



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.11.19.23-TDI

**UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE CORRENTE
ELÉTRICA E LUMINOSIDADE, EXTRAÍDA DE
CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE, DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

Larissa Antunes da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 03 de maio de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R4JD9E>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.11.19.23-TDI

**UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE CORRENTE
ELÉTRICA E LUMINOSIDADE, EXTRAÍDA DE
CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE, DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

Larissa Antunes da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 03 de maio de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R4JD9E>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Larissa Antunes da.

Si38e Um estudo da relação entre corrente elétrica e luminosidade, extraída de câmeras de alta velocidade, de descargas atmosféricas / Larissa Antunes da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxiv + 227 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/05.11.19.23-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Osmar Pinto Junior, e Antonio Carlos Varela Saraiva.

1. Relâmpagos. 2. Relâmpagos nuvem-solo. 3. Câmera de alta velocidade. 4. Rede de detecção de relâmpagos. 5. Pico de corrente. I.Título.

CDU 551.594.21



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Larissa Antunes da Silva*

Título: "UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE CORRENTE ELÉTRICA E LUMINOSIDADE, EXTRAÍDA DE CÂMERAS DE ALTA VELOCIDADE, DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Doutor(a)* em *Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas*

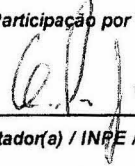
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Osmar Pinto Junior



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva



Orientador(a) / UNESP/ICT / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

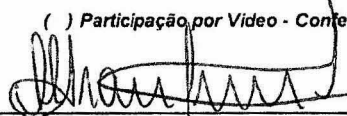
Dr. Plínio Carlos Alvalá



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

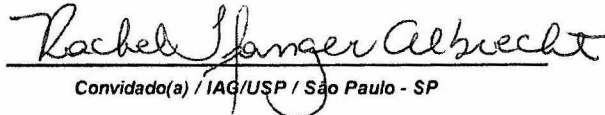
Dr. Alexandre Piantini



Convidado(a) / USP/IEE / São Paulo - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Dra. Rachel Ifanger Albrecht



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 03 de maio de 2018

“A menos que modifiquemos nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

Dedico este trabalho aos meus pais Rafael José da Silva e Leonilda Pereira Antunes da Silva e sobrinhos Gabriel Antunes Mariano e Samuel Antunes Mariano.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e meu namorado Marcos Vinicius pelo amor, paciência, compreensão, apoio e incentivo durante a realização desse trabalho.

Aos amigos que fazem parte desta trajetória, sempre acreditaram em mim e me deram força para continuar. São muitos nomes para mencionar, mas cada um sabe a importância que tem na vida.

Aos meus orientadores Dr. Osmar Pinto Jr. e Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva, pelo conhecimento transferido, por acreditarem em mim, pela dedicação a minha dissertação e pelo carinho.

A todos os membros do grupo ELAT que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Aos docentes do curso de Geofísica Espacial pelo conhecimento transmitido.

Ao INPE por providenciar a estrutura de trabalho.

À FAPESP pelo auxílio financeiro através do projeto RAMMER, processo número 2010/01742-2.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível) e CNPQ Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro sem o qual teria sido impossível realizar este trabalho

RESUMO

O objetivo principal do trabalho foi estudar a relação entre a luminosidade das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais, registradas por câmera de alta velocidade, e os picos corrente destas descargas de retorno medidos por redes locais de detecção de relâmpagos. Os dados foram coletados durante quatro campanhas de coleta de dados realizadas no verão de 2011/2012, de 2012/2013 e 2013/2014, no Brasil e no verão de 2017 nos Estados Unidos (EUA). Ao todo 1122 relâmpagos foram analisados, seguindo alguns critérios de seleção que consideram a visibilidade do canal das descargas de retorno, casos em que foi possível observar a presença de chuva, ou que estavam saturados, foram excluídos da análise. Além disso, foram selecionados para este trabalho, apenas os casos que tiveram ao menos cinco descargas de retorno detectadas por pelo menos uma das redes locais de detecção de relâmpagos. Como resultado, 66 relâmpagos foram escolhidos para serem analisados nesse trabalho. Na primeira parte da análise os dados foram analisados caso a caso por conta da luminosidade relativa, extraída das câmeras, não ser uma grandeza comparável entre vídeos. Além disso, os casos foram separados em dois grupos. O primeiro, foi o grupo de dados coletados no verão de 2011/2012, período em que havia duas redes de detecção de relâmpagos, instaladas temporariamente na região, devido ao projeto CHUVA. Os resultados das 3 redes de detecção BrasilDAT, LINET e TSL200 foram comparados entre si. O segundo, foi o grupo de dados do verão de 2012/2013 e 2013/2014 realizadas no Brasil e verão de 2017, realizada nos EUA. A rede BrasilDAT foi utilizada para os dados do Brasil e a rede ENLTN para os dados dos EUA. As duas redes utilizam sensores da empresa EarthNetworks. Foram aplicados aos dados dois métodos de extração da luminosidade do canal da descarga de retorno. O método de área fixa considerou o mesmo tamanho de janela, em pixels (30x15), para todos os casos, independentemente do tamanho ou distância do canal. O outro método utilizou a fotogrametria em cada caso para encontrar a razão pixel por metro. A luminosidade relativa foi comparada com picos de corrente, e ajustes lineares proveram a relação entre as duas grandezas. Na segunda parte da análise, foram utilizados os ajustes lineares de cada relâmpago nuvem-solo analisado, para se estimar o pico de corrente. Ao transformar luminosidade relativa em pico de corrente torna-se possível a comparação entre todos os casos estudados. O valor do quadrado do coeficiente linear entre o pico de corrente estimado pela luminosidade extraída pelo método de área fixa (30x15) e pico de corrente medido pelas redes de detecção foi 0,77 e para o pico de corrente estimado pela luminosidade extraída pelo método da fotogrametria foi 0,73. Esses resultados mostram que no geral existe uma boa correlação entre a luminosidade extraída das imagens das câmeras para os dois métodos e esse resultado foi próximo do resultado obtido por outros autores onde as análises foram realizadas a partir de medidas diretas de corrente em relâmpagos induzidos por foguetes. A última parte deste trabalho foi utilizar os dados de relâmpagos nuvem-solo registrados nos EUA, durante o verão de 2017 para analisar o que é visto pelo imaginador geoestacionário GLM, a bordo do satélite

GOES-16, buscando verificar se existe alguma correlação entre a luminosidade(energia) visto no topo das nuvens pelo GLM e o pico de corrente das descargas para cada descarga de retorno registrada pela câmera de alta velocidade. Os resultados apresentados neste trabalho mostram que é possível estimar o pico de corrente das descargas naturais através da luminosidade extraída das imagens das câmeras de alta velocidade e que existe uma boa correlação entre a luminosidade das descargas de retorno, extraída das imagens de câmeras de alta velocidade, e o pico de corrente medido pelas redes de detecção de relâmpagos para casos que tenham boas condições de visibilidade. Os resultados da comparação dos relâmpagos nuvem-solo, registrados pelas câmeras de alta velocidade, com os dados do sensor ótico GLM, mostraram que algumas descargas de retorno foram registradas simultaneamente pelos dois instrumentos, porém não é possível estimar a intensidade da corrente das descargas de retorno dos relâmpagos, pois esse instrumento só consegue registrar a radiação luminosa emitida no topo das nuvens. Somente com os dados utilizados na análise deste trabalho não foi possível identificar qual parte do relâmpago é vista pelo GLM.

Palavras-chave: Relâmpagos. Relâmpagos nuvem-solo. Câmera de alta velocidade. Rede de detecção de relâmpagos. Pico de corrente.

A STUDY OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRIC CURRENT AND LUMINOSITY, EXTRACTED FROM HIGH-SPEED CAMERAS, OF ATMOSPHERIC DISCHARGES

ABSTRACT

The main goal of the work was to study the relationship between the return stroke luminosity of natural cloud-to-ground lightning flashes, recorded by high-speed camera, and the peak current of these return stroke measured by local lightning location system. Data were collected during four data collection campaigns that were conducted during the summer of 2011/2012, 2012/2013 and 2013/2014, in Brazil and summer of 2017 in the United States (USA). Over all 1122 lightning flashes were analyzed, following some selection criteria that consider the visibility of the return stroke channel, cases in which it was possible to see the presence of rain, or that were saturated, were excluded from the analysis. In addition, we selected for this work only the cases that had at least five return strokes detected by at least one of the local lightning location system, As result, 66 lightning flashes were chosen to be analyzed in this work. In the first part of the analysis the data, were analyzed case by case because the relative brightness, extracted from the cameras, was not a comparable magnitude between videos. In addition the cases were separated into two groups. The first one was the data group collected during the summer 2011/2012, during which there were two temporary installed lightning location system in the region. Due to the CHUVA project. The results of the 3 lightning location system, BrasilDAT, LINET and TSL200 were compared to each other. The second one was the data group of the summer 2012/2013 and 2013/2014 in Brazil and summer of 2017 in the USA. The lightning location system BrasilDAT was used for data from Brazil and ENLTLN for US data. Both systems use sensors from the company EarthNetworks. Two methods of extracting the luminosity of the return stroke channel were applied to the data. The fixed area method considered the same window size, in pixels (30x15), for all cases, regardless of the size or distance of the channel. The other method applied the photogrammetry in each case to find the ratio pixel per meter. Relative luminosity was compared with the peak current, and linear adjustments provided the relationship between the two magnitudes. In the second part of the analysis, the linear adjustments of each analyzed cloud-to-ground lightning flashes were used to estimate the peak current. By transforming relative luminosity into peak currents, it is possible to compare all the cases studied. The square value of the linear correlation coefficient between the peak current estimated by the luminosity extracted by the fixed area method (30x15) and the peak current measured by the lightning location systems 0.77 and for the peak current estimated by the luminosity extracted by the photogrammetry method was 0.73. These results show that in general, there is a good correlation between the luminosity

extracted from the images of the cameras for the two methods and this result was similar to the result obtained by other authors where the analyzes were carried out from direct measures of current in lightning induced by rockets . The last part of this work was to use the data from cloud-ground lightning, registered during the summer of 2017 in USA, to analyze what is seen by the geostationary imager GLM onboard the GOES-16 satellite, looking for verify if there is some correlation between the luminosity (energy), seen at the top of the clouds by the GLM, and the peak current of the discharges for each return stroke recorded by the high-speed camera. The results presented in this work show that it is possible to estimate the peak current of the natural discharges through the luminosity extracted from the images of the high speed cameras and that there is a good correlation between the luminosity of the return stroke extracted from the images of high speed cameras , and the peak current measured by lightning location system for cases with good visibility conditions. The results of the comparison of the cloud-ground lightning, recorded by the high-speed cameras with the data of the optical sensor GLM, showed that some return strokes were recorded simultaneously by the two instruments, but it is not possible to estimate the current intensity of the return strokes of the lightning, since this instrument can only register the light radiation emitted at the top of the clouds. Only with the data used in the analysis od this work could not identify which part of the lightning is seen by GLM.

Keywords: Lightning. Lightning cloud-to-ground lightning flashes. High-speed camera. Lightning location system. Peak current.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade.	8
Figura 2.2 – Formação do relâmpago nuvem-solo negativo.....	10
Figura 2.3 – Relâmpago nuvem solo negativo natural	11
Figura 2.4 – Descargas K.	12
Figura 2.5 - Geometria de uma antena finita.....	14
Figura 2.6 - Onda de emissão óptica e campo elétrico Quick e Krider (2013).....	23
Figura 2.7 - dados de Carvalho et al., (2015).....	25
Figura 4.1 – Espectro de energia emitida pelos relâmpagos.....	30
Figure 4.2 – Tecnologia de tempo de chegada com 3 sensores	32
Figure 4.3 – Localização ambígua método de tempo de chegada	33
Figura 4.4 – Localização dos sensores da rede BrasilDAT.	35
Figura 4.5 – Mapa de eficiência de detecção da rede ENTLN para os EUA	36
Figura 4.6 – Área de cobertura e instrumentação do experimento de campo CHUVA-GLM Vale do Paraíba	38
Figura 4.7 – Simulação de um relâmpago visto pelo GLM e LMA.....	43
Figura 5.1 – Involucro de proteção para os equipamentos.....	46
Figura 5.2. Posição dos sensores RAMMER no verão 2011/2012 no Brasil.	47
Figura 5.3 - Posição dos sensores RAMMER no verão 2012/2013 no Brasil.	49
Figura 5.4. Posição dos sensores RAMMER no verão 2013/2014 no Brasil.	50
Figura 5.5 – Campo de visada das câmeras de alta velocidade em College Park	51
Figure 5.6 - Posição dos sensores RAMMER o verão 2017 nos EUA.....	52
Figura 6.1 – Integração da luminosidade de uma DR em um único frame	56
Figura 6.2 - Integração da luminosidade de uma DR em dois frames	56
Figura 6.3 – Exemplo da remoção da claridade de fundo das imagens	57
Figura 6.4 – Câmera de alta velocidade e campo elétrico.....	60
Figura 6.5 -Área fixa selecionada para medir a intensidade luminosa.....	62
Figura 6.6 – Relâmpago registado dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC (Área Fixa).....	64
Figura 6.7 – Potência luminosa x pico de corrente (área fixa 30x15)	65
Figura 6.8 – Relâmpago registado dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC (Fotogrametria). 67	
Figura 6.9 – Potência luminosa x pico de corrente (Fotogrametria com área 52x26) ..	68
Figura 7.1 – Caso 13 de março de 2012, 18:25 00 UTC (área fixa e fotogrametria) ...	71
Figura 7.2 – Luminosidade x pico de corrente 13/03/2012 18:25:00 UTC (Fixa)	71
Figura 7.3 – Luminosidade x pico de corrente 13/03/2012 18:25:00 UTC (Fotogrametria)	72
Figura 7.4 – Caso 2 de março de 2012, 21:22 48 UTC (área fixa e fotogrametria)	73
Figura 7.5 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012 - 21:22:48 UTC (área fixa)	74
Figura 7.6 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012 - 21:22:48 UTC (fotogrametria)	75
Figura 7.7 – Caso 2 de março de 2012, 20:52:13 UTC (área fixa e fotogrametria)	76
Figura 7.8 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012, 20:52:13 UTC (área fixa) .	77

Figura 7.9 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012, 20:52:13 UTC (fotogrametria)	77
Figura 7.10 - Caso 13 de março de 2012, 19:27:09 UTC (área fixa e fotogrametria) ..	78
Figura 7.11 – Gráfico de dispersão (luminosidade x pico de corrente) caso 13/03/2012, 18:32:14 UTC	79
Figura 7.12 - Caso 17 de fevereiro de 2013, 18:56:07 UTC (área fixa e fotogrametria)	82
Figura 7.13 – Luminosidade x pico de corrente 17/02/2013, 18:56:07 UTC (área fixa e fotogrametria)	82
Figura 7.14 - Caso 17 de fevereiro de 2013, 19:06:45 UTC (área fixa e fotogrametria)	83
Figura 7.15 – Luminosidade versus pico de corrente 17/02/2013, 19:06:45 UTC	84
Figura 7.16 – Luminosidade versus pico de corrente 17/02/2013, 19:06:45 UTC (sem a 2° e a 3° Descarga de Retorno)	85
Figura 7.17. - Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:18:23 UTC (área fixa e fotogrametria)	86
Figura 7.18 – Luminosidade versus pico de corrente 11/02/2013 20:18:23 UTC	87
Figura 7.19 – Pico de corrente estimado (câmera) versus pico de corrente (redes) para método área fixa	90
Figura 7.20 – Pico de corrente estimado (câmera) versus pico de corrente (redes) para método da fotogrametria.....	91
Figura 8.1 – Luminosidade versus pico de corrente 02/03/2012 19:52:55 UTC	93
Figura 8.2 - Forma de onda da corrente contínua, estudo de caso do relâmpago registrado em 02/03/2012 19:55:52 UTC.	94
Figura 8.3 – Desenvolvimento do líder escalonado da primeira descarga de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu no dia 11/02/2013 às 20:21:14 UTC	95
Figura 8.4 – Luminosidade versus pico de corrente 11/02/2013 20:21:14 UTC	96
Figura 8.5 – Evolução da corrente na ponta do líder escalonado em função do tempo.	97
Figura 9.1 – Relâmpago ocorrido em 19/06/2017 as 20:01:41 UTC nos EUA.....	99
Figura 9.2 – Relâmpago ID 96 registrado às 20:01:40 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.	101
Figura 9.3 - Energia do relâmpago ID 96 registrado as 20:01:40 UTC pelo GLM.....	102
Figura 9.4 - Relâmpago ID 4483 registrado às 20:25:56 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.	104
Figura 9.5 – Energia do relâmpago ID 4483 registrado as 20:25:56 UTC pelo GLM.	105
Figura 9.6 - Relâmpago ID 107 registrado às 21:00:40 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.	107
Figura 9.7 – Energia do relâmpago ID 107 registrado as 21:00:40 UTC pelo GLM... ..	108
Figura 9.8 - Relâmpago ID 2331 registrado às 3:56:48 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.	110
Figura 9.9 – Energia do relâmpago ID 2331 registrado 3:56:48 UTC pelo GLM.....	111
Figura 9.10 – Gráfico de dispersão (pico de corrente da rede x energia luminosa registrada pelo GLM)	112

Figura 9.11 – Gráfico de dispersão do pico de corrente da rede (ENLTN) x Intensidade luminosa (câmera)	113
Figura 10.1 – Comparação da frequência dos valores de pico de corrente, estimado pela câmera pelo método de área fixa, com a frequência dos valores de pico de corrente medido pelas redes de detecção.	118
Figura 10.2 – Comparação da frequência dos valores de pico de corrente, estimado pela câmera através do método da fotogrametria, com a frequência dos valores de pico de corrente medido pelas redes de detecção.	119
Figura A.1 – Caso 13 de março de 2012, 18:32:14 UTC.....	139
Figura A.2 - Luminosidade x pico de corrente (13/02/2012, 18:32:14 UTC)	140
Figura A.3 – Caso 02 de março de 2012, 19:44:48 UTC.....	141
Figura A.4 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 19:44:48 UTC)	142
Figura A.5 – Caso 02 de março de 2012, 21:13:16 UTC.....	143
Figura A.6 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:13:16 UTC)	144
Figura A.7 – Caso 23 de fevereiro de 2012, 14:42:10 UTC.....	145
Figura A.8 - Luminosidade x pico de corrente (23/02/2012, 14:42:10 UTC)	146
Figura A.9 – Caso 24 de fevereiro de 2012, 20:02:27 UTC.....	147
Figura A.10 - Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 20:02:27 UTC)	148
Figura A.11 – Caso 13 de março de 2012, 19:18:16 UTC.....	149
Figura A.12 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:18:16 UTC)	150
Figura A.13 – Caso 13 de março de 2012, 21:27:09 UTC.....	151
Figura A.14- Luminosidade x pico de corrente (13/02/2012, 20:13:46 UTC)	152
Figura A.15 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC.....	153
Figura A.16- Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 19:35:11 UTC)	154
Figura A.17 – Caso 01 de dezembro de 2013, 19:34:40 UTC.....	155
Figura A.18 - Luminosidade x pico de corrente (01/12/2011, 19:34:40 UTC)	156
Figura A.19 – Caso 23 de fevereiro de 2012, 18:26:48 UTC.....	157
Figura A.20 - Luminosidade x pico de corrente (23/02/2012, 18:26:48 UTC)	158
Figura A.21 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC.....	159
Figura A.22 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)	160
Figura A.23 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC.....	161
Figura A.24 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)	162
Figura A.25 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC.....	163
Figura A.26 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 19:52:55 UTC)	164
Figura A.27 – Caso 02 de março de 2012, 21:77:53 UTC.....	165
Figura A.28 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)	166
Figura A.29 – Caso 24 de fevereiro de 2012, 19:40:37 UTC.....	167
Figura A.30 - Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 19:40:37 UTC)	168
Figura B.1 – Caso 02 de fevereiro de 2012, 21:15:34 UTC.....	169
Figura B.2 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:15:34 UTC)	170
Figura B.3 – Caso 13 de março de 2012, 19:20:21 UTC.....	171
Figura B.4 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:20:21 UTC)	172
Figura B.5 – Caso 13 de março de 2012, 19:22:21 UTC.....	173
Figura B.6 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:22:21 UTC)	174

Figura C.1 – Caso 02 de março de 2012, 21:10:31 UTC	175
Figura C.2- Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:10:31 UTC).....	176
Figura C.3 – Caso 12 de março de 2012, 18:17:56 UTC	177
Figura C.4 - Luminosidade x pico de corrente (12/03/2012, 18:17:56 UTC).....	178
Figura C.5 – Caso 23 de março de 2012, 19:27:09 UTC	179
Figura C.6 - Luminosidade x pico de corrente (23/03/2012, 19:27:09 UTC).....	180
Figura D.1 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC.....	181
Figura D.2- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC).....	182
Figura D.3 – Caso 14 de janeiro de 2014, 19:14:30 UTC.....	183
Figura D.4- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 19:14:30 UTC).....	183
Figura D.5 – Caso 19 de junho de 2017, 20:01:41 UTC.....	184
Figura D.6- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 19:14:30 UTC).....	184
Figura D.7 – Caso 24 de julho de 2017, 3:56:48 UTC.....	185
Figura D.8- Luminosidade x pico de corrente (24/07/2017, 3:56:48 UTC).....	185
Figura D.9 – Caso 19 de fevereiro de 2013, 17:11:07 UTC.....	186
Figura D.10- Luminosidade x pico de corrente (19/02/2013, 17:11:07 UTC).....	186
Figura D.11 – Caso 18 de fevereiro de 2013, 21:19:38 UTC.....	187
Figura D.12- Luminosidade x pico de corrente (18/02/2013, 21:19:38 UTC).....	187
Figura D.13 – Caso 18 de fevereiro de 2013, 21:25:42 UTC.....	188
Figura D.14- Luminosidade x pico de corrente (18/02/2013, 21:25:42 UTC).....	188
Figura D.15 – Caso 06 de março de 2013, 21:25:42 UTC	189
Figura D.16- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:25:32 UTC).....	189
Figura D.17 – Caso 06 de março de 2013, 21:41:30 UTC	190
Figura D.18- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:41:33 UTC).....	190
Figura D.19 – Caso 06 de março de 2013, 21:50:49 UTC	191
Figura D.20- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:50:49 UTC).....	191
Figura D.21 – Caso 6 de março de 2013, 21:52:22 UTC	192
Figura D.22- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:52:22 UTC).....	192
Figura D.23 – Caso 6 de março de 2013, 21:59:54 UTC	193
Figura D.24- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:59:54 UTC).....	193
Figura D.25 – Caso 20 de fevereiro de 2013, 21:29:08 UTC.....	194
Figura D.26- Luminosidade x pico de corrente (20/02/2013, 20:29:08 UTC).....	194
Figura D.27 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:21:24 UTC.....	195
Figura D.28- Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:21:24 UTC).....	195
Figura D.29 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:29:25 UTC.....	196
Figura D.30- Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:29:25 UTC).....	196
Figura D.31 – Caso 17 de fevereiro de 2013, 18:56:07 UTC.....	197
Figura D.32- Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 18:56:07 UTC).....	197
Figura D.33 – Caso 06 de março de 2013, 20:43:33 UTC	198
Figura D.34- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 20:43:33 UTC).....	198
Figura D.35 – Caso 17 de fevereiro de 2014, 19:16:20 UTC.....	199
Figura D.36 - Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 19:16:20 UTC).....	199
Figura E.1 – Caso 14 de janeiro de 2014, 20:19:22 UTC.....	200
Figura E.2- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 20:19:22 UTC).....	201

Figura E.3 – Caso 14 de janeiro de 2014, 20:58:04 UTC	202
Figura E.4 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 20:58:04 UTC)	202
Figura E.5 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:05:00 UTC	203
Figura E.6 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:05:00 UTC)	203
Figura E.7 – Caso 17 de janeiro de 2014, 17:21:17 UTC	204
Figura E.8 - Luminosidade x pico de corrente (17/01/2014, 17:21:17 UTC)	204
Figura E.9 – Caso 23 de janeiro de 2014, 17:18:54 UTC	205
Figura E.10- Luminosidade x pico de corrente (23/01/2014, 17:18:54 UTC)	205
Figura E.11 – Caso 28 de fevereiro de 2014, 19:26:15 UTC	206
Figura E.12 - Luminosidade x pico de corrente (28/02/2014, 19:26:15 UTC)	206
Figura E.13 – Caso 13 de março de 2014, 21:00:34 UTC	207
Figura E.14- Luminosidade x pico de corrente (13/03/2014, 21:00:34 UTC)	207
Figura E.15 – Caso 14 de julho de 2017, 21:00:40 UTC	208
Figura E.16- Luminosidade x pico de corrente (14/07/2017, 21:00:40 UTC)	208
Figura E.17 – Caso 06 de março de 2013, 17:53:53 UTC	209
Figura E.18- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 17:53:53 UTC)	209
Figura E.19 – Caso 06 de março de 2013, 22:31:15 UTC	210
Figura E.20 - Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 22:31:15 UTC)	210
Figura E.21 – Caso 19 de janeiro de 2013, 17:14:12 UTC	211
Figura E.22 - Luminosidade x pico de corrente (19/01/2013, 17:14:12 UTC)	211
Figura E.23 – Caso 12 de fevereiro de 2013, 17:42:44 UTC	212
Figura E.24 - Luminosidade x pico de corrente (12/02/2013, 17:42:44 UTC)	212
Figura E.25 – Caso 17 de fevereiro de 2013, 19:13:12 UTC	213
Figura E.26 - Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 19:13:12 UTC)	213
Figura E.27 – Caso 17 de janeiro de 2014, 15:57:25 UTC	214
Figura E.28 - Luminosidade x pico de corrente (16/01/2014, 15:57:25 UTC)	214
Figura E.29 - Caso 22 de fevereiro de 2013, 20:41:15 UTC	215
Figura E.30 - Luminosidade x pico de corrente (22/02/2013, 20:41:15 UTC)	215
Figura F.1 – Caso 22 de fevereiro de 2014, 20:12:20 UTC	216
Figura F.2 - Luminosidade x pico de corrente (22/02/2014, 20:12:20 UTC)	217
Figura F.3 – Caso 30 de março de 2014, 19:42:21 UTC	218
Figura F.4 - Luminosidade x pico de corrente (30/03/2014, 19:42:21 UTC)	218
Figura F.5 – Caso 14 de julho de 2017, 20:25:56 UTC	219
Figura F.6 - Luminosidade x pico de corrente (14/07/2017, 20:25:56 UTC)	219
Figura F.7 – Caso 19 de fevereiro de 2013, 18:24:50 UTC	220
Figura F.8 - Luminosidade x pico de corrente (19/02/2013, 18:24:50 UTC)	220
Figura F.9 – Caso 16 de março de 2013, 21:25:13 UTC	221
Figura F.10 - Luminosidade x pico de corrente (16/03/2013, 21:25:13 UTC)	221
Figura F.11 – Caso 19 de janeiro de 2013, 16:57:03 UTC	222
Figura F.12 - Luminosidade x pico de corrente (19/01/2013, 16:57:03 UTC)	222
Figura F.13 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 19:20:15 UTC	223
Figura F.14 - Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 19:20:15 UTC)	223
Figura F.15 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:18:23 UTC	224
Figura F.16 - Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:18:23 UTC)	224

Figura F.17 – Caso 12 de fevereiro de 2013, 18:17:01 UTC	225
Figura F.18 - Luminosidade x pico de corrente (12/02/2013, 18:17:01 UTC)	225
Figura F.19 – Caso 26 de fevereiro de 2014, 18:23:55 UTC	226
Figura F.20- Luminosidade x pico de corrente (26/02/2013, 18:23:55 UTC)	226

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 7.1 – Resumo dos resultados campanha 2011/2012.....	80
Tabela 7.2 – Resumo dos resultados campanhas 2012/2013 e 2013/2014 (Brasil) e campanha 2017 (EUA)	88
Tabela 9.1 – Relâmpago ocorrido em 19/06/2017 as 20:01:41 UTC nos EUA.....	99
Tabela 9.2 – Relâmpago ocorrido em 14/07/2017 as 20:25:56 UTC nos EUA.....	103
Tabela 9.3 – Relâmpago ocorrido em 14/07/2017 às 21:00:40 UTC nos EUA.....	106
Tabela 9.4 – Relâmpago ocorrido em 24/07/2017 as 3:56:48 UTC nos EUA.....	109

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO..... 1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7
2.1.	PROCESSOS DE FORMAÇÃO DOS RELÂMPAGOS 7
2.2.	Corrente da descarga de retorno relâmpago nuvem-solo negativo 12
2.4.	Observações ópticas envolvendo o estudo da corrente do canal do relâmpago..... 20
3	JUSTIFICATIVA..... 26
4	INSTRUMENTAÇÃO..... 29
4.1.	Sistema de detecção e localização de relâmpago..... 29
4.3.	Câmeras de alta velocidade 39
4.4.	GLM (Geostationary Lightning Mapper)..... 41
5	CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS 45
5.1.	Campanha verão 2011/2012 (Brasil) 45
5.2.	Campanha verão 2012/2013 (Brasil) 47
5.3.	Campanha verão 2013/2014 (Brasil) 49
5.4.	Verão 2017 (EUA) 50
6	METODOLOGIA 53
6.1.	Processamento de imagem da câmera de alta velocidade 53
6.2.	Considerações dos dados das redes de detecção de relâmpagos..... 58
6.3.	Diferença da resolução temporal entre os instrumentos..... 59
6.4.	Seleção dos casos 61
6.5.	Teste 1 – método caso a caso com área fixa..... 62
6.6.	Teste 2 – método caso a caso com fotogrametria..... 65
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 69
7.1.	Campanha verão 2011/2012 (BrasilDAT, LINET e TLS200) 69
7.2.	Resultados das demais campanhas (2012/2013, 2013/2014 e 2017) 80
7.3.	Comparação geral dos resultados..... 88

8	ESTUDO DE CASO (ESTIMATIVA DA CORRENTE CONTÍNUA E DA CORRENTE DA PONTA DO LÍDER ESCALONADO)	92
9	COMPARAÇÃO DOS DADOS DO GLM COM OS DADOS DE CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE	98
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115
10.1.	Distribuição do Pico de corrente estimado pela luminosidade comparado com a distribuição do pico de corrente da rede ENLTN (Brasil e EUA).....	117
11	CONCLUSÃO	121
12	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	APÊNDICE A - CASOS COM CORRELAÇÃO BOA (CAMPANHA 2011/2012)	139
	APÊNDICE B - CASOS COM CORRELAÇÃO MÉDIA (CAMPANHA 2011/2012)	169
	APÊNDICE C - CASOS COM CORRELAÇÃO RUIM (CAMPANHA 2011/2012)	175
	Apêndice D – CASOS CORRELAÇÃO BOA CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA)	181
	APÊNDICE E - CASOS CORRELAÇÃO MÉDIA (CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA))	200
	APÊNDICE F - CASOS CORRELAÇÃO RUIM (CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA))	216

1 INTRODUÇÃO

Relâmpagos são descargas elétricas de grandes proporções que ocorrem na atmosfera, formando um longo canal ionizado que se estende por vários quilômetros, tanto na vertical como na horizontal. Ocorrem quando o campo elétrico de dentro da nuvem de tempestade é intensificado ao ponto de romper a rigidez dielétrica do ar e inicia o desenvolvimento do canal. Os relâmpagos podem ser classificados devido ao local de início e fim do canal da descarga elétrica. Descargas com canais que se iniciam e terminam dentro da nuvem de tempestade são classificados como relâmpagos intra-nuvem (IN), que são as que ocorrem com maior frequência, sendo cerca de 75% do total (RAKOV; UMAN, 2003). Descargas atmosféricas que iniciam dentro da nuvem e terminam no solo são classificadas como relâmpago nuvem-solo (NS). E por último, descargas que iniciam no solo e terminam na nuvem são classificadas como relâmpagos solo-nuvem (SN), mais conhecidos como ascendentes e na maioria das vezes iniciam-se de estruturas altas como prédios e torres (SABA et al., 2016)

Estudos realizados por Boccippio et al. (2001) sugerem que o tipo tempestade e a sua morfologia podem ser os fatores dominantes para razão entre relâmpagos intra-nuvem (IN) e nuvem-solo (NS) de uma tempestade. Embora os relâmpagos Nuvem-solo (NS) ocorram com menor frequência que os relâmpagos intra-nuvem (IN), existe um interesse maior em estudá-los devido ao seu caráter destrutivo (UMAN, 1987; RAKOV; UMAN, 2003; PINTO JUNIOR, 2005; NACCARATO, 2006). Os NS são os relâmpagos responsáveis por causar danos em estruturas de prédios, linhas de transmissão e até mesmo a vida humana, além disso, possui grande parte de seu canal ionizado exposto sob a nuvem que os produziu, o que facilita a sua observação. Quando o canal ionizado do relâmpago NS toca a superfície, ocorre uma intensa movimentação de cargas elétricas em direção ao solo, denominada descarga de retorno. A alta corrente da descarga de retorno aquece rapidamente o canal do relâmpago para uma temperatura próxima ou acima de 30000K e aumenta a

pressão do canal para 10atm ou mais, resultando em expansão de canal, intensa radiação óptica, que se propaga a partir do solo em direção à nuvem e uma onda de choque que se transforma no trovão que ouvimos à distância. A corrente elétrica envolvida nessa transferência de carga é da ordem de algumas dezenas a centenas de milhares de ampères. As descargas de retorno (DRs) têm sido o processo mais estudado da física de relâmpagos devido a dois fatos: um deles é que a corrente da descarga de retorno é a responsável por causar a maioria dos danos atribuídos aos relâmpagos (CUMMINS et al. 1998a); o outro fato é que dentre todos os processos que envolvem o relâmpago, a DR é o processo mais fácil de ser medido. Essa facilidade se dá pelo fato das DRs serem facilmente observáveis tanto em comprimentos de onda na faixa do visível e infravermelho próximo, como em radiofrequência (RAKOV; UMAN, 2003).

Os relâmpagos nuvem-solo (NS) também podem ser discriminados de acordo com a carga elétrica efetiva que é transferida para o solo durante a descarga de retorno (DR): podem ser negativos, positivos ou bipolares. Dentre os relâmpagos nuvem-solo, os relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-) são os que ocorrem com maior frequência (~90%) (RAKOV; UMAN, 2003). Segundo Williams (2006) isso ocorre porque o centro principal de carga negativa da nuvem fica mais próximo do solo do que o centro principal de carga positiva. Além disso, os NS- são constituídos, na maioria das vezes, por múltiplas descargas de retorno (DRs). Essas descargas ocorrem em intervalos de tempo médio de 60 ms (RAKOV et al., 1994; SABA, 2006; SARAIVA, 2010; BALLAROTTI et al. 2012; ANTUNES, 2014). Devido ao curto intervalo de tempo entre as descargas, para o olho humano, a luminosidade do canal parece cintilar (HACKMAN, 1992).

Como o relâmpago é uma descarga elétrica, todos os processos do seu desenvolvimento estão associados ao movimento de cargas elétricas e, portanto, emite pulsos de radiação eletromagnética em uma ampla faixa do espectro. A faixa da emissão da radiação eletromagnética emitida em

radiofrequência pode variar entre a frequência ELF (*do Inglês, Extremely Low Frequency* – 300Hz até 3kHz) e a frequência VHF (*do Inglês, Very High Frequency* – 30MHz até 300 MHz) que podem ser detectadas através de instrumentos de medidas de campos elétricos e magnéticos que formam os sistemas de detecção de relâmpagos (RAKOV; UMAN, 2003). As tecnologias empregadas nas redes de detecção de relâmpagos se baseiam na captação dos pulsos eletromagnéticos emitidos pelos relâmpagos, através de um conjunto de sensores. Além da localização das descargas dos relâmpagos, as redes também determinam a frequência de ocorrência e algumas características elétricas, tais como: polaridade, multiplicidade, pico de corrente, entre outros. (UMAN et al., 1975; CUMMINS et al., 1998a; CUMMINS et al., 1998b; VAISALA, 2003).

Uma das principais características elétricas dos relâmpagos é o pico de corrente, esse pico é responsável por causar surtos de tensão elétrica, falhas e interrupções de energia elétrica dos sistemas de transmissão e distribuição de energia em áreas propensas à ocorrência de relâmpagos. O pico de corrente da DR é o representativo da corrente máxima que a descarga de retorno transfere para o solo e pode ser estimado pela rede de detecção de relâmpagos através da conversão do valor médio do pico da radiação eletromagnética da descarga que foi detectada por um conjunto de sensores.

Além de serem estimadas pelas redes de detecção de relâmpagos, o pico de corrente da DR também pode ser medido empiricamente através de medidas diretas feitas por resistor Shunt, instalado em locais onde espera-se que caia um relâmpago, como torres e para raios, ou na base de lançamento de foguete para induzir relâmpagos. Os relâmpagos são induzidos por um pequeno foguete, carregando um fio de metal fino ligado ao chão através de um medidor de corrente, lançado na direção de uma nuvem de tempestade. À medida que o foguete sobe, o campo elétrico em sua ponta aumenta, e quando este campo atinge um certo valor crítico, uma descarga de conexão se inicia em direção a nuvem, favorecendo a inicialização do relâmpago (COORAY, 2003; FISHER et

al., 1993; RAKOV et al., 1998; HILL, 2012; DWYER; UMAN, 2014). Outra forma de se medir a corrente das descargas dos relâmpagos é através de indução magnética, essa medida é feita através de bobinas que assim como o resistor Shunt, são instaladas em estruturas relativamente altas que são atingidas frequentemente por relâmpagos. A diferença de enrolamentos da bobina primária para a secundária faz com que a corrente induzida na segunda bobina seja lida seguramente por um amperímetro. Assim, as bobinas são capazes de gravar a assinatura magnética da corrente do relâmpago que cai sobre a estrutura (COORAY, 2003; DIENDORFER, 2003; HUSSIEN et al., 2004).

Além de utilizar medidas da radiação eletromagnética das descargas atmosféricas para estudar os relâmpagos é possível estudá-los também através da radiação óptica observando seus processos visíveis. Um muito utilizado para esse fim são as câmeras de alta velocidade, esse instrumento fornece imagens com alta resolução temporal e é capaz de obter centenas a milhares de quadros por segundo. A resolução temporal das câmeras de alta velocidade permite que alguns processos opticamente visíveis que ocorrem no desenvolvimento dos canais do relâmpago fora da nuvem, sejam analisadas com bastante precisão, tais como: a tortuosidade, a multiplicidade, o intervalo de tempo entre as descargas de retorno, a duração da corrente contínua e do próprio relâmpago, os múltiplos pontos de contato no solo e as descargas de retorno bifurcadas, os líderes de retorno, as componentes M e entre outros diversos processos visíveis (SABA et al., 2006; CAMPOS, et al., 2006; KONG et al., 2009; SARAIVA et al., 2010; BALLAROTTI et al., 2012; ANTUNES, 2014).

Considerando que a radiação eletromagnética e a radiação óptica da descarga de retorno do relâmpago são resultantes e dependentes do fluxo de corrente elétrica do canal, é possível estudar a variação de corrente no canal através do seu processo luminoso. Alguns autores vêm estudando a relação entre a corrente e a luminosidade do canal do relâmpago em descargas de laboratório (GOMES; COORAY, 1998) ou com instrumentos ópticos, como câmeras e

ftodiodos IDONE; ORVILLE, 1985; DIENDORFER et al., 2003; WANG et al., 2005; AMARASINGHE et al., 2007; CAMPOS et al., 2009; QUICK; KRIDER, 2013; LIANG et al., 2014; CARVALHO et al., 2014, CARVALHO et al., 2015; QUICK; KRIDER, 2015). A maioria dos trabalhos encontrados na literatura foram feitos com relâmpagos induzidos por foguetes ou relâmpagos que atingiram o alto de torres instrumentadas, onde a distância entre o instrumento que registrou a luminosidade e o ponto de impacto era conhecido e utilizando medidas diretas para obter a corrente. Considerando que não é possível realizar medida direta de corrente dos relâmpagos nuvem-solo naturais que não atingem o topo de estruturas altas instrumentadas e que são a grande maioria, o objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo da relação entre a luminosidade emitida pela descarga de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais, registradas por câmeras de alta velocidade, e o pico de corrente, estimado pelas redes locais de detecção. A maior contribuição dessa relação será a capacidade de determinar o valor do pico de corrente da descarga de retorno, mesmo quando não for detectada pelas redes de detecção. Além disso, há a possibilidade de se estimar a variação da corrente ou o pico de corrente de outros processos que o sistema de detecção não consegue fornecer, como a corrente das componentes M, do líder contínuo, do líder escalonado, do líder de recuo, da descarga de conexão, entre outros.

Os dados que foram utilizados neste trabalho foram coletados durante quatro campanhas de coleta de dados realizadas no verão de 2011/2012, de 2012/2013 e 2013/2014, no Brasil e no verão de 2017 nos Estados Unidos (EUA) que somam ao todo 1122 relâmpagos nuvem-solo. Todas as campanhas utilizaram o mesmo modelo de câmeras de alta velocidade monocromática (Phantom V9.1) e mesma resolução temporal (2500 quadros por segundo). Os sistemas de detecção de relâmpagos utilizados foram a BrasilDAT (Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas), LINET (do inglês, *Lightning Network*) e TSL200 (do inglês, *Thunderstorm Total Lightning Sensor*), sistemas instalados temporariamente na região durante o verão de 2011/2012

onde foram realizadas as campanhas, devido ao projeto CHUVA, BrasilDAT para demais dados coletados no Brasil e ENTLN (do inglês, *Earth Networks Total Lightning Network*) para dados de campanha realizada nos EUA.

Resumindo o que será discutido em cada capítulo deste trabalho, no Capítulo 2 apresentamos a fundamentação teórica do trabalho, explicando os processos de formação dos relâmpagos, do desenvolvimento do canal do relâmpago nuvem-solo negativo, da corrente da descarga de retorno e também uma breve revisão sobre observações ópticas envolvendo o estudo da corrente do canal do relâmpago. No Capítulo 3 serão apresentadas as justificativas e motivações para o trabalho. Posteriormente, nos Capítulos 4 e 5, todos os instrumentos utilizados e campanhas observacionais realizadas neste trabalho são introduzidos, respectivamente, na tentativa de facilitar a compreensão de suas características e limitações. A metodologia de seleção e análise dos dados será apresentada e discutida no Capítulo 6. O Capítulo 7 é dedicado a apresentação e discussão dos resultados. O capítulo 8 apresenta as análises realizadas com mapeador de relâmpagos GLM (do inglês, *Geostationary Lightning Mapper*) a bordo satélite geoestacionário GOES-16. Finalmente no capítulo 9 resume as principais considerações finais e conclusões e de todas as análises.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados, de forma resumida uma revisão sobre a física dos relâmpagos, incluindo os processos de desenvolvimento do canal dos relâmpagos nuvem-solo negativos (NS-), a teoria descrita para modelar a corrente do relâmpago, e estudos envolvendo as observações ópticas e a corrente do canal do relâmpago.

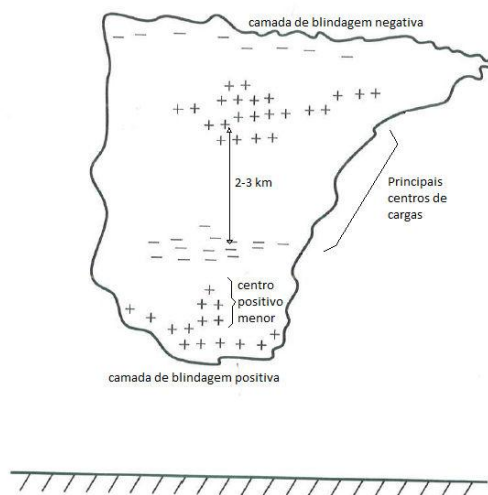
2.1. PROCESSOS DE FORMAÇÃO DOS RELÂMPAGOS

Relâmpagos são descargas elétricas de grandes proporções que ocorrem na atmosfera, a partir de nuvens de tempestade. Formam um longo canal ionizado, que se estende por vários quilômetros, tanto na vertical como na horizontal. Ocorre quando o campo elétrico de dentro da nuvem é intensificado ao ponto de romper a rigidez dielétrica do ar. O campo elétrico de dentro da nuvem de tempestade é gerado pela distribuição de cargas elétricas. Sabe-se que essa estrutura elétrica é bastante complexa e é resultante de processos microfísicos e microfísicos de geração e separação das cargas que ocorrem simultaneamente durante o processo de desenvolvimento da nuvem (SAUNDERS, 1995; JAYARATNE et al., 2003).

Diversos estudos mostram que a estrutura elétrica básica de uma nuvem de tempestade tem três centros principais de cargas (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; STOLZENBURG et al. 2008). Um centro de cargas positivas na parte superior da nuvem, um centro de carga negativa na região central da nuvem (região de temperatura em torno de -10°C e -15°C), e um centro menor de cargas positivas próximas a base da nuvem (região de temperatura em torno de 0°C) (WILLIAMS, 1989). Além dos três centros principais de cargas elétricas, existe também uma camada de blindagem negativa ao longo do topo da nuvem e uma camada de blindagem positiva ao longo da base da nuvem, como mostra a Figura 2.1. Essas camadas de blindagem são formadas a partir da captura de íons da atmosfera, responsáveis por blindar parcialmente os

campos elétricos internos da nuvem (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; PINTO JUNIOR; PINTO, 2008, STOLZENBURG et al. 2008).

Figura 2.1 – Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade.



Representação da estrutura elétrica simplificada de uma nuvem de tempestade considerando a estrutura tripolar da nuvem.

Fonte: Adaptada de Pinto Junior e Pinto (2008).

Os tipos de relâmpagos são classificados de acordo com o local onde as descargas iniciam e terminam, os que ocorrem com mais frequência são os intra-nuvem (IC), ocorre entre centros de cargas carregados opostamente dentro de uma nuvem. Embora os relâmpagos nuvem-solo (NS), que se iniciam dentro da nuvem e termina no solo, ocorram com menos frequência, são os mais perigosos e devastadores, além de ser o tipo de relâmpago que mais temos conhecimento, devido facilidade de estudá-los em relação aos outros tipos de relâmpago. Os relâmpagos NS também podem ser separados em três tipos, dependendo da carga efetiva que é transferida para o solo: negativos, positivos e bipolares. Os que ocorrem com maior frequência são os negativos, aproximadamente 90%. Segundo Williams (2006) isso ocorre porque o centro principal de carga negativa da nuvem fica mais próximo do solo do que o centro de carga positiva.

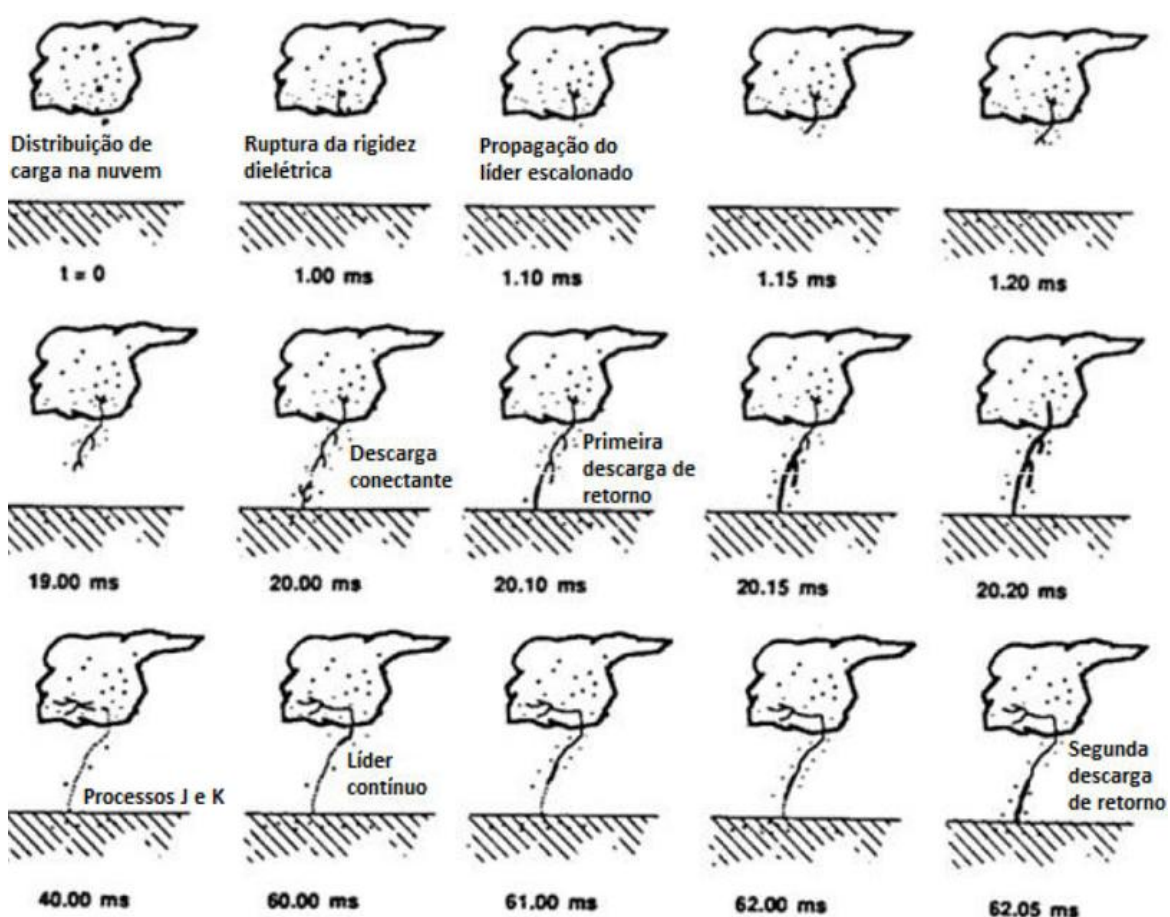
2.1.1. Desenvolvimento do canal do relâmpago nuvem-solo negativo.

A seguir será descrito os passos do desenvolvimento do canal do relâmpago nuvem-solo negativo, como ilustrado na Figura 2.2 (adaptada de Uman [1987]) e nas Figuras 2.3 e 2.4 (imagem real de relâmpagos nuvem-solo negativos registrados por câmera de alta velocidade). Um relâmpago nuvem-solo se inicia a partir da ruptura da rigidez dielétrica do ar ($t = 1,00\text{ms}$, Figura 2.2). A partir desse processo, um líder começa a se propagar em direção ao solo de forma escalonada. À medida que o líder escalonado avança, ele deixa para trás um canal condutor carregado. A ponta do líder escalonado forma um sistema de filamentos que se desenvolvem através de descarga corona, ramificando-se em passos discretos em direção ao solo ($t = 1,10$ a $19,00\text{ms}$ da Figura 2.2 e quadros 1 a 7 da Figura 2.3). Esse desenvolvimento provoca uma tortuosidade característica do canal do relâmpago nuvem-solo negativo (NS-). Quando o líder escalonado atinge uma distância de centenas de metros do solo, o campo elétrico intensifica-se ao ponto de gerar um canal ionizado, que se desenvolve a partir do solo, em direção ao líder escalonado, denominado líder conectante ($t = 20,10\text{ms}$ da Figura 2.2 e quadro 8 da Figura 2.3). A primeira descarga de retorno (DR) ocorre quando a ponta do líder escalonado faz uma conexão com o solo ou com o líder conectante, que parte do solo ou de objetos pontiagudos em direção ao líder escalonado descendente. A partir do ponto de encontro entre o líder escalonado e o líder conectante ocorre o processo de neutralização de cargas, seguido por uma frente de onda ascendente devido a avalanche de cargas negativas (elétrons) para o solo ($t = 20,10\text{ms}$ da Figura 2.2 e quadro 9 da Figura 2.3). A frente de onda emite uma luminosidade bastante intensa e é facilmente observada a olho nu, a corrente elétrica gerada pode durar dezenas de microssegundos com picos cuja amplitude é da ordem de centenas e até milhares de ampères.

A dissipação de energia durante a descarga de retorno é extremamente rápida e faz com que a temperatura no canal do relâmpago alcance cerca de 30.000K , gerando uma onda de choque supersônica responsável pelo trovão (UMAN,

1987). A corrente que flui pelo canal do relâmpago tende a durar algumas centenas de microssegundos ($t = 20,15$ a $20,20$ ms da Figura 2.2 e quadros 9 a 12 da Figura 2.3), porém em alguns casos, essa corrente pode continuar a fluir por algumas dezenas ou centenas de milissegundos gerando uma corrente contínua. Após a primeira DR, pode ser que o relâmpago se encerre, sendo considerado relâmpago simples, mas é comum nos NS- que ocorram múltiplas DRs, sendo a quantidade de DR de um relâmpago denominada multiplicidade.

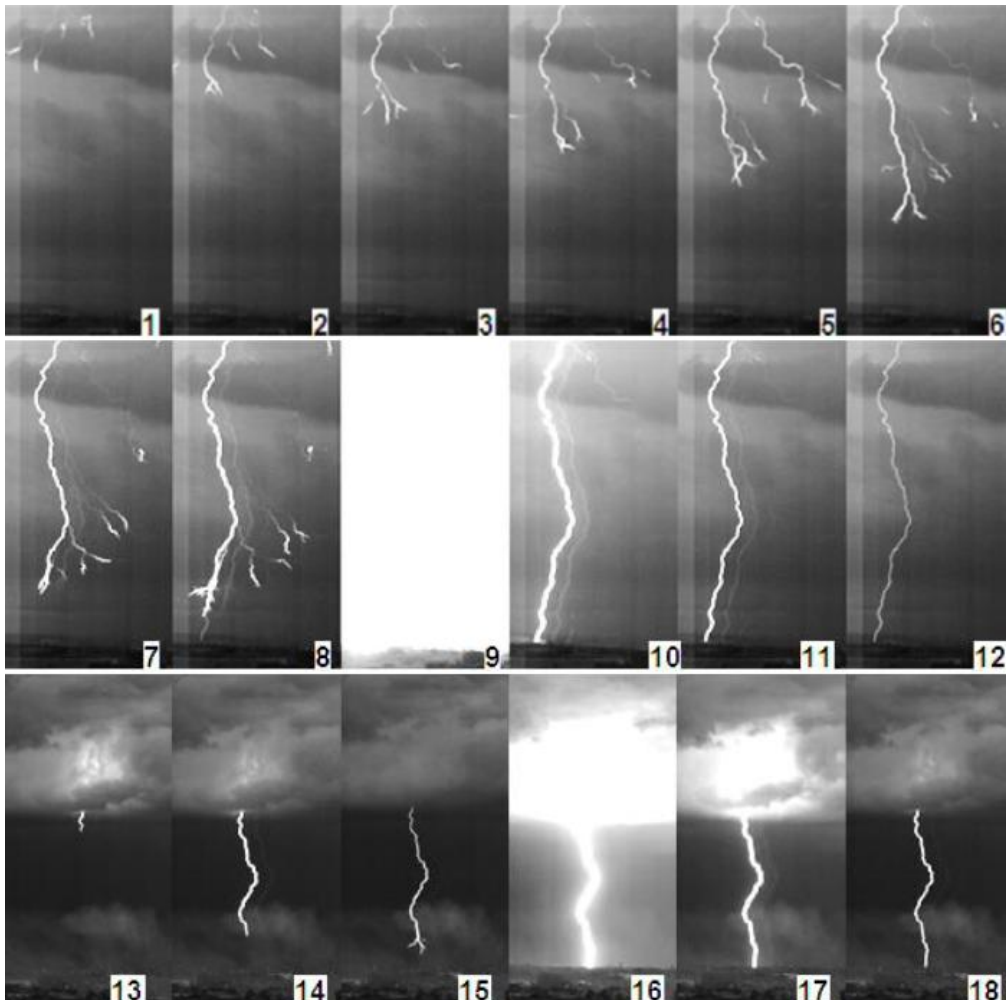
Figura 2.2 – Formação do relâmpago nuvem-solo negativo.



Exemplo da seqüência temporal dos processos físicos envolvidos na formação do relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: Adaptada de Uman (1987).

Figura 2.3 – Relâmpago nuvem solo negativo natural



Sequência do desenvolvimento do canal de um relâmpago nuvem-solo negativo registrado por uma câmera de alta velocidade.

Fonte: Adaptada de Antunes (2014).

Após a primeira DR, várias outras descargas de retorno subsequentes podem ocorrer precedidas por um líder contínuo, que se propaga da nuvem em direção ao solo pelo canal previamente traçado pelo líder escalonado ($t = 61,00$ a $62,05$ ms da Figura 2.3 e quadros 12 a 16 da Figura 2.3). Porém se essa descarga começar a se desenvolver em um canal diferente, o líder também irá se desenvolver de forma escalonada como na primeira DR.

Além disso, após a primeira DR, também podem ocorrer processos dentro da nuvem denominados descargas K ou líderes de recuo, que drenam cargas de uma região próxima à origem do líder escalonado para o canal do relâmpago ($t = 40\text{ms}$ da Figura 2.2 e Figura 2.4) (FERRO, 2008). Os líderes de recuo são líderes positivo que se movem através do canal do relâmpago previamente ionizado pelo líder escalonado, geralmente provocam um aumento da corrente que flui pelo canal e, conseqüentemente, um aumento da luminosidade (componente-M) (MAZUR, 2002).

Figura 2.4 – Descargas K.



Exemplo de descargas k que ocorreram na base da nuvem, registrados por câmera de alta velocidade, indicados na figura pelas setas vermelhas

Fonte: Adaptada de Saraiva et al. (2013).

2.2. Corrente da descarga de retorno relâmpago nuvem-solo negativo

Estudar a corrente do canal do relâmpago durante a descarga de retorno é muito importante para compreensão do mecanismo físico por trás desse processo. Do ponto físico, sabe-se que um canal ionizado é composto de uma mistura de elétrons livres, íons positivos, além de átomos e moléculas neutras. A ionização elétrica é formada por uma avalanche de elétrons a partir da aplicação do campo elétrico intenso. Onde esse campo elétrico tem que ser suficientemente grande para que os elétrons livres se acelerem a um determinado grau para que eles consigam expulsar mais de um elétron de cada átomo, sem que eles colidam. A avalanche de elétrons ocorre quando a multiplicação de elétrons livres aumenta geometricamente, resultando na

iniciação da descarga, conhecida como ruptura elétrica. A presença de elétrons livres no canal ionizado faz com que seja possível conduzir corrente elétrica, que é o movimento direcionado de partículas carregadas sob a ação de um campo elétrico. A colisão entre elétrons e íons produz calor e o aquecimento do canal produz uma ionização termal tornando o canal luminoso. Com isso, sabe-se que a avalanche de elétrons no processo de descarga de retorno no canal dos relâmpagos aquece rapidamente o canal até uma temperatura próxima ou acima de 30.000 K, criando uma pressão 10 atm ou mais no canal, resultando em expansão de canal e intensa radiação óptica, além de uma onda de choque que se propaga no ar em forma de onda sonora (trovão). Pode-se afirmar então que a intensidade da radiação óptica emitida pelo processo da descarga de retorno do relâmpago está relacionada com o fluxo de corrente que passa pelo canal.

Considerando que o pico de corrente da descarga de retorno é o representativo da corrente máxima que a descarga de retorno transfere para o solo. Do ponto de vista de engenharia, é importante conhecer a distribuição do pico de corrente das descargas para poder estimar as tensões envolvidas através de dispositivos resistivos de estruturas que tenham que suportar o impacto de uma descarga do relâmpago. Além de poder utilizar os dados como uma entrada para os modelos matemáticos simular o processo de descarga de retorno (COORAY, 2003). Atualmente as principais formas de estudar o pico de corrente dos relâmpagos nuvem-solo naturais são através dos dados fornecidos pelas redes de detecção de relâmpagos (UMAN et al., 1975; CUMMINS et al., 1998^a; CUMMINS et al.; 1998b; VAISALA, 2003).

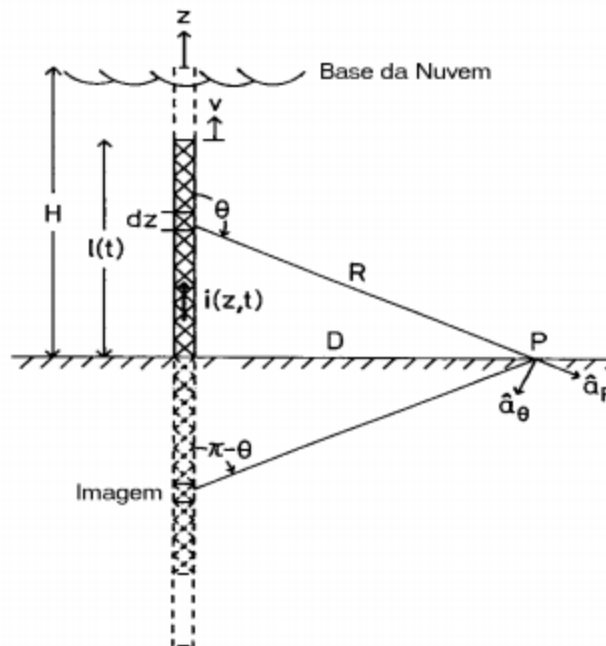
Para poder estimar o pico de corrente das descargas, uma teoria geral foi desenvolvida para descrever a radiação eletromagnética emitida pelo relâmpago NS, a teoria considera o canal do relâmpago como uma antena finita, posicionada verticalmente, que emite radiação eletromagnética (UMAN et al., 1969, 1970^a, 1970b, 1975a; MCLAIN; UMAN, 1971; LIN et al., 1979, 1980). A teoria utiliza como base o modelo de linha de transmissão e diversos outros

modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever analiticamente as formas de onda dos campos eletromagnéticos produzidos pela DR em várias distâncias (THOMSON, 1999; LUPO et al., 2000; POPOV et al., 2000; RAKOV; UMAN, 2003).

A teoria é baseada no método das imagens, como é descrito a seguir:

- Considera-se uma antena vertical com altura H sobre um plano condutor aterrado e adiciona-se a imagem da antena satisfazendo as condições de contorno, como mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Geometria de uma antena finita



Geometria de uma antena finita utilizada para descrever a radiação eletromagnética emitida pela corrente dos relâmpagos nuvem-solo.

Fonte: Adaptada de Ogawa (1994).

- A corrente em qualquer altura da antena é uma função arbitrária contínua, sendo nula em $t = 0$ (Figura 2.5). Considerando então, a antena como um dipolo de corrente vertical infinitesimal de comprimento dz , associado a um pulso de corrente $i(z, t)$, os campos elétrico e

magnético em um ponto P, a uma distância D da base da antena, são a soma dos campos gerados pelos dipolos. A componente vertical e horizontal do campo elétrico e magnético em função de t e D é fornecida por:

$$E(D, t) = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \left\{ \int_0^H R^{-3} (2 - 3\sin^2\theta) \int_0^t i(z, t - R/c) dt dz + \int_0^H c^{-2} R^{-2} (2 - 3\sin^2\theta) i(z, t - R/c) dz - \int_0^H c^{-1} R^{-2} \sin^2\theta \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right\} \quad (1.1)$$

$$B(D, t) = (\mu_0/2\pi) \left\{ \int_0^H R^{-2} \sin\theta i(z, t - R/c) dz + \int_0^H c^{-1} R^{-1} \sin\theta \frac{\partial (z, t - R/c)}{\partial t} dz \right\} \quad (1.2)$$

- onde, ϵ_0 e μ_0 são respectivamente a permissividade elétrica e permeabilidade magnética no vácuo, H é a altura e $R = (D^2 + H^2)^{1/2}$
- O primeiro termo da equação 1.1 é o campo eletrostático associado à carga líquida no fio, o segundo é o campo elétrico induzido pela variação associada ao movimento das cargas, ou seja, à corrente $i(z, t - R/c)$ e o terceiro termo é a radiação emitida pelo campo elétrico, associada ao fato de que cargas elétricas em aceleração emitem radiação. O primeiro termo da equação 1.2 é o campo magnético induzido e o segundo termo é a radiação emitida pelo campo magnético. Usando a teoria acima, as ondas do campo elétrico e magnético podem ser calculadas e através da comparação entre as ondas medidas e calculadas pela teoria, vários parâmetros das características da corrente dos relâmpagos puderam ser estimados (OGAWA, 1994).

Uma aplicação importante para os modelos desenvolvidos, consiste em deduzir a propagação da frente de onda da corrente gerada pela DR com base nas medidas dos campos eletromagnéticos nos sensores das redes de detecção de relâmpagos. O pico de corrente pode ser calculado através da conversão do

valor de pico da radiação eletromagnética gerada pela corrente que flui no canal da descarga de retorno.

Ao longo dos anos a teoria da linha de transmissão foi sendo aprimorada para ser utilizada pelas redes de detecção de relâmpagos. Uman et al., (1975) obtiveram a relação entre o pico da radiação e o pico de corrente, assumindo a radiação como sendo a mesma de um modelo de linha de transmissão. Isso significa que o valor do pico de campo elétrico irradiado pela descarga é diretamente proporcional ao valor do pico de corrente que se propaga pelo canal, de acordo com a expressão 1.3 descrita por Wacker e Orville (1999a)

$$I_{pk} \approx \frac{2\pi D}{\mu_0 v} E_{pk} \quad (1.3)$$

onde D é a distância horizontal da fonte de radiação, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo; v é a velocidade de propagação do pico de corrente próximo à base do canal (supostamente constante), E_{pk} é a intensidade do pico da radiação do campo elétrico vertical no solo (considerado como um condutor perfeito) e, por último, I_{pk} que é a intensidade do pico de corrente da descarga na base do canal.

Alguns autores criticaram a estimativa do pico de corrente que utiliza o modelo de linha de transmissão, pois ele não considera a velocidade de propagação da descarga de retorno no canal (DIENDORFER et al., 1998; SCHULZ et al., 2005). Orville (1991) propõe um modelo simples para corrigir o erro no efeito de propagação da radiação através de dados de corrente obtidos por relâmpagos induzidos como parâmetro de calibração. Já Rachidi et al. (2004), desenvolveram um modelo que prova ser possível determinar o pico de corrente de uma descarga com base na estatística, esse modelo foi a justificativa teórica para o uso de redes de detecção para determinar distribuições estatísticas do pico de corrente dos relâmpagos através da medição dos campos eletromagnéticos gerados pelas descargas.

A atenuação sofrida pela radiação eletromagnética à medida que se propaga por uma superfície, denominada efeito de propagação, faz com que a forma de onda irradiada sofra uma distorção proporcional à distância percorrida por ela (DIENDORFER et al., 1998). Cummins et al., (1998a) obtiveram uma expressão que normaliza o valor da intensidade do sinal pela distância percorrida (*range normalized signal strength*, RNSS), pois a radiação emitida pela descarga percorre diferentes distâncias até chegar a cada um dos sensores da rede. Portanto, a normalização é feita individualmente para cada sensor participante da solução dos dados da rede, a fim de que, a estimativa do pico de corrente leve em consideração os diferentes efeitos de propagação. A normalização é obtida através da expressão 1.4:

$$NSS = C \cdot SS \cdot \left(\frac{r}{D}\right)^p e^{-r-D/A} \quad (1.4)$$

onde C é uma constante unitária, SS é a intensidade do sinal eletromagnético medido pelo sensor, r é a distância da fonte de radiação (em km), D é a distância de normalização (definida como 100 km), p é o expoente de atenuação e A é a escala de comprimento da atenuação da radiação. O expoente de atenuação atualmente utilizado nas redes de detecção é $p = 1,13$, determinado por Orville (1991). O valor de “A” atualmente adotado como padrão pelo fabricante é 105 km. Já a rede de detecção austríaca ALDIS (*Austrian Lightning Detection and Information System*) utiliza parâmetros diferentes, sendo $p = 1,0$ e $A = 107$ km, devido ao fato da rede possuir pequena extensão geográfica (SCHULZ et al., 2005).

Para obter a expressão final para o pico de corrente é preciso também calcular a média dos valores de RNSS para todos os sensores da rede em um raio de 625 km ao redor do ponto de impacto do relâmpago. Assim, evita-se o erro devido à reflexão do sinal eletromagnético na ionosfera ou possíveis distorções excessivas do sinal, devido às grandes distâncias de propagação. A expressão final para o pico de corrente da descarga de retorno dada por Cummins et al. (1998a) é:

$$I_{pk} = 0,185 \cdot RNSS \quad (1.5)$$

Mesmo considerando todas as equações da teoria da radiação eletromagnética emitida pelo relâmpago, descrita nesta sessão, as redes de detecção apresentam algumas limitações na detecção dos relâmpagos, como por exemplo medir apenas DRs com pico de corrente da ordem de quiloampere ou superior. Neste caso, a rede pode não registrar o pico de corrente de todas as DRs de um relâmpago ou até mesmo perder completamente o relâmpago. Há também a possibilidade de captação de uma DR bifurcada, onde a rede detectará apenas aquela mais intensa. Outra limitação da rede é não conseguir fornecer informações da corrente de outros processos do relâmpago, como a descarga de conexão e dos líderes de recuo. Desenvolver outro método que consiga analisar a corrente de todos os processos dos relâmpagos é de extrema importância para melhor interpretação física dos relâmpagos.

2.3. Observações ópticas das descargas de retorno nuvem solo

As observações ópticas dos relâmpagos são de grande relevância para o estudo da física dos processos envolvidos nas descargas atmosféricas. Os primeiros estudos envolvendo observação óptica dos relâmpagos teve início nos anos 20, após a criação da câmera de filme corrido (Boys, 1926). Essa técnica revelou os primeiros detalhes visuais dos processos físicos envolvidos no desenvolvimento do relâmpago e continuou sendo utilizada por diversos pesquisadores ao longo de várias décadas e.g. (SCHONLAND; COLLENS, 1934; MALAN; SCHONLAND, 1947; SCHONLAND, 1956; KITAGAWA et al., 1962; BERGER, 1967; ORVILLE; IDONE, 1982; IDONE et al., 1984; JORDAN et al., 1992, 1997).

Alguns autores como Rakov et al. (1994), Parker e Krider (2003), Biagi et al. (2007), Fleenor et al. (2009) utilizaram câmeras de VHS para complementar estudos realizados com outros instrumentos, como a rede de detecção de relâmpagos, antenas de campo elétrico, entre outros. Porém esse tipo de câmera tem uma resolução temporal baixa para o estudo de relâmpagos, essa

resolução é em média entre 30 e 60 quadros por segundo. Com essa resolução muitos detalhes de todo o processo das descargas são perdidos, como a perda de descargas de retorno individuais que ocorrem em um mesmo relâmpago, o desenvolvimento do líder escalonado, a duração de correntes contínuas, quando ocorrem em intervalo de tempo inferior a resolução temporal da câmera.

Com o avanço da tecnologia, surgiram câmeras com alta resolução temporal, que são capazes de obter centenas ou milhares de quadros por segundo. Os primeiros estudos que utilizaram câmeras de alta velocidade para estudar relâmpagos foram feitos por Kito et al. (1985). Os autores utilizaram uma câmera capaz de registrar 1000 quadros por segundo para analisar relâmpagos induzidos por foguetes durante o inverno na província japonesa de Hokuriku. Alguns anos depois, Moreau et al. (1992) estudaram o processo de iniciação de relâmpagos em aeronaves a partir de registros ópticos, utilizando uma câmera com resolução de 200 quadros por segundo. Mazur et al. (1995, 1998) utilizaram uma câmera com resolução de 1000 quadros por segundo para analisar relâmpagos nuvem-solo e descargas do tipo horizontais com grande extensão que são frequentemente associadas a relâmpagos nuvem-solo positivos, denominadas “*spider*”. Alguns autores como Saba et al. (2006); Campos, et al. (2006); Kong et al. (2009); Saraiva et al. (2010); Ballarotti et al. (2012) e Ferro et al., (2012); Antunes et al. (2014), Antunes (2014), entre outros, estudaram por exemplo, características dos relâmpagos nuvem-solo negativo, tais como: a velocidade do desenvolvimento do líder escalonado e contínuo; a quantidade de descargas de retorno do relâmpago (multiplicidade); o intervalo de tempo entre as descargas de retorno; a duração da corrente contínua e do próprio relâmpago; os múltiplos pontos de contato no solo e as descargas de retorno bifurcadas (quando o canal do relâmpago gera duas descargas de retorno em pontos diferentes ao mesmo tempo).

Outro método de observar as emissões ópticas das descargas de retorno com alta resolução temporal, são os arranjos compostos ou por fotodiodos de

resposta rápida ou por fotodetectores de estado sólido. Um exemplo desse tipo de instrumento, descrito inicialmente por Yokoyama et al. (1990), que consiste em uma lente fotográfica convencional, um arranjo de 256 fotodiodos, um digitalizador e um microcomputador. O sistema denominado ALPS (do inglês, *Automatic Lightning Progressing Feature Observation System*) ainda se encontra em operação no Japão (WANG; TAKAGI, 2011), mas diversos outros sistemas já foram utilizados anteriormente por outros pesquisadores, com funcionamento baseado em diversos tipos de sensores ópticos e.g. (HUBERT; MOUGET, 1981; MACH; RUST, 1997).

2.4. Observações ópticas envolvendo o estudo da corrente do canal do relâmpago

Segundo Gomes e Cooray (1998), dados experimentais de laboratório para descargas longas mostram que o tempo de subida da corrente no canal da descarga elétrica é aproximadamente igual ao tempo de subida do pulso óptico e a amplitude de pico do pulso óptico está linearmente correlacionada com o pico de corrente. Idone e Orville (1985) encontraram uma forte correlação linear entre o pico de corrente e o pico da radiação óptica.

Diendorfer et al. (2003) estudaram a relação entre a luminosidade e a corrente da DR de 9 relâmpagos que atingiram o topo de uma torre em Toronto, Canadá. A corrente foi obtida através medições diretas de instrumentos instalados no topo da torre que foi atingida pelos relâmpagos e a luminosidade foi obtida através de uma câmera rápida (500 quadros por segundo) instalada a 200m de distância da torre. Os autores encontraram correlação linear entre a luminosidade e a corrente com $R^2 = 0,96$.

Wang et al. (2005) conduziram experimentos com relâmpagos induzidos por foguete no Centro Internacional de Pesquisa e Ensaio de Relâmpago (ICLRT, do inglês, *International Center for Lightning Research and Testing*) em Camp Blanding, na Flórida. A análise comparou a corrente da DR obtida através de medição direta com a luminosidade obtida através de fotodiodos pertencentes

ao sistema ALPS com resolução temporal de 100ns, posicionado a 250 m do ponto de impacto do relâmpago e com janela de 50 x 50 m². A comparação entre a corrente e a luminosidade foi feita através da comparação do pico e/ou da forma de onda de seus derivados. Os autores verificaram que os sinais de corrente e de luminosidade do canal exibem uma relação linear (diretamente proporcional) no estágio crescente. No entanto, logo após os picos a linearidade desaparece, e os sinais de luminosidade, normalmente, diminuem mais rapidamente.

Campos et al. (2007, 2009) utilizaram câmeras de alta velocidade com resolução temporal de 500 a 8000 quadros por segundo e o conceito de que durante a fase de corrente contínua do relâmpago a luminosidade do canal é diretamente proporcional à corrente que flui através dele para deduzir a forma de onda da corrente contínua (corrente com duração maior que 40ms) para relâmpagos nuvem-solo natural negativo e positivo respectivamente.

Vayanganie et al. (2003) utilizou uma câmera de alta resolução temporal (5000 quadros por segundo) para analisar a variação da luminosidade de relâmpagos nuvem-solo naturais. Os autores desenvolveram algoritmos para extrair o brilho máximo do canal da descarga em diferentes alturas. A variação da corrente ao longo do canal foi analisada assumindo-se que a luminosidade emitida é diretamente proporcional a corrente que flui pelo canal. O estudo mostrou que existe uma perda de corrente conforme a corrente flui através do canal. A proporção da perda aumenta com o aumento da distância propagada pela corrente. Estimativas preliminares mostram que há cerca de 3% de redução na corrente quando na propagação da nuvem para o solo.

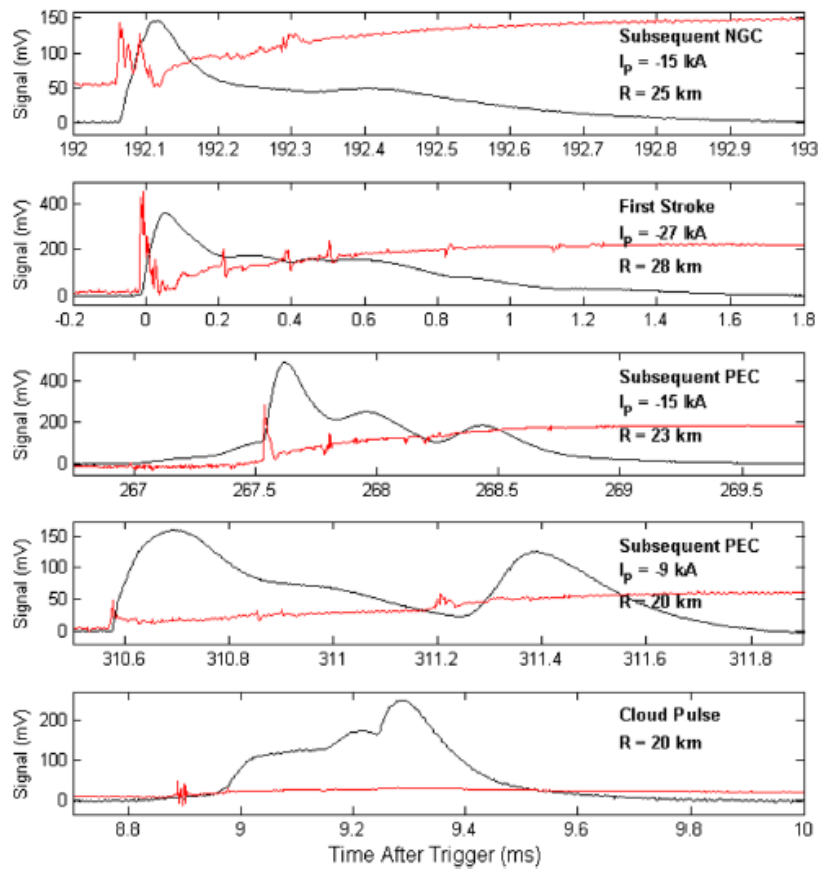
Zhou et al. (2013) analisaram a correlação entre a corrente na base da DR e a luminosidade integrada no período inicial da corrente contínua do canal de relâmpagos induzidos. A corrente foi obtida através da medição direta no ponto de impacto da descarga, a luminosidade foi obtida através de uma câmera de alta velocidade, com resolução temporal de 5000 quadros por segundo,

posicionada a 630m do ponto de impacto. Os autores encontraram que a luminosidade integrada está correlacionada com o valor logarítmico da corrente tanto para pixels saturados ou não. Na fase não saturada, a corrente do canal apresenta uma correlação linear com a raiz quadrada da luminosidade integrada e o ajuste desta relação é muito melhor do que na fase saturada.

Quick e Krider (2013) realizaram medidas ópticas visíveis e da radiação infravermelha próxima de canais de relâmpagos nuvem-solo naturais que ocorreram entre 5 e 32 km de distância do ponto de observação. Os autores utilizaram fotodiodo calibrado com uma resposta espectral linear entre 0,4 e 10 μm . Utilizaram também uma câmera com resolução temporal de 60 quadros por segundo para obter informações sobre o tipo de relâmpagos. Dados da rede de detecção de relâmpagos dos Estados Unidos NLDN (do inglês, *National Lightning Detection Network*) foram utilizados para obter a localização, a polaridade e o pico dos relâmpagos registrados pelo fotodiodo. A Figura 2.6 mostra exemplos de ondas ópticas obtidas pelo fotodiodo, juntamente com a assinatura de campo elétrico.

Na Figura 2.6 é possível observar que o pico de onda óptica ocorre cerca de centenas de microssegundos após o pico do campo elétrico. Também é possível observar que os picos secundários e as componentes M nas ondas ópticas são precedidas de rápidas mudanças na onda do campo elétrico similares ao tempo de atraso entre os picos. A explicação dos autores é que o pico do campo elétrico foi produzido nos primeiros instantes em que a corrente da DR estava próxima ao solo. Segundo os autores, o atraso do pico do sinal óptico foi causado principalmente pelo aumento do comprimento do canal e outros ramos que podem aparecer na imagem e sobrepor as variações de tempo na corrente do canal e também os efeitos de dispersão óptica atmosférica.

Figura 2.6 - Onda de emissão óptica e campo elétrico Quick e Krider (2013).



Exemplos da onda de emissão óptica (preto) e campo elétrico (vermelho), produzidas por quatro DR de relâmpagos NS- (em diferentes relâmpagos) e um pulso intra-nuvem. O campo elétrico foi plotado com polaridade invertida com a convenção física normal.

Fonte: Adaptada de Quick e Krider (2013).

Quick e Krider (2015) utilizaram o mesmo método de análise que Quick e Krider (2014) para analisar a emissão óptica no infravermelho de relâmpagos induzidos por foguetes e correlacionar com medidas de corrente obtidas através de bobina shunt instalada na base do foguete. Os resultados encontrados pelos autores foram similares aos resultados encontrados por Quick e Krider (2014).

Liang et al. (2014) utilizaram um modelo de canal de relâmpago para prever que existe um atraso de $1,5 \mu\text{s}$ no tempo entre propagação da corrente da

descarga de retorno e a propagação da luminosidade. A luminosidade é produzida pela absorção de energia associada a corrente conforme aumenta a altura do canal a partir do solo. Liang et al. (2014) apresentaram pela primeira vez um modelo que utiliza simultaneamente as interações da corrente e da termodinâmica no canal do relâmpago. O modelo prevê que existe um atraso de 20%, em relação ao pico, no tempo que a corrente e a luminosidade atingem seus respectivos picos no nível do solo. O modelo previu também que esse atraso aumenta à medida que a corrente e a luminosidade se propagam em direção a nuvem, em certos casos a velocidade de propagação da corrente chega a ser quase o dobro da velocidade de propagação da luminosidade.

Carvalho et al. (2014) testaram experimentalmente o modelo de Liang et al. (2014) através de medições feitas em relâmpagos induzidos por foguete no centro ICRLT, Flórida. A medição da luminosidade foi feita com um módulo de fotodiodo posicionado a 293m do ponto de impacto do relâmpago. A medição de corrente foi feita através de bobina shunt instalada na base do foguete. Os autores encontraram que o atraso de 20% no tempo de subida da luminosidade em relação a corrente, previsto no modelo de Liang et al. (2014), é da ordem de nanossegundos no nível do solo, essa medida é significativamente menor que os $1,5\mu\text{s}$ previstos pelo modelo. Os autores confirmaram também que esse atraso aumenta conforme a corrente se propaga em direção a nuvem.

Carvalho et al. (2015) estudaram o pico de corrente em relação ao pico de luminosidade em 12 alturas diferentes do canal de relâmpagos induzidos por foguetes, utilizando os mesmos equipamentos que Carvalho et al.(2014). Os autores apresentaram medidas de luminosidade e de corrente na base do canal de 44 DRs, 23 componentes M, e um pulso inicial de corrente contínua. Além disso, os autores fizeram medidas de luminosidade em várias alturas em alguns casos e encontraram que a corrente a 115m de altura do ponto de impacto de relâmpago decai para 47% e 38% em relação ao pico de corrente medido na corrente na base do canal. Encontraram também que o pico de luminosidade decai mais rapidamente que o pico de corrente com o aumento

da altura. O trabalho comprovou experimentalmente a teoria de Liang et al. (2014) de que a corrente se propaga mais rápida que a onda de luminosidade do canal, mas discorda que a velocidade da corrente seja duas vezes mais rápida, sendo que o estudo mostrou que essa velocidade é apenas 30% mais rápida. A Figura 5 mostra um gráfico de dispersão do pico de corrente em relação ao pico de luminosidade feito com os dados apresentados em tabela por Carvalho et al., (2015), com correlação linear de $R = 0,85$ ($R^2 = 0,72$)

Figura 2.7 - Dados de Carvalho et al. (2015).

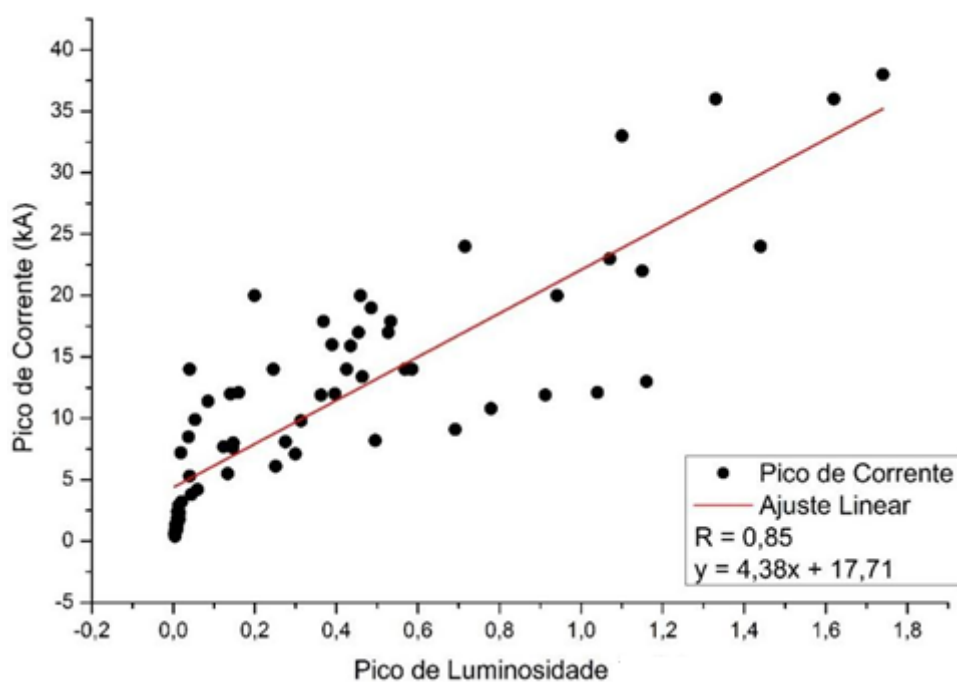


Gráfico de dispersão entre a luminosidade e o pico de corrente dos dados de Carvalho et al. (2015).

Fonte: Adaptada de Carvalho (2015).

3 JUSTIFICATIVA

Na seção 2.5 vimos que existe um interesse da comunidade científica em estudar a corrente elétrica da descarga de retorno através do seu processo luminoso. A maioria dos estudos já realizados, utilizaram relâmpagos induzidos por foguetes ou relâmpagos que atingiram torres instrumentadas, onde as medidas de corrente foram feitas através de medições diretas e a luminosidade foi registrada por conjunto de fotodiodos. Todos os estudos encontram uma boa relação entre a variação da corrente da descarga de retorno e a luminosidade emitida. A principal desvantagem de estudos realizados com medidas diretas de corrente é a baixa amostragem, pois essas medidas só são possíveis de se realizar em relâmpagos induzidos por foguete e ou relâmpagos que atingem torres instrumentadas, que possui uma baixa incidência, se comparado com a frequência com que ocorrem os relâmpagos naturais que tocam diretamente o solo. Considerando que os sistemas de detecção de relâmpagos são capazes de estimar a localização e o pico de corrente de relâmpagos nuvem-solo naturais com uma eficiência de detecção de até 90%, dependendo da densidade de sensores instalados (HECKMAN; LIU, 2010), realizar estudo utilizando os dados de pico de corrente estimado pelas redes de detecção de relâmpagos terá uma grande vantagem no número de casos que podem ser analisados.

Além disso, o sistema baseado em conjunto de fotodiodos, utilizado em diversos estudos envolvendo a luminosidade do canal do relâmpago, consegue medir a luminosidade na mesma escala de tempo dos instrumentos de medição direta de corrente e/ou sensores de campo elétrico. Ele capta o sinal de luminosidade e o transforma em pulsos elétricos, gerando um sinal em forma de onda com o tempo de subida e descida do sinal. Porém o instrumento tem a limitação de obter a forma de onda da luminosidade emitida apenas por um pequeno espaço que compreende seu cone de abertura, seja objeto de observação o canal do relâmpago, o céu, ou a luminosidade do lugar para onde quer que esteja apontado. Isso impossibilita a análise de outras características

do canal da descarga como a corrente ao longo do canal, corrente das ramificações do líder, entre outros.

No caso da câmera de alta velocidade, somente alguns modelos que tem um custo muito elevado conseguem atingir uma resolução temporal na ordem de poucos microssegundos. A maioria das câmeras de alta velocidade, como as que foram utilizadas neste trabalho, costumam operar na faixa de resolução temporal de dezenas a centenas de microssegundos. Embora a resolução temporal das câmeras de alta velocidade sejam, na maioria das vezes, inferiores a resolução temporal do sistema de fotodiodo, ainda sim possuem a capacidade de resolver espacialmente e temporalmente todos os processos da DR.

O objetivo deste trabalho realizar um estudo da relação entre a luminosidade emitida durante a descarga de retorno de relâmpagos nuvem-solo negativos naturais e registradas por câmera de alta velocidade, com o pico de corrente estimado pelos sistemas de detecção de relâmpagos. Atualmente a principal forma de estudar a corrente da DR do relâmpago nuvem-solo natural é através do valor do pico de corrente fornecido pelos sistemas de detecção de relâmpagos, quando esses conseguem captar e interpretar corretamente a onda eletromagnética emitida pela DR. Em muitos casos não é possível conhecer o pico de corrente de uma descarga que foi registrada pela câmera de alta velocidade porque a corrente da mesma não foi detectada pela rede.

Conhecendo a relação entre o pico de corrente e a luminosidade emitida pelo canal do relâmpago, será viável estudar a corrente de descargas de retorno que não forem detectadas pelos sistemas de detecção, além disso será possível também analisar a corrente de outros processos que não são detectados pelos sistemas de detecção, como a corrente das componentes M, a corrente da ponta do líder do canal do relâmpago, a corrente dos líderes de recuo que estão ligados a processos K, o pico de corrente dos dois canais de

descargas bifurcadas (pois a rede só registra a mais intensa), a corrente do líder de conexão, entre outros.

4 INSTRUMENTAÇÃO

A seguir serão descritos todos os instrumentos utilizados neste trabalho. Começando pela descrição do funcionamento dos sistemas de detecção de relâmpagos de modo geral, incluindo a tecnologia envolvida nos sensores. Posteriormente será apresentado de forma detalhada a descrição das câmeras de alta velocidade e da rede RAMMER (Rede Automatizada Multi-câmeras para o Monitoramento e Estudo de Relâmpagos). Finalizando com a descrição do sensor óptico geostacionário GLM (do inglês, Geostationary Lightning Mapper).

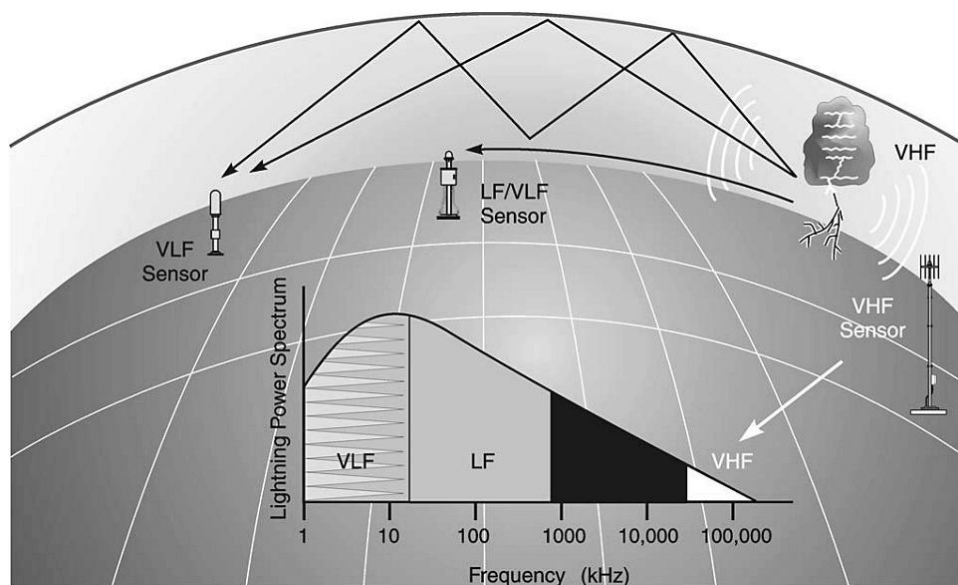
4.1. Sistema de detecção e localização de relâmpago

Durante o seu desenvolvimento, os relâmpagos emitem radiação eletromagnética em um amplo espectro de frequência. Essa radiação pode ser detectada e localizada por diferentes tipos de sensores e em diversas faixas de frequências. Como é mostrado na Figura 4.1, a amplitude do espectro da radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos varia desde o ELF (frequência extremamente baixa, 3-30 Hz) até VHF (frequência muito alta, 30-300 MHz,) e para detectar cada intervalo de radiação são usados sensores específicos. Os sensores capazes de medir radiação VLF (frequência muito baixa) são comumente usados para detectar relâmpagos muito distantes (milhares de quilômetros), detectam os sinais das ondas refletidas entre o solo e a ionosfera. Os sensores capazes de medir emissões em VLF / LF podem localizar pulsos transitórios que se propagam ao longo da superfície da Terra, tornando-os uma classe de sensores de média distância, geralmente são usados para identificar a localização de cada descarga de retorno ou a localização média do relâmpago. Já os sensores VHF são apenas capazes de detectar apenas os relâmpagos próximos. Sua vantagem, no entanto, é o fato de que eles podem ser usados para detectar e localizar em três dimensões as emissões de radiação associadas aos processos de quebra da rigidez dielétrica

e a propagação do líder do canal do relâmpago, tornando-os extremamente úteis para mapear canais dentro da nuvem de tempestade (Campos, 2016).

Para que um relâmpago seja detectado e localizado é preciso uma rede de sensores, onde cada sensor envia os dados para uma central de processamento onde são feitos os cálculos para se obter as informações de cada descarga. Os sistemas de detecção e localização de relâmpagos utilizados neste trabalho utilizam sensores com faixa de detecção em ELF, VLF, LF, MF e HF, onde ELF indica a faixa de frequência extremamente baixa, de 3 a 30 Hz. Os sensores gravam o pulso no campo elétrico vertical de 1 Hz a 12 MHz onde a localização dos pulsos no campo elétrico é dada por tempo de chegada e são agrupados em relâmpagos.

Figura 4.1 – Espectro de energia emitida pelos relâmpagos.



Espectro de emissão de energia dos relâmpagos e os tipos de sensores capazes de medir cada uma delas.

Fonte: Adaptada de Cummins e Murphy (2009).

A primeira rede comercial de detecção de relâmpagos foi criada nos Estados Unidos, em 1975, com a finalidade de obter informações de relâmpagos para prevenção de queimadas. O sistema utilizava a tecnologia MDF (Magnetic

Direction Finder) que é baseada na detecção da direção magnética da radiação emitida pelo relâmpago.

Em 1987, foi criada outra empresa para detectar relâmpagos nos Estados Unidos, agora utilizando a tecnologia TOA (Time of Arrival), que é baseada no tempo de chegada da radiação eletromagnética do relâmpago. As duas empresas operaram separadamente até meados da década de 1990, quando uma empresa japonesa comprou as duas tecnologias e criou a GAI (Global Atmospheric, Inc). Essa empresa juntou as duas técnicas e desenvolveu uma mais eficiente que as anteriores, chamada IMPACT (IMProved Accuracy from Combined Technology) (CUMMINS ET AL., 1998a).

4.2. Tecnologia de tempo de chegada

Como descrito por Rakov (2003), um único sensor de tempo de chegada fornece o instante em que o sinal da onda eletromagnética do relâmpago chega ao sensor. Os sistemas que utilizam a tecnologia de tempo de chegada para localizar o relâmpago podem ser divididos basicamente em três tipos: linha de base muito curta (dezenas a centenas de metros), linha de base curta (dezenas de quilômetros) e linha de base longa (centenas a milhares de quilômetros).

Um sistema de tempo de chegada de linha de base muito curta é composto por sensores VHF, e para encontrar a localização da fonte de emissão, precisa de dois ou mais conjuntos de três sensores com curto espaçamento entre eles, onde os conjuntos são separados por dezenas de quilômetros ou mais. Cada conjunto de sensores é basicamente um buscador de direção do tempo de chegada, e a interseção de dois ou mais vetores de direção produz a localização.

Os sistemas de tempo de chegada de linha de base curta são redes que utilizam entre 5-15 estações que utilizam informações de tempo de chegada da fonte de emissão para fazer o mapeamento tridimensional (3D) dos canais dos relâmpagos, fornecendo imagens eletromagnéticas do desenvolvendo canais

de qualquer tipo de relâmpago. Este sistema é atualmente denominado LMA (do inglês, *Lightning Mapping Array*) e tornou-se recentemente uma ferramenta importante tanto para pesquisa de relâmpago quanto para aplicações operacionais.

Já os sistemas de tempo de chegada de linha de base longa que detectam emissões na faixa VLF / LF. Como descrito por Campos (2015), quando apenas um par de sensores é utilizado no algoritmo de localização da descarga, a diferença entre os tempos de chegada do sinal em cada um deles define uma hipérbole. A localização da fonte poderia estar em qualquer ponto desta hipérbole, então os dados de pelo menos um sensor adicional é necessário para poder estimar a localização da fonte. Ou seja, para cada par de sensores, uma hipérbole pode ser calculada sobre a qual uma fonte eletromagnética pode estar localizada. A interseção entre as duas hipérboles fornece a localização da descarga, como mostra a Figura 4.2

Figure 4.2 – Tecnologia de tempo de chegada com 3 sensores

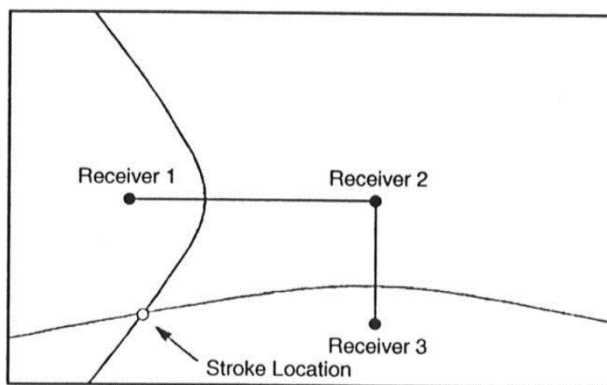


Ilustração da localização de uma descarga de retorno baseada na tecnologia de tempo de chegada utilizando 3 sensores de detecção de relâmpagos VLF/LF.

Fonte: Adaptada de Holle e Lopez (1993).

Quando apenas três sensores são usados na técnica de tempo de chegada, existe a possibilidade de a posição da descarga de retorno a ser localizada em relação à geometria da rede pode levar a uma ambiguidade de localização, como mostra o exemplo da Figura 4.3. O exemplo mostra a solução com

apenas 3 sensores onde as hipérbolas se cruzam em dois locais diferentes e é impossível determinar qual solução corresponde a real localização. Essa ambiguidade pode ser resolvida se os dados de pelo menos quatro sensores forem utilizados para a solução da localização.

Figure 4.3 – Localização ambígua método de tempo de chegada

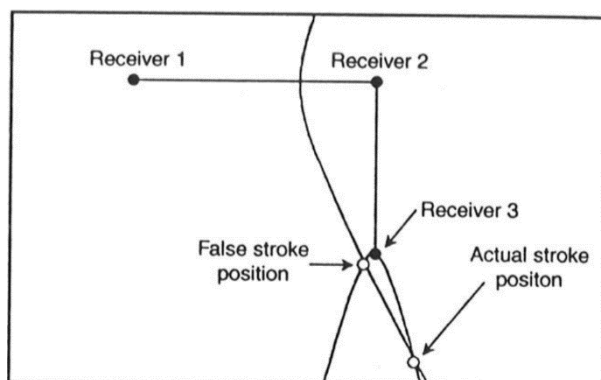


Ilustração da localização ambígua de uma descarga de retorno baseada na localização por tempo de chegada detectada por 3 sensores de detecção de relâmpagos VLF/LF. Neste caso as hipérbolas apresentam duas intersecções e um quarto sensor seria necessário para fornecer a localização correta.

Fonte Adaptada de Holle and Lopez (1993).

4.2.1. ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network)

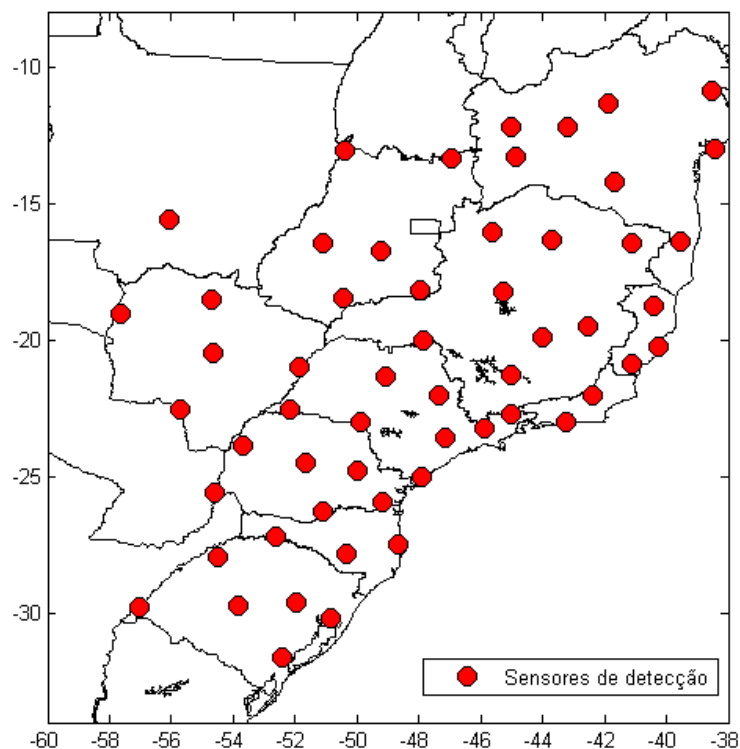
A rede *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN) é uma rede de detecção que relâmpagos cuja densidade de sensores abrange os Estados Unidos, o Aasca, Havaí, Caribe, Austrália e Austrália e Brasil. Os sensores da rede ENTLN operam em uma faixa de frequência de 1 Hz a 12 MHz (ELF, VLF, LF, MF e HF). A ampla faixa de frequência permite que sensores detectem tanto as descargas NS, como também pulsos elétricos que ocorrem dentro da nuvem (IN), que geralmente são pulsos mais fracos. De acordo com Heckman e Liu (2010), o sensor registra formas de onda inteiras de cada relâmpago e as envia de volta para a central de processamento, em pacotes de dados compactados que são usados para estimar a localização das descargas e na diferenciação entre descargas NS ou IN. A tecnologia de tempo de chegada e a

amplitude do sinal eletromagnético que chega em cada sensor são usados para estimar a localização das descargas, incluindo latitude, longitude e altitude (para IN), e o pico de corrente, respectivamente. As descargas são agrupadas em relâmpagos, se ocorrerem dentro do intervalo de 700 milissegundos e da distância 10 quilômetros, a partir da primeira descarga detectada. Além disso, um relâmpago é classificado como NS se contém pelo menos uma DR, caso contrário, é classificado como um IN.

4.2.2. BrasilDAT (Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas).

A BrasilDAT é uma rede de detecção de relâmpagos baseada em tecnologia da ENTLN e como descrito por Nacaratto et. al (2014), atualmente é constituída por cinquenta e seis (56) sensores de detecção de descargas atmosféricas, instalados em 11 estados brasileiros. A Figura 4.4 mostra a área de cobertura dos sensores com uma cobertura que abrange totalmente os estados das regiões Sul e Sudeste e parte do Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. Os pontos vermelhos indicam a localização dos sensores.

Figura 4.4 – Localização dos sensores da rede BrasilDAT.



Localização dos sensores da rede de detecção e localização de relâmpagos BrasilDAT

Fonte: Azambuja (2017)

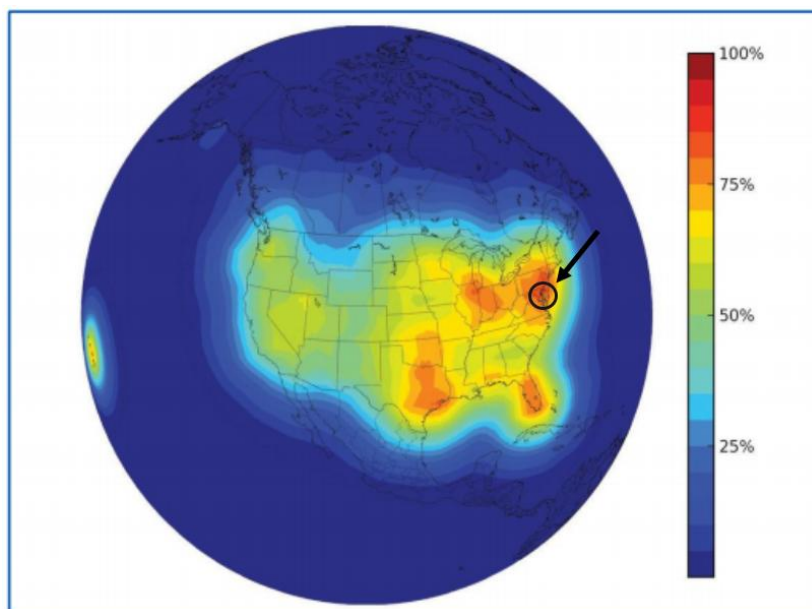
Nas regiões onde há sensores instalados, as descargas nuvem-solo são detectadas por meio de ondas LF e VHF, com eficiência de 90% e precisão menor de 1 km. Na região Norte do país, os relâmpagos são detectados por meio de ondas VLF, com eficiência de 50% e precisão menor de 10 km (website: <http://www.ccst.inpe.br/projetos/brasildat/>)

4.2.3. Rede Americana ENTLN

Para a análise dos relâmpagos registrados nos Estados Unidos foram utilizados os da rede local americana ENTLN. Os dados foram coletados ao redor da região de Washington, DC, região que possui a maior eficiência de detecção da rede ENTLN. Em Heckman e Liu, (2010) os autores mostram que a ENTLN tem eficiência de detecção de relâmpagos intra-nuvem de 40-50%

em grande parte dos EUA e até 95% nos Estados Unidos do meio-oeste e leste, como mostra a Figura 4.5.

Figura 4.5 – Mapa de eficiência de detecção da rede ENTLN para os EUA



Mapa de eficiência de detecção de relâmpago intra-nuvem (IN) estimado para ENTLN nos EUA. A seta preta indica a região de Washington, DC onde os dados foram registrados

Fonte: Adaptada de Heckman e Liu (2010)

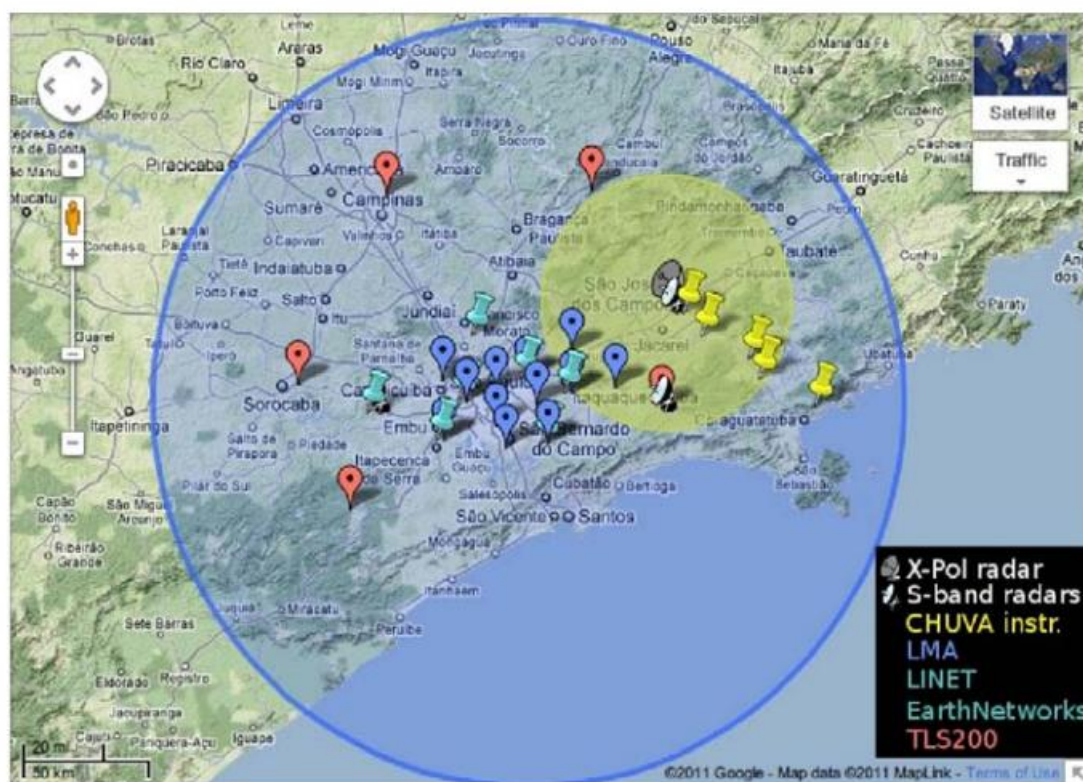
Mallick et al. (2013) avaliaram o desempenho da rede ENTLN para detectar relâmpagos trigados por foguete em Camp Blanding, FL, em 2009-2012. Os autores estimam que as eficiências de detecção para relâmpago e descargas de retorno individuais são 89 e 67%, respectivamente. O erro de localização mediana é de 687 m e o erro de medição da corrente absoluta é de 17%. Essas características de desempenho foram computadas independentemente de como os eventos localizados foram classificados pelo sistema. Cerca de metade (52%) dos traços de retorno do relâmpago desencadeado (todos negativos) foram classificados erroneamente como IC (51%) ou CG positivos (1%).

4.2.4. Sistemas de detecção em funcionamento durante a campanha de 2011/2012 no Brasil

A campanha de coleta de dados de relâmpagos durante o verão de 2011/2012 foi realizada juntamente com o projeto CHUVA (do Inglês, Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: A contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement) (MACHADO ET AL. 2014), que foi realizado na região metropolitana de São Paulo e Vale do Paraíba, de novembro de 2011 à março de 2012 (ALBRECHT et al., 2012). Devido ao projeto CHUVA, diversos instrumentos de medição foram instalados na região. Além da rede BrasilDAT, que já operava na região, 4 sistemas de localização de relâmpagos foram instalados na região metropolitana de São Paulo (LMA, LINET, Vaisala TLS200 e ENTLN). Como mencionado anteriormente, a rede BrasilDAT já utiliza sensores da ENTLN, mas durante o projeto CHUVA sensores extras foram instalados, favorecendo uma rede mais densa na região. A Figura 4.6 mostra a área de cobertura e instrumentação do experimento de campo CHUVA-GLM Vale do Paraíba realizada durante o verão de 2011/2012

Os sensores da rede LINET (do inglês, *Lightning NETWORK*) utiliza medições de campo magnético na faixa do VLF e a localização das descargas é feita por meio de um método de tempo de chegada (TOA) (BETZ et al. 2009). Usando componentes de hardware e software, o sistema é capaz de fornecer informações da posição horizontal (latitude-longitude) dos eventos relâmpagos observados e também da sua posição vertical. A rede LINET também é capaz de discriminar a descarga como sendo NS ou IN para casos que ocorram até cerca de 120 km de distância do sensor mais próximo.

Figura 4.6 – Área de cobertura e instrumentação do experimento de campo CHUVA-GLM Vale do Paraíba



Pinos vermelhos e cianos representam os sistemas de detecção de relâmpagos instalados durante a campanha CHUVA (TLS200, LINET e ENTLN), pinos azuis e amarelos representam a localização de outros instrumentos do CHUVA (LMA, pluviômetros, disdrômetros, radiômetros, lidar, etc.). O círculo amarelo representa a área de cobertura de 50 km de raio do radar de dupla polarização banda X, e o círculo azul representa a área de cobertura de 250 km do LMA.

Fonte: Adaptada de Albrecht et al. (2012).

Os sensores de relâmpago da Vaisala TLS200 combinam a interferometria VHF com as tecnologias de localização de direção magnética e tempo de chegada (MURPHY et al. 2013). Como parte da campanha da CHUVA-GLM Vale do Paraíba, a Vaisala instalou e operou uma rede de cinco sensores TLS-200 de janeiro a março de 2012. Cada sensor inclui um componente LF que mede os tempos e ângulos de chegada e um componente de interferômetro

VHF que mede os ângulos de chegada das emissões de VHF principalmente a partir de descargas IN.

4.3. Câmeras de alta velocidade

A câmera de alta velocidade é um instrumento com alta resolução temporal (milhares de frames por segundo) muito importante para o estudo da física de relâmpagos. Esse instrumento é capaz de registrar com precisão os processos visíveis que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago e é utilizada para estudar principalmente as descargas que tocam o solo (relâmpagos nuvem-solo), devido à grande parte do canal ficar visível fora da nuvem de tempestade. Quanto maior a resolução temporal da câmera de alta velocidade, é possível registrar com mais detalhes dos processos de desenvolvimento do canal do relâmpago. Além disso a alta resolução temporal das câmeras (milhares de frames por segundo) permite que cada descarga de retorno seja visualizada individualmente, tornando possível identificar se elas ocorreram no mesmo canal ou não, além de poder medir o tempo de intervalo entre elas, a duração da corrente contínua, quando existente e a duração total do relâmpago.

O modelo de câmera de alta velocidade utilizada neste trabalho foi a Phantom v9.1, esse modelo é monocromático e fornece até 14-bit de profundidade de imagem (escalas de cinza). Configurada para gravar 1.000 quadros por segundo, ela possui uma resolução completa de no máximo 1.632 x 1.200 pixels. Mas essa configuração é ajustável e é possível especificar outras proporções para aumentar a velocidade de gravação ou prolongar o tempo de gravação. A configuração utilizada na obtenção dos dados utilizados neste trabalho foi 2500 quadros por segundo, com 8-bits de profundidade de imagem com resolução de 1200x504 pixels. Além disso, o tempo de exposição é variável e independente da taxa de amostragem em quadros por segundo e a pré-visualização de focagem é feita via computador. A lente utilizada é da marca NIKON, modelo AF-S DX Zoom-Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G ED II e

possui alcance da distância focal que varia entre 18 - 55 mm. Durante as gravações a lente foi configurada com distancia focal de 18mm com foco no infinito. Como já descrito por Antunes (2014), cada uma das estações de observação foi configurada de forma padrão e continha os mesmos equipamentos:

- Uma câmera de alta velocidade monocromática da marca Phantom, modelo V9. 1;
- Um computador que executa os programas para controle do sistema e armazenamento dos dados;
- Um GPS que faz sincronização de cada frame gravado em horário universal

A sincronização da câmera com o GPS permite correlacionar os dados de relâmpagos registrados por ela com os dados do sistema de detecção e localização de relâmpagos.

4.3.1. Rede Automatizada Multi-câmeras para o Monitoramento e Estudo de Relâmpagos (RAMMER)

As campanhas de coletas de dados realizadas no Brasil fizeram parte do projeto RAMMER. Como descrito por Saraiva et al. (2012), o projeto RAMMER começou oficialmente em julho de 2010 e, a partir de então, várias etapas e testes foram realizados em São José dos Campos, a fim de preparar o equipamento para as primeiras observações relâmpagos. O projeto consiste em formar uma rede de câmeras de alta velocidade automatizada operando simultaneamente para registrar relâmpagos de uma mesma tempestade para que um número maior de relâmpagos fosse registrado. Para que as câmeras funcionassem de forma automatizada, foi instalado um sensor fotodiodo ao sistema do botão de acionamento da gravação. O fotodiodo é sensível as variações de luminosidade ambiente e quando há variação ele emite um pulso que aciona o botão de gatilho da câmera. No momento da descarga de retorno

do relâmpago emite uma intensa onda luminosa, ao perceber essa luminosidade, o fotodiodo aciona a câmera. Mesmo sendo uma rede automatizada, em algumas ocasiões, as câmeras foram operadas de forma manual.

4.4. GLM (Geostationary Lightning Mapper)

O GLM (*Geostationary Lightning Mapper*) é um sensor óptico capaz de monitorar a incidência de relâmpagos vistos do espaço e está incluído no conjunto de instrumentos a bordo do satélite geoestacionário GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite-16*) (GOODMAN et al. 2013). O GOES-16 é o primeiro satélite da nova geração de satélites geoestacionários operacionais da série GOES, desenvolvidos em parceria pelas agências americanas NASA (National Aeronautics and Space Administration) e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). O satélite foi lançado no dia 19 de novembro de 2016, e encontrava-se em fase de testes de validação dos dados no período em que a campanha de coleta de dados foi realizada. Durante a fase de testes, o satélite ficou posicionado em 89,5 graus de longitude oeste e em dezembro de 2017, o satélite foi posicionado em 75 graus de longitude oeste, na sua posição operacional.

O GLM consiste em um detector óptico de canal único próximo do infravermelho (777,4 nm) que pode detectar mudanças transitórias extremamente breves (800 μ s) na atmosfera, indicando a presença de relâmpagos. Por estar em órbita geoestacionária, o sensor mede a atividade total do relâmpago continuamente sobre as Américas e as regiões oceânicas adjacentes, através da detecção de radiações ópticas dos relâmpagos que incidem do topo da nuvem de todos os tipos de relâmpagos, durante o dia e a noite. O GLM possui um CCD (*do inglês, Charge Coupled Device*) com abertura de 1372x1300 pixels e cada pixel tem resolução espacial de aproximadamente 8km, chegando a aproximadamente 14km nas bordas e possui resolução temporal de 2 milissegundos (GOODMAN et al. 2013).

O algoritmo de agrupamento usado pelo GLM tem base no algoritmo usado do imaginador pelo LIS (*do inglês, Lightning Imaging Sensor*) que operou de 1997 a 2015 (GOODMAN et al., 2000, 2013; ALBRECHT et al., 2016; CHRONIS et al., 2008) e gera basicamente 3 produtos, os eventos, grupos e relâmpagos, como ilustrado na Figura 4.7. Cada pixel iluminado representa um evento, a localização e agrupamento dos grupos representam um centroide considerando todos os eventos, e conseqüentemente da mesma forma, a localização de um relâmpago representa um centroide considerando todos os grupos. Além disso, todos os eventos e grupos pertencentes ao mesmo relâmpago recebem o mesmo número de identificação. No exemplo da Figura 4.7, é mostrado como seria um agrupamento de um relâmpago visto pelo GLM em comparação com as fontes de radiação VHF individuais de um canal do relâmpago. Neste exemplo, os pontos (vermelho, verde, azul) são fontes VHF e os quadrados cinza são os pixels (eventos) que seriam vistos pelo GLM. O tempo é indicado pela seqüência de cor, iniciando pelo vermelho, seguindo pelo verde e por último o azul. O brilho dos pixels (CCD) do GLM é indicado por escala de cinza (quanto mais claro, mais intenso). O centroide da localização do relâmpago é ponderado no pixel mais intenso, indicado pelo X grande no quadro da esquerda. A faixa de tempo para o relâmpago inicia no primeiro pixel (evento) que é iluminado, indicado como t_0 . Todos os pixels (eventos) próximos e iluminados em um único frame (2ms), são agrupados em grupos (Grupo 1 e Grupo 2 da Figura 4.7). Os grupos de vários frames, próximos o suficiente no tempo/espço, são agrupados em um único relâmpago (Relâmpago 1). Neste exemplo, os pulsos de LMA em verdes não criaram um pulso óptico suficientemente grande para ser detectado pela simulação de dados do GLM. Atualmente, os dados GLM sozinhos não podem determinar se um relâmpago individual é um NS ou IN. Mas muitos estudos vêm sendo realizados com o intuito de desenvolver de um algoritmo que estima a ocorrência de um NS utilizando dados de relâmpagos vistos do espço por sensores ópticos (KOSHAK, 2010; KOSHAK; SOLAKIEWICZ, 2011; KOSHAK, 2011).

Figura 4.7 – Simulação de um relâmpago visto pelo GLM e LMA

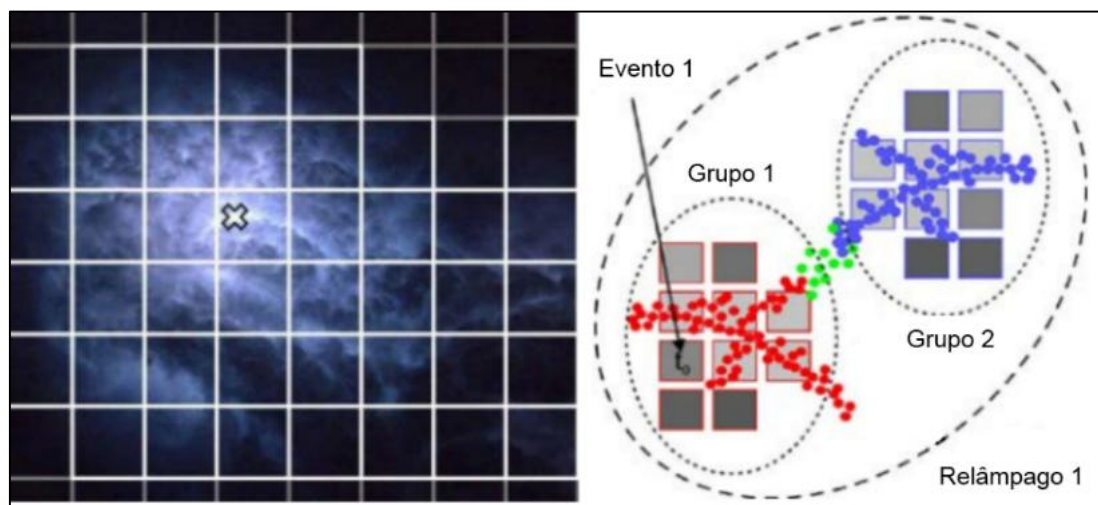


Ilustração de um relâmpago visto pelo GLM separados em dois grupos e composto por 20 eventos relativos a um canal do relâmpago visto pelo VHF (LMA).

Fonte: Adaptada de Goodman et al. (2013).

Um relâmpago pode incluir apenas um grupo com um único evento ou pode consistir em muitos grupos, cada um contendo muitos eventos. As características espaciais para um relâmpago são calculadas nas coordenadas do solo (isto é, georreferenciadas em latitude e longitude) (GOODMAN et al., 2013).

Neste trabalho, os dados do GLM foram utilizados para estudar a relação entre a radiação óptica emitida pelos relâmpagos, que foi vista do topo das nuvens pelo GLM e o pico de corrente das descargas de retorno nuvem-solo, estimados pelas redes de detecção de relâmpagos, para os relâmpagos nuvem-solo que foram registrados pelas câmeras de alta velocidade durante a campanha de coleta de dados realizada nos EUA. O estudo foi realizado a partir da comparação da intensidade luminosa, vista pelas câmeras de alta velocidade, a localização e o pico de corrente de cada descarga, fornecida pelo sistema local de detecção de relâmpagos e a radiância vista no topo da nuvem pelo GLM. Os resultados obtidos servirão de base de dados para auxiliar na

validação dos dados do GLM, além de ajudar a entender como os relâmpagos nuvem-solo podem ser vistos pelo GLM.

5 CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS

Neste capítulo será apresentada a descrição dos instrumentos e dos lugares nos foram realizadas as 4 campanhas de coleta dos dados utilizados neste trabalho.

5.1. Campanha verão 2011/2012 (Brasil)

Na primeira campanha de coleta de dados, que foi realizada no verão de 2011/2012 na cidade de São Jose dos Campos e região, no interior do estado de São Paulo, Brasil. Durante essa campanha, a rede RAMMER operou com 2 estações de observação de relâmpagos, uma instalada próximo a torre de transmissão da Vanguarda e a outra instalada na UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba). Cada estação continha uma câmera, uma antena GPS integrado, um fotodiodo para operação automática e um computador configurado para controle, coleta e armazenamento de dados. Além disso, cada estação possuía também um involucro construído para armazenar e proteger os equipamentos das ações do tempo, como sol, chuva e vento como é mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Involucro de proteção para os equipamentos.



Involucro de proteção construído para proteger os equipamentos das ações do tempo.

Fonte: Adaptada de Saraiva (2012)

A Figura 5.2 mostra a localização das estações de observação durante a campanha realizada no verão de 2011/2012. As câmeras operaram entre novembro de 2011 e Março de 2012 e duzentos e setenta relâmpagos nuvem-solo foram registrados. Como mencionado na sessão 4.4, durante a realização dessa campanha, algumas redes adicionais estavam operando na região como parte do projeto CHUVA, que ocorreu entre novembro de 2011 e março de 2011. Com isso os dados de relâmpagos nuvem-solo coletados durante essa campanha foram comparados com os dados de 3 redes de detecção diferentes, isso permitiu verificar se a existe diferença significativa no valor do pico de corrente das descargas de retorno detectadas por cada uma das redes. Para as demais campanhas realizadas no Brasil, somente a os dados da rede BrasilDAT serão utilizados nas análises.

Figura 5.2. Posição dos sensores RAMMER no verão 2011/2012 no Brasil.



Posição dos sensores RAMMER em São José dos Campos durante a campanha de coleta de dados no verão de 2011/2012.

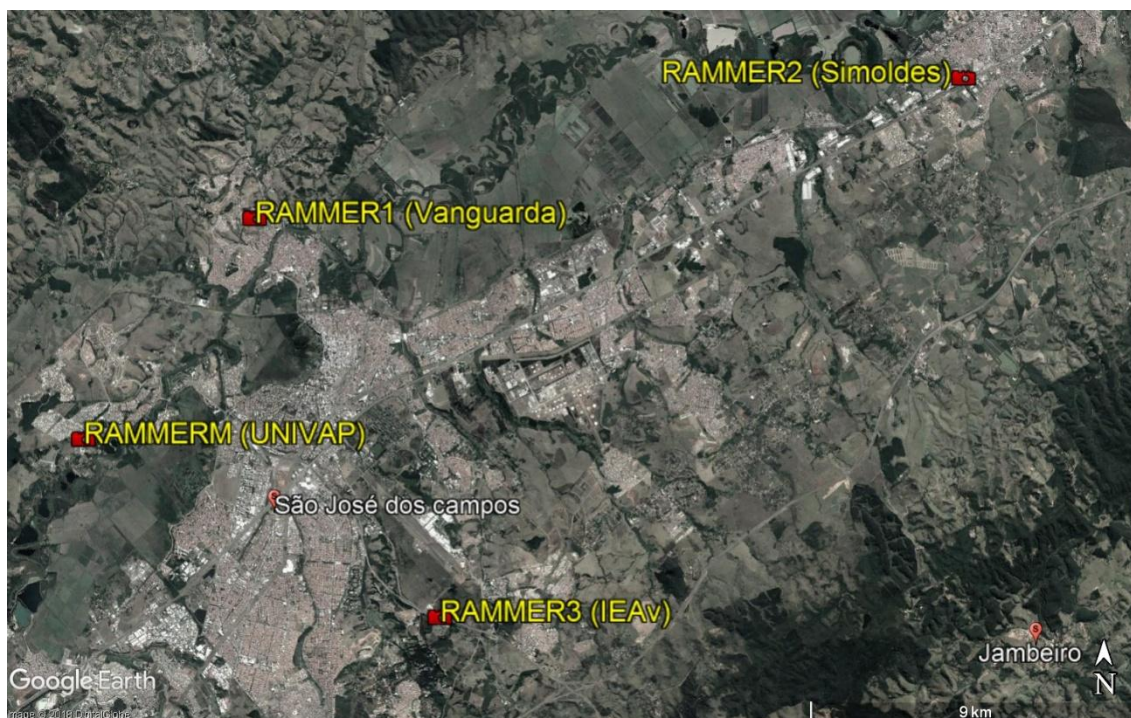
Fonte: Produção do autor

5.2. Campanha verão 2012/2013 (Brasil)

A segunda campanha de coleta de dados ocorreu no verão de 2012/2013. Para essa campanha, duas novas estações de observação foram incluídas, aumentando assim o número de câmeras de alta velocidade observando a mesma região da cidade de São José dos Campos e região. A nova configuração da rede RAMMER foi composta por três estações fixas e uma estação móvel. As estações que operaram nessa campanha foram denominadas pela ordem em que foram instaladas, a RAMMER 1 foi instalada próximo a torre de transmissão da Vanguarda. A RAMMER 2 foi instalada na torre na fábrica Simoldes, que fica em Caçapava, na cidade vizinha de São José dos Campos. A RAMMER 3 foi instalada na torre de observação do IEAv (Instituto

de Estudos Avançados da Aeronáutica) e por último a RAMMERM operou dentro de um automóvel sempre na UNIVAP. Cada estação fixa (RAMMER 1 a 3) continha uma câmera digital monocromática Phantom v9.1 de alta velocidade com a mesma configuração e os mesmos equipamentos utilizados na campanha anterior (verão 2011/2012). A estação móvel, por sua vez, foi operada sempre de forma manual, instalada em um carro e composta por uma câmera Phantom v9.1 colorida, uma antena GPS e um computador portátil para controle, coleta e armazenamento de dados. Como a RAMMER M possuía uma câmera colorida, os dados de relâmpago registrados com essa estação não foram utilizados neste trabalho. A Figura 5.3 mostra a localização dos 4 sensores RAMMER que operaram nesta campanha. A localização de cada sensor foi estrategicamente escolhida para que o campo de visão fosse direcionado para a mesma região com o intuito de conseguir maximizar a quantidade de relâmpagos registrados da mesma tempestade. Seiscentos e setenta e um relâmpagos nuvem-solo foram registrados pelas 3 câmeras de alta velocidade monocromáticas entre dezembro de 2012 e março de 2013.

Figura 5.3 - Posição dos sensores RAMMER no verão 2012/2013 no Brasil.



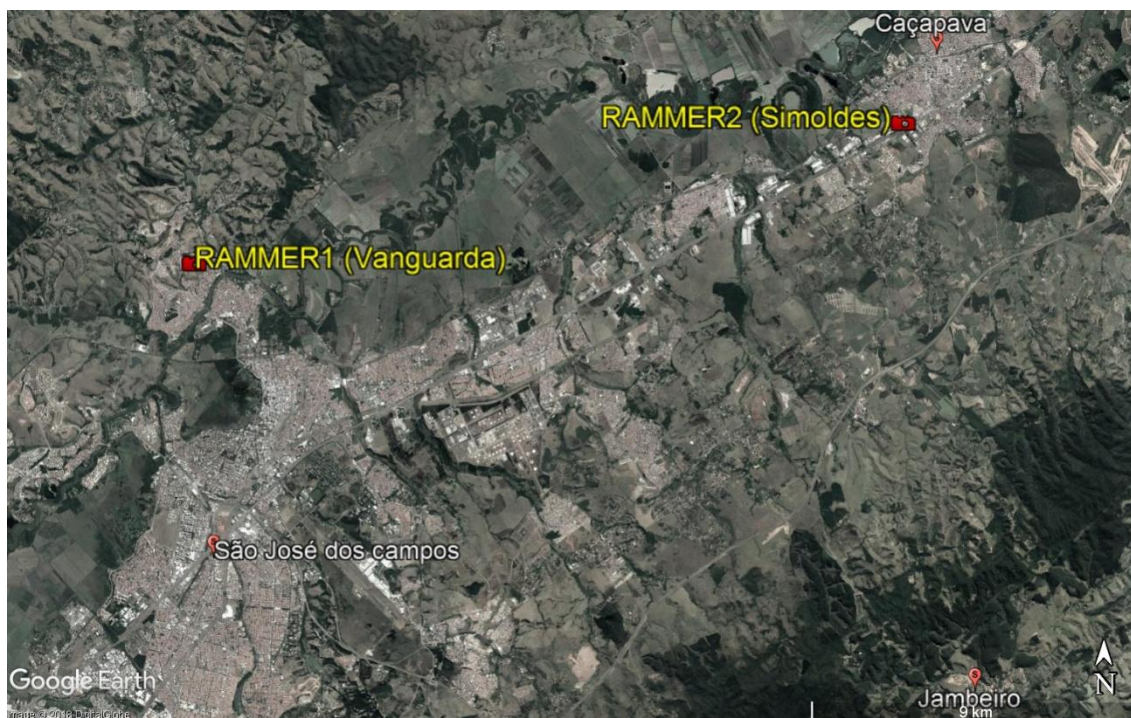
Posição dos sensores RAMMER em São José dos Campos durante a campanha de coleta de dados no verão de 2012/2013

Fonte: Produção do autor

5.3. Campanha verão 2013/2014 (Brasil)

A terceira campanha de coleta de dados também foi realizada na cidade de São José dos Campos e região. Nesta campanha apenas duas estações operaram, a RAMMER 1, próximo a torre da Vanguarda e a RAMMER 2, instalada na torre da fábrica Simoldes, como mostra a Figura 5.4. Ambas as estações possuíam câmeras monocromáticas, com a mesma configuração e instrumentos utilizados nas campanhas anteriores. Além de operarem de forma automatizada, em algumas ocasiões, foram operadas de forma manual. Entre novembro de 2013 e março de 2014 os sensores registraram cento e trinta e seis relâmpagos nuvem-solo.

Figura 5.4. Posição dos sensores RAMMER no verão 2013/2014 no Brasil.



Posição dos sensores RAMMER em São José dos Campos durante a campanha de coleta de dados no verão de 2013/2014

Fonte: Produção do autor

5.4. Verão 2017 (EUA)

A quarta campanha de coleta de dados foi realizada durante o verão de 2017 no hemisfério norte na região de Washington, DC nos Estados Unidos. A campanha foi realizada durante o doutorado sanduiche da autora e em parceria com Centro Interdisciplinar de Ciências do Sistema Terrestre (ESSIC, do inglês, *Earth System Science Interdisciplinary Center*) da Universidade de Maryland. Duas câmeras de alta velocidade Phantom v 9.1 monocromáticas, pertencentes ao projeto RAMMER, foram utilizadas. As câmeras foram configuradas com a mesma resolução temporal utilizada nas campanhas realizadas no Brasil (2500 fps) e cada uma delas também possuía um GPS e um fotodiodo integrado, além de um computador portátil para cada uma das câmeras. As duas câmeras foram posicionadas no mesmo local, no quarto andar da sala de conferencia do prédio do Centro Interdisciplinar de Ciência do

Sistema da Terra (ESSIC) da Universidade de Maryland, em College Park, EUA. Apesar de estarem no mesmo local, as câmeras estavam apontadas em diferentes direções, ampliando assim o campo de visada coberto pelas câmeras, como mostra a Figura 5.5. A Figura 5.6 mostra a localização do prédio ESSIC, na cidade de College Park, onde as câmeras foram instaladas. Ao todo, quarenta e quatro relâmpagos nuvem-solo foram registrados durante a realização da campanha. A rede de detecção utilizada para complementar a análise com dados de localização e pico de corrente dos casos registrados pelas câmeras foi a rede Americana ENLTN.

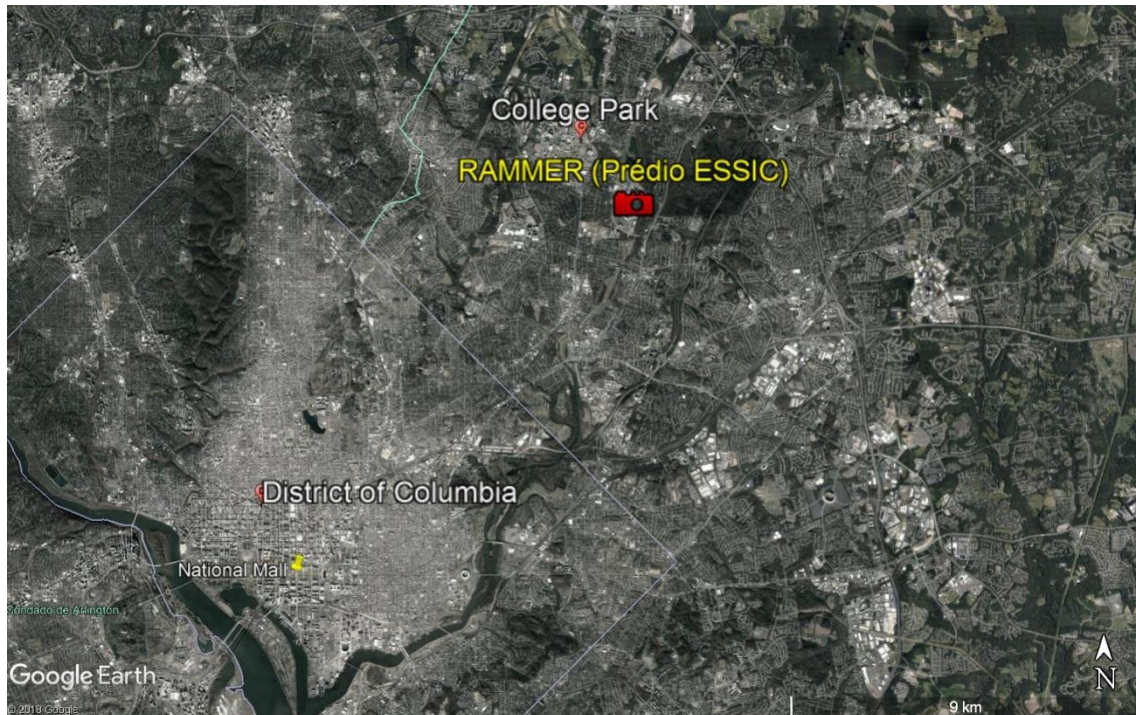
Figura 5.5 – Campo de visada das câmeras de alta velocidade em College Park



Campo de visada das câmeras de alta velocidade no quarto andar do prédio ESSIC da Universidade de Maryland em College Park, EUA.

Fonte: Produção do autor

Figure 5.6 - Posição dos sensores RAMMER o verão 2017 nos EUA.



Localização das câmeras de alta velocidade durante a campanha de coleta de dados no verão de 2017 em College Park, MD, EUA.

Fonte: Produção do Autor.

6 METODOLOGIA

O objetivo principal do trabalho é estudar a relação entre a luminosidade, registrada pela câmera de alta velocidade, e a corrente da descarga de retorno, estimada pela rede local de detecção de relâmpagos. As redes utilizadas neste trabalho foram a BrasilDAT, LINET e TLS200 para os casos registrados no Brasil durante o verão de 2011/2012, BrasilDAT para os casos registrados também no Brasil durante os verões de 2012/2013 e 2013/2014 e ENLTN para os casos registrados nos EUA durante o verão 2017. Para fazer a comparação entre a luminosidade das descargas de retorno, registradas pelas câmeras de alta velocidade, com o pico de corrente fornecido pelas redes locais de detecção de relâmpago, é preciso considerar as condições para possíveis erros devido as limitações de cada instrumento. Além disso, para os casos registrados nos EUA durante o verão de 2017, também foi feito um estudo comparando o que foi registrado pelas câmeras de alta velocidade e detectado pela rede ENLTN, com o que foi visto pelo GLM.

6.1. Processamento de imagem da câmera de alta velocidade

A luminosidade do canal do relâmpago nuvem-solo, extraída das imagens das câmeras de alta velocidade é a luminosidade relativa da imagem. Por luminosidade relativa entende-se a quantificação do sinal luminoso recebido pela câmera dividido em níveis de tensão que, por sua vez, são convertidos em escala de cinza em cada pixel. A precisão da luminosidade relativa é dada pelo número de bits (níveis de cinza), configurado na câmera, que no caso desse trabalho foi configurada em 8bits , ou seja 256 níveis de cinza.

Além da configuração em relação profundidade de imagem (escalas de cinza), dada em bits, que pode alterar os níveis de luminosidade da imagem, é importante considerar também, que existem câmeras com diferentes tecnologias podem influenciar em como a luminosidade do canal do relâmpago é obtida e processada. O sensor da câmera é a parte que captura a luz para criar a imagem e existem basicamente dois tipos: CCD (do inglês, *Charged*

Coupled Device) e o CMOS (do inglês, *Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Tanto o CCD como o CMOS, são dispositivos de carga acoplada e as suas respectivas funções básicas são receber as variações de luz, transformando-as em sinais eletromagnéticos e as codificando em bits, através de um microprocessador que gera a imagem. As diferenças entre um sensor CCD e um sensor CMOS são basicamente as seguintes:

- a) O sensor CCD transporta a carga armazenada através de um chip que a lê em um canto da matriz (grade de pixel). Um conversor analógico para digital transforma o valor de cada pixel em um valor digital por meio da medição da quantidade de carga de cada diodo fotossensível e converte essa medição para a forma binária;
- b) O sensor CMOS não utiliza o conversor analógico para digital, pois o sinal já é digital. Esse sensor utiliza diversos transistores em cada pixel para amplificar e mover a carga armazenada usando fios tradicionais, onde em cada pixel tem um circuito constituído de fotodiodos, capacitores e transistores interligados. A vantagem desse sensor é que há a possibilidade de selecionar as linhas e colunas na matriz sensorial, além de poder fazer a interseção entre eles, ou seja, selecionar apenas um pixel designado, fazendo a interseção da linha com a coluna ou também acessar apenas uma área dentro de uma imagem (CARDOZA et al., 2012).

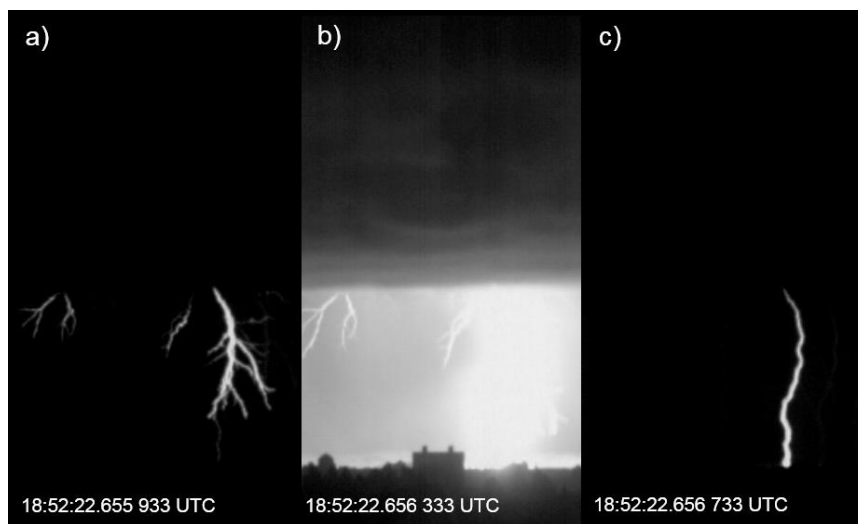
Como mencionado na sessão 4.7 deste trabalho, as câmeras utilizadas para coleta de todos os dados utilizados nas análises deste trabalho eram do mesmo modelo e pertencem ao projeto RAMMER (SARAIVA, 2012). O modelo das câmeras de alta velocidade monocromáticas é Phantom v9.1 e foram configuradas para operar com resolução temporal de 2500 quadros por segundo e fornecer 8bits profundidade de imagem, com o mesmo ângulo de abertura e o mesmo tipo de lente. O sensor desse modelo de câmera é o CMOS, que tem a função de capturar a imagem através de seu feixe de luz e transforma-la em carga de elétrica, onde essa carga é processada em imagem

digital pelo circuito eletrônico. Cada imagem obtida pela câmera de alta velocidade representa uma integração da luminosidade captada em um intervalo de tempo especificado pela configuração da câmera. Com a configuração de gravação de 2500 quadros por segundo, a câmera gera uma imagem a cada 400 μs , sendo 390 μs de tempo de integração mais 10 μs de tempo morto, utilizando o tempo de exposição máximo para a configuração citada. Os dados de luminosidade que foram utilizados nas análises deste trabalho foram extraídos sempre do frame em que ocorreu a DR. Esse frame é facilmente diferenciado dos demais, devido à frente de onda da avalanche de elétrons que emite uma luminosidade bastante intensa. Porém devido ao tempo de integração da imagem ($\sim 390\mu\text{s}$), a luminosidade da DR pode ser integrada toda em um único frame, como mostra o exemplo da Figura 6.1, neste caso, toda a intensa onda de luminosidade que ocorre na DR foi integrada em um único frame (quadro b), o frame seguinte apresenta apenas a corrente residual no canal. Pode acontecer também da DR ter ocorrido entre dois frames, nesse caso a integração de cada frame pega apenas parte da luminosidade dessa DR, como mostra o exemplo da Figura 6.2. Neste exemplo, provavelmente a descarga ocorreu em um instante mais para o final do intervalo de integração desse frame (quadro b), fazendo com que parte da onda luminosa da DR fosse integrada também no frame seguinte (quadro c). Para casos como esse, o frame que apresenta uma luminosidade mais intensa será o frame considerado na análise, neste caso foi o frame do quadro c). Quando isso ocorre, pode afetar os resultados, gerando uma correlação errônea ou subestimada, pois parte da intensidade da descarga foi integrada em outro frame.

Além de considerar a tecnologia de obtenção de imagem da câmera, é preciso considerar também alguns fatores externos que podem influenciar os resultados. Primeiramente é preciso considerar a visibilidade do canal do relâmpago, um dos fatores que podem afetar a visibilidade do canal é a cortina de chuva entre a câmera e o canal do relâmpago. Devido a cortina de chuva haverá reflexão da luz emitida pelo canal através da gota de água, tornando o

canal visivelmente difuso, então, todos os casos em que foi possível observar a presença de chuva foram excluídos da análise.

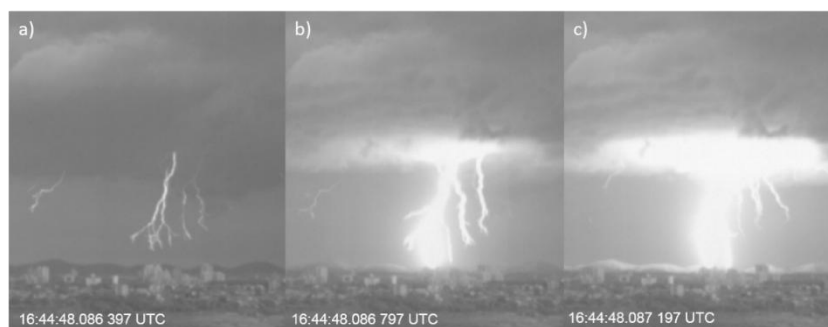
Figura 6.1 – Integração da luminosidade de uma DR em um único frame



Exemplo da integração da luminosidade da descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo em um único frame gravado pela câmera de alta velocidade. O tempo de integração de cada frame é 400 μ s.

Fonte: Produção do autor

Figura 6.2 - Integração da luminosidade de uma DR em dois frames



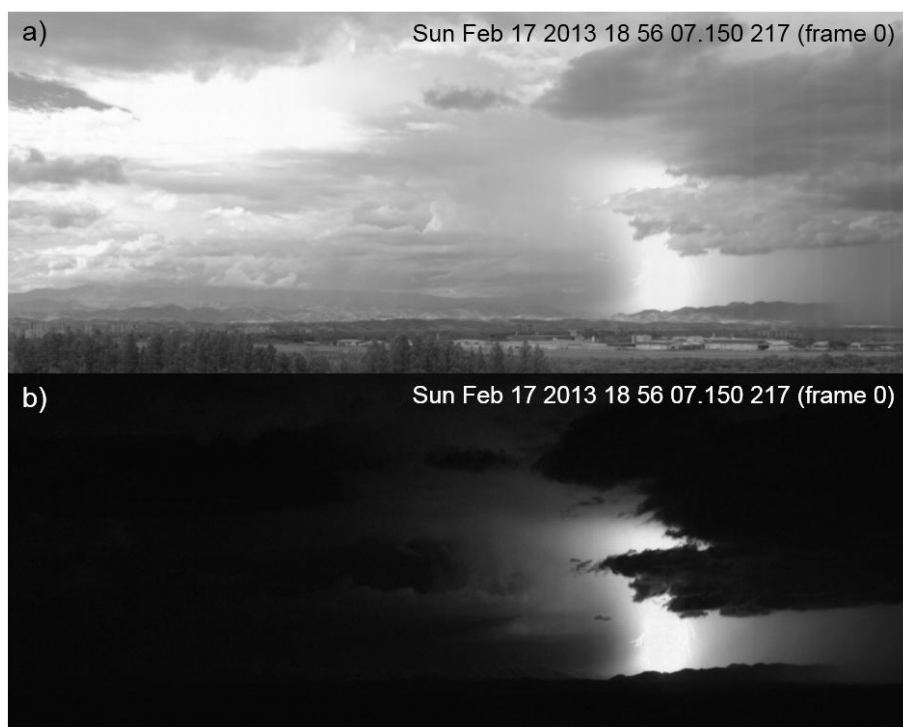
Exemplo da integração da luminosidade da descarga de retorno de um relâmpago-nuvem solo em dois frames gravados pela câmera de alta velocidade. O tempo de integração de cada frame é 400 μ s.

Fonte: Produção do autor

Outro fator externo que tem que ser considerado é a distância entre a câmera e a descarga do relâmpago. A intensidade da radiação óptica diminui com o

quadrado da distância da fonte pontual ($1/r^2$), porém, considerando o canal do relâmpago como sendo uma antena finita, assim como para radiação eletromagnética, tem-se que a intensidade da radiação óptica do canal do relâmpago diminui com a distância ($1/r$). Sendo assim, se o canal do relâmpago estiver muito próximo da câmera, provavelmente a luminosidade emitida será tão intensa que irá saturar a imagem e se o canal estiver muito distante da câmera a luminosidade será muito fraca e não será possível identificar a sua intensidade.

Figura 6.3 – Exemplo da remoção da claridade de fundo das imagens



Exemplo da remoção da claridade de fundo das imagens. A Figura a) mostra a imagem com a claridade de fundo natural, registrada pela câmera de alta velocidade. A Figura b) mostra o mesmo frame com a claridade de fundo removida.

Fonte: Produção do autor.

Considerando os níveis de saturação da imagem, foram selecionados para a análise apenas os casos que não estavam saturados, ou seja, cujo ponto mais luminoso do canal da DR na imagem não ultrapassasse o limiar do CMOS (valor do pixel igual a 256). Quando um ponto está saturado, torna-se

impossível saber a que nível de luminosidade ele chegou, introduzindo muito erros na análise. Outro fator que pode influenciar na visibilidade do canal é a claridade de fundo da imagem, pois o fundo também estará emitindo uma determinada quantidade de luminosidade. Para minimizar a interferência da claridade de fundo nas imagens analisadas, foi desenvolvido um algoritmo numérico, em linguagem IDL, que remove claridade de fundo da imagem de cada DR, permitindo assim que somente a luminosidade emitida pela DR seja medida. A Figura 6.3a mostra o exemplo de uma imagem com claridade de fundo natural, registrada pela câmara de alta velocidade e a Figura 6.3b mostra a mesma imagem com o fundo removido, nessa imagem é possível perceber somente a luminosidade emitida pela DR.

6.2. Considerações dos dados das redes de detecção de relâmpagos

Além das considerações das limitações e possíveis erros nos dados fornecidos pelas câmeras de alta velocidade, é preciso considerar também as limitações e possíveis erros nos dados das redes de detecção de relâmpagos. Como já discutido na sessão 4.2, dependendo do número de sensores que detectam a DR, a localização pode ser dada de forma ambígua e pode interferir também na solução do cálculo do valor do pico de corrente. Além da quantidade de sensores envolvidos na solução, existem também outros fatores que podem influenciar nos resultados. Alguns exemplos desses fatores são os ruídos detectados pelos sensores, que podem gerar erros nos resultados; a posição dos sensores em relação ao local onde ocorreu a descarga, pois radiação eletromagnética emitida pela descarga pode sofrer alguma interferência no caminho percorrido até o sensor e até possíveis falhas em algum dos sensores no momento da detecção. Esses fatores podem ocorrer combinados e de forma aleatória, gerando possíveis erros nos resultados. Para analisar a interferência desses possíveis erros nas redes, os dados coletados com as câmeras de alta velocidade, durante a campanha de 2011/2012, serão analisados utilizando os dados das redes BrasilDAT, LINET e TSL200. Os resultados obtidos por cada uma das redes foram comparados entre si para avaliar como os possíveis erros

em uma das redes, como os mencionados anteriormente, podem influenciar nos resultados da análise. Como as 3 redes possuem sensores com tecnologia diferentes e que não tem relação com as outras redes, caso uma haja alguma falha do sistema ou algum erro relacionado a localização da descarga ou em relação ao valor do pico corrente, será possível identificá-los na comparação com os resultados das outras duas redes.

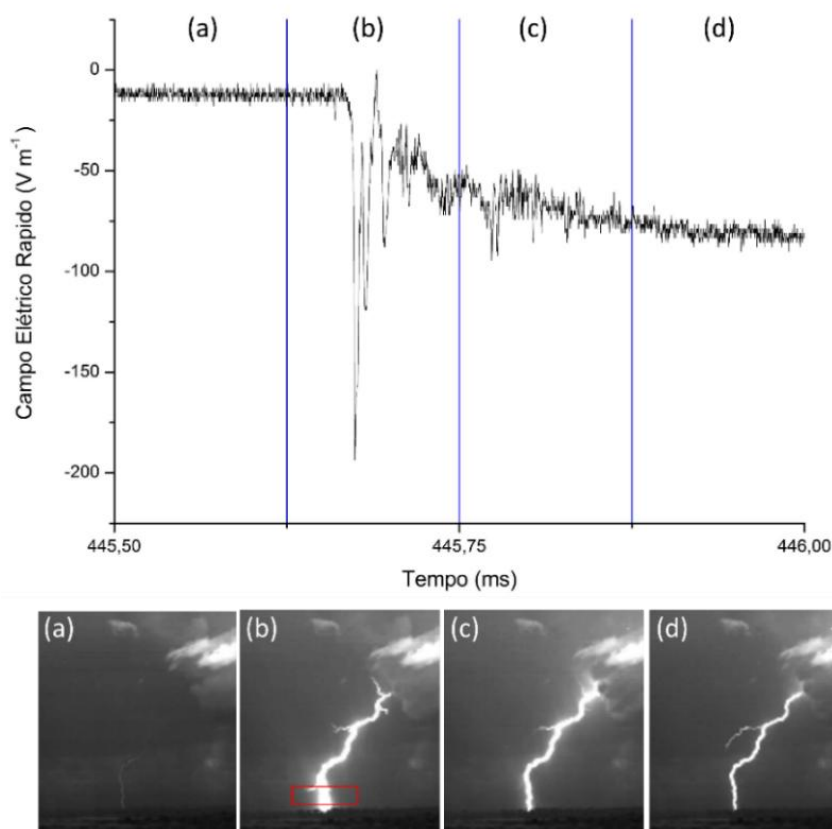
6.3. Diferença da resolução temporal entre os instrumentos

Para fazer a comparação entre a luminosidade das descargas de retorno, registradas pelas câmeras de alta velocidade, com o pico de corrente, fornecido pelas redes locais de detecção de relâmpago, é preciso considerar a diferença da resolução temporal dos instrumentos. Cada imagem obtida pela câmera representa uma integração da luminosidade captada em um intervalo de tempo especificado pela configuração da câmera. No caso das filmagens realizadas para coletar os dados que foram utilizados neste trabalho, a velocidade de gravação foi de 2500 quadros por segundo, ou seja 400 μ s de tempo de integração. Já o sinal eletromagnético da rede, utilizado para estimar o pico de corrente, tem resolução temporal muito maior, na casa de nanossegundos.

Considerando essa diferença temporal entre os instrumentos, foi preciso estudar o que acontece com a corrente da DR no tempo para verificar a viabilidade da comparação dos dados das câmeras e das redes. Tomando como exemplo a Figura 6.4, vê-se que o tempo de integração (400 μ s) de cada quadro do vídeo, registrados pela câmera, equivale à DR e vários outros processos eletromagnéticos detectados pelos sensores da rede de detecção. No quadro b), é possível observar que todo o processo do desenvolvimento do líder escalonado foi perdido na imagem devido ao tempo de integração ser muito longo. Embora haja outros processos a serem considerados, estes são muito menos intensos que o pico da radiação da DR, ou seja, mesmo integrado em $\sim 400 \mu$ s, o que se sobressai ainda é a intensidade máxima da DR. Isso permite que a integração da luminosidade dos processos da descarga de

retorno que foram registrados pela câmera de alta velocidade, a cada quadro (400us), seja comparada com o pico de corrente, detectado pela rede de detecção, dentro do mesmo intervalo de tempo da imagem.

Figura 6.4 – Câmera de alta velocidade e campo elétrico



Sincronização entre cada quadro registrado por uma câmera de alta velocidade e a forma de onda obtida através de sistema de aquisição dos sensores de campo elétrico. Cada quadro foi registrado ao longo do intervalo de tempo correspondente à sua letra indicada no gráfico de campo elétrico e separados pelas linhas azuis. O retângulo vermelho no quadro inferior b) indica a área selecionada para extrair a luminosidade.

Fonte: Adaptada de Campos (2012)

Além de considerar o tempo de integração das imagens da câmera, é preciso encontrar a melhor maneira de extrair a luminosidade do canal do relâmpago que representa com maior fidelidade o pico de corrente. Para isso, alguns testes foram realizados e serão apresentados nas sessões seguintes. O

retângulo vermelho no quadro inferior b) da Figura 5.4 representa a área selecionada para demonstrar como foram feitos os testes

6.4. Seleção dos casos

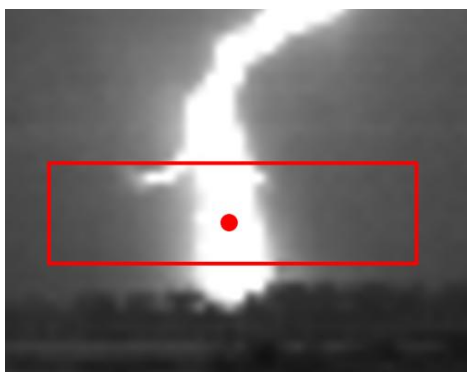
A base de dados utilizado neste trabalho possui um total de 1122 relâmpagos nuvem-solo, que foram gravados pelas câmeras de alta velocidade durante as quatro campanhas descritas no capítulo 4. A análise de todos os dados foi feita de forma manual, caso a caso. As gravações de todos os vídeos foram feitas utilizando o mesmo o tipo de câmera, com o mesmo modelo de lente e mesma configuração. Eliminando assim alguma influência do equipamento nos vídeos, porém, além do tipo de equipamento, é preciso considerar influências de variáveis externas, como a visibilidade do canal em relação a chuva, a saturação da imagem e ou a distância da descarga em relação a câmera. Quando foi identificado cortina de chuva visível ou saturação da imagem, os casos foram excluídos da análise. Uma maneira de minimizar a influência em relação a variação da distância, é considerar a análise caso a caso, onde a análise é feita comparando a luminosidade e o pico de corrente de todas as DR de um único relâmpago, que atingiram o mesmo canal. A identificação se a DR atingiu ou não o mesmo canal, foi feita através das imagens das câmeras. Para que a análise caso a caso tenha uma quantidade de pontos suficientes para avaliar a relação entre a luminosidade da DR e o pico de corrente, apenas os que casos que tinham ao menos 5 DRs detectadas pela rede de detecção, que atingiram o mesmo canal (identificado pelas imagens das câmeras) foram selecionados para serem analisados. Após analisar todos os dados, e selecionar apenas os que se encaixavam nos critérios estabelecidos, 66 relâmpagos nuvem-solo foram selecionados. Com isso, o próximo passo foi realizar dois testes para encontrar a metodologia ideal para extrair a luminosidade do canal para encontrar a relação com o pico de corrente. O valor de pico de corrente será utilizado em módulo em todas as análises, pois o que está sendo analisado é a intensidade do pico de corrente, independente da sua polaridade. Porém, como uns dos critérios de seleção foi escolher casos que

tivessem ao menos 5 DRs detectadas pelas redes de detecção e considerando que a maioria dos relâmpagos naturais nuvem-solo positivos tem em média apenas uma descarga de retorno (SABA, et al., 2010), todos os casos analisados neste trabalho são relâmpagos nuvem-solo negativo.

6.5. Teste 1 – método caso a caso com área fixa

Para encontrar a metodologia ideal para realizar a extração do dado de luminosidade que melhor se relaciona ao pico de corrente, foram considerados casos isolados, onde a maioria das limitações citadas anteriormente podem ser desprezadas. O primeiro teste da metodologia de extração da luminosidade foi utilizar o ponto de maior brilho na imagem (pixel) correspondente à DR. A Figura 6.5 mostra o ponto vermelho, que ilustra o ponto de maior intensidade luminosa do canal, naquele quadro. Essa técnica foi descartada, pois chegou-se à conclusão que apenas um ponto não representava adequadamente o fenômeno.

Figura 6.5 -Área fixa selecionada para medir a intensidade luminosa.

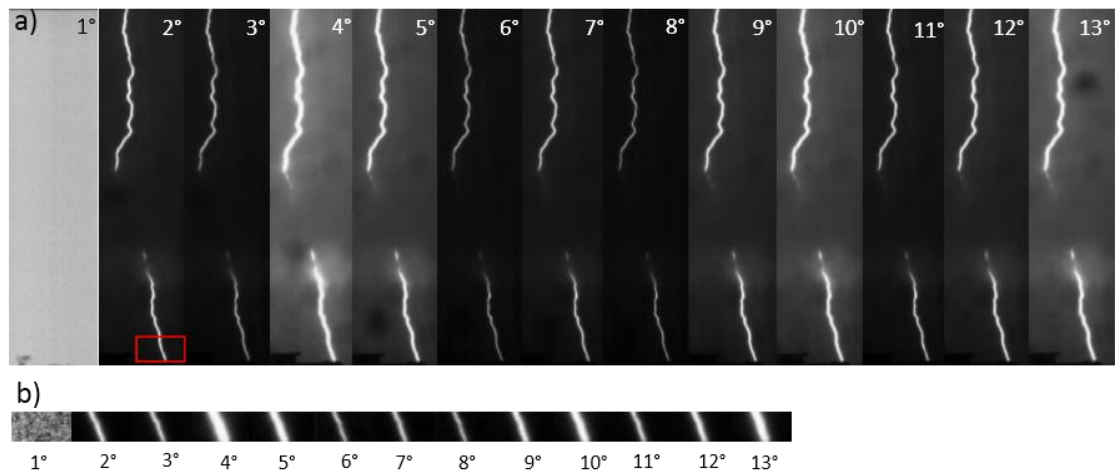


O ponto vermelho representa o primeiro teste que considerou apenas o pixel com luminosidade mais intensa da descarga de retorno foi utilizado na relação com o pico de corrente. O retângulo vermelho representa o segundo teste, onde a soma e a média da intensidade luminosa de todos os pixels contidos em uma área fixa (30x15) selecionada ao redor do canal foram utilizadas na relação com o pico de corrente.

Fonte: Adaptada de Campos (2012).

Após descartar a técnica que considerava como representativo da luminosidade o ponto de maior brilho, foi desenvolvida uma outra técnica para extrair a luminosidade do canal da DR. Essa técnica consiste em selecionar um retângulo em torno do canal, próximo do ponto de conexão no solo. Considerando a teoria para a radiação eletromagnética do canal do relâmpago, que foi descrita na sessão 2.2, e que os sensores das redes de detecção medem a propagação do campo elétrico irradiado pela descarga próximo à base do canal. Além disso, é possível verificar na Figura 6.5 que existem alguns fenômenos ópticos envolvidos na luminosidade emitida pela DR, como o efeito chamado “blooming”. Esse efeito é bastante conhecido em óptica e se refere ao espalhamento da luminosidade de um objeto além de suas bordas quando o objeto emite uma luz muito intensa. No caso da imagem da DR que foi registrada pela câmera de alta velocidade, esse fenômeno pode estar ligado a duas coisas: o tempo de integração de cada quadro da imagem ser muito grande e ou a intensidade da corrente. Como as DRs de cada vídeo possuem o mesmo tempo de integração, então a variação desse espalhamento luminoso está refletindo a intensidade da corrente. A Figura 6.6a mostra o exemplo de um relâmpago nuvem-solo negativo com treze DRs que foram registradas pela câmera de alta velocidade. O caso foi registrado no dia 16 de Junho de 2017, às 21:01:41 (UTC), na região de Washington, DC nos EUA. A Figura 6.3b mostra os retângulos selecionados com área 30 x 15 pixels que foram usados para extrair a média e a soma da intensidade luminosa relativa na base do canal das DRs desse relâmpago.

Figura 6.6 – Relâmpago registado dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC (Área Fixa)

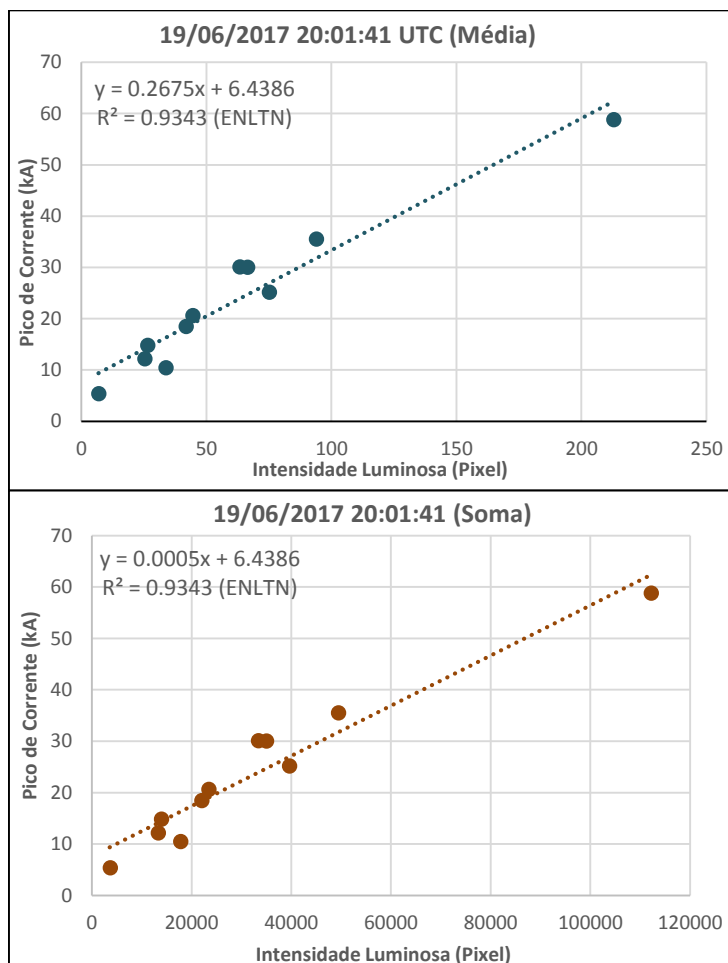


Exemplo de um relâmpago registado pela câmara de alta velocidade no dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC nos EUA. O retângulo vermelho no segundo quadro da Figura a) indica a área de 30x15 pixels selecionada para extrair a potência luminosa na base do canal de cada descarga de retorno. A Figura b) representa a área de 30x15 extraída de cada descarga de retorno.

Fonte: Produção do autor.

A partir do quadro do vídeo em que ocorreu a DR, selecionou-se um retângulo ao redor do canal da descarga de retorno do tamanho de 30 x 15, em unidade de pixel. Através de um algoritmo numérico, em linguagem IDL, extraiu-se a média e a soma da luminosidade de todos os pixels contidos no retângulo selecionado, como mostrado pelo retângulo vermelho no segundo quadro da Figura 6.6a. O valor da média e da soma da intensidade luminosa relativa dos pixels desse retângulo foi comparada com o valor do pico de corrente da descarga de retorno fornecido pelas redes locais de detecção de relâmpagos, como mostra os gráficos da Figura 6.7.

Figura 6.7 – Potência luminosa x pico de corrente (área fixa 30x15)



Gráficos de dispersão da média (primeiro) e da soma (segundo) da potência luminosa, em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu no dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC, nos EUA. Neste caso a câmera registrou treze descargas de retorno, mas onze delas foram detectadas pela rede ENLTN.

Fonte: Produção do autor.

6.6. Teste 2 – método caso a caso com fotogrametria

Considerando uma DR com uma corrente fixa, o espalhamento de sua luminosidade será aproximadamente constante. Quando observamos essa mesma descarga a distâncias diferentes, o efeito visual da luminosidade será diferente, menor a cada vez que a descarga é visualizada mais longe. Dessa

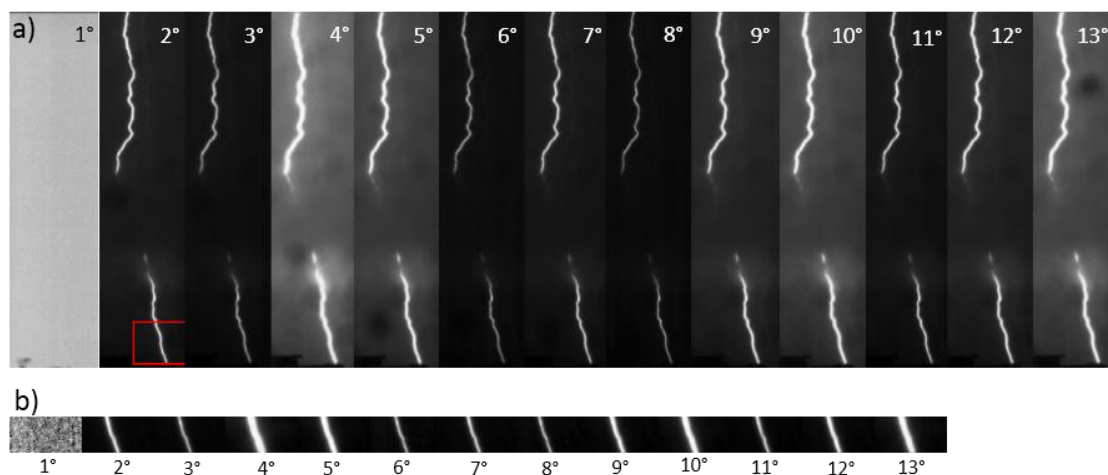
forma, ao integrar todos os pixels contidos em uma janela fixa de 15 x 30 pixels, estamos integrando cada vez mais porções de fundo conforme a DR é observada mais longe da câmera. O objetivo desta próxima análise foi utilizar uma janela de tamanho fixo em metros, para minimizar esse possível problema.

O segundo teste foi feito aplicando uma técnica de fotogrametria nas imagens registradas pelas câmeras para estabelecer a razão do tamanho que cada pixel equivale em metros (pixel/m) para cada caso, dependendo da localização de cada descarga. Para realizar a fotogrametria foi utilizado a localização da câmera, que era conhecida, e a distância média das DRs de cada relâmpago, cuja a localização foi estimada pela rede de detecção. A relação pixel/m variou aproximadamente entre 1 e 40 metros de acordo com a distância de cada caso em relação a posição da câmera que registrou a descarga. Considerando essa variação e a relação pixel por metro em cada caso, foi escolhido uma extensão horizontal fixa de 150m e vertical de 75m aproximadamente. Com isso, o tamanho da janela selecionada para extrair a luminosidade na base do canal do relâmpago variou entre 4x2, para os casos mais próximos, e 150x70 para casos mais distantes. Assim como foi feito no teste com janelas fixas, para o teste com fotogrametria também foram extraídos os valores médios e a soma de todos os pixels contidos na área selecionada na base do canal.

Utilizando o mesmo exemplo apresentado para o teste com áreas fixas, o relâmpago nuvem-solo que foi registrado no dia 16 de Junho de 2017, às 21:01:41 (UTC), na região de Washington, DC nos EUA, também como exemplo da fotogrametria, como mostra a Figura 6.8. De acordo com a localização das DRs, dadas pela rede local ENLTDN, a distância média entre as DRs e a câmara de alta velocidade foi aproximadamente 4km. Aplicando a fotogrametria neste caso, foi encontrado a relação pixel por metro em que cada lado do pixel equivale, em média, a 2,86m. Considerando uma janela fixa com extensão horizontal de 150m e extensão vertical de 75m, a janela em número de pixels, selecionada para este caso, foi de 52 pixels na horizontal e 26 pixels

na vertical. O retângulo vermelho no segundo quadro da Figura 6.5a mostra a área selecionada na base do canal do relâmpago. A Figura 6.5b mostra as áreas selecionadas pela fotogrametria das treze DRs desse relâmpago. A Figura 6.9 apresenta os gráficos de dispersão da média e da soma da luminosidade das áreas selecionadas pela fotogrametria, respectivamente, em relação ao pico de corrente do relâmpago apresentado na Figura 6.8. Os gráficos de dispersão da luminosidade (fotogrametria) em relação ao pico de corrente mostram, assim como no exemplo com área fixa, que o valor do R^2 é mesmo para a média e a soma da luminosidade dos pixels contidos na área selecionada (52x26) na base do canal. Outro fator importante é que o valor do R^2 diminuiu para área selecionada através da fotogrametria, foi $R^2 = 0,9343$ para área fixa (Figura 6.7) e $R^2 = 0,8949$ para a área selecionada com fotogrametria (Figura 6,8).

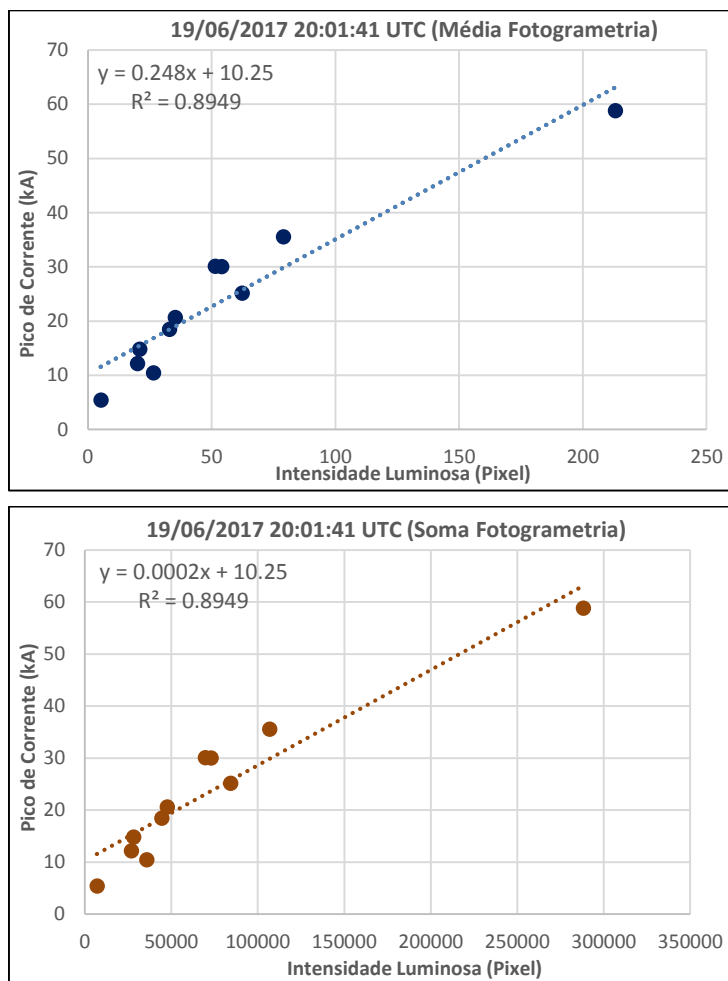
Figura 6.8 – Relâmpago registrado dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC (Fotogrametria)



Exemplo de um relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC nos EUA. O retângulo vermelho no segundo quadro da Figura a) indica a área de 52x26 pixels selecionada através da fotogrametria aplicada na imagem obtida pela câmera para extrair a potência luminosa na base do canal de cada descarga de retorno. A Figura b) representa a área de 52x26 extraída de cada descarga de retorno.

Fonte: Produção do autor

Figura 6.9 – Potência luminosa x pico de corrente (Fotogrametria com área 52x26)



Gráficos de dispersão da média (primeiro) e da soma (segundo) da potência luminosa, em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu no dia 16/06/2017 às 21:01:41 UTC, nos EUA. Neste caso a área (52x26) foi selecionada através da fotogrametria aplicada na imagem.

Fonte: Produção do autor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados encontrados da relação entre a luminosidade das DRs dos relâmpago nuvem-solo, registrados com câmera de alta velocidade, com pico de corrente, fornecido pelas redes locais de detecção de relâmpago. Os resultados da análise caso a caso para os dados coletados durante o verão de 2011/2012 serão apresentados em uma sessão separada dos resultados da análise dos dados das demais campanhas. Isso porque durante essa campanha, realizada no verão de 2011/2012, havia duas redes extras de detecção de relâmpagos operando na região. As redes disponíveis durante essa campanha eram a BrasilDAT que é a rede local que opera permanente na região, e as redes LINET e TLS200, que foram instaladas temporariamente na região, durante a realização do projeto CHUVA. Com isso, a análise dos dados coletados durante a realização dessa campanha considerou os dados das 3 redes de detecção disponíveis na época. Os resultados da análise realizada com cada rede de detecção foram comparados entre si para avaliar como os dados de instrumentos diferentes pode influenciar nos resultados. Além disso, os valores de pico de corrente foram considerados em módulo, não sendo discriminados como positivo ou negativo.

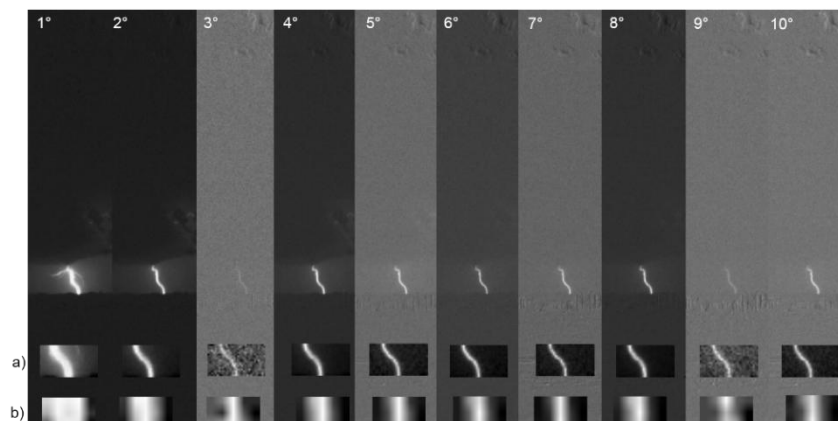
7.1. Campanha verão 2011/2012 (BrasilDAT, LINET e TLS200)

270 relâmpagos nuvem-solo foram registrados pelas câmeras de alta velocidade durante o verão de 2011/2012 e apenas 24 foram selecionados para serem analisados neste trabalho. A seleção dos dados foi feita seguindo os critérios descritos anteriormente na seção 6.4, além de se escolher casos com ao menos 5 descargas que utilizaram o mesmo canal e que foram detectadas por, pelo menos, umas das 3 redes de detecção. A multiplicidade média (número de descargas de retorno) dos relâmpagos nuvem-solo selecionados foi 10 e somaram ao todo 231 descargas de retorno. Os dados da distância entre as descargas de retorno e a câmera de alta velocidade, que foram utilizados na fotogrametria, foram calculados através da localização

média das DRs de cada relâmpago através da localização das descargas que foram detectadas pelas redes de detecção. O primeiro exemplo foi um relâmpago que ocorreu no dia 13 de março de 2012, às 18:25:00 UTC e que teve 11 DRs registradas pela câmera de alta velocidade. Das 11 DRs registradas pela câmera, 5 delas foram detectadas pelas redes LINET e TLS200 e 4 foram detectadas pela BrasilDAT. A relação entre o pico de corrente e a luminosidade para este caso apresentou um valor de R^2 considerado boa correlação (acima de $R^2 = 0,75$), utilizando os dois métodos (área fixa e fotogrametria). A Figura 7.1 mostra a sequência das 10 descargas registradas pela câmera, com a claridade de fundo já removida, as áreas de onde a luminosidade foi extraída pelo método de área fixa, com janela de 30x15 pixels (fileira a) e a janela selecionada pelo método da fotogrametria (fileira b), que para este caso teve razão pixel/m de aproximadamente 32m/pixel. Considerando a extensão horizontal e vertical fixa em metros de 150x75 metros, que foi estabelecida na metodologia de análise deste trabalho, então a janela selecionada, em pixel, para este caso foi de 5x3.

As Figuras 7.2 e 7.3 apresentam os gráficos de dispersão da média da luminosidade em relação ao pico de corrente das DRs do relâmpago da Figura 7.1, para área fixa e para fotogrametria, respectivamente. Os gráficos apresentam 3 valores de pico de corrente das descargas que foram detectadas pelas redes BrasilDAT, LINET e TLS200. O R^2 para área fixa, variou entre 0,83 com a rede BrasilDAT e 0,92 com a rede TLS200 e para fotogrametria variou entre 0,79 com a BrasilDAT e 0,82 com a rede TSL200. Neste caso é preciso considerar que a relação com os dados da BrasilDAT tinha um ponto a menos e isso pode ter influenciado no resultado de R^2 , que foi um pouco mais baixo em relação as outras redes.

Figura 7.1 – Caso 13 de março de 2012, 18:25 00 UTC (área fixa e fotogrametria)



Primeiro exemplo, correlação boa, campanha 2011/2012. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 10 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (5x3).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.2 – Luminosidade x pico de corrente 13/03/2012 18:25:00 UTC (Fixa)

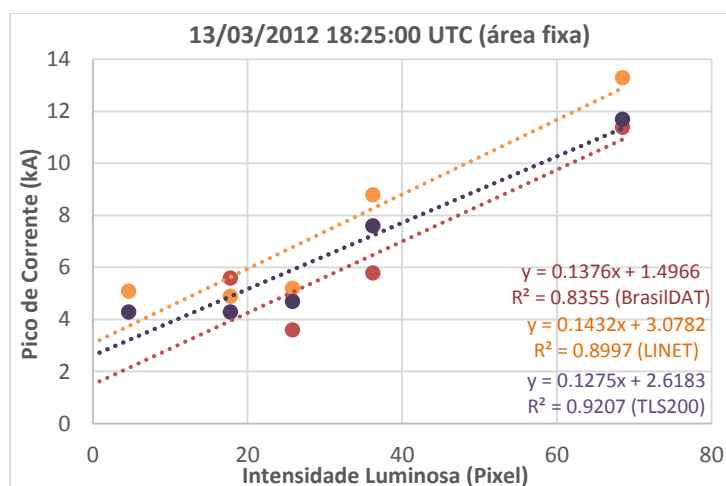


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 13/03/2012 às 18:25:00 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa, em relação ao pico de corrente da BrasilDAT (vermelho), LINET (laranja) e TLS200 (roxo).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.3 – Luminosidade x pico de corrente 13/03/2012 18:25:00 UTC (Fotogrametria)

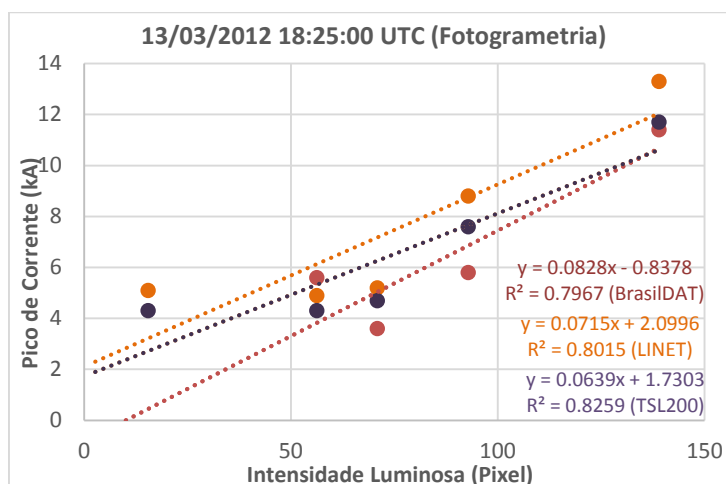


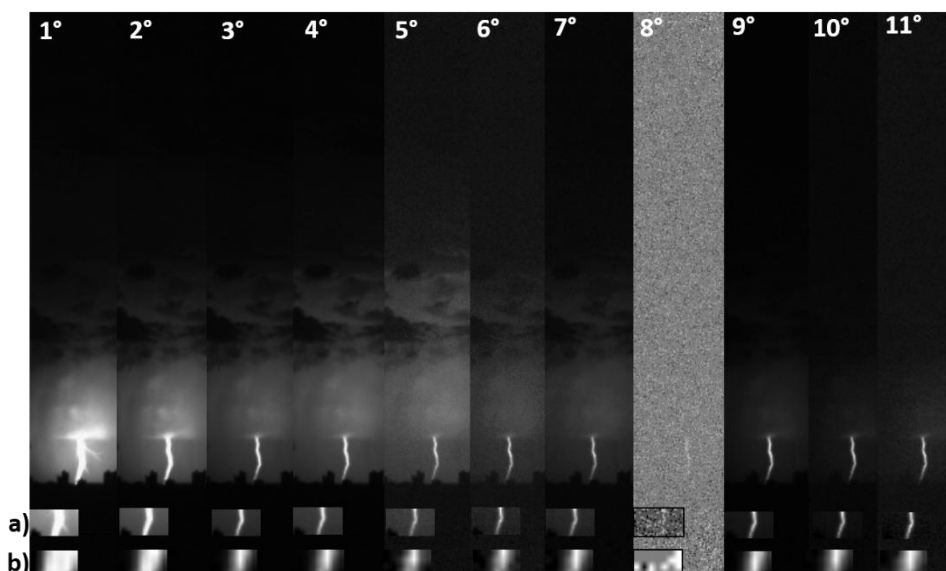
Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 13/03/2012 às 18:25:00 UTC, com luminosidade extraída pelo método de fotogrametria, em relação ao pico de corrente da BrasilDAT (vermelho), LINET (laranja) e TLS200 (roxo).

Fonte: Produção do autor

Ao observar a Figura 7.1 é possível perceber que algumas descargas apresentam uma intensidade luminosa muito baixa. A terceira, quinta, sétima, nona e décima descarga de retorno são as descargas visivelmente menos luminosas e a maioria delas não foram detectadas por nenhuma das redes locais de detecção. Das descargas com intensidade luminosa mais fraca, apenas a sétima DR foi detectada pelas redes LINET e TLS200. Os gráficos de dispersão das figuras 7.2 e 7.3 mostram que os valores de pico de corrente das descargas de retorno desse relâmpago, que foram calculados pelas 3 redes, foram todos menores que 14kA, com média aproximado de 7kA. Mesmo este caso apresentando pico de corrente relativamente baixo (calculado pelas 3 redes) e conseqüentemente, intensidade luminosa baixa, a correlação entre a luminosidade e o pico de corrente foi alta, com $R^2 \cong 90$ para o método de área fixa e $R^2 \cong 80$ para o método da fotogrametria

O segundo exemplo (Figura 7.4), mostra a sequência de imagens das 11 DRs que foram registradas pela câmera de alta velocidade no dia 2 de março de 2012, às 21:22:48 UTC. A sequência de quadros da linha a) mostram a área selecionada pelo método de área fixa de cada DR e a sequência de quadros da linha b) mostram a área selecionada pela fotogrametria (7X4). As Figuras 7.4 e 7.5 apresentam os gráficos de dispersão da correlação entre a luminosidade, extraída pelos dois métodos (área fixa e fotogrametria), respectivamente, e o pico de corrente das DRs. Este caso teve 7 DRs detectadas pela rede LINET e 5 detectadas pela rede BrasilDAT.

Figura 7.4 – Caso 2 de março de 2012, 21:22 48 UTC (área fixa e fotogrametria)



Segundo exemplo, correlação média, campanha 2011/2012. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 11 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (7x4).

Fonte: Produção do autor

Este caso apresentou valor de R^2 considerado baixo (abaixo de 0,50) para a correlação entre a luminosidade e o pico de corrente calculado pela BrasilDAT,

tanto para o método de área fixa ($R^2 = 0,25$) quanto para a fotogrametria ($R^2 = 0,18$). Já a correlação entre a luminosidade e o pico de corrente calculado pela LINET teve valor de R^2 considerado médio (acima de 0.50). O valor de R^2 foi muito próximo para do dos métodos, $R^2 = 0,52$ para método de área fixa e $R^2 = 0,51$ para o método da fotogrametria. O pico de corrente médio para as DRs desse relâmpago foi 29kA para a LINET e 27kA para a BrasilDAT, valores bem maiores do que o exemplo anterior que mesmo apresentando um pico de corrente médio baixo, apresentou uma boa correlação entre a luminosidade e o pico de corrente. Ao observar a sequência de imagens da Figura 7.4 é possível perceber uma irradiação difusa da luminosidade ao redor do canal do relâmpago, essa luz difusa pode ser um indicativo de espalhamento causado pela chuva, o que pode levar a uma baixa correlação, como encontrada para este caso. Além disso, semente a sexta, oitava e décima primeira DR não foram detectadas por nenhuma das redes, essas 3 DRs são as que apresentam intensidade luminosa visivelmente mais fracas.

Figura 7.5 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012 - 21:22:48 UTC (área fixa)

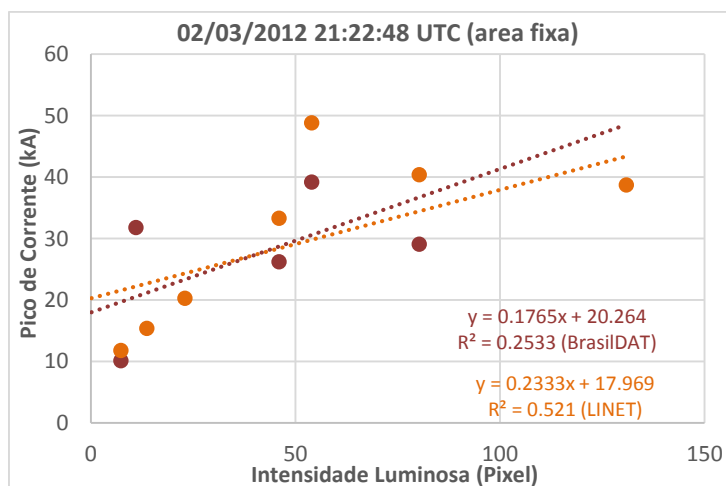


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 02/03/2012 às 21:22:48 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa, em relação ao pico de corrente da BrasilDAT (vermelho), LINET (laranja).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.6 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012 - 21:22:48 UTC (fotogrametria)

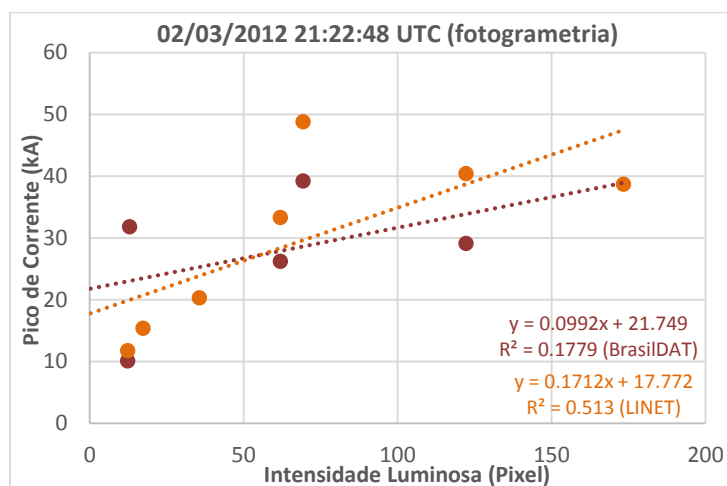


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 02/03/2012 às 21:22:48 UTC, com luminosidade extraída pelo método da fotogrametria, em relação ao pico de corrente da BrasilDAT (vermelho), LINET (laranja).

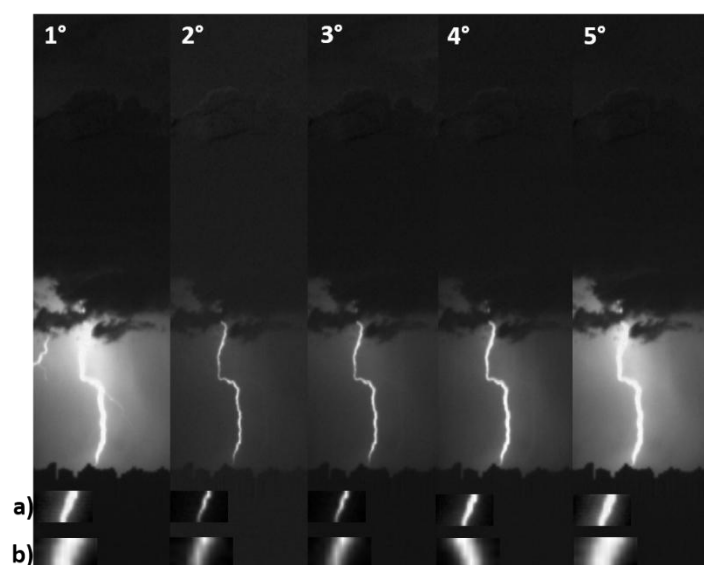
Fonte: Produção do autor

O terceiro exemplo, mostrado na Figura 7.7, apresenta a sequência de imagens de um relâmpago nuvem-solo com 5 DRs. O relâmpago foi registrado pela câmera de alta velocidade no dia 2 de março de 2012, às 20:52:13 UTC. A sequência de quadros da linha a) mostram a área selecionada pelo método de área fixa de cada uma das 5 DRs e a sequência de quadros da linha b) mostram a área selecionada pela fotogrametria (10X5). Todas as DRs desse relâmpago foram detectadas pela rede LINET, enquanto a BrasilDAT detectou 4 delas. As Figuras 7.8 e 7.9 apresentam os gráficos de dispersão da correlação entre a luminosidade, extraída pelos dois métodos, área fixa e fotogrametria, respectivamente, e o pico de corrente das DRs calculados pela rede LINET e pela rede BrasilDAT.

Esse terceiro exemplo apresentou uma correlação ruim para as duas redes (menor que 0,1), tanto para o método da área fixa, quanto para o método da fotogrametria. Assim como no segundo exemplo percebe-se uma irradiação

difusa da luminosidade ao redor do canal do relâmpago, porém nesse caso aparenta ser um pouco mais intensa. Mesmo tendo todas as DRs detectadas por uma das redes (LINET), a correlação entre a luminosidade e o pico de corrente foi muito baixa. O que indica que em casos onde existe esse espalhamento difuso da luz, possivelmente presença de chuva, não apresentará uma boa correlação.

Figura 7.7 – Caso 2 de março de 2012, 20:52:13 UTC (área fixa e fotogrametria)



Terceiro exemplo, correlação ruim, campanha 2011/2012. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 11 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (10x5).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.8 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012, 20:52:13 UTC (área fixa)

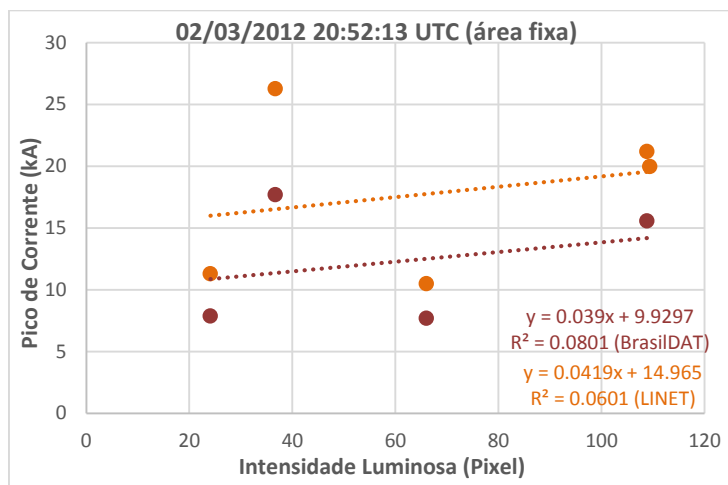


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 02/03/2012 às 20:52:13 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT (vermelho) e da rede LINET (laranja)

Fonte: Produção do autor

Figura 7.9 – Luminosidade x pico de corrente 02/03/2012, 20:52:13 UTC (fotogrametria)

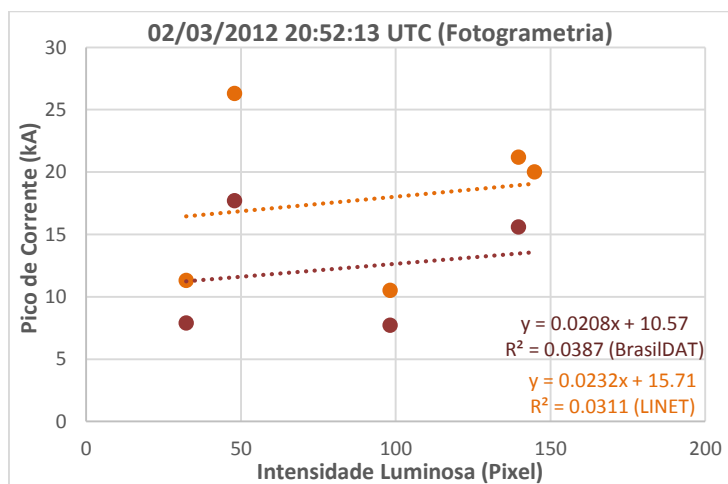
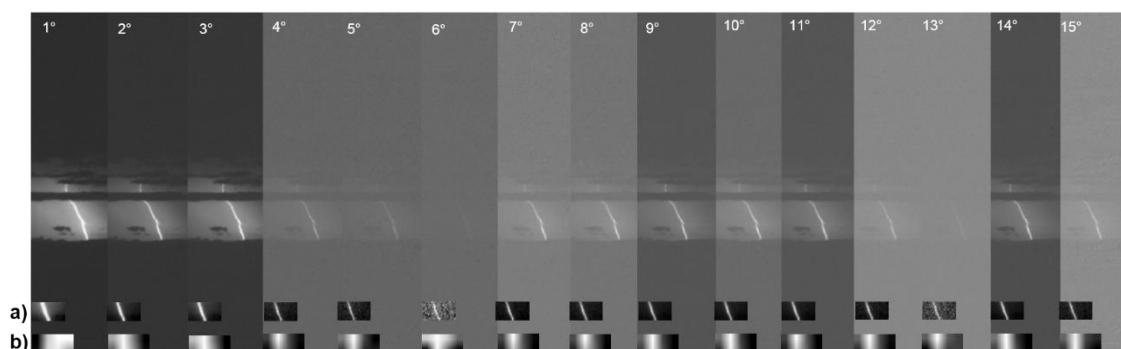


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 02/03/2012 às 20:52:13 UTC, com luminosidade extraída pelo método de fotogrametria em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT (vermelho) e da rede LINET (laranja).

Fonte: Produção do autor

A Figura 7.10 mostra um outro exemplo que apresentou correlação próxima de zero. O relâmpago nuvem-solo teve 15 descargas de retorno registradas pelas câmeras de alta velocidade e ocorreu no dia 13 de março de 2012 às 19:27:09 UTC. A Figura 9.2 mostra o gráfico de dispersão da luminosidade (extraída pelos dois métodos) em relação ao pico de corrente das 8 DRs detectadas pela rede LINET, a rede BrasilDAT detectou apenas 3 DRs desse relâmpago.

Figura 7.10 - Caso 13 de março de 2012, 19:27:09 UTC (área fixa e fotogrametria)



Exemplo caso ruim, luminosidade fraca. Relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade com 15 descargas de retorno. A sequência de imagem das 15 descargas já está com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (4x2).

Fonte: Produção do autor

A relação entre a luminosidade e pico de corrente para este caso é praticamente zero, os valores de R^2 para o método de área fixa é 0.006 e para fotogrametria é 0.008. Ao observar a Figura 7.10 é possível perceber que a luminosidade na maioria das descargas é baixa e conseqüentemente, os valores de pico de corrente, mostrados no gráfico de dispersão da Figura 9.2 também são baixos com pico de corrente médio de 6.6kA. Observando a sequência de imagens registradas pela câmera, não é possível identificar se existe uma cortina de chuva entre a câmera a o relâmpago, o que poderia explicar a correlação entre a luminosidade e o pico de corrente deste caso ter sido tão baixa.

Figura 7.11 – Gráfico de dispersão (luminosidade x pico de corrente) caso 13/03/2012, 18:32:14 UTC

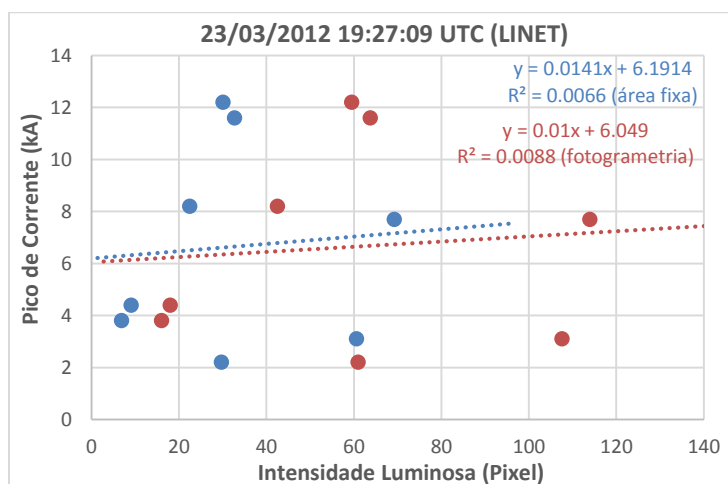


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 23/03/2012 às 19:27:09 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa (azul) e pelo método da fotogrametria (vermelho) em relação ao pico de corrente da rede LINET.

Fonte: Produção do autor

Embora a luminosidade seja fraca, é possível perceber a variação da intensidade luminosa, que não apresenta correlação com a variação do pico de corrente. Um fator que pode ter influenciado é a intensidade da radiação óptica diminuiu com o quadrado da distância da fonte, e que a distância média das descargas de retorno deste caso e a câmera foram 40km e devido a luminosidade registrada pela câmera ter sido muito fraca, não foi possível identificar a sua real intensidade. Outra questão a ser considerada é que a propagação da radiação eletromagnética, emitida pelas DRs pode ter influenciado negativamente no resultado do pico de corrente medido pelas redes, considerando que somente a LINET detectou a maioria das DRs e que a BrasilDAT detectou apenas 3 delas.

Na Tabela 7.1 é apresentado um resumo dos ajustes das relações luminosidade x corrente encontradas para todos os casos coletados no verão de 2011/2012 e selecionados para essa análise. Na tabela foram incluídos os valores de R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de área fixa e pelo método da fotogrametria e o pico de corrente das 3 redes disponíveis nessa campanha, além da área selecionada pela fotogrametria. Os valores destacados em vermelho representam os casos que tiveram uma relação considerada ruim (abaixo de $R^2=0,30$). As imagens e gráficos de distribuição de todos os casos apresentados na tabela encontram-se no Apêndice A, B e C, separados por nível de correlação (boa, média e ruim).

Tabela 7.1 – Resumo dos resultados campanha 2011/2012

Resumo dos resultados da campanha 201/2012							
Nº	R ² Área fixa (30x15)			R ² Fotogrametria			
	BrasildAT	LINET	TSL200	BrasildAT	LINET	TSL200	área x
1		0.9607			0.9578		4x2
2		0.8515	0.843		0.6546	0.4683	4x2
3	0.5622	0.7603		0.4157	0.8392		4x2
4	0.6089	0.76		0.3224	0.4409		4x2
5		0.0066			0.0088		4x2
6	0.8355	0.8997	0.9207	0.7967	0.8015	0.8259	5x3
7	0.8319	0.8134	0.7887	0.8127	0.7899	0.7607	5x3
8	0.9925	0.9173		0.7319	0.6745		5x3
9	0.2533	0.521		0.1779	0.513		7x4
10		0.7242			0.7159		8x4
11		0.3736			0.4398		8x4
12		0.6671			0.644		8x4
13	0.3406	0.5576		0.2754	0.5186		9x5
14	0.7807	0.6853	0.5588	0.8216	0.6418	0.5294	9x5
15	0.0801	0.0601		0.0387	0.0311		10x5
16	0.2241	0.7007	0.6975	0.0916	0.6693	0.6203	11x6
17	0.6558	0.7291		0.5759	0.7603		11x6
18		0.6496			0.6312		11x6
19		0.0753			0.0544		11x6
20	0.8055	0.6914	0.7099	0.7996	0.6917	0.7028	14x7
21	0.7509	0.6855		0.8626	0.6787		14x7
22	0.7796	0.8326		0.7719	0.8289		16x8
23	0.8066	0.8471		0.8031	0.8495		21x11
24		0.6647			0.6729		24x12

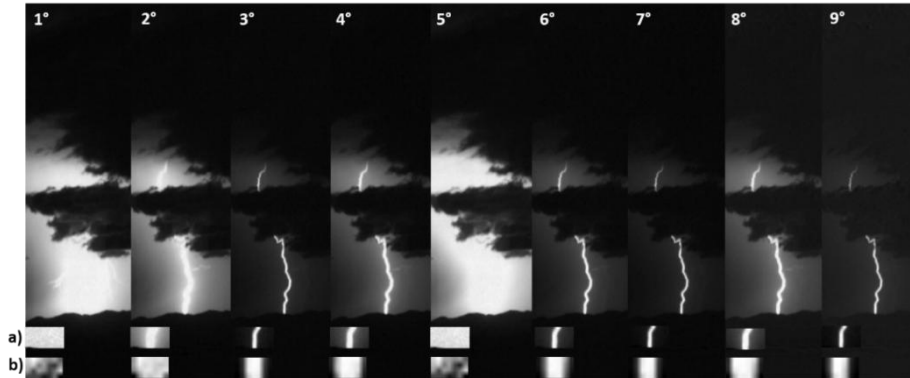
7.2. Resultados das demais campanhas (2012/2013, 2013/2014 e 2017)

Nesta sessão são apresentados os resultados das análises feitas com os dados coletados nas campanhas dos verões de 2012/2013 e 2013/2014, no Brasil, e do verão de 2017, nos EUA. Em todas essas campanhas foram utilizados apenas os dados uma rede de detecção local, a BrasildAT para os

dados do Brasil e a ENLTN para os dados dos EUA. Como mencionado na sessão 4.2, as duas redes utilizam sensores com tecnologia ENLTN, o que significa que as campanhas foram realizadas utilizando o mesmo tipo de instrumento. Ao todo 852 relâmpagos nuvem-solo foram registrados pelas câmeras de alta velocidade durante as 3 campanhas, porém apenas 42 foram selecionados para análise. A multiplicidade média dos relâmpagos selecionados é 10,3 e somam ao todo 433 descargas de retorno. Assim como na análise dos dados da campanha de 2011/2012, os dados da distância entre as descargas de retorno e a câmera de alta velocidade, que foram utilizados na fotogrametria, foram calculados através da localização média das DRs de cada relâmpago através da localização dada pelas redes de detecção.

Novamente o primeiro exemplo é um caso considerado bom, que teve uma correlação entre a luminosidade e o pico de corrente de aproximadamente 0.97 para área fixa e 0.96 para fotogrametria. O relâmpago nuvem-solo que ocorreu no dia 17 de fevereiro de 2013, às 18:56:07 UTC, teve nove DRs registradas pela câmera de alta velocidade, das quais 6 foram detectadas pela BrasilDAT. A Figura 7.12 mostra a sequência de imagens das descargas já com a claridade de fundo removida; na fileira a) tem-se as áreas de onde a luminosidade foi extraída pelo método de área fixa (30x15) e na fileira b), a janela selecionada pelo método da fotogrametria (7x4). A Figura 7.13 mostra o gráfico de dispersão entre o pico de corrente e as luminosidades extraídas pelos dois métodos (área fixa e fotogrametria). Neste caso, apenas a terceira, a sétima e a oitava descarga não foram detectadas pela rede. Como mencionado anteriormente o efeito “blooming” das DRs, que estão relacionados ao espalhamento da luminosidade de um objeto além de suas bordas, está relacionado com a intensidade da corrente. Ao observar a sequência de imagens da Figura 7.12 é possível perceber que a primeira e a quinta descarga apresentam um espalhamento da luminosidade muito maior que as demais, essas duas descargas conseqüentemente, são as que tem o maior pico de corrente, 43kA e 39kA, respectivamente.

Figura 7.12 - Caso 17 de fevereiro de 2013, 18:56:07 UTC (área fixa e fotogrametria)



Primeiro exemplo, correlação boa, rede BrasilDAT, campanha 2012/2013. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 9 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (7x4).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.13 – Luminosidade x pico de corrente 17/02/2013, 18:56:07 UTC (área fixa e fotogrametria)

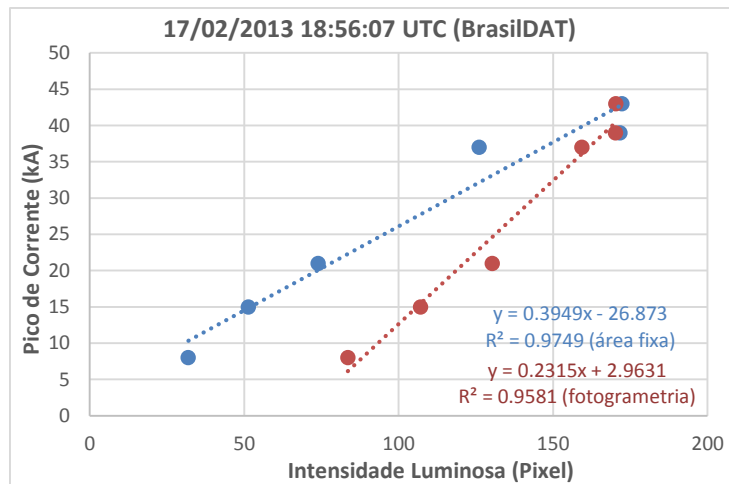
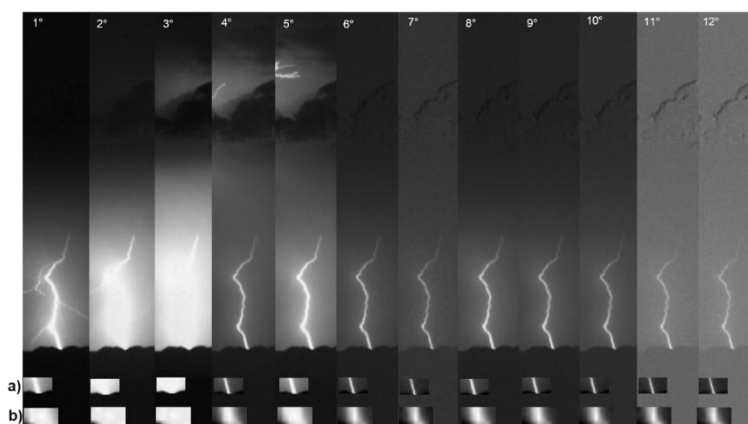


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 17/02/2013 às 18:56:07 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa (azul) e pelo método da fotogrametria (vermelho) em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT.

Fonte: Produção do autor

O Segundo exemplo, mostrado na Figura 7.14, apresenta um relâmpago nuvem-solo que teve uma correlação média entre a luminosidade e o pico de corrente. O relâmpago nuvem-solo ocorreu dia 17 de fevereiro de 2013, às 19:06:45 UTC e teve 12 DRs registradas pela câmera de alta velocidade. Assim como nos outros exemplos, a claridade de fundo foi removida e a sequência de quadros da fileira a) representa a área selecionada pelo método de área fixa e a sequência de quadros da fileira b) representa a área selecionada pela fotogrametria, que neste caso foi 7x4. A Figura 7.15 mostra o gráfico de dispersão para luminosidade extraída pelos dois métodos (área fixa e fotogrametria) em relação ao pico de corrente fornecido pela rede BrasilDAT para as 9 DRs que foram detectados pela rede de detecção e o R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de área fixa e o pico de corrente foi 0,32, já o R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de fotogrametria e o pico de corrente foi um pouco maior, 0,55.

Figura 7.14 - Caso 17 de fevereiro de 2013, 19:06:45 UTC (área fixa e fotogrametria)



Primeiro exemplo, correlação média, rede BrasilDAT, campanha 2012/2013. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 12 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (7x4).

Fonte: Produção do autor

Figura 7.15 – Luminosidade versus pico de corrente 17/02/2013, 19:06:45 UTC

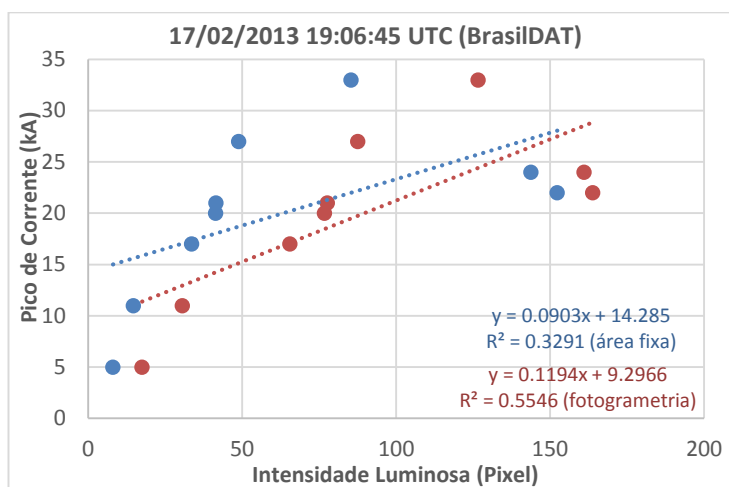


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 17/02/2013 às 19:06:45 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa (azul) e pelo método da fotogrametria (vermelho) em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT.

Fonte: Produção do autor

Ao observar a sequência de imagens da Figura 7.14 é possível perceber que luminosidade da segunda e a terceira DR aparentam estar saturando a imagem, apesar dos valores do pixel não estarem saturados. Além disso, neste caso essas duas descargas não foram as que tiveram o maior pico de corrente. A DR que teve o maior pico de corrente calculado pela BrasilDAT, foi a quinta DR com 33kA e a primeira não foi detectada. O pico de corrente da segunda descarga foi 22kA e para a terceira 22kA. Se essas duas descargas, que aparentam estar saturados forem excluídas da análise, o valor de R^2 da correlação entre a luminosidade e o pico de corrente das DRs restantes passa a ser 0,93 para área fixa e 0,97 para área selecionada pela fotogrametria, como mostra a Figura 7.16.

Figura 7.16 – Luminosidade versus pico de corrente 17/02/2013, 19:06:45 UTC (sem a 2° e a 3° Descarga de Retorno)

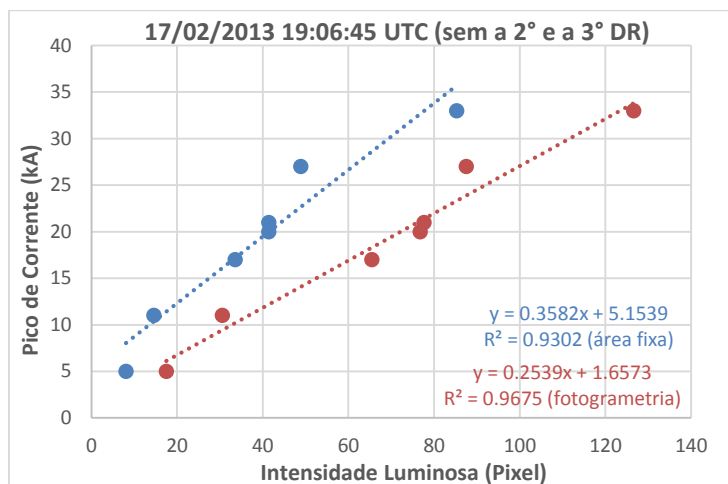
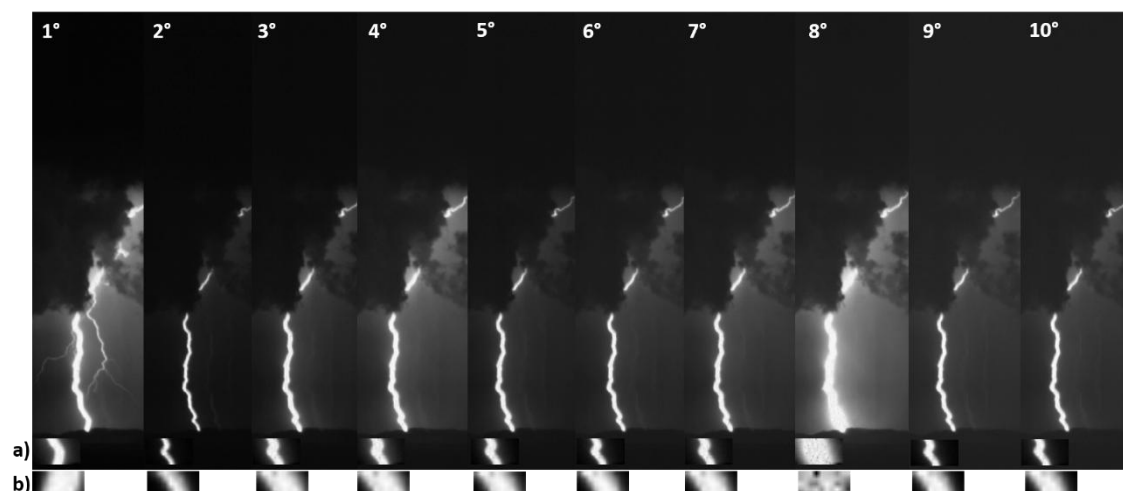


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 17/02/2013 às 19:06:45 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa (azul) e pelo método da fotogrametria (vermelho) em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT, excluindo a 2° e a 3° que aparentavam estar com imagem saturada.

Fonte: Produção do autor

O Terceiro e último exemplo dessa sessão é um relâmpago nuvem-solo que teve uma correlação entre a luminosidade e o pico de corrente ruim. O relâmpago nuvem-solo ocorreu dia 11 de fevereiro de 2013, às 20:18:23 UTC e teve 10 DRs registradas pela câmera de alta velocidade (Figura 7.17). As claridades de fundo das imagens já foram removidas e a sequência de quadros da fileira a) representa a área selecionada pelo método de área fixa e a sequência de quadros da fileira b) representa a área selecionada pela fotogrametria (10x5). A Figura 7.18 mostra o gráfico de dispersão para luminosidade extraída pelos dois métodos (área fixa e fotogrametria) em relação ao pico de corrente fornecido pela rede BrasilDAT que detectou apenas 5 DRs. O valor de R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de área fixa e o pico de corrente foi 0,08 e o valor de R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de fotogrametria e o pico de corrente foi 0,09.

Figura 7.17. - Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:18:23 UTC (área fixa e fotogrametria)



Terceiro exemplo, correlação ruim, rede BrasilDAT, campanha 2012/2013. Relâmpago nuvem-solo registrado pela câmera de alta velocidade com 10 descargas de retorno. As sequências de imagem já estão com a claridade de fundo removida. A fileira de quadros indicados pela letra a) representa a janela selecionada pelo método de área fixa (30x15), já a fileira quadros b) representa a janela selecionada com base na fotogrametria (10x5).

Fonte: Produção do autor

Aparentemente, esse caso não tem explicações muito claras do porque ele apresentou uma correlação tão baixa. Porém, é possível perceber a presença de uma irradiação difusa da luminosidade ao redor do canal do relâmpago, mas ela não é tão intensa, o que pode representar a presença de uma cortina de chuva fraca entre a câmera e o canal da DR. Outra questão que pode ser considerada, é que tenha ocorrido algum erro no cálculo do pico de corrente das DRs desse relâmpago, mas como não se tem dados de outra rede para comparação, não é possível ter certeza. Outro fator que pode ter influenciado para esse resultado ruim, é a morfologia do canal, como na imagem só temos a informação em duas dimensões, não é possível saber a inclinação do canal na terceira dimensão, caso o canal tenha uma curvatura muito grande para trás, por exemplo, pode influenciar na intensidade luminosa que é registrada pela câmera.

Figura 7.18 – Luminosidade versus pico de corrente 11/02/2013 20:18:23 UTC

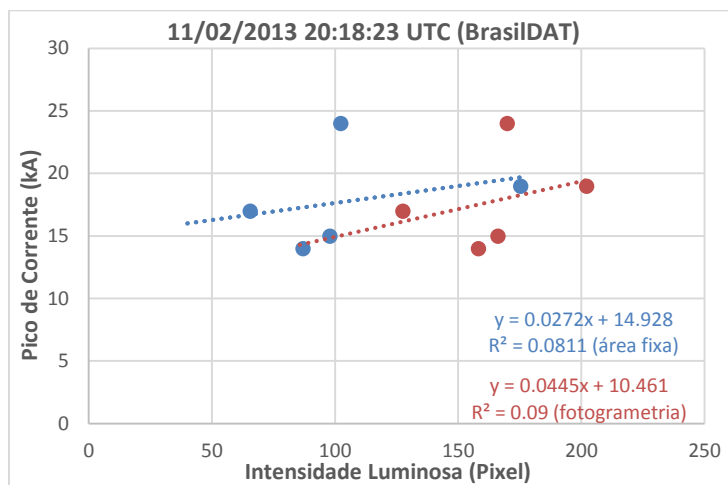


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 11/02/2013 às 20:18:23 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa (azul) e pelo método da fotogrametria (vermelho) em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT.

Fonte: Produção do autor

A Tabela 7.2 apresenta um resumo dos resultados das análises dos dados coletados nas campanhas realizadas no verão de 2012/2013 e 2013/2014 no Brasil e no verão de 2017 nos EUA. Os resultados apresentados na tabela incluem o valor de R^2 da relação entre a luminosidade extraída pelo método de área fixa e pelo método da fotogrametria, o pico de corrente das redes BrasilDAT (para dados do Brasil) e NLTN (para dados dos EUA) e também a área selecionada através da fotogrametria. Os valores destacados em vermelho representam os casos considerados ruins. As imagens e gráficos de distribuição de todos os casos apresentados na Tabela 7.2 são apresentados nos apêndices D, E e F, separados por correlação boa, média e ruim, respectivamente.

Tabela 7.2 – Resumo dos resultados campanhas 2012/2013 e 2013/2014 (Brasil) e campanha 2017 (EUA)

Resumo resultado de R ² para as demais campanhas (2012/2012, 2013/2014 e 2017)			
Nº	BrasilDAT (área fixa)	BrasilDAT (Fotogrametria)	área
1	0,92	0,8302	4x2
2	0,7333	0,2814	4x2
3	0,8228	0,758	5x3
4	0,649	0,8426	5x3
5	0,67	0,25	5x3
6	0,44	0,31	5x3
7	0,2093	0,2338	5x3
8	0,8904	0,8562	6x3
9	0,74	0,38	6x3
10	0,6535	0,8636	7x4
11	0,9074	0,9826	7x4
12	0,7647	0,8801	7x4
13	0,9749	0,9581	7x4
14	0,9628	0,8517	7x4
15	0,3291	0,5546	7x4
16	0,4226	0,5062	7x4
17	0,028	0,1032	7x4
18	0,1046	0,1258	7x4
19	0,8533	0,8542	8x4
20	0,2611	0,322	8x4
21	0,78	0,6708	8x4
22	0,0397	0,0646	9x5
23	0,0002	0,0107	9x5
24	0,48858	0,4608	9x5
25	0,816	0,7284	10x5
26	0,47	0,61	10x5
27	0,844	0,6213	10x5
28	0,0811	0,09	10x5
29	0,9448	0,9431	11x6
30	0,5804	0,5339	13x7
31	0,3455	0,4039	17x8
32	0,2141	0,0556	18x9
33	0,7479	0,7421	19x9
34	0,6133	0,5939	21x10
35	0,5894	0,561	23x12
36	0,1056	0,1063	27x14
37	0,3346	0,3332	29x15
38	0,0861	0,118	43x22
39	2,00E-09	0,0006	44x22
40	0,3329	0,3083	44x22
41	0,9343	0,8949	52x26
42	0,751	0,757	125x75

7.3. Comparação geral dos resultados

Conforme dito anteriormente, existem mais variáveis a se considerar ao tentar extrair a potência luminosa das câmeras, do que seria possível conseguir para realizar neste trabalho. Por conta de a luminosidade relativa não ser uma grandeza comparável entre vídeos, foi escolhida a análise caso a caso. Essa luminosidade relativa foi comparada com picos de corrente, e ajustes lineares proveram a relação entre as duas grandezas. Nesta seção, foram utilizados os

ajustes lineares de cada relâmpago nuvem-solo analisado para se estimar o pico de corrente. Ao transformar luminosidade relativa em pico de corrente torna-se possível a comparação entre todos os casos estudados.

O valor do pico de corrente estimado pela intensidade luminosa das DRs foi estimado caso a caso, para os métodos de área fixa e para o método da fotogrametria. Para os dados coletados na campanha de 2011/2012, que tinham as redes extras LINET e TSL200, o pico de corrente foi estimado individualmente para cada rede, a partir de suas equações da correlação. E para os dados coletados nas campanhas de 2012/2013, 2013/2014 e 2017, o pico de corrente foi estimado com base na equação da correlação com os dados da BrasilDAT. A equação utilizada para estimar o pico de corrente de cada DR foi a equação do gráfico de dispersão de cada caso, para os dois métodos e para cada rede de detecção. As Figuras 7.19 e 7.20 mostram os gráficos de dispersão para o pico de corrente estimado através da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa e da fotogrametria, em relação ao pico de corrente das redes locais de detecção, para todos os casos estudados neste trabalho. O valor de R^2 para o gráfico da Figura 7.19, que é referente a luminosidade extraída pelo método de área fixa (30x15), foi em média 0,77, considerando os valores de pico de corrente das redes de detecção. E o valor médio de R^2 para o gráfico da Figura 7.10, que é referente a luminosidade extraída pelo método da fotogrametria para cada caso, foi 0,73. Esses resultados mostram que no geral existe uma boa correlação entre a luminosidade extraída das imagens das câmeras para os dois métodos e esse resultado foi próximo do resultado obtido por Zhou et al., (2013) e Carvalho et al. (2015). Os dois trabalhos foram realizados com medida direta de corrente em relâmpagos induzidos por foguetes.

Figura 7.19 – Pico de corrente estimado (câmera) versus pico de corrente (redes) para método área fixa

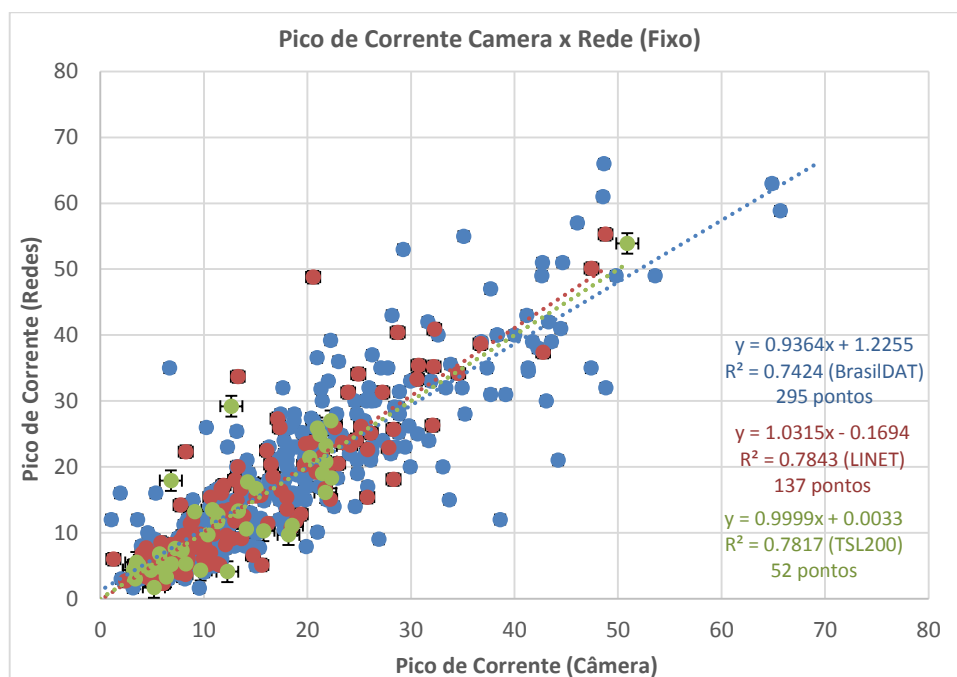


Gráfico de dispersão do pico de corrente estimado pela luminosidade das descargas de retorno, extraída das imagens das câmeras de alta velocidade pelo método de área fixa, em relação ao pico de corrente das redes BrasilDAT (azul), LINET (vermelho) e TSL200 (verde). Os casos que apresentaram correlação entre a luminosidade e pico de corrente foram excluídos.

Fonte: Produção do autor

Em Zhou et al. (2013) a luminosidade foi obtida através de uma câmera de alta velocidade, com resolução temporal de 5000 quadros por segundo, posicionada a 630m do ponto de impacto e encontraram que a luminosidade integrada das descargas está correlacionada com o valor logarítmico da corrente, tanto para pixels saturados ou não, porém na fase não saturada, a corrente do canal apresenta uma correlação linear com a raiz quadrada da luminosidade. Em Carvalho et al. (2015) as medições de luminosidade foram feitas através com um módulo de fotodiodo, fixo, posicionado a 293m do ponto de impacto da DR e encontraram que o coeficiente da correlação entre o pico de luminosidade e o pico de corrente com $R = 0,85$.

Figura 7.20 – Pico de corrente estimado (câmera) versus pico de corrente (redes) para método da fotogrametria

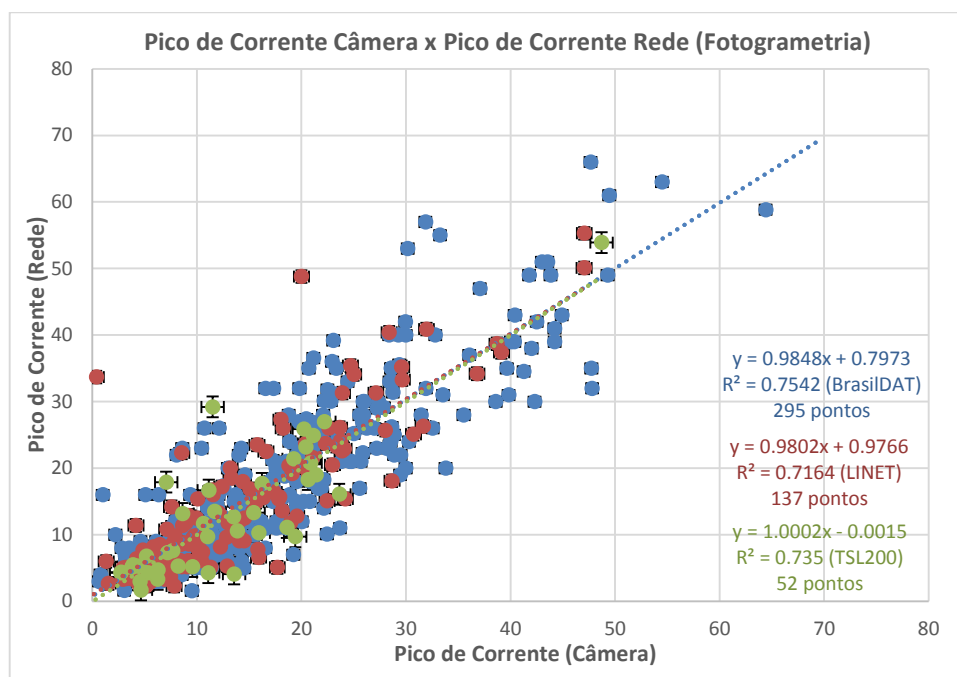


Gráfico de dispersão do pico de corrente estimado pela luminosidade das descargas de retorno, extraída das imagens das câmeras de alta velocidade pelo método da fotogrametria, em relação ao pico de corrente das redes BrasilDAT (azul), LINET (vermelho) e TSL200 (verde). Os casos que apresentaram correlação entre a luminosidade e pico de corrente foram excluídos.

Fonte: Produção do autor

8 ESTUDO DE CASO (ESTIMATIVA DA CORRENTE CONTÍNUA E DA CORRENTE DA PONTA DO LÍDER ESCALONADO)

Nesta sessão será apresentado dois estudos de caso da estimativa de corrente através da luminosidade, extraída de imagem de câmera rápida. O primeiro estudo de caso corresponde a estimativa da corrente contínua, da sexta DR, seguida de duas componentes-M, de um NS- que ocorreu no dia 02 de março de 2012, as 19:52:55 UTC, em São José dos Campos, Brasil. Esse caso teve 9 DRs registradas pela câmera de alta velocidade, sendo que 6 delas foi detectada pela rede LINET e 4 pela rede BrasilDAT, como mostra o gráfico da Figura 8.1 para área fixa. Neste caso, para evitar valores de pico de corrente estimados pela luminosidade apresentem alguns valores negativos, a linha de tendência teve intersecção definida no zero. Como a rede LINET detectou mais descargas, a estimativa de corrente contínua foi feita utilizando a equação do gráfico da rede LINET. A Figura 8.2 é apresentado a forma de onda da corrente contínua estimada pela luminosidade que foi extraída da câmera de alta velocidade, versus o tempo, a forma de onda da corrente inclui o pico de corrente da DR, seguida de duas componentes-M (M) e teve duração de 122 milissegundos.

Figura 8.1 – Luminosidade versus pico de corrente 02/03/2012 19:52:55 UTC

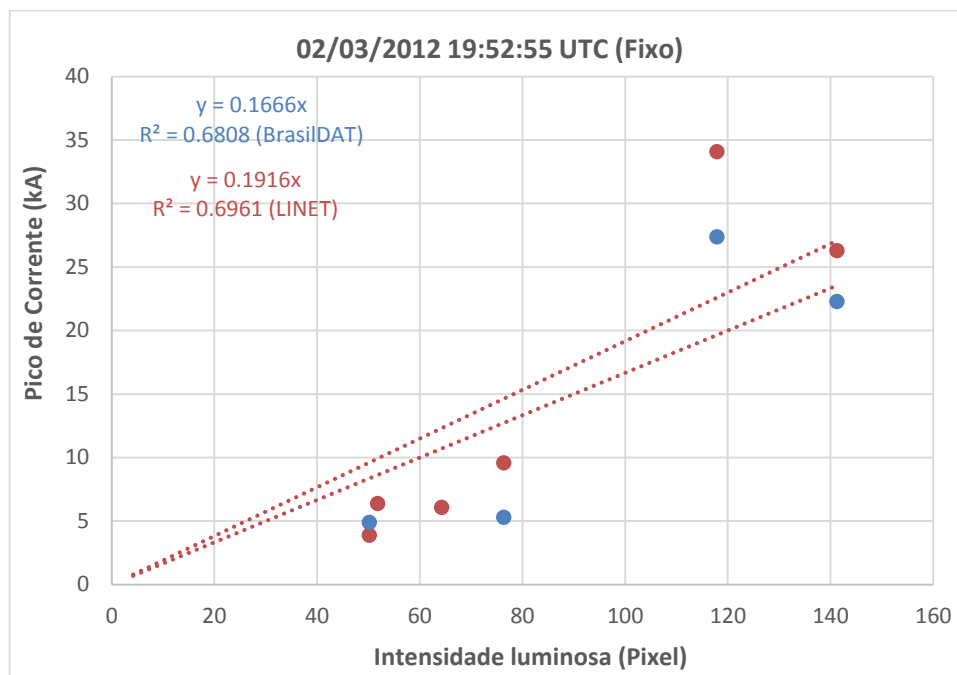
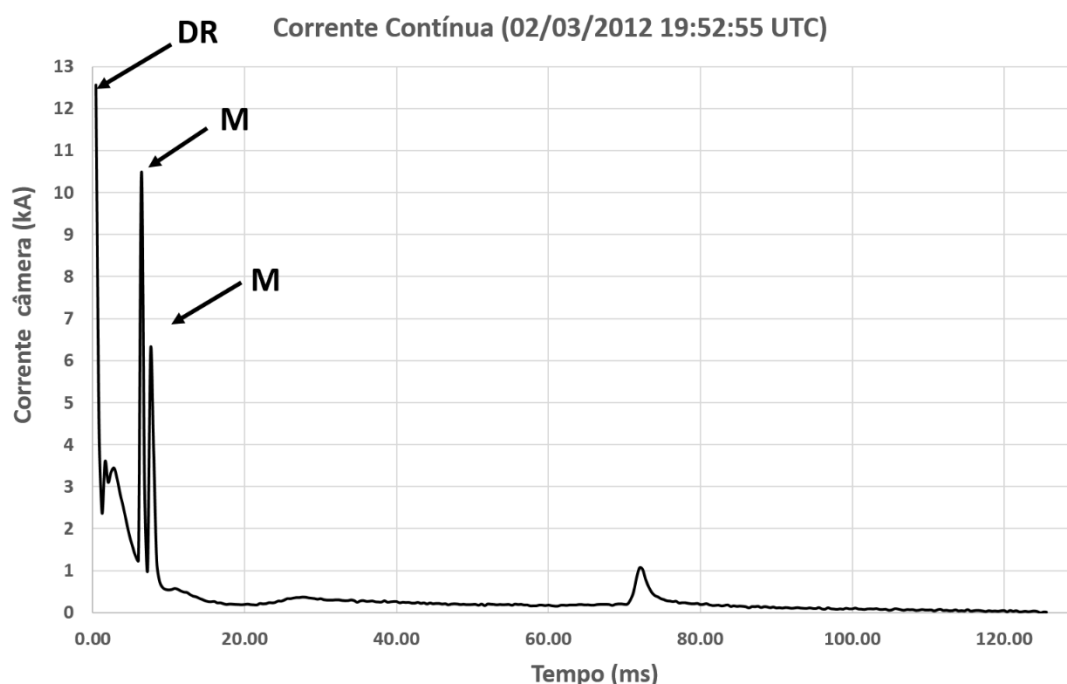


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 02/03/2012 às 19:52:55 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT (azul) e para rede LINET (vermelho)

Fonte: Produção do autor

Figura 8.2 - Forma de onda da corrente contínua, estudo de caso do relâmpago registrado em 02/03/2012 19:55:52 UTC.

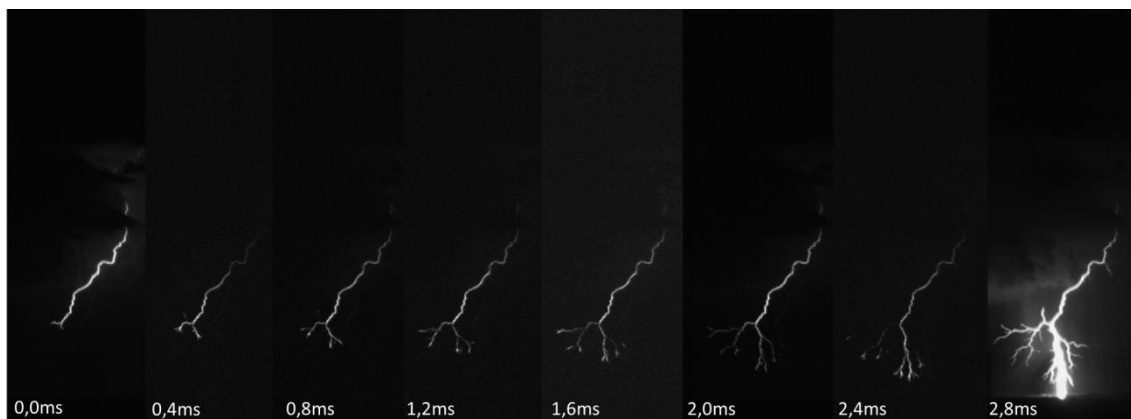


Forma de onda da corrente contínua da sexta DR, de um relâmpago nuvem-solo negativo que teve 9 descargas de retorno, estimada pela luminosidade que foi extraída da câmera de alta velocidade, versus o tempo. A forma de onda da corrente inclui o pico de corrente da DR, seguida de duas componentes-M (M) e teve duração de 122 milissegundos.

Fonte: Produção do autor.

O segundo estudo caso corresponde a evolução da corrente na ponta do líder escalonado e das suas ramificações, durante o seu desenvolvimento em direção ao solo, correspondente ao relâmpago que ocorreu no dia 11 de fevereiro de 2013, as 20:21:14 UTC, também em São José dos Campos, Brasil. A Figura 8.3 mostra a sequência de 8 imagens referentes ao desenvolvimento do líder escalonado da primeira descarga de retorno com duração de 2.8 milissegundos.

Figura 8.3 – Desenvolvimento do líder escalonado da primeira descarga de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu no dia 11/02/2013 às 20:21:14 UTC



Sequência de imagens do desenvolvimento do líder escalonado e suas ramificações da primeira descarga de retorno, registrada por uma câmera de alta velocidade.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 8.4 apresenta o gráfico de dispersão da luminosidade, extraída de imagens da câmera de alta velocidade, em função do pico de corrente, estimado pela rede BrasilDAT das dez DR que foram detectadas. Este caso teve quatorze DRs registrada pela câmera de alta velocidade. Assim como para o primeiro caso, a linha de tendência do gráfico teve intersecção definida no zero para evitar valores de pico de corrente estimado pela luminosidade sejam negativos. A estimativa da corrente na ponta do líder escalonado através da luminosidade foi feita utilizando a equação do gráfico apresentada na Figura 8.4.

Figura 8.4 – Luminosidade versus pico de corrente 11/02/2013 20:21:14 UTC

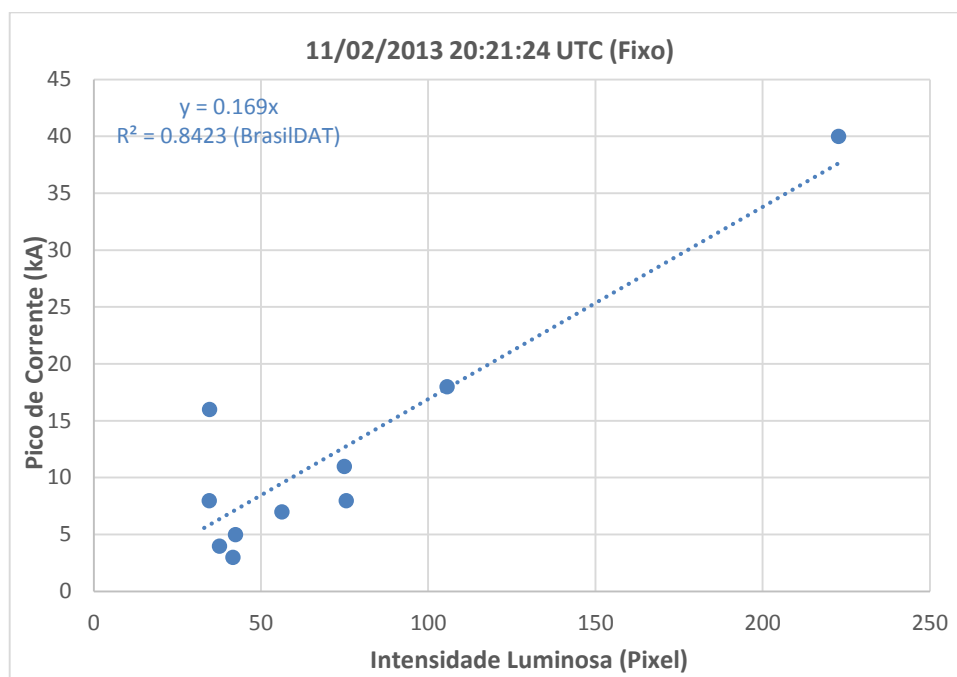


Gráfico de dispersão da luminosidade das descargas de retorno do relâmpago nuvem-solo, registrado no dia 11/02/2013 às 20:21:24 UTC, com luminosidade extraída pelo método de área fixa em relação ao pico de corrente da rede BrasilDAT.

Fonte: Produção do autor

A Figura 8.5 mostra a evolução da corrente na ponta das ramificações do líder escalonado durante o seu desenvolvimento, estimada através da luminosidade, extraída das imagens registradas com câmera rápida, apresentada na Figura 8.3. Ao observa o gráfico da a Figura 8.5 é possível perceber que a medida que o líder escalonado se ramifica, a corrente em cada ponta tende a diminuir até o instante 1,6 ms, em seguida o tronco que toca o solo passa a se desenvolver mais que os outros e a corrente volta a aumentar até que ocorre a DR.

Figura 8.5 – Evolução da corrente na ponta do líder escalonado em função do tempo.

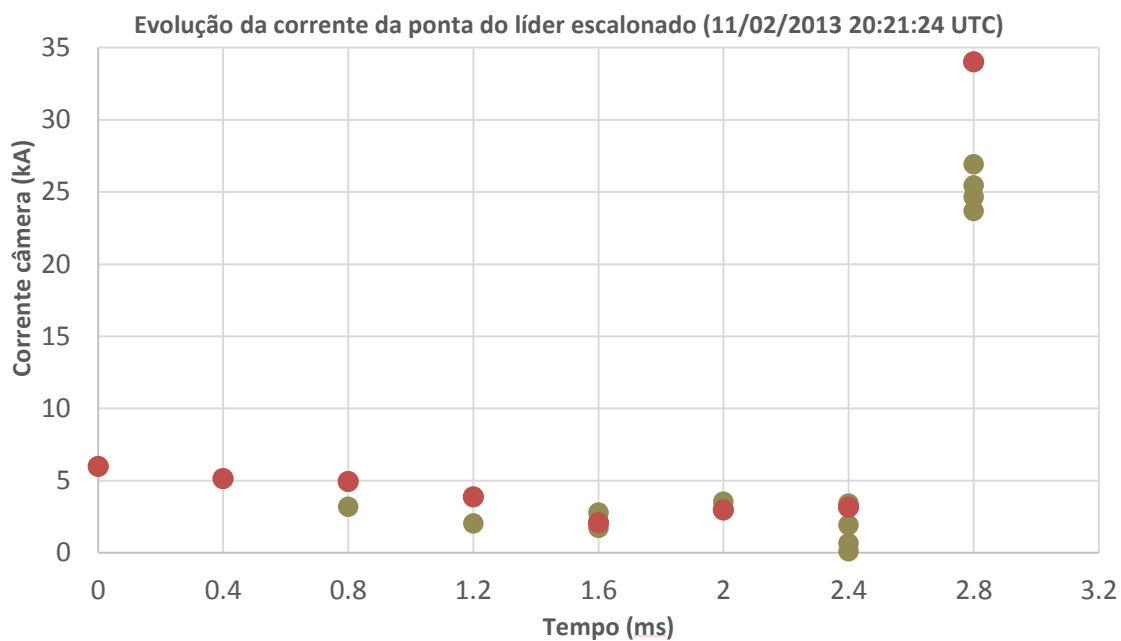


Gráfico da evolução da corrente na ponta do líder escalonado, estimada pela luminosidade, extraída de imagens de câmera de alta velocidade. Os pontos vermelhos são referentes ao troco que tocou o solo, os pontos amarelos são referentes as demais ramificações

Fonte: Produção do autor.

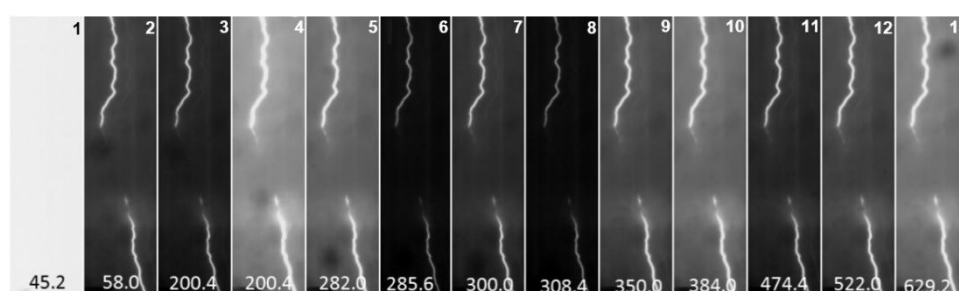
9 COMPARAÇÃO DOS DADOS DO GLM COM OS DADOS DE CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Durante a campanha de coleta de dados realizada em 2017, nos EUA, o GLM encontrava-se na posição não operacional e em fase de validação de dados. Dos 44 relâmpagos nuvem-solo registrados pelas câmeras de alta velocidade em College Park, MD nos EUA, 25 relâmpagos e 54 descargas de retorno individuais foram simultaneamente registrados pelo GLM. A identificação das DRs, que foram registradas pelas câmeras de alta velocidade e simultaneamente pelo GLM, foi feita através da comparação da localização e do tempo em que elas ocorreram. Para isso, os dados de localização das descargas que foram registradas pelas câmeras e detectadas pela rede local ENLTN, foram plotados junto com os dados do GLM que foram registrados na mesma região e intervalo de tempo em que os relâmpagos registrados pela câmera. Com isso foi possível identificar o conjunto de dados do GLM que poderia corresponder aos mesmos casos registrados pelas câmeras. Assim como as câmeras de alta velocidade, o GLM também é um instrumento óptico que registra a emissão luminosa das descargas dos relâmpagos, e tem resolução temporal de 2ms. A vantagem de comparar os dados de relâmpagos NS registrados pelas câmeras de alta velocidade, com os dados de luminosidade, vistos no topo das nuvens pelo GLM, é que a câmera nos permite ter certeza de que a descarga é NS, além de poder identifica-las individualmente. Com isso é possível analisar o que é visto pelo GLM a cada DR e se existe alguma correlação entre a radiância visível no topo das nuvens e o pico de corrente das descargas, assim como relação entre a luminosidade das DRs, vistas pela câmera, e o pico de corrente, medidos pelas redes de detecção, estudada neste trabalho.

Os quatro relâmpagos nuvem-solo que foram selecionados para a análise da correlação entre a luminosidade das DRS e o pico de corrente para este trabalho, também serão os casos analisados nessa sessão. O primeiro caso é o relâmpago NS negativo, que foi registrado às 20:01:41 UTC no dia 19 de

junho de 2017, onde 13 DRs foram registradas pela câmera de alta velocidade (Figura 9.1) e 11 delas foram detectadas pela rede de detecção local ENLTN. A Tabela 9.1 mostra a o instante, em que cada DR foi registrado pela câmera e também o pico de corrente das DR que foram detectadas pela rede ENLTN. Na comparação dos dados da câmera com os dados do GLM, foi identificado que apenas 2 DR foram registradas simultaneamente pelos dois instrumentos, sendo uma delas a primeira e a outra, a quarta DR.

Figura 9.1 – Relâmpago ocorrido em 19/06/2017 as 20:01:41 UTC nos EUA.



Treze descargas de retorno de uma relâmpago nuvem-solo negativo registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19 de Junho de 2017 em College Park, MD, EUA. O tempo em milissegundos em cada imagem representa o tempo após o início do desenvolvimento do canal da primeira descarga de retorno (20:01:41,559996 UTC).

Fonte: Produção do autor

Tabela 9.1 – Relâmpago ocorrido em 19/06/2017 as 20:01:41 UTC nos EUA.

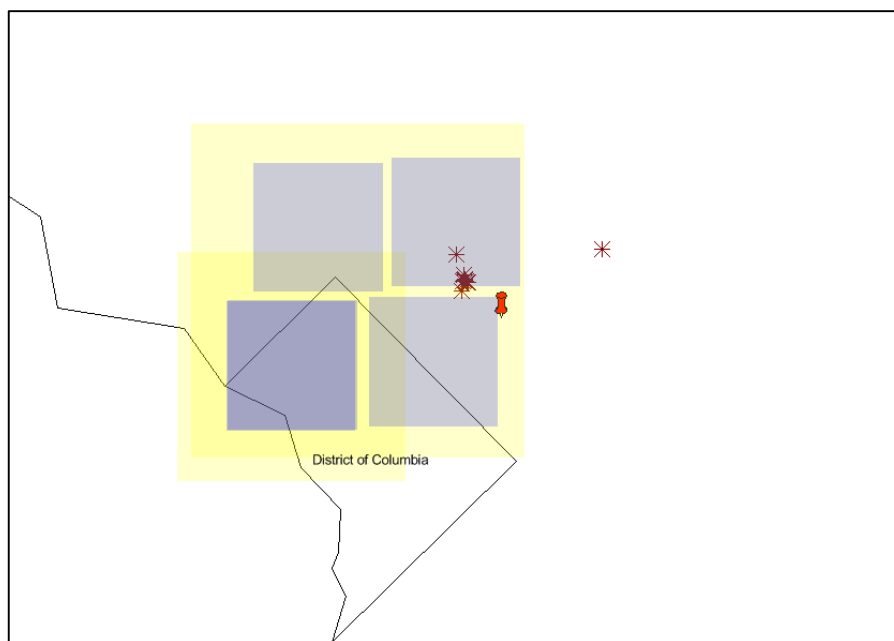
DRs registradas pela Câmera de alta velocidade		
Microsssegundos	Ordem das Descargas	Pico de corrente (kA)
41.562	1	-58,841
41.606	2	-10,849
41.6188	3	
41.7612	4	-35,557
41.8428	5	-30,137
41.8464	6	
41.8608	7	-14,859
41.8692	8	-5,437
41.9108	9	-20,667
41.9448	10	-30,078
42.0352	11	-12,186
42.0828	12	-18,498
42.1897	13	-25,189

Instante em microssegundos em que cada descarga de retorno registrada pela câmera de alta velocidade atingiu o solo. As linhas em cinza representam as duas descargas de retorno que foram vistas pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

A Figura 9.2 mostra que 4 eventos (pixeis, quadrados azuis) foram iluminados no mesmo intervalo de tempo em que o relâmpago NS foi registrado pela câmara. Os eventos são referentes a duas descargas de retorno, a primeira DR registrada pela câmara, com 4 eventos (pixeis) registrados pelo GLM e pico de corrente de -59kA, estimado pela rede; e a quarta DR registrada pela câmara, com apenas 1 evento (pixel) registrado pelo GLM e pico de corrente de -35kA, estimado pela rede. Esses eventos foram agrupados em dois grupos (quadrados amarelos) que equivalem à área total iluminada por cada DR. Cada pixel (evento) tem resolução de 10km (área de 100km²), o grupo referente a primeira DR (quadrado amarelo maior) tem 434.156 km², já o grupo referente a quarta DR (quadrado amarelo menor) tem 203.059 km². A localização do relâmpago é centralizada na localização média (latitude e longitude) dos grupos e área total é a soma da área total de todos os pixeis iluminados, equivalente a 588.373 km².

Figura 9.2 – Relâmpago ID 96 registrado às 20:01:40 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.



Localização das 11 descargas de retorno que foram registradas pela câmara de alta velocidade (asteriscos vermelhos), dada pela rede ENLTD e localização dos eventos (azuis) e dos grupos (amarelo) que foram registrados pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

Além de estimar a área iluminada pelo relâmpago, o GLM também mede a energia de cada pixel (evento), estimando assim a quantidade de energia irradiada pelo relâmpago, que é vista no topo da nuvem. A Figura 9.3 apresenta um gráfico da intensidade de energia irradiada, medida pelo GLM, de todos os grupos pertencentes ao relâmpago que ocorreu às 20:01:40 UTC e recebeu o número de identidade (ID) 96, em função do tempo em que ocorreram.

Figura 9.3 - Energia do relâmpago ID 96 registrado as 20:01:40 UTC pelo GLM

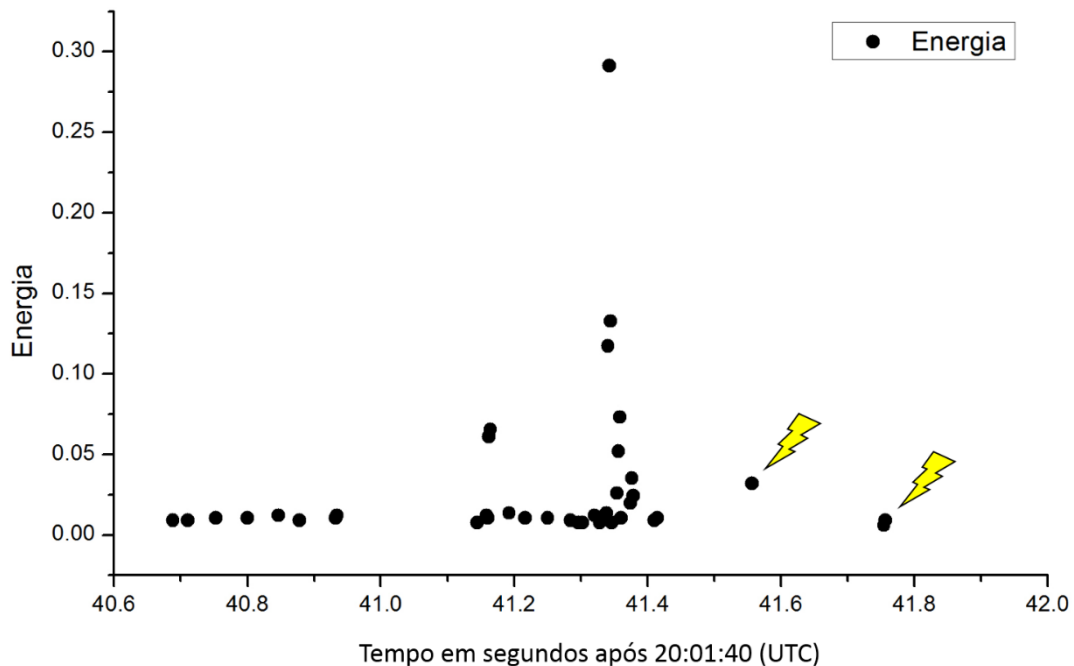


Gráfico da intensidade de energia irradiada no topo da nuvem de todos os grupos pertencentes ao relâmpago ID 96, registrados pelo GLM na cidade de College Park, MD EUA no dia 19 de Junho de 2017 às 20:01:40 UTC. Os dois raios amarelos indicam as duas descargas de retorno que foram registradas simultaneamente pela camera de alta velocidade e pelo GLM.

Fonte: Produção do autor.

É possível perceber na Figura 9.2, que pelo agrupamento dos grupos do GLM, que pertencem a esse relâmpago, a atividade elétrica do relâmpago vista pelo GLM, começou aproximadamente 1 minuto antes (40,6) da primeira descarga de retorno, registrada pela câmera de alta velocidade, atingir o solo (41,5). Além disso, a primeira descarga de retorno vista pela câmera não equivale à emissão energética mais intensa vista pelo GLM. Considerando que a emissão mais intensa ocorreu no tempo 41,342335 minutos e que o vídeo começou aos 41,360396 minutos e pode ter perdido alguma outra atividade elétrica visível. As descargas que foram registradas simultaneamente pela câmera e pelo GLM, neste caso, correspondem as que tiveram maior pico de corrente medidos pela rede ENLTN.

O segundo caso ocorreu no dia no dia 14 de julho de 2017, às 20:25:56 UTC e 6 DRs foram registradas pela câmera de alta velocidade, onde 5 delas foram detectadas pela rede de detecção local ENLTN. A Tabela 9.2 apresenta o instante, em que cada DR ocorreu e também o pico de corrente das DR que foram detectadas pela rede. Na comparação dos dados da câmera com os dados do GLM, foi identificado que, assim como no primeiro exemplo, apenas 2 DR foram registradas simultaneamente pela câmera e pelo GLM, neste caso a segunda e terceira descarga que foram registradas pela câmera. A Figura 9.4 mostra que essas descargas iluminaram 2 píxeis (eventos, quadrados azuis), os eventos referentes as duas descargas foram agrupados em dois grupos (quadrados amarelos). O grupo referente a segunda DR (quadrado amarelo maior) tem 280.091 km², já o grupo 2 (quadrado amarelo menor) tem 203.362 km² e é referente a terceira DR. A área total iluminada pelo relâmpago do segundo caso, registrado pelo GLM foi de 434.46 km². A Figura 9.5 apresenta um gráfico da intensidade de energia irradiada, medida pelo GLM, de todos os grupos pertencentes a esse relâmpago em função do tempo em que ocorreram, o número de identidade (ID) nos dados do GLM é 4483.

Tabela 9.2 – Relâmpago ocorrido em 14/07/2017 as 20:25:56 UTC nos EUA.

DRs registradas pela Câmera de alta velocidade		
Microssegundos	Ordem das Descargas	Pico de corrente (kA)
56.8182	1	-13.326
57.066	2	-19.558
57.1464	3	-23.543
57.2228	4	
57.2405	5	-13.094
57.3053	6	-5.524

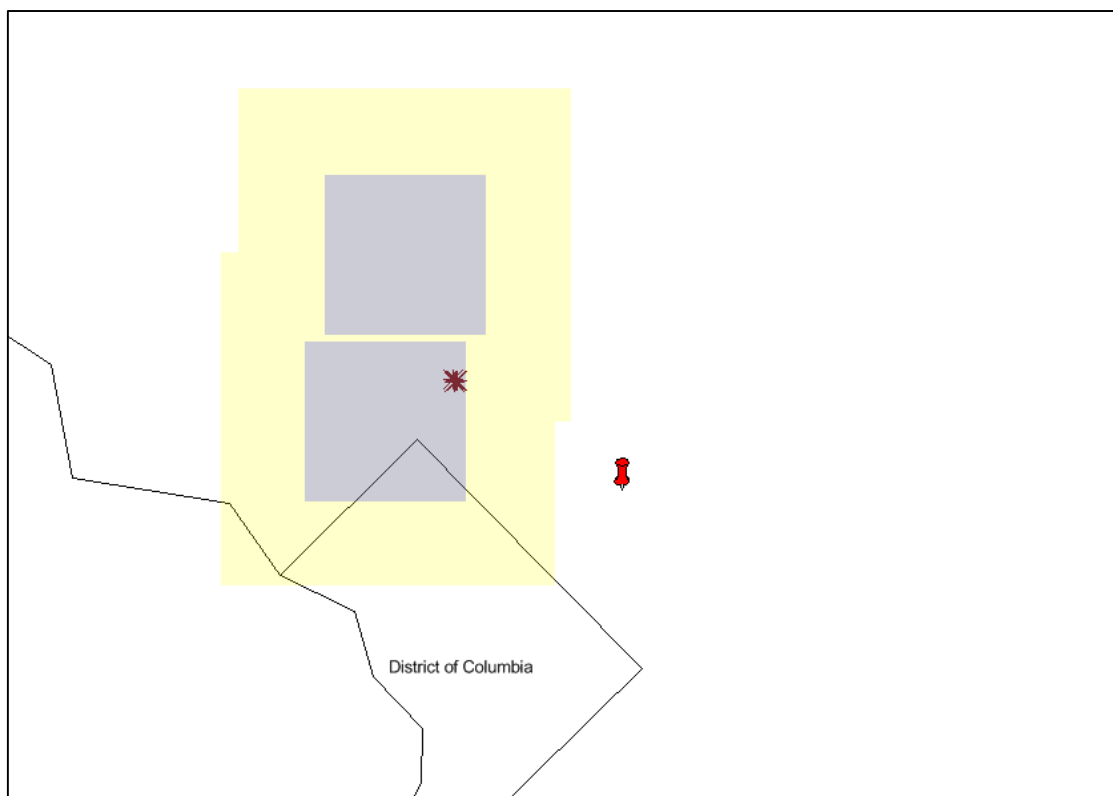
Instante em microssegundos em que cada descarga de retorno registrada pela câmera de alta velocidade atingiu o solo 14/07/2017 as 20:25:56 UTC. As linhas em cinza representam as duas descargas de retorno que também foram vistas pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

O gráfico da Figura 9.4 mostra que a energia dos grupos que foram identificados como sendo da mesma DR, que foi registrada pela câmera, não são os grupos que possuem maior energia irradiada no topo da nuvem, assim como no primeiro exemplo. Porém neste caso, os grupos com maior energia,

ocorreram entre as duas descargas que foram registradas simultaneamente pela câmera e pelo GLM (segunda e terceira).

Figura 9.4 - Relâmpago ID 4483 registrado às 20:25:56 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.



Localização das 5 descargas de retorno que foram registradas pela câmera de alta velocidade (asteriscos vermelhos), dada pela rede ENLTDN e localização dos eventos (azuis) e dos grupos (amarelo) que foram registrados pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

Figura 9.5 – Energia do relâmpago ID 4483 registrado as 20:25:56 UTC pelo GLM

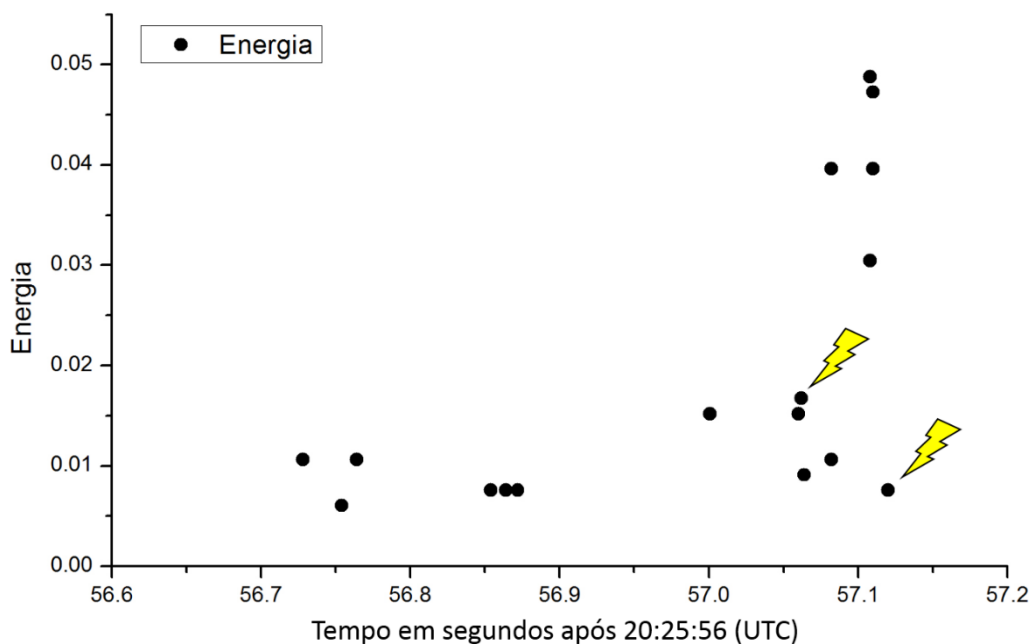


Gráfico da intensidade de energia irradiada no topo da nuvem de todos os grupos pertencentes ao relâmpago ID 4483, registrados pelo GLM na cidade de College Park, MD EUA no dia 14 de Julho de 2017 às 20:25:56 UTC. Os dois raios amarelos indicam as duas descargas de retorno que foram registradas simultaneamente pela câmara de alta velocidade e pelo GLM

Fonte: Produção do autor.

O terceiro caso também ocorreu no dia no dia 14 de julho de 2017 e foi registrado às 21:00:40 UTC. Esse relâmpago teve 7 DRs registradas pela câmara de alta velocidade e todas elas foram detectadas pela rede de detecção local ENLTN. A Tabela 9.3 apresenta o instante, em microssegundos em que cada DR ocorreu e também o pico de corrente medido pela rede. Neste caso, 5 DR identificadas como registradas simultaneamente pela câmara de alta velocidade e pelo GLM, neste caso 3 DR não foram vistas pelo GLM, sendo ela a terceira, quinta e sétima descarga e são as que tiveram os menores picos de corrente. Este caso teve a primeira DR bifurcada, a Figura 9.6 mostra que um grupos de eventos ocorreram mais distante do restante dos grupos pertencentes a esse relâmpago e esses grupo de eventos

correspondem ao tempo em que a primeira DR bifurcada foi registrada pela câmera. A área total do relâmpago vista pelo GLM foi de 590.496 km². A Figura 9.7 apresenta um gráfico da intensidade de energia irradiada, medida pelo GLM, de todos os grupos pertencentes a esse relâmpago, em função do tempo em que ocorreram, a identificação desde relâmpago nos dados do GLM e pelo número ID107.

Tabela 9.3 – Relâmpago ocorrido em 14/07/2017 às 21:00:40 UTC nos EUA.

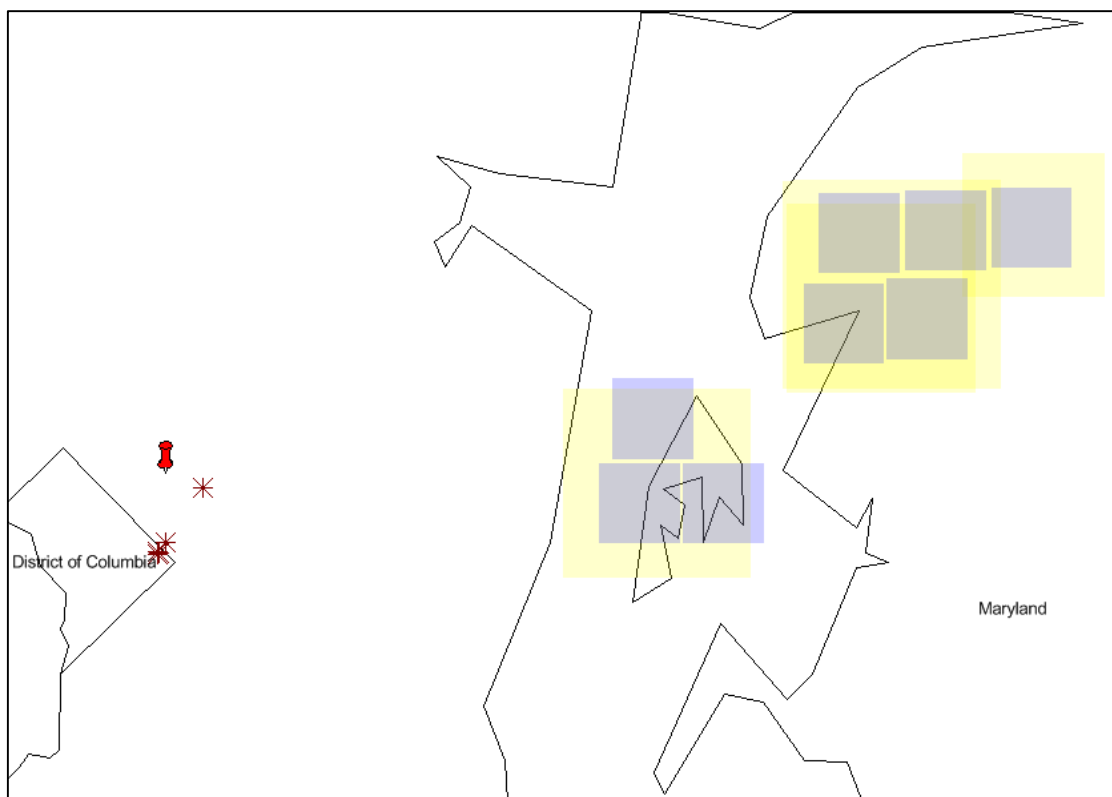
DRs registradas pela Câmera de alta velocidade		
Microsssegundos	Ordem das Descargas	Pico de corrente (kA)
40.1416	1	-21.233
40.208	2	-21.299
40.3532	3	-9.115
40.4276	4	-16.236
40.5692	5	-7.708
40.5772	6	-16.494
40.6384	7	-10.992

Instante em microssegundos em que cada descarga de retorno registrada pela câmera de alta velocidade atingiu o solo no dia 14/07/2017 as 21:00:40 UTC. As linhas em cinza representam as seis descargas de retorno que também foram vistas pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

A energia irradiada no topo da nuvem pelas DR que foram vistas simultaneamente pela câmera de alta velocidade e pelo GLM, foram as que tiveram níveis de energia registrados pelo GLM para este caso.

Figura 9.6 - Relâmpago ID 107 registrado às 21:00:40 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.



Localização das 7 descargas de retorno que foram registradas pela câmara de alta velocidade (asteriscos vermelhos), dada pela rede ENLTN e localização dos eventos (azuis) e dos grupos (amarelo) que foram registrados pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

Figura 9.7 – Energia do relâmpago ID 107 registrado as 21:00:40 UTC pelo GLM

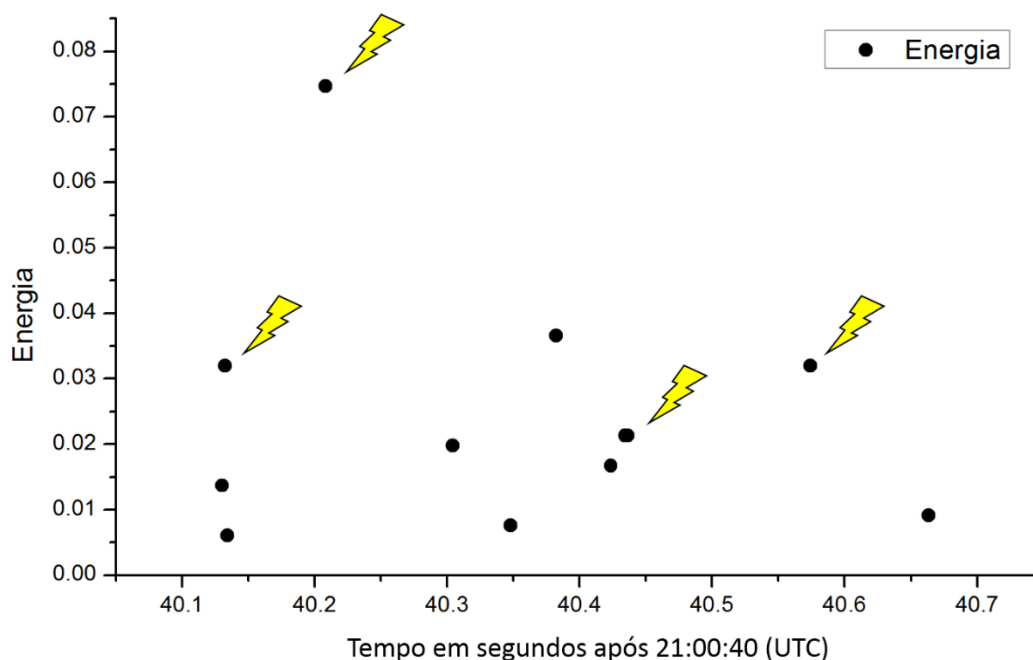


Gráfico da intensidade de energia irradiada no topo da nuvem de todos os grupos pertencentes ao relâmpago ID 107, registrados pelo GLM na cidade de College Park, MD EUA no dia 14 de Julho de 2017 às 21:00:40 UTC. Os raios amarelos indicam as descargas de retorno que foram registradas simultaneamente pela camera de alta velocidade e pelo GLM

Fonte: Produção do autor.

O quarto e último caso apresentado nessa sessão, ocorreu no dia no dia 24 de julho de 2017 às 3:56:48 UTC e também teve 7 DRs registradas pela câmera de alta velocidade e apenas uma delas, a última DR, não foi detectada pela rede local de detecção ENLTN. A Tabela 9.4 apresenta o instante, em microssegundos em que cada DR ocorreu e também o pico de corrente das DRs que foram detectadas pela rede. Neste caso as 6 DRs que foram registradas simultaneamente pela câmera e pelo GLM, sendo as que não foram vistas pelo GLM a primeira e a última DR registrada pela câmera. A Figura 9.8 mostra localização das DR detectadas pela rede ENLTN e a localização dos eventos (azul), grupos (amarelo) do relâmpago visto pelo GLM. A área total do relâmpago visto pelo GLM foi de 1278.18km². A Figura 9.9 apresenta um

gráfico da intensidade de energia irradiada, medida pelo GLM, de todos os grupos pertencentes a esse relâmpago, em função do tempo em que ocorreram, a identificação desse relâmpago nos dados GLM é pelo número ID2331.

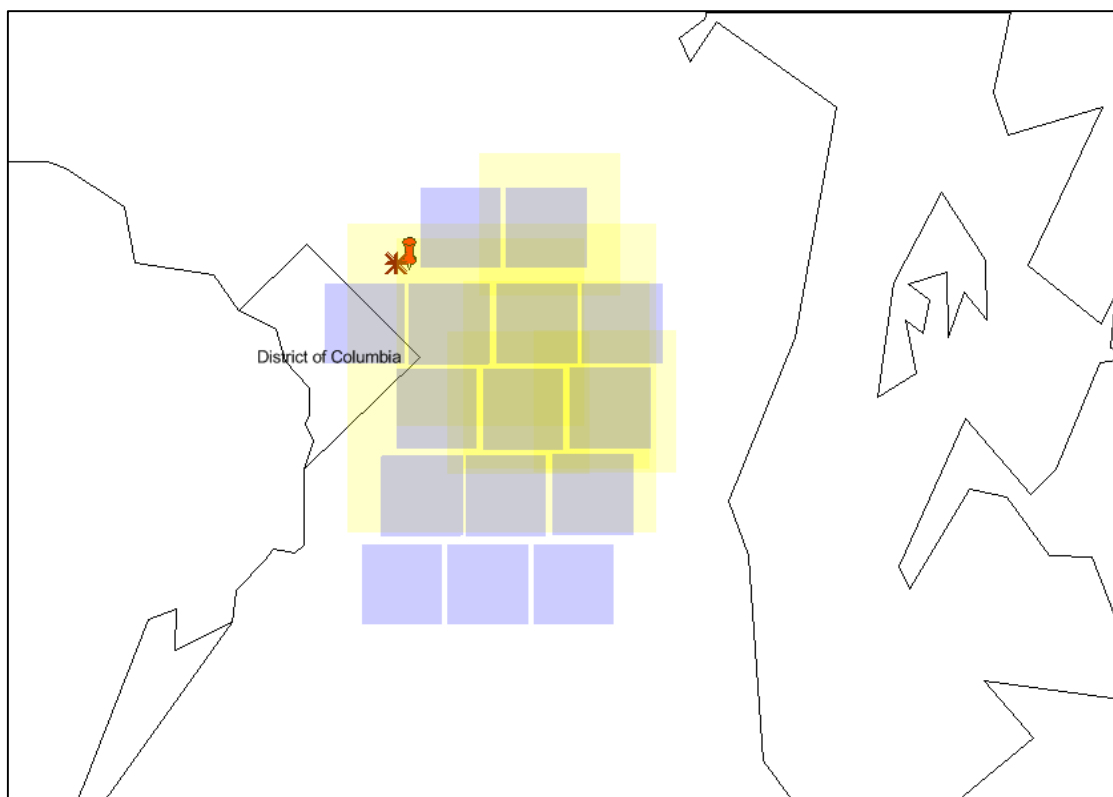
Tabela 9.4 – Relâmpago ocorrido em 24/07/2017 as 3:56:48 UTC nos EUA.

DRs registradas pela Câmera de alta velocidade		
Microsssegundos	Ordem das Descargas	Pico de corrente (kA)
48.38512	1	34.538
48.43512	2	36.545
48.46472	3	9.219
48.66352	4	24.788
48.71352	5	1.589
48.82512	6	1.624
48.96392	7	2.828
48.97112	8	

Instante em microssegundos em que cada descarga de retorno registrada pela câmera de alta velocidade atingiu o solo no dia 24/07/2017 as 3:56:48 UTC. As linhas em cinza representam as seis descargas de retorno que também foram vistas pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

Figura 9.8 - Relâmpago ID 2331 registrado às 3:56:48 UTC pela camera de alta velocidade e pelo GLM.



Localização das 7 descargas de retorno que foram registradas pela câmara de alta velocidade (asteriscos vermelhos), dada pela rede ENLTD e localização dos eventos (azuis) e dos grupos (amarelo) que foram registrados pelo GLM.

Fonte: Produção do autor

Figura 9.9 – Energia do relâmpago ID 2331 registrado 3:56:48 UTC pelo GLM

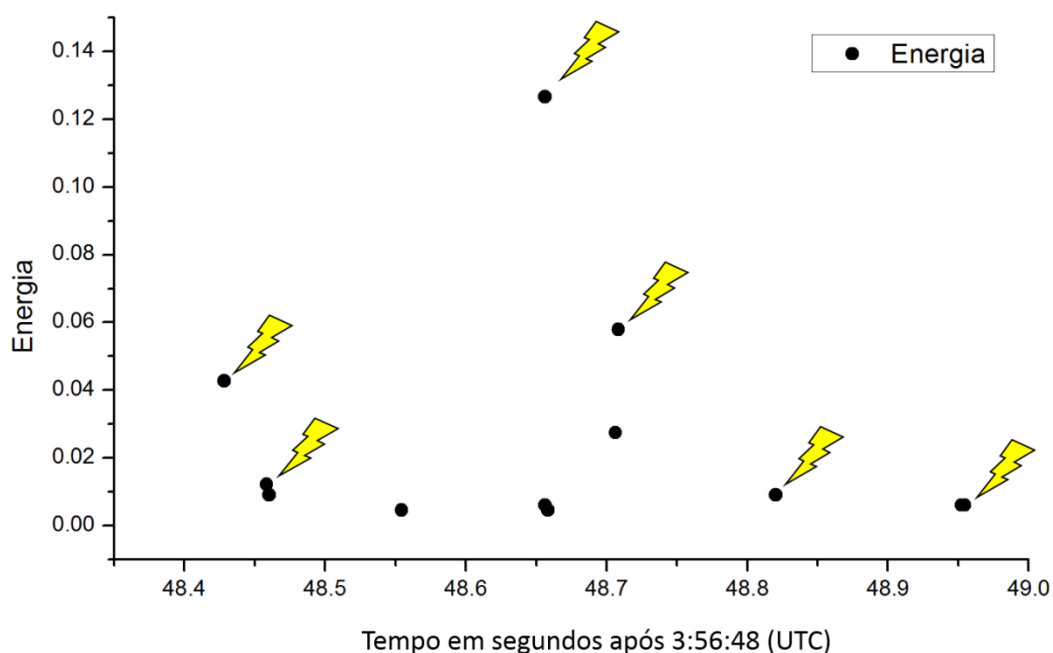


Gráfico da intensidade de energia irradiada no topo da nuvem de todos os grupos pertencentes ao relâmpago ID 2331, registrados pelo GLM na cidade de College Park, MD EUA no dia 24 de Julho de 2017 às 3:56:48 UTC. Os raios amarelos indicam as descargas de retorno que foram registradas simultaneamente pela câmera de alta velocidade e pelo GLM

Fonte: Produção do autor.

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que existe uma boa correlação entre a luminosidade das descargas de retorno, extraídas das câmeras de alta velocidade, e o pico de corrente medido pelas redes de detecção de relâmpagos. Considerando que o GLM mede a intensidade luminosa emitida pelos relâmpagos, no topo da nuvem de tempestade, e tendo identificado algumas DRs que foram registradas simultaneamente, pelas câmeras e pelas redes de detecção. É possível analisar se também existe uma correlação entre a energia luminosa, vista pelo GLM no topo da nuvem, e o pico de corrente das DRs, medidos pelas redes de detecção, no solo. A Figura 9.10 mostra o gráfico de dispersão da energia luminosa vista pelo GLM, no

topo da nuvem e o pico de corrente, medido pela rede de detecção ENLTN no solo, para todas as DRs dos relâmpagos apresentados nesta sessão e que foram identificadas como vistas pela câmera, pelo GLM e detectadas pela rede de detecção. A Figura 9.11 mostra o gráfico de dispersão da luminosidade, extraída das imagens de câmera de alta velocidade, em função do pico de corrente, estimado pela americana rede ENLTN para as DRs dos quatro NS estudados nesta sessão.

Figura 9.10 – Gráfico de dispersão (pico de corrente da rede x energia luminosa registrada pelo GLM)

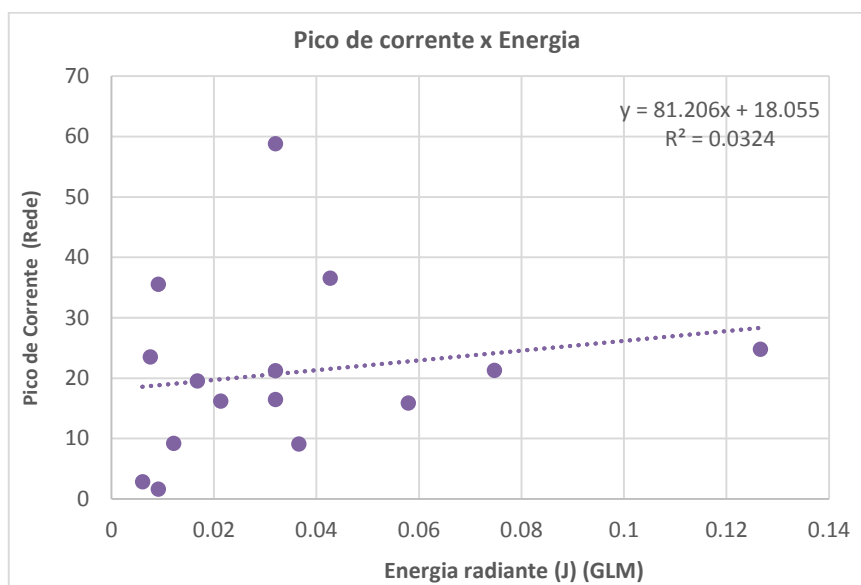


Gráfico de dispersão do pico de corrente, medidos pela rede ENLTN no solo em relação a energia radiante, vista pelo GLM no topo da nuvem, de todas as descargas de retorno de 4 relâmpagos nuvem-solo que foram registradas simultaneamente pela câmera de alta velocidade, pelo GLM e pela rede de detecção.

Fonte: produção do autor

Figura 9.11 – Gráfico de dispersão do pico de corrente da rede (ENLTN) x Intensidade luminosa (câmera)

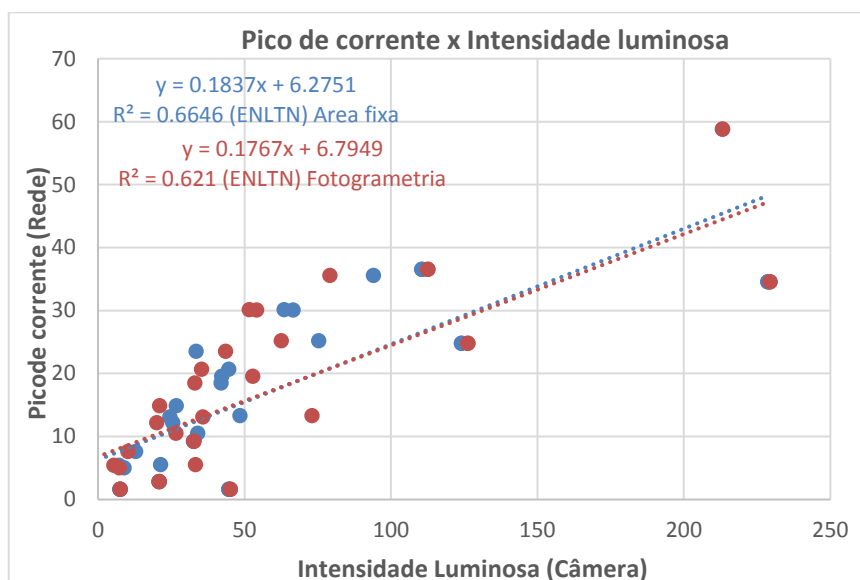


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (ENLTN) das descargas de retorno dos 4 relâmpagos estudados nesta sessão.

Fonte: Produção do autor

O gráfico da Figura 9.10 mostra que não há correlação entre a energia radiante registrada pelo GLM e o pico de corrente das descargas de retorno dos relâmpagos analisados, já o gráfico da Figura 9.11 mostra que o coeficiente quadrado de correlação entre a luminosidade e o pico de corrente para as descargas de retorno para o quatro relâmpagos estudados nesta sessão é 0.67 para o método de área fixa e 0,62 para o método de fotogrametria. Porém existem algumas considerações que precisam ser feitas, somente com essa comparação dos dados da câmera, rede e GLM em relação a localização e tempo, não é possível saber se todos esses grupos do GLM, identificados como visto simultaneamente pelos 3 instrumentos são de fato referentes a mesma descarga de retorno ou se realmente pertencem ao mesmo relâmpago ou qual é a parte do canal do relâmpago que o GLM consegue ver, para poder estudar a porção horizontal do canal do relâmpago, que se estende dentro da nuvem, seria preciso medidas em VHF (LMA) que são capazes de mapear o

desenvolvimento do canal dentro da nuvem. A radiância no topo da nuvem pode ser referente a processos de iniciação do relâmpago, que ocorrem dentro da nuvem antes da descarga de retorno e câmera só registra a porção do canal que está fora da nuvem e não registra a parte horizontal do canal, não sendo possível identificar a altura e dimensão do canal que se propaga dentro da nuvem. E o pico de corrente medido pelas redes, que foram utilizados nessa comparação, foram medidos na base do canal da descarga, próximo ao solo. Isso explica porque não há correção entre a luminosidade vista no topo da nuvem e o pico de corrente das descargas de retorno. Porém, na maioria dos casos as DRs identificadas como sendo registradas simultaneamente pela câmera e pelo GLM, de cada caso, foram as DRs que apresentaram os maiores picos de corrente, medidos pela rede ENLTN.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do trabalho foi realizar um estudo da relação entre a luminosidade emitida pela descarga de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais, registradas por câmeras de alta velocidade, e o pico de corrente, estimado pelas redes locais de detecção. As redes utilizadas foram a BrasilDAT, LINET e TLS200 para os casos registrados no Brasil durante o verão de 2011/2012, somente BrasilDAT para os casos registrados no Brasil durante os verões de 2012/2013 e 2013/2014 e ENLTN para os casos registrados nos EUA durante o verão 2017. Ao todo 1122 relâmpagos foram analisados e seguindo alguns critérios de seleção que consideram a visibilidade e a quantidade das descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo. Os casos em que foi possível observar a presença de chuva, ou que estavam saturados, foram excluídos da análise. Além disso, foram selecionados para este trabalho, apenas os casos que tiveram ao menos cinco descargas de retorno detectadas por pelo menos umas das redes de detecção. Esse critério foi adotado para que uma análise individual de cada caso pudesse ser realizada. Considerando todos esses critérios de seleção, 66 relâmpagos foram escolhidos para serem analisados nesse trabalho.

Os dados foram analisados caso a caso e separados por dois grupos. O primeiro, foi o grupo de dados coletados na campanha 2011/2012, período em que havia duas redes de detecção de relâmpagos, temporárias, instaladas na região, devido ao projeto CHUVA os resultados das 3 redes de detecção BrasilDAT, LINET e TSL200 foram comparados entre si. O segundo, foi grupo de dados das campanhas 2012/2013 e 2013/2014, realizadas no Brasil e 2017, realizada nos EUA. A análise do segundo grupo foi feita considerando apenas uma rede local para cada região em que foram realizadas as campanhas de coleta de dados, BrasilDAT para dados do Brasil e ENLTN para dados dos EUA, as duas redes utilizam sensores da empresa EarthNetworks. Além disso foram aplicados aos dados dois métodos de extração da luminosidade do canal da descarga de retorno. O método de área fixa para todos os casos, esse

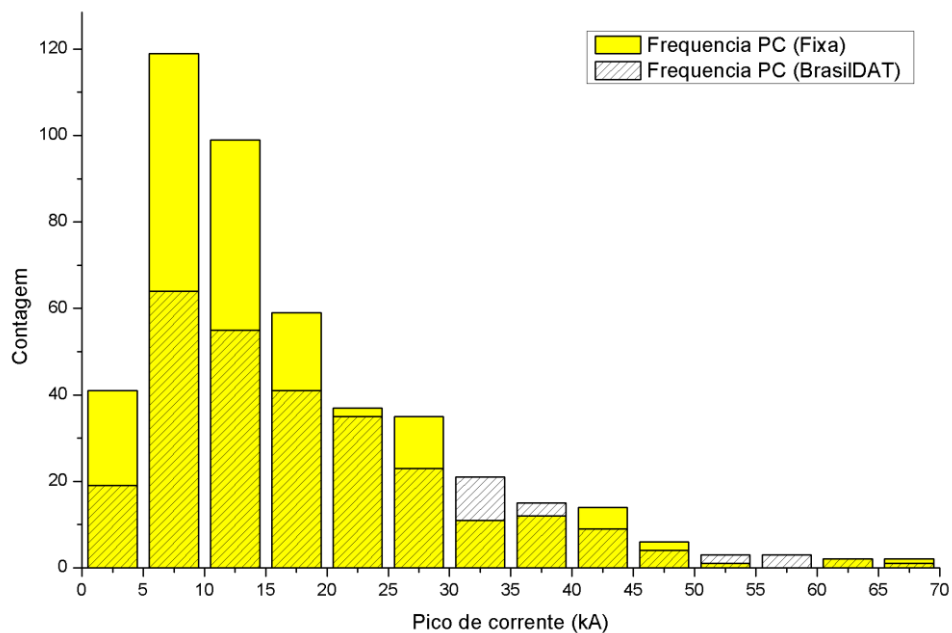
método considerou o mesmo tamanho de janela, em pixels (30x15), para todos os casos, independentemente do tamanho ou distância do canal. O outro método foi aplicar a fotogrametria em cada caso para encontrar a razão pixel por metro, neste caso foi escolhido uma área, em metros, fixa de 150x75, onde a quantidade de pixels selecionados variou de caso a caso. Mesmo considerando todos os critérios de seleção, dos 66 casos selecionados, 14 apresentaram correlação muito baixa para os dois métodos de extração da luminosidade. Ao analisar as imagens de cada um deles foi possível estimar as possíveis causas da baixa correlação.

Todos os casos que apresentaram uma correlação ruim foram excluídos do gráfico de dispersão do pico de corrente estimado pela luminosidade em relação ao pico de corrente medido pelas redes. De modo geral, não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos para o método de área fixa e o método da fotogrametria. A relação entre o pico de corrente estimado pela luminosidade extraída pelo método de área fixa apresentou $R^2=0.77$, enquanto que para o método da fotogrametria apresentou $R^2=0.73$. Esses valores são próximos dos valores encontrados por Carvalho et al. (2015), onde a distância entre as descargas de retorno dos relâmpagos lançados por foguete e a fotodiodo, que registrou a luminosidade, foi sempre a mesma. Porém, na maioria dos casos, quando a área selecionada pela a fotogrametria foi maior que a área fixa, a correlação para o método da fotogrametria também foi menor. Isso mostra que é preciso considerar a atenuação da luminosidade do canal da descarga de retorno, pois está relacionada com a intensidade da corrente que flui pelo canal. Também não houve diferenças significativas na comparação dos resultados da correlação entre a luminosidade e as redes LINET, TSL2300 e BrasilDAT para os dados da campanha 2011/2012.

10.1. Distribuição do Pico de corrente estimado pela luminosidade comparado com a distribuição do pico de corrente da rede ENLTN (Brasil e EUA).

Os histogramas, apresentados nas Figuras 10.1 e 10.2, comparam as distribuições de pico de corrente estimados através da luminosidade, extraída das imagens de câmera de alta velocidade, para todas as descargas observadas em todas as campanhas de coleta de dados, incluindo as DRs que foram registradas pelas câmeras, mas que não foram detectadas pelas redes. Os histogramas correspondem as distribuições para o pico de corrente estimado pelos dois métodos (área fixa e fotogrametria) respectivamente. A comparação dos dados entre o pico de corrente, estimado pela luminosidade e o pico de corrente, estimada pela rede de detecção, considerou apenas os dados das redes que utilizam sensores EarthNetworks (BrasilDAT para dados do Brasil e ENLTN, para dados dos EUA), pois foram as redes com mesmo tipo de sensor de medição que operaram em todas as campanhas. O pico de corrente estimado pela intensidade luminosa das descargas, tanto para o método de área fixa quanto para o método de fotogrametria consideraram todas as descargas registradas pelas câmeras de alta velocidade (441), já o pico de corrente estimado pelas redes possui apenas os valores das descargas que foram detectadas pelas redes (295).

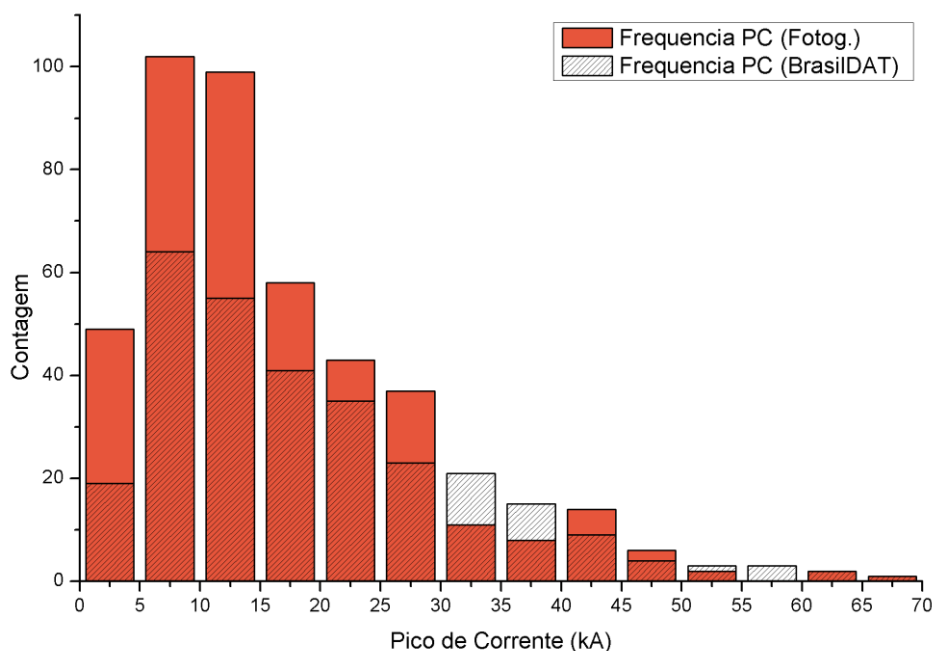
Figura 10.1 – Comparação da frequência dos valores de pico de corrente, estimado pela câmera pelo método de área fixa, com a frequência dos valores de pico de corrente medido pelas redes de detecção.



As colunas em amarelo representam o pico de corrente, estimado pela luminosidade extraída das imagens das câmeras pelo método de área fixa (30x15), de todas as descargas de retorno analisadas neste trabalho, incluindo as descargas que não foram detectadas pelas redes. A coluna listradas representam os picos de corrente que foram calculados pelas redes BrasilDAT e ENLTN.

Fonte: Produção do autor.

Figura 10.2 – Comparação da frequência dos valores de pico de corrente, estimado pela câmera através do método da fotogrametria, com a frequência dos valores de pico de corrente medido pelas redes de detecção.



As colunas em amarelo representam o pico de corrente, estimado pela luminosidade extraída das imagens das câmeras pelo método de área fotogrametria caso a caso, de todas as descargas de retorno analisadas neste trabalho, incluindo as descargas que não foram detectadas pelas redes. A coluna listradas representam os picos de corrente que foram calculados pelas redes BrasilDAT e ENLTN.

Fonte: Produção do autor.

Ao observar os histogramas das Figuras 10.1 e 10.2 é possível perceber que existe uma diferença maior na quantidade de descargas detectadas pelas redes e na quantidade de descargas registradas pelas câmeras de alta velocidade para picos de corrente até 20kA. Isso indica que a rede costuma perder, ou não consegue detectar corretamente, DRs que possuem picos de corrente menores 20 kA. Considerando que a probabilidade das redes de detecção não detectarem descargas de retorno mais fracas ser bem maior, é esperado que exista uma maior quantidade de casos em que o pico de corrente, estimado através da luminosidade, para os casos que não foram detectados pelas redes sejam abaixo de 20kA. Porém mesmo com a diferença

na quantidade de casos, as distribuições de frequência de pico de corrente estimado pela luminosidade são semelhantes às distribuições de pico de corrente das descargas de retorno que foram detectadas pelas redes.

11 CONCLUSÃO

O objetivo principal do trabalho foi estabelecer a relação entre a luminosidade das descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo naturais e o pico de corrente estimado pelas redes de detecção. Considerando todos os critérios de seleção, 66 casos foram selecionados 73% dos casos apresentaram correlação positiva entre a luminosidade e pico de corrente estimado. De modo geral, não houve diferenças significativas entre os resultados obtidos para o método de área fixa e o método da fotogrametria. Também não houve diferenças significativas na comparação das redes LINET, TSL200 e BrasilDAT para os dados da campanha 2011/2012. Considerando que a análise deste trabalho foi feita com relâmpagos naturais, onde a distância entre as descargas e a câmera variam e que a medida do pico de corrente é estimado pela rede, o coeficiente da correlação para o método de área fixa foi 0,88 e para fotogrametria foi 0,85 foi bastante satisfatório.

A correlação entre o pico de corrente e luminosidade caso a caso permite estimar as descargas de retorno que não foram detectadas pelas redes ou até mesmo de processos em que a rede não calcula o pico de corrente, como líderes de retorno, quando visíveis fora da nuvem, por exemplo. Os resultados da comparação dos relâmpagos nuvem-solo, registrados pelas câmeras de alta velocidade, com os dados do sensor ótico GLM, mostraram que alguns relâmpagos foram registros simultaneamente pelos dois instrumentos, porém não é possível estimar a intensidade da corrente das descargas de retorno dos relâmpagos. O GLM só consegue registrar a radiação luminosa emitida no topo das nuvens e somente com os dados de rede, utilizados na análise desde trabalho, não foi possível identificar qual parte do relâmpago é vista pelo GLM.

12 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação ao estudo da luminosidade em relação a corrente das descargas de retorno:

- Estabelecer uma relação geral entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo.
- Utilizar essa relação para estudar a corrente de outros processos dos relâmpagos que a rede não consegue medir, como a Componente-M, dos líderes de retorno e ramificações do canal.

Em relação a observação simultânea de relâmpagos registrados pela câmera de alta velocidade e o GLM:

- Utilizar dados auxiliares de LMA para identificar a altura e dimensão da parte horizontal do canal que se propagou dentro da nuvem dos relâmpagos registrados pela câmera de alta velocidade e pelo GLM.
- Realizar novas campanhas de coleta de dados para continuar a análise de observação simultânea de relâmpagos registrados com câmeras de alta velocidade e com o GLM para poder entender como os relâmpagos nuvem-solo são vistos pelo GLM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; PETERSEN, W. A.; BUECHLER, D. E.; BRUNING, E. C.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. The 13 years of TRMM Lightning Imaging Sensor: from individual flash characteristics to decadal tendencies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 14., 2011. Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** 2011.

ALBRECHT, R.; MORALES, C.; MATTOS, E.; BISCARO, T.; MACHADO, L.; ANSELMO, E.; NEVES, J. Tempestades e tempo severo durante o experimento CHUVA-GLM Vale do Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17., 2012, Gramado, RS. **Anais... Sociedade Brasileira de Meteorologia**, 2012.

ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E., BLAKESLEE; R. J., & CHRISTIAN, H. J. Where are the lightning hotspots on Earth?. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.97, n.11, p.2051-2068, 2016.

AMARASINGHE, D.; SONNADARA, U.; BERG, M.; COORAY, V. Correlation between brightness and channel currents of electrical discharges. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.14, n.5, p.1154-1160, 2007.

ANTUNES, L. S. **Comparação de características visíveis de relâmpagos nuvem-solo negativos para diferentes dias de tempestade no sudeste do Brasil, observados por uma rede de câmeras de alta velocidade**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

AZAMBUJA, R. R. **Estudo da atividade de relâmpagos na região sul do Brasil a partir de dados de sistema de detecção**. 2017. 164 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3NF6K38>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/03.04.13.22-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NF6K38>>.

BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, C.; SABA, M. M.; SCHULZ, W.; PINTO, O. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.117, n.D6, 2012.

BERGER, K. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v. 283, n. 6 p. 478- 525, 1967.

BETZ, H.D.; SCHMIDT, K.; LAROCHE, P.; BLANCHET, P.; OETTINGER, W.P.; DEFER, E.; DZIEWIT, Z.; KONARSKI, J. LINET: an international lightning detection network in Europe. **Atmospheric Research**, v.91, n.2/4, p.564-573, 2009

BIAGI, C. J.; CUMMINS, K. L.; KEHOE, K. E.; KRIDER, E. P. National lightning detection network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003–2004. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.112, n.D5, 2007.

BOCCIPPIO, D. J.; CUMMINS, K. L.; CHRISTIAN, H. J.; GOODMAN, S. J. Combined satellite- and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. **Monthly Weather Review**, v.129, n.1, p.108-122, jan. 2001.

BOYS, C. V. Progressive lightning. **Nature**, v.118, n.11, p.749-750, 1926.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F. **Estudo da corrente contínua de relâmpagos naturais através de uma câmara rápida**. São José dos Campos: INPE, 2006. 70 p. IBI: <8JMKD3MGPDW/QRCA78>. (INPE-14120-RPQ/257). Disponível em:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGPDW/QRCA78>>.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JÚNIOR, O.; BALLAROTTI, M. G. Study on waveshapes of continuing currents and properties of M-components observed in natural negative and positive cloud-to-ground flashes using a high-speed camera. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 13., 2007. Beijing, China. **Proceedings...** 2007.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JUNIOR, O.; BALLAROTTI, M. G. Wave shapes of continuing currents and properties of M – components in natural negative cloud to ground lightning from high speed video observations. **Atmospheric Research**, v.91, p.416-424, 2009.

CAMPOS, L. Z. S. **Caracterização das componentes-m e dos líderes de relâmpagos naturais a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e medidas de campo elétrico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

CAMPOS, L. Z. S. **On the mechanisms that lead to multiple ground contacts in lightning**. 2016. 280 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3LG4CDL>. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/04.12.01.06-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LG4CDL>>.

CARDOZA, J. A. Sensores de imagem digitais CCD E CMOS. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO (CONNEPI), 7., 2012, Palmas, TO. **Anais...** 2012.

CARVALHO, F. L.; JORDAN, D. M.; UMAN, M. A.; NGIN, T.; GAMEROTA, W. R.; PILKEY, J. T. Simultaneously measured lightning return stroke channel-base current and luminosity. **Geophysical Research Letters**, v.41, n.22, p.7799-7805, 2014.

CARVALHO, F. L.; UMAN, M. A.; JORDAN, D. M.; NGIN, T. Lightning current and luminosity at and above channel bottom for return strokes and M-components. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.120, n.20, p.10645-10663, 2015.

COORAY, V. **The lightning flash**. Stevenage: IET, 2003.

CHRONIS, T. G.; GOODMAN, S. J.; CECIL, D.; BUECHLER, D.; ROBERTSON, F. J.; PITTMAN, J.; BLAKESLEE, R. J. Global lightning activity from the ENSO perspective. **Geophysical Research Letters**, v.35, n.19, 2008.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L.; PYLE, R. B.; PIFER, A. E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n.D8, p. 9035-9044, 1998a.

CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; MALONE, M. D. The U.S. National Lightning Detection Network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric 152 power utilities. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.40, n.4, pt. 2, p. 465-480, 1998b.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. An overview of Lightning Locating Systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.51, n.3, p.499-518, Aug. 2009.

DWYER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, v.534, n.4, p.147–241, 2014. DOI:10.1016/j.physrep.2013.09.004.

DIENDORFER, G.; SCHULZ W.; RAKOV V. A. Lightning characteristics based on data from the Austrian Lightning Location System. **IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, pt. 2, p. 452-464, Nov. 1998.

DIENDORFER, G.; VIEHBERGER, M.; MAIR, M.; SCHULZAN, W. An attempt to determine currents in lightning channels branches from optical data of a high speed video system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND STATIC ELECTRICITY, 2003, Blackpool, United Kingdom. **Proceedings...** 2003.

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

FERRO, M. A. S.; YAMASAKI, J.; PIMENTEL, D. R. M.; NACCARATO, K. P.; SABA, M. M. F. An electric field-mill network in southeastern Brazil for lightning warnings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 14., 2012. **Proceedings...** 2012.

FISHER, R. J.; SHNETZER, G. H.; THOTTAPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M.; GOLDBERG, J. D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. **Journal of Geophysical Research**, v.72, p.22887–22902, 1993.

FLEENOR, S. A.; BIAGI, C. J.; CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; SHAO, X. M. Characteristics of cloud-to-ground lightning in warm-season thunderstorms in the Central Great Plains. **Atmospheric Research**, v.91, n.2/4, p.333-352, 2009.

GOODMAN, S. J.; BUECHLER, D. E.; KNUPP, K.; DRISCOLL, K.; MCCAUL, E. W. The 1997–98 El Niño event and related wintertime lightning variations in the southeastern United States. **Geophysical Research Letters**, v.27, n.4, p.541-544, 2000.

GOODMAN, S. J.; BLAKESLEE, R. J., KOSHAK, W. J., MACH, D., BAILEY, J., BUECHLER, D., STANO, G. The GOES-R geostationary lightning mapper (GLM). **Atmospheric Research**, v.125, p.34-49, 2013.

GOMES, C.; COORAY, V. Correlation between the optical signatures and current waveforms of long sparks: applications in lightning research. **Journal of Electrostatics**, v.43, p.267– 274, 1998.

HECKMAN, S. **Why does a lightning flash have multiple strokes?** 1992. 134p. Thesis (Ph. D.) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1992.

Heckman, S.; LIU, C. The application of total lightning detection for severe storm prediction. In: EMS ANNUAL MEETING, 10.; EUROPEAN CONFERENCE ON APPLICATIONS OF METEOROLOGY (ECAM), 10., 2010, Zurich, Switzerland. **Abstracts...**, Disponível em: <http://meetings.copernicus.org/ems2010/>. Id. EMS2010-623.

HILL, J. D. **The mechanisms of lightning leader propagation and ground attachment.** Thesis (Ph. D.) - University of Florida, Gainesville, 2012. Disponível em: <http://ufdc.ufl.edu/UFE0044602>.

HUBERT, P.; MOUGET, G. Return stroke velocity measurements in two triggered lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**, v.86, n.C6, p.5253–5261, 1981. DOI:10.1029/JC086iC06p05253.

HUSSEIN, A. M.; JANISCHEWSKYJ, W.; MILEWSKI, M.; SHOSTAK, V.; CHISHOLM, W.; CHANG, J. S. Current waveform parameters of CN Tower lightning return strokes. **Journal of Electrostatics**, v.60, n.2/4, p.149-162, 2004.

HOLLE, R. L.; LOPEZ, R. E. **Overview of real-time lightning detection systems and their meteorological uses**. Norman: NSSL/NOAA, 1993. 68p. (NOAA Technical Memorandum, reference ERL NSSL-102).

IDONE, V. P.; ORVILLE, R. E. Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.90, n.D4, p.6159-6164, 1985.

IDONE, V. P.; ORVILLE, R. E.; HUBERT, P.; BARRET, L.; EYBERT-BERARD, A. Correlated observations of three triggered lightning flashes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.89, n.D1, p.1385-1394, 1984.

JORDAN, D. M.; IDONE, V. P.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; BEASLEY, W. H.; JURENKA, H. Observed dart leader speed in natural and triggered lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.97, n.D9, p.9951-9957, 1992.

JORDAN, D. M.; RAKOV, V. A.; BEASLEY, W. H.; UMAN, M. A. Luminosity characteristics of dart leaders and return strokes in natural lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.102, n.D18, p.22025-22032, 1997.

JORDAN, D. M.; UMAN, M.A. Variation in light intensity with height and time from subsequent lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v.88, p.6555–6562, 1983.

JORDAN, D. M.; RAKOV, V. A.; BEASLEY, W. H.; UMAN, M. A. Luminosity characteristics of dart leaders and return strokes in natural lightning. **Journal of Geophysical Research**, v.102, p.22025–22032, 1997.

KITO, Y.; HORII, K.; HIGASHIYAMA, Y.; NAKAMURA, K. Optical aspects of winter lightning discharges triggered by the rocket-wire technique in Hokuriku district of Japan. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.90,n.D4, p.6147-6157, 1985..

KOSHAK, W. J. Optical characteristics of OTD flashes and the implications for flash-type discrimination. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.27, n.11, p.1822-1838, 2010.

KOSHAK, W. J.; SOLAKIEWICZ, R. J. Retrieving the fraction of ground flashes from satellite lightning imager data using CONUS-based optical statistics. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.28, n.4, p.459-473, 2011.

KOSHAK, W. J. A mixed exponential distribution model for retrieving ground flash fraction from satellite lightning imager data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.28, n.4, p.475-492, 2011.

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p.637, 1962.

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: KRIDER, E.P.; ROBLE, R. G. (Eds.). **The Earth's electrical environment**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1986. v. 1, p. 90-113.

- KREHBIEL, P. R.; BROOK, M.; KRIDER, E. P. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. **Journal Geophysical Research**, v. 84, n. C5, p. 2432-2456, May 1979.
- KONG, X. Z.; QIE, X. S.; ZHAO, Y.; ZHANG, T. Characteristics of negative lightning flashes presenting multiple-ground terminations on a millisecond-scale. **Atmospheric Research**, v.91, n.2/4, p.381-386, 2009.
- LIANG, C.; CARLSON, B.; LEHTINEN, N.; COHEN, M.; MARSHALL, R. A.; INAN, U. Differing current and optical return stroke speeds in lightning. **Geophysical Research Letters**, v.41, p.2561–2567, 2014.
DOI:10.1002/2014GL059703.
- LIN, Y.T.; UMAN, M. A.; STANDLER, R. B. Lightning return stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. C3, p. 1571-1583, 1980.
- LIU, C.; HECKMAN, S. The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY ANNUAL MEETING, 91., 2011, Seattle, WA. **Proceedings... AMS**, 2011. p. 1-10.
- LUPO, G.; PETRARCA, C.; TUCCI, V.; VITELLI, M. EM fields associated with lightning channels: on the effect of tortuosity and branching. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 42, n. 4, p. 394-404, Nov. 2000.
- MACHADO, L. A.; SILVA DIAS, M. A.; MORALES, C.; FISCH, G.; VILA, D.; ALBRECHT, R.;... & COHEN, J. The CHUVA project: How does convection vary across Brazil?. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 95(9), 1365-1380. 2014
- MACH, D.M.; RUST, W.D. Two-dimensional velocity, optical risetime, and peak current estimates for natural positive lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v.98, p.2635–2638, 1993.

MCLAIN, D.K.; UMAN, M.A. Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 9, p. 2101- 2105, 1971.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning, Directly-correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society**, v. A191, p. 485-503, 1947.

MALLICK, S.; RAKOV, V. A.; HILL, J. D.; GAMEROTA, W. R.; UMAN, M. A.; HECKMAN, S.; LIU, C. Calibration of the ENTLN against rocket-triggered lightning data. In: LIGHTNING PROTECTION (SIPDA), 12., 2013. **Proceedings...** IEEE, 2013. p.39-46.

MAZUR, V.; KREHBIEL, P. R.; SHAO, X. M. Correlated high-speed video and interferometric observations of a cloud-to-ground flash. **Journal Geophysical Research**, v. 100, n. 12, p. 25731– 25753, 1995.

MAZUR, V.; SHAO, X. M.; KREHBIEL, P. R. Spider lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes. **Journal Geophysical Research**, v. 103, n. 19, p. 811–822, 1998.

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

MOREAU, J. P.; ALLIOT, J. C.; MAZUR, V. Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n.D14, p.15903-15912, 1992.

MURPHY, M. J.; NAG, A.; LOJOU, J. Y.; SAID, R. K. Preliminary analysis of the Vaisala TLS200 network deployed during the CHUVA campaign. In: CONFERENCE ON THE METEOROLOGICAL APPLICATIONS OF LIGHTNING DATA, 6., 2013. **Proceedings...** AMS, 2013. NACCARATO, K. P. Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total

Lightning Network (BrasilDAT). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2012. Vienna, Austria. **Proceedings...** 2012.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: http://urlib.net/sid.inpe.br/MTCm13@_80/2005/09.28.19.00

NACCARATO, K.P.; PINTO, O.; SLOOP, C.D.; HECKMAN, S.; LIU, C. Evaluation of BrasilDAT relative detection efficiency based on LIS observations and a numeric model. In: LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2014. **Proceedings...** IEEE, 2014. p.1814-1819.

OGAWA, T. Lightning currents. In: VOLLAND, H. (Ed). **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Bonn: Radioastronomical Institute, University of Bonn, CRC Press, 1994. v. 1, p. 93-136.

ORVILLE, R. E. Calibration of a magnetic direction finding network using measured triggered lightning return stroke peak currents. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n.D9, p. 17135-17142, Sept. 1991.

ORVILLE, R. E.; IDONE, V. P. Lightning leader characteristics in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). **Journal of Geophysical Research**, v.87, n.C13, p.11177-11192, 1982.

PARKER, N. G.; KRIDER, E. P. A portable, PC-based system for making optical and electromagnetic measurements of lightning. **Journal of Applied Meteorology**, v. 42, n. 6, p. 739-751, 2003.

PINTO JUNIOR, P. J.; ALMEIDA PINTO, I. R. C. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A.; SABA, M. M. F.; SOLORZANO, N. N.; GUEDES, D. Return stroke peak current observations of negative natural and triggered lightning in Brazil. **Atmospheric Research**, v.76, n.1, p.493-502, 2005.

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 2008.110 p. ISBN 978-85-11-00112-9.

PINTO JUNIOR, O. **Lightning in the tropics**: from a source of fire to a monitoring system of climatic changes. London: Nova Science Publishers, 2009.

POPOV, M.; HE, S.; THOTTAPPILLIL, R. Reconstruction of lightning currents and return stroke model parameters using remote electromagnetic fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n.D19, p. 24469-24481, Oct. 2000.

QUICK, M. G.; KRIDER, E. P. Optical power and energy radiated by natural lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.118, n.4, p.1868-1879, 2013.

QUICK, M. G.; KRIDER, E. P. Optical emission and peak electromagnetic power radiated by negative return strokes in rocket-triggered lightning. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.136, p.80-85, 2015.

RACHIDI, F.; BERMUDEZ, J. L.; RUBINSTEIN, M.; RAKOV, V. A. On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems. **Journal of Electrostatics**, v.60,n.2/4, p.121-129, 2004.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **Journal Geophysical Research**, v. 99, p. 10745–10750, 1994.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 403-426, Nov. 1998.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. New York: Cambridge University Press, 2003. 687p. ISBN 978-0521583275.

RAKOV, V. A.; HUFFINES, G. R. Return stroke multiplicity of negative cloud to ground lightning flashes. **Journal of Applied Meteorology**, v.42, p.1455-1462, 2003.

SABA, M. M. F.; BELLAROTTI, M. G.; PINTO JUNIOR, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal Geophysical Research**, v. 111, p. D03101, 2006.

SABA, M. M.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.115, n.D24, e24201, 2010.

SARAIVA, A. C. V. **Estudo dos fatores determinantes das características dos raios negativos**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R.; HELSDON JUNIOR, J.; ORVILLE, R. E. Upward lightningflashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v.121, p.8493-8505, 2016. DOI:10.1002/2016JD025137.

SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; PINTO JUNIOR. 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 (USA) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v.115, p.D11102, 2010.

SARAIVA, A. C. V.; PINTO JUNIOR., O.; ZEPKA, G. S. RAMMER network observations during summer 2011/2012. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC); INTERNATIONAL LIGHTNING METEOROLOGY CONFERENCE (ILMC), 2012, Vaisala, Broomfield-Colorado, EUA. **Proceedings...** 2012.

SARAIVA, A. C. V.; CAMPOS, L. Z. S.; WILLIAMS, E.; ZEPKA, G. S.; PINTO JUNIOR, O.; HECKMAN, S.; BUZATO, T. S.; BAILEY, J.; MORALES, C. A.; BLAKESLEE, R. J. High speed video and electromagnetic analysis of two natural bipolar cloud-to-ground lightning flashes. **Journal Geophysical Research**, v.119, n.10, p.6105-6127, 2013.

SCHONLAND, B. F. J; COLLENS, H. Progressive lightning. **Proceedings of the Royal Society**, v. A143, p. 654-674, 1934.

SCHONLAND, B. F. J. The lightning discharge. **Handbuch der Physik**, v.22, p.576- 628, 1956.

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

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Charge structure and dynamics in thunderstorms. **Space Science Reviews**, v. 137, n. 1-4, p. 355-372, June 2008.

TAKAGI, N.; WANG, D.; WATANABE, T.; ARIMA, I.; TAKEUCHI, T.; SIMIZU, M.; KATURAGI, Y.; YOKOYA, M.; KAWASHIMA, Y. Expansion of the luminous region of the return stroke channel. **Journal of Geophysical Research**, v.103, p.14131–14134, 1998.

THOMSON, E. M. Exact expressions for electric and magnetic fields from a propagating lightning channel with arbitrary orientation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, D18, p. 22293-22300, Sept. 1999.

UMAN, M.A.; MCLAIN, D.K. Magnetic field of lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 28, p. 6899-6910, 1969.

UMAN, M.A.; MCLAIN, D.K.; KRIDER, E.P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33-38, 1975a.

UMAN, M.A.; BRANTLEY, R.D.; LIN, Y.T.; TILLER, J.A. Correlated electric and magnetic fields from lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 3, p. 373-376, 1975b.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. v. 39, 377p. ISBN 0-12-708350-2.

VAISALA. **LP series (LP2000, LP5000)**: user's guide. Helsinki, 2003. (M210412EN-B).

VAYANGANIE, S. A.; FERNANDO, M.; SONNADARA, U. Luminosity variation during propagation of lightning cChannels. **Proceedings of Technical Sessions**, v.29, p. 15-22, 2013.

WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; RAMBO, K. J.; STAPLETON, M. V. A comparison of channel-base currents and optical signals for rocket-triggered lightning strokes. **Atmospheric Research**, v.76, n.1, p.412-422, 2005.

Wang, D.; TAKAGI, N. A downward positive leader that radiated optical pulses like a negative stepped leader. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.116,n.D10, e10205, 2011.

WACKER, R. S.; ORVILLE, R. E. Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 US National Lightning Detection Network upgrade: 1. observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.104, n.D2, p.2151-2157, 1999.

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v.94, n.D11, p.13151-13167, 1989.

WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics: the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v.15, p.S91-S108, 2006.

YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; SUZUKI, T.; KANAO, S. Winter lightning on Japan Sea coast-development of measuring system on progressing feature of lightning discharge. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.5, n.3, p.1418-1425, 1990.

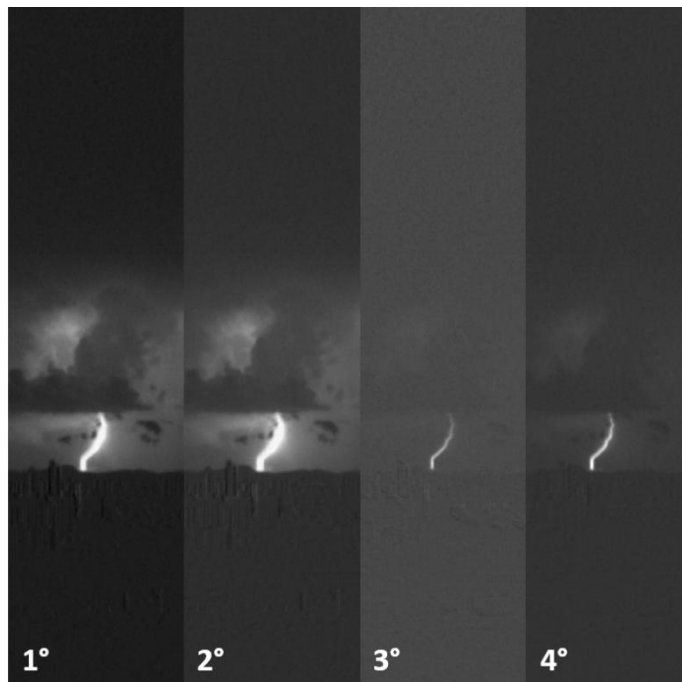
ZHOU, E.; LU, W.; ZHANG, Y.; ZHU, B.; ZHENG, D.; ZHANG, Y. Correlation analysis between the channel current and luminosity of initial continuous and continuing current processes in an artificially triggered lightning flash. **Atmospheric Research**, v.129, p.79-89, 2013.

Zhu, Y.; RAKOV, V. A.; TRAN, M. D.; STOCK, M. G.; HECKMAN, S.; LIU, C.; SLOOP, C. D.; JORDAN, D. M.; UMAN, M. A.; CAICEDO, J. A.;KOTOVSKY, D. A. Evaluation of ENTLN performance characteristics based on the ground truth natural and rocket-triggered lightning data acquired in Florida. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.122, n.18, p.9858-9866, 2017.

APÊNDICE A - CASOS COM CORRELAÇÃO BOA (CAMPANHA 2011/2012)

Casos com boa correlação entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2011/2012 (Brasil)

Figura A.1 – Caso 13 de março de 2012, 18:32:14 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/02/2012 às 18:32:14 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.2 - Luminosidade x pico de corrente (13/02/2012, 18:32:14 UTC)

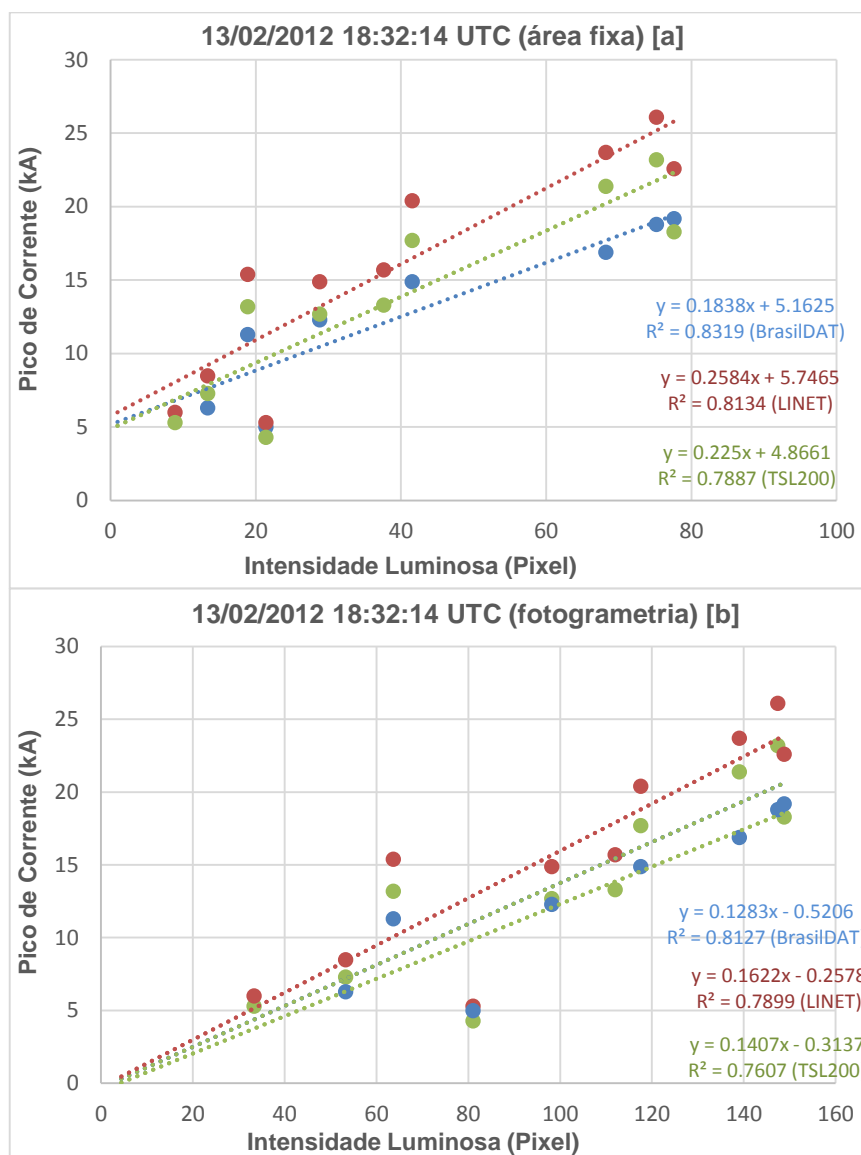
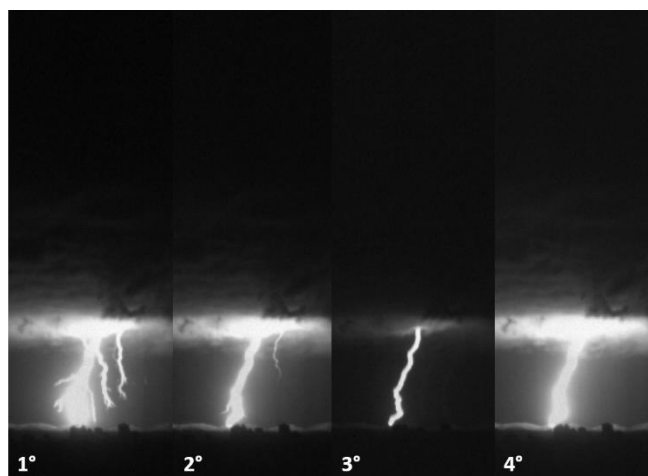


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul), LINET (vermelho) e TSL200 (verde)

Fonte: Produção do autor

Figura A.3 – Caso 02 de março de 2012, 19:44:48 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 02/03/2012 às 19:44:48 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.4 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 19:44:48 UTC)

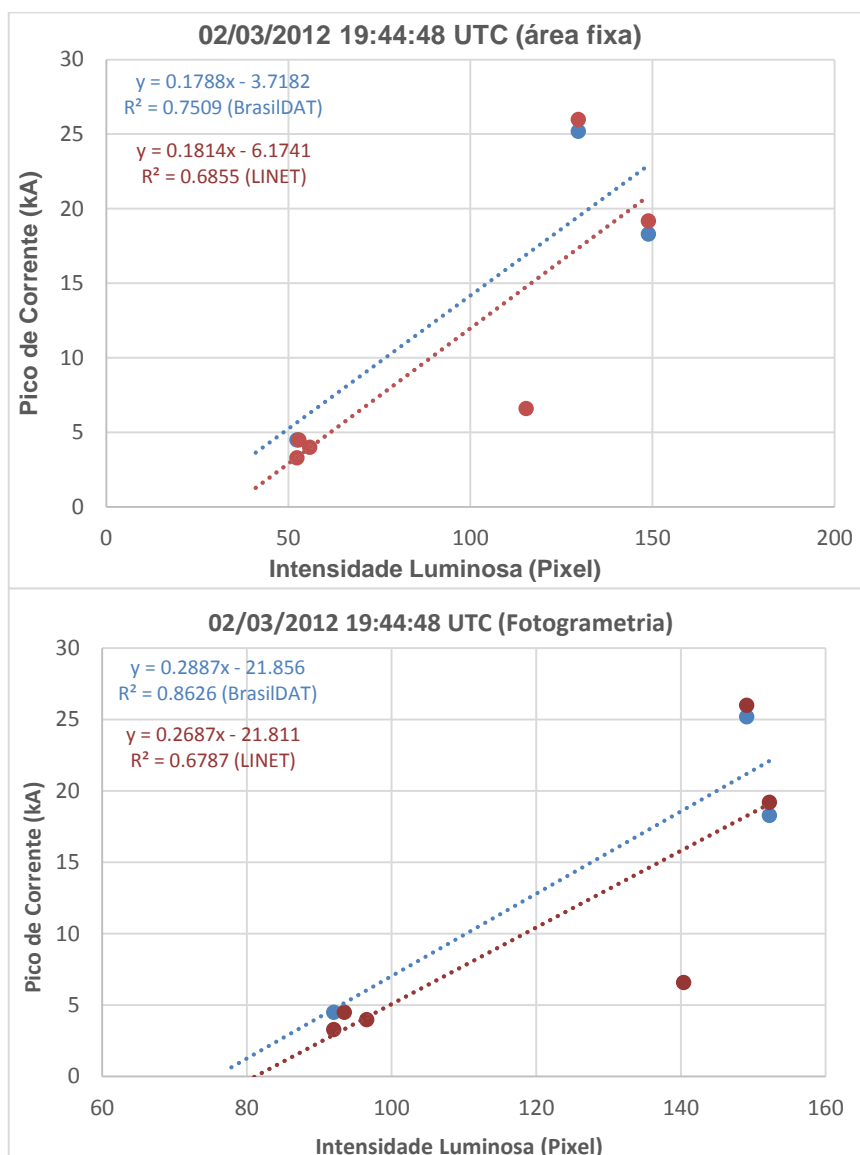
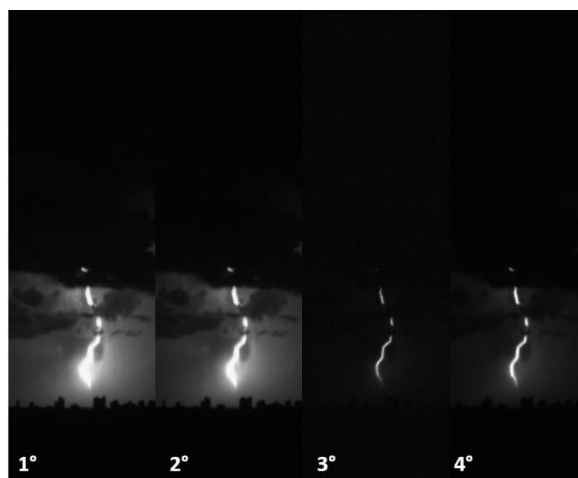


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 19:44:48 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho).

Fonte: Produção do autor

Figura A.5 – Caso 02 de março de 2012, 21:13:16 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 02/03/2012 às 21:13:16 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.6 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:13:16 UTC)

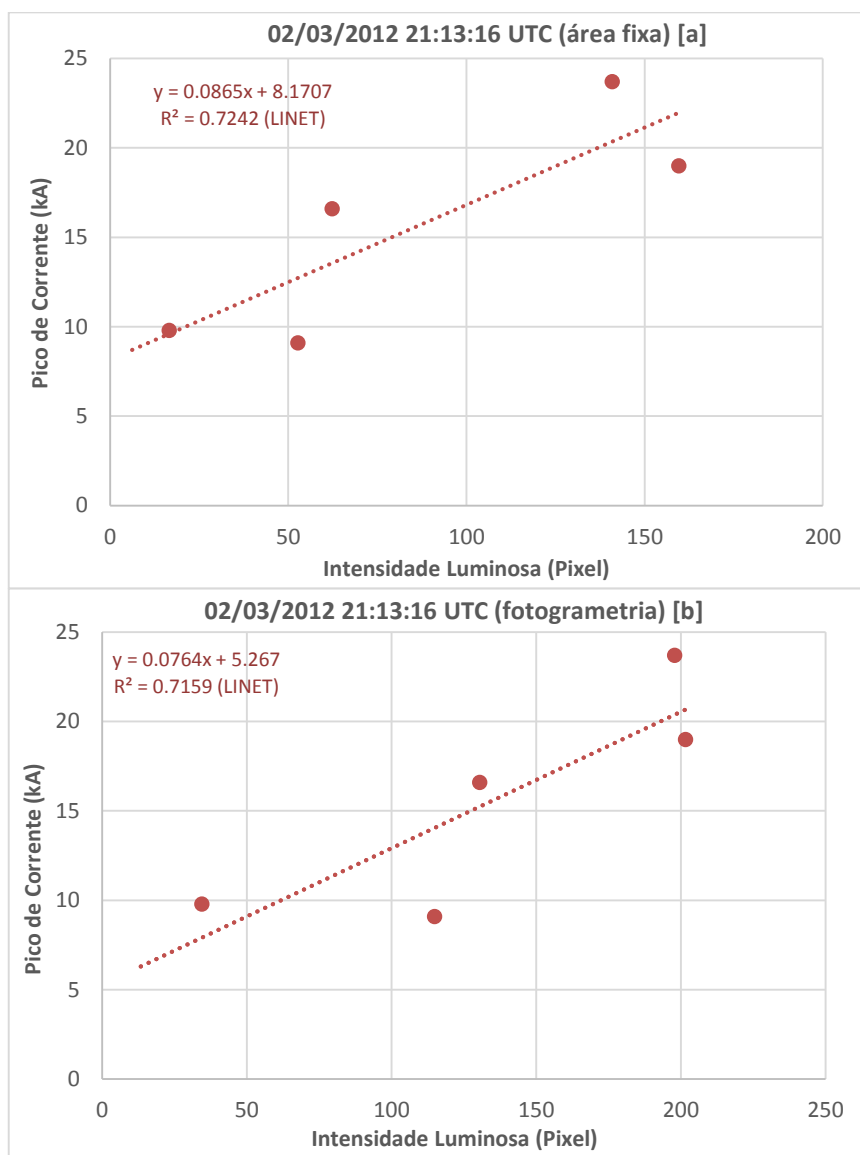
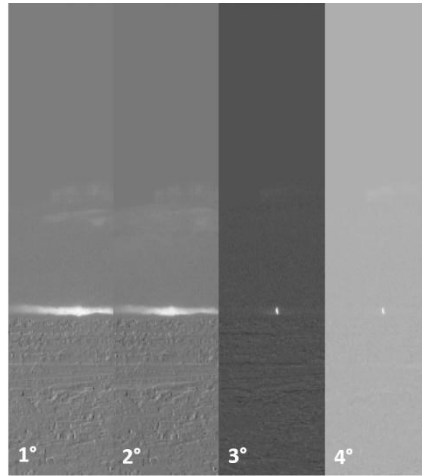


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 21:13:16 UTC, detectadas pela rede LINET (vermelho).

Fonte: Produção do autor

Figura A.7 – Caso 23 de fevereiro de 2012, 14:42:10 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 23/02/2012 às 14:42:10 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.8 - Luminosidade x pico de corrente (23/02/2012, 14:42:10 UTC)

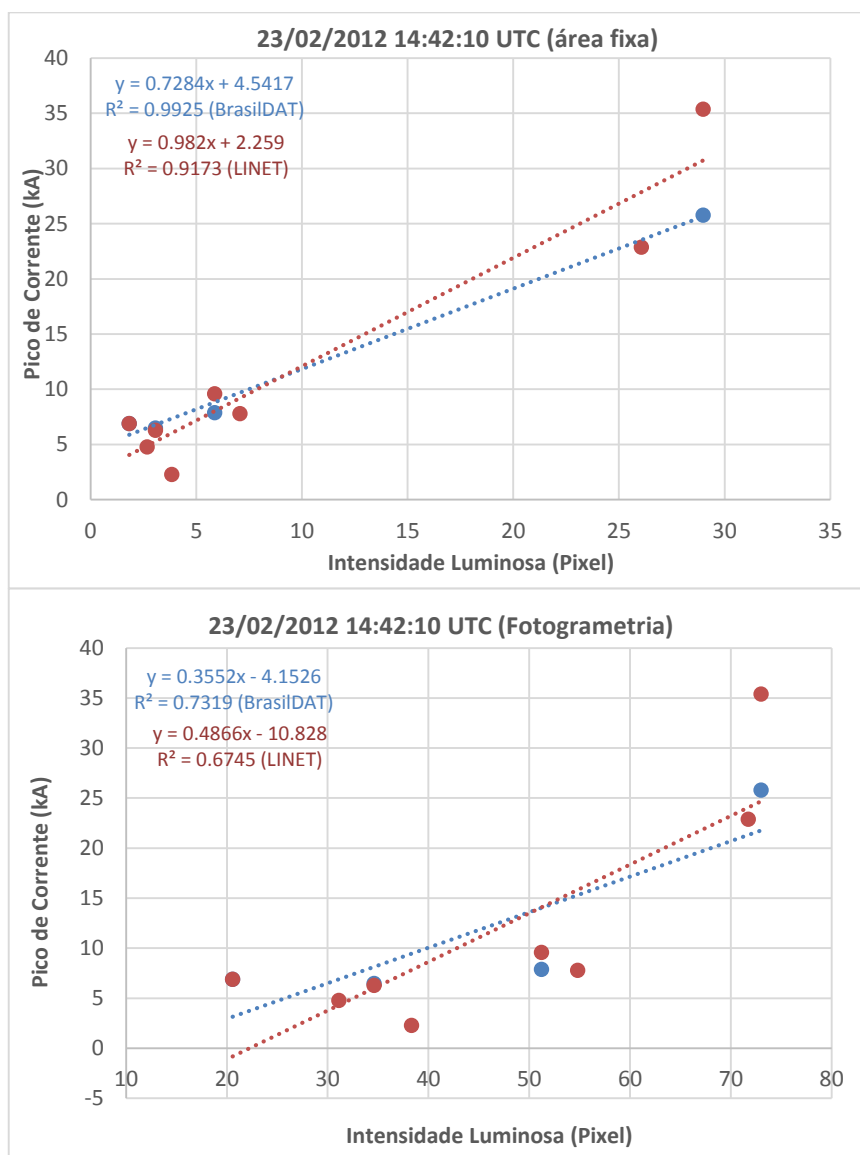
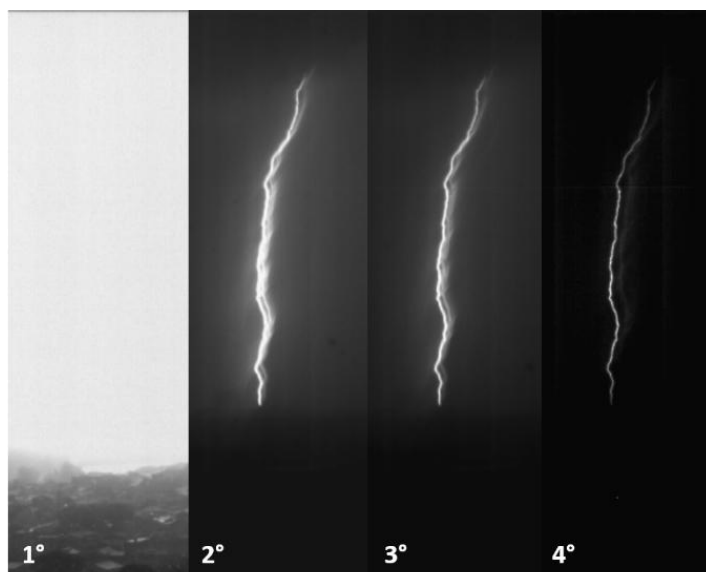


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 19:44:48 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho).

Fonte: Produção do autor

Figura A.9 – Caso 24 de fevereiro de 2012, 20:02:27 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 24/02/2012 às 20:02:27 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.10 - Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 20:02:27 UTC)

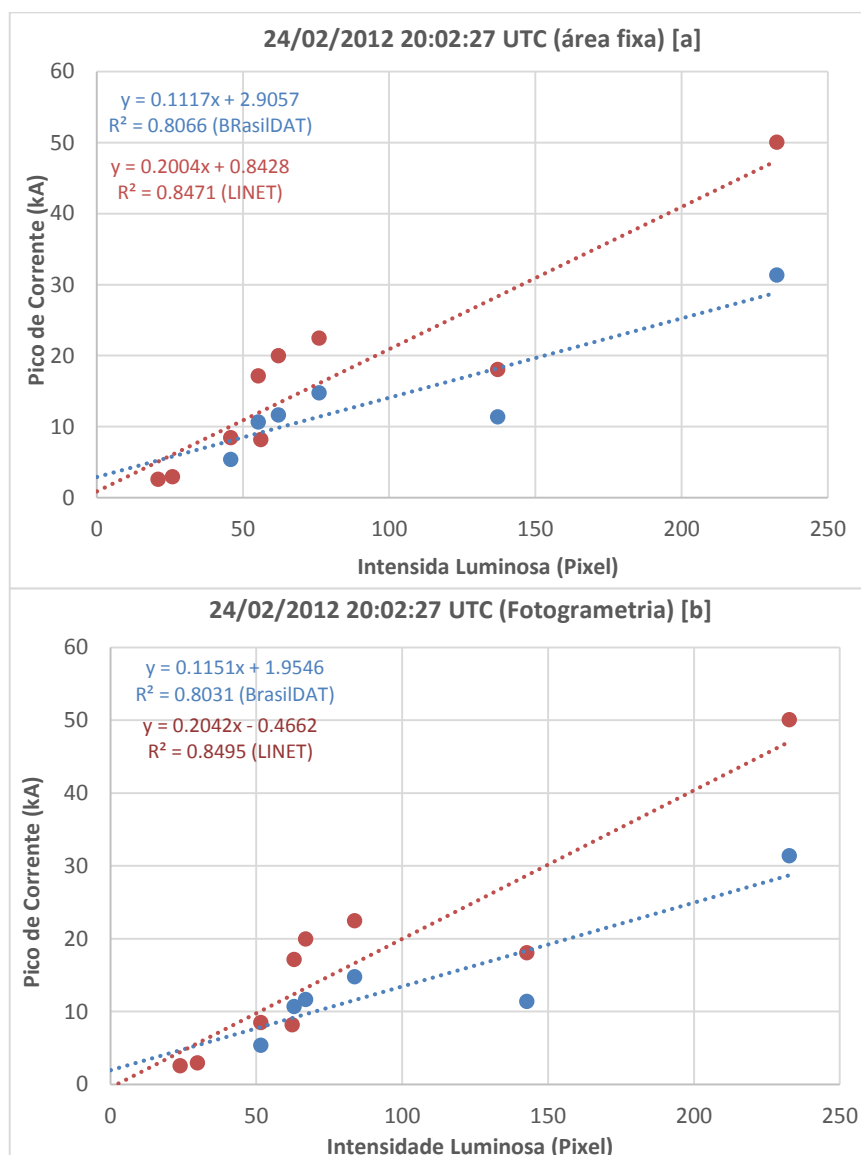
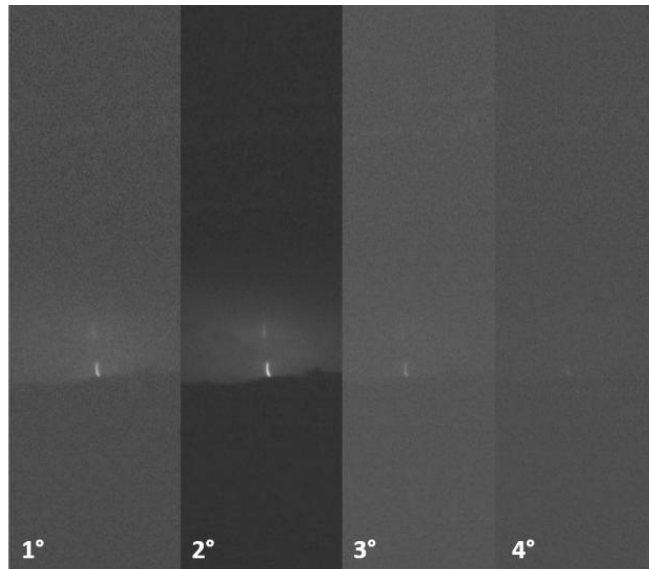


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 19:44:48 UTC, detectadas pelas redes BRasilDAT (azul) e LINET (vermelho).

Fonte: Produção do autor

Figura A.11 – Caso 13 de março de 2012, 19:18:16 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/03/2012 às 19:18:16 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.12 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:18:16 UTC)

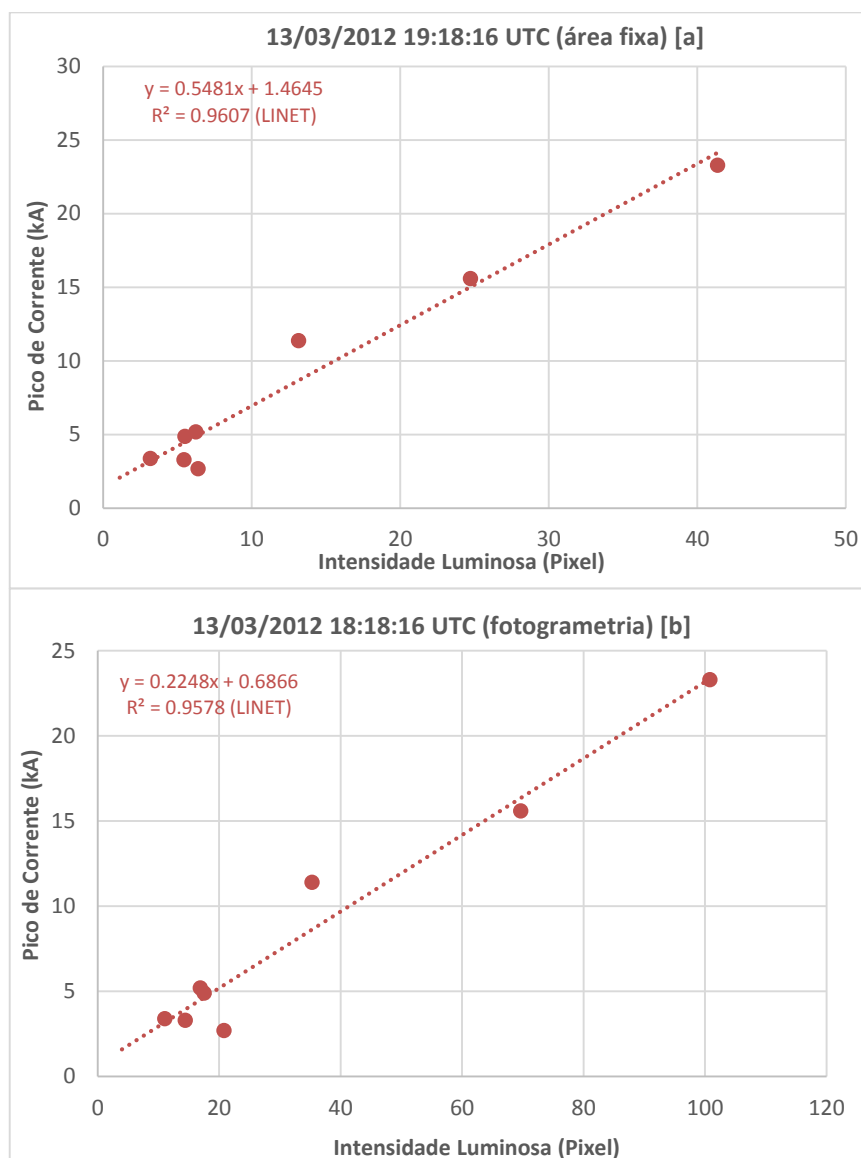
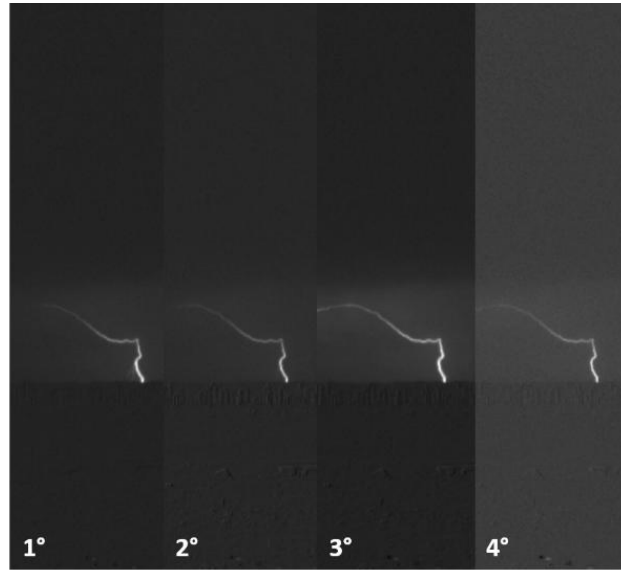


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 19:44:48 UTC, detectadas pela rede LINET (vermelho).

Fonte: Produção do autor

Figura A.13 – Caso 13 de março de 2012, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/03/2012 às 20:13:46 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.14- Luminosidade x pico de corrente (13/02/2012, 20:13:46 UTC)

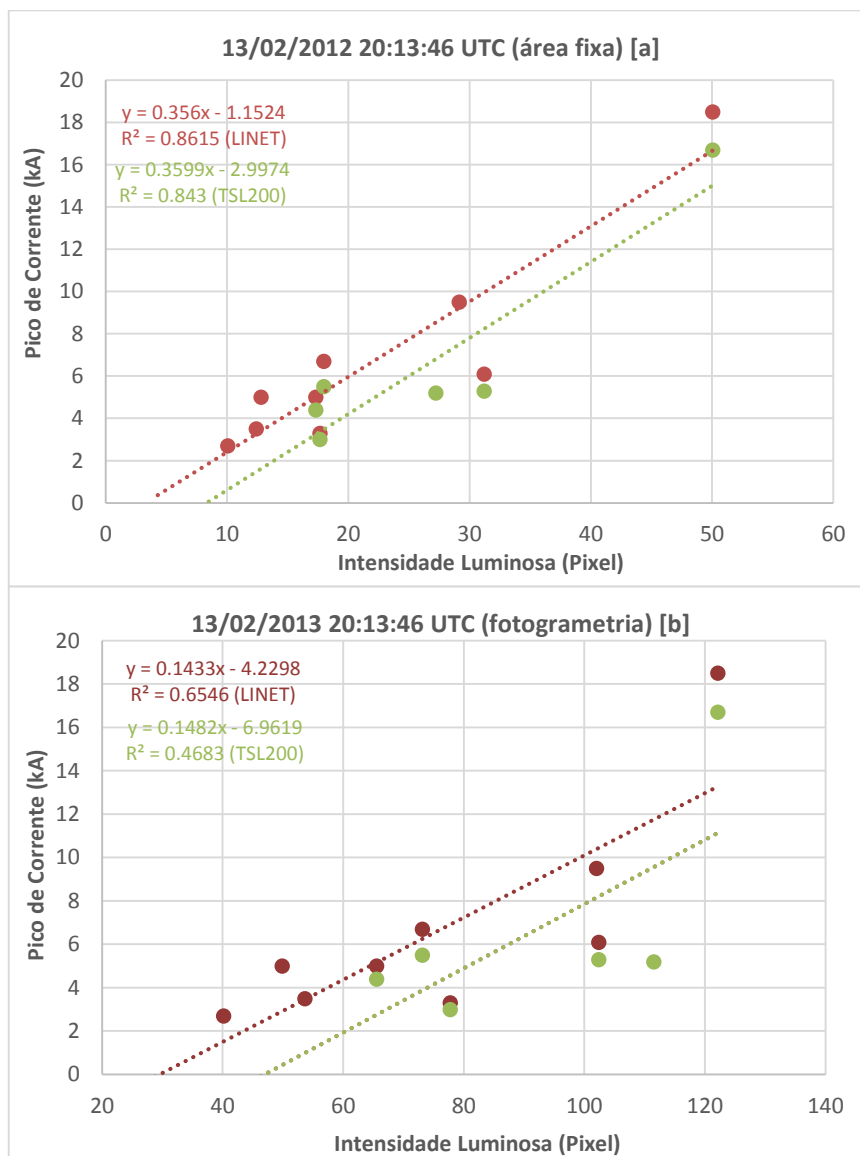
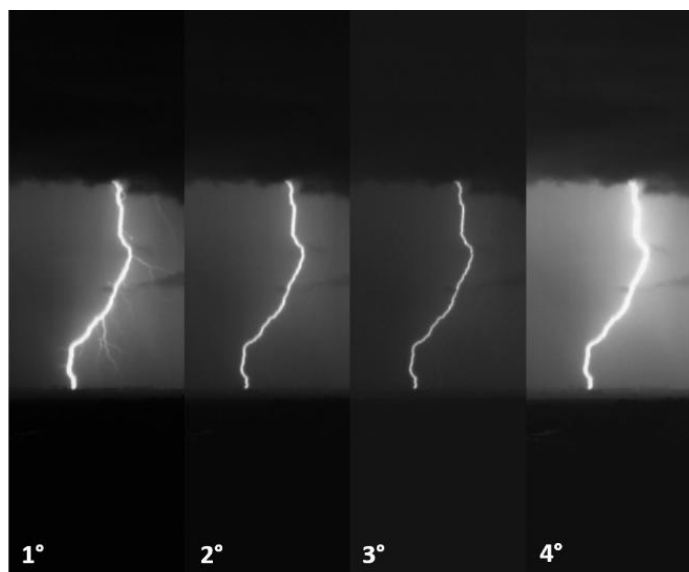


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC, detectadas pelas redes LINET (vermelho) e TSL200 (verde)

Fonte: Produção do autor

Figura A.15 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.16- Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 19:35:11 UTC)

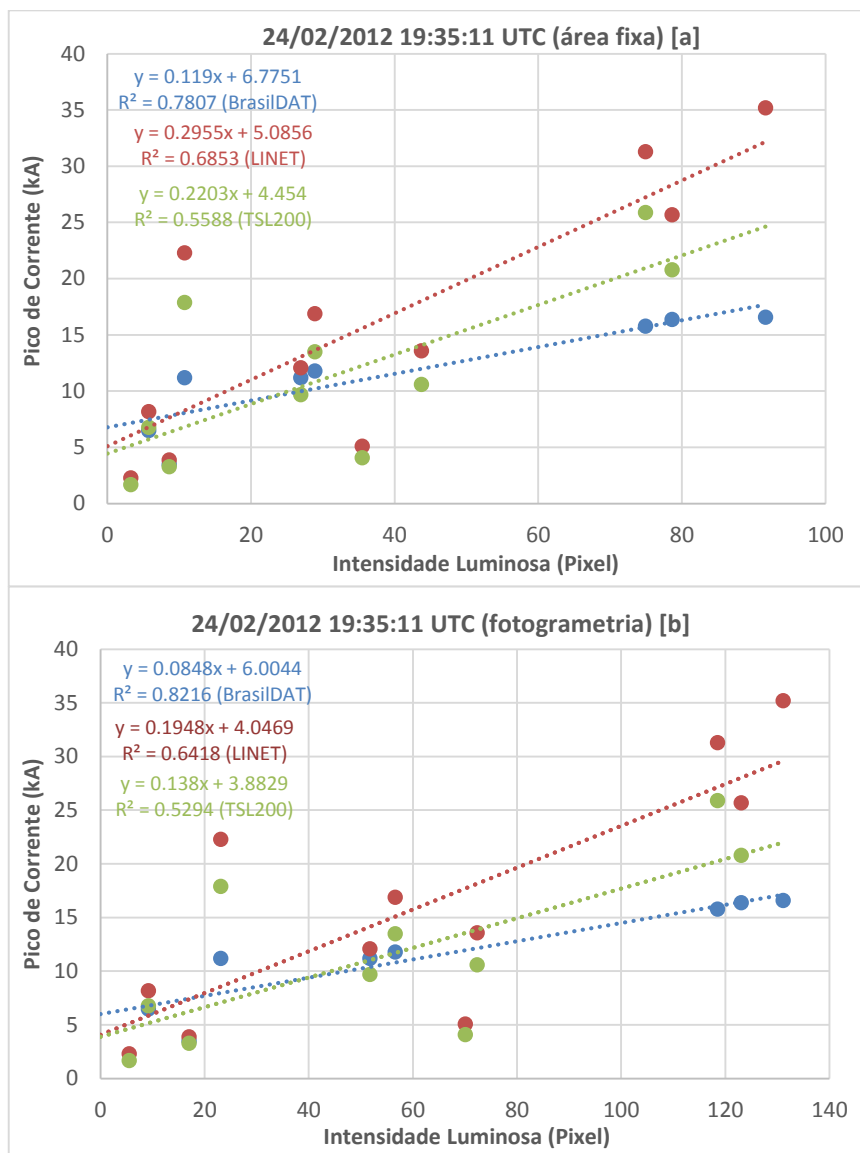
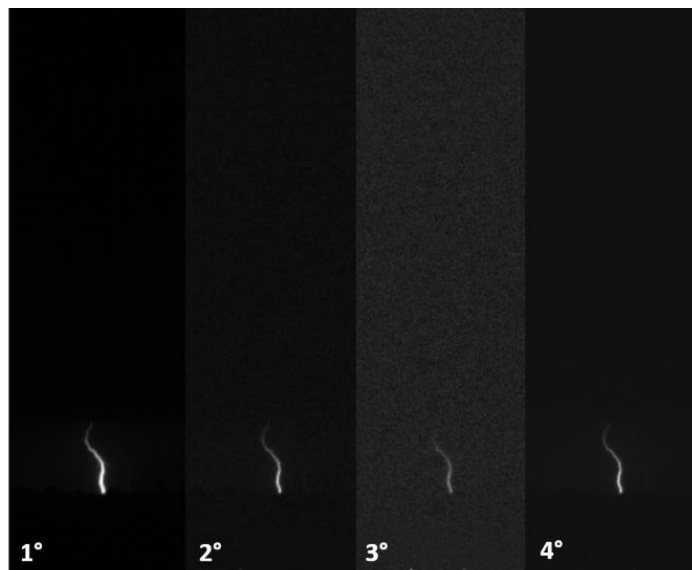


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC, detectados pelas redes BrasilDAT(azul), LINET (vermelho) e TSL200 (verde).

Fonte: Produção do autor

Figura A.17 – Caso 01 de dezembro de 2013, 19:34:40 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 01/12/2013 às 19:34:40 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.18 - Luminosidade x pico de corrente (01/12/2011, 19:34:40 UTC)

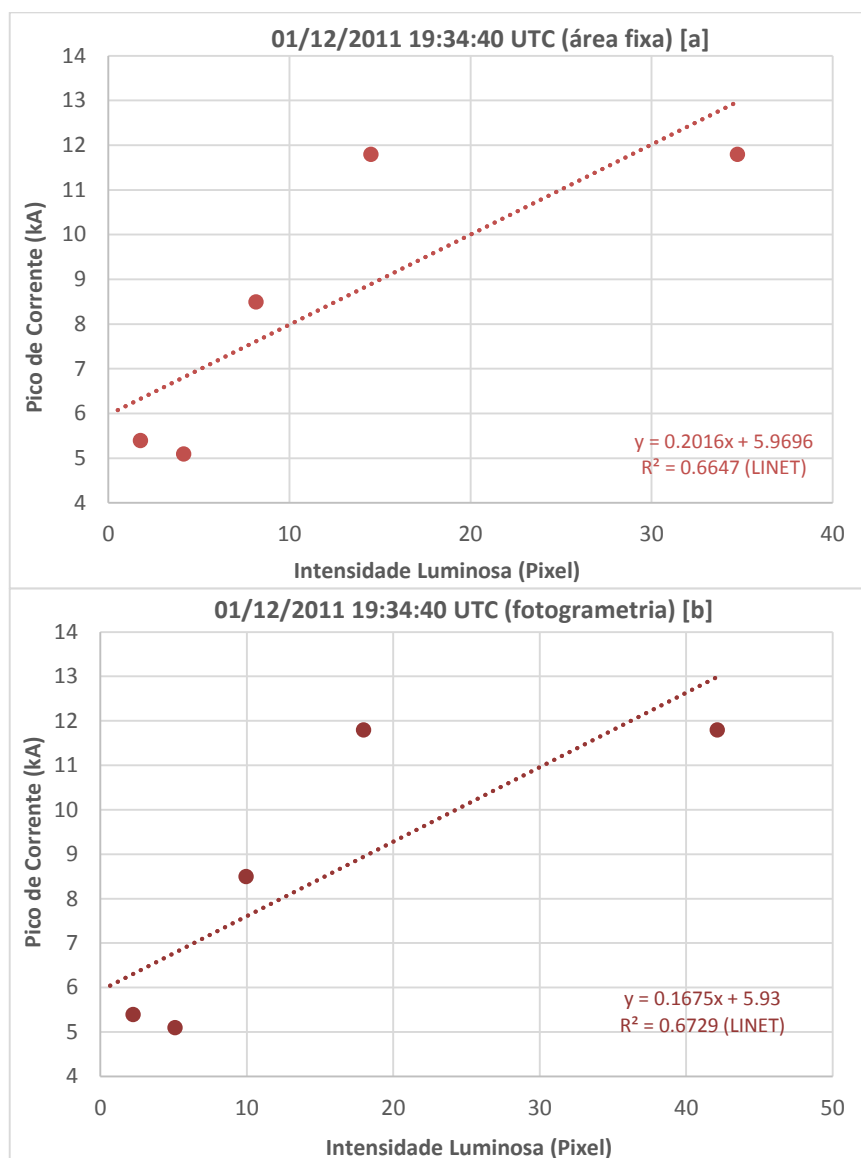


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 01/12/2011 às 19:34:40 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura A.19 – Caso 23 de fevereiro de 2012, 18:26:48 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 23/02/2012 às 18:26:48 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.20 - Luminosidade x pico de corrente (23/02/2012, 18:26:48 UTC)

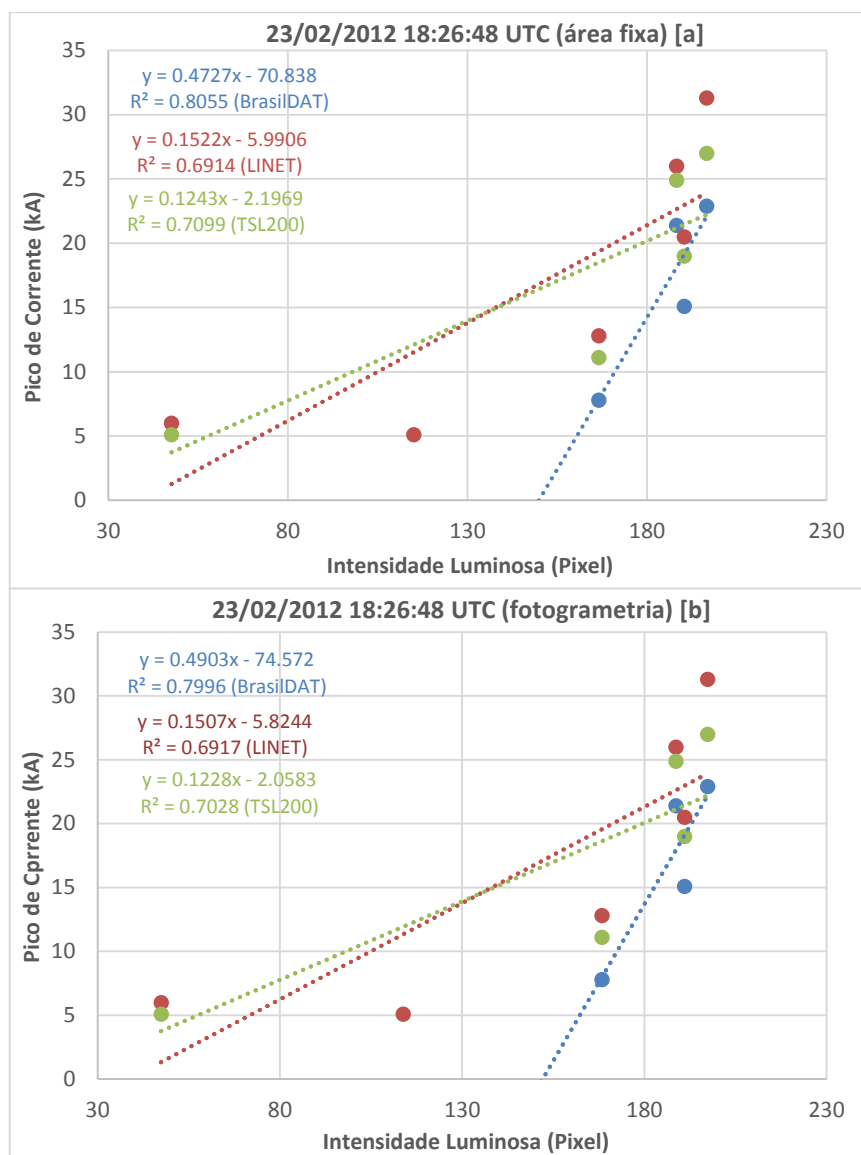
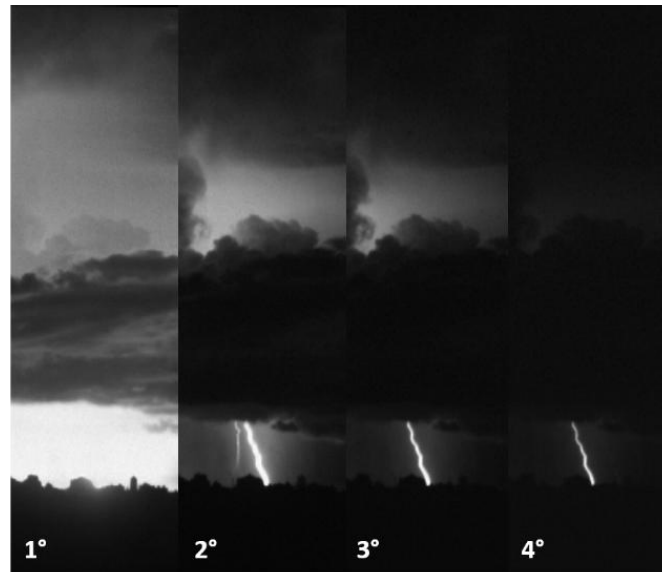


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC detectado pelas redes BrasilDAT (azul), LINET (vermelho) e LINET (verde)

Fonte: Produção do autor

Figura A.21 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.22 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)

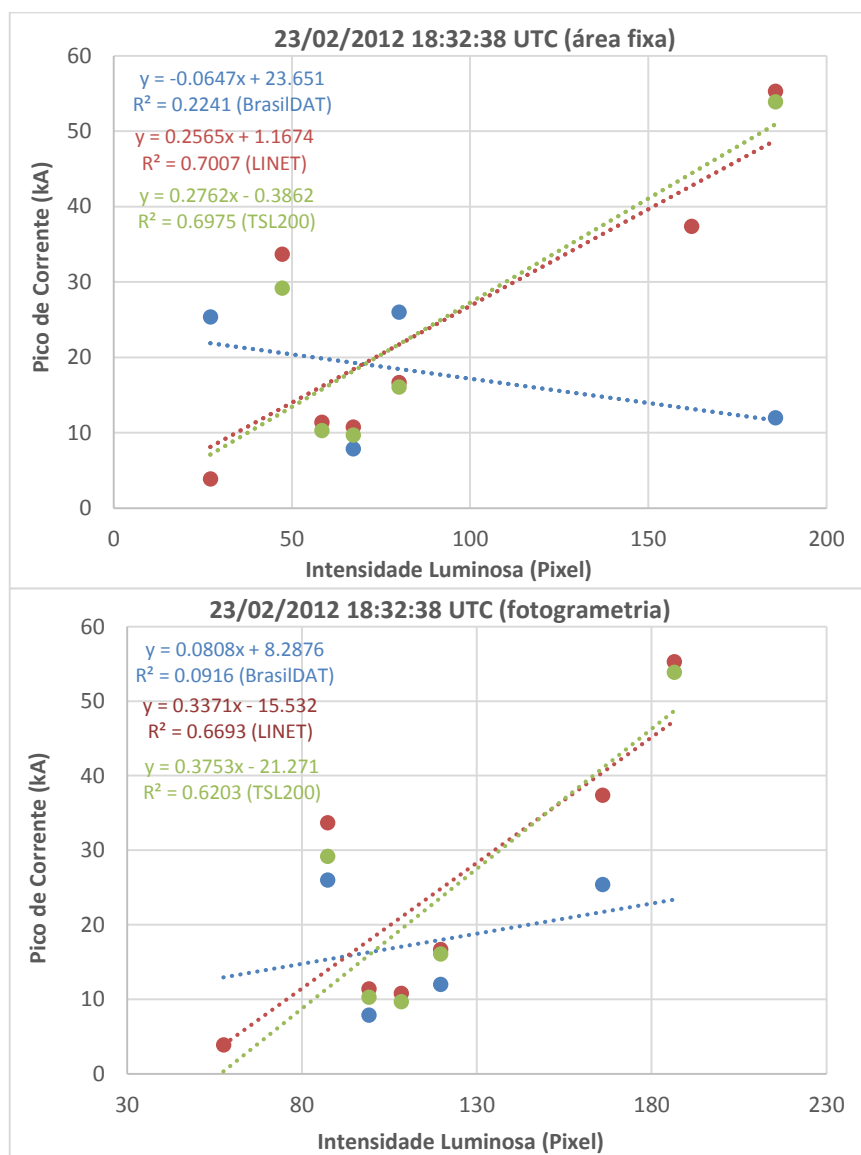
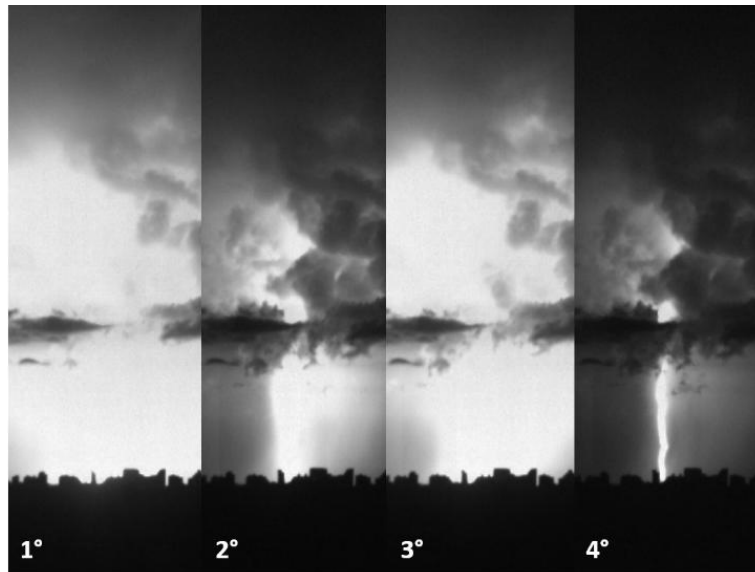


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura A.23 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.24 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)

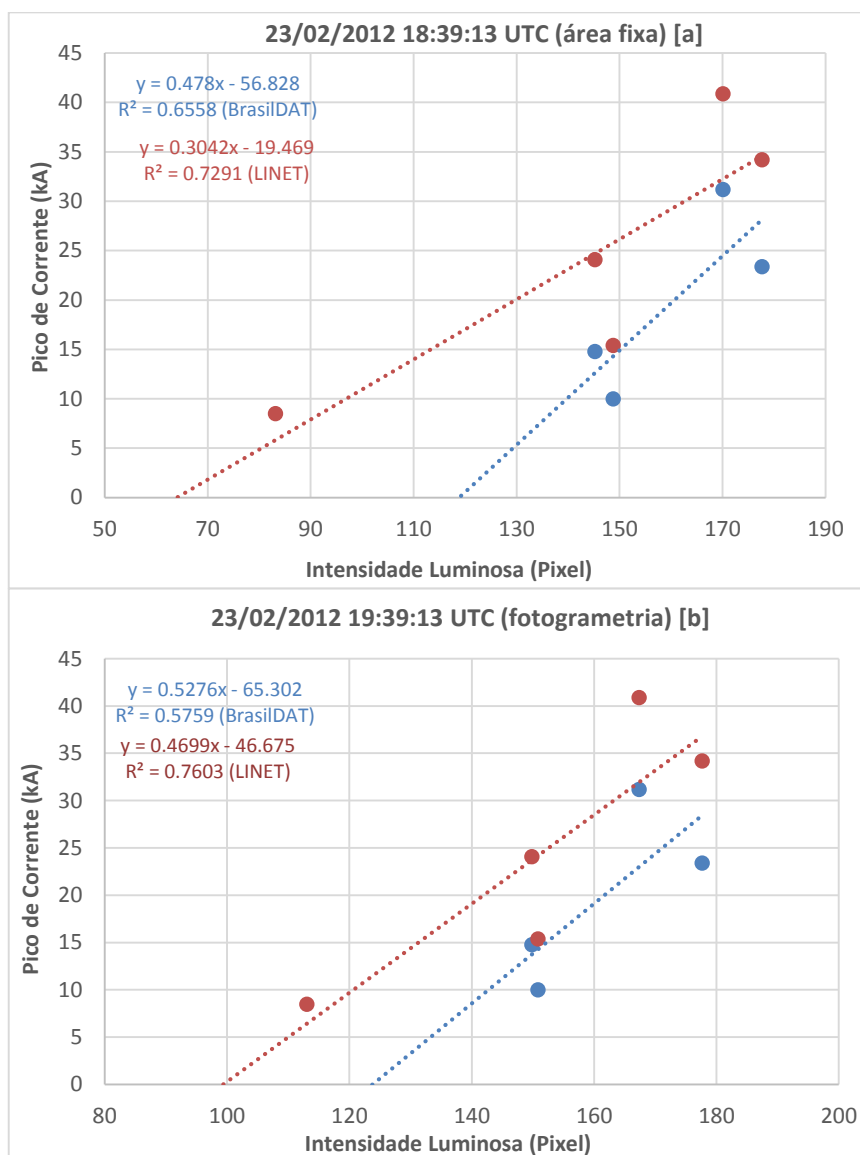
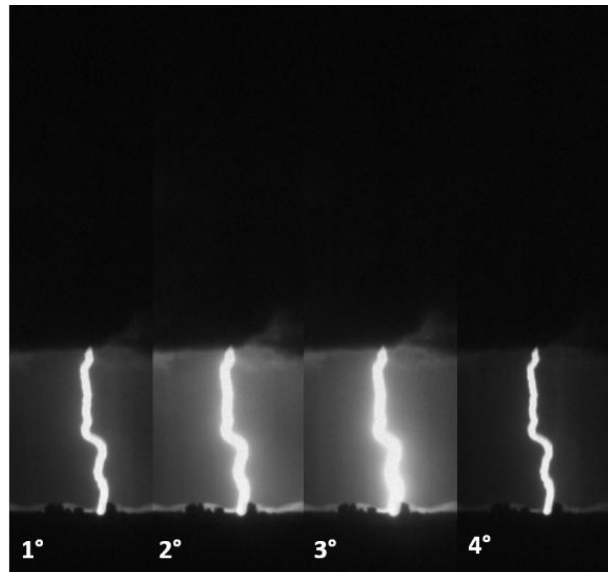


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura A.25 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.26 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 19:52:55 UTC)

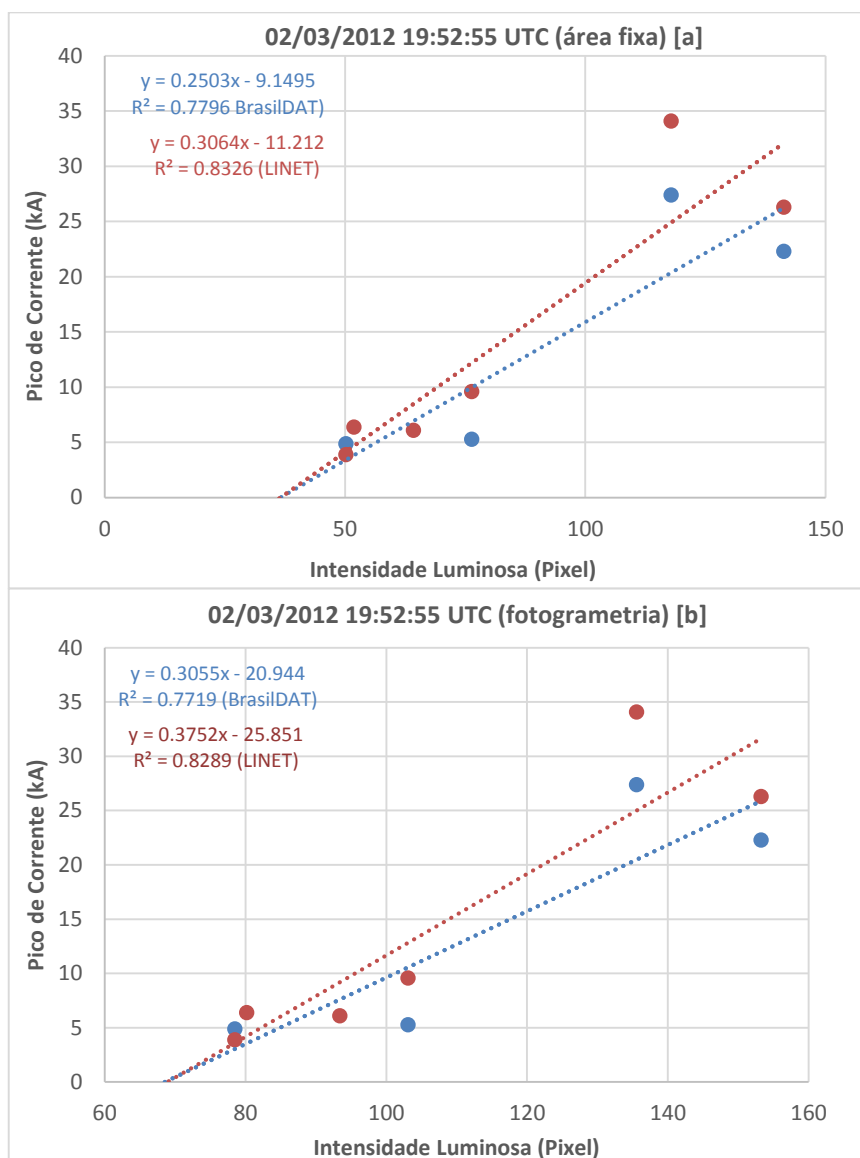
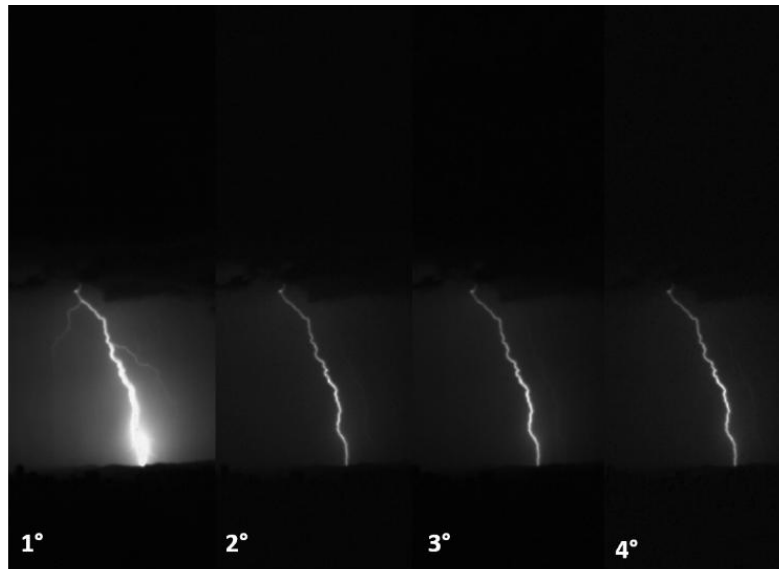


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 19:52:55 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho)..

Fonte: Produção do autor

Figura A.27 – Caso 02 de março de 2012, 21:77:53 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 02/03/2012 às 21:17:53 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.28 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)

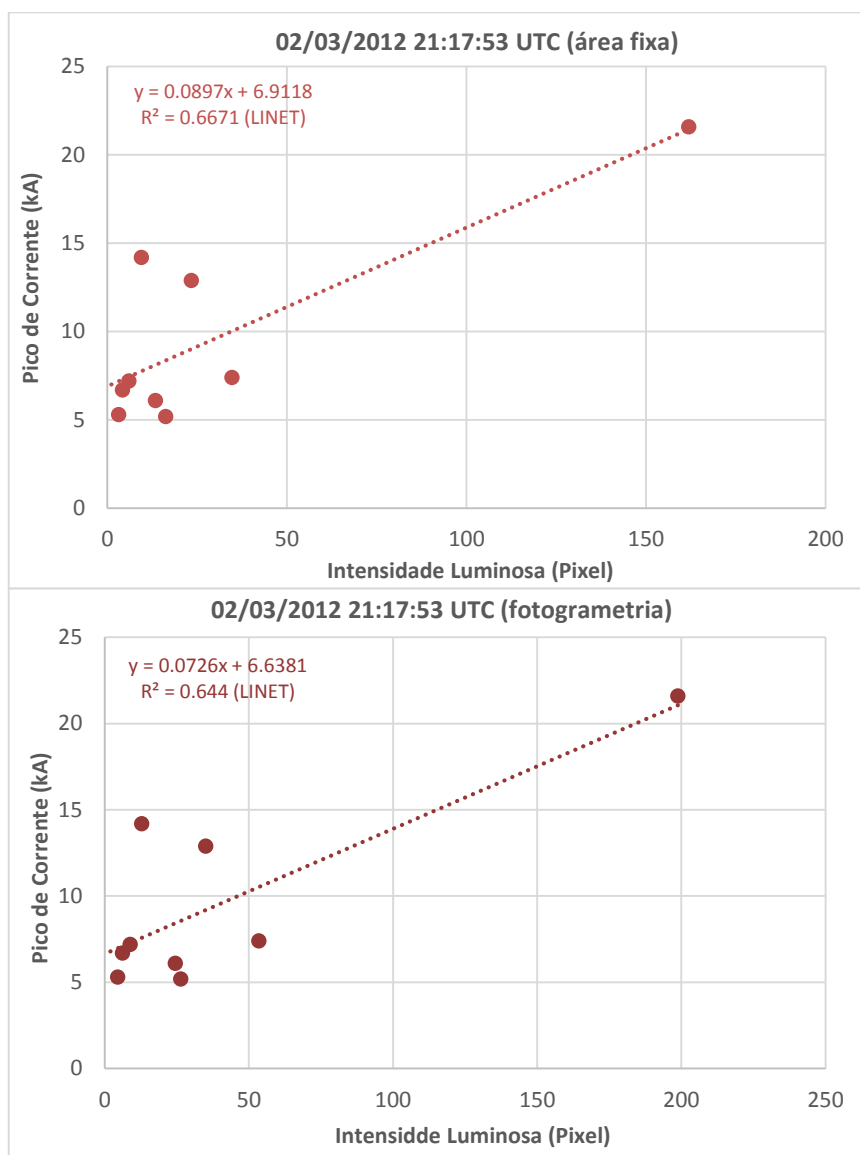
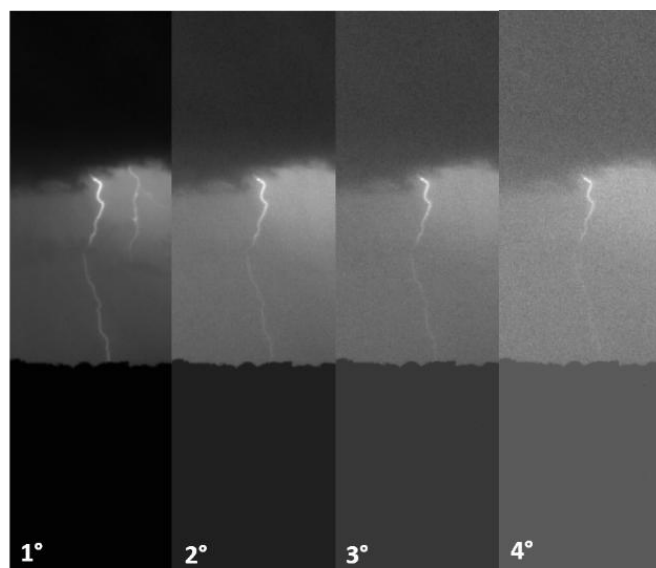


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 21:17:53 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura A.29 – Caso 24 de fevereiro de 2012, 19:40:37 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 24/02/2012 às 19:40:37 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura A.30 - Luminosidade x pico de corrente (24/02/2012, 19:40:37 UTC)

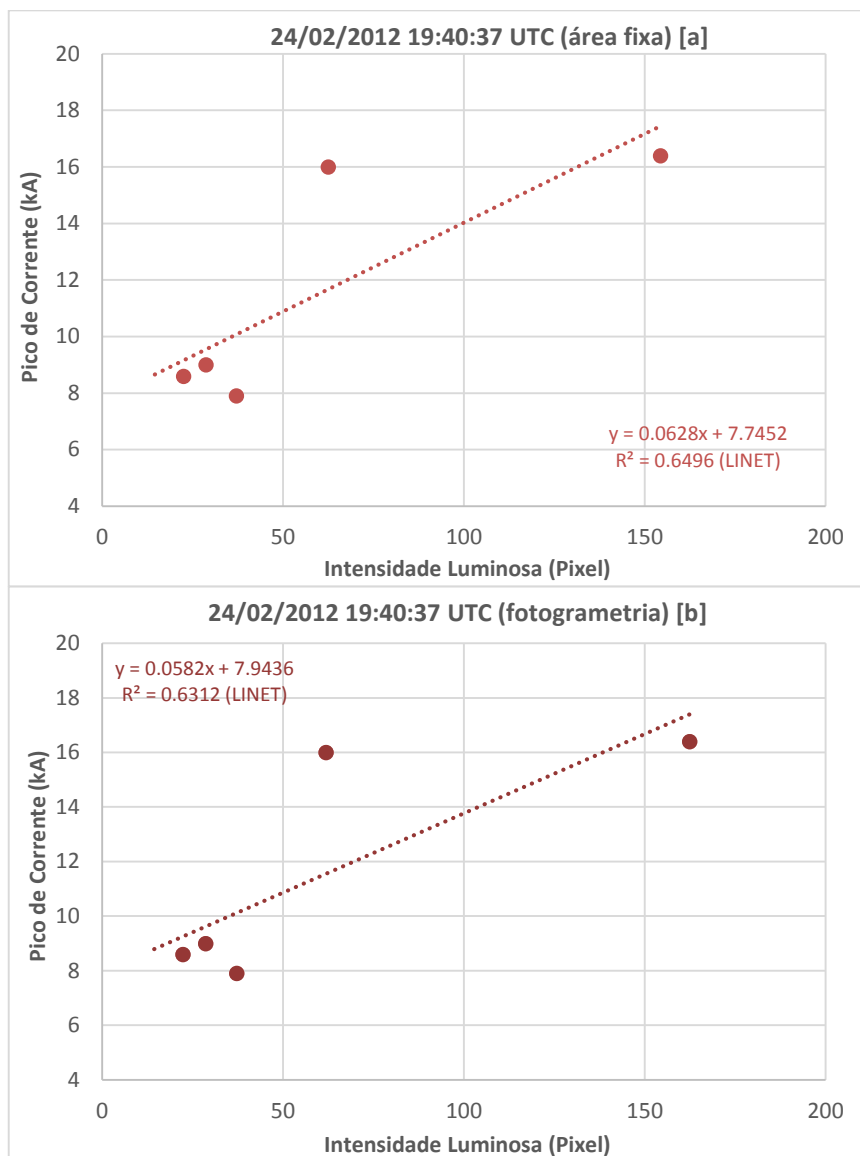


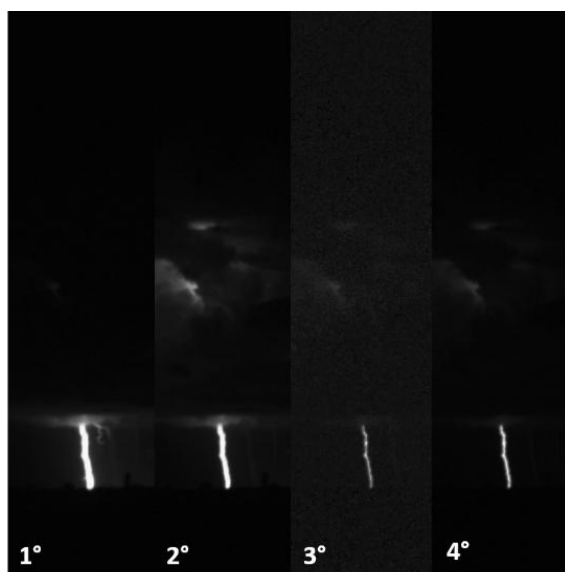
Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 24/02/2012 às 19:40:37 UTC.

Fonte: Produção do autor

APÊNDICE B - CASOS COM CORRELAÇÃO MÉDIA (CAMPANHA 2011/2012)

Casos considerados com correlação mediana entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2011/2012 (Brasil)

Figura B.1 – Caso 02 de fevereiro de 2012, 21:15:34 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 02/03/2012 às 21:15:34 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura B.2 - Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:15:34 UTC)

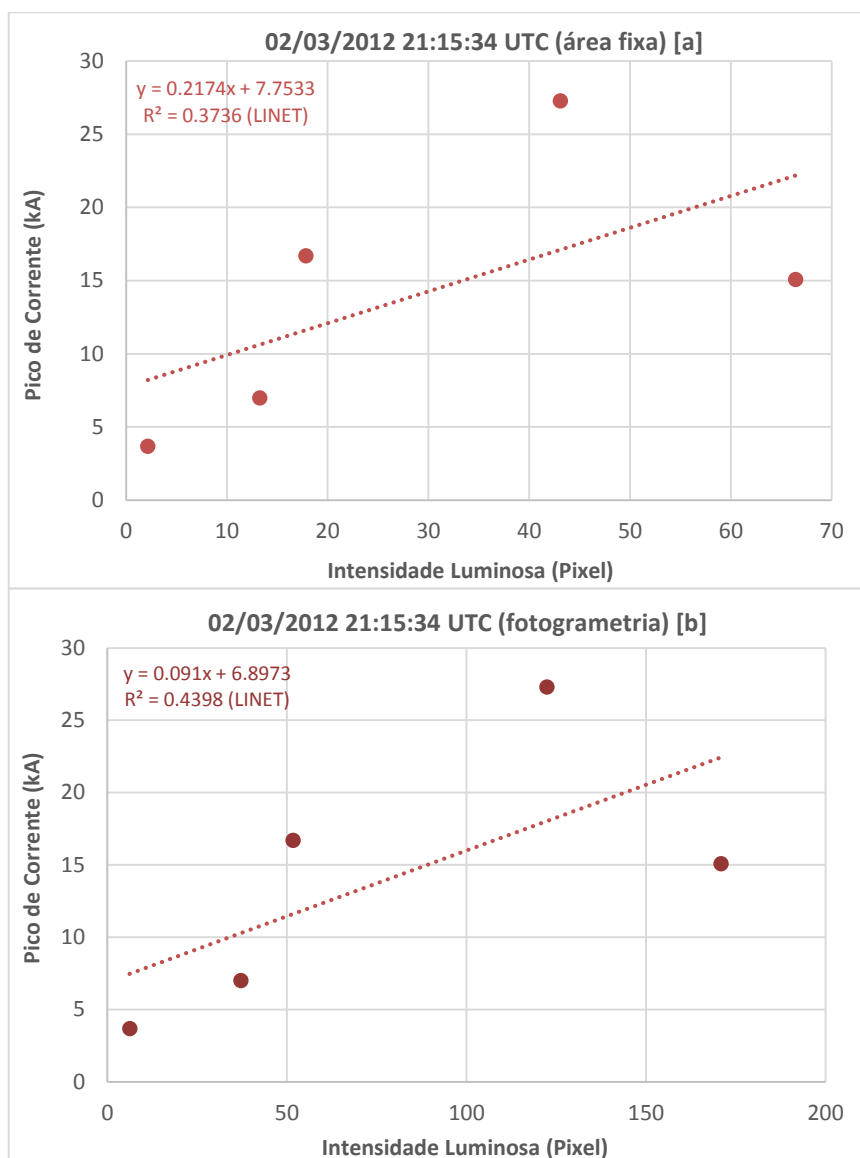
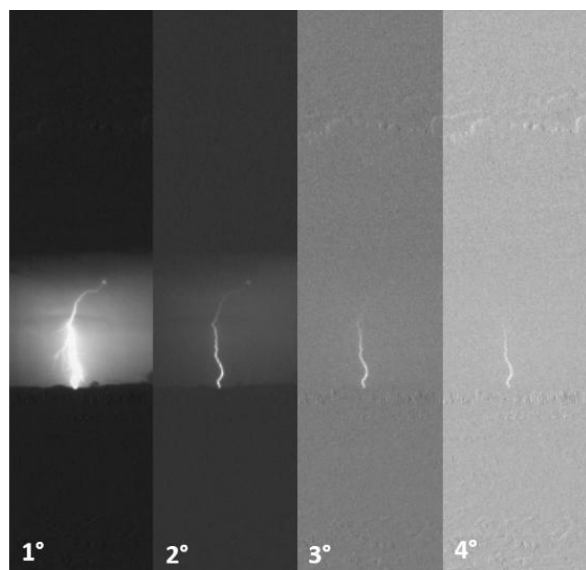


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura B.3 – Caso 13 de março de 2012, 19:20:21 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/03/2012 às 19:20:21 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura B.4 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:20:21 UTC)

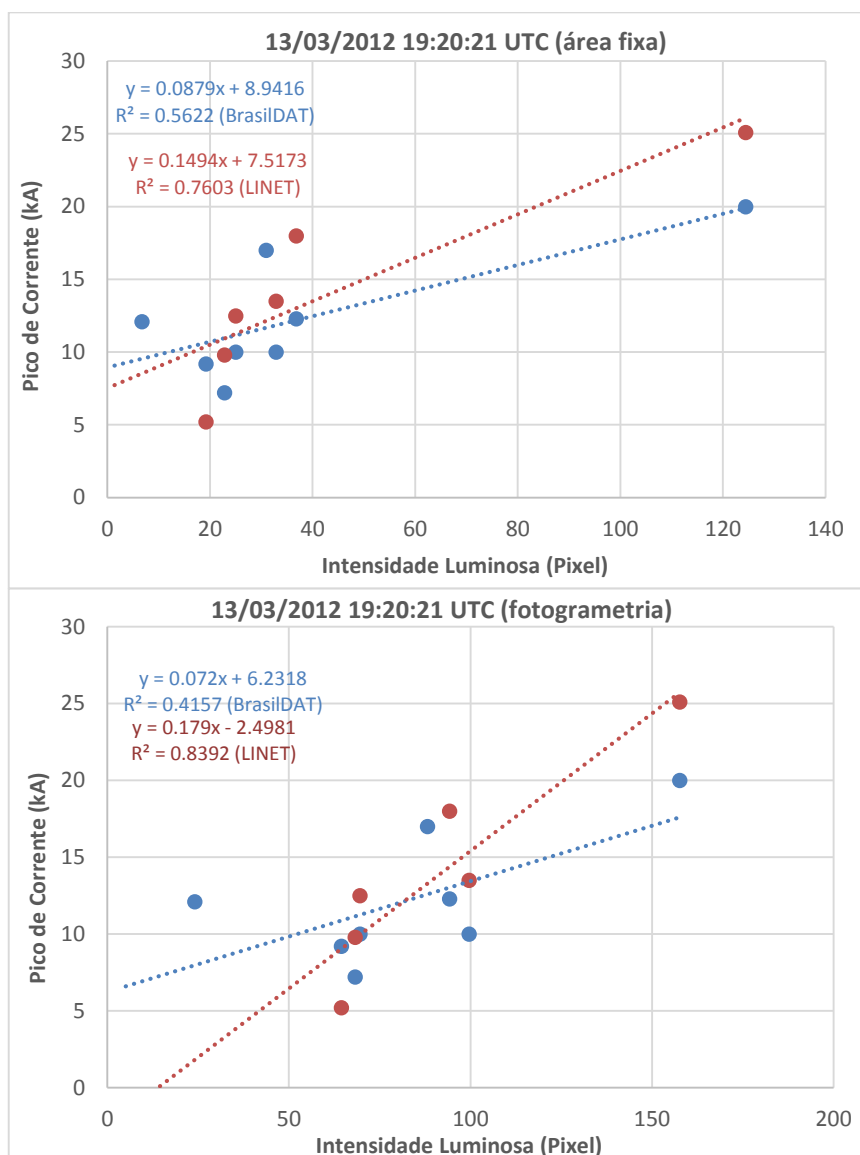
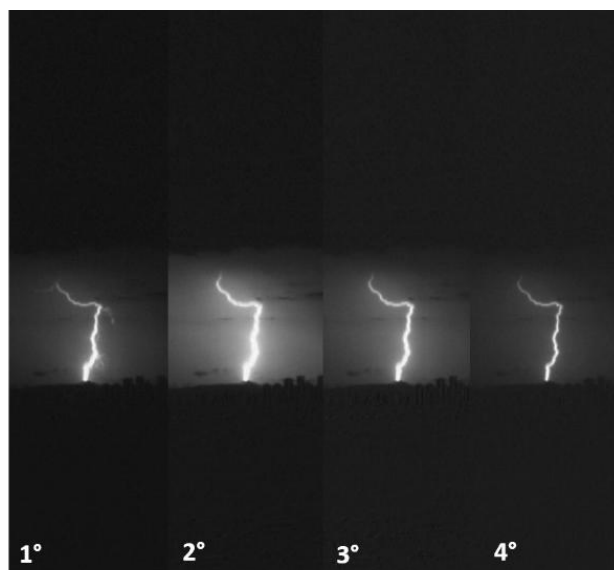


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho)

Fonte: Produção do autor

Figura B.5 – Caso 13 de março de 2012, 19:22:21 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/03/2012 às 19:22:21 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura B.6 - Luminosidade x pico de corrente (13/03/2012, 19:22:21 UTC)

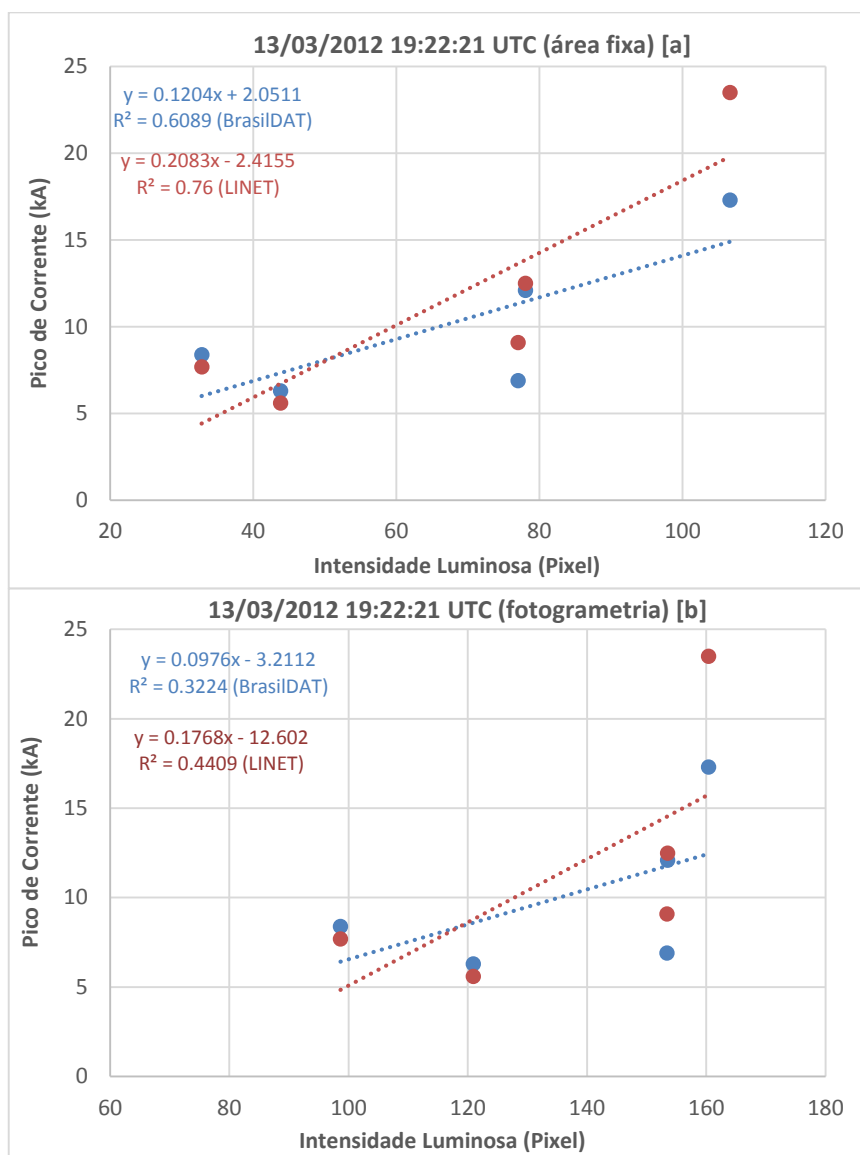


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho)

Fonte: Produção do autor

APÊNDICE C - CASOS COM CORRELAÇÃO RUIM (CAMPANHA 2011/2012)

Casos considerados com correlação ruim entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2011/2012 (Brasil)

Figura C.1 – Caso 02 de março de 2012, 21:10:31 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 02/03/2012 às 21:10:31 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura C.2- Luminosidade x pico de corrente (02/03/2012, 21:10:31 UTC)

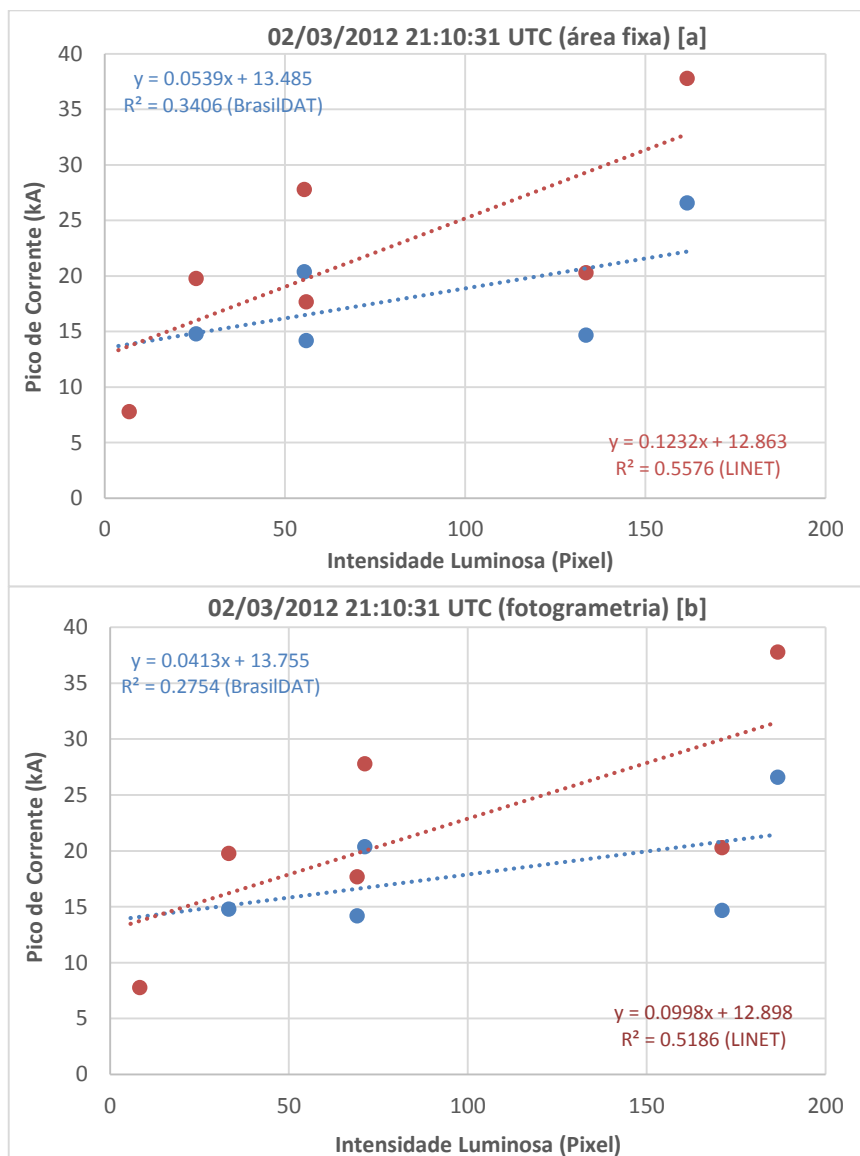


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 02/03/2012 às 21:10:31 UTC, detectadas pelas redes BrasilDAT (azul) e LINET (vermelho)

Fonte: Produção do autor

Figura C.3 – Caso 12 de março de 2012, 18:17:56 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 12/03/2012 às 18:17:56 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura C.4 - Luminosidade x pico de corrente (12/03/2012, 18:17:56 UTC)

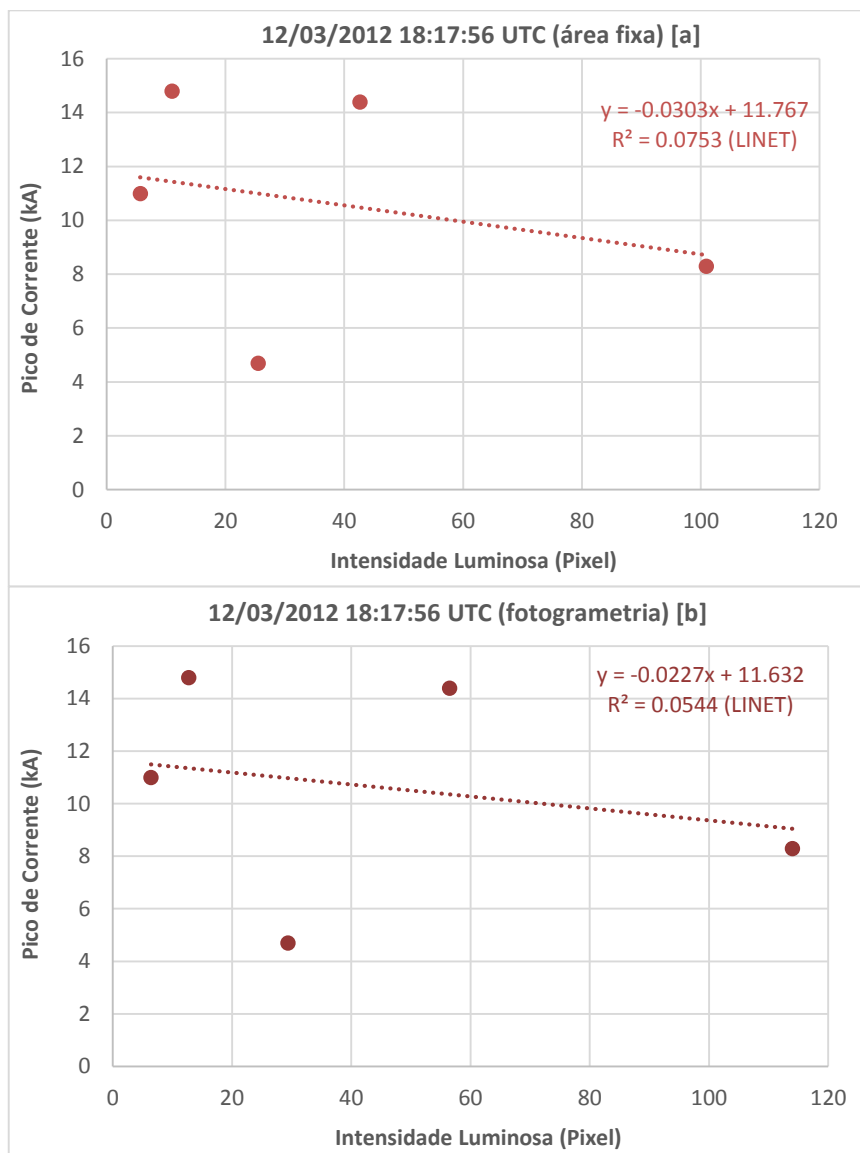
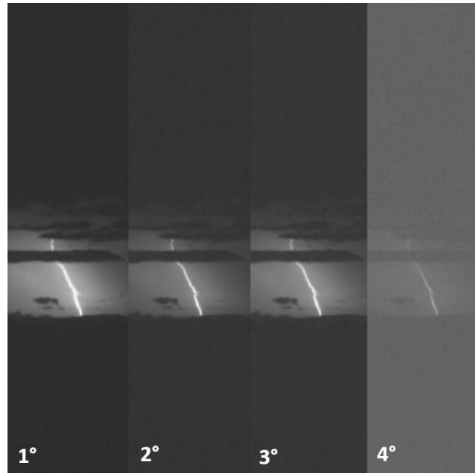


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 12/03/2012 às 18:17:56 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura C.5 – Caso 23 de março de 2012, 19:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 23/03/2012 às 19:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura C.6 - Luminosidade x pico de corrente (23/03/2012, 19:27:09 UTC)

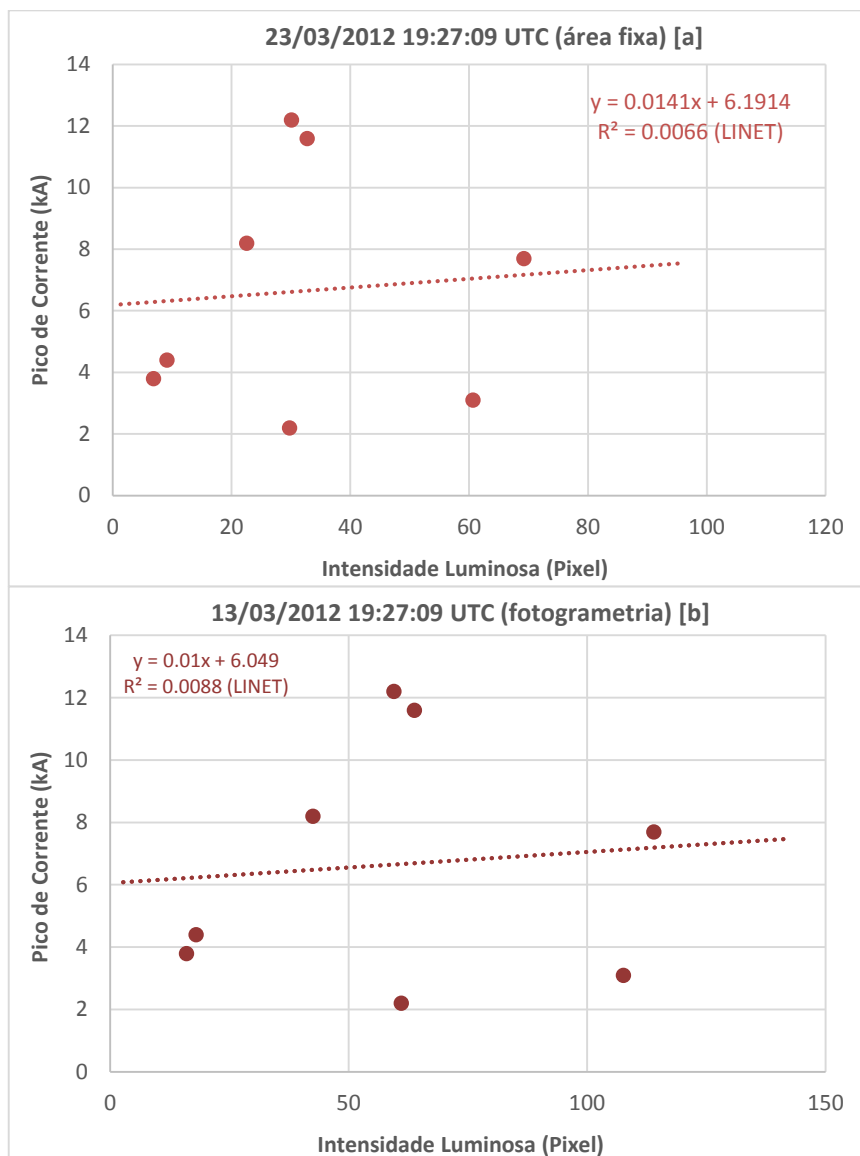


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (a) e fotogrametria (b), em relação ao pico de corrente (LINET) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 13/03/2012 às 19:27:09 UTC.

Fonte: Produção do autor

APÊNDICE D – CASOS CORRELAÇÃO BOA CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA)

Casos com boa correlação entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2012/2013, 2013/2014 (Brasil) e 2017 (EUA).

Figura D.1 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:27:09 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura D.2- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:27:09 UTC)

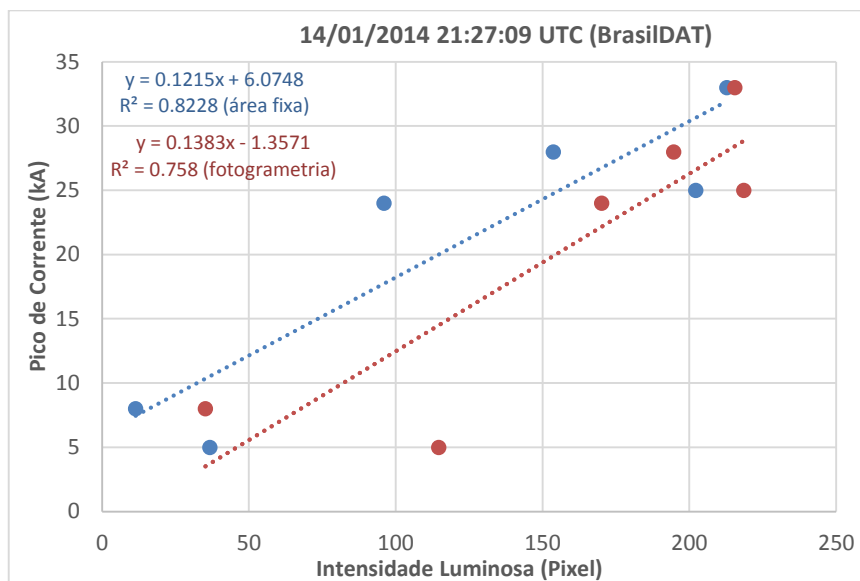
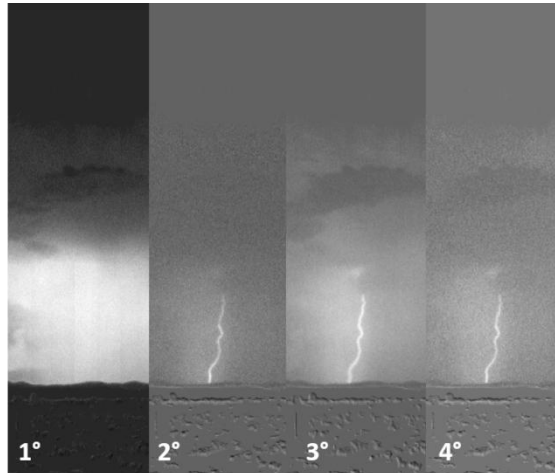


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:27:09 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.3 – Caso 14 de janeiro de 2014, 19:14:30 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 19:14:30 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura D.4- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 19:14:30 UTC)

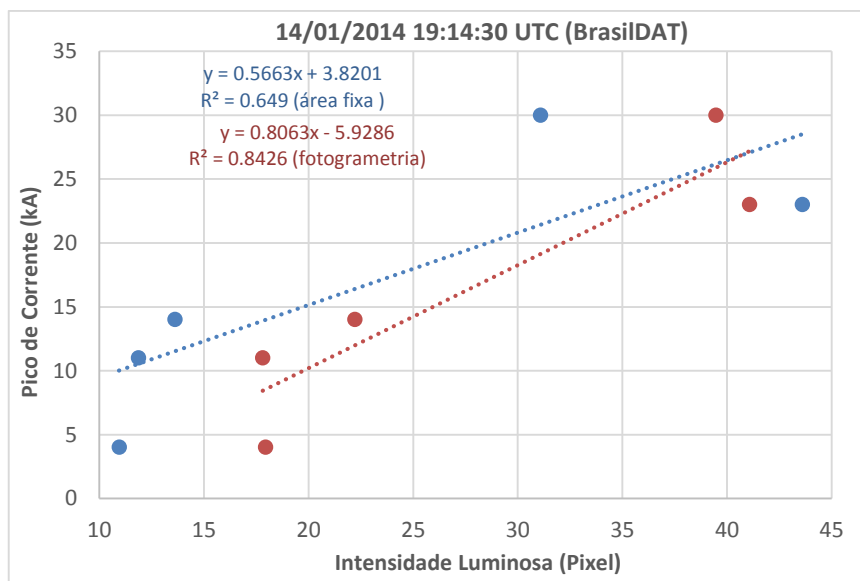
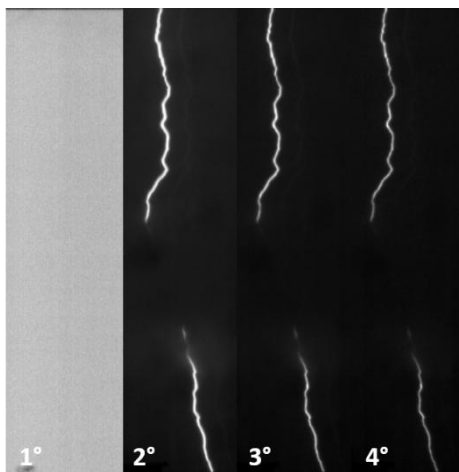


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 19:14:30 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.5 – Caso 19 de junho de 2017, 20:01:41 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19/06/2017 às 20:01:41 UTC nos EUA.

Fonte: Produção do autor

Figura D.6- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 19:14:30 UTC)

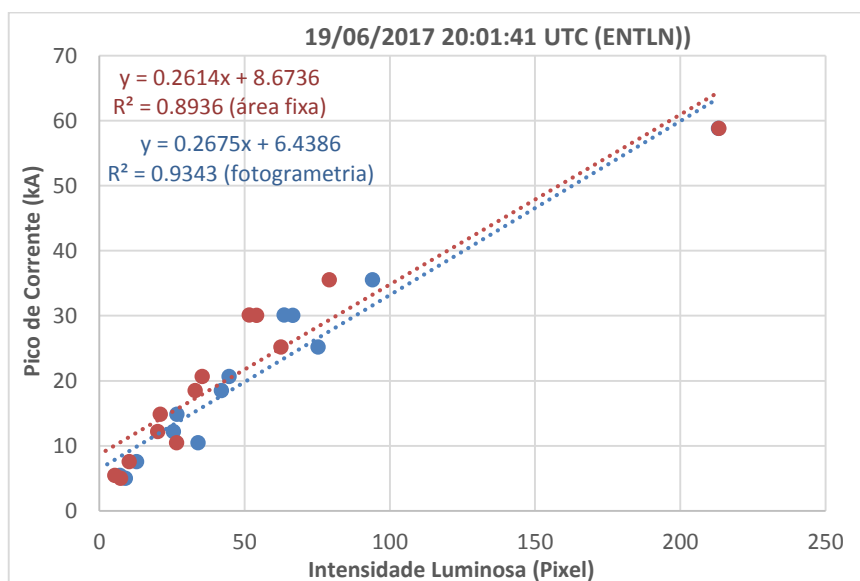
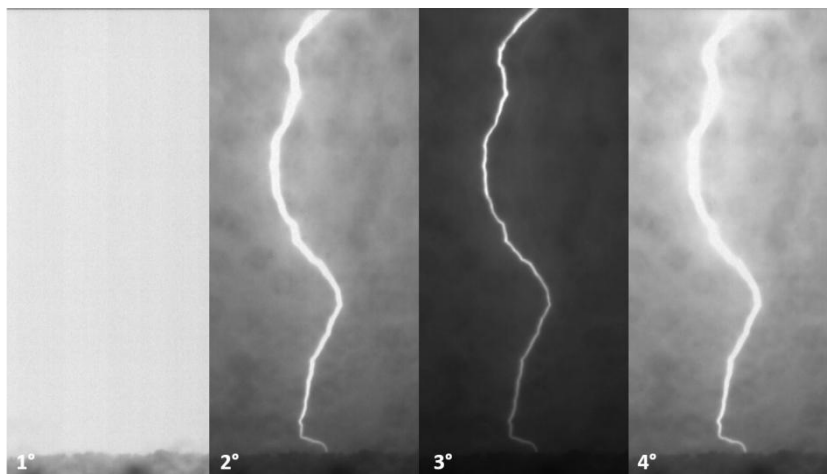


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (ENTLN) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 19/06/2017 às 20:01:41 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.7 – Caso 24 de julho de 2017, 3:56:48 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 24/07/2017 às 3:56:48 UTC nos EUA.

Fonte: Produção do autor

Figura D.8- Luminosidade x pico de corrente (24/07/2017, 3:56:48 UTC)

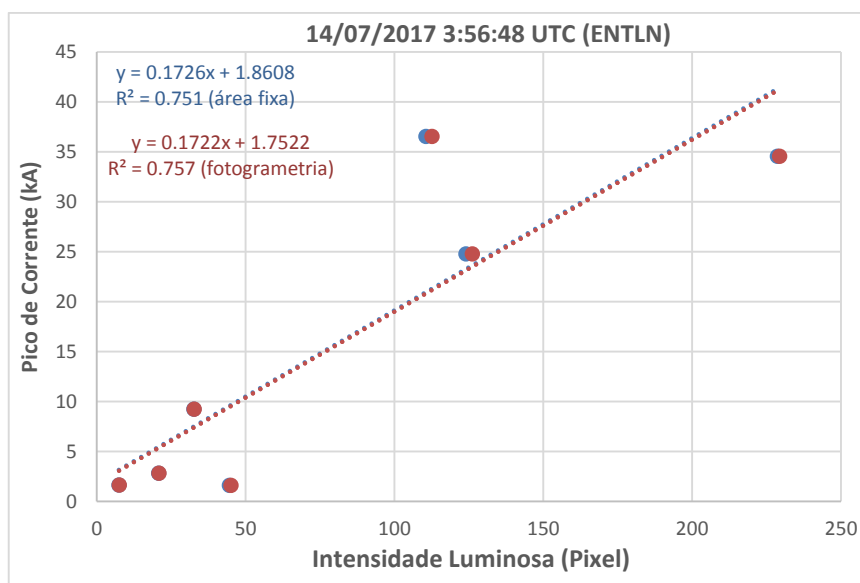
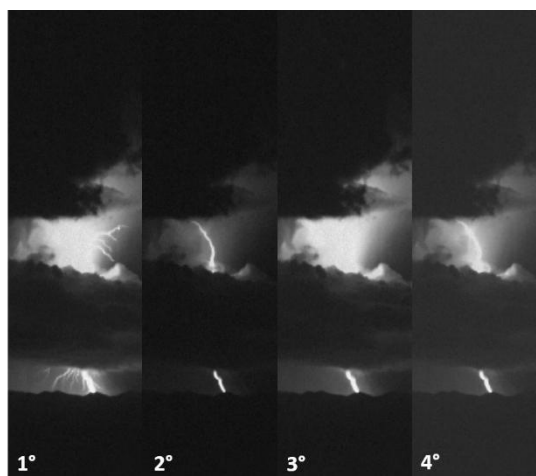


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (ENTLN) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 24/07/2017 às 3:56:48 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.9 – Caso 19 de fevereiro de 2013, 17:11:07 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19/02/2013 às 17:11:7 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura D.10- Luminosidade x pico de corrente (19/02/2013, 17:11:07 UTC)

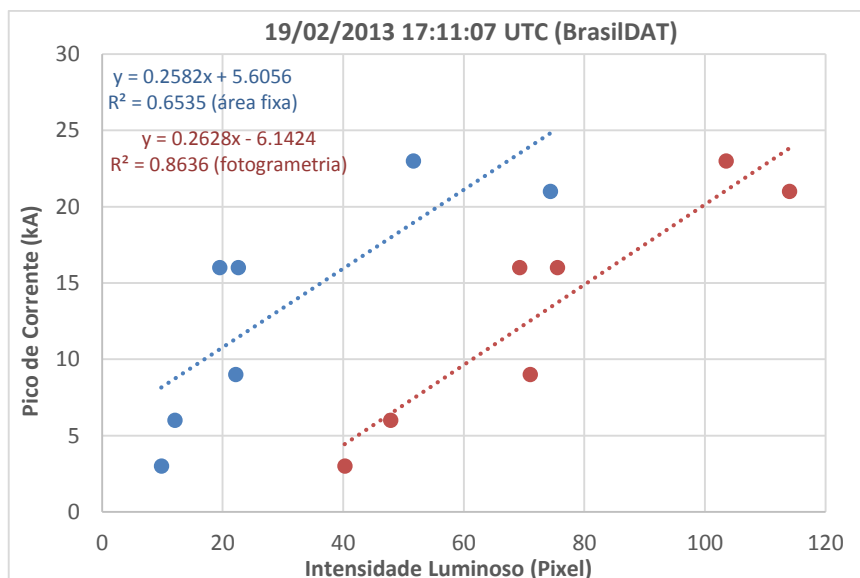
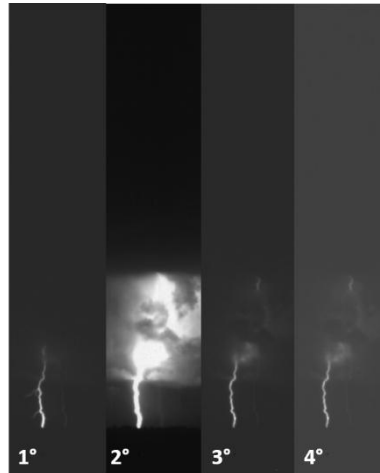


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 19/02/2013 às 17:11:07 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.11 – Caso 18 de fevereiro de 2013, 21:19:38 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 18/02/2013 às 21:19:38 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura D.12- Luminosidade x pico de corrente (18/02/2013, 21:19:38 UTC)

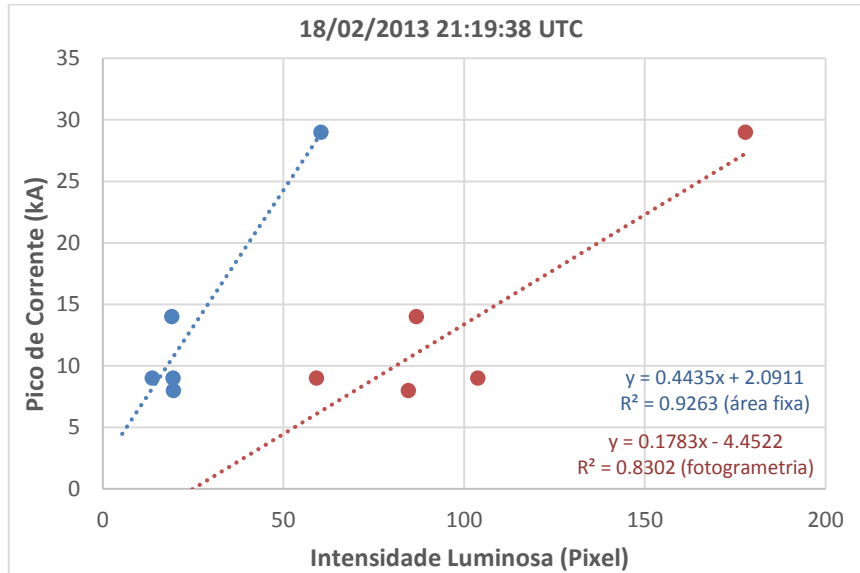
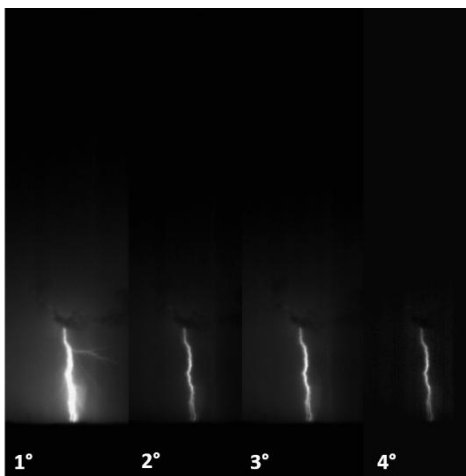


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 18/02/2013 às 21:19:38 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.13 – Caso 18 de fevereiro de 2013, 21:25:42 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 18/02/2013 às 21:19:38 UTC no Brasil.

Fonte: Produção do autor

Figura D.14- Luminosidade x pico de corrente (18/02/2013, 21:25:42 UTC)

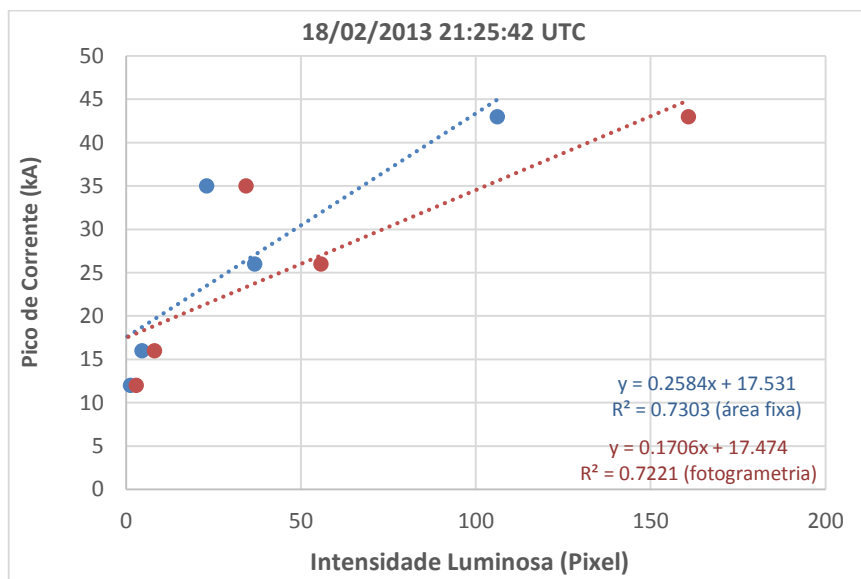
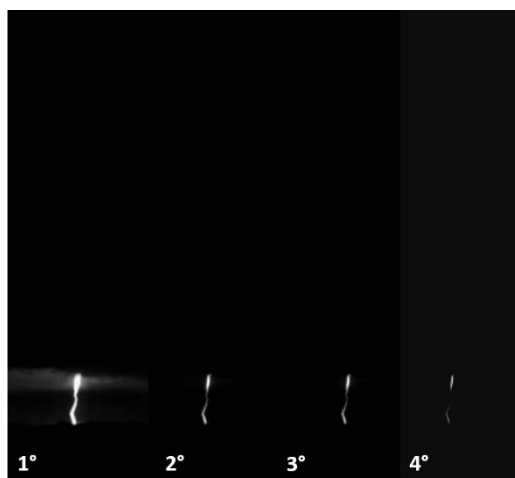


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 18/02/2013 às 21:25:42 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.15 – Caso 06 de março de 2013, 21:25:42 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:19:38 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.16- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:25:32 UTC)

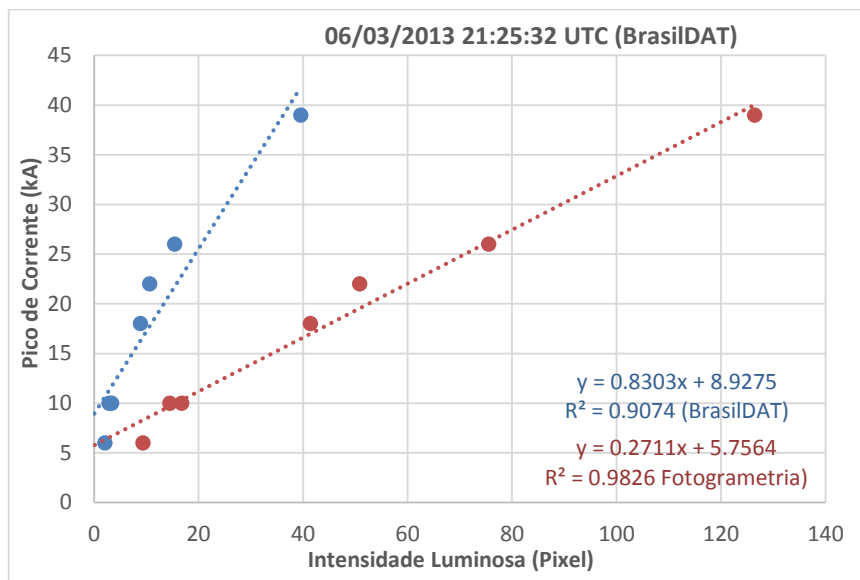
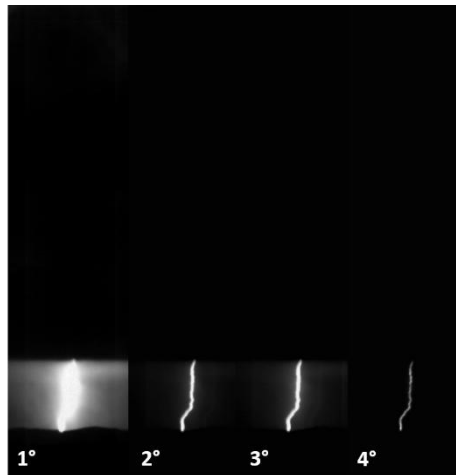


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:25:32 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.17 – Caso 06 de março de 2013, 21:41:30 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:41:30 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.18- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:41:33 UTC)

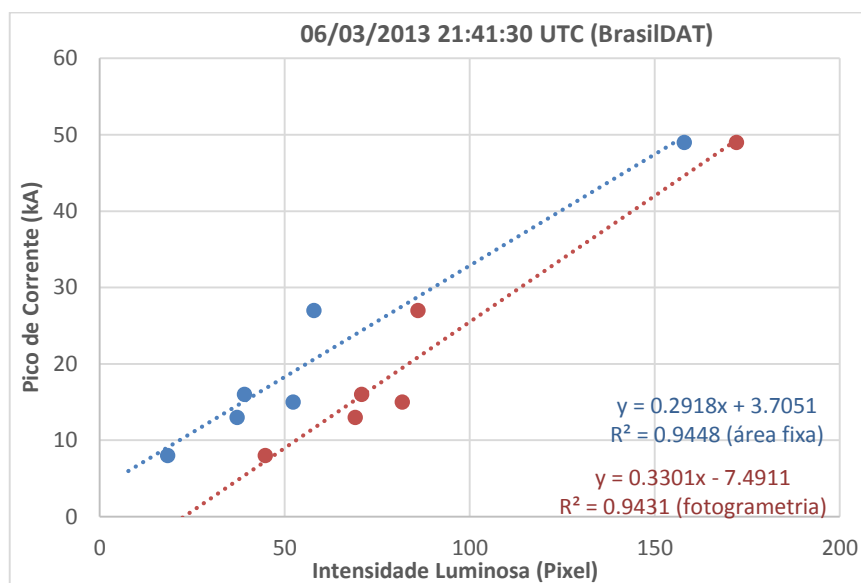
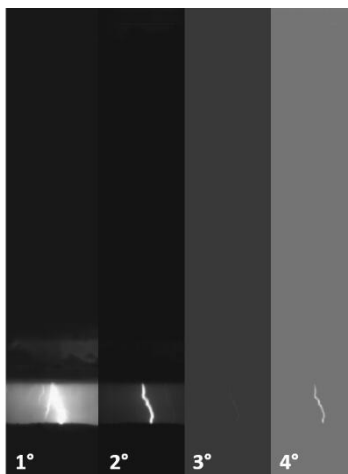


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:41:30 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.19 – Caso 06 de março de 2013, 21:50:49 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:50:49 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.20- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:50:49 UTC)

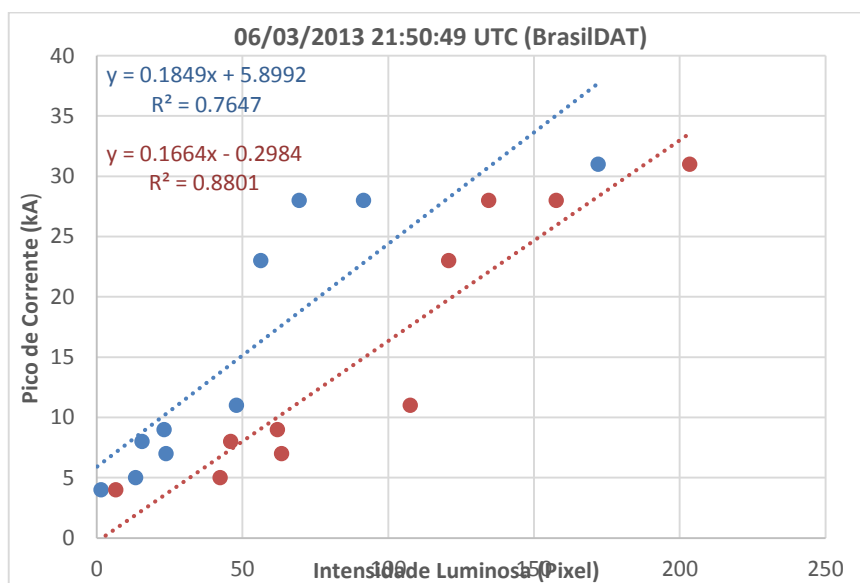
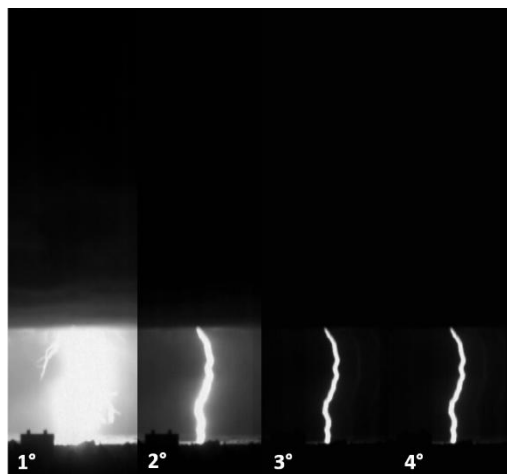


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:50:49 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.21 – Caso 6 de março de 2013, 21:52:22 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:52:22 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.22- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:52:22 UTC)

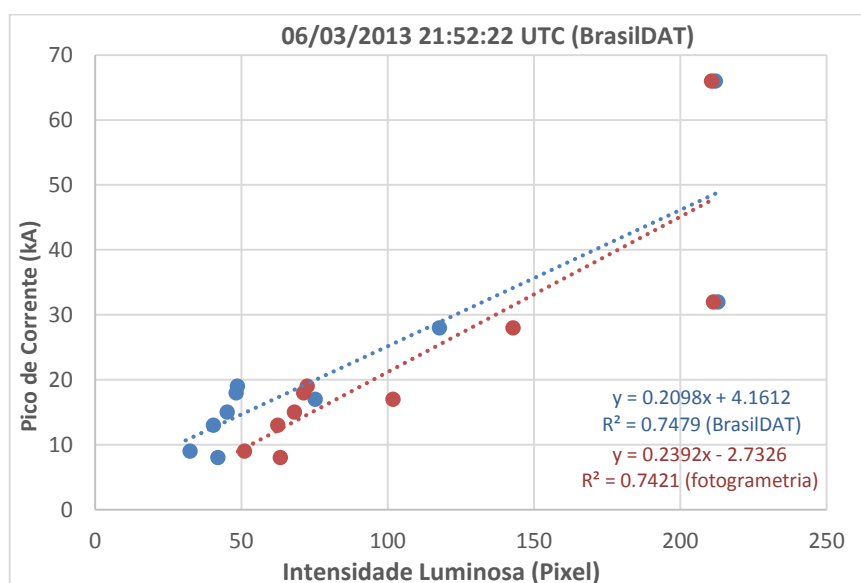
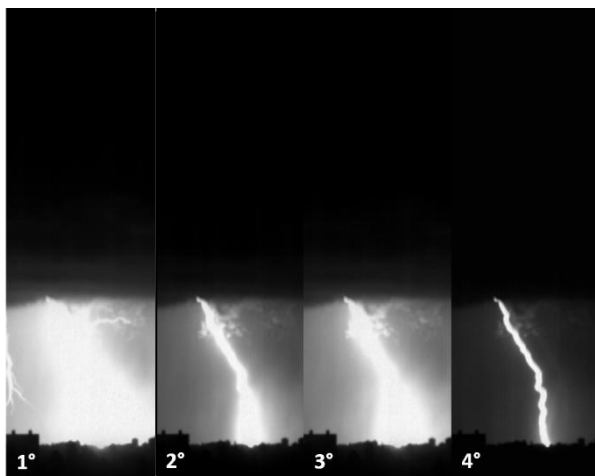


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:52:22 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.23 – Caso 6 de março de 2013, 21:59:54 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:59:54 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.24- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:59:54 UTC)

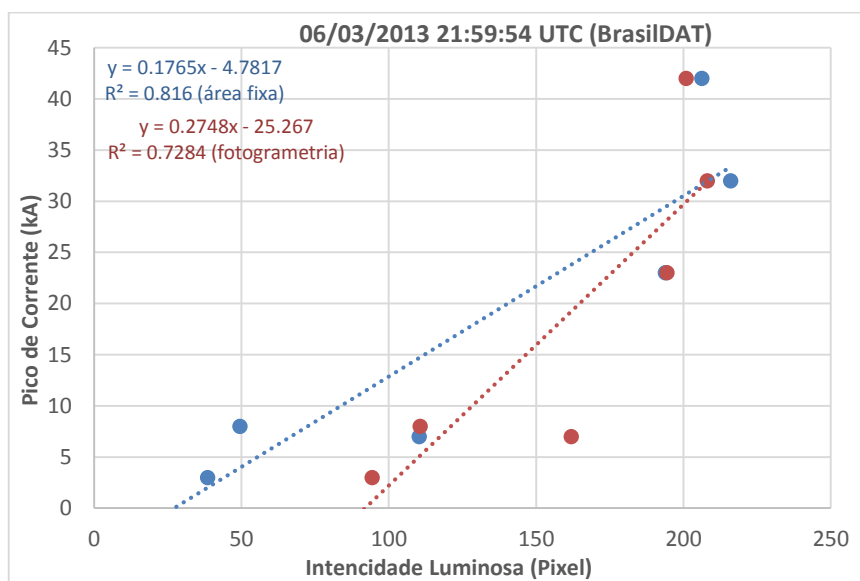
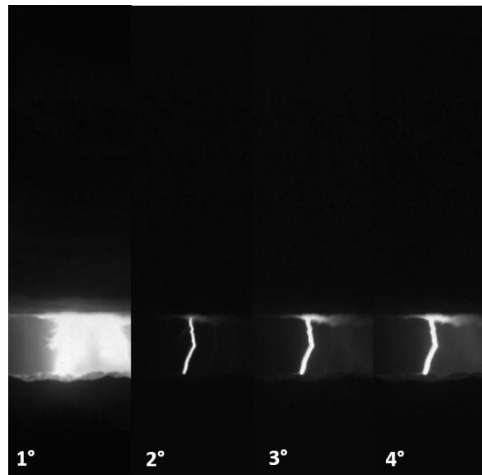


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:54:54 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.25 – Caso 20 de fevereiro de 2013, 21:29:08 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 20/02/2013 às 20:29:08 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.26- Luminosidade x pico de corrente (20/02/2013, 20:29:08 UTC)

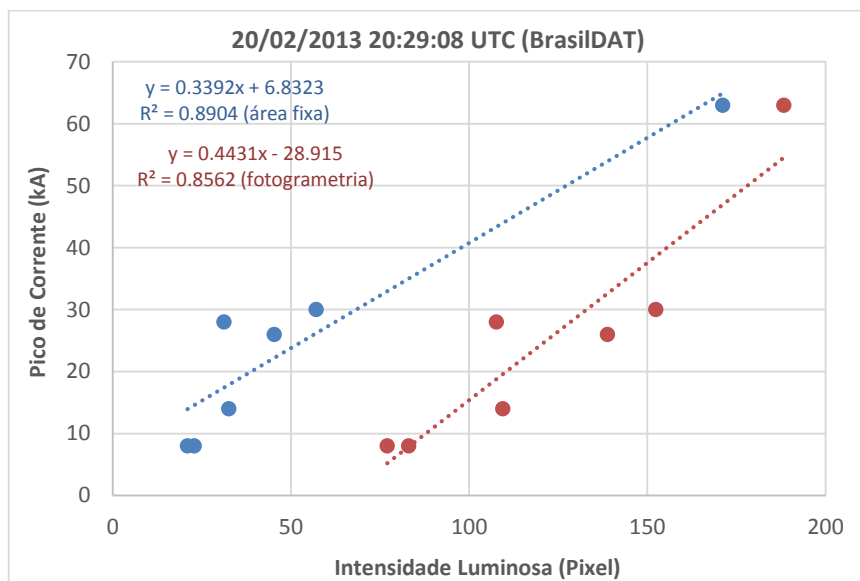


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 20/02/2013 às 20:29:08 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.27 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:21:24 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 11/02/2013 às 20:21:24 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.28- Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:21:24 UTC)

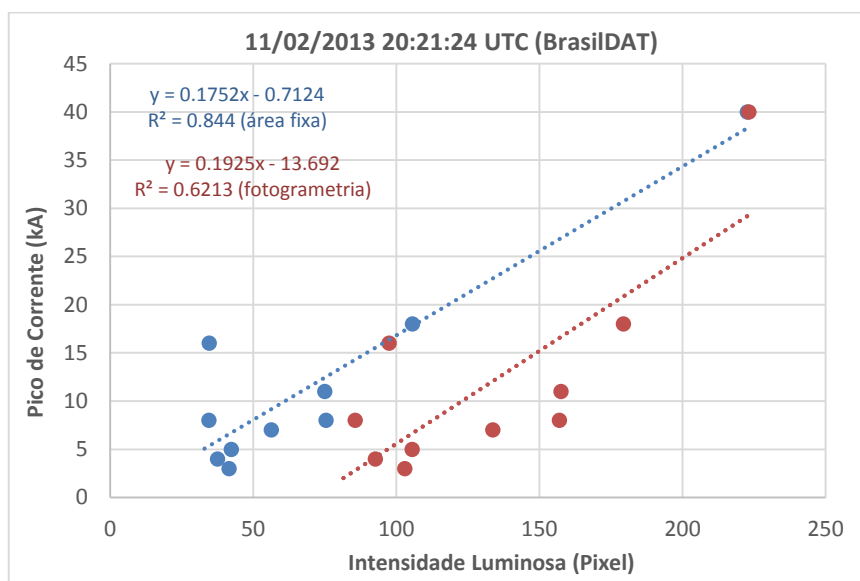
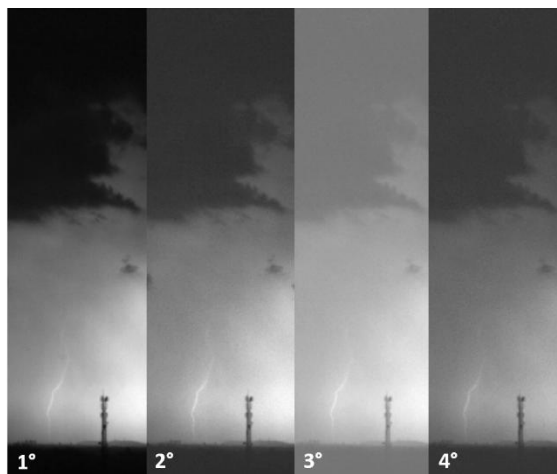


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 20/02/2013 às 20:29:08 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.29 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:29:25 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 11/02/2013 às 20:29:25 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.30- Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:29:25 UTC)

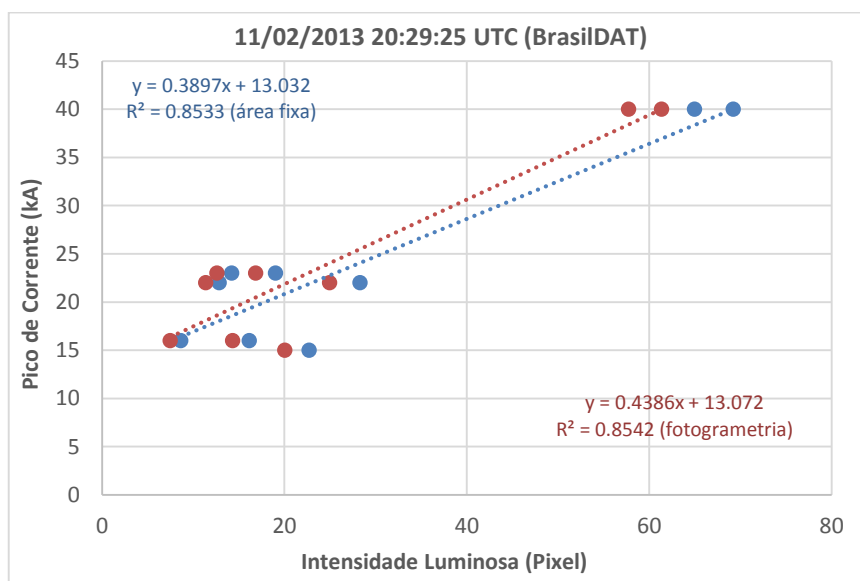


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 20/02/2013 às 20:29:08 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.31 – Caso 17 de fevereiro de 2013, 18:56:07 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 17/02/2013 às 18:56:07 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.32- Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 18:56:07 UTC)

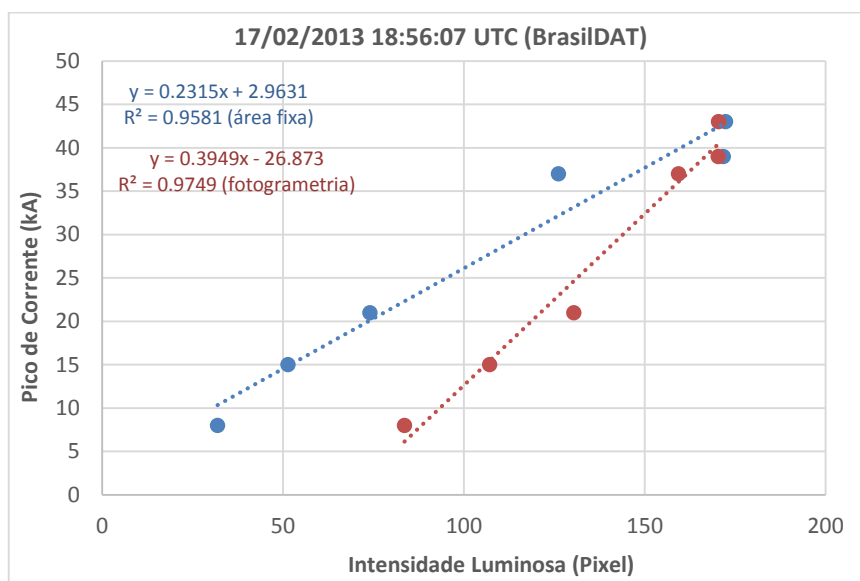
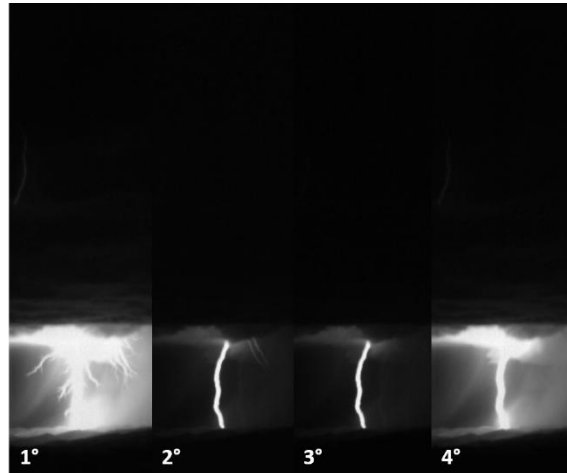


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/02/2013 às 18:56:07 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.33 – Caso 06 de março de 2013, 20:43:33 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 20:43:33 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.34- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 20:43:33 UTC)

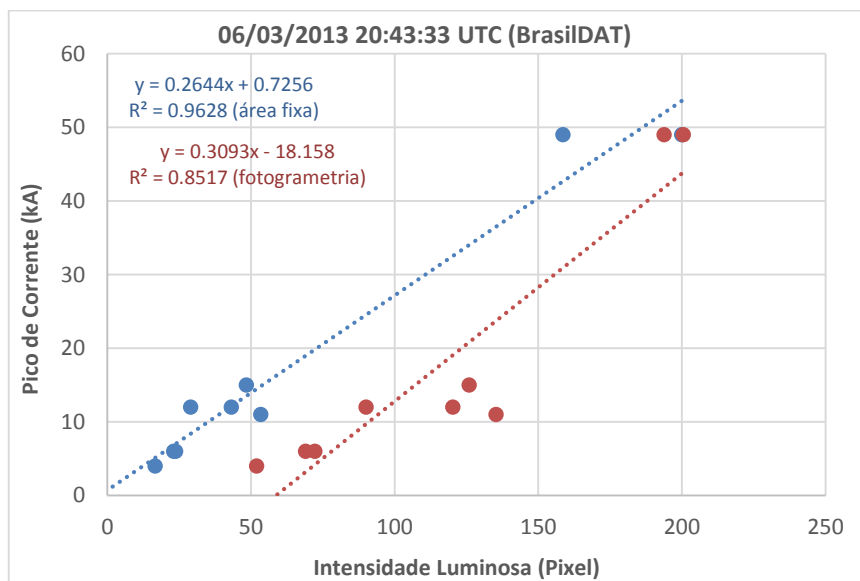
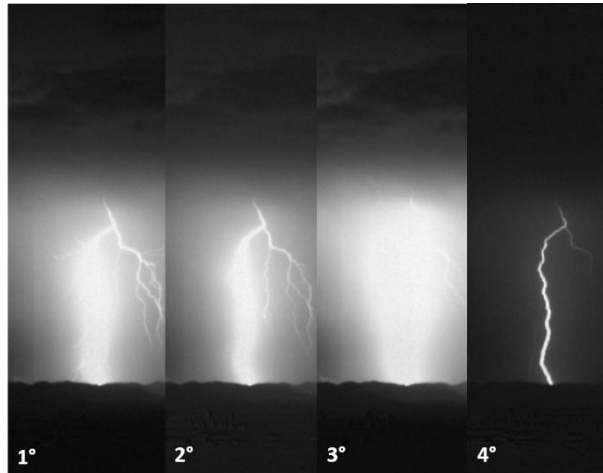


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/02/2013 às 18:56:07 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura D.35 – Caso 17 de fevereiro de 2014, 19:16:20 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 17/02/2014 às 19:16:20 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura D.36 - Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 19:16:20 UTC)

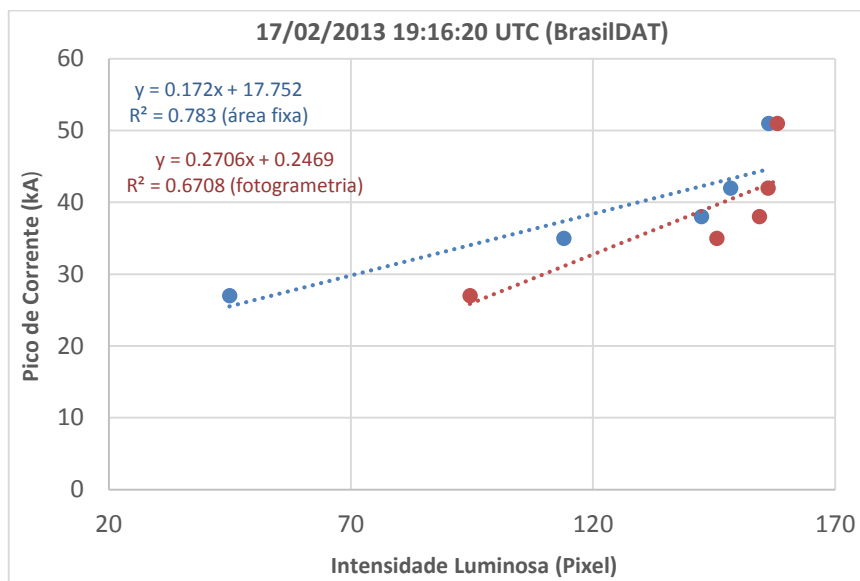


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/02/2013 às 19:06:20 UTC.

Fonte: Produção do autor

APÊNDICE E - CASOS CORRELAÇÃO MÉDIA (CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA))

Casos considerados com correlação mediana entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2012/2013, 2013/2014 (Brasil) e 2017 (EUA).

Figura E.1 – Caso 14 de janeiro de 2014, 20:19:22 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14:01:2014 às 20:19:22 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.2- Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 20:19:22 UTC)

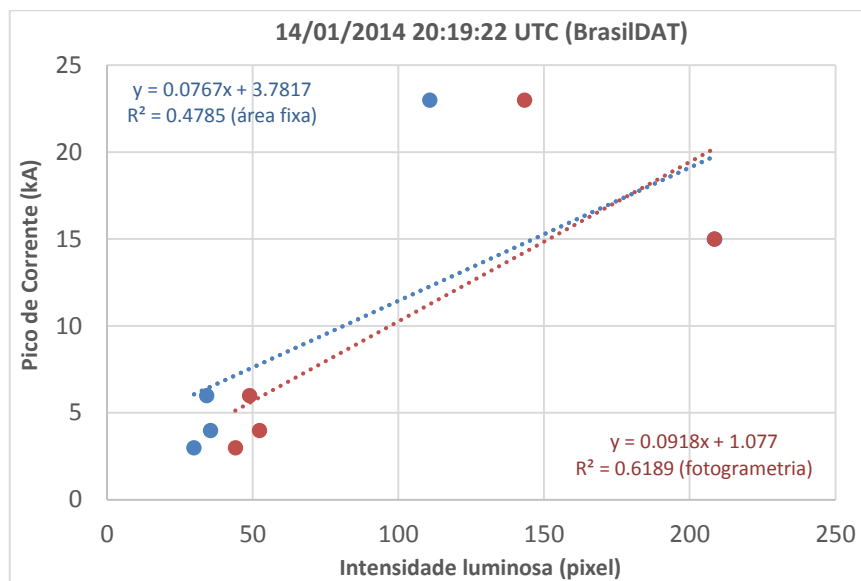
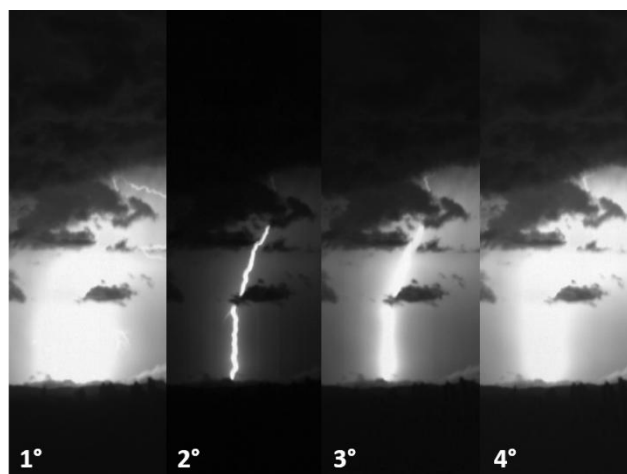


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/02/2013 às 18:56:07 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.3 – Caso 14 de janeiro de 2014, 20:58:04 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 20:58:04 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.4 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 20:58:04 UTC)

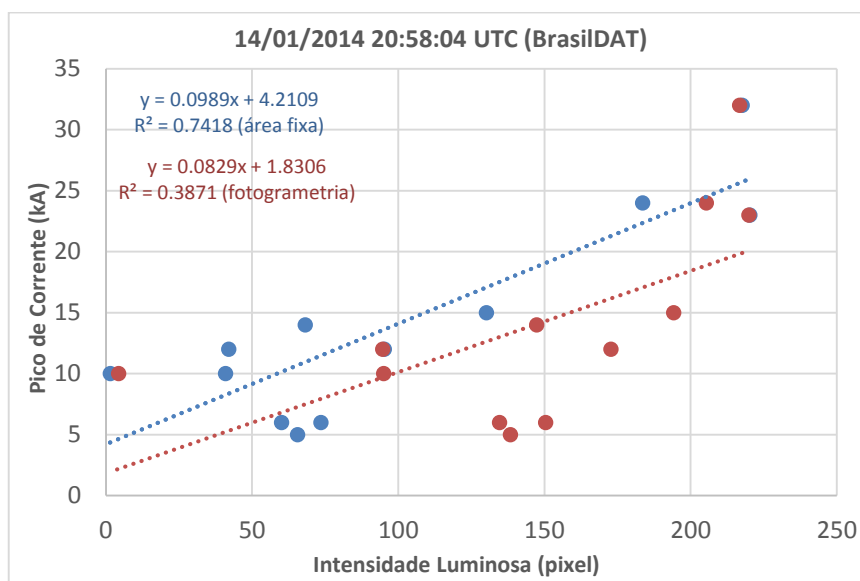
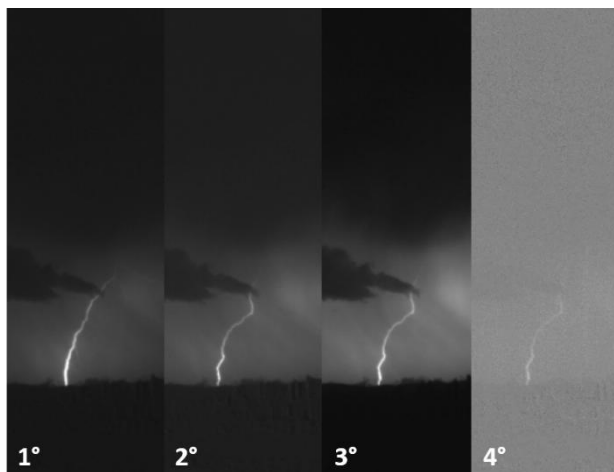


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 20:58:04 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.5 – Caso 14 de janeiro de 2014, 21:05:00 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/01/2014 às 21:05:00 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.6 - Luminosidade x pico de corrente (14/01/2014, 21:05:00 UTC)

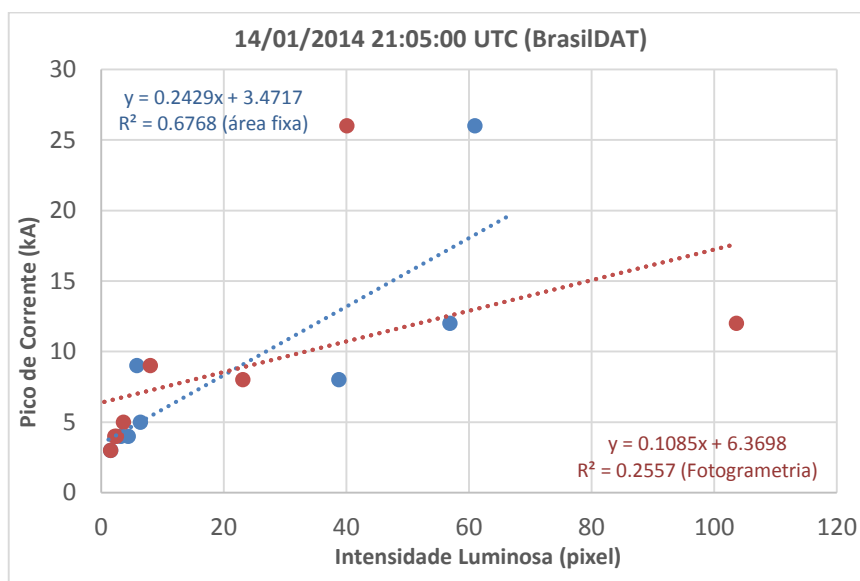
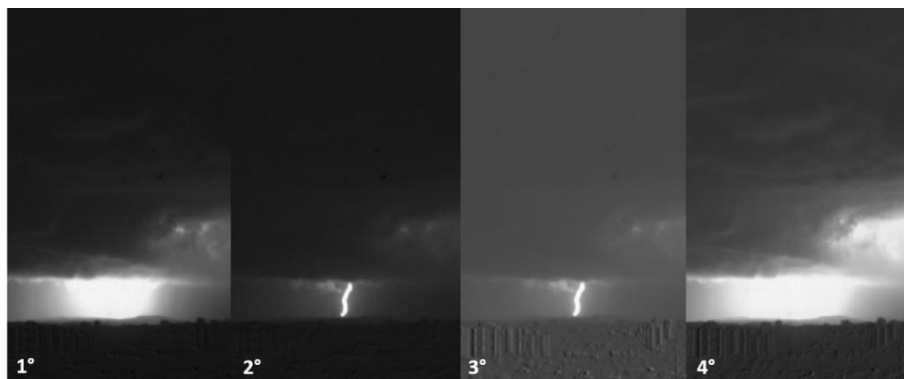


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/01/2014 às 21:05:00 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.7 – Caso 17 de janeiro de 2014, 17:21:17 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 17/01/2014 às 21:21:17 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.8 - Luminosidade x pico de corrente (17/01/2014, 17:21:17 UTC)

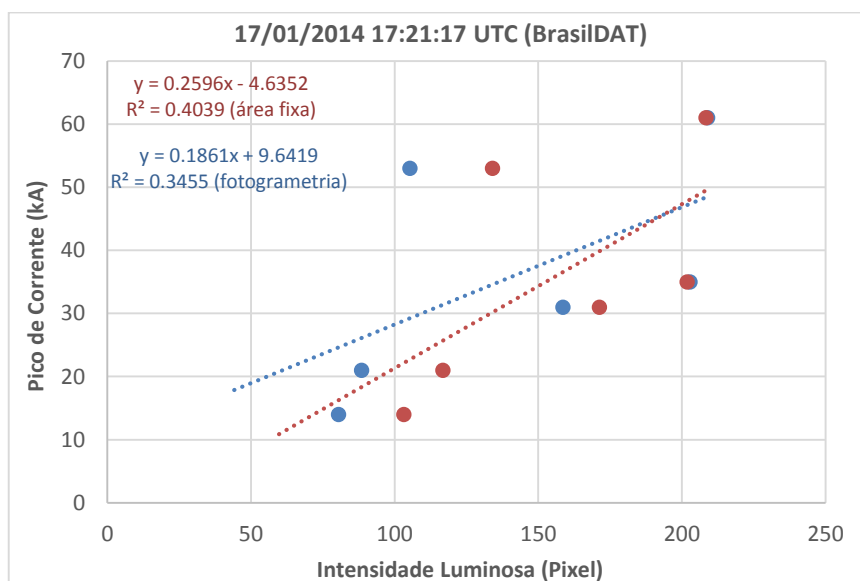
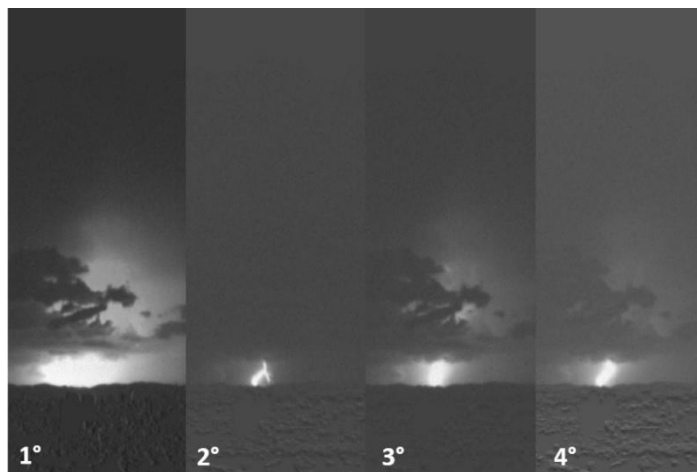


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/01/2014 às 17:21:17 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.9 – Caso 23 de janeiro de 2014, 17:18:54 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 23/01/2014 às 17:18:54 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.10- Luminosidade x pico de corrente (23/01/2014, 17:18:54 UTC)

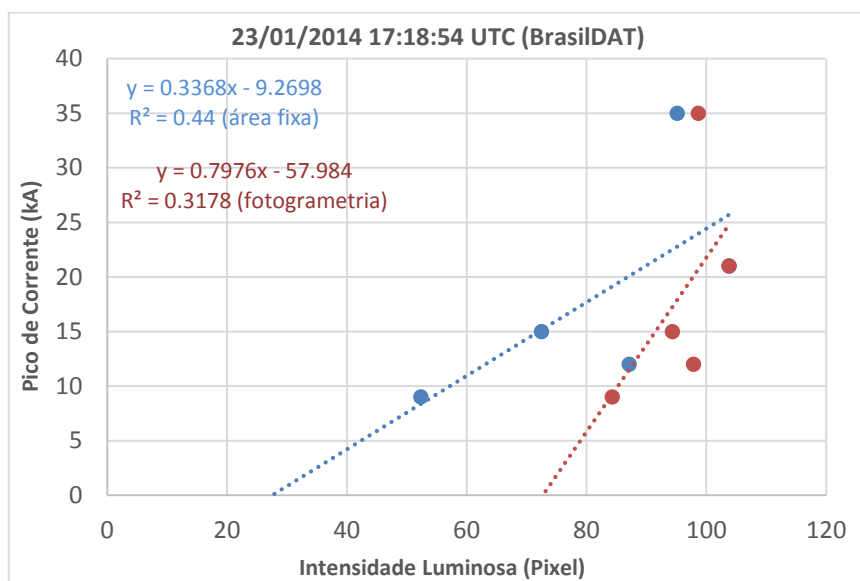


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 23/01/2014 às 17:18:54 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.11 – Caso 28 de fevereiro de 2014, 19:26:15 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 28/02/2014 às 19:26:15 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.12 - Luminosidade x pico de corrente (28/02/2014, 19:26:15 UTC)

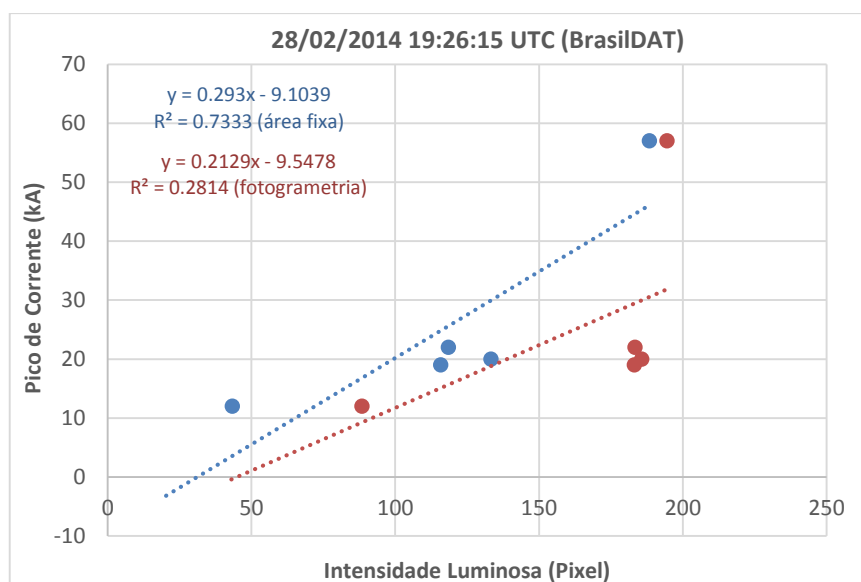
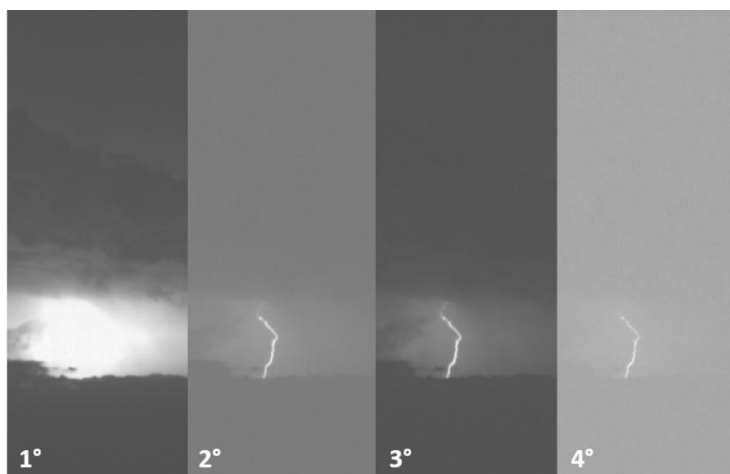


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 28/02/2014 às 19:26:15 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.13 – Caso 13 de março de 2014, 21:00:34 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 13/03/2014 às 21:00:34 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.14- Luminosidade x pico de corrente (13/03/2014, 21:00:34 UTC)

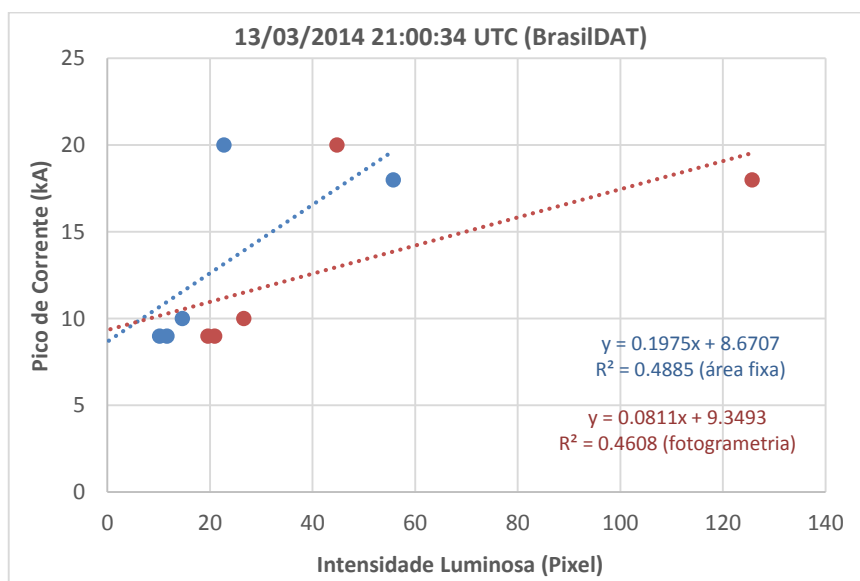
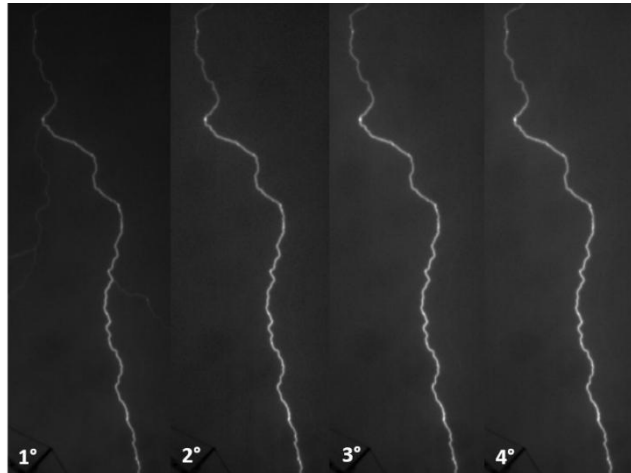


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 13/03/2014 às 21:00:34 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.15 – Caso 14 de julho de 2017, 21:00:40 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/07/2017 às 21:00:40 UTC nos EUA

Fonte: Produção do autor

Figura E.16- Luminosidade x pico de corrente (14/07/2017, 21:00:40 UTC)

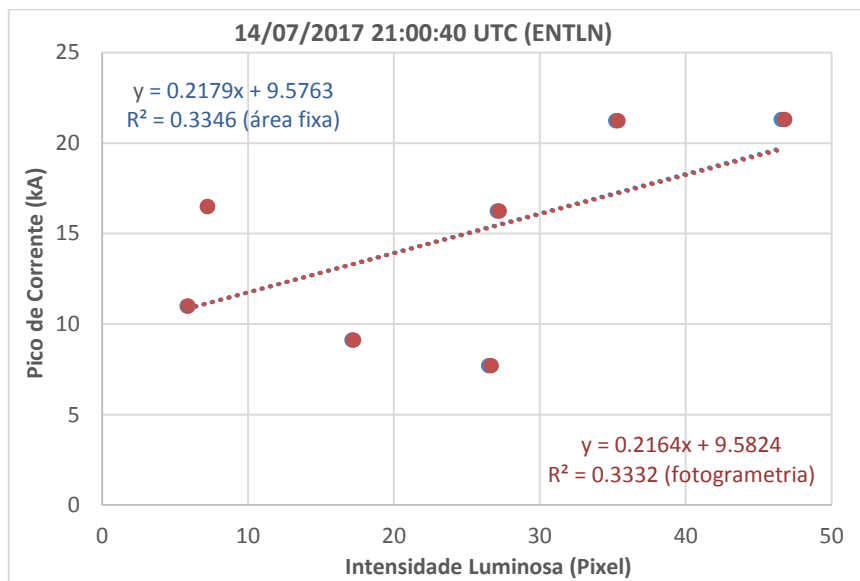
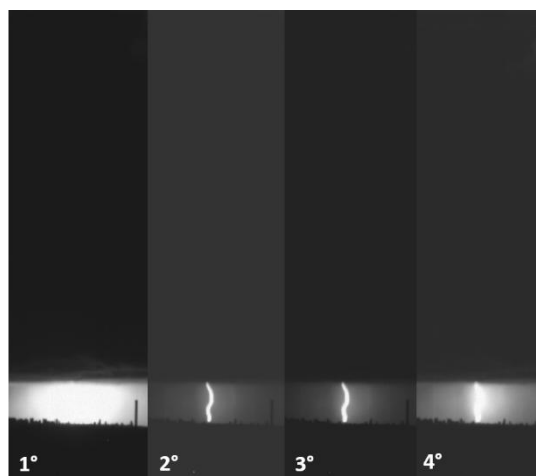


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (ENTLN) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/07/2017 às 21:00:40 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.17 – Caso 06 de março de 2013, 17:53:53 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 21:53:53 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.18- Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 21:53:53 UTC)

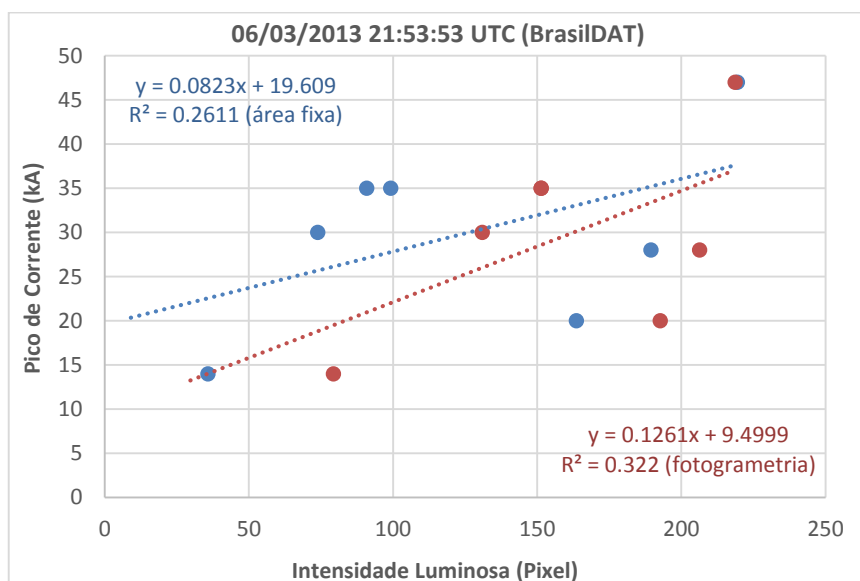
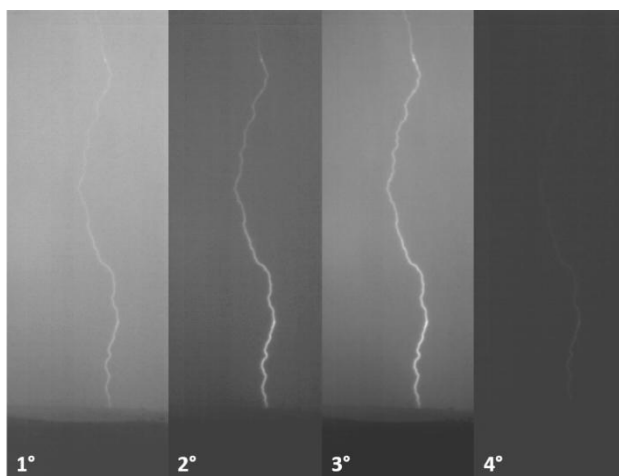


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 21:53:53 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.19 – Caso 06 de março de 2013, 22:31:15 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 06/03/2013 às 22:31:15 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.20 - Luminosidade x pico de corrente (06/03/2013, 22:31:15 UTC)

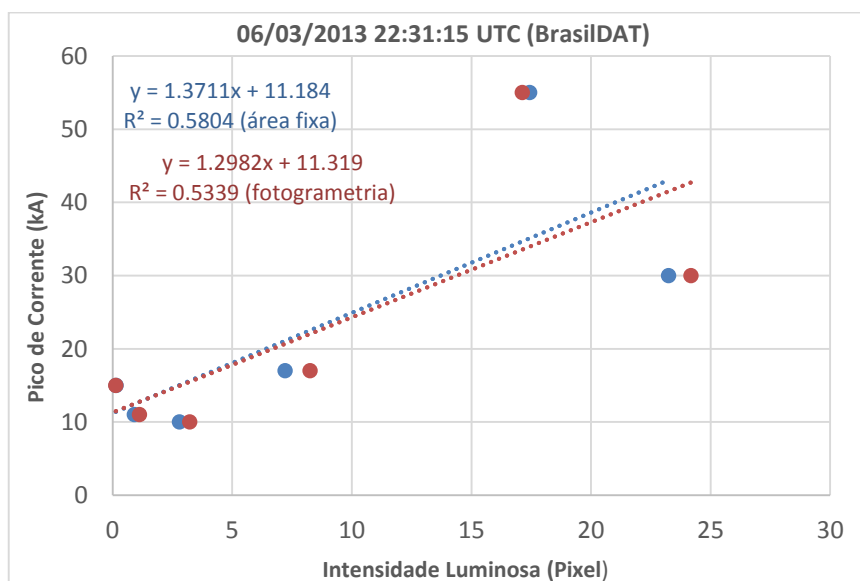
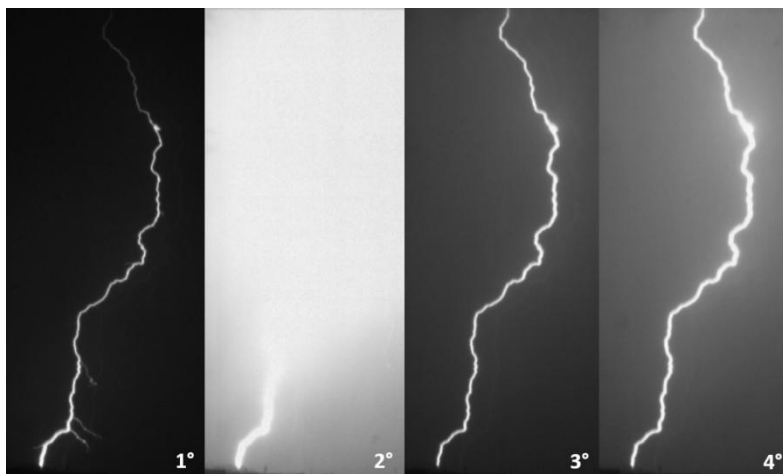


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 06/03/2013 às 22:31:15 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.21 – Caso 19 de janeiro de 2013, 17:14:12 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19/01/2013 às 17:14:12 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.22 - Luminosidade x pico de corrente (19/01/2013, 17:14:12 UTC)

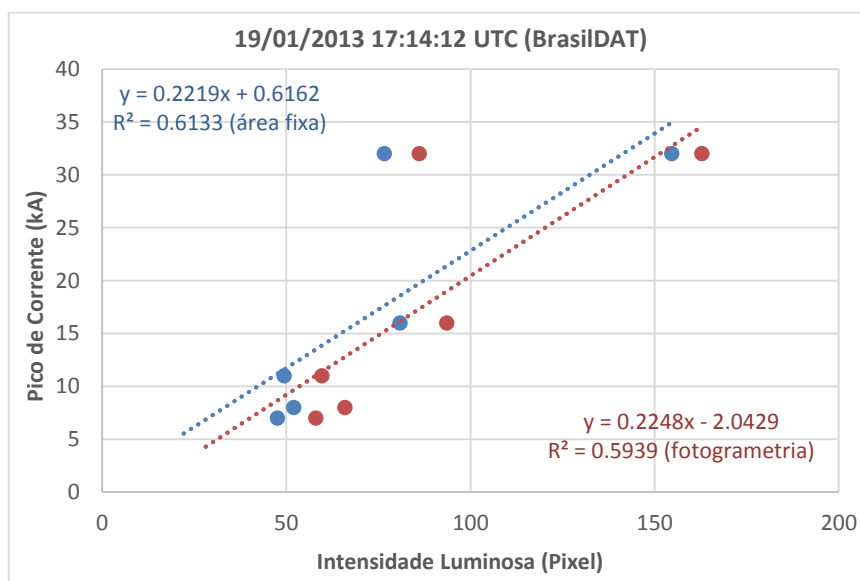
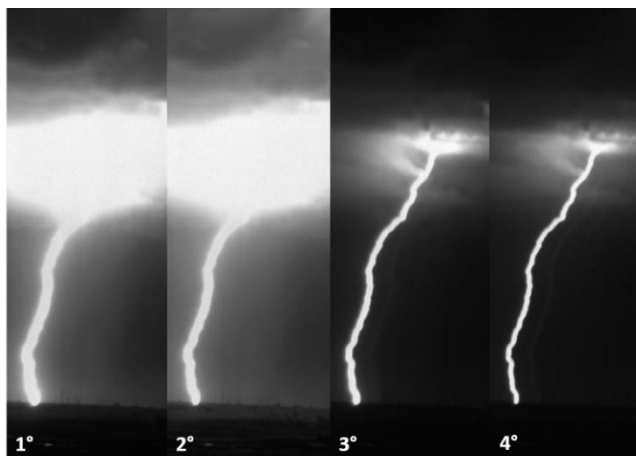


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 19/01/2013 às 17:14:12 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.23 – Caso 12 de fevereiro de 2013, 17:42:44 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 12/02/2013 às 17:42:44 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.24 - Luminosidade x pico de corrente (12/02/2013, 17:42:44 UTC)

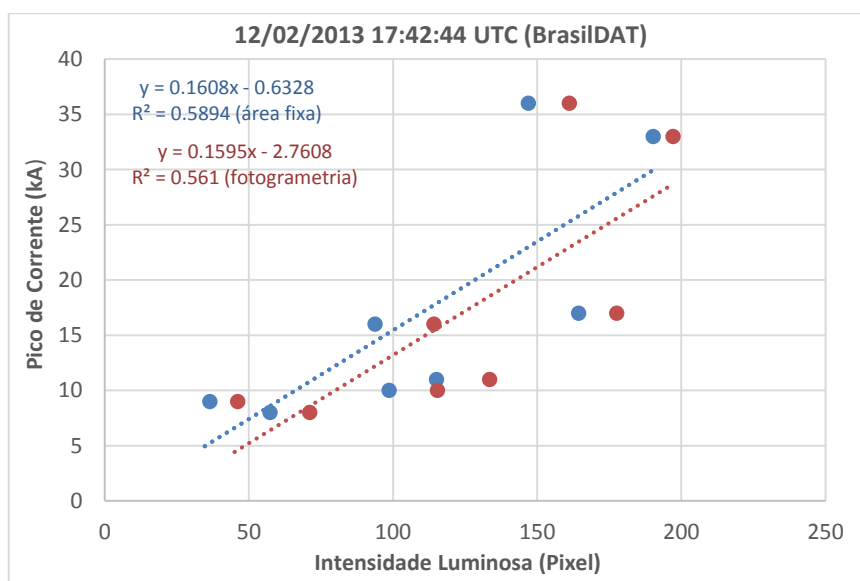
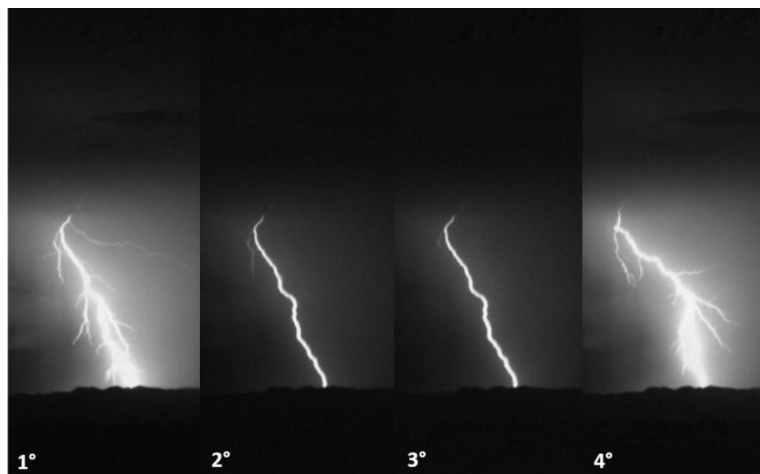


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 12/02/2013 às 17:42:44 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.25 – Caso 17 de fevereiro de 2013, 19:13:12 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 17/02/2013 às 19:13:12 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.26 - Luminosidade x pico de corrente (17/02/2013, 19:13:12 UTC)

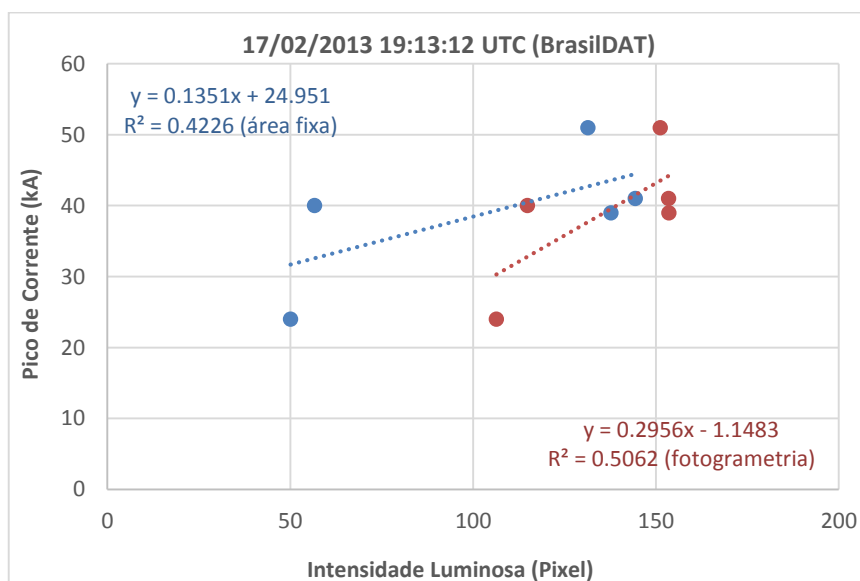
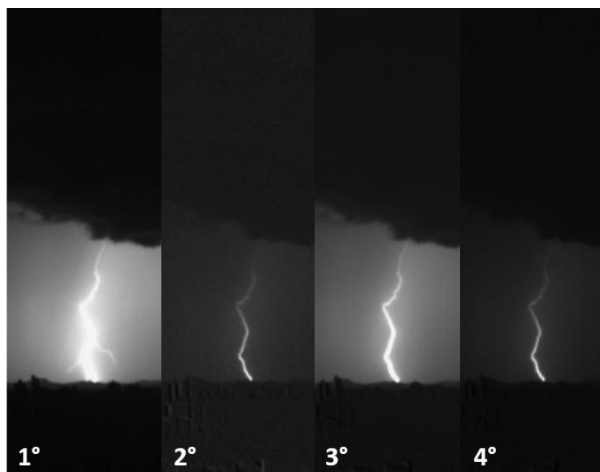


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/02/2013 às 19:13:12 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.27 – Caso 17 de janeiro de 2014, 15:57:25 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 17/01/2014 às 15:57:25 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.28 - Luminosidade x pico de corrente (16/01/2014, 15:57:25 UTC)

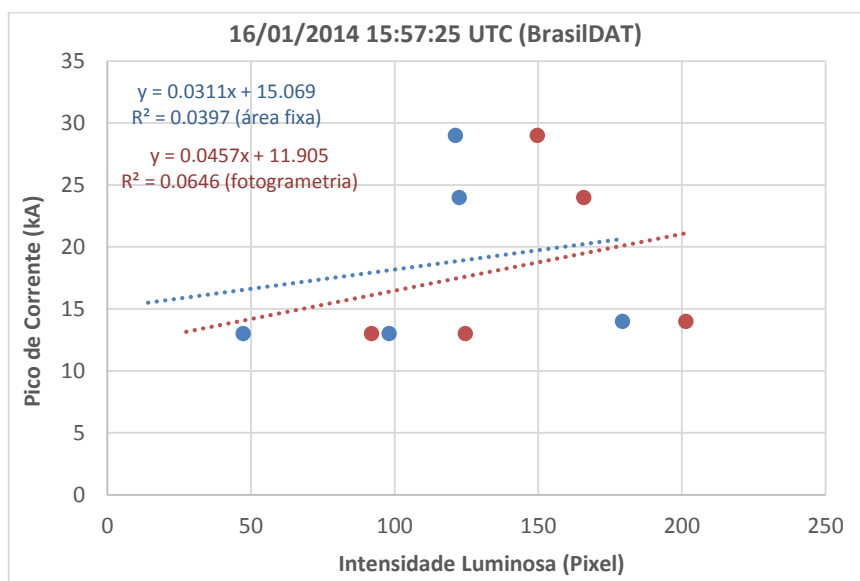
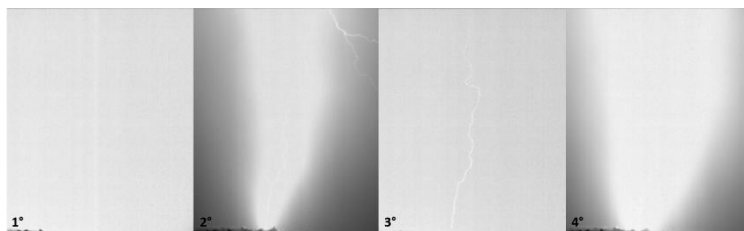


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 16/01/2014 às 15:57:25 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura E.29 - Caso 22 de fevereiro de 2013, 20:41:15 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 22/02/2013 às 20:41:15 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura E.30 - Luminosidade x pico de corrente (22/02/2013, 20:41:15 UTC)

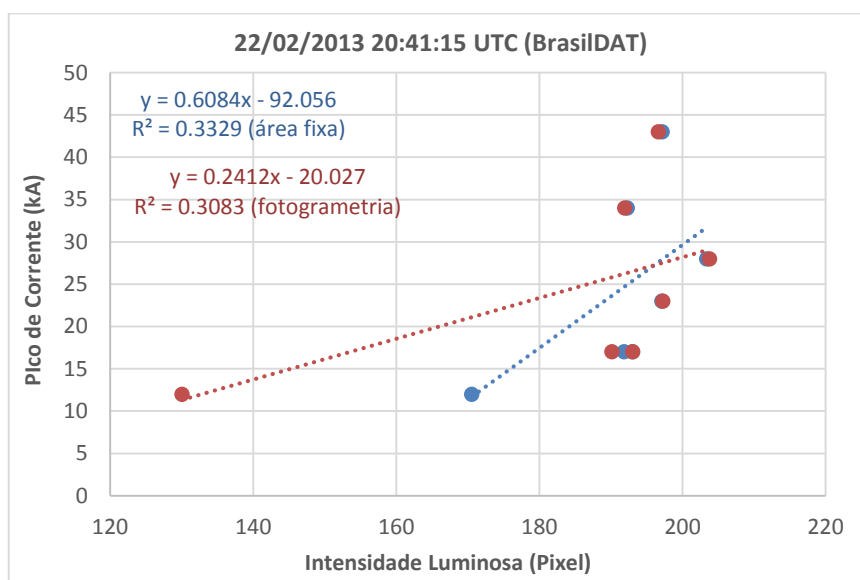


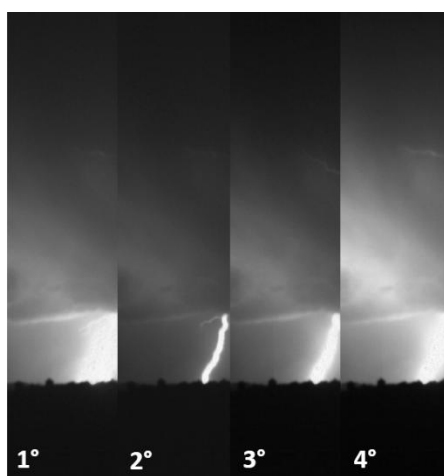
Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 22/02/2013 às 20:41:15 UTC.

Fonte: Produção do autor

APÊNDICE F - CASOS CORRELAÇÃO RUIM (CAMPANHA 2012/2013, 2013/2014 (BRASIL) E 2017 (EUA))

Casos considerados com correlação ruim entre a luminosidade e o pico de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo naturais registrados por câmeras de alta velocidade. Campanha 2012/2013, 2013/2014 (Brasil) e 2017 (EUA).

Figura F.1 – Caso 22 de fevereiro de 2014, 20:12:20 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 22/02/2014 às 20:12:20 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.2 - Luminosidade x pico de corrente (22/02/2014, 20:12:20 UTC)

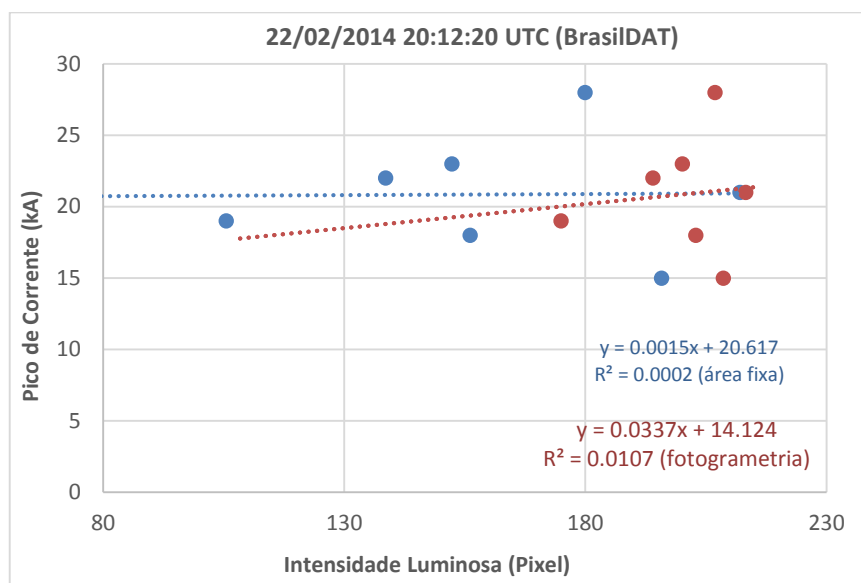
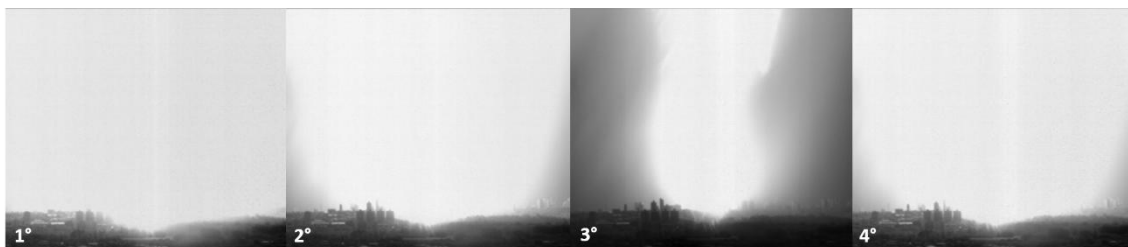


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 17/01/2014 às 17:21:17 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.3 – Caso 30 de março de 2014, 19:42:21 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 30/03/2014 às 19:42:21 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.4 - Luminosidade x pico de corrente (30/03/2014, 19:42:21 UTC)

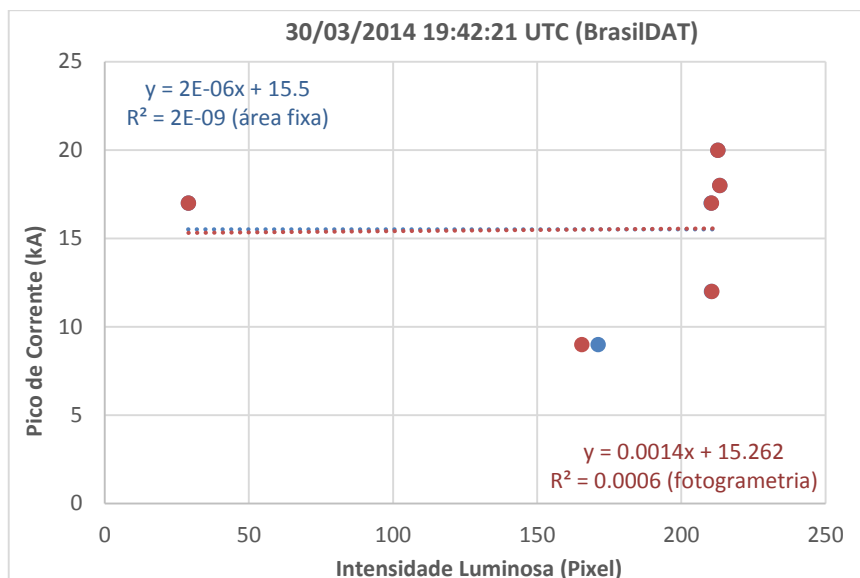
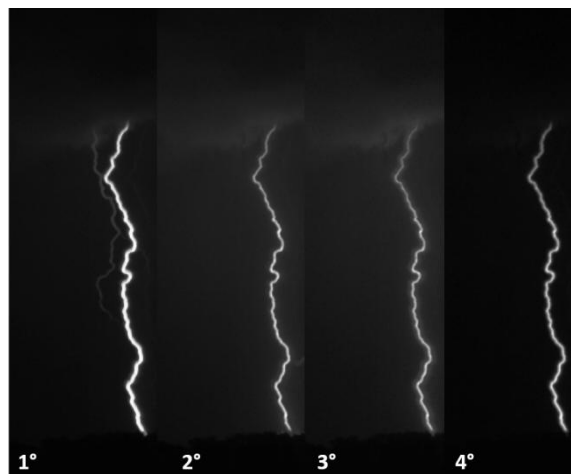


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 30/03/2014 às 19:42:21 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.5 – Caso 14 de julho de 2017, 20:25:56 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 14/07/2017 às 20:25:56 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.6 - Luminosidade x pico de corrente (14/07/2017, 20:25:56 UTC)

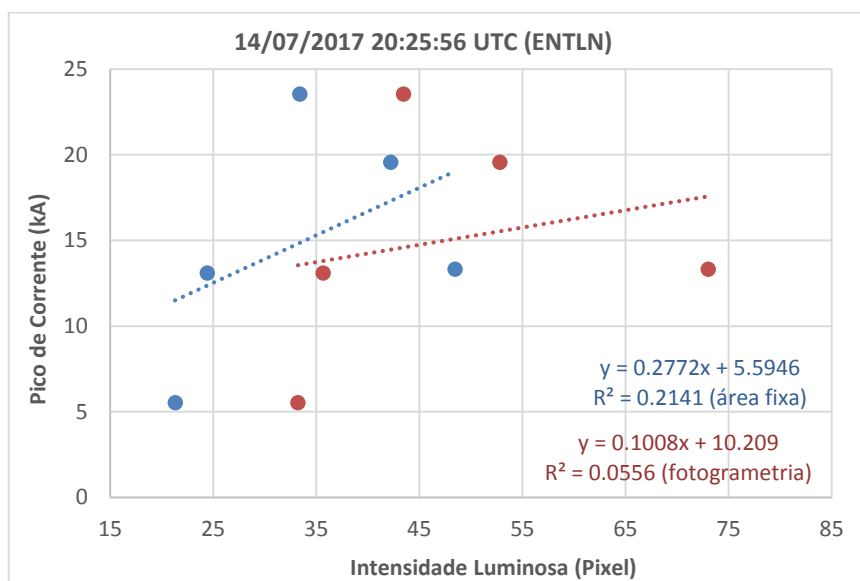
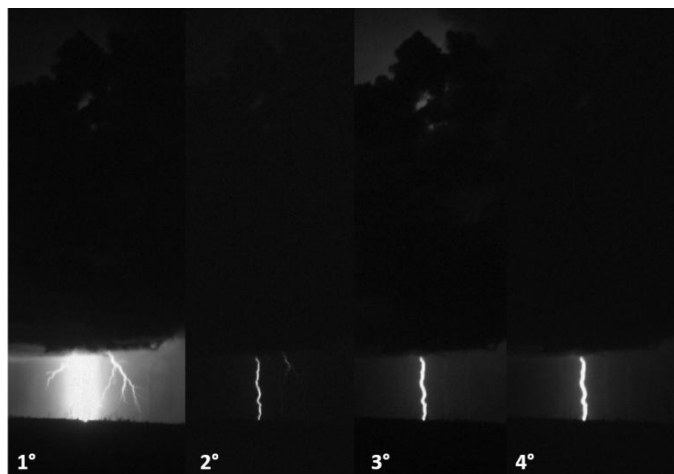


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (ENTLN) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 14/07/2017 às 20:25:56 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.7 – Caso 19 de fevereiro de 2013, 18:24:50 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19/02/2013 às 18:24:50 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.8 - Luminosidade x pico de corrente (19/02/2013, 18:24:50 UTC)

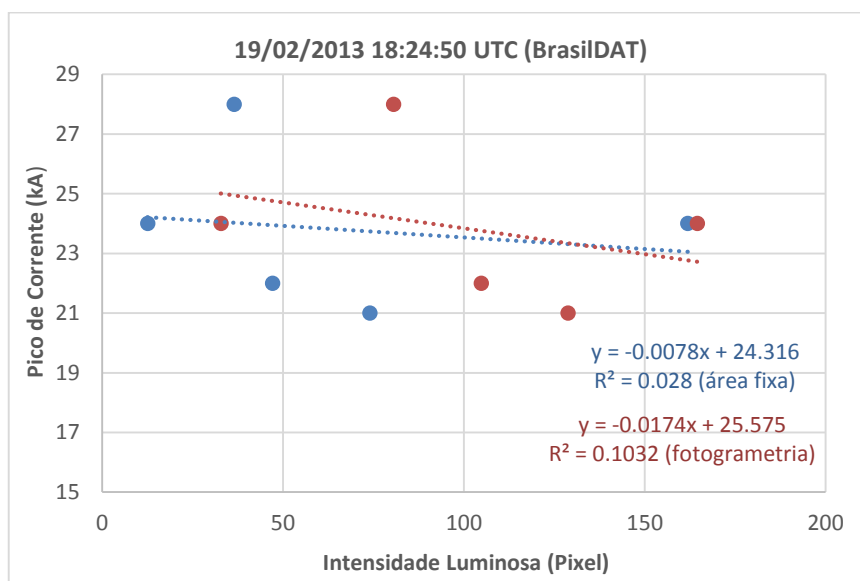
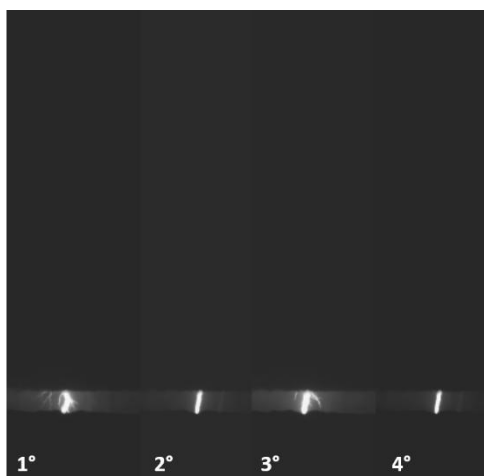


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 19/02/2013 às 18:24:50 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.9 – Caso 16 de março de 2013, 21:25:13 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 16/03/2013 às 21:25:13 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.10 - Luminosidade x pico de corrente (16/03/2013, 21:25:13 UTC)

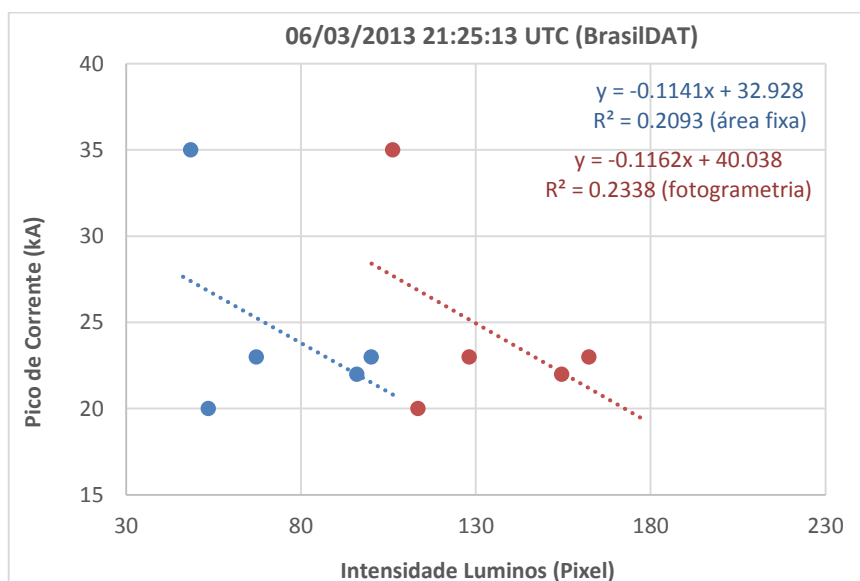
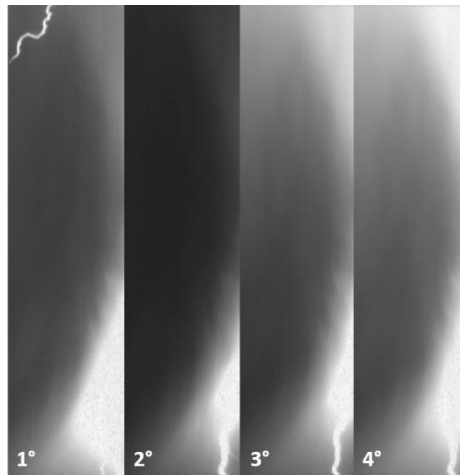


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 16/03/2013 às 21:25:13 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.11 – Caso 19 de janeiro de 2013, 16:57:03 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 19:01:2013 às 26:57:03 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.12 - Luminosidade x pico de corrente (19/01/2013, 16:57:03 UTC)

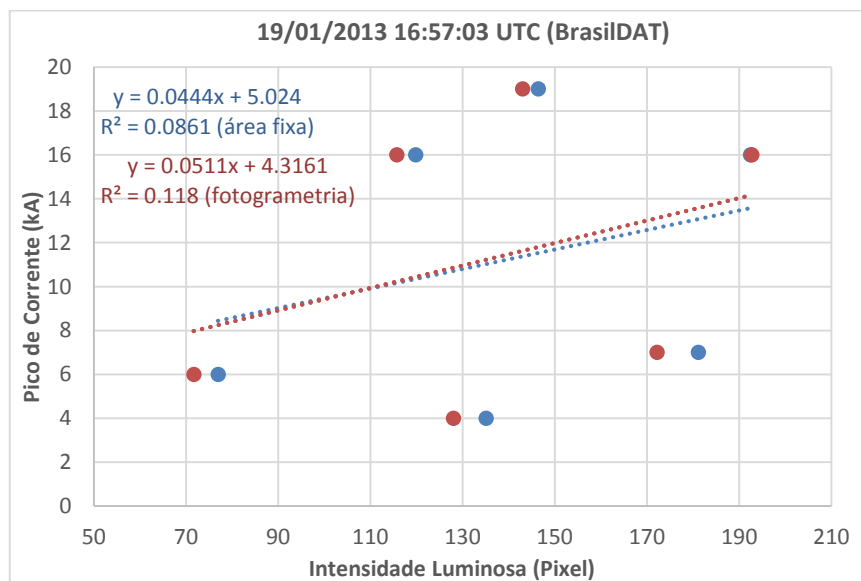
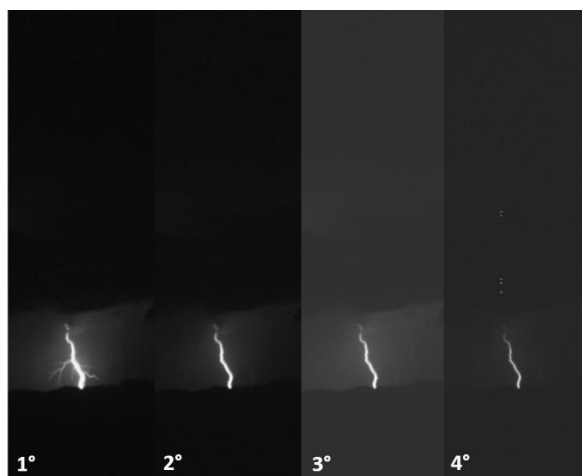


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 19/01/2013 às 16:57:03 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.13 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 19:20:15 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 11/02/2013 às 19:20:15 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.14 - Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 19:20:15 UTC)

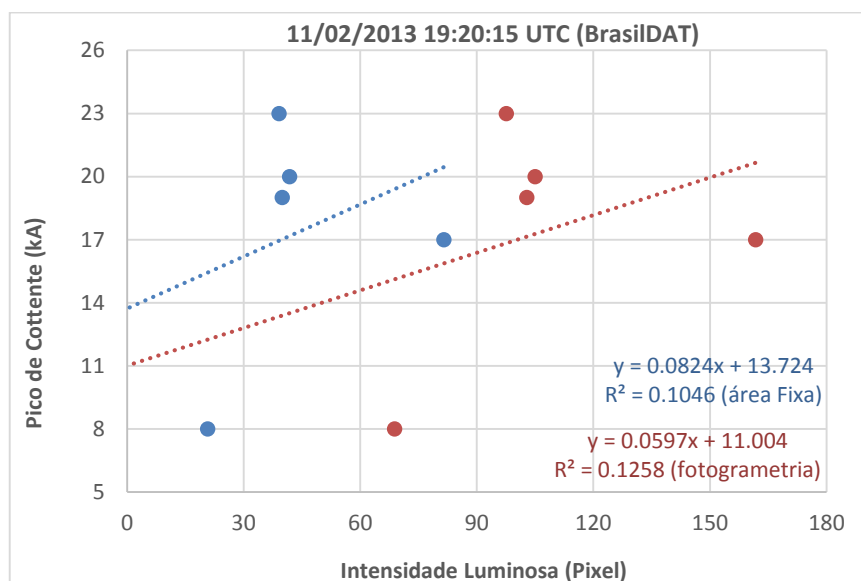
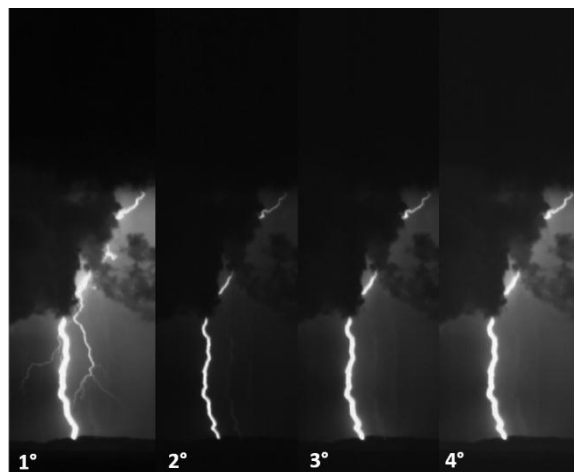


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 11/02/2013 às 19:20:15 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.15 – Caso 11 de fevereiro de 2013, 20:18:23 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 11/02/2013 às 20:18:23 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.16 - Luminosidade x pico de corrente (11/02/2013, 20:18:23 UTC)

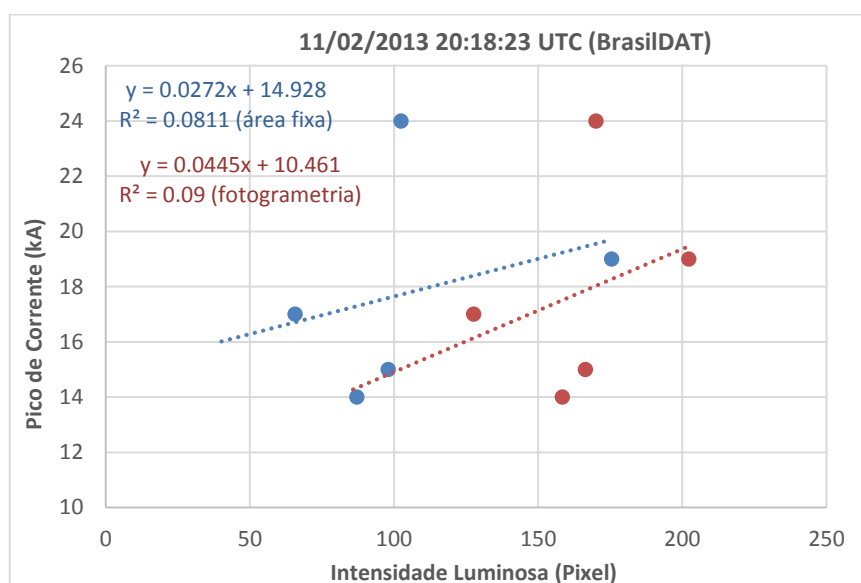


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 11/02/2013 às 20:18:23 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.17 – Caso 12 de fevereiro de 2013, 18:17:01 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 12/02/2013 às 18:17:01 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.18 - Luminosidade x pico de corrente (12/02/2013, 18:17:01 UTC)

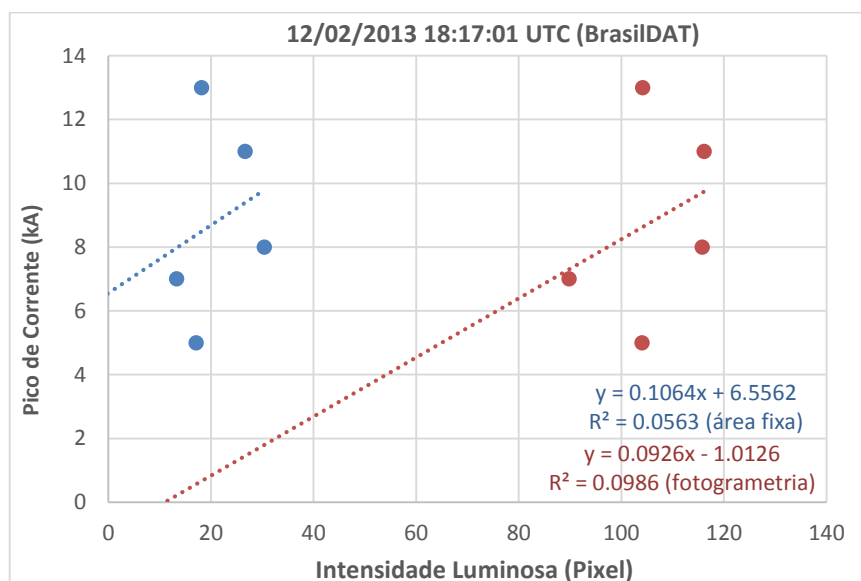


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 12/02/2013 às 18:17:01 UTC.

Fonte: Produção do autor

Figura F.19 – Caso 26 de fevereiro de 2014, 18:23:55 UTC



Sequência de imagens das quatro primeiras descargas de retorno do relâmpago registrado pela câmera de alta velocidade no dia 26/02:2014 às 18:23:55 UTC no Brasil

Fonte: Produção do autor

Figura F.20- Luminosidade x pico de corrente (26/02/2013, 18:23:55 UTC)

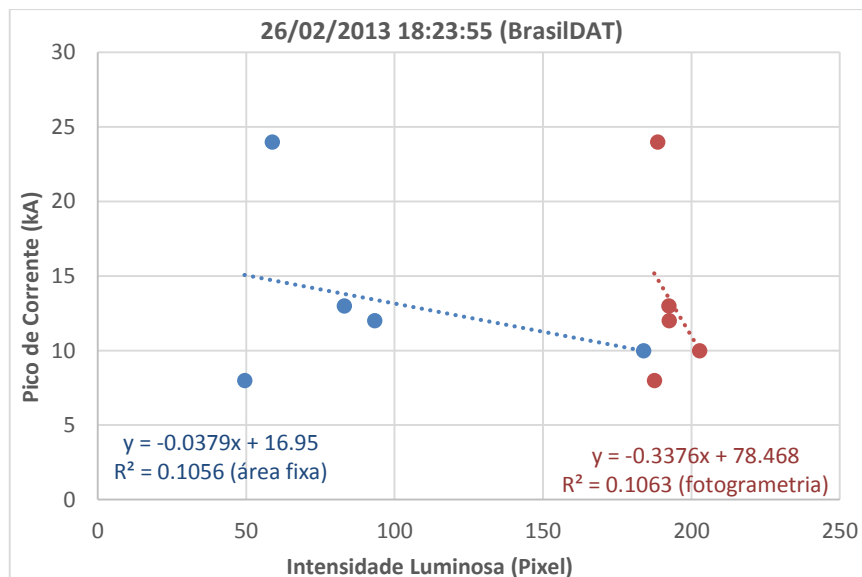


Gráfico de dispersão da luminosidade, extraída pelos métodos de área fixa (azul) e fotogrametria (vermelho), em relação ao pico de corrente (BrasilDAT) das descargas de retorno do relâmpago registrado no dia 16/02/2013 às 18:23:55 UTC.

Fonte: Produção do autor

