinto. 2000), podendo variar de 2 a 5 cm de diâmetro o canal, alguns quilômetros de comprimento e temperaturas que podem chegar até 30.000°C com duração de alguns milissegundos (MCGRAW, 1997).

Os relâmpagos também podem ocorrer em tempestades de areia, neve, erupções vulcânicas, entre outros (RAKOV; UMAN, 2003). Além disso, se desenvolvem relâmpagos

artificiais, por meio de explosões nucleares, nos fundos dos oceanos e por lançamentos de foguetes que estendem fios condutores na atmosfera (SABA et al., 2002).

Há um modelo idealizado na distribuição dos centros de cargas em uma nuvem de tempestade, em que se estabelece dois centros principais: um negativo, próximo a base, e um positivo na parte superior da nuvem, ambos com magnitude da ordem de várias dezenas de coulombs (NACCARATO, 2001). Ocasionalmente pode ocorrer também um pequeno centro de cargas positivo na base da nuvem, abaixo do centro negativo principal, como podemos ver na Figura 3.2.

Figura 3-2 – Modelo idealizado dos centros de carga elétrica dentro de uma nuvem de tempestade.



FONTE: Pinto Jr. e Pinto (1996, p. 41)

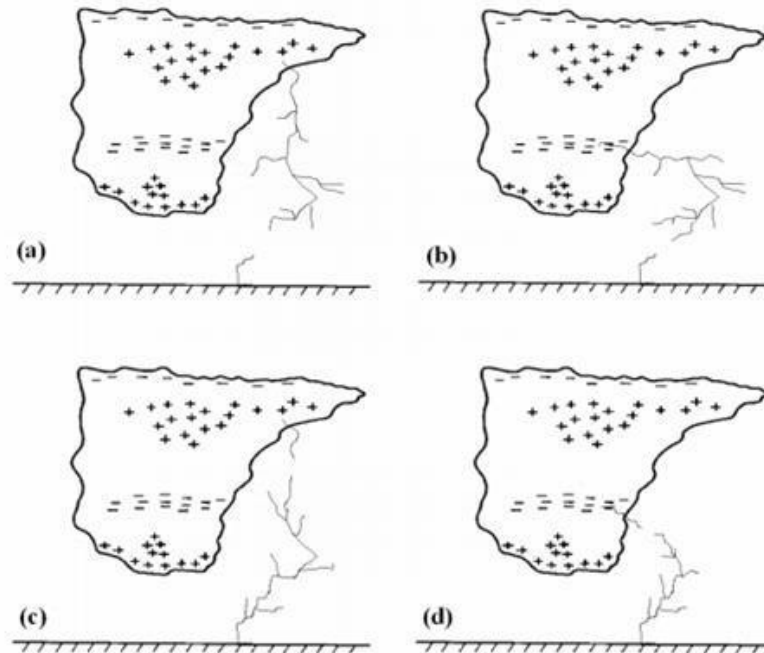
Acredita-se que os relâmpagos possuem um papel fundamental na manutenção do campo elétrico de tempo bom (cerca de 100V/ m apontando para baixo), observável abaixo da ionosfera, que surge devido ao balanço entre a carga negativa líquida da Terra e a carga espacial positiva da atmosfera, constituindo o chamado Circuito Elétrico Atmosférico Global, CEAG (Iribarne e Cho. 1980 apud Uman. 1987 apud Williams. 1988). Além do que, as reações químicas no interior e ao redor do canal da descarga atmosférica resulta em elementos químicos antes não existentes na atmosfera ou, pelo menos, em concentração minoritária (Uman. 1987, Pinto Jr. e Pinto. 1996).

A classificação dos relâmpagos ocorre de acordo com o local que se originam e/ou terminam. Eles podem ser de dois tipos: os que não tocam o solo e os que tocam o solo (OGAWA. 1995).

Os que não tocam o solo pode-se identificar três tipos principais: (1) relâmpagos intra-nuvem (IN), os quais ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade; (2) relâmpagos entre-nuvens (EN), que ocorrem entre nuvens diferentes e (3) relâmpagos no ar (AR).

Os relâmpagos que envolvem o solo, também conhecidos como raios, são classificados em dois tipos básicos: (1) relâmpagos nuvem-solo (NS), caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra; (2) relâmpagos solo-nuvem (SN), que ocorrem a partir do solo em direção à nuvem. Os relâmpagos NS e SN também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos relâmpagos positivos (transferência de cargas positivas) e negativos (transferência de cargas negativas) (NACCARATO, 2001).

Figura 3-3 – Tipos de Relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas: (a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.

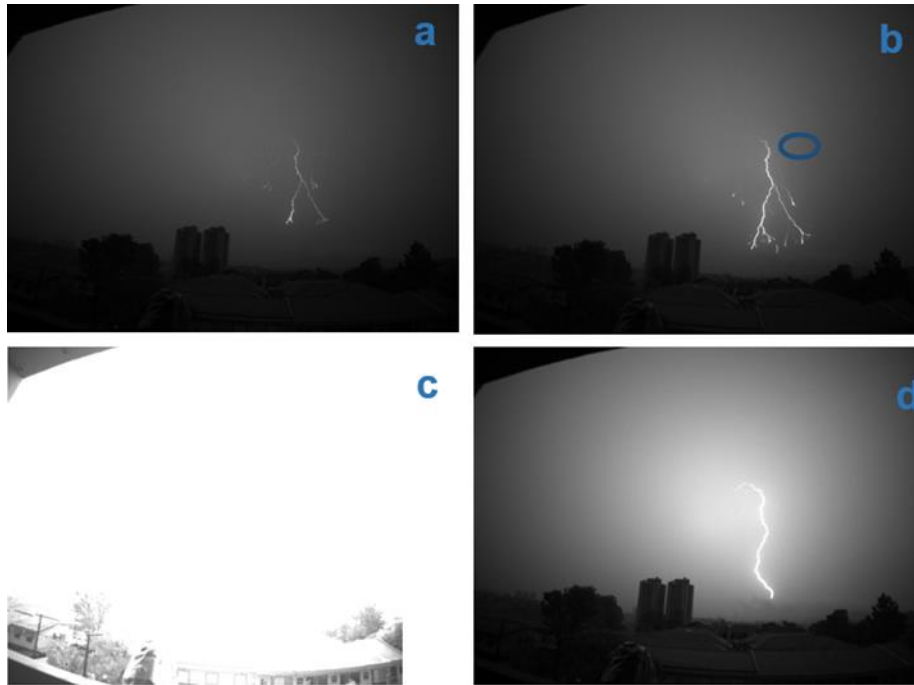


Fonte: NACCARATO (2001)

3.2.1 RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO (DESCENDENTES)

Um relâmpago NS são em sua maioria negativos. Iniciam-se na nuvem e, eventualmente, transporta para a Terra dezenas de coulombs de cargas negativas (NACCARATO, 2001). Possui um tempo de duração médio entre 1/3 e meio segundo, sendo constituído por vários pulsos de alta corrente denominados *strokes* ou descargas individuais. Chamamos de multiplicidade de um relâmpago, o número de *strokes* que o compõe, cujo valor típico varia entre três e quatro.

Figura 3-4 – Processos de um relâmpago nuvem-solo.



Fonte: BUSSI (2018)

Antes de chegar ao solo, os relâmpagos descrevem um processo descrito a seguir.

Dentro da nuvem ocorre uma sucessão de descargas fracas que dão início a chamada ruptura preliminar (preliminary breakdown). Essa ruptura faz com que haja um deslocamento das cargas no interior da nuvem para sua base, que logo em seguida, caminha em direção ao solo formando o líder escalonado (Figura 3.6a). Quando o líder estiver próximo ao solo, partirá do chão uma *descarga conectante* de cargaoposta ao líder escalonado (Figura 3.6b). Essa descarga conectante ao se encontrar com o líder escalonado permitirá um fluxo intenso de cargas elétricas, formando a descarga de retorno (Figura 3.6c).

Quando formado o canal, este, poderá ser acompanhado ou não de corrente contínua (Figura 3.6d). A corrente contínua, recebe três classificações: muito curta (3 a 10 ms), curta (10 a 40 ms) e longa (maior que 40 ms) (BALLAROTTI et al. 2005). Durante a corrente contínua, alguns processos dentro da nuvem podem ocorrer, provocando uma repentina

intensificação na luminosidade já existente, a essa intensificação denominamos por “componente M”.

Cessando a corrente contínua, poderá ainda ocorrer outra descarga percorrendo o canal que se encontra ionizado, que denominamos líder contínuo. Ao tocar o solo, dá-se início a segunda descarga de retorno, denominada descarga de retorno subsequente (PAIVA, 2015).

A corrente das descargas varia de alguns quiloampères até dezenas de quiloampères e as cargas transferidas para o solo são da ordem de 20 C, podendo em alguns casos, atingirem centenas de coulombs (Uman,1987).

4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

4.1. LOCAL DE OBSERVAÇÃO

Os vídeos analisados foram gravados no Distrito de Pirituba, Zona Noroeste de São Paulo, a câmera ficava apontada para o Pico do Jaraguá, pico conhecido na região por sua altitude de 1135 metros, destacando-se na paisagem, que possui torres de transmissão elevando-se até 139 metro do solo. Das quais foram detectadas descargas em três das torres presentes no pico, denominadas T1, T2 e T3, conforme ilustra a Figura 4.1 (PAIVA, 2015).

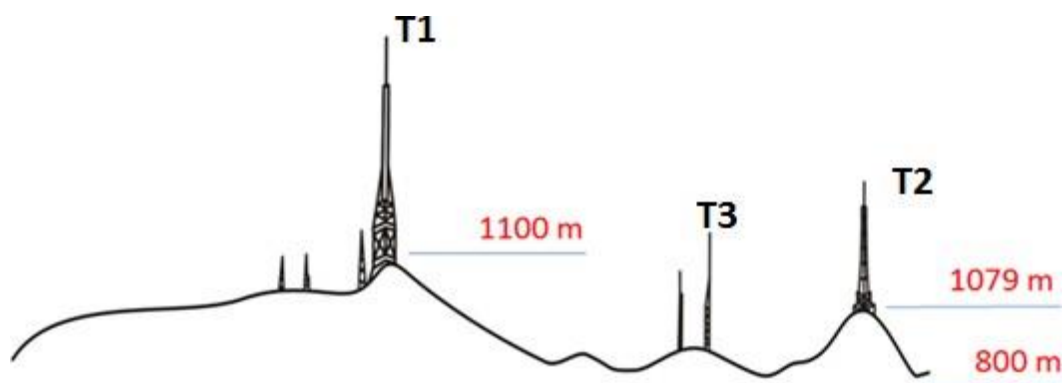
Figura 4-1 – Torres do Pico do Jaraguá.



Fonte: PAIVA (2015)

Na Figura 4.2 vemos uma ilustração do Pico com ênfase e informações adicionais das torres.

Figura 4-2 – Relevo do Pico do Jaraguá.



Fonte: PAIVA (2015)

4.2. CÂMERAS

Os vídeos disponibilizados pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Centro de Ciências do Sistema Terrestre (CCST) para realização do Projeto eram gravados por uma câmera de alta velocidade da marca Phantom, nos modelos v310, v710 e v711, que capturava entre 7.500 até 1.400.000 imagens por segundo, variando de modelo para modelo e tamanho em pixels da imagem.

Figura 4-3 – Câmera Phantom V310.



Fonte: *Data Sheet Vision Research*

A câmera era direcionada para a tempestade e seu sistema ligado a um computador, que também era ligado a um *trigger*, sempre que o operado visualizava uma descarga ele acionava o *trigger* que finalizava a gravação da câmera, de forma que após o ajuste do sistema da câmera ele salvava imagens realizadas antes do acionamento do *trigger*.

Os vídeos da câmera foram visualizados e analisados por um *software* específico disponibilizado pela fabricante do equipamento mostrado na Figura 4.4.

Figura 4-4 – Software da câmera Phantom.



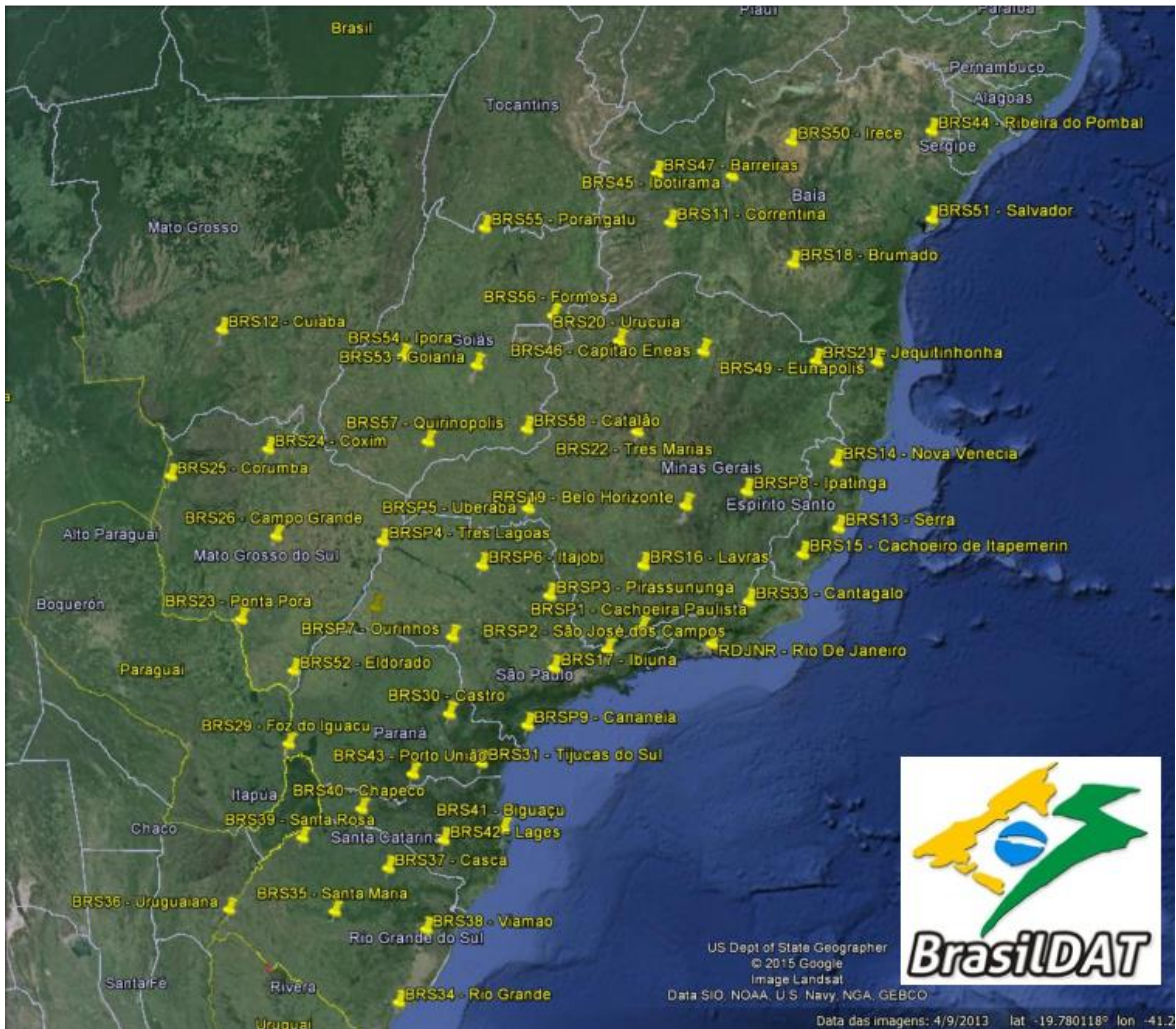
Fonte: BUSSI (2018)

4.3. REDE BRASILEIRA DE DETECCÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (BRASILDAT)

A Rede BrasilDAT é uma das principais redes de detecção de descargas atmosféricas do Brasil, hoje ela conta com 70 sensores, sendo considerada a maior rede de detecção da região tropical do planeta e uma das maiores do mundo.

Sendo criada em Agosto de 2011 pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos – SP, a BrasilDAT detecta descargas nuvem-solo e intra-nuvem, fornecendo informações como data e horário com precisão de milissegundos, latitude, longitude e pico de corrente do relâmpago. A Figura 4.5 mostra a localização dos sensores da Rede BrasilDAT em Abril de 2016.

Figura 4-5 – Localização dos sensores BrasilDAT em Abril de 2016.



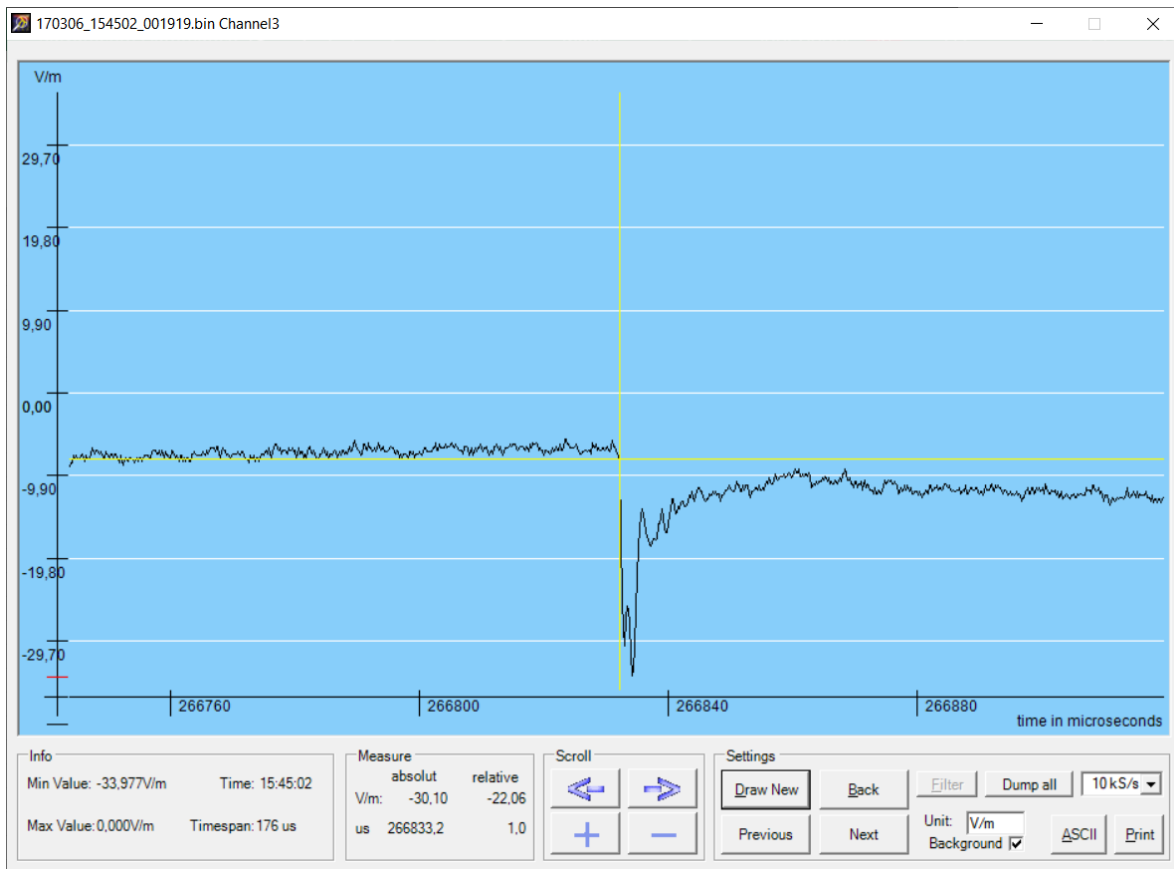
Fonte: NACCARATO (2016)

4.4. SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO

Caso houvessem diferenças nos resultados analisados nos vídeos com os resultados obtidos pela Rede BrasilDAT eram utilizados gráficos oriundos de um sensor de Campos Elétricos para confirmar qual informação era correta, este sensor também estava localizado na região próxima ao Pico do Jaragua, de forma que qualquer alteração no Campo Elétrico

da Região era captada e descrita em um gráfico bidimensional, como ilustra a Figura 4.6, onde o resultado do sensor é visualizado em um programa específico.

Figura 4-6 – Exemplo de variação do Campo Elétrico, característica de um relâmpago descendente.



Fonte: Próprio Autor.

A Figura 4.7 descreve a posição relativa da câmera e do sensor em relação ao Pico do Jaraguá.

Figura 4-7 – Localização dos instrumentos de medição. O indicador amarelo marca a localização Pico do Jaraguá, o azul a localização das câmeras e o vermelho a localização do sensor de Campo Elétrico.



Fonte: PAIVA (2015)

5. ANÁLISES E RESULTADOS

Este trabalho reuniu informações de exímios trabalhos anteriormente realizados por outros bolsistas do projeto (Figura 5.1), chegando a contabilização de 1533 (mil, quinhentos e trinta e três) ocorrências, os quais foram comparadas com os dados de relâmpagos fornecidos pela Rede BrasilDAT e com os dados de campo elétrico fornecidos pelos sensores instalados da USP.

Figura 5-1 – Planilha utilizada como base para este trabalho.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a data table. The columns include: A (Obs do Local), B (Video), C (Camera), D (Year), E (Month), F (Day), G (Hour), H (Min), I (Sec), J (Ms Video), K (Frame), L (Type), M (Deteção Rede), N (Campo Elétrico), O (Obs Video), P (Lat Senso), Q (Long Senso), R (Type Rede), S (Ms Rede), T (Lat), U (Long), V (D [m]), W (D [km]), X (Ip Detectado), Y (E), Z (I). The rows contain data for various Phantom v310 cameras at different locations, with columns M through Z indicating detection status and coordinates.

Fonte: Próprio Autor

Destas ocorrências podemos filtrá-las nas seguintes categorias (Tabela 5.1):

Tabela 5-1 – Filtragem dados da pesquisa.

Total de ocorrências nuvem-solo	1533 (mil, quinhentas e trinta e três)
Total de detecções pela rede BrasilDAT (independente do campo elétrico)	639 (seiscentas e trinta e nove)
Total de detecções de campo elétrico USP com detecção pela rede BrasilDAT	398 (trezentos e noventa e oito)
Total de detecções de campo elétrico USP sem detecção pela rede BrasilDAT	171 (cento e setenta e um)

Fonte: Próprio Autor

Considerando os valores da Tabela 5.1 pudemos observar que dos 1533 (mil, quinhentas e trinta e três) cerca de 54% foram detectados pela rede BrasilDAT

Aplicando outros filtros e separando os dados por períodos percebe-se uma melhora na detecção com o passar dos anos (Tabela 5.2).

Tabela 5-2 - Separação dos dados por períodos anuais.

Período (MÊS/ANO)	Porcentagem de Detecção
10/2012 – 04/2013	146 Detectados ÷ 725 Ocorrências NS ≈ 20% de detecção
10/2013 – 08/2014	121 Detectados ÷ 248 Ocorrências NS ≈ 50% de detecção
11/2014 – 02/2015	169 Detectados ÷ 235 Ocorrências NS ≈ 71% de detecção
09/2015 – 12/2015	68 Detectados ÷ 81 Ocorrências NS ≈ 83% de detecção
10/2016 – 03/2017	27 Detectados ÷ 60 Ocorrências NS ≈ 45% de detecção
11/2017 – 03/2018	22 Detectados ÷ 45 Ocorrências NS ≈ 48% de detecção
11/2018 – 01/2019	86 Detectados ÷ 139 Ocorrências NS ≈ 61% de detecção

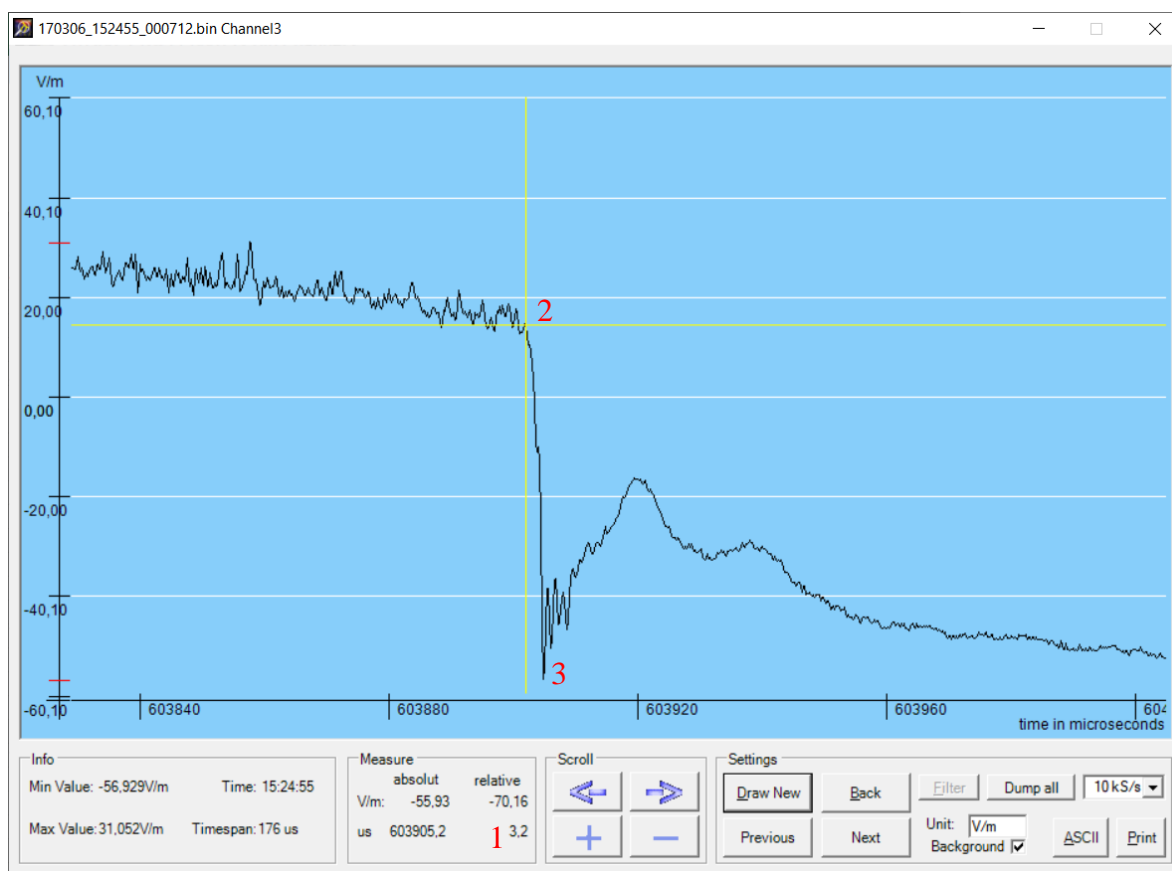
Fonte: Próprio Autor

Buscando verificar as características dos das descargas nuvem-solo não detectadas pela Rede BrasilDAT, foram feitas as seguintes comparações.

A primeira consistia em verificar o padrão de tempo de subida (medido em μs) das descargas detectadas e não detectadas e comparar estas informações.

Segundo Naccarato (2010) espera-se que descargas com maiores tempos de subida tendem a serem menos detectadas pela rede de detecção de descargas atmosféricas. Tempo de subida (1) é a variação de tempo entre o início da descida/subida (2) de um gráfico de campo elétrico até seu vale/pico (3), como está assinalado na Figura 5.2.

Figura 5-2 – Gráfico de campo elétrico.

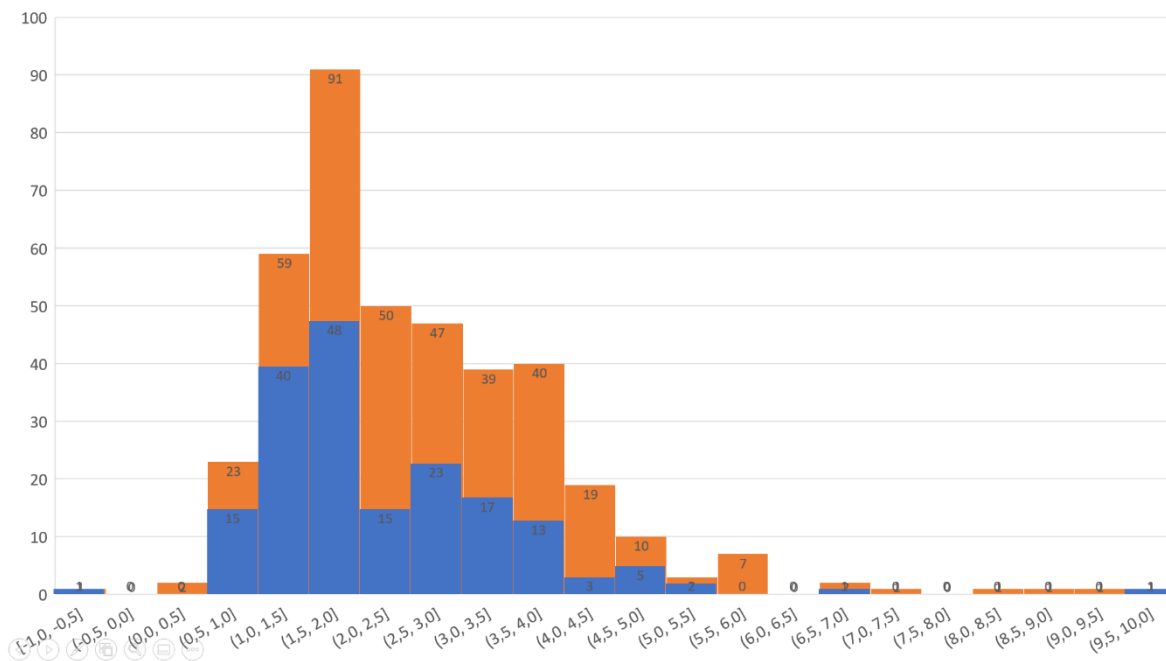


Fonte: Próprio Autor

Entretanto os produzir histogramas do tempo de subida das descargas detectadas pela Rede BrasilDAT (laranja), das descargas não detectadas pela Rede BrasilDAT (azul) e

compará-los, percebeu-se que ambas tendiam a possuir valores de tempo de subida muito próximos, como mostra a Figura 5.3.

Figura 5-3 – Histograma comparativo de tempo de subida de descargas detectadas e não detectadas pela Rede BrasilDAT.

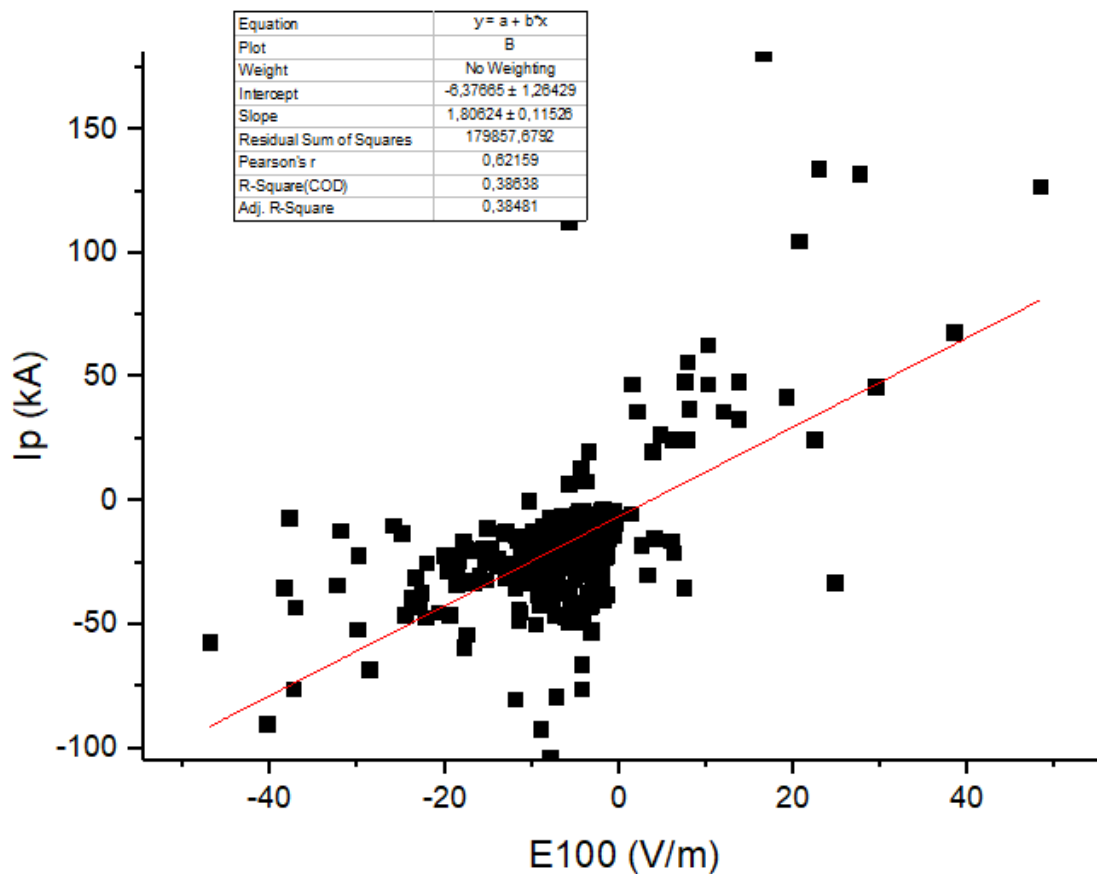


Fonte: Próprio Autor

A segunda análise realizada em busca dos motivos da rede BrasilDAT não detectar certos relâmpagos foi acerca dos valores dos picos de corrente elétrica. Para descobrir os possíveis valores de picos de corrente elétrica desses relâmpagos não detectados, buscamos uma relação entre o Campo Elétrico e picos de corrente elétrica (dos relâmpagos detectados). Essa relação foi possível pois sabe-se que essas duas características são diretamente proporcionais (Naccarato, 2001).

Para isso foi plotado um gráfico de valores conhecidos picos de corrente elétrica (kA) por valores de campo elétrico [V/m] normalizados em 100km e traçada uma reta de tendência (Figura 5.4).

Figura 5-4 - Gráfico de pico de corrente [kA] em função da corrente elétrica [V/m].

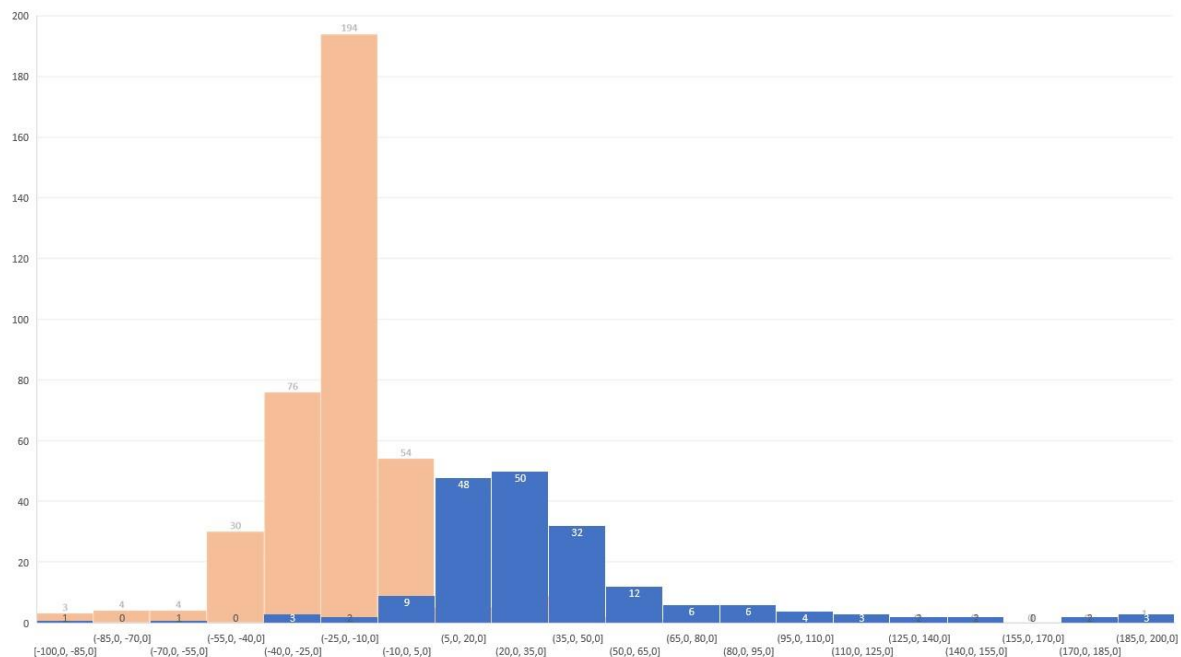


Fonte: Próprio Autor

Plotando o gráfico, conseguiu-se obter uma relação entre o pico de corrente elétrica com o pico do campo elétrico do relâmpago. Com essa função, $I_p = 1,80624 - 6,37665 \times E$, foi possível fazer uma aproximação dos possíveis valores de pico de corrente dessas ocorrências não detectadas pela rede BrasilDAT.

Com esses dados foi possível realizar um histograma comparando os picos de corrente das descargas detectadas pela Rede BrasilDAT (laranja) com as descargas não detectadas pela Rede BrasilDAT (azul) (Figura 5.5).

Figura 5-5 – Histograma comparativo do pico de corrente de descargas detectadas e não detectadas pela Rede BrasilDAT.



Fonte: Próprio Autor

Com este histograma foi possível perceber que a maioria das descargas detectadas pela Rede BrasilDAT encontrava-se entre os valores de -55 kA até +20 kA, enquanto as descargas não detectadas pela Rede BrasilDAT encontravam-se entre os intervalos de +5 kA até +65 kA.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho buscou identificar alguns motivos da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BRASILDAT) não detectarem uma grande parcela dos relâmpagos nuvem-solo. Para isso, foram analisados vídeos de câmeras de alta velocidade, obtendo 1533 descargas nuvem-solo, onde 54% foram detectados, entre os anos de 2012 a 2019.

Para descobrir os possíveis motivos de 46% das descargas analisadas não terem sido detectadas, utilizou-se os sensores de campo elétrico instalado na região de interesse.

Assim, foram analisadas duas características principais: tempo de subida do campo elétrico e estimativa dos valores de pico de corrente elétrica desses relâmpagos não detectados. Essas análises foram comparadas com os relâmpagos detectados afim de buscar diferenças e semelhanças entre eles.

Para o tempo de subida, tanto para os relâmpagos detectados e não detectados, encontramos o mesmo comportamento. Para ambos os casos, os tempos de subida foram curtos. Esse comportamento é esperado quando o relâmpago é detectado.

Na segunda análise realizada, buscamos estimar os valores de pico de corrente elétrica dos relâmpagos não detectados. Para todos os casos, os valores encontrados de picos de corrente elétrica foram de polaridade positiva. Já os relâmpagos detectados, apresentaram picos de corrente elétrica de polaridade negativa e positiva.

Este trabalho também pode concluir a proposta almejada por pesquisas anteriores, que era a verificação do rendimento regional da Rede BrasilDAT entre os anos de 2012 a 2019, utilizando dados dessa rede, vídeos de câmeras de alta velocidade registradas pelo Grupo ELAT e valores de campo elétrico.

Essa análise demonstrou-se satisfatória, com média de detecção aproximada de 54% das descargas nuvem-solo, e crescente com o decorrer dos anos. Esse resultado condiz com o aperfeiçoamento da rede e com a instalação de novos sensores da rede.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R. I. ; SILVA DIAS, M. A. F. Características microfísicas da precipitação convectiva e estratiforme associadas à oscilação de larga-escala no sudoeste da Amazônia. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA., 2004, Fortaleza -CE. Anais ... 2004. CD-ROM. (INPE- 12036-PRE/7382).

BALLAROTTI, M.G.; SABA, M.M.F; PINTO JR. O. High speed camera observations of negative ground flashes on a milisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005.

BUSSI, Gabrielle de Oliveira. **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq): AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO REGIONAL DA REDE BRASILEIRA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (BrasilDAT) UTILIZANDO IMAGENS DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE.** São José dos Campos: Inpe, 2018. 29 p.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F., PINTO JR., O.; BALLAROTTI, M. G.

Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmospheric Research**, v. 84, n. 4, p. 302-310. 2007.

CARN, S. A. **Atmospheric observations and meteorology.** 2009. Michigan, EUA. Michigan Technological University, Department of Geological Engineering and Sciences at Michigan Tech. Disponível em:

<<http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE2640.htm>>. Acesso em: 27 de junho de 2019.

CHOWDHURI,P.;Anderson,J.G.;Chisholm,W.A.;Field,T.E.;Ishii,M.;Martinez,J.A.;
Marz,M.B.;McDaniel,J.;McDermott,T.R.;Mousa,A.M.;Narita,T.;Nichols,D.K.;
Short,T.A.Parametersoflightningstrokes:areview.**IEEETransactionsOnPower Delivery**, v.
20, n. 1, p. 346-358, Jan.2005.

CUMMINS,K.L.;HiscoxW.L.;PiferA.E.;Maier,M.W.PerformanceanalysisoftheU.S.
National Lightning Detection Network. In: International Conference on Atmospheric
Electricity,9.,1992,St.Petersburg,Russia.**Proceedings...**St.Petersburg:International
Commission on Atmospheric Electricity,1992.

CUMMINS, K. L.; Burnett, R. O.; Hiscox, W. L.; Pifer, A. E. Line reliability and fault
analysis using the National Lightning Detection Network. In: Precise Measurements in
Power Conference, 1993, Arlington, USA. **Preprint...** Arlington: National Science
FoundationandCenterforPowerEngineeringatVirginiaTech,1993,p.II-4.1toII-4.15.

CUMMINS, K. L.; Bardo, E. A.; Hiscox, W. L., Pyle, R. B.; Pifer, A. E. NLDN'95: A
combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection
Network. In: International Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static
Electricity,1995,Williamsburg,EUA.**Proceedings...**NationalInteragencyCoordination
Group,1995,p.72-1to72-15.(U.S.NavyReportNAWCADPAX--306-PR

FERRO M. A. S., YAMASAKI J., PIMENTEL D. R. M. ,K. P. NACCARATO, M.

M. F. SABA., An Electric Field-Mill Network in Southeastern Brazil for Lightning

Warnings. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 14., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings...2012.**

GAI (Global Atmospheric). **IMPACT ES advanced lightning direction finder**

– Model 141-TES ALDF: installation, operation and maintenance manual. Tucson, 1999. 386p. (40211REV 9904).

HOUZE JR., R. A.; RUTLEDGE, S. A.; BIGGERSTAFF, M. I.; SMULL, B. F.

Interpretation of Doppler weather-radar displays in midlatitude Mesoscale Convective Systems. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 70, p. 608-619, 1989.

KRIDER, E. P.; Weidman, C. D.; Levine, D. M. Temporal structure of the HF and VHF radiation produced by intracloud lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, NC9, p. 5760-5762, 1979.

KRIDER, E. P.; Pifer, A. E.; Vance, D. L. Lightning direction finding system for forest fire detection. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 61, n. 9, p. 980-986, Sept. 1980.

KRIDER, E. P. 75 years of research on the physics of a lightning discharge. In: Fleming, J. R. ed. **Historical essays on meteorology 1919-1995**. Boston: American Meteorological Society, 1996. Cap. 11, p. 321-350.

LIMA, K. C. **Descargas elétricas atmosféricas em sistemas convectivos de mesoescala no sul da América do Sul**. 2005. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

MCGRAW-HILL Encyclopedia of Science and Technology. McGraw Hill, p. 74, 1997.

MOREAU, J.; ALLIOT, J; MAZUR, V. Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. **J Geophys Res.**, 1992, doi: 10.1029/92JD01077. issn: 0148-0227 Moreau et al. [11] pioneered the use of high-speed video to observe lightning at 200 images persecond

NACCARATO, Kleber Pinheiro et al. Total Lightning Flash Detection from Space: A CubeSat Approach. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 24., 2016, San Diego. 2016. p. 1 - 8.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**. 2001. 165p. (INPE-8380-TDI/770). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001. Disponível em: <<http://marte3.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.09/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2019.

NACCARATO, K, P. **Análise das Características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2006. 316p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial). INPE, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <[27](http://mtc-</p></div><div data-bbox=)

m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00/doc/publicacao.pdf >.
Acesso em: 13 jun. 2019.

OGAWA, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. v. 1, Cap. 4, p. 93-136.

PAIVA, A.R. **Estudo das descargas de retorno e componentes M e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos**. 2015. 106p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2015. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2019.

PINTO JR., O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 185p.

RAKOV V.A.;UmanM.A.Somepropertiesofnegativecloud-to-groundlightningflashes versusstrokeorder.**JournalofGeophysicalResearch**,v.95,D5,p.5447-5453,Apr. 1990.

SABA, M. M., Schumann, C., Warner, T. A., Ferro, M. A. S., Paiva, A. R., Helsdon, J., & Orville, R. E. (2016). Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 121(14), 8493-8505.

SCHUMANN, C. **Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico**. 2016. 178 p. Tese (Doutorado

em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKP8ML>>.

SOLORZANO, N. N. **Primeiras medidas de relâmpagos induzidos no Brasil**. 2003. 219p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (Não publicado).

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 376p.

VIEMEISTER, P. **The Lightning Book**, Cambridge MA: MIT Press, 1961.