



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.04.19.06-TDI

**ESTUDO DOS RAIOS ASCENDENTES A PARTIR DE
OBSERVAÇÕES DE CÂMERAS DE ALTA RESOLUÇÃO
TEMPORAL E DE MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO**

Carina Schumann

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Marco Antonio da Silva Ferro, aprovada em 03 de junho de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKP8ML>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

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 (CST)

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.04.19.06-TDI

ESTUDO DOS RAIOS ASCENDENTES A PARTIR DE OBSERVAÇÕES DE CÂMERAS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL E DE MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO

Carina Schumann

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Marco Antonio da Silva Ferro, aprovada em 03 de junho de 2016.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LKP8ML>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Schumann, Carina.

Sc86e Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico / Carina Schumann. – São José dos Campos : INPE, 2016. xxvi + 152 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.04.19.06-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Marco Antonio da Silva Ferro.

1. Raios ascendentes. 2. Raios em torres. 3. Raios em estruturas altas. I.Título.

CDU 551.594.221:537.8



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

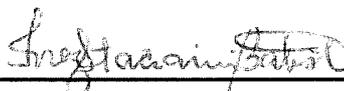
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Carina Schumann**

Título: "ESTUDO DOS RAIOS ASCENDENTES A PARTIR DE OBSERVAÇÕES DE CÂMERAS DE ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL E DE MEDIDAS DE CAMPO ELÉTRICO".

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

Dra. Inez Staciarini Batista



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



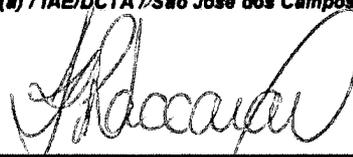
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marco Antonio da Silva Ferro



Orientador(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato



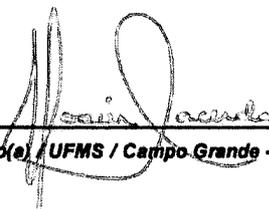
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Alexandre Plantini



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

Dr. Moacir Lacerda



Convidado(a) / UFMS / Campo Grande - MS

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 03 de junho de 2016

“Não bastam os esforços e a coragem, se não tiver um propósito e uma direção”.

John F. Kennedy

A minha amada Família.

AGRADECIMENTOS

À paciência e atenção dos meus familiares que ficavam animados a cada registro a cada resultado e também frustrados a cada tentativa de "caçar" raios e esses não aparecerem. Agradecê-los pelas festas onde por Skype celebrei aniversários onde me carregaram para eu ver meus sobrinhos, bolo, mudanças na casa durante as campanhas e estágios longe de casa. Pelo suporte nos prazos e por terem me mantido em foco.

Quero agradecer a meu companheiro Hugh pelo suporte emocional, pelos conselhos, pelas conversas para entender os raios em todos os fusos horários possíveis, sem você essa jornada não teria sido completa.

Ao amigo, pesquisador, companheiro de tempestade e também um pai: Tom Warner que me ensinou muito e tem muita paciência comigo a cada pergunta em cada situação. Que me abriu tantas oportunidades, confiou seus carros e equipamentos caríssimos e nos dias de sol seus filhos também.

Agradeço ao John Helsdon Jr. e Universidade SDMST em Rapid City pela oportunidade de participação no Projeto UPLIGHTS. AGS-1048103. Aos pesquisadores Ron Thomas, Bill Rison, Ken Cummins, Tim Samaras (in memory), Carl Samaras (in memory), Walter Lyons durante as campanhas.

Agradeço aos pesquisadores: Rachel Albrecht, Carlos Morales e Alexandre Piantini, da Universidade de São Paulo que nos ajudam desde a troca de baterias até à participação em análises e discussões

Agradeço aos pesquisadores Wolfgang Schulz, Gerhard Diendorfer, Hannes Pichler, Hannes Kohlmann pelo conhecimento transmitido, informações compartilhadas, apoio e discussão científica acaloradas e, em especial, na ALDIS a Petra Pohl com seu incondicional apoio em todos os momentos, mesmo nos menos esperados, desde antes mesmo da chegada até após a minha volta.

Agradeço ao amigo e pesquisador Moacir Lacerda pelas discussões e motivações.

Aos amigos e companheiros de campanhas: Benny, Raphael, Amanda, Julia, Mason, Christopher (Chip), Alana, Ryan e John Hamilton que encontraram assim como eu a paixão para registrar os fenômenos mais perigosos e intrigantes da natureza.

Meu eterno agradecimento aos anjos: Curtis e Fatima Sullivan que apareceram para me acudir num momento tão difícil.

Agradeço também aos amigos que fiz e que criamos uma grande rede de primos e irmãos ajudando uns aos outros numa terra de quatro bem definidas estações e uma língua alemã: Flavia, Alysson, Laura, Matteo, Nikki, Johanna, Lina.

Agradeço à Mirtes Monfardini pela amizade e por ter me abrigado em pesquisa de campo.

Agradeço à Rose e sua família que abriram a porta de seu apartamento para nós na primeira vez que nos viu e acreditar nos olhos brilhantes de duas alunas (Amanda e eu) amante dos raios.

Agradeço em especial e acima de tudo aos queridos orientadores Dr. Marcelo M.F. Saba e Dr. Marco A. S. Ferro que contestando, questionando e compartilhando produziram um ambiente de excelência, criatividade e elevado nível de pesquisa com os recursos disponíveis e que a cada encontro, e-mail ou discussão aumentavam minha crença em mim mesma. Gratidão eterna a ambos.

À Fapesp pelo apoio financeiro projetos 2012/15375-7, 2013/05784-0 e 2014/10299-6 CAPES/PROEX.

RESUMO

Nos últimos anos o interesse pelos raios ascendentes tem crescido muito com o crescente uso de estruturas altas associadas principalmente com torres de comunicação, edifícios altos e turbinas eólicas. Este trabalho descreve o estudo das características e iniciação dos raios ascendentes, feito pela primeira vez, no Brasil e nos Estados Unidos. Durante o estudo foram realizadas 8 campanhas de aquisição de dados. Para a caracterização dos raios ascendentes foram utilizados 100 casos registrados por câmeras rápidas. As características observadas foram: duração, ramificações, presença de *recoil leaders*, intervalo entre descargas, pulsos de corrente contínua inicial, entre outras. Também foram utilizados sensores de campo elétrico ambiente para determinar fase da tempestade em que os raios ascendentes se iniciaram e a sua influência no campo elétrico. Os dados de mapeamento tridimensional da descarga foram utilizados para verificar a propagação das descargas matrizes que são responsáveis pela iniciação dos raios ascendentes. Foram elaboradas hipóteses para a iniciação do raio ascendente e obtiveram-se confirmações parciais das mesmas.

Palavras-chave: Raios ascendentes. Raios em torres. Raios em estruturas altas.

Upward lightning flash characterization from high-speed camera videos and electric field measurements

ABSTRACT

Recently, the interest on upward flashes has increased, due to the recent increasing number of tall buildings, wind turbines, telecommunication towers, and man-made tall structures. The present study of upward flashes in Brazil and in United States allowed, for the first time, the characterization of upward flashes and its initiation. The data analyzed in this study was obtained during 8 campaigns. The characterization of upward flashes was based on a 100 cases registered by high-speed cameras. The characteristics observed were: duration, branching, presence of recoil leaders, interval between return strokes, pulses superimposed on the initial continuous current, etc. Also, electric field mill sensors were used to determine the thunderstorm phase that upward flashes occurred and their influence on the environment electric field. Data of the lightning mapping array was used to analyze the propagation of the triggering flashes i.e. responsible for triggering upward flashes. A hypothesis was elaborated for the initiation of upward flashes and a partial confirmation of them was obtained.

Keywords: Upward flashes. Flashes on towers. Lightning flashes in tall structures.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 Etapas de um raio descendente.....	8
Figura 2.2 Raio Ascendente	9
Figura 2.3 Etapas de um raio ascendente.....	10
Figura 3.1 Densidade de raios sobre a área urbana de São Paulo	14
Figura 3.2 Avenida Paulista: Torres sobre prédios altos.....	15
Figura 3.3 Gráfico de densidade de descargas atmosféricas em torno do Pico do Jaraguá (10km).....	15
Figura 3.4 a) Torre T1: Antenas da TV Globo e TV Bandeirantes entre outras antenas menores. A estrutura possui 130 metros; b) Torre T2 (90 metros) e outras torres de rádio no topo do Pico do Jaraguá.	16
Figura 3.5 Torres em São Paulo: Avenida Paulista à esquerda e Pico do Jaraguá à direita.	17
Figura 3.6 Localização de Rapid City	17
Figura 3.7 Perfil das torres em Rapid City – SD- EUA	18
Figura 3.8 Bases de observação em São Paulo	21
Figura 3.9 Sensores de campo elétrico atmosférico rápido na USP.....	22
Figura 3.10 Equipamentos a 27 metros da torre T1 no Pico do Jaraguá.....	23
Figura 3.11 Câmeras instaladas na sacada do apartamento em Pirituba	24
Figura 3.12 Câmeras instaladas no apartamento em Santana.....	25
Figura 3.13 Câmeras instaladas na estação do SBT	26
Figura 3.14 Localização dos equipamentos em Rapid City.....	27
Figura 3.15 Estações móveis.....	28
Figura 3.16 Estação móvel VAN: Banco traseiro para um operador. As câmeras faceiam a janela lateral do veículo.....	28
Figura 3.17 Estação móvel <i>Truck</i> : 2 assentos (um para motorista e outro para o operador), câmeras na janela frontal, computadores e telas para o operador..	29
Figura 3.18 - Base fixa 1: Sensores de campo elétrico: rápido (dois ganhos) e ambiente.....	30
Figura 3.19 Base fixa 2: Sensores de campo elétrico: rápido (um ganho) e ambiente.....	30
Figura 3.20 Sistema de gravação das câmeras rápidas (fila circular)	32
Figura 3.21 Modelos das câmeras utilizadas	32
Figura 3.22 Raio ascendente registrado por câmera rápida.	33
Figura 3.23 Tempo de chegada	34
Figura 3.24 Múltiplas de estações de LMA	36

Figura 3.25 Sensores durante campanha CHUVA em SP	37
Figura 3.26 Área de cobertura dos sensores de LMA em Rapid City.....	38
Figura 3.27 LMA de um raio ascendente.....	39
Figura 3.28 Sistemas de sensores de campo elétrico.....	41
Figura 3.29 Sensor de campo elétrico ambiente (<i>field mill</i>).....	42
Figura 5.1 Resultantes do campo elétrico vertical ambiente.....	48
Figura 5.2 Registro de EFM de tempestade com raio ascendente ocorrida em 10 de março de 2014	49
Figura 5.3 Campo elétrico ambiente durante a tempestade do dia 27 de março de 2012.....	50
Figura 5.4 Inversão do campo elétrico ambiente dos raios positivos que geraram raios ascendentes.....	53
Figura 5.5 Histograma da intensidade de campo elétrico ambiente nos momentos em que ocorreram os raios ascendentes.....	56
Figura 6.1 Propagação do líder dentro da nuvem.....	59
Figura 6.2 Intervalos de tempo entre o momento de contato do NS e o início do raio ascendente e em função da distância entre o ponto de contato e a torre..	60
Figura 6.3 Forma de onda típica: a) raio descendente positivo b) intra-nuvem.	61
Figura 6.4 Parâmetros da forma de onda.....	62
Figura 6.5 Exemplo de uma imagem do LMA com a propagação de um líder de uma possível descarga matriz sobre a torre do Pico do Jaraguá (sem produzir raio ascendente).	65
Figura 6.6 Exemplo de uma imagem de LMA em Rapid City. Os triângulos pretos indicam a posição das torres. O líder se propaga por sobre as torres sem produzir raios ascendentes.	66
Figura 6.7 Pico de corrente e distância dos casos em São Paulo das descargas.....	68
Figura 6.8 Pico de corrente e distância dos casos em Rapid City das descargas	68
Figura 6.9 Registro de LMA para um raio ascendente no Pico do Jaraguá (linha vermelha indica o início do líder ascendente).....	69
Figura 6.10 Registro de LMA para um raio ascendente em Rapid City (linha vermelha indica o início do líder ascendente).....	70
Figura 6.11 Distância das fontes de radiação à torre (Rapid City).....	71
Figura 6.12 Altura das fontes de radiação à torre (Rapid City).....	71
Figura 7.1 Pico de corrente estimado.....	75
Figura 7.2 Pico de corrente e distância das descargas matrizes	76
Figura 7.3 Raios ascendentes e torres envolvidas	77
Figura 7.4 Ramificação do raio ascendente.....	78

Figura 7.5 Tempo entre a iniciação do líder ascendente e a bifurcação.....	79
Figura 7.6 Líderes de recuo	80
Figura 7.7 Sequência de imagens sobrepostas de RL's.....	80
Figura 7.8 Intervalo de tempo entre a iniciação do líder ascendente e a ocorrência dos RL's	81
Figura 7.9 Duração da Corrente Contínua Inicial (CCI)	83
Figura 7.10 Distribuição da multiplicidade para ambas as regiões.....	85
Figura 7.11 Duração total do raio ascendente	90
Figura 7.12 Duração dos eventos do raio ascendente.....	91
Figura 8.1 Perturbação das linhas equipotenciais	95
Figura 8.2 Hipóteses para a iniciação dos raios ascendentes	96
Figura 8.3 Contribuições da tese para o entendimento da iniciação dos raios ascendentes.	98
Figura 8.4 Raios ascendentes auto-iniciados	99
Figura 8.5 Descarga de retorno dispara o líder ascendente	101
Figura 8.6 Líder ascendente disparado devido ao líder associado à corrente contínua da descarga matriz.....	101
Figura 8.7 Descarga de retorno do raio descendente após o início do líder ascendente	102
Figura 8.8 Campo elétrico resultante sobre a torre.....	104
Figura 8.9 Estimativa da altura da propagação horizontal do líder ascendente	105
Figura 8.10 Centro de cargas e propagação dos líderes.....	106
Figura 8.11 Locais de instalação dos sensores para verificação do fator de intensificação do campo devido à presença da montanha	108
Figura 8.12 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a tempestade período 1 – dados de média de minuto.....	109
Figura 8.13 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a tempestade período 2	110
Figura 8.14 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a condição de tempo bom.....	111
Figura 8.15 Altura efetiva da torre.....	112
Figura 8.16 Exemplos do perfil utilizado para determinar a altura das montanhas (<i>Google Earth</i>).....	113
Figura 8.17 Alturas efetivas por diferentes métodos	116
Figura 8.18 As alturas que teriam as torres sobre um terreno plano.....	117
Figura 8.19 Perfil de relevo das regiões em São Paulo	118

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 Características das regiões observadas	20
Tabela 4.1 Tabela das informações dos equipamentos que participam da hipótese	45
Tabela 4.2 Quantidade de registros por cada equipamento.....	45
Tabela 5.1 Polaridade de campo elétrico ambiente em tempestade com ocorrência de RA.	52
Tabela 5.2 Intensidade de campo elétrico ambiente	55
Tabela 6.1 Caracterização do pulso das descargas de retorno que antecedem raios ascendentes.....	63
Tabela 6.2 Informações sobre descarga matriz, propagação de líderes e ascendentes	66
Tabela 6.3 Informações sobre descarga matriz, propagação de líderes e ascendentes	67
Tabela 7.1 Corrente contínua inicial (CCI)	82
Tabela 7.2 Duração de corrente continua inicial (ms)	82
Tabela 7.3 Descargas de Retorno (DR).....	85
Tabela 7.4 Intervalo entre eventos	87
Tabela 7.5 Corrente Contínua	88
Tabela 7.6 Duração da CC (ms)	89
Tabela 7.7 Duração Total (ms).....	90
Tabela 8.1 Resumo dos casos e as situações	103
Tabela 8.2 Altura efetiva de torres do mundo	115

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NS	Raio Nuvem solo
IN	Raio intra-nuvem
RA	Raio Ascendente
ICC ou CCI	Corrente contínua Inicial ou do inglês Initial Continuous Current
NSF	National Science Foundation
SD	South Dakota
Lat	Latitude
Long	Longitude
SBT	Sistema Brasileiro de Televisão
IAG	Instituto de Astronomia e Geofísica
EFM	Electric Field Mill
DVR	Digital Video Recorder
qps	Quadros por segundo
HD	High-Definition
GPS	Global Positioning System
TOA	Time of Arrival
MDF	Magnetic Direction Finding
NLDN	National Lightning Detection Network
LMA	Lightning Mapping Array
VHF	Very-high frequency
Field Mill	Sensor de campo elétrico ambiente
LLS	Lightning Location System
MSC	Sistema convectivo de mesoescala
EUA	Estados Unidos da América
RL	Recoil Leader ou líderes de recuo
AM	Média aritmética
GM	Média Geométrica
Min	Mínimo
Max	Máximo

CC	Corrente Contínua
E_c	Campo elétrico crítico
E_o	Campo elétrico inicial
E_f	Campo elétrico final
ΔEI	Varição de carga devido ao líder da descarga matriz
ϕ	Função relevo
Q	Carga elétrica
H	Altura efetiva
a	Altura da montanha

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. RELEVÂNCIA E INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. LOCAIS DE OBSERVAÇÃO E EQUIPAMENTO UTILIZADO	13
3.1. Locais de Observações	13
3.1.1. São Paulo	13
3.1.2. Rapid City.....	17
3.2. Bases de Observação.....	21
<i>São Paulo</i>	21
3.2.1. Universidade de São Paulo – USP	22
3.2.2. Pico do Jaraguá.....	23
3.2.3. Apartamento no bairro de Pirituba.....	24
3.2.4. Apartamento no bairro de Santana	24
3.2.5. Estação SBT.....	25
<i>Rapid City</i>	26
3.2.6. Estações móveis	27
3.2.7. Base fixa 1 - TW	29
3.2.8. Base Fixa 2 – Sound Pro	30
3.3. Equipamentos	31
3.3.1. Câmeras Rápidas	31
3.3.2. Sistema de Localização.....	33
3.3.3. LMA – Mapeamento 3D	35

3.3.4.	Sensores de campo elétrico	39
4.	METODOLOGIA	43
5.	CAMPO ELÉTRICO AMBIENTE.....	47
6.	CARACTERÍSTICA DOS EVENTOS PRECURSORES	57
6.1	Análise do campo elétrico rápido das descargas matrizes.	57
6.2.	Propagação do líder por LMA.....	64
7.	CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS ASCENDENTES.....	73
7.1	Descargas matriz	74
7.2	Múltiplas torres envolvidas	76
7.3	Propagação do líder ascendente e suas ramificações	77
7.4	Corrente Contínua Inicial	81
7.5	Descargas de retorno e multiplicidade	83
7.6	Intervalo entre descargas de Retorno	85
7.7	Corrente continua nas descargas de retorno	88
7.8	Duração total do raio ascendente.	89
8.	HIPÓTESE PARA INICIAÇÃO DE RAIOS ASCENDENTES.....	93
8.1	Variação do campo elétrico devido ao líder associado à descarga matriz (ΔE) 99	
8.1.1	Componentes da descarga matriz.....	100
8.1.2	Centro de cargas e regiões onde os líderes se propagam.....	103
8.2	Variação do campo elétrico em função do relevo (φr)	106
8.2.1	Medidas da influência da montanha na intensificação do campo elétrico	107
8.3	Determinação da altura da montanha (φt)	112
9.	CONCLUSÕES.....	119
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
10.	Anexo 1 - Calibração campo elétrico rápido	129

11. Anexo 2 - Calibração campo elétrico ambiente	131
12. Anexo 3 - Imagens de LMA.....	133
13. Anexo 4 - Altura efetiva por diferentes métodos	151

1. RELEVÂNCIA E INTRODUÇÃO

O impacto com que as tempestades e seus principais produtos, tais como ventos, raios, granizo, afetam a sociedade é assunto de interesse de toda a população.

Os raios são, em sua grande maioria, descendentes, ou seja, iniciam nas nuvens e se conectam em algum ponto no solo. Porém, essa não é a única direção que os raios percorrem. Mesmo que em minoria, os raios ascendentes, isto é, aqueles que iniciam em algum ponto no solo (prédios, torre, estruturas altas, etc.) e se propagam em direção às nuvens, também causam impacto na sociedade.

A proporção entre descendentes e ascendentes varia com a região. Em certas regiões essa proporção pode mudar radicalmente, podendo haver uma maioria de raios ascendentes.

Os raios ascendentes têm se tornado, com o passar dos anos, de muito interesse devido ao aumento do número de estruturas altas feitas pelo homem tais como: torres de comunicação, turbinas eólicas, entre outras.

Uma das características desses raios ascendentes, que difere dos raios descendentes, é seu ponto de contato no solo. Os raios descendentes positivos possuem quase sempre uma única descarga e um ponto de contato. Os raios descendentes negativos possuem descargas subsequentes, mas 50% dessas descargas subsequentes utilizam diferentes pontos de contato e, segundo Saba et al., (2006), o mesmo ponto de contato será, em média, atingido 2 vezes.

Além dos raios ascendentes iniciarem e ramificarem de um ponto no solo, o qual é submetido a diversas descargas subsequentes, a estrutura alta situada nesse ponto pode dar origem a diversos raios numa mesma tempestade.

As estruturas altas têm probabilidade centenas de vezes maior de iniciarem um raio ascendente do que serem atingidas por um raio descendente (DIENDORFER et al., 2006; HEIDLER, 2002). Segundo Diendorfer et al. (2005), 236 dos 242 eventos, para os quais houve conexão de uma descarga na torre

instrumentada de Gaisberg, na Áustria, foram classificados como raios ascendentes. Já na torre em Peissenberg, na Alemanha, 116 descargas que conectaram com a torre foram ascendentes e somente 1 evento foi raio descendente (HEIDLER, 2002).

O registro de raios ascendentes pode ser feito por diferentes métodos, tais como, câmeras e medidas de corrente entre outros. Alemanha, Áustria, Japão, Estados Unidos e Canadá são alguns dos poucos países que possuem registros desse fenômeno. Cada um desses locais de observação tem suas limitações, tanto meteorológicas quanto de equipamentos. Como consequência, há pouco conhecimento sobre a física e as características dos raios ascendentes.

Durante um projeto realizado em colaboração com a Universidade SDMT nos Estados Unidos, onde o objetivo era observar e caracterizar os raios ascendentes que ocorriam na cidade de Rapid City, a dúvida de que se existiam raios ascendentes no Brasil surgiu. Assim, o tema do projeto e desta tese de doutorado teve início a partir desta dúvida. O grupo ELAT já havia registrado mais de 3000 vídeos de raios em câmera rápida, na cidade de São José dos Campos, e nenhum deles iniciou do solo em direção a nuvem. Em uma análise de densidade de descargas atmosféricas, a cidade de São Paulo apresentou uma alta densidade de raios por quilômetro quadrado; e apresentou também uma outra característica, uma maior quantidade de torres e prédios altos (muito mais altos que em São José dos Campos). Assim, São Paulo se tornou a cidade base dos estudos. As regiões que possuem mais torres são as regiões da avenida Paulista e também a região do Pico do Jaraguá. Elas também apresentam uma alta densidade de raios. Decidiu-se observar tanto as torres da avenida Paulista quanto as torres do Pico do Jaraguá. Após algumas tempestades tivemos o primeiro registro de um raio ascendente na região do Pico do Jaraguá. E desde então os raios são observados e registrados por câmeras rápidas.

Nas torres da avenida Paulista ocorreram casos de raios ascendentes mas não na mesma frequência observada nas torres do Pico do Jaraguá. Assim apresentaremos as características das torres de ambas regiões no Brasil para comparar e analisar as razões pelas quais as torres não apresentaram a mesma taxa de ocorrência de raios ascendente.

No Brasil e nos Estados Unidos temos condições meteorológicas que favorecem a observação de todo o trajeto percorrido pelo raio ascendente bem como suas características.

Além da sugestão de Berger (1967) de que os raios ascendentes são iniciados quando uma mudança no campo elétrico ambiente acontece, essa pesquisa busca identificar outras possíveis condições necessárias (o que provoca uma variação de campo elétrico, qual intensidade desta variação, qual é proximidade desta variação de campo elétrico), para a iniciação dos raios ascendentes.

O objetivo da tese é propor uma teoria nova, sobre os mecanismos e características dos raios ascendentes, baseada em resultados de medidas experimentais.

As medidas experimentais foram realizadas, desde 2011, por diversos sensores. Os resultados foram sincronizados no tempo e analisados de maneira para extrair a física dos raios ascendentes e fundamentar a teoria criada.

Esta tese de doutorado será estruturada da seguinte maneira:

No Capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica e todos os termos necessários e usados no documento para a compreensão dos estudos realizados.

No Capítulo 3 serão descritos os locais de observação, bases de observação e uma descrição técnica detalhada dos equipamentos utilizados. Nos capítulos seguintes, quando necessário, serão lembrados os equipamentos e suas

características mais relevantes que contribuíram para os resultados obtidos no capítulo em questão.

No Capítulo 4 será apresentada a metodologia utilizada na análise dos dados para obtenção da hipótese final.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises das tempestades através de sensores de campo elétrico ambiente. A fase da tempestade em que os raios ascendentes aconteceram e a influência destes no campo elétrico ambiente.

No Capítulo 6 são abordadas as características dos eventos precursoros. Os resultados foram obtidos a partir da análise dos registros que sensores de campo elétrico fizeram dos eventos que precedem os raios ascendentes, isto é, foram analisadas as características da estrutura fina de radiação dos raios nuvem-solo positivos e dos intra-nuvem que geraram os raios ascendentes.

O Capítulo 7 é destinado às características dos raios ascendentes registrados por câmera rápida. Será apresentado o comportamento óptico dos raios ascendentes tais como: duração, multiplicidade, tempo entre uma descarga e outra, ramificações.

Capítulo 8: Iniciação dos raios ascendentes – A influência do relevo, do campo elétrico ambiente e dos fatores circundantes é apresentadas neste capítulo.

Capítulo 9: Discussão e Conclusão. – os resultados obtidos serão apresentados, tendo por base o que foi discutido nos capítulos anteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

McEachron (1939) fez o primeiro registro de raios ascendentes na comunidade científica. Com o crescente mercado de turbinas eólicas, de estruturas de antenas de telefonia móvel/TV e aparecimento de edifícios altos cresce a frequência do fenômeno, assim como o interesse por ele. Há registros de que raios ascendentes podem ocorrer tanto em tempestades de inverno (TAKAGI et al., 2006; WANG et al., 2008; LU et al., 2009; DIENDORFER et al., 2009) quanto em tempestades de verão (MIKI et al., 2005; FLACHE et al., 2008; MAZUR; RUHNKE, 2011; WARNER, 2012).

Os raios ascendentes são observados em estruturas altas, ou muito altas (do termo em inglês *very high structures*). As estruturas com altura maior do que 60 metros são denominadas estruturas altas. Esse valor adotado (60 metros) é definido por uma das categorias das normas de proteção às estruturas contra descargas atmosféricas (IEC 62305).

As observações de Berger (1967) sugerem que descargas ascendentes também acontecem após uma mudança súbita do campo elétrico ambiente devido à ocorrência prévia de uma descarga descendente. Orville e Berger (1973) sugerem que essas mudanças súbitas também podem ser devido à ocorrência de descargas intra-nuvem.

Wang et al. (2008) sugerem duas categorias para os raios ascendentes: o primeiro tipo seria os **disparados por uma descarga prévia (descarga matriz)**; e o segundo tipo os **auto-iniciados**.

Seguindo a literatura, durante essa tese os raios serão diferenciados pelas categorias:

- **Raios ascendentes disparados por uma descarga matriz:** onde os líderes ascendentes que se iniciam das estruturas altas após uma variação de

súbita no campo elétrico. Essa variação súbita pode ser associada a um raio descendente ou a uma descarga intra-nuvem.

- **Raios auto-iniciados:** onde os líderes ascendentes se iniciam de maneira espontânea, isto é sem a variação súbita do campo elétrico.

Em algumas localidades, como por exemplo, na torre da Suíça somente a categoria de auto-iniciados é observada. E em outros lugares, como *Gaisberg Tower*, na Áustria, puderam ser observadas ambas as categorias: a dos auto-iniciados e a dos disparados por outra descarga matriz (SMORGONSKIY et al., 2015; DIENDORFER et al., 2009).

Podemos classificar as descargas elétricas tanto pela polaridade da carga transferida (positiva, negativa ou bipolar) como também por sua direção de propagação: da nuvem para o solo, os chamados raios descendentes (NS); dentro da nuvem, também conhecidos como relâmpagos intra-nuvem (IN); ou do solo para a nuvem, os chamados raios ascendentes (RA).

Como nesse estudo são apresentadas as características dos raios descendentes que desencadeiam raios ascendentes, descrevemos, a seguir, as etapas conhecidas na literatura de um raio descendente. E, na sequência, as etapas de um raio ascendente.

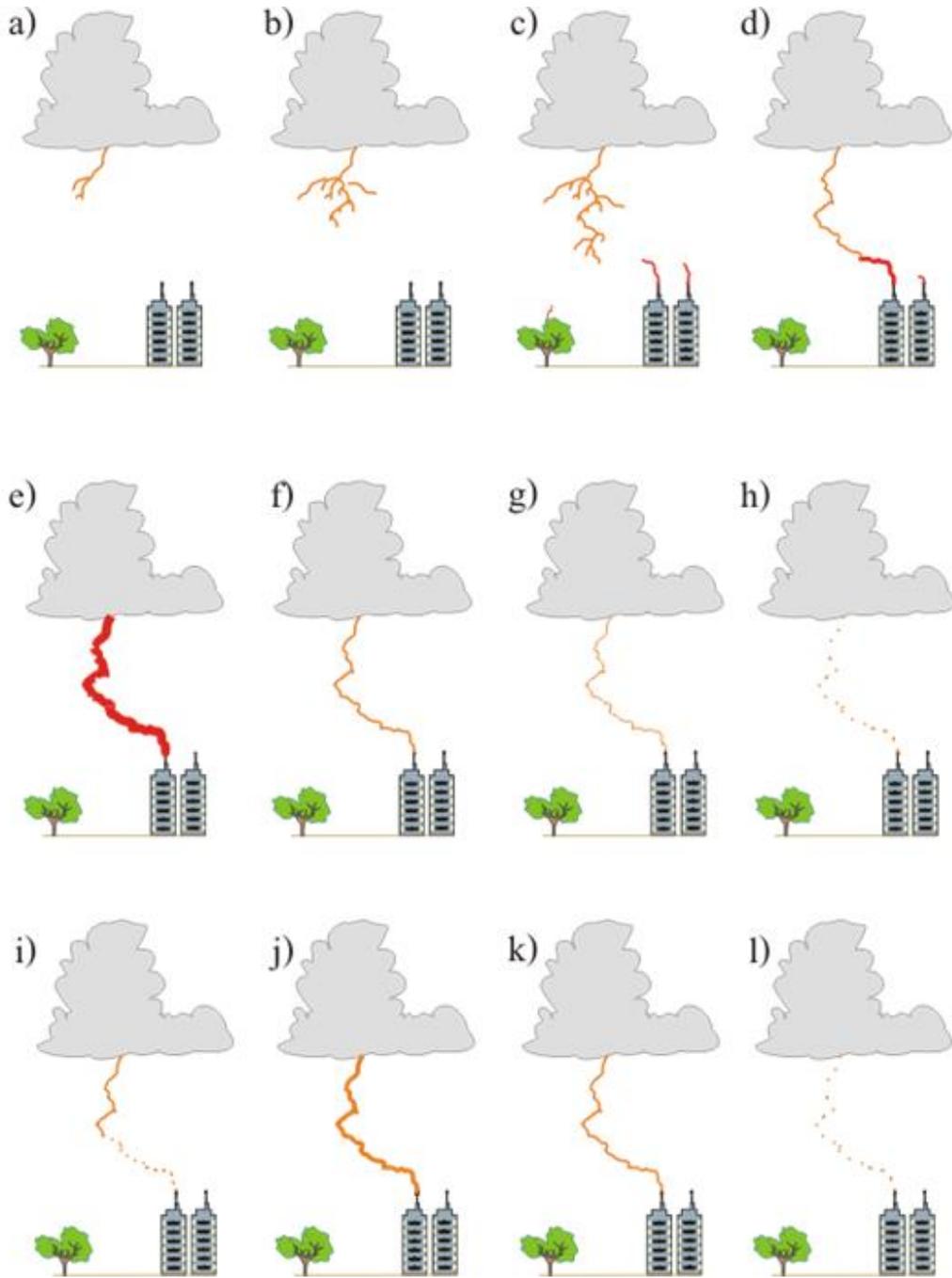
Etapas de um raio descendente

Um líder descendente se inicia na nuvem e se propaga em direção ao solo (Figura 2.1 a e b). Ao se aproximar do solo, descargas conectivas podem ou não partir de árvores ou estruturas altas (Figura 2.1 c). As descargas podem tocar um ou mais pontos no solo (raios bifurcados). Uma vez estabelecido o canal da descarga, cargas começam a fluir entre a nuvem e o solo (processo conhecido como descarga de retorno - Figura 2.1e). O raio pode finalizar após essa intensa transferência de cargas ou uma corrente de intensidade menor

pode perdurar por até centenas de milissegundos (processo conhecido como corrente contínua).

Uma vez finalizada essa transferência de cargas, após um período sem corrente no canal (Figura 2.1h), pode ocorrer, ainda, que um novo líder descendente utilize o mesmo canal (Figura 2.1 i), ou também podem utilizar-se de um novo canal, dando início, como consequência, a uma nova descarga denominada descarga de retorno subsequente (Figura 2.1j). Esse processo pode ocorrer uma ou mais vezes, característica conhecida como a multiplicidade do raio descendente.

Figura 2.1 Etapas de um raio descendente



Fonte: Imagem criada pela autora.

A polaridade do raio é determinada pela polaridade da carga transferida ao solo. Assim, raios descendentes negativos são raios que transferem elétrons para o solo. Raios positivos são raios que transferem elétrons do solo para a nuvem.

Os raios bipolares são raros e possuem duas descargas no mínimo, uma de cada polaridade.

Os raios positivos possuem uma característica diferente dos raios negativos, eles possuem descargas de recuo (ou do termo inglês: Recoil Leaders) durante a propagação do líder.

Etapas de um raio ascendente

Quando o campo elétrico ambiente se intensifica sobre uma estrutura alta, um líder ascendente pode se iniciar a partir do topo da estrutura (Figura 2.2).

Figura 2.2 Raio Ascendente



Fonte: Fotos tiradas durante as campanhas

A mudança abrupta do campo elétrico ambiente, devido a uma descarga matriz, pode contribuir para o início do líder ascendente.

O líder ascendente pode ou não se bifurcar. Uma vez que o líder ascendente se propaga em direção à base da nuvem (Figura 2.3B), uma corrente começa a fluir nesse canal e é chamada de corrente contínua inicial ou ICC (do termo

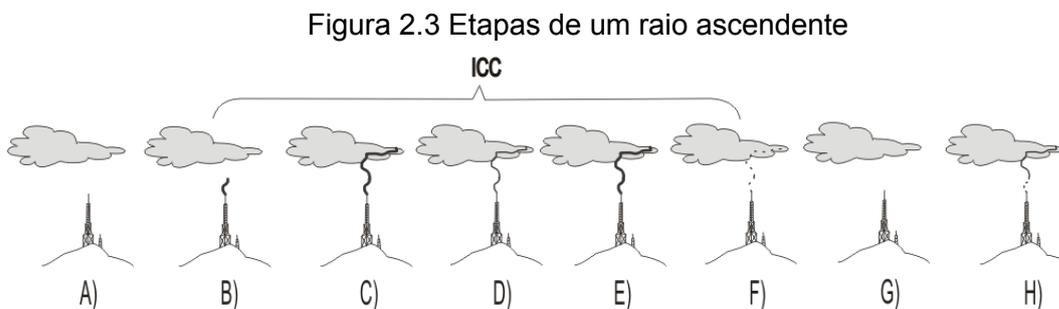
inglês Initial Continuous Current). Próximo à base da nuvem esse canal passa a se propagar predominantemente na horizontal (Figura 2.3C)

Com o canal completo, a luminosidade no canal pode variar, indicando a flutuação da corrente no canal (Figura 2.3D). Podem surgir intensificações da luminosidade através de pulsos chamados pulsos de ICC (Figura 2.3E).

Quando a corrente deixa de fluir pelo canal ocorre o fim da corrente contínua inicial. Esse pode ser o final do raio ascendente ou não.

Após um período sem corrente no canal (Figura 2.3G), pode ocorrer uma ou mais descargas de retorno descendentes utilizando o canal formado previamente pelo líder ascendente (Figura 2.3H)

Estas descargas de retorno podem ser seguidas de corrente contínua. As correntes contínuas podem apresentar flutuações na corrente do canal (chamadas de componentes M)



Fonte: Imagem criada pela autora.

Um raio ascendente, pode ter mais do que uma torre envolvida, isto é, em torres próximas (na mesma região e mesmo horário). Pode-se observar diferentes torres disparando líderes ascendentes, devido a mesma variação abrupta de campo elétrico (descarga matriz).

Os líderes dos raios ascendentes e dos raios descendentes apresentam a mesma característica, como por exemplo, líderes ascendentes positivos possui descarga de recuo.

3. LOCAIS DE OBSERVAÇÃO E EQUIPAMENTO UTILIZADO

A descrição técnica mais detalhada dos locais de observação de raios ascendentes e os equipamentos utilizados no estudo são tema deste capítulo. Nos capítulos seguintes, quando necessário, serão lembrados os equipamentos e suas características mais relevantes que contribuíram para os resultados obtidos no capítulo em questão.

Os dados utilizados nessa tese de doutorado foram gravados em dois países. Algumas variações foram necessárias na instalação dos equipamentos utilizados em diferentes campanhas de aquisição de dados. Nos itens a seguir estão as descrições de cada local e condições de observação.

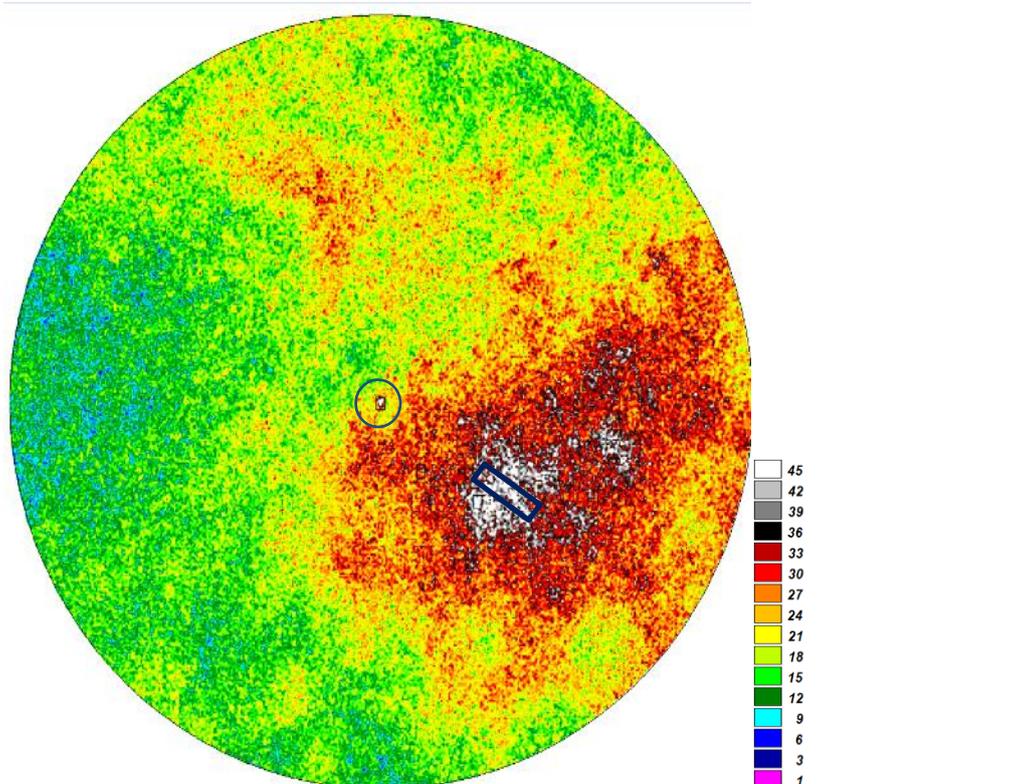
3.1. Locais de Observações

Nessa tese serão apresentados os resultados obtidos das análises dos raios ascendentes observados nas cidades de São Paulo, no Brasil, e Rapid City, nos Estados Unidos.

3.1.1. São Paulo

Com o auxílio de um mapa de densidade de raios da cidade de São Paulo, obtido a partir dos registros da rede de detecção de raios local, foram identificadas duas regiões de interesse para o estudo de raios ascendentes: Avenida Paulista e Pico do Jaraguá. A Figura 3.1 mostra a densidade de raios para a cidade de São Paulo. O círculo central delimita a área ao redor do Pico do Jaraguá e o retângulo está sobre a área da Av. Paulista.

Figura 3.1 Densidade de raios sobre a área urbana de São Paulo



Unidade de medida: número de raios /km² dados acumulados de 1999 a 2015 (50 km de raio em torno do Pico do Jaraguá)

Fonte: Banco de dados de descargas atmosféricas ELAT (2015)

A Avenida Paulista reúne três características importantes para observação de raios ascendentes: alta densidade de flashes; possui mais de 100 estruturas metálicas altas inclusive no topo de prédios; e a região é alta em relação às redondezas (Figura 3.2).

Figura 3.2 Avenida Paulista: Torres sobre prédios altos

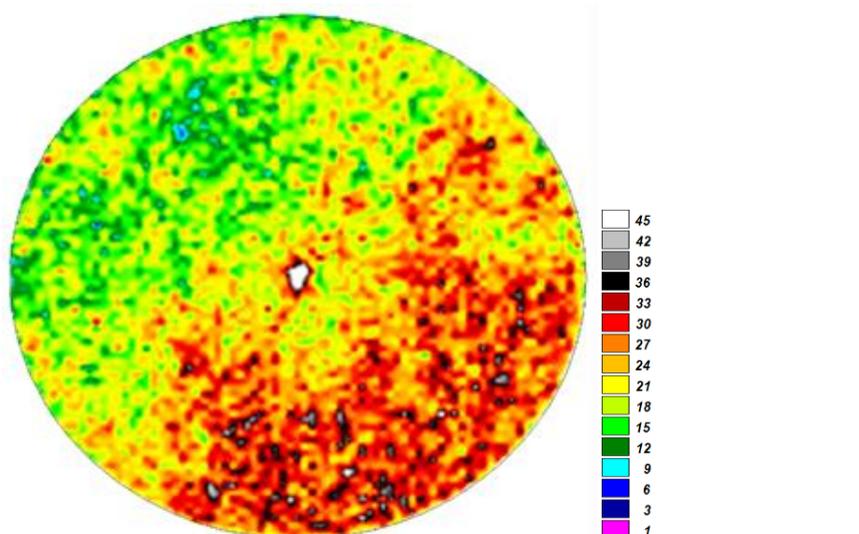


Fonte: BOARO (2016)

O Pico do Jaraguá está localizado em um parque nacional, com reserva da Mata Atlântica. A montanha fica cerca de 300 metros acima dos arredores e possui diversas torres de comunicação instaladas no topo.

Na Figura 3.3 um círculo com 10 km de raio mostra uma alta densidade de descargas atmosféricas no Pico do Jaraguá localizado no centro da figura, assim como na região central da cidade localizada na parte mais baixa do círculo da Figura 3.1.

Figura 3.3 Gráfico de densidade de descargas atmosféricas em torno do Pico do Jaraguá (10km)

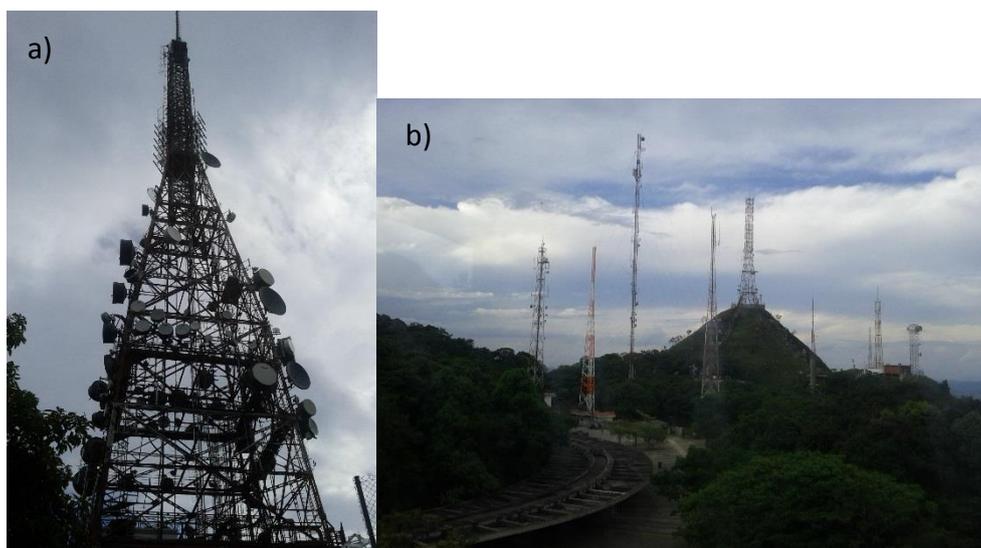


Unidade de medida: número de raios /km² dados acumulados de 1999 a 2015 Fonte: Banco de dados de descargas atmosféricas ELAT(2015)

Na Figura 3.4 são mostradas as principais torres do Pico do Jaraguá. As torres nas quais houve ocorrência de raios ascendentes foram denominadas T1, T2 e T3 de acordo com o número de ocorrência em cada uma. A torre T1 é a que mais produziu raios, ela possui 130 metros de altura. A torre T2, com 90 metros de altura, produziu alguns raios. Também houve casos de raios que iniciaram simultaneamente de ambas as torres. A torre T3, também com 90 metros de altura, só produziu um raio durante todos os anos de registro.

Durante o período de observação, de 2011 a 2016, o número de raios ascendentes observados foi acima da média esperada (média calculada pela densidade de raios por quilômetro quadrado por ano encontrada na **Figura 3.3** de três raios por ano). O número esperado de descargas foi estimado com base nas informações dos sistemas de detecção que registram as descargas mais intensas como, por exemplo, a primeira descarga retorno, e como os raios ascendentes não possuem essa característica, não são detectados. (PAIVA, 2014).

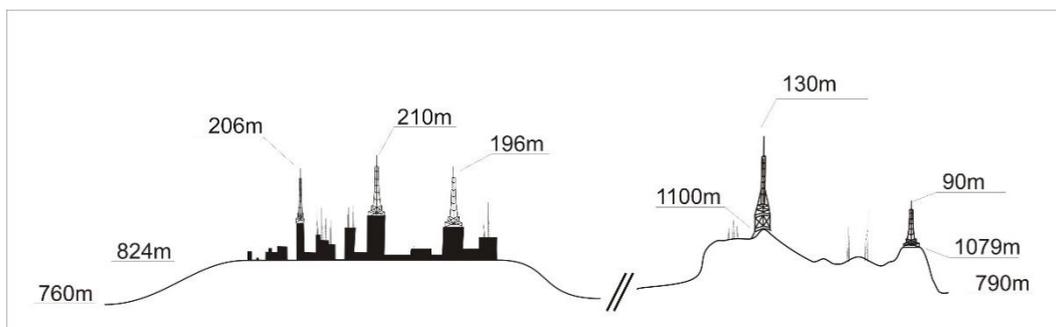
Figura 3.4 a) Torre T1: Antenas da TV Globo e TV Bandeirantes entre outras antenas menores. A estrutura possui 130 metros; b) Torre T2 (90 metros) e outras torres de rádio no topo do Pico do Jaraguá.



Fonte: Foto tirada pela autora

A Figura 3.5 mostra o perfil do terreno e altura das torres nas regiões em que foram observados raios ascendentes em São Paulo.

Figura 3.5 Torres em São Paulo: Avenida Paulista à esquerda e Pico do Jaraguá à direita.



Fonte: Imagem criada pela autora

3.1.2. Rapid City

Dentro do projeto financiado pela NSF - National Science Foundation, foram realizadas campanhas de aquisição na cidade de Rapid City durante os verões dos anos de 2011 a 2014. Na Figura 3.6 a cidade de Rapid City está localizada no centro-norte dos Estados Unidos, no estado de Dakota do Sul.

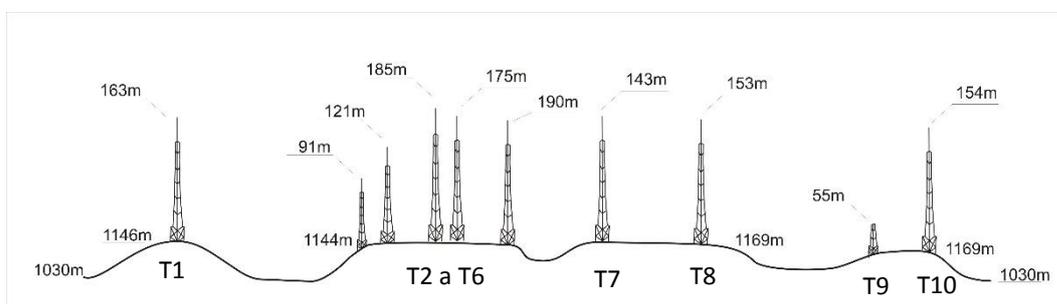
Figura 3.6 Localização de Rapid City



Fonte: Google Maps® 2016

Em Rapid City existem 10 torres de telecomunicação onde são observados raios ascendentes desde 2008 pelo pesquisador Tom A. Warner (WARNER, 2010). Em 2010 umas das torres foi reduzida de tamanho não mais produzindo raios ascendentes. A cidade está a 1030 metros de altitude em relação ao nível do mar e a altura das torres varia de 55 a 190 metros, como mostra a Figura 3.7 a seguir.

Figura 3.7 Perfil das torres em Rapid City – SD- EUA



Fonte: Imagem criada pela autora

Warner et al. (2010), analisando a densidade de flashes na região de Rapid City, não encontrou uma alta densidade como a encontrada na região do Pico de Jaraguá por Saba et al. (2012). Embora não apresente o mesmo comportamento, um número considerável de raios ascendentes foi registrado em Rapid City.

A

Tabela 3.1 mostra um resumo das características das regiões observadas nesse estudo.

Tabela 3.1 Características das regiões observadas

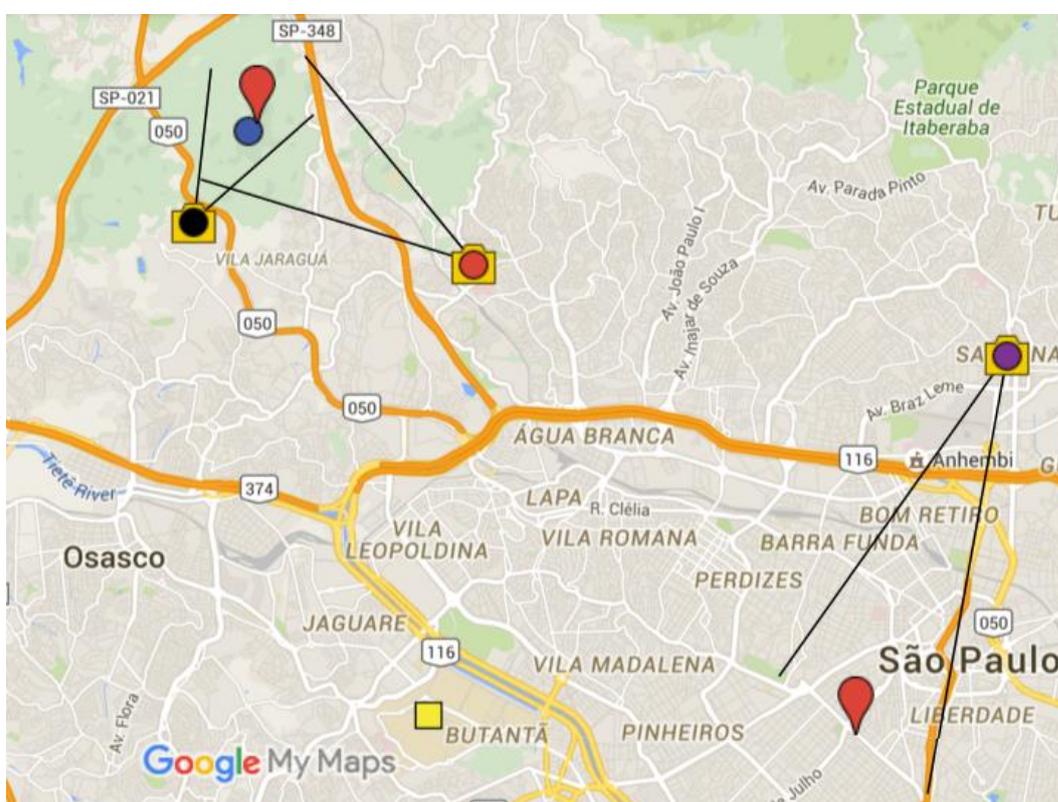
	Rapid City	Pico do Jaraguá	Av. Paulista
Características de localização			
Coordenadas (lat, lon)	44,08; 103,23	- 23,55; - 46,63	-23,57; -46,63
Altitude da região (m)	1030	760	832
Altura da base da nuvem (km) Dado de radiossondagem - nível de condensação por levantamento	2-4	1,2 – 3,4	1,2 – 3,4
Densidade de raios (descargas/km ² /ano)	3	15	15
Características das Torres			
Altura das torres(m)	55 - 191	90 – 130	Até 210
Número de Torres que produzem raios ascendentes	8	3	6
Máxima distância entre torres (km)	8	14	8
Distância entre as torres e as câmeras (km)	2,5 – 9,0	1,0 – 8,5	6,0-8,0

3.2. Bases de Observação

São Paulo

Na cidade de São Paulo foram utilizadas 5 bases de observação: a Universidade de São Paulo, o Pico do Jaraguá, um apartamento no bairro Pirituba, um apartamento no bairro Santana e uma estação no SBT. A Figura 3.8 a seguir mostra a localização das bases de observação.

Figura 3.8 Bases de observação em São Paulo



Universidade de São Paulo (quadrado amarelo), Pico do Jaraguá (círculo azul), apartamento no bairro de Pirituba (câmera com círculo vermelho), apartamento no bairro de Santana (câmera com círculo roxo), SBT (câmera com círculo preto) Pico do Jaraguá (Balão vermelho no canto superior à esquerda) e Avenida Paulista (Balão vermelho no canto inferior à direita)

Fonte: Produção da autora na ferramenta *Google My Maps*® (2016)

3.2.1. Universidade de São Paulo – USP

Na universidade de São Paulo foram instalados, na laje do prédio do Instituto de Astronomia e Geofísica (IAG), um sistema composto por sensores de campo elétrico atmosférico rápido e lento e, em colaboração com os pesquisadores da universidade, sensores do tipo *Electric Field Mill* (EFM) para monitoramento do campo elétrico atmosférico ambiente.

O prédio do IAG fica localizado a 11 quilômetros das torres do Pico do Jaraguá e a 8 quilômetros da Avenida Paulista.

Os sensores estão instalados na laje de um prédio de 3 andares (Figura 3.9). O aumento na intensidade do campo elétrico atmosférico devido à deformação das linhas equipotenciais de campo causada pela altura do prédio foi determinado ser 2,5 maior do que se o mesmo equipamento estivesse instalado na base do prédio (ver anexo 1)

Figura 3.9 Sensores de campo elétrico atmosférico rápido na USP



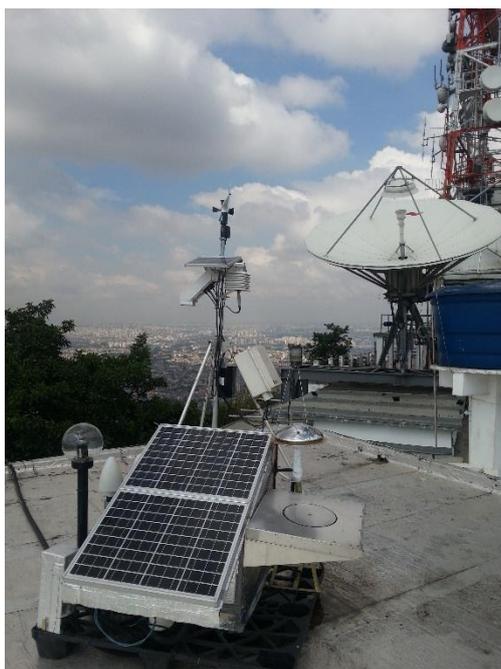
Fonte: Foto tirada pela autora

3.2.2. Pico do Jaraguá

No alto do Pico do Jaraguá, a 27 metros de distância da base da torre T1 (que possui 130 metros de altura) foram instalados um sistema de campo elétrico rápido, uma câmera com taxa de aquisição de 100 imagens por segundo e lente com 175 graus de abertura, um sensor de campo elétrico ambiente acoplado a uma estação meteorológica provida de anemômetro (medidor de direção e intensidade do vento), pressão e temperatura (Figura 3.10).

O aumento na intensidade do campo elétrico atmosférico devido à montanha foi determinado ser de 6,5 vezes para condição de tempo bom (sem tempestade) e de 10 vezes em condição de tempestade (mais detalhes no capítulo 8.2.1).

Figura 3.10 Equipamentos a 27 metros da torre T1 no Pico do Jaraguá



Fonte: Foto tirada pela autora.

3.2.3. Apartamento no bairro de Pirituba

O apartamento fica localizado a 5 quilômetros do Pico do Jaraguá, no bairro de Pirituba, com vista plena das torres instaladas no alto do Pico do Jaraguá (Figura 3.11).

O apartamento é de um colaborador da pesquisa, Benny, responsável pelo acionamento das câmeras durante as tempestades. Foram instaladas na sacada do apartamento câmeras rápidas e câmeras convencionais (30 imagens por segundo). O registro de raios por meio dessas câmeras tem sido realizado desde novembro de 2011 até os dias de hoje.

Figura 3.11 Câmeras instaladas na sacada do apartamento em Pirituba



Fonte: Foto tirada pela autora.

3.2.4. Apartamento no bairro de Santana

O apartamento fica localizado em uma região elevada, no bairro de Santana a 7 quilômetros, em linha reta, da avenida Paulista. O local, posicionado a uma distância e ângulo estratégicos em relação à Avenida Paulista possibilita a

observação de todas as torres da Avenida e algumas outras estruturas na região próxima, sem sobrepô-las na imagem.

Nessa base de observação, durante todo o verão de 2012/2013, a cada tempestade, eram instaladas câmeras rápidas (Figura 3.12a) e, na parte superior, uma câmera convencional com DVR (do termo inglês *Digital Video Recorder*) (Figura 3.12b).

Figura 3.12 Câmeras instaladas no apartamento em Santana



Fonte: Fotos tiradas pela autora.

3.2.5. Estação SBT

Durante o verão de 2012-2013 foi instalada uma estação localizada dentro das dependências da emissora de televisão SBT (Sistema Brasileiro de Televisão).

Os motivos que levaram à escolha desta base foram: o ângulo de registro (90 graus em relação à câmera instalada no apartamento de Pirituba) e a proximidade das torres do Pico do Jaraguá (1 km em linha reta).

A estação foi instalada dentro de uma das guaritas de segurança. Os dados obtidos nessa estação foram provenientes de uma câmera de vídeo comum e de câmeras rápidas (Figura 3.13 a e b).

Figura 3.13 Câmeras instaladas na estação do SBT



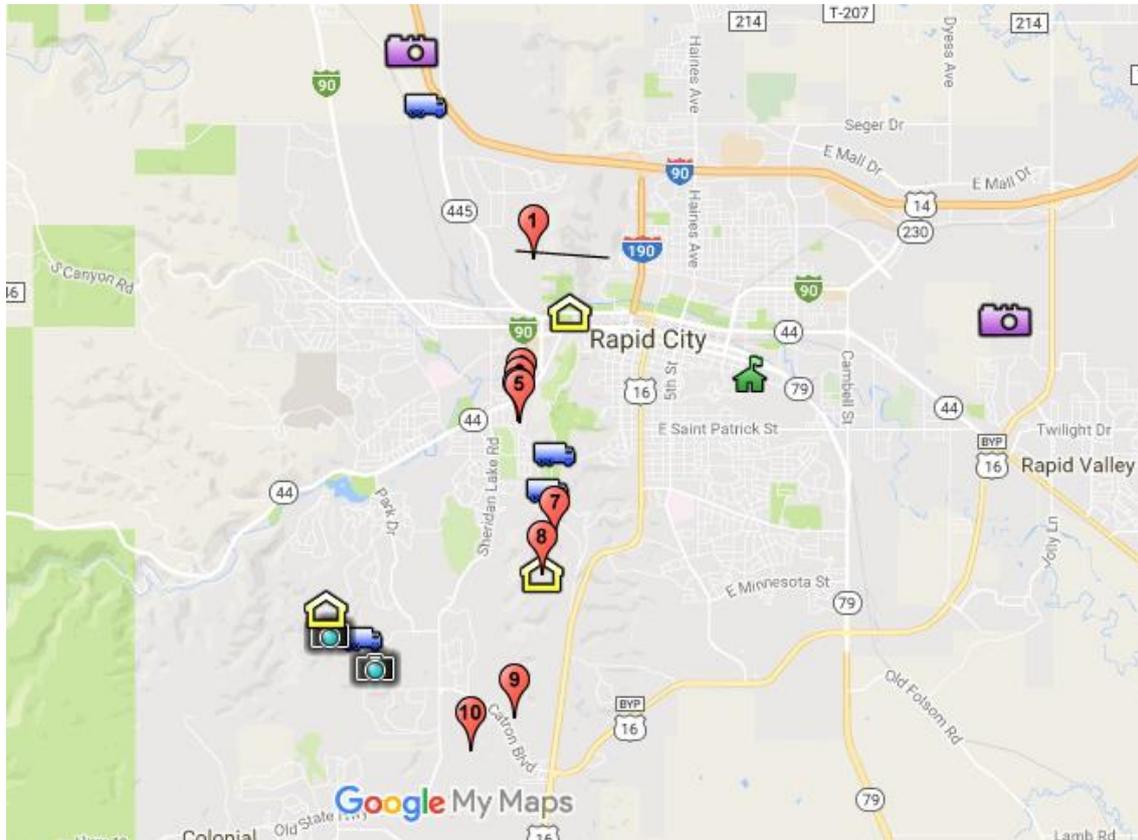
Fonte: Foto tirada pela autora.

O local também foi utilizado para calibração do sensor de campo elétrico que será apresentada no Anexo 2 deste documento.

Rapid City

Em Rapid City, Estados Unidos, as observações ópticas foram feitas por meio de duas estações móveis (Figura 3.15) e as medidas de campo elétrico rápido por sensores instalados em duas bases fixas.

Figura 3.14 Localização dos equipamentos em Rapid City



Fonte: Produção da autora

Os símbolos amarelos representam as localidades onde houve registro de campo elétrico, as câmeras são os locais onde tiveram câmeras instaladas; os balões vermelhos são as torres enumeradas; os carros azuis são os locais mais utilizados pelas estações móveis.

3.2.6. Estações móveis

O posicionamento das estações móveis foi feito com os seguintes objetivos: a) que todas as torres estivessem dentro do campo de visão das câmeras; b) obter imagens de diversos ângulos (preferencialmente a 90 graus) quando a visibilidade permitia e c) aumentar a probabilidade de registrar os raios descendentes positivos que desencadeiam o raio ascendente.

Figura 3.15 Estações móveis



Fonte: Foto cedida por Tom A. Warner.

Uma das estações móveis, chamada de VAN (Figura 3.16), possui: câmeras rápidas, câmeras fotográficas, câmeras em alta definição (câmeras HD do termo em inglês *high-definition*), câmera com lente 175 graus de abertura (olho de peixe).

Figura 3.16 Estação móvel VAN: Banco traseiro para um operador. As câmeras fazem a janela lateral do veículo.



Fonte: Foto cedida de Tom A. Warner

A segunda estação móvel, chamada de Truck, é equipada com as câmeras rápidas, câmera fotográfica, câmera de alta definição e, também, com dois sensores de campo elétrico ambiente (Figura 3.17)

Figura 3.17 Estação móvel *Truck*: 2 assentos (um para motorista e outro para o operador), câmeras na janela frontal, computadores e telas para o operador



Fonte: Foto tirada pela autora

3.2.7. Base fixa 1 - TW

Os sensores de campo elétrico rápido instalados na Base Fixa 1 foram os mesmos utilizados no Brasil, cedidos para as campanhas realizadas em Rapid City através de uma colaboração no projeto da NSF (*National Science Foundation* AGS-1048103) que financiou a ida de alunos durante os verões de 2011, 2012, 2013 e 2014. Os sensores foram instalados em duas bases fixas (Figura 3.18 a e b). Na base fixa 1, que ocupou o espaço de uma sacada, foram instalados dois sensores com diferentes ganhos para o campo rápido, um sensor de campo elétrico lento e um sensor de campo elétrico ambiente. Esta base está localizada de 5 a 6 km de distância das torres.

Figura 3.18 - Base fixa 1: Sensores de campo elétrico: rápido (dois ganhos) e ambiente.

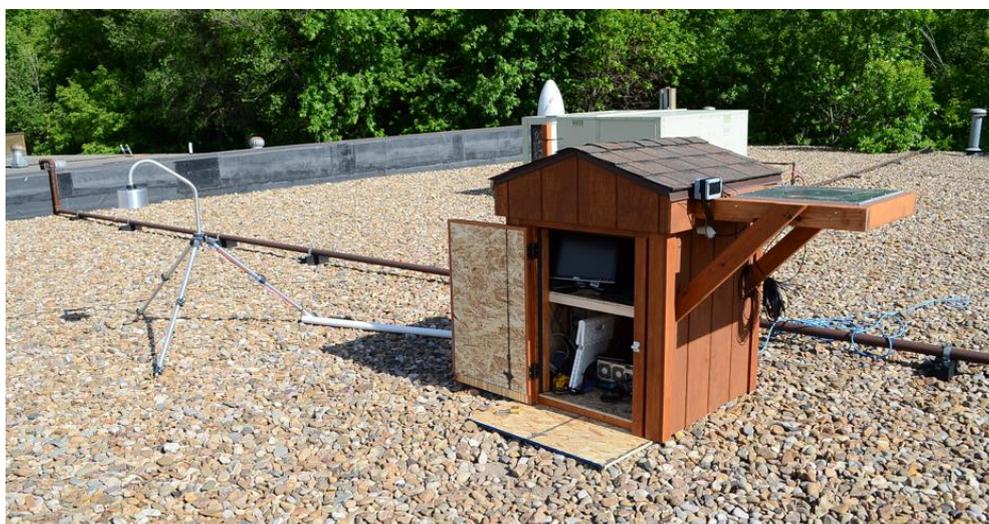


Fonte: Foto tirada pela autora

3.2.8. Base Fixa 2 – Sound Pro

Na segunda base fixa, localizada cerca de 500 metros das torres 2 a 6, foram instalados um sensor de campo elétrico e um sensor de campo elétrico ambiente (Figura 3.19).

Figura 3.19 Base fixa 2: Sensores de campo elétrico: rápido (um ganho) e ambiente.



Fonte: Foto tirada pela autora

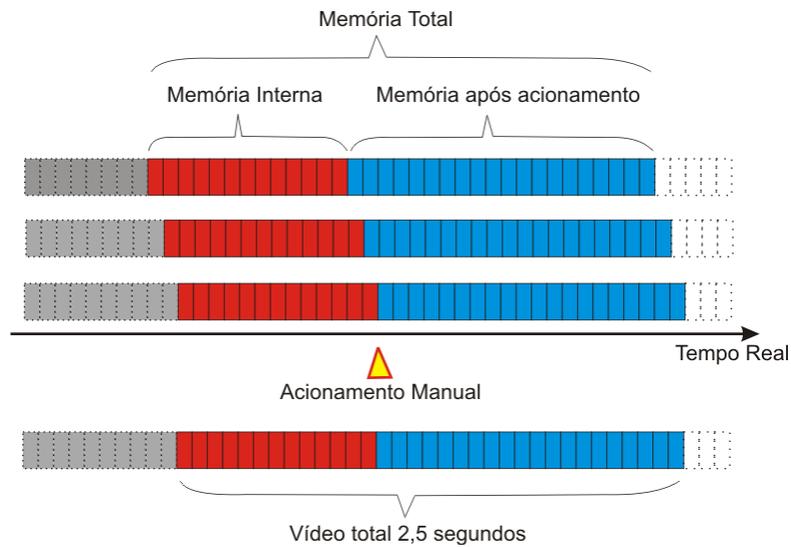
3.3. Equipamentos

3.3.1. Câmeras Rápidas

As câmeras rápidas utilizadas têm a capacidade de registrar de 1.000 a 100.000 quadros por segundo (qps). Os vídeos registrados por estas câmeras possuem informação de tempo GPS (do termo em inglês *Global Positioning System*) em cada imagem.

Essas câmeras rápidas possuem uma memória interna que pode ser dividida em 2 partes: pré-acionamento manual e pós-acionamento manual. O sistema de gravação da câmera rápida registra os dados continuamente na primeira parte da memória interna da câmera (pré-acionamento manual), utilizando um recurso computacional denominado fila circular. Esse recurso faz com que, ao completar a sua capacidade, a primeira imagem registrada na memória interna da câmera seja apagada liberando, assim, espaço para uma imagem recente. Desta forma, na memória interna da câmera é mantido sempre o último intervalo de tempo ajustado do pré-acionamento. A Figura 3.20 mostra um exemplo desta divisão de memória interna. O exemplo mostra uma câmera com memória interna de 2,5 segundos, com ajuste da posição de acionamento em 2/5, isto é, a memória interna é dividida em 1 segundo antes do acionamento manual e 1,5 segundo após o acionamento manual.

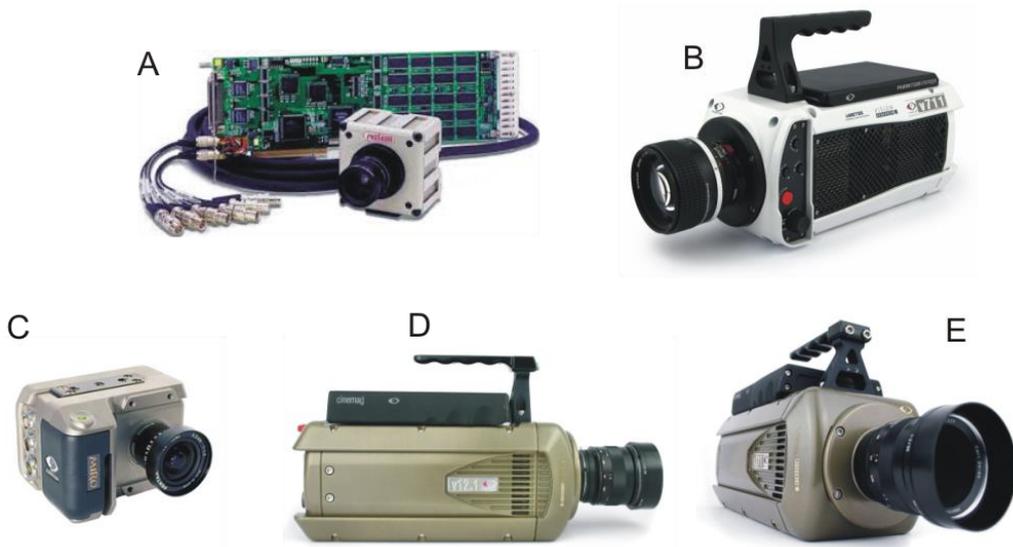
Figura 3.20 Sistema de gravação das câmeras rápidas (fila circular)



Memória dividida em pré-acionamento manual (1 segundo) e pós-acionamento manual (1,5 segundos). Vídeo de duração total 2,5 segundos
Fonte: Adaptada de Schumann (2012).

Os modelos das câmeras utilizadas foram: Photrom Fast Cam 512 (4.000 qps), Phantom v711 (10.000 e 20.000 qps), Phantom v310 (10.000 qps), v12 (100.000 qps) e miro4 (1.000 qps), conforme apresentado na Figura 3.21.

Figura 3.21 Modelos das câmeras utilizadas

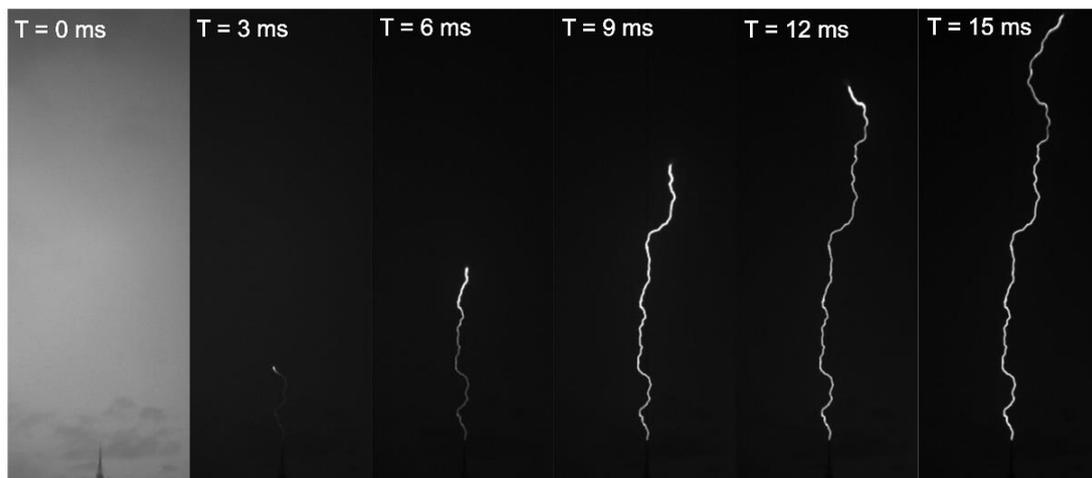


A) Photrom Fast Cam 512, B) Phantom v711, C) miro4, D) v12 e E) Phantom v310.

Fonte: websites dos fabricantes Photron (2016) e Phantom (2016)

Um exemplo de um raio registrado por câmera rápida é mostrado na Figura 3.22. (SABA et al., 2014)

Figura 3.22 Raio ascendente registrado por câmera rápida.



Fonte : SABA et al. (2014)

3.3.2. Sistema de Localização

O raio se propaga de uma forma não contínua gerando assim pulsos eletromagnéticos cuja amplitude varia tanto em função do comprimento de onda como da velocidade e da direção da propagação. Estes pulsos são detectados pelas redes de localização. Os sensores que compõem as redes de localização de raios medem a radiação eletromagnética gerada por cada evento. Os dados de amplitude e instante de chegada da radiação eletromagnética emitida por cada evento são registrados por cada sensor. Isto permite que o sistema de detecção determine o horário, a posição (latitude e longitude), a polaridade, entre outros parâmetros. Para a determinação da posição, a triangulação das informações de 3 ou mais sensores é necessária.

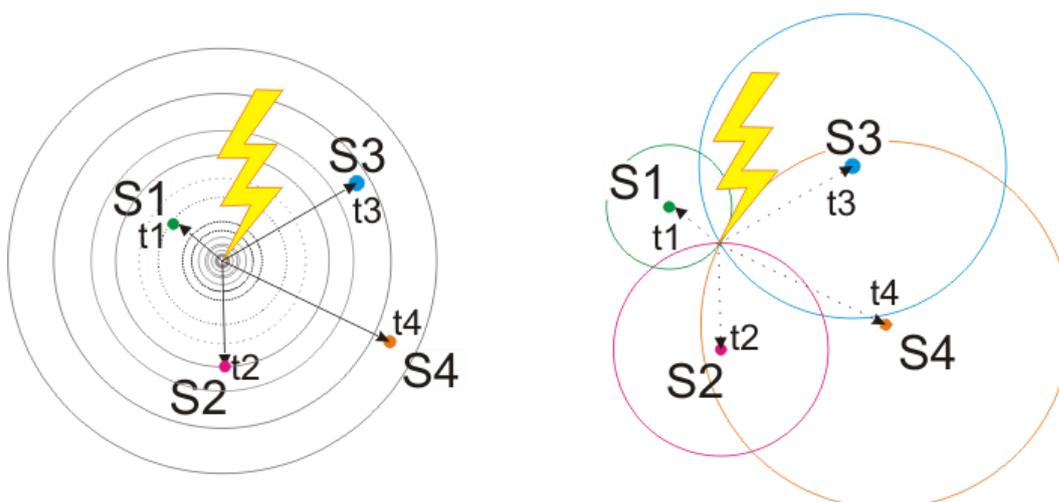
Como descrito por Cummins et al. (1998), existem 2 métodos para a determinação da localização da descarga de retorno pelos sistemas de

localização: o Método do Tempo de Chegada (TOA – do termo em inglês *Time of Arrival*) e o Método da Direção Magnética (MDF - *Magnetic Direction Finding*).

O método da direção magnética utiliza um único parâmetro: a componente magnética da radiação eletromagnética registrada por cada sensor. Os sensores possuem duas bobinas ortogonais entre si. Com a intensidade da radiação eletromagnética registrada em cada bobina do sensor determina-se a direção da ocorrência do raio, mais precisamente o ângulo em relação ao norte geográfico (azimute). Com a informação de três ou mais sensores desse tipo, é determinado o ponto de contato com o solo.

No método do tempo de chegada os sensores registram o instante de chegada dos pulsos eletromagnéticos emitidos por cada descarga e o computador central compara o horário em que o pulso foi registrado por cada um dos diferentes sensores. As distâncias entre o ponto de contato no solo e o sensor podem ser representadas como o raio de círculos. O raio do círculo para cada sensor será função do tempo e com a participação de quatro ou mais sensores é possível determinar a localização mais provável do ponto de contato no solo, a partir da intersecção destes círculos. A Figura 3.23 ilustra o método TOA.

Figura 3.23 Tempo de chegada



Tempo de chegada em cada sensor (à esquerda); triangulação para determinar a posição de contato com o solo (à direita)

Fonte: Imagem criada pela autora

Os sensores fornecem as informações de tempo, intensidade e ângulo que ocorreu a descarga. A central de processamento recebe todos os dados de todos os sensores e, a partir de algoritmos baseados nos métodos de MDF e TOA, determina a localização da descarga. Deste modo, qualquer distorção durante a propagação acarretará um erro na localização da descarga.

Os sistemas de localização utilizados neste trabalho foram BrasilDAT e Rindat, no Brasil e NLDN (*National Lightning Detection Network*) no Estados Unidos (NACCARATO; PINTO, 2009; CUMMINS et al.,2009).

3.3.3. LMA – Mapeamento 3D

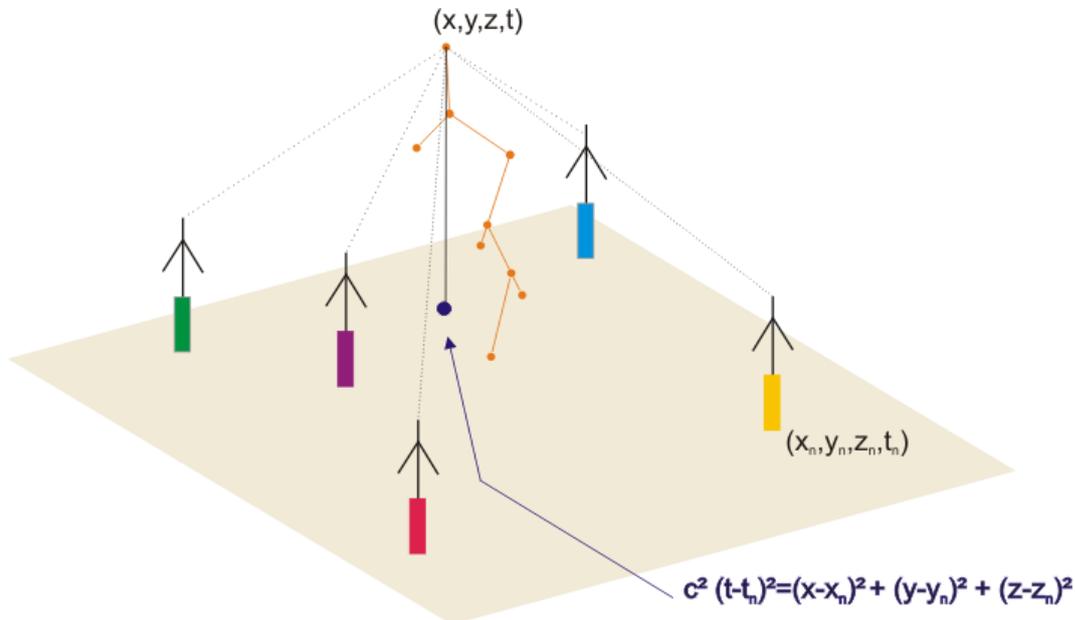
O sistema conhecido por LMA, acrônimo do termo em inglês *Lightning Mapping Array*, mede o tempo de chegada de radiação em 60MHz em múltiplas estações no solo. Assim, o sistema localiza as fontes de radiação de forma tridimensional.

As fontes de radiação detectadas são impulsivas e na faixa de frequência VHF (do termo em inglês *very-high frequency*) usualmente associadas a pequenas quebras de rigidez dielétrica.

Para determinar a posição de uma fonte de radiação, no mínimo 4 estações são necessárias. Uma vez que o ruído de uma das estações pode influenciar no resultado, várias estações são necessárias para que o resultado seja mais preciso.

As estações possuem antenas GPS com precisão de 50 ns. Durante a ocorrência dos raios cada fonte de radiação, isto é, cada quebra de rigidez dielétrica é associada ao tempo GPS e armazenada na estação (Figura 3.24). Os dados são coletados e levados à central para processamento.

Figura 3.24 Múltiplas de estações de LMA



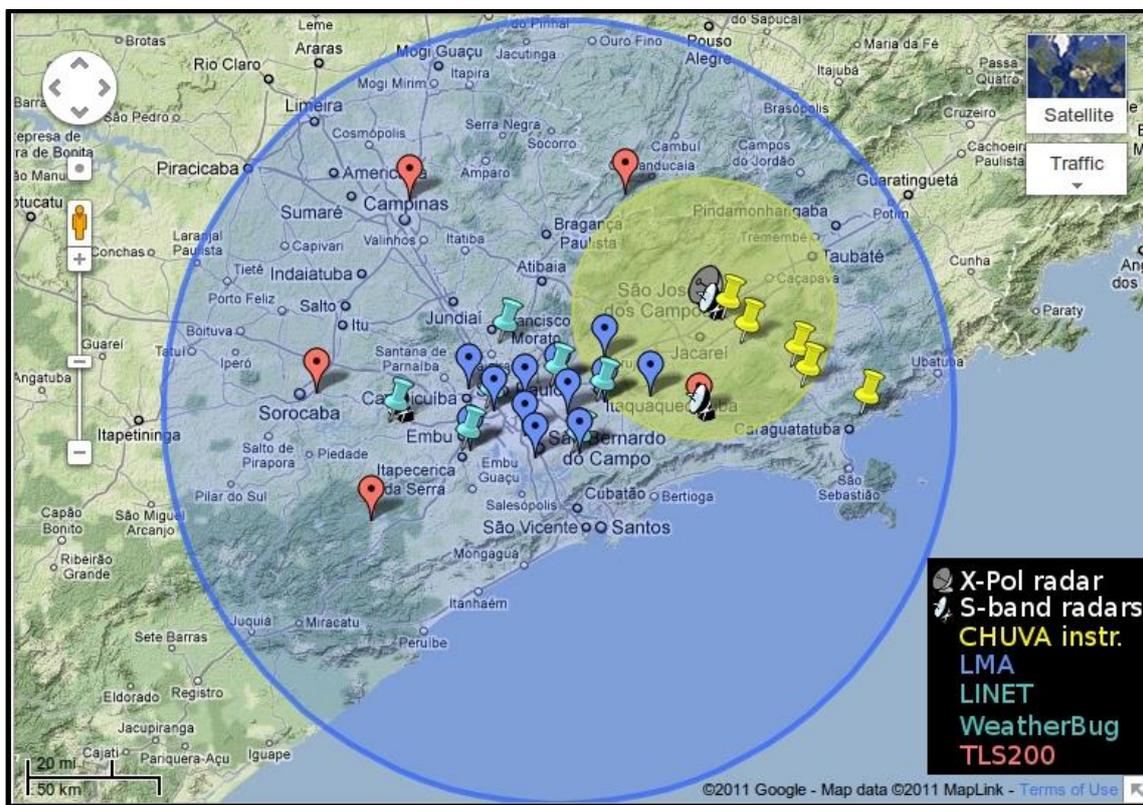
Pequenas quebras de rigidez dielétrica, em VHF, são registradas e associadas ao tempo GPS

Fonte: Adaptada de NEW MEXICO TECH (2016).

Os dados de LMA foram registrados durante duas campanhas de aquisição, uma no Brasil e outra nos Estados Unidos.

No Brasil os dados de LMA foram adquiridos durante a campanha do Projeto CHUVA realizada em São Paulo no verão de 2012 (Figura 3.25). Os sensores foram distribuídos na cidade de São Paulo. O Pico do Jaraguá estava dentro da área de cobertura dos sensores.

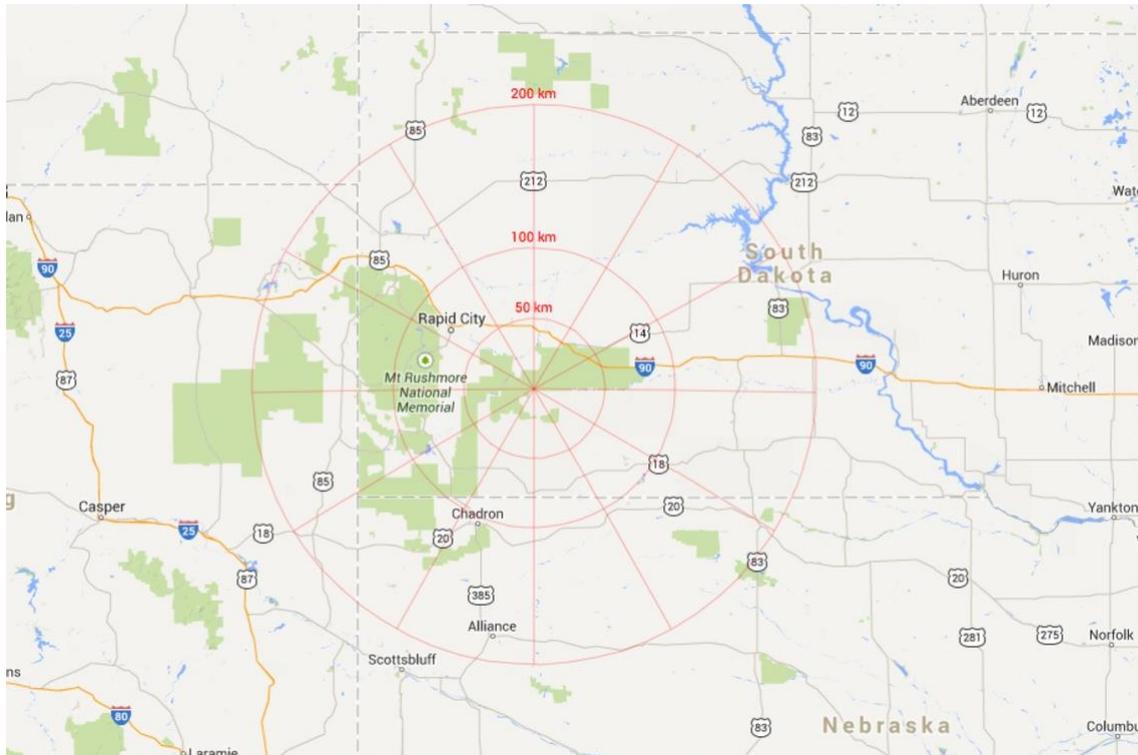
Figura 3.25 Sensores durante campanha CHUVA em SP



Fonte: CHUVA (2016)

Em Rapid City, durante a campanha de 2014, os sensores de LMA foram instalados na região das torres (Figura 3.26), tendo sido registrados 14 raios ascendentes durante esse período.

Figura 3.26 Área de cobertura dos sensores de LMA em Rapid City

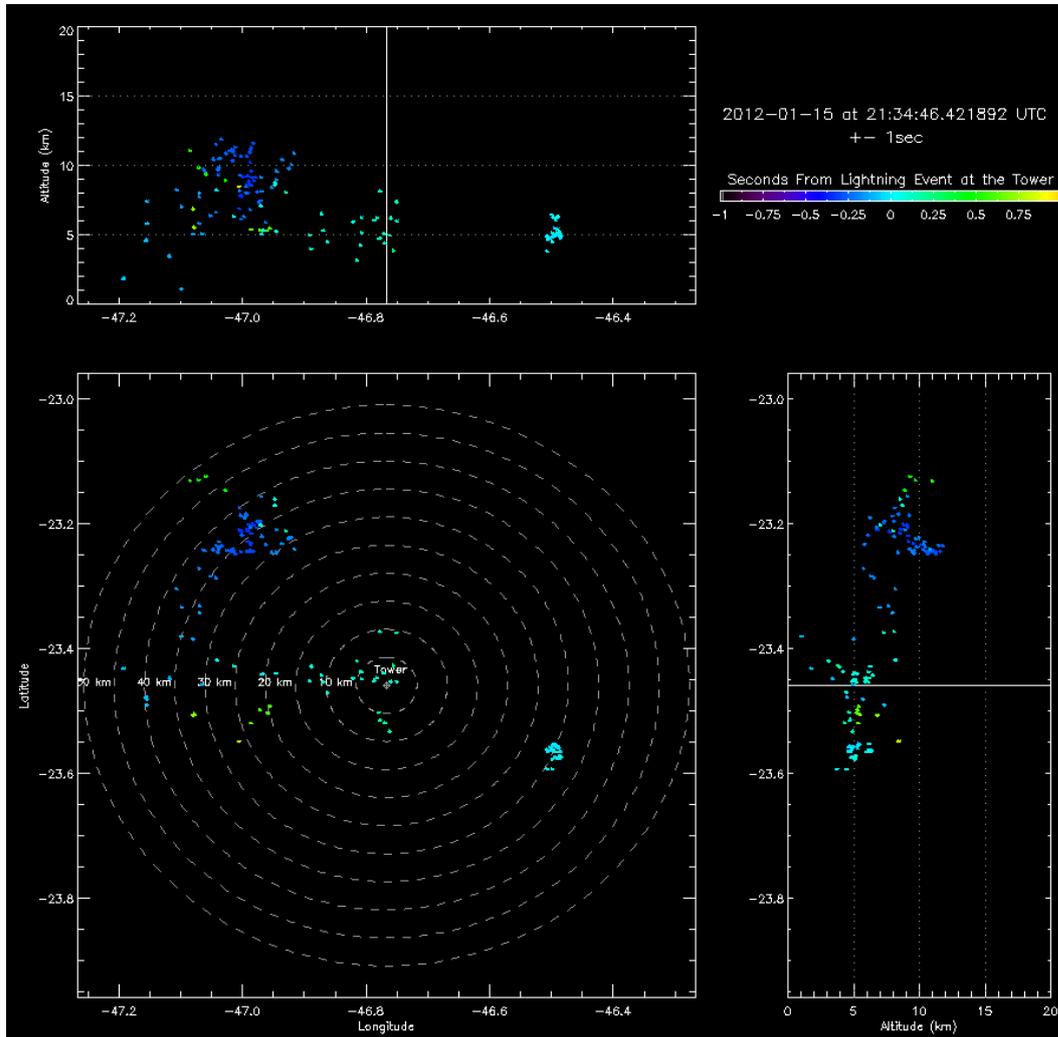


Fonte: Imagem cedida por Tom A. Warner (2014).

As informações dos sensores de LMA e as imagens para a análise posterior foram processadas pelos pesquisadores responsáveis de cada projeto.

Cada imagem mostra as fontes de radiação de três modos (Figura 3.27): um quadrado, com a vista superior (longitude versus latitude); o retângulo localizado acima do quadrado mostra a disposição das fontes de radiação no perfil altitude versus longitude; o retângulo localizado à direita do quadrado mostra as fontes de radiação no perfil da latitude versus altitude. As cores indicam o relativo tempo de ocorrência de cada evento nos gráficos.

Figura 3.27 LMA de um raio ascendente



Dados de LMA de um raio ascendente em SP. A torre do Pico do Jaraguá está centralizada no quadrado (latitude versus longitude): no topo altitude versus longitude; à direita altitude versus latitude. As cores das fontes de radiação estão associadas a uma escala de tempo, sendo as mais claras as fontes mais recentes.

Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

3.3.4. Sensores de campo elétrico

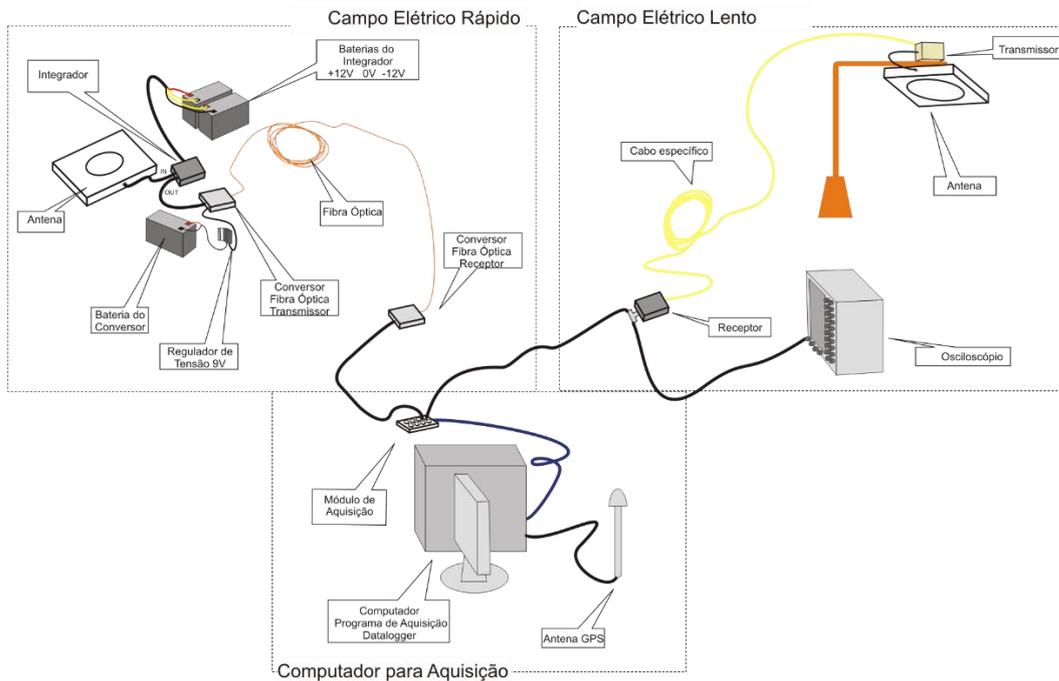
Os sensores de campo elétrico podem ser divididos em: rápido e lento. A diferença entre eles é o tempo de decaimento do sistema.

O sistema de gravação de ambos os sensores de campo elétrico é realizado por um computador com placa digitalizadora. A placa digitalizadora tem a capacidade de 5 milhões de medidas por segundo (5MS/s para cada canal em uso), grava até 4 canais simultaneamente em arquivos de 1 segundo. Possui sincronização de tempo GPS (Figura 3.28).

Campo elétrico rápido: este sensor possui uma antena capacitiva de prato plano, com capacitância de aproximadamente 10pF, mede a derivada do campo elétrico no tempo. O sinal passa por um integrador que fornece o campo elétrico. O integrador opera numa frequência de 300Hz a 2MHz. As componentes de alta frequência do raio, como por exemplo a descarga de retorno, são registradas por este sensor com mais detalhamento.

Campo elétrico lento: este sensor também possui uma antena capacitiva de prato plano, com um diâmetro maior do que a antena do campo elétrico rápido, aumentando a sensibilidade. O sinal passa por um integrador de alto ganho com tempo de decaimento de aproximadamente 1,5 segundos. Este sensor é capaz de registrar sinais de baixa frequência como, por exemplo, a propagação do líder e a presença de correntes contínuas dos raios, os quais não produzem campos eletromagnéticos irradiados de grandes amplitudes.

Figura 3.28 Sistemas de sensores de campo elétrico



Sistemas de campo elétrico rápido (no topo à esquerda) e lento (topo à direita). Abaixo computador de aquisição para ambos os sistemas.

Fonte: Imagem criada pela autora

Além dos campos elétricos rápido e lento, foram utilizados sensores de campo elétrico ambiente. O desenho dos pratos da antena do sensor de campo elétrico ambiente se assemelha a um moinho (Figura 3.29), por esse motivo ele é também conhecido como *field mill*.

Figura 3.29 Sensor de campo elétrico ambiente (*field mill*)



Fonte: CAMPBELL (2016)

Este sensor, grava até 100 medidas por segundo ou a média dos valores de cada minuto, sua memória interna tem capacidade de armazenamento para 15 dias.

Os sensores *field mill* medem o campo elétrico vertical próximo ao solo, induzido pela carga elétrica acumulada nas nuvens. O sensor se apresenta eficaz numa área com raio de 15 quilômetros de cobertura ao seu redor.

Esses equipamentos foram utilizados de maneira obter o melhor resultado, assim em diferentes campanhas alguns equipamentos foram realocados.

4. METODOLOGIA

Como descrito no capítulo 1, esta tese de doutorado irá caracterizar os raios ascendentes bem como identificar quais fatores contribuem para a sua iniciação.

Depois de descritos todos os equipamentos e a localização de instalação dos mesmos, outro importante tópico a ser abordado são as características obtidas a partir dos registros dos raios efetuados por cada equipamento, bem como apontar qual a contribuição de cada um no desenvolvimento da tese de doutorado.

Enquanto os registros de câmera rápida foram sendo registrados e analisados, as dúvidas em relação a iniciação dos raios ascendentes começaram a surgir. São raios ascendentes auto-iniciados ou acionados por uma descarga matriz? São todas as tempestades que geram? A qualquer momento da tempestade pode-se observar um raio ascendente? Quanto tem que variar o campo elétrico ambiente para que os raios ascendentes se iniciem?

Para tentar entender os aspectos da iniciação de um raio ascendente foi elaborado um vídeo com todos os registros dos equipamentos (gráficos, vídeo, imagens, etc.), sincronizados no tempo para observar as informações que cada equipamento fornecia para a análise.

As análises das características do raio ascendente puderam ser divididas em três diferentes intervalos de tempo: segundos antes do início, milissegundos antes do início e no instante da iniciação do líder ascendente. Cada equipamento contribui com a caracterização de uma ou mais fases do raio ascendente.

*Primeiro Intervalo: Alguns **segundos** antes do início do líder ascendente:*

Dos equipamentos descritos, os sensores de campo elétrico atmosférico (tipo *Field Mill*) são os que permitem analisar informações das condições segundos antes do líder ascendente ter início.

*Segundo Intervalo: Alguns **milissegundos** antes do início do líder ascendente:*

Dados do LMA nos permitem acompanhar a propagação do líder da descarga matriz dentro da nuvem, uma vez que não é possível o registro dessas descargas através de câmeras. A partir dos dados do LMA podem ser analisadas a influência da distância e da altura dos líderes da descarga matriz em relação às torres na iniciação dos raios ascendentes.

Os sensores de campo elétrico rápido fornecem características da descarga matriz e permitem observar os diferentes processos da mesma

Os sistemas de localização de descargas (LLS) estimam a intensidade do pico de corrente e a localização do ponto de impacto das descargas matrizes que disparam os raios ascendentes.

*Terceiro Intervalo: o instante da **iniciação do líder ascendente***

Os registros em vídeo efetuados com câmeras rápidas permitem a análise detalhada da propagação dos líderes, a identificação das torres envolvidas, o tempo entre descargas, entre outras características.

A Tabela 4.1 apresenta os equipamentos e suas contribuições em cada um dos intervalos mencionados.

Tabela 4.1 Tabela das informações dos equipamentos que participam da hipótese

Equipamento	Segundos antes	Milissegundos antes	Iniciação do raio ascendente
Câmera rápida	-	+CG ou líderes aproximando	Características gerais
Field Mill	Comportamento do Campo elétrico atmosférico	Intensidade do campo elétrico atmosférico	- (Sem resolução temporal)
Campo elétrico Rápido	-	IC ou CG	- (se mistura com a atividade do CG)
LLS	-	Localização e intensidade	-
LMA	-	Líderes aproximando, dimensão espacial, altura	Propagação líderes, altura

A quantidade de dados registrados por cada instrumento está na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Quantidade de registros por cada equipamento

Equipamentos	Quantidade de casos registrados	
	Pico do Jaraguá	Rapid City
Câmera rápida	72 casos de RA	28 casos de RA
Field Mill	7 tempestades	10 tempestades
Campo elétrico Rápido	37 casos de RA	11 casos de RA
LLS juntamente com registros de câmera rápida	65 casos de RA	23 casos de RA
LMA	10 casos de RA	13 casos de RA

Nos próximos capítulos serão analisadas as condições às quais o raio ascendente pode estar associado, as características ambientais que antecedem a iniciação do líder ascendente, as características das descargas matrizes e as características próprias do líder ascendente.

No próximo capítulo serão apresentadas as características obtidas a partir do registro do campo elétrico ambiente durante as tempestades com raios ascendentes. Para os resultados das próximas seções foram utilizados **somente dados do Pico do Jaraguá e Rapid City**.

5. CAMPO ELÉTRICO AMBIENTE

Segundo Volland (1984), os valores do campo elétrico, no nível do solo, gerados por uma tempestade, podem alcançar valores superiores a 5kV/m. No interior da nuvem esse valor pode chegar a 400kV/m.

Souza et al. (2015) observou que as tempestades ocorridas na cidade de São Paulo apresentaram registro de raios ascendentes na parte estratiforme da tempestade, porém numa região próxima a área convectiva, apontada pelo radar como uma área com alta refletividade (40dBz).

Warner et al. (2011) observou que os raios ascendentes em Rapid City estão associados a tempestades geradas por sistemas convectivos de mesoescala (MSCs) que possuem extensas áreas estratiformes de precipitação, onde os raios positivos, de grande variação de momento de carga, favorecem a iniciação dos raios ascendentes.

As observações dos raios ascendentes filmados por câmera rápida durante as campanhas de aquisição sugerem que, alguns milissegundos antes do líder ascendente se iniciar da ponta da torre, existe uma atividade, isto é, um líder dentro da nuvem que aproxima das torres gerando assim um líder ascendente.

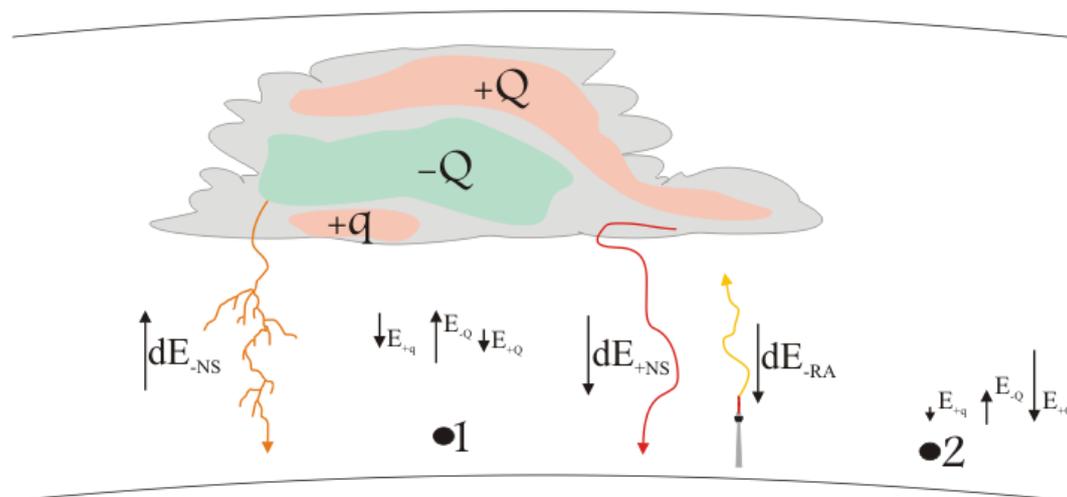
No presente trabalho, dados de campo elétrico ambiente foram utilizados para a análise do momento da tempestade em que os raios ascendentes ocorrem (SCHUMANN et al., 2015b). Foram utilizados os registros de campo elétrico ambiente relativos a 10 tempestades que produziram raios ascendentes em Rapid City e 7 tempestades em São Paulo.

Nessa análise foi adotada a convenção da física na definição da polaridade do campo elétrico atmosférico, isto é, o campo elétrico é positivo quando aponta para cima.

A Figura 5.1 é uma ilustração que mostra como as medições do campo elétrico são dependentes da distância do sensor em relação às cargas geradoras dos mesmos.

Se forem instalados sensores nos pontos 1 e 2 mostrados na Figura 5.1, os valores medidos para o campo elétrico não serão os mesmos, pois as distâncias do sensor às cargas geradoras serão diferentes. Na Figura 5.1 as setas ilustram o sentido e intensidade do campo gerado por cada um dos centros de carga em função da posição do sensor: No ponto 1 o centro de cargas negativo tem maior influência na resultante; No ponto 2 o centro de cargas negativo já não apresenta a mesma influência uma vez que o sensor está mais longe..

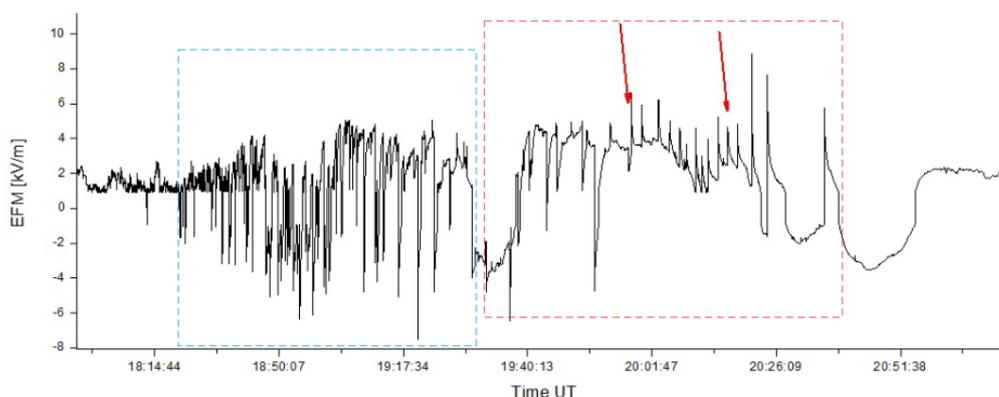
Figura 5.1 Resultantes do campo elétrico vertical ambiente



Fonte: Imagem criada pela autora

A Figura 5.2 mostra um exemplo do registro efetuado por um sensor de campo elétrico ambiente. A tempestade registrada ocorreu em 10 de março de 2014 na cidade de São Paulo. As setas vermelhas indicam os instantes em que ocorreram raios ascendentes.

Figura 5.2 Registro de EFM de tempestade com raio ascendente ocorrida em 10 de março de 2014



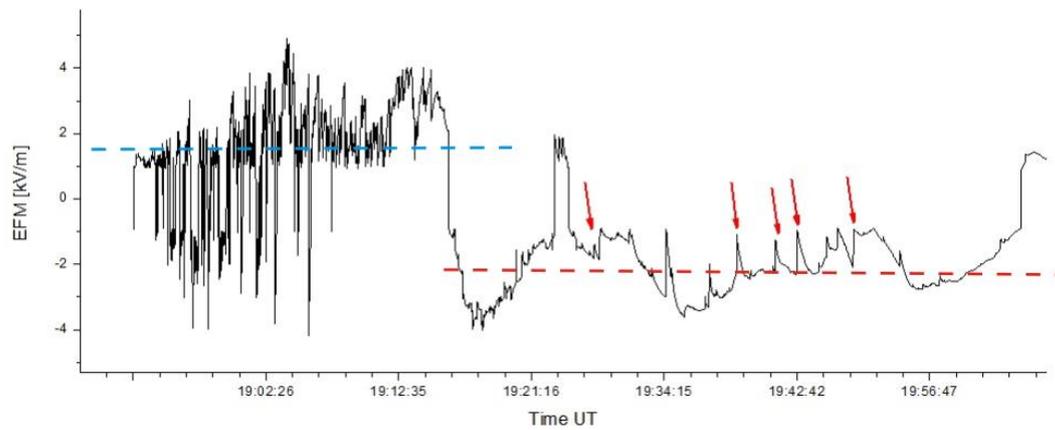
Tempestade com raio ascendente ocorrida em 10 de março de 2014, na cidade de São Paulo, registrada por um sensor de campo elétrico ambiente (polaridade de acordo com a convenção da física). As setas indicam os instantes em que ocorreram raios ascendentes.

Fonte: Imagem criada pela autora.

A primeira região da Figura 5.2 (em azul) mostra a fase mais intensa da tempestade, durante a qual acontecem os processos convectivos mais intensos e a ocorrência de raios descendentes negativos. Durante o intervalo mostrado na segunda região (vermelho) os raios descendentes positivos ocorrem. Nessa fase as descargas ocorrem em menor número (Figura 5.2 em vermelho).

A tempestade também pode apresentar dois patamares de campo ambiente, como na tempestade do dia 27 de março de 2012 e é apresentado na Figura 5.3. Durante a tempestade, nos momentos em que não há descargas de retorno, o campo elétrico fica no mesmo patamar. Entre uma descarga de retorno e outra o campo elétrico se equilibra de maneira a manter um patamar numa certa intensidade e polaridade. É nesse segundo período da tempestade onde ocorrem os raios ascendentes.

Figura 5.3 Campo elétrico ambiente durante a tempestade do dia 27 de março de 2012.



Em azul o primeiro patamar: raios negativos frequentes e em vermelho o segundo patamar: raios positivos menor frequência de ocorrência

Fonte: Produção da autora

Tabela 5.1 apresenta, para cada tempestade registrada com raios ascendentes, a polaridade encontrada, bem como a distância entre o ponto de instalação do sensor e a torre que produziu o raio ascendente. Os asteriscos (*) indicam os casos em que mais de uma torre produziu raio ascendente. Nesses casos, a menor distância foi considerada.

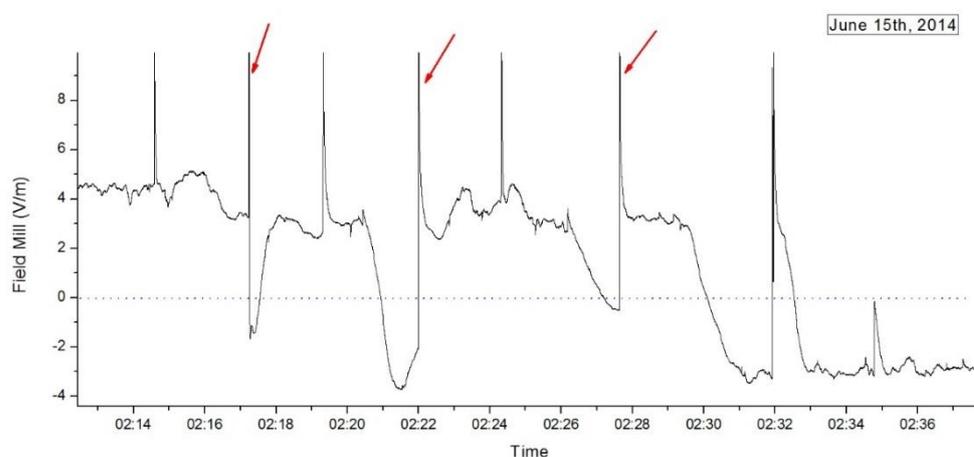
As distâncias em São Paulo são fixas, pois os dados utilizados foram os dados gerados pelo sensor de campo elétrico ambiente instalado na Universidade de São Paulo – USP. As distâncias variam na região de Rapid City devido ao sensor instalado na unidade móvel.

Tabela 5.1 Polaridade de campo elétrico ambiente em tempestade com ocorrência de RA.

Tempestade	Número de RAs	Local	Polaridade do Campo elétrico ambiente	Distância entre o RA e o sensor de campo elétrico ambiente (km)
15/01/2012	4	P. do Jaraguá	Positivo	9,8
10/03/2012	2	P. do Jaraguá	Positivo	9,8
15/03/2012	3	P. do Jaraguá	Positivo	9,8
23/03/2012	1	P. do Jaraguá	Positivo	9,8
27/03/2012	4	P. do Jaraguá	Negativo	9,8
12/04/2012	1	P. do Jaraguá	Positivo	9,8
05/12/2013	1	P. do Jaraguá	Negativo	9,8
01/06/2014 – (tarde)	2	Rapid City	Positivo	3.7*/4.8*
01/06/2014 – (noite)	4	Rapid City	Positivo	4.8*/4.8*/4.8*/4.7
15/06/2014	3	Rapid City	Positivo	8.7*/7.6*/8.7*
22/06/2014	2	Rapid City	Negativo	8.7/8.7
28/06/2014	3	Rapid City	Negativo	4.8/4.8/4.8
30/05/2013	1	Rapid City	Positivo	4.3
08/07/2013	2	Rapid City	Positivo	4.6/3.8*
23/06/2013	4	Rapid City	Positivo	6.9/4.6/4.8*/4.3
25/07/2013	4	Rapid City	Positivo	4.8/6.9/4.8/4.6
05/08/2013	2	Rapid City	Positivo	4.6*/4.6

Também foi observado que, em algumas tempestades, ocorreu uma inversão do campo antes da iniciação dos raios ascendentes. Esta inversão ocorreu cerca de poucos segundos antes da ocorrência das descargas de retorno positiva que gerou os raios ascendentes (Figura 5.4 – são indicados por setas vermelhas na figura os eventos que geraram líder ascendente).

Figura 5.4 Inversão do campo elétrico ambiente dos raios positivos que geraram raios ascendentes.



Fonte: Produção da autora

No primeiro raio ascendente marcado na Figura 5.4 a inversão do campo ocorreu após o pulso intenso da descarga de retorno matriz. O último pulso, que ocorre quando o campo elétrico já está negativo, não gerou ascendente, mas também não teve líderes passando por sobre a torre. Os pulsos situados entre os que geraram raios ascendentes tiveram a trajetória de propagação passando por sobre as torres, porém não houve inversão prévia da polaridade do campo e não desencadearam líderes ascendentes.

A Tabela 5.2 apresenta a intensidade do campo elétrico ambiente tanto no período da tempestade na qual os raios ascendentes ocorrem como no momento anterior.

Os valores de intensidade do campo no período da tempestade com atividade de raios positivos (e pelo menos uma ocorrência de RA) variaram de -3kV/m a 4,5 kV/m. Não foi observada um valor de campo elétrico ambiente padrão que sugere a ocorrência de raios ascendentes nas tempestades.

Durante as tempestades dos dias 15/01/2012 e 30/05/2013 ocorreram poucos raios nuvem-solo positivos assim, não foi possível determinar os valores como um patamar (Tabela 5.2).

A região do Pico do Jaraguá apresentou uma média de 0,9 kV/m com máximo de +4,0kV/m e mínimo de -0,5 kV/m. Em Rapid City a média foi de 1,5 kV/m com máximo e mínimo de +4,4kV/m e -3kV/m, respectivamente.

Em 6 das 17 tempestades analisadas não houve inversão no campo elétrico ambiente antes das descargas matrizes.

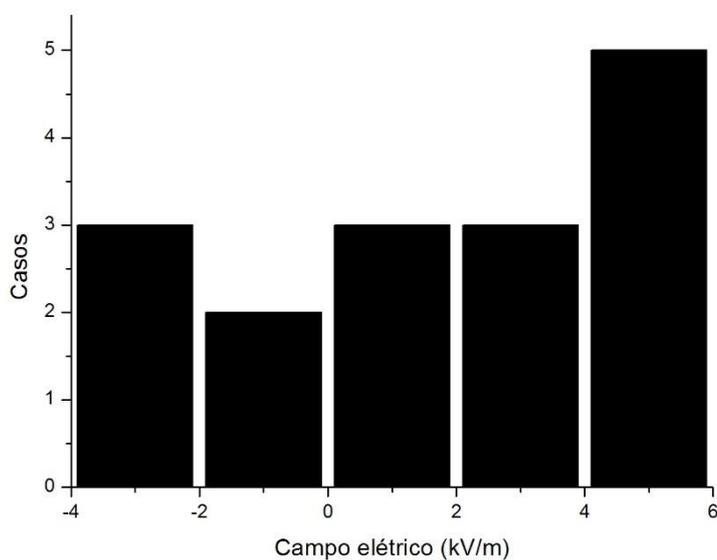
Tabela 5.2 Intensidade de campo elétrico ambiente

Tempestade	Local	Média do Campo elétrico ambiente da parte da tempestade	Campo elétrico ambiente antes do RA
15/01/2012	P. Jaraguá	Poucos NS Positivos ¹	-0,5kV/m a 3kV/m
10/03/2012	P. Jaraguá	+4,0kV/m	Sem inversão
15/03/2012	P. Jaraguá	+1,2kV/m	-1,1kV/m até +1,5kV/m
23/03/2012	P. Jaraguá	-1,5kV/m	1kV/m
27/03/2012	P. Jaraguá	+2kV/m	Sem inversão
12/04/2012	P. Jaraguá	0,5kV/m	Sem inversão
05/12/2013	P. Jaraguá	-0,5kV/m	0,5kV/m
01/06/2014 – (tarde)	Rapid City	+4kV/m	-2kV/m
01/06/2014 – (noite)	Rapid City	+3,5kV/m	-0,5kV/m até 1kV/m
15/06/2014	Rapid City	+4,5kV/m	-0,5kV/m até -2,5kV/m
22/06/2014	Rapid City	-2,7kV/m	Sem inversão
28/06/2014	Rapid City	-3kV/m	Sem Inversão
30/05/2013	Rapid City	Poucos NS Positivos ¹	-1kV/m
08/07/2013	Rapid City	4,0kV/m	1,8kV/m e 4,3kV/m
22/06/2013	Rapid City	-3,0kV/m	2,0kV/m e 2,5kV/m
25/07/2013	Rapid City	+2,2kV/m	-0,5kV/m
05/08/2013	Rapid City	+4,4kV/m	Sem Inversão

¹ Tempestades que tiveram poucos casos de raios positivos não caracterizando um patamar.

A intensidade de campo elétrico ambiente durante as tempestades está relacionada diretamente com o tamanho, altura e proximidade do centro de carga do sensor, entre outros fatores. Os valores registrados nas tempestades não apresentaram um padrão (Figura 5.5).

Figura 5.5 Histograma da intensidade de campo elétrico ambiente nos momentos em que ocorreram os raios ascendentes



Fonte: Produção da autora

Pontos de destaque do capítulo:

- Os raios ascendentes ocorrem no fim da tempestade, quando a frequência de descargas é menor e a polaridade das descargas é positiva.
- O campo elétrico ambiente da tempestade apresenta um patamar de intensidade entre -3,0 e 4,5 kV/m.
- Mesmo que a intensidade de campo elétrico esteja positiva pode haver uma inversão do campo elétrico ambiente segundos antes do raio positivo.

6. CARACTERÍSTICA DOS EVENTOS PRECURSORES

Na primeira seção desse capítulo serão abordados os resultados obtidos a partir dos registros efetuados pelos sensores de campo elétrico dos eventos que precedem os raios ascendentes, isto é, as características observadas na estrutura fina de radiação dos raios nuvem-solo positivos que geraram os raios ascendentes.

Na segunda seção 6.2 serão abordados os resultados obtidos a partir dos dados de mapeamento das descargas elétricas atmosféricas em 3 dimensões obtidos pelo *Lightning Mapping Array* (LMA).

6.1 Análise do campo elétrico rápido das descargas matrizes.

Os resultados dessa análise são baseados nos dados obtidos em campanhas realizadas na cidade de São Paulo, SP, Brasil e na cidade de Rapid City, no estado de South Dakota, EUA. Não necessariamente as mesmas tempestades registradas no capítulo anterior, devido à disponibilidade/manutenção dos equipamentos no dia. Informações sobre as campanhas podem ser encontradas em Schumann et al. (2014c).

Como houve a preocupação, durante as campanhas, em posicionar os equipamentos de forma a registrar principalmente os raios ascendentes, somente em poucos casos a descarga matriz foi registrada pelo ângulo de visada das câmeras. Assim, para a caracterização das descargas matrizes foram utilizados principalmente os dados de campo elétrico rápido.

Nessa análise foram utilizados 37 registros de campo elétrico rápido de descargas matrizes que antecederam a iniciação de raios ascendentes. Em 21 dos 37 casos os registrados foram realizados no Pico do Jaraguá e 16 em Rapid City.

Foram utilizados a forma de onda dos sensores para a classificação das descargas matrizes em relação ao raio ascendente iniciado por cada uma delas.

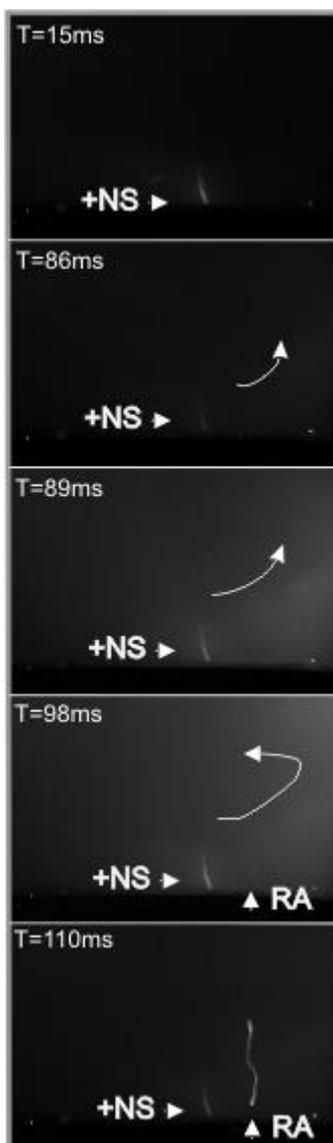
Somente 5 casos de raio ascendente foram iniciados por descargas intra-nuvem. Os outros 32 casos foram iniciados por descargas nuvem-solo positivas.

Os resultados da caracterização da radiação para os 32 casos de descarga nuvem-solo são apresentados nesse capítulo e comparados com a literatura.

A primeira característica identificada foi que todos os raios descendentes positivos que geraram raios ascendentes tiveram somente uma descarga de retorno, isto é, eram raios descendentes positivos simples.

Os raios descendentes tiveram o seu ponto de contato no solo a distâncias de até 80 km das torres. Os registros em vídeo efetuados pelas câmeras mostram uma propagação da descarga em direção à torre. Como pode ser visto na Figura 6.1 a seta indica o trajeto da luminosidade da descarga na base da nuvem.

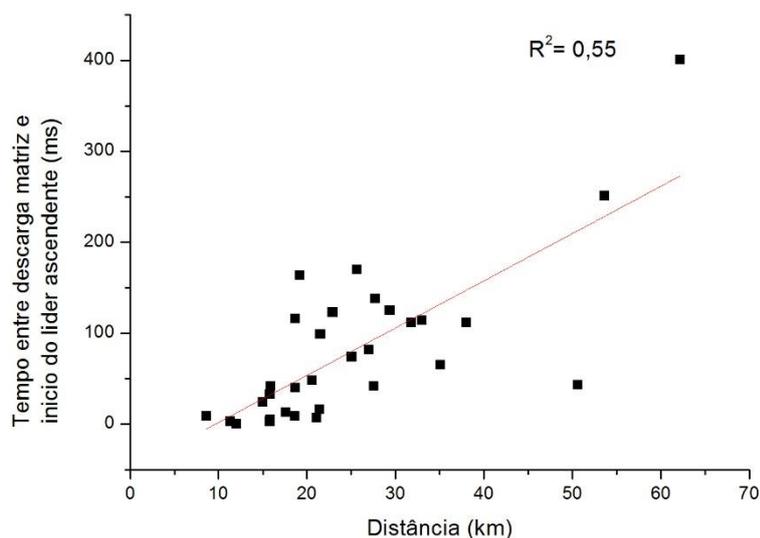
Figura 6.1 Propagação do líder dentro da nuvem



Fonte: Produção da autora

A Figura 6.2 mostra a relação entre o intervalo de tempo entre a descarga precedente e o raio ascendente iniciado por ela em função da distância do ponto de contato até a torre de onde o raio ascendente se inicia.

Figura 6.2 Intervalos de tempo entre o momento de contato do NS e o início do raio ascendente e em função da distância entre o ponto de contato e a torre.



Fonte: Produção da autora

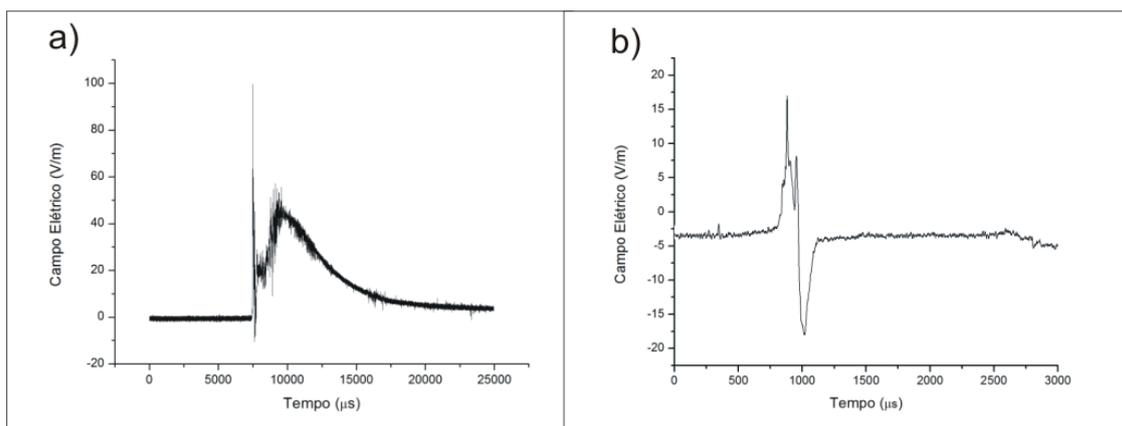
O gráfico indica que quando a descarga de retorno precedente que dá início ao ascendente está próxima das torres, o intervalo entre o contato com o solo e o início do líder ascendente é curto. Quando o ponto de contato da descarga de retorno precedente com o solo encontra-se distante das torres, um intervalo mais longo é observado. Isto sugere que a iniciação do líder ascendente somente ocorre quando a propagação do líder da descarga precedente aproxima-se do local de iniciação do ascendente. A distribuição sugere ainda uma proporcionalidade entre a distância e o intervalo de tempo e, portanto, uma velocidade de propagação dentro de certos limites.

Em 26 dos 32 casos o sistema de localização classificou como descargas nuvem-solo. Os outros 6 casos foram erroneamente classificados como intra-nuvem.

Os valores de pico de corrente encontrado para os intra-nuvens foram: 8.6kA; 15kA; 18,7kA; 18,8kA; 19,2kA e 27kA.

A confirmação de que esses 6 casos são descargas de retorno e não descargas intra-nuvem foi feita pela análise da curva de campo elétrico rápido gerado por essas descargas precedentes e pela comparação com a forma de onda típica de um raio descendente positivo (Figura 6.3).

Figura 6.3 Forma de onda típica: a) raio descendente positivo b) intra-nuvem.



Fonte: Produção da autora

Na análise do campo elétrico rápido foram determinadas algumas características tais como: tempos de subida 0-100% e 10-90%, tempo de decaimento 100-0%, largura do pulso e pico normalizado para 100 km. A Figura 6.4 mostra uma ilustração de como esses valores são definidos.

Figura 6.4 Parâmetros da forma de onda

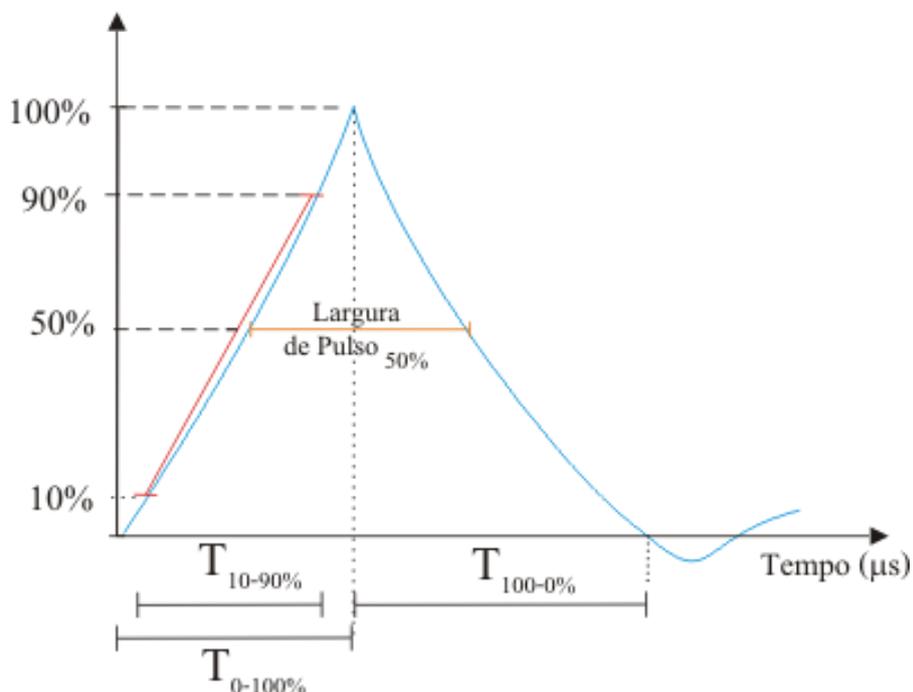


Ilustração de como são determinados os valores para caracterização do pulso registrado por um sensor de campo elétrico rápido.

Fonte: Produção da autora

O instante do valor máximo de pico de corrente é considerado $T_{100\%}$. A partir dele os tempos $T_{10-90\%}$, $T_{0-100\%}$ e $T_{100-0\%}$ são definidos. O tempo de decaimento $T_{100-0\%}$ é o intervalo entre o instante de ocorrência do pico máximo e o instante em que a curva cruza o eixo horizontal. O valor de $T_{10-90\%}$ exclui flutuações que podem haver na determinação de T_0 devido ao ruído ambiente. As formas de ondas de descargas em que reúne tempo de subida $T_{0-90\%}$ e tempo de decaimento $T_{100-0\%}$ longos sugerem que a descarga seja nuvem-solo.

A Tabela 6.1 apresenta os valores de $T_{10-90\%}$, $T_{0-100\%}$ e $T_{100-0\%}$ encontrados neste estudo para a caracterização das descargas que antecedem um raio ascendente e, na última coluna, para comparação, o valor encontrado por Schumann et al. (2013) para os raios positivos que não produziram raios ascendentes.

Tabela 6.1 Caracterização do pulso das descargas de retorno que antecedem raios ascendentes

Característica	Este trabalho (N= 32)			Schumann et al. (2013) N=72
	Mínimo	Máximo	Média	Média
Tempo de subida 0-100% (μs)	2.4	14	6.5	9.5
Tempo de subida 10-90% (μs)	0.4	6.4	3.2	5.7
Tempo de decaimento 100-0% (μs)	3.6	28	14	-
Largura 50% (μs)	1.6	19.2	6.6	-
Pico Normalizado em 100km (V/m)	3.2	142.1	29	17.3

Pontos de destaque dessa seção:

- O uso de diferentes equipamentos nos possibilitou identificar que 6 casos de raios NS positivos que antecederam ascendentes foram classificados, pelos sistemas de detecção, erroneamente como intra-nuvem.
- Os raios NS positivos que geraram RA possuem tempo de subida menor do que os raios NS positivos que não geraram RA.
- Em média os picos normalizados para 100 km dos raios que geraram raios ascendentes são 1,7 vezes maiores do que os dos que não provocaram raios ascendentes.

6.2. Propagação do líder por LMA

Durante os verões de 2011/2012 no Brasil e de 2014 em Rapid City os dados de mapeamento 3D (LMA) estavam disponíveis.

No verão de 2011/2012 no Brasil ocorreram 10 raios ascendentes registrados pelo LMA. Em Rapid City o mesmo ocorreu para 13 raios ascendentes durante o verão de 2014.

As aproximações dos líderes da região das torres foram estudadas utilizando-se as informações do LMA e do LLS (SCHUMANN et al 2013b, 2014b; 2016).

Foram selecionados para análise os intervalos entre 1 hora antes até 1 hora depois dos eventos de raios ascendentes registrados.

Para os intervalos selecionados foram geradas figuras relativas a todas as descargas elétricas que ocorreram numa área centralizada nas torres em Rapid City e no Pico do Jaraguá em São Paulo.

Ocorreram 4 dias de tempestade que geraram raios ascendentes no período em que o LMA esteve instalado na cidade de São Paulo.

Foram feitas imagens com intervalo de 15 segundos de maneira a que se pudesse analisar todas e quaisquer fontes de radiação na área (Figura 6.5). A área definida para o estudo tinha dimensões de 40 km x 40 km centralizada em torno da torre do Pico do Jaraguá.

Figura 6.5 Exemplo de uma imagem do LMA com a propagação de um líder de uma possível descarga matriz sobre a torre do Pico do Jaraguá (sem produzir raio ascendente).

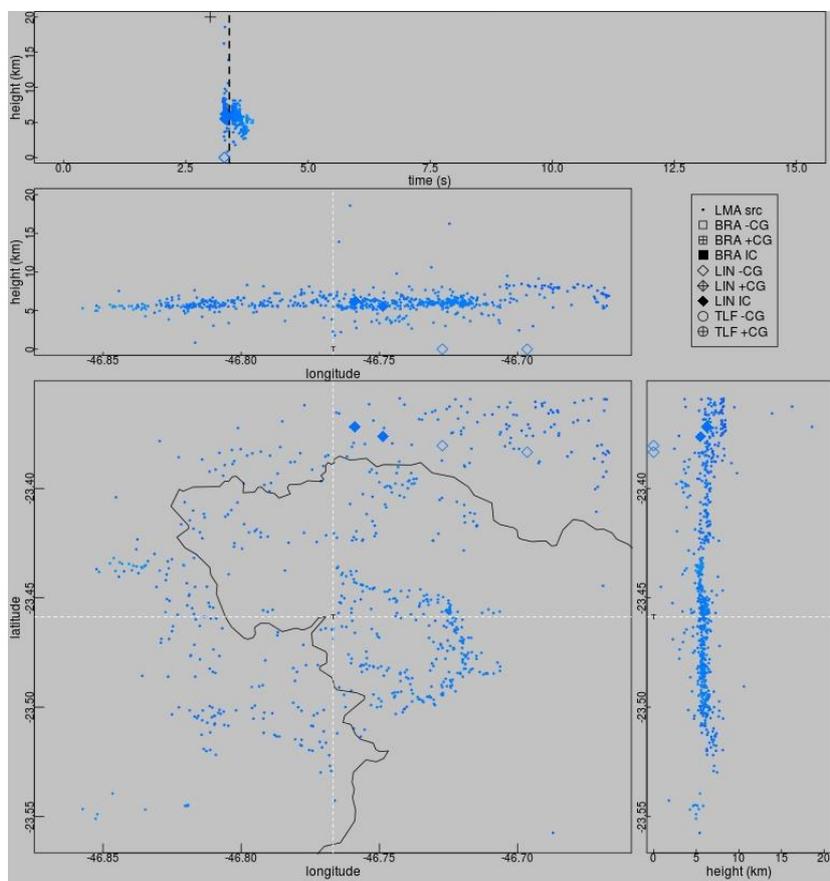


Imagem centralizada na torre do Pico do Jaraguá. Linha tracejada indica a posição da torre.

Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

Durante os 4 dias de tempestade na área em torno do Pico do Jaraguá, foram registradas 4134 descargas pelo LMA, 99 das quais tiveram líderes se propagando por sobre a torre. Essas descargas foram classificadas pelo sistema de detecção como nuvem-solo negativas, nuvem-solo positivas ou intra-nuvem.

A

Tabela 6.2 mostra a quantidade de líderes e a polaridade das descargas associadas a eles, bem como a quantidade de raios ascendentes iniciados em cada situação.

Tabela 6.2 Informações sobre descarga matriz, propagação de líderes e ascendentes

Polaridade da descarga matriz	Líderes sobre a Torre do Pico do Jaraguá	Quantidade de Raios Ascendentes
+NS	53	9
IN	34	1
-NS	12	Nenhum

O mesmo estudo foi feito para as 5 tempestades ocorridas em Rapid City no verão de 2014. A área definida para o estudo tinha 50 km x 50 km centralizados nas torres. Durante as tempestades foram produzidos 13 raios ascendentes e um total de 35 líderes ascendentes iniciando das torres.

Figura 6.6 Exemplo de uma imagem de LMA em Rapid City. Os triângulos pretos indicam a posição das torres. O líder se propaga por sobre as torres sem produzir raios ascendentes.

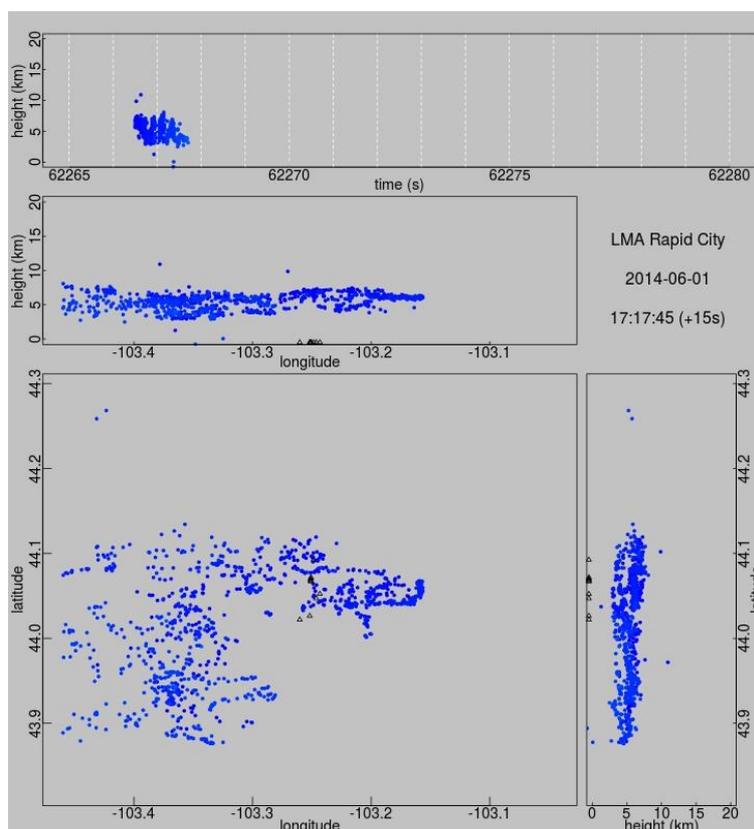


Imagem centralizada no conjunto de torres.

Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

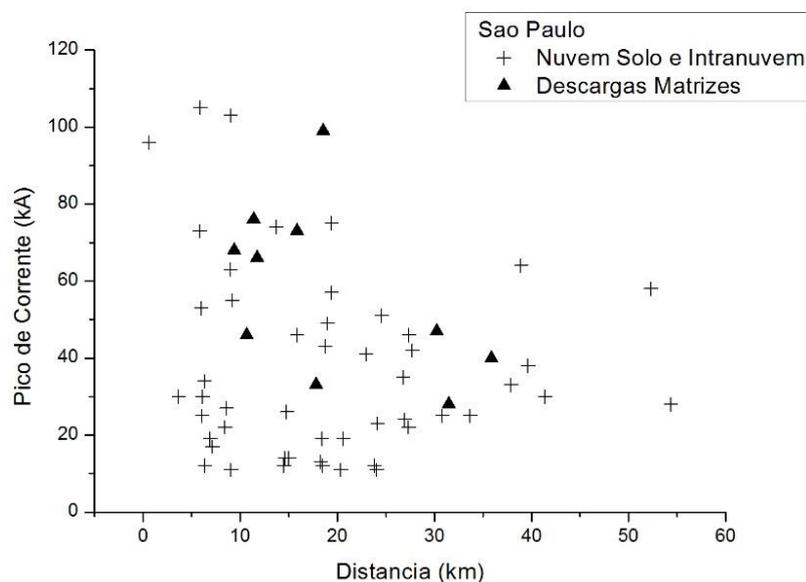
1590 descargas ocorreram dentro da área escolhida. 262 dos 1590 eventos apresentaram líderes passando por sobre uma ou mais torres. A partir das informações do sistema de detecção, as descargas foram classificadas como nuvem-solo negativa, nuvem-solo positiva ou intra-nuvem. A Tabela 6.3 mostra um resumo dos dados.

Tabela 6.3 Informações sobre descarga matriz, propagação de líderes e ascendentes

Polaridade da descarga matriz	Líderes sobre as Torres de Rapid City	Quantidade de Raios Ascendentes
+NS	17	4
IN	207	9
-NS	48	Nenhum

A Figura 6.7 e a Figura 6.8 mostram a relação para S. Paulo e Rapid City entre os picos de corrente informados pelos sistemas de detecção e a distância de ocorrência das descargas em relação à torre de onde iniciou o RA.

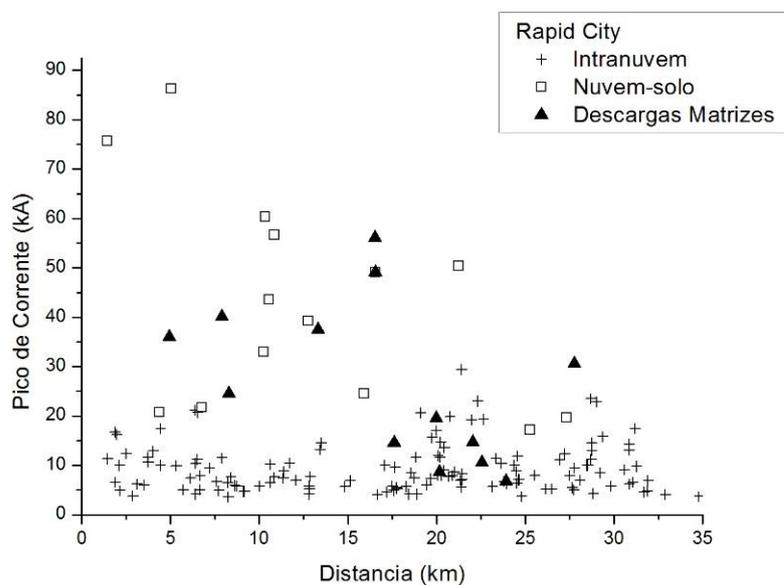
Figura 6.7 Pico de corrente e distância dos casos em São Paulo das descargas.



As descargas que geraram RA são marcadas com o símbolo ▲.

Fonte: Produção da autora

Figura 6.8 Pico de corrente e distância dos casos em Rapid City das descargas



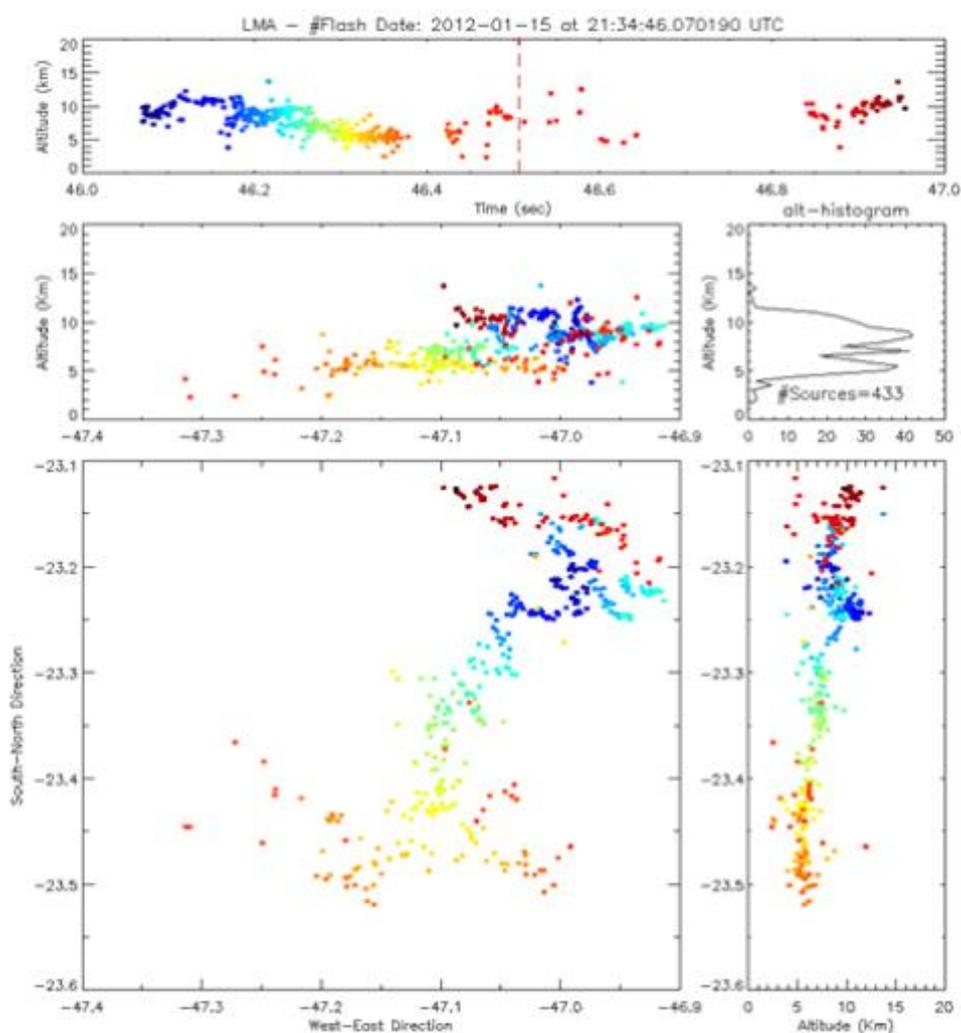
As descargas que geraram RA são marcadas com o símbolo (▲)

Fonte: Produção da autora

A distribuição dos valores de intensidade de pico de corrente e respectivas distâncias não sugere que haja alguma relação destas grandezas com a iniciação do RA.

A Figura 6.9 e a Figura 6.10 são exemplos de raios descendentes que geraram raios ascendentes em cada uma das regiões estudadas. A variação de cores dos pontos indica a evolução temporal das descargas.

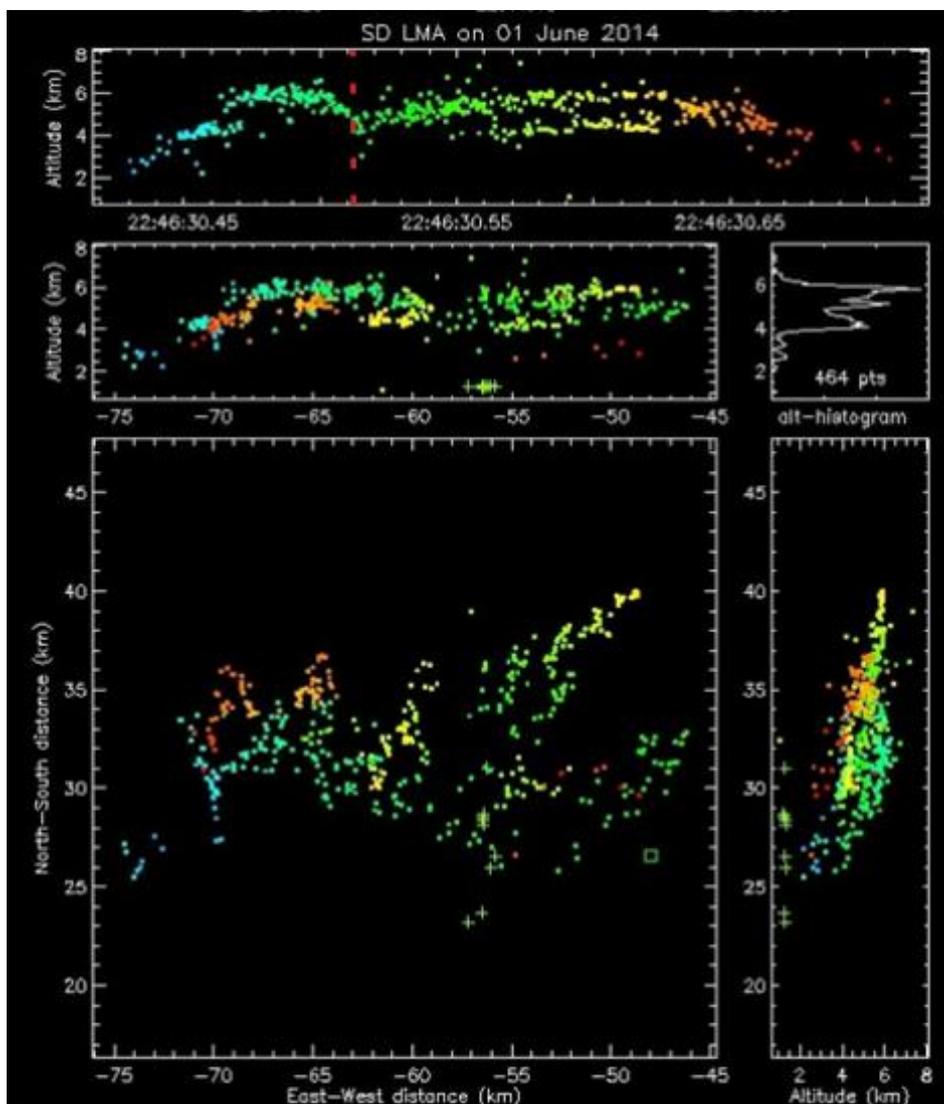
Figura 6.9 Registro de LMA para um raio ascendente no Pico do Jaraguá (linha vermelha indica o início do líder ascendente).



Distância entre a descarga de retorno positiva e a torre de 11,46 km e pico de corrente de 76 kA. A linha tracejada indica o horário de início do líder ascendente.

Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

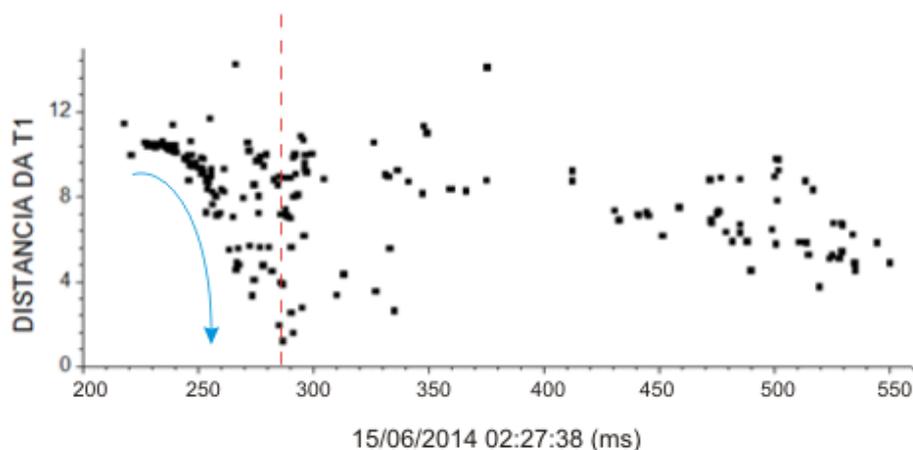
Figura 6.10 Registro de LMA para um raio ascendente em Rapid City (linha vermelha indica o início do líder ascendente).



Distância entre a descarga de retorno positiva e a torre de 15,7 km e pico de corrente de 40,1kA. Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

A distância entre as fontes de radiação e as torres, para os eventos que geraram raios ascendentes, apresentaram valor médio de 4 km no instante do início do líder ascendente. A Figura 6.11 é um exemplo da evolução temporal da distância até a torre ao longo da descarga.

Figura 6.11 Distância das fontes de radiação à torre (Rapid City).

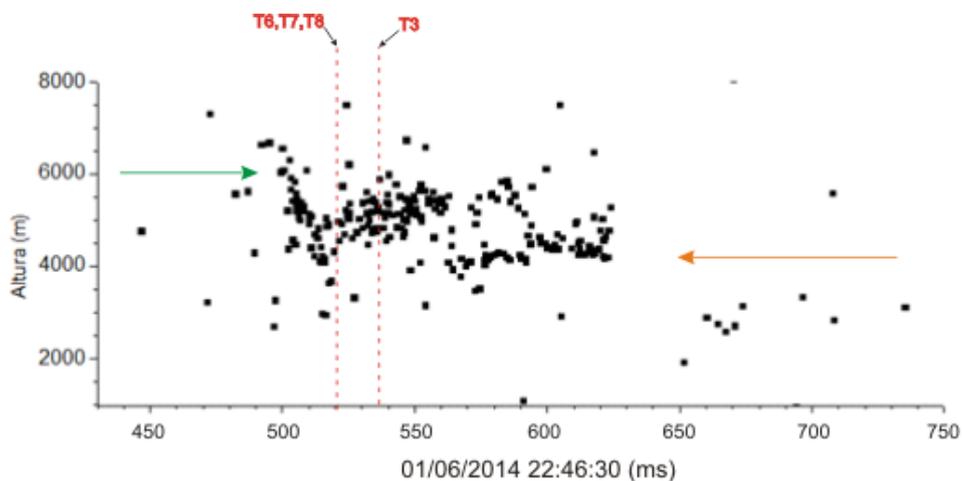


A linha vermelha indica o instante em que o líder ascendente inicia. Aproximação do líder dentro da nuvem associado à descarga de retorno é indicada pela seta azul.

Fonte: Produção da autora

Utilizando os dados de LMA também foi possível analisar a altitude das fontes de radiação se propagando dentro da nuvem. A Figura 6.12 mostra o gráfico da altitude em relação ao tempo durante a propagação

Figura 6.12 Altura das fontes de radiação à torre (Rapid City).



A linha vermelha indica o instante em que o líder ascendente inicia nas torres indicadas acima. A seta verde indica a propagação do líder associado a descarga de retorno antes do início do líder ascendente e a seta laranja a propagação de ambos líderes: líder ascendente; e do líder da descarga matriz. Fonte: Produção da autora

Vale observar que na Figura 6.12, mesmo após o início do líder ascendente, as fontes de radiação com origem no líder que se propaga dentro da nuvem não cessam. Assim, as fontes de radiação do NS positivo e do raio ascendente se misturam. Após o início dos líderes ascendentes, as radiações estão em diferentes alturas, porém pode-se observar fontes de radiações em alturas mais baixas do que a inicial, por exemplo, na Figura 6.12 sinalizada com a seta laranja.

Pontos de destaque do capítulo:

- A propagação dos líderes sobre as torres é necessária, mas não é condição suficiente para a iniciação de um líder ascendente. Vários líderes passam sobre as torres sem produzirem raios ascendentes.
- Os picos de corrente e as distâncias das descargas próximas não apresentaram nenhum padrão de associação com a ocorrência de raios ascendentes.
- A altitude da propagação do líder antes e depois do início do raio ascendente apresenta uma redução na altura. O líder ascendente se propaga logo abaixo da região em que propagou o líder dentro da nuvem.
- As fontes de radiação do líder da descarga matriz estão a poucos quilômetros de distância da torre onde se inicia o líder ascendente. Isto é, o raio de influência do líder dentro da nuvem associado à descarga matriz, para a ocorrência de raios ascendentes é, em média, 4 km.

7. CARACTERÍSTICAS DOS RAIOS ASCENDENTES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das análises dos registros em vídeo efetuados pelas câmeras rápidas, sem informações de sensores de campo elétrico.

Existem diversos estudos na literatura baseados em medidas da corrente elétrica de raios ascendentes como, por exemplo, Diendorfer et al. (2009), Romero et al. (2013) e Hussein et al. (2004). Outros são baseados em registros em vídeo obtidos através de câmeras rápidas, por exemplo, Schumann et al. (2014a); Wang et al. (2008), Mazur e Ruhnke (2011), Flache et al. (2008), Lu et al. (2009), Jiang et al. (2014) e Warner et al. (2012). Estes estudos com câmeras rápidas analisam, no entanto, poucos casos (menos de 15 eventos).

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de 72 raios ascendentes no Pico do Jaraguá e 28 raios ascendentes em Rapid City registrados por câmeras rápidas. Como descrito no Capítulo 4, os dados dos raios ascendentes filmados na Avenida Paulista não foram utilizados nessa análise uma vez que a campanha nesse local se restringiu a apenas um verão com o registro de uma amostra muito pequena de eventos (3 casos).

Neste capítulo além dos registros em vídeo efetuados com câmera rápida, serão utilizadas as informações dos sistemas de localização de descargas.

Foram observados raios ascendentes em 28 tempestades na região do Pico do Jaraguá, e em 11 em Rapid City. Nessas tempestades, 72 raios ascendentes foram registrados no Pico do Jaraguá e 28 em Rapid City. Um caso interessante foi o de um raio ascendente que teve participação simultânea de torres situadas no Pico do Jaraguá e na Avenida Paulista (11 quilômetros de distância entre elas).

A média de raios ascendentes por tempestade é de 2,57 no Pico do Jaraguá, e de 2,54 em Rapid City.

Os raios ascendentes registrados em ambos os locais de observação, foram caracterizados como raios ascendentes iniciados por descargas que os antecederam. Essa caracterização foi feita com base na análise do LLS e evidências observadas no vídeo.

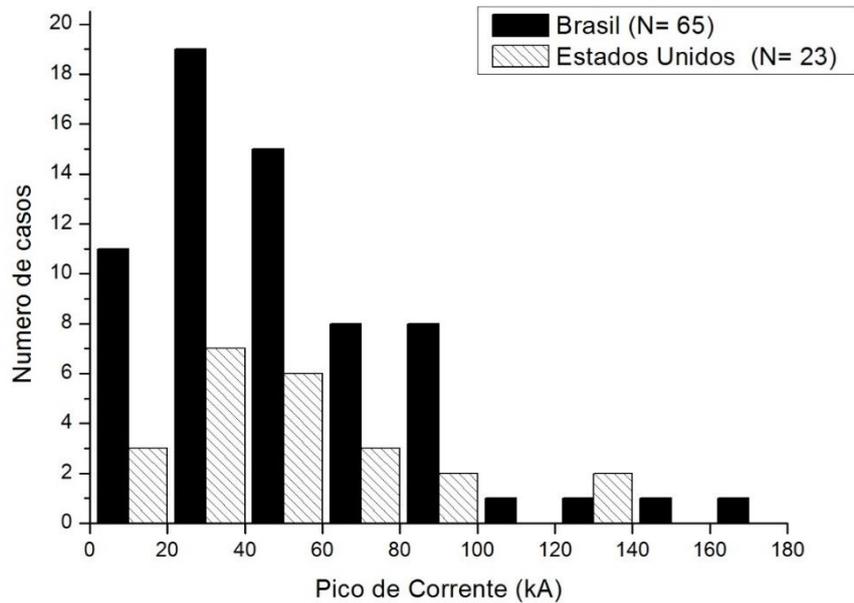
7.1 Descargas matriz

As descargas matrizes analisadas nesta seção são de todos os casos de raios ascendentes filmados por câmera rápida, incluindo os que foram analisados no capítulo 6.2 (no capítulo 6.2 a análise foi feita para casos registrados com LMA).

Nesta seção, serão apresentadas as descargas matrizes dos raios ascendentes filmados por vídeos (65 no Brasil e 23 casos de descargas matrizes nos Estados Unidos). No capítulo 6 foram analisados somente parte dos casos de descarga matriz para os raios ascendentes, os raios ascendentes que possuem dados de LMA (10 no Brasil e 13 nos Estados Unidos).

As descargas matrizes foram identificadas pelos sistemas de localização (LLS) como sendo 5% intra-nuvens e 95% descargas nuvem-solo positivas. A distribuição do pico de corrente destas descargas pode ser vista na Figura 7.1.

Figura 7.1 Pico de corrente estimado

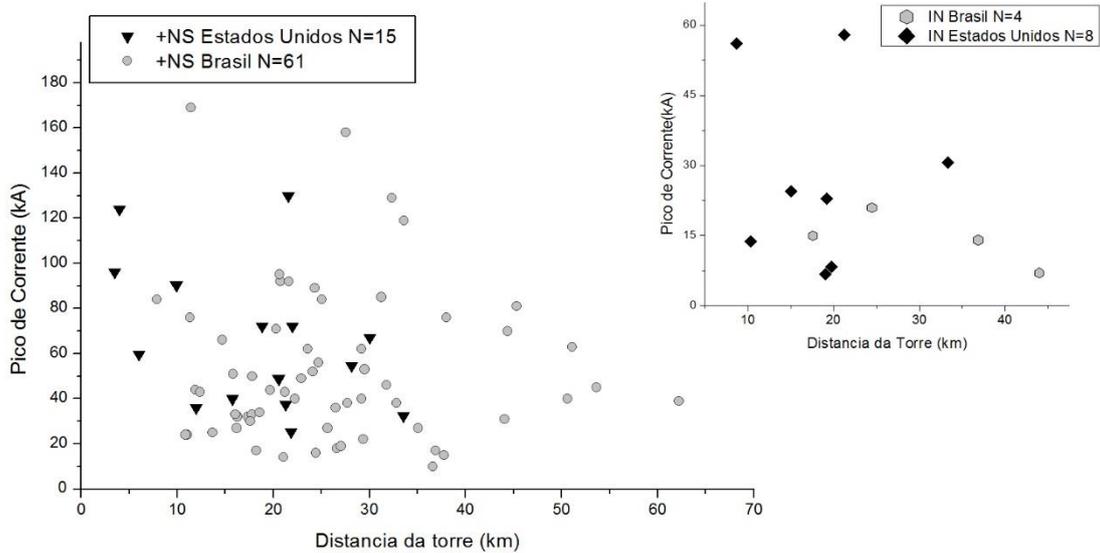


Distribuição do pico de corrente estimado pelas redes de detecção para os 65 casos de RA no Brasil e 23 em Rapid City.

Fonte: Produção da autora

As descargas matriz tiveram seus pontos de contato com solo determinados pelo sistema de localização, sendo que a máxima distância encontrada foi 65 km das torres envolvidas, conforme mostrado na Figura 7.2. O gráfico menor à direita da figura apresenta os picos de corrente dos casos que foram classificados como intra-nuvem.

Figura 7.2 Pico de corrente e distância das descargas matrizes



Pico de corrente estimado pelas redes de detecção e distâncias para os 65 casos de RA no Brasil e 23 em Rapid City. Gráfico superior à direita são as descargas matrizes que os sistemas de localização classificou como inta-nuvem.

Fonte: Produção da autora

O horário das descargas matrizes registradas pelos sistemas de localização podem ter sido antes ou depois do início do líder ascendente. Evidências nos vídeos indicam que, em todos os casos, ocorreu a passagem, por dentro na nuvem, de líderes da descarga matriz por cima da região onde estavam situadas as torres de onde partiram os líderes ascendentes. Em alguns casos a descarga matriz toca o solo antes do início do líder ascendente e em outros toca depois. Veremos no capítulo 8 as hipóteses ligadas a esta observação com mais detalhes. Na seção 6.2, os casos que foram registrados por LMA, essas evidências nos vídeos foram confirmadas pelo mapeamento 3D.

7.2 Múltiplas torres envolvidas

Uma descarga matriz pode provocar o início de um ou mais líderes ascendentes em diferentes torres (Figura 7.3). No Brasil, 11% dos raios ascendentes (8 em

72) ocorridos no Pico do Jaraguá apresentaram múltiplas torres envolvidas. Esse número aumenta para 57% (16 em 28 casos) em Rapid City.

O maior número de torres que produziram líderes ascendentes simultaneamente foi 5 em Rapid City, e duas no Pico do Jaraguá.

Figura 7.3 Raios ascendentes e torres envolvidas



Exemplo de raio ascendente: a) de uma torre b) simultaneamente de duas torres.

Fonte: Campanha SP 2014-2015 (esquerda) e Campanha Rapid City 2014

Assim, os raios ascendentes podem ter um ou mais líderes ascendentes iniciando de diferentes torres. E pelo horário próximo, será considerado o mesmo raio ascendente.

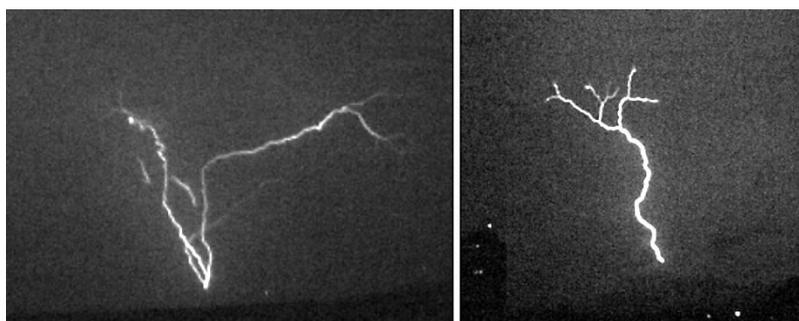
7.3 Propagação do líder ascendente e suas ramificações

Os líderes ascendentes podem se propagar de forma ramificada ou não. A ramificação pode ocorrer já na extremidade da torre, durante a sua propagação antes de atingir a base da nuvem ou na base da nuvem (Ver Figura 7.4).

Para os 72 casos de raios ascendentes ocorridos no Pico do Jaraguá, foram 75 líderes ascendentes observados pelas câmeras rápidas. Desses, 40% (30 em 75) não se ramificaram. Para os 45 casos (60%) de líderes ascendentes que se ramificaram, em somente 3 casos (7%) a ramificação ocorreu já na extremidade da torre (Figura 7.4).

Para os 28 casos de raios ascendentes ocorridos em Rapid City, nos Estados Unidos, 62 líderes ascendentes iniciando das torres foram observados com câmera rápida. Desses, 37% (23 em 62) não apresentam ramificação. Para os 39 casos (63%) que ramificaram 18% (7 em 39) apresentam ramificação já na extremidade da torre.

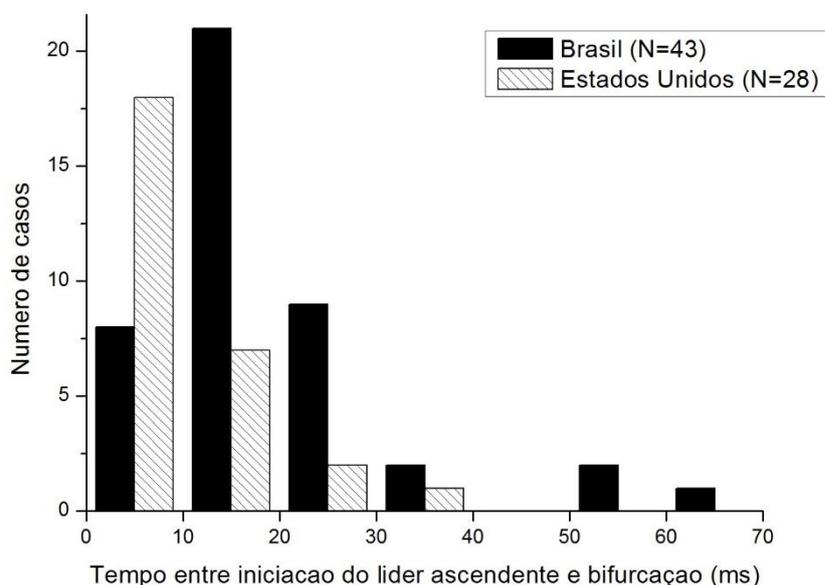
Figura 7.4 Ramificação do raio ascendente



Ramificação do raio ascendente: na ponta da torre (esquerda) e na base da nuvem (direita) Fonte: Campanha SP 2014-2015 e Campanha Rapid City 2014

Para os casos que se ramificam, a média do intervalo de tempo entre a iniciação e a ramificação do líder ascendente é de 19 ms no Pico do Jaraguá e de 9.5 ms em Rapid City. A distribuição do intervalo entre iniciação e a primeira ramificação do líder ascendente é apresentada na Figura 7.5.

Figura 7.5 Tempo entre a iniciação do líder ascendente e a bifurcação



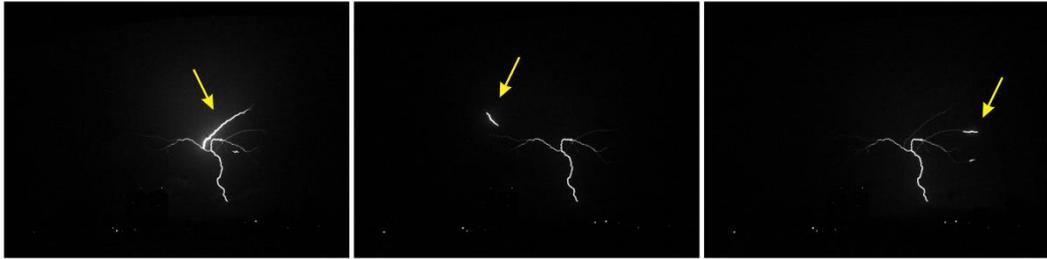
Fonte: Produção da autora

O líder ascendente se inicia de maneira intensa, formando o canal (trajeto formado pela transferência de carga). Após um tempo este canal se enfraquece favorece a ramificação, buscando assim as diferentes regiões de carga dentro da nuvem.

Durante a propagação dos líderes ascendentes foram registradas pequenas descargas logo à frente da extremidade do líder. Essas pequenas descargas são líderes de recuo, do termo em inglês recoil leaders (Figura 7.6).

A presença desses líderes de recuo é associada com a polaridade do líder que está se propagando (MAZUR, 2002). Somente as descargas positivas apresentam essa característica. Estão associadas à propagação tanto inicial para criação do canal principal quanto ao enfraquecimento do canal devido a extensão do mesmo.

Figura 7.6 Líderes de recuo



Líderes de recuo: Pequenas descargas logo à frente da extremidade do líder.

Fonte: produção da autora

Esses líderes de recuo aparecem em grande quantidade durante a propagação do líder. A Figura 7.7 apresenta uma imagem feita com uma sequência de imagens sobrepostas de um raio ascendente se propagando.

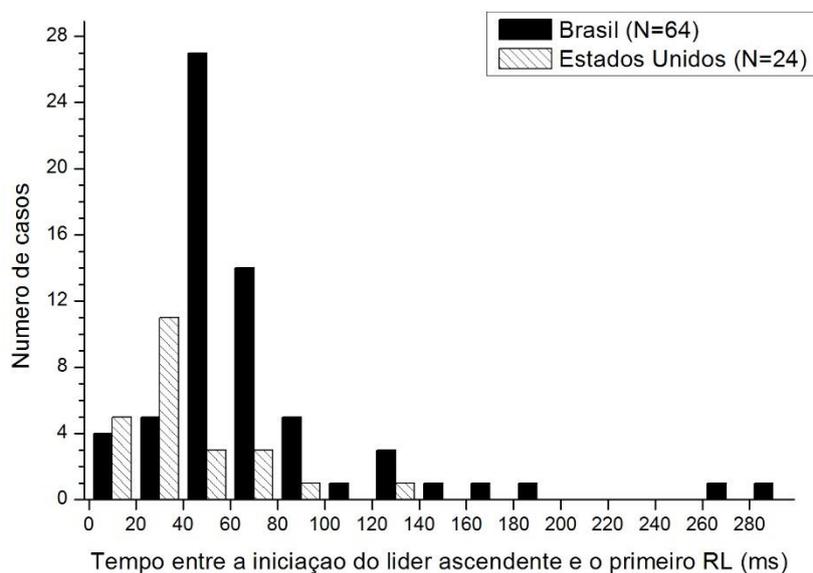
Figura 7.7 Sequência de imagens sobrepostas de RL's



Fonte: Produção da autora

A propagação do líder ascendente se inicia na extremidade das torres e após, em média, 70,6 ms no Brasil e 39,7 ms nos EUA surgem os líderes de recuo. A Figura 7.8 mostra a distribuição dos intervalos entre o início do líder ascendente e o surgimento dos líderes de recuo.

Figura 7.8 Intervalo de tempo entre a iniciação do líder ascendente e a ocorrência dos RL's



Fonte: Produção da autora

7.4 Corrente Contínua Inicial

A etapa do raio ascendente com maior duração é a corrente contínua inicial. A duração desta etapa é obtida medindo-se o intervalo de tempo entre o aparecimento do líder ascendente até o instante quando não há mais luminosidade no canal. Durante essa etapa, alguns pulsos superpostos podem ocorrer.

Nessa análise, para os casos de raios ascendentes partindo de múltiplas torres simultaneamente, foi considerado individualmente cada caso de líder ascendente.

Em aproximadamente metade dos casos (54% no Pico do Jaraguá e 51% em Rapid City) os líderes apresentaram pulsos sobrepostos à corrente contínua

inicial. Em média, foram encontrados 4.6 pulsos sobrepostos às CCI no Pico do Jaraguá e 7.2 em Rapid City . A Tabela 7.1 resume esses dados.

Tabela 7.1 Corrente contínua inicial (CCI)

	Pico do Jaraguá	Rapid City
Número de casos	79	65
Porcentagem de casos que contém pulsos	54%	51%
Número de pulsos de CCI	197	236
Média de pulsos de CCI para total de casos	2.5	3.6
Média de pulsos de CCI para os casos que contem pulsos	4.6	7.2

A corrente contínua inicial, assim como as correntes contínuas nos raios descendentes, está associada aos danos térmicos causados pelas descargas de origem atmosféricas.

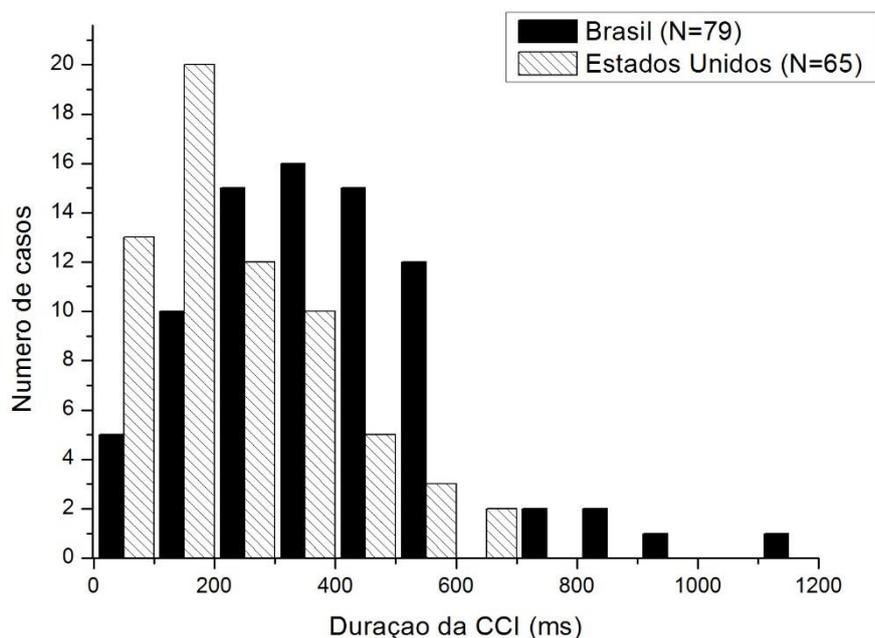
A Tabela 7.2 apresenta os valores de duração média (média geométrica, mínimo e máximo valor da corrente contínua inicial) das correntes contínuas iniciais dos raios ascendentes. A distribuição dos dados da duração da corrente contínua inicial é mostrada na **Erro! Autoreferência de indicador não válida..**

Tabela 7.2 Duração de corrente continua inicial (ms)

Região	N	AM	GM	Mediana	Min	Max
Pico do Jaraguá	79	370	330	336	72	1143
Rapid City	65	233	174	195	10	616

N é o número de casos; AM é a média aritmética; GM é a Média geométrica; Min é o valor mínimo; Max é o valor máximo encontrado.

Figura 7.9 Duração da Corrente Contínua Inicial (CCI)



Fonte: Produção da autora

Nos casos do Pico do Jaraguá, as durações foram mais longas do que em Rapid City. A menor duração em Rapid City pode estar associada ao maior número de torre envolvidas fazendo que as cargas entre nuvem e solo se reorganizem mais rapidamente através dos vários canais.

7.5 Descargas de retorno e multiplicidade

Outra característica dos raios ascendentes observada pelas câmeras de alta velocidade são as descargas de retorno que percorrem o mesmo canal criado pelo líder ascendente.

Nos registros de câmeras rápidas, a descarga de retorno é determinada quando após um período sem luminosidade no canal um líder descendente percorre o mesmo caminho em direção ao solo. Para as regiões no mundo, como por exemplo a Áustria, onde não possuem as câmeras rápidas ou que a região não

permita a visualização do canal, determinar as descargas de retorno é através do limite inferior do equipamento de medidas de corrente (fundo de escala).

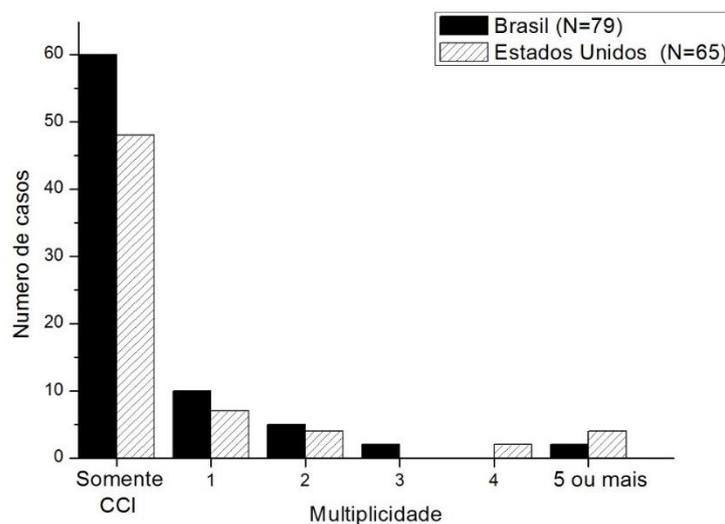
As porcentagens de líderes ascendentes que são seguidos por descargas de retorno subsequentes são similares nos dois locais de observação, 24% (19 em 79 casos) no Pico do Jaraguá e 26% (17 em 65 casos) em Rapid City. Os líderes ascendentes seguidos por descargas de retorno subsequentes ocorreram em poucas tempestades, 6 em 28 no Pico do Jaraguá e 4 em 11 casos de Rapid City.

No caso dos raios descendentes a quantidade de descargas de retorno é denominada multiplicidade. Nos casos dos raios ascendentes, existe a corrente contínua inicial que é a criação de um caminho (canal) de maneira mais lenta se comparada às descargas de retorno, assim essa tese apresenta a multiplicidade dos raios ascendentes tanto como o número de descargas de retorno em um líder ascendente, quanto ao número de descargas de retorno presentes em todos os casos de ascendentes.

A multiplicidade média de descargas de retorno, quando só incluídos os líderes com descarga de retorno, é de 2,0 no Pico do Jaraguá (39 descargas de retorno em 19 líderes ascendentes) e 3,4 em Rapid City (57 descargas de retorno em 17 líderes ascendentes). A Figura 7.10 apresenta a distribuição da multiplicidade para ambas as regiões.

Se no cálculo da multiplicidade fossem considerados todos os líderes ascendentes, incluindo os casos que possuem somente corrente contínua inicial, o valor médio decresceria para 0,5 no Pico do Jaraguá e 0,9 em Rapid City. Com essa análise, é possível dizer que em média 1 a cada 2 raios ascendentes terá uma descarga de retorno no Pico do Jaraguá, e em Rapid City é que em praticamente todos os casos pode haver uma descarga de retorno.

Figura 7.10 Distribuição da multiplicidade para ambas as regiões.



Fonte: Produção da autora

A

Tabela 7.3 resume as características de ambas as regiões.

Tabela 7.3 Descargas de Retorno (DR)

	Pico do Jaraguá	Rapid City
Número de líderes ascendentes	79	65
Porcentagem de líderes ascendentes seguidos de DR	24%	26%
Média de DR por líderes ascendentes seguidos de DR	2,0	3,4
Média de DR em todos os líderes ascendentes	0,5	0,9
Número de tempestades em que ocorreram DR subsequentes aos líderes ascendentes	6 de 28	4 de 11

7.6 Intervalo entre descargas de Retorno

O intervalo de tempo entre as descargas de retorno subsequentes nos raios ascendentes, entre os pulsos ocorrendo durante a corrente contínua inicial e entre pulsos e descargas de retorno quando considerados em um só conjunto,

são mostrados na Tabela 7.4. Para comparação são mostrados, na mesma tabela, estudos realizados na Áustria com raios ascendentes (DIENDORFER et al., 2009) e no Brasil com raios descendentes negativos (CAMPOS et al., 2007, 2009 e SABA et al., 2006).

Tabela 7.4 Intervalo entre eventos

Intervalo entre:		Região	N	AM (ms)	GM (ms)	Mediana (ms)	Min (ms)	Max (ms)
Raios ascendentes	Pulsos de CCI	<i>Brasil</i>	154	34.5	19.8	20.7	0.2	227
		<i>EUA</i>	204	16.3	10.6	11.0	0.2	142
	Descargas de retorno	<i>Brasil</i>	20	54.3	40.7	39.3	3.5	114
		<i>EUA</i>	41	16.3	13.2	11.6	3.2	53.7
	Pulsos de CCI e Descargas de retorno juntos	<i>Brasil</i>	184	40.6	23.1	23.8	0.2	275
		<i>EUA</i>	258	20.9	11.2	10.7	0.3	620
	<i>Diendorfer et al., (2009)</i>	<i>Áustria</i>	476		17.3	18.6		
Raios Negativos	Componente M. <i>Campos et al. (2009)</i>	<i>Brasil</i>	289		11			
	Descarga de Retorno <i>Saba et al. (2006)</i>	<i>Brasil</i>	608		61			

Os intervalos entre as descargas de retorno se apresentaram muito menores nos casos de Rapid City em comparação aos casos do Pico do Jaraguá. No entanto, em ambos os casos esses intervalos se apresentam muito menores quando comparados com os intervalos entre descargas de retorno em raios negativos (Tabela 7.4).

7.7 Corrente contínua nas descargas de retorno

A caracterização da corrente contínua após a descarga de retorno em função da sua duração, estimada a partir da duração da luminosidade no canal, já foi apresentada em trabalhos anteriores (e.g. SABA et al., 2006, 2010; BALLAROTTI et al., 2012). Assim, a duração da luminosidade do canal após a descarga de retorno pode ser separada por categorias. Nesse trabalho, a separação foi feita para descargas que contém alguma corrente contínua (maiores do que 3 ms) e descargas que contenham correntes contínuas maiores do que 40 ms (longas).

Os dados de descargas de retorno subsequentes aos líderes ascendentes que apresentaram corrente contínua são mostrados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 Corrente Contínua

	Pico do Jaraguá	Rapid City
Número de DR subsequentes seguidas de corrente contínua	39	57
Porcentagem de DR com alguma CC	90%	40%
Porcentagem de DR com CC longa	26%	5%

Na Tabela 7.6 são encontrados os valores estatísticos (AM, GM, mediana, mínimo, máximo) das correntes contínuas nos raios ascendentes e dados comparativos de trabalhos anteriores.

Tabela 7.6 Duração da CC (ms)

	Região	N	AM	GM	Mediana	Min	Max
Raio Ascendente	Pico do Jaraguá	35	60	41	21	4	571
	Rapid City	23	19	11	10	3	101
-NS CC (≥ 3 ms) * Ballarotti et al. (2012)	Brasil	2180	31	-	6	3	714
-NS CC (> 40 ms) ** Ballarotti et al. (2012)	Brasil	304	173	-	137	40	714

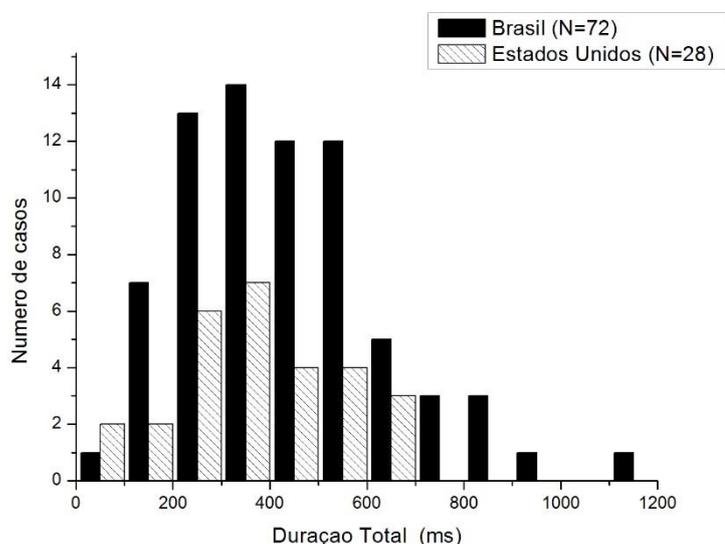
* Todos os valores de CC considerados (3 ms ou maiores).

** Somente valores de CC maiores do que 40ms de duração.

7.8 Duração total do raio ascendente.

Nos raios ascendentes a duração é definida como o intervalo de tempo entre o instante em que o líder ascendente inicia na extremidade da torre até o final da última corrente contínua da descarga de retorno subsequente. A distribuição da duração total dos raios ascendentes é mostrada na Figura 7.11.

Figura 7.11 Duração total do raio ascendente



Fonte: Produção da autora

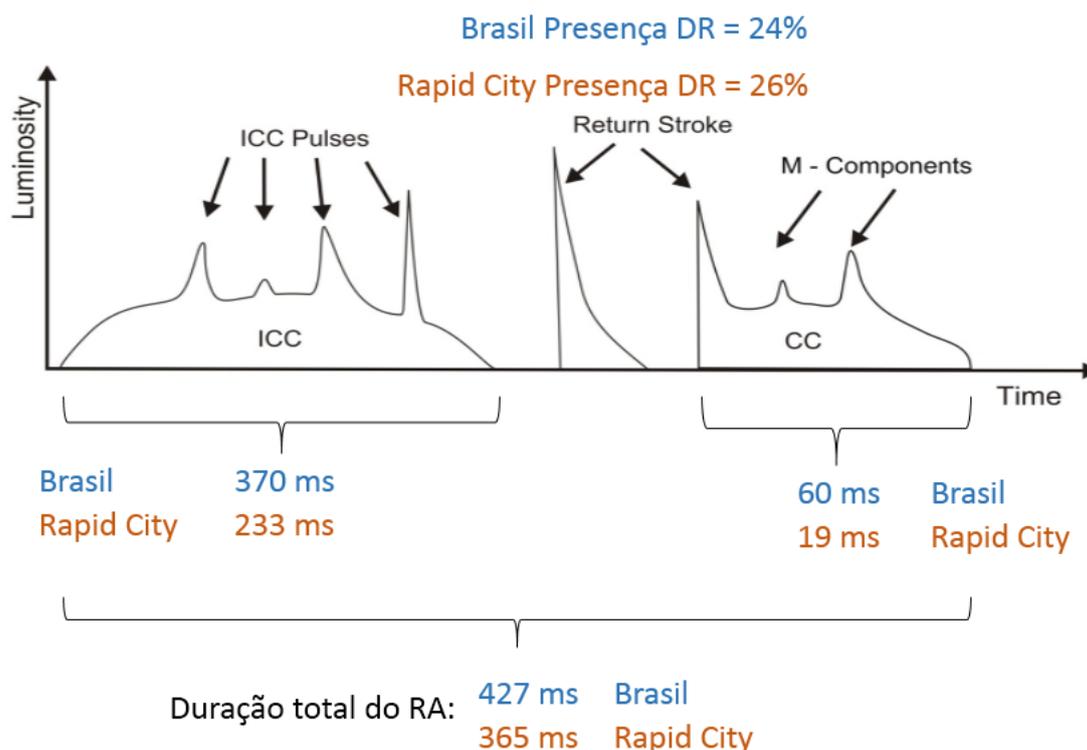
A Tabela 7.7 mostra os resultados estatísticos obtidos neste estudo para a duração total dos raios ascendentes bem como o resultado de um estudo para raios descendentes encontrado na literatura para comparação (BALLAROTTI et al., 2012). Vale notar que os resultados são semelhantes tanto para ambas as regiões deste estudo como para os raios descendentes negativos estudados por Ballarotti et al. (2012). Embora os raios descendentes negativos apresentem maior multiplicidade quando comparados aos raios ascendentes, estes, por sua vez, têm como característica a presença das correntes contínuas iniciais que também contribui para uma duração total maior.

Tabela 7.7 Duração Total (ms)

	Região	N	AM	GM	Mediana	Min	Max
Raio Ascendente	Pico do Jaraguá	72	427	372	430	86	1143
Raio Ascendente	Rapid City	28	365	308	363	22	682
Raio Descendente	Brasil	736	423	-	300		1430

A **Figura 7.12** ilustra as durações e porcentagem dos eventos nos casos de raios ascendentes.

Figura 7.12 Duração dos eventos do raio ascendente



Pontos de destaque deste capítulo:

- Uma descarga descendente ou intra-nuvem pode disparar líderes ascendentes a partir de uma ou mais torres;
- As descargas matrizes são predominantemente descargas nuvem solo positivas.
- As descargas prévias podem ser detectadas nos sistemas de detecção antes ou depois do início do líder ascendente;

- Todas as descargas nas regiões estudadas foram positivas, com presença de líderes de recuo;
- Os líderes ascendentes podem se ramificar e alcançar diferentes regiões na nuvem, e como consequência dessa propagação, podem apresentar pulsos sobrepostos à corrente contínua inicial;
- Os raios ascendentes apresentam duração total semelhante aos raios descendentes negativos, apesar de apresentarem menor multiplicidade. Isso, provavelmente, é devido à contribuição das longas correntes contínuas iniciais presentes nesse tipo de relâmpago.
- As longas correntes contínuas iniciais podem ter como consequência problemas graves causados por efeitos térmicos, uma vez que a corrente permanece fluindo, pela estrutura, por um tempo mais longo.

8. HIPÓTESE PARA INICIAÇÃO DE RAIOS ASCENDENTES

Inicialmente serão lembrados alguns pontos importantes dos capítulos anteriores:

- a) Todos os raios ascendentes registrados durante as campanhas foram iniciados por descargas matrizes. As descargas matrizes foram todas positivas ou intra-nuvem.
- b) Não foi observado casos de raios ascendentes auto-iniciados.
- c) Existe um momento específico em que os raios ascendentes ocorrem: no final da tempestade.
- d) A partir da análise do mapeamento em 3D das descargas elétricas, foi possível observar que as descargas que ocorrem nas proximidades podem se propagar por sobre a torre e não gerar raios ascendentes.
- e) A distância entre o ponto de contato de uma descarga matriz e as torres pode ser grande e, nesses casos, o intervalo de tempo entre a descarga de retorno e o início do líder ascendente é longo.
- f) Foi possível observar, através dos registros em vídeo e do mapeamento em 3D das descargas, que a propagação do líder na base da nuvem ao se aproximar das torres provoca a iniciação do(s) líder(es) ascendente(s).

A seguir, duas hipóteses são propostas baseadas nas observações e resultados dos capítulos anteriores e nas seções seguintes serão apresentados os mecanismos que sustentam as hipóteses apresentadas.

Para a iniciação de um líder ascendente o valor de campo elétrico ambiente deve ultrapassar um valor crítico. Esse valor crítico é o valor mínimo do campo elétrico necessário para a iniciação do líder ascendente a partir da extremidade da torre. Este valor de campo elétrico crítico deverá ser determinado para cada torre de

observação. Para a hipótese descrita nesse capítulo, E_c é definido com o *campo elétrico ambiente crítico* para a ocorrência de raios ascendentes.

Como decorrência das observações acima, e a definição de valor crítico, foram propostas duas hipóteses para explicar como raios ascendentes podem ser desencadeados por descargas matrizes.

Hipótese 1: *O campo elétrico pré-existente na extremidade da torre é baixo, porém a variação provocada pela passagem do líder da descarga matriz (dentro da nuvem) é alta o suficiente para fazer com que o valor do campo elétrico crítico seja ultrapassado.*

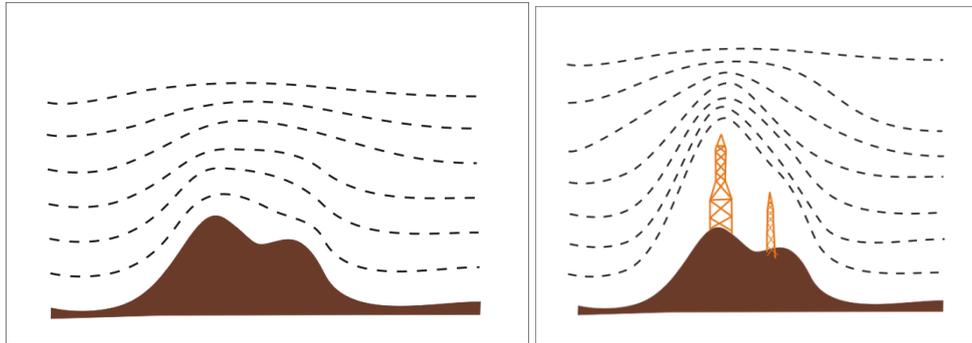
Hipótese 2: *O campo elétrico pré-existente na extremidade da torre é alto, de maneira que a variação provocada pela passagem do líder por dentro da nuvem não precisa ser intensa para que o valor do campo elétrico crítico seja ultrapassado, e o raio ascendente seja iniciado.*

Essas duas hipóteses podem ser descritas matematicamente. A seguir são dadas as definições de alguns termos utilizados na descrição matemática.

E_0 . Campo elétrico ambiente inicial

Este termo representa o campo elétrico ambiente observado na extremidade superior da torre segundos antes da ocorrência da descarga matriz. Nesse termo já está inclusa a intensificação do campo resultante da concentração das linhas equipotenciais em função da deformação causada nas mesmas pela presença da montanha e da torre instalada no seu cume (Figura 8.1).

Figura 8.1 Perturbação das linhas equipotenciais



Fonte: Produção da autora

E_f – Campo elétrico final

Esse termo é obtido a partir de uma função do valor do campo elétrico inicial e variações na atmosfera.

ΔE_l é a variação de campo elétrico devido ao líder da descarga matriz.

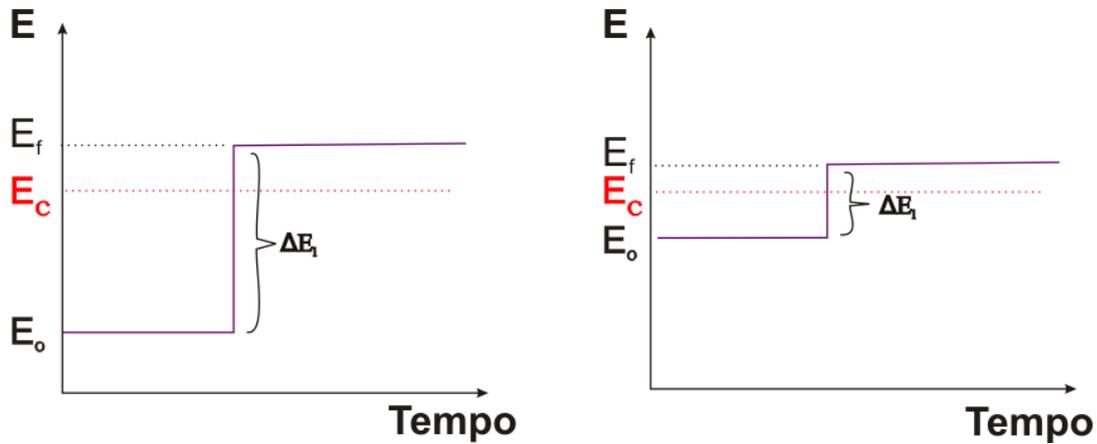
ΔE_l representa a variação causada no campo elétrico pelo rearranjo de carga na nuvem devido à propagação do líder da descarga matriz. Esse valor é função: da altura de propagação dos líderes dentro da nuvem e da distância dos líderes em relação à torre.

φ – Função das características locais (relevo e torre)

Essa função é determinada a partir das características das torres, relevo, atividade elétrica entre outras.

As hipóteses propostas para a iniciação dos raios ascendentes estão ilustradas na Figura 8.2. O valor de campo elétrico crítico é o mesmo em ambas as situações. A intensidade do campo elétrico inicial é que muda de um cenário para o outro.

Figura 8.2 Hipóteses para a iniciação dos raios ascendentes



Hipóteses para a iniciação dos raios ascendentes: Campo elétrico inicial baixo e variação do campo alta provocada pela passagem do líder da descarga matriz (esquerda), campo elétrico inicial alto e baixa variação do campo provocada pela passagem do líder da descarga matriz (direita).

Fonte: Imagem criada pela autora.

Baseado nas observações e resultados obtidos nos capítulos anteriores uma inequação é proposta:

$$E_c \leq E_f$$

$$E_c \leq E \cdot \varphi$$

onde,

E_c - Campo elétrico crítico necessário para iniciar o líder ascendente. É função da umidade, pressão, temperatura, condutividade, etc.

φ - Fator das características locais (relevo e torre)

E - Valor de campo elétrico registrado no momento

E_f – Campo elétrico final (resulta do campo elétrico em uma região devido às condições locais e à atividade elétrica).

Considerando que:

$$E = E_0 + \Delta E_l$$

Então

$$E_c \leq (E_0 + \Delta E_l) \cdot \varphi$$

Onde:

$$\Delta E_l = f(\Delta Q, h, d) \quad \text{e} \quad \varphi = f(\varphi_r, \varphi_t)$$

E_0 – Valor de campo elétrico inicial

ΔQ – Variação de carga devido ao líder da descarga matriz

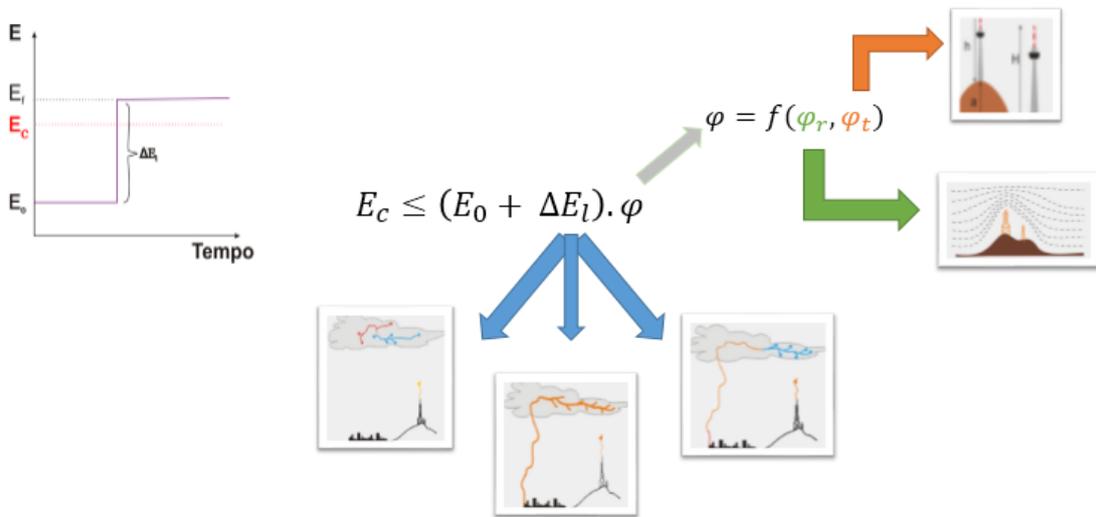
h – Altura em que o líder da descarga matriz se propaga

d - distância em que o líder da descarga matriz dentro da nuvem se aproxima da torre

φ_r - Fator que representa a intensificação do campo elétrico devido ao relevo

φ_t – Fator que representa a intensificação do campo elétrico devido às características da torre (altura, aterramento, material, etc).

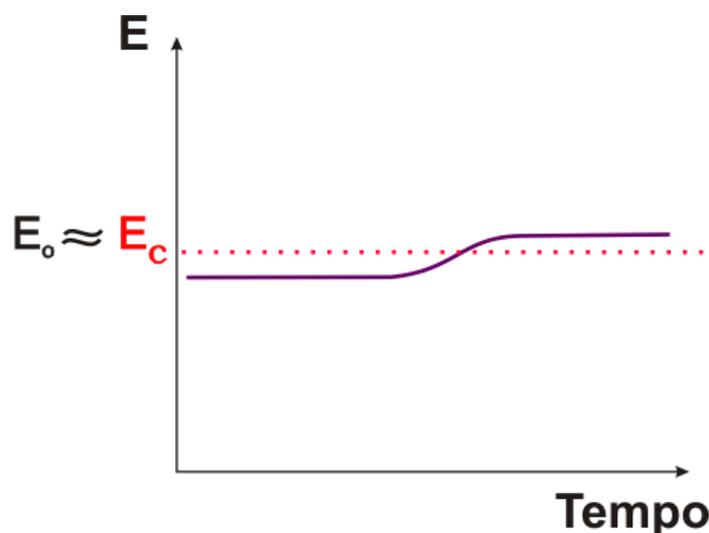
Figura 8.3 Contribuições da tese para o entendimento da iniciação dos raios ascendentes.



As componentes da descarga matriz que tem influência na iniciação do raio ascendente e os dois fatores que foram analisados nas próximas seções deste capítulo. Fonte: Imagem criada pela autora.

Como apresentado no capítulo 2, existem casos em que os líderes ascendentes são auto-iniciados. Nesses casos, o campo elétrico ambiente encontra-se tão próximo do valor de campo elétrico crítico que pequenas e lentas variações no campo ambiente podem ser suficientes para iniciar o líder ascendente sem a necessidade de uma descarga matriz (Figura 8.4).

Figura 8.4 Raios ascendentes auto-iniciados



Situação 3 – Raios ascendentes auto-iniciados. Nesses casos não há variação súbita no campo elétrico. Fonte: Produção da autora

Nos casos de iniciação espontânea do líder ascendente, quando não há uma descarga matriz envolvida na iniciação do líder ascendente, uma simples variação lenta do campo, como por exemplo a aproximação natural do centro de cargas por vento (segundo Rizk, 1994) seria suficiente.

Nas seções seguintes serão apresentadas as observações e mecanismos que sustentam as hipóteses apresentadas.

8.1 Variação do campo elétrico devido ao líder associado à descarga matriz (ΔE)

Nesse ponto é muito importante ressaltar a teoria bidirecional citada na revisão bibliográfica. O líder que dá origem a um raio nuvem-solo é um líder bipolar e bidirecional, ou seja, uma extremidade, de polaridade negativa, se propaga em direção a uma região onde as cargas positivas são abundantes, enquanto o inverso acontece com a extremidade positiva do líder.

A hipótese proposta se baseia no fato de que todos os líderes ascendentes foram acionados por um líder da descarga matriz que passa por sobre a torre, isto é, **a presença de um líder passando por sobre a torre é fundamental**. A variação súbita no campo provocada pela passagem desse líder pode ter origem em diferentes processos das descargas matrizes. Nos subitens seguintes são apresentados os processos das descargas matrizes que são responsáveis pela variação súbita no campo elétrico.

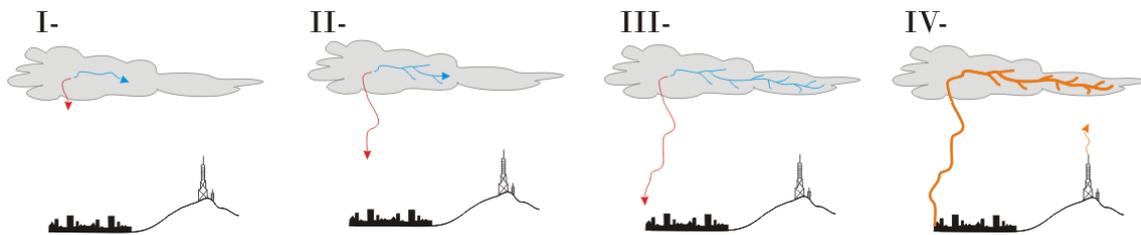
8.1.1 Componentes da descarga matriz

Foram identificados os processos de uma descarga matriz responsáveis por desencadear o líder ascendente. São eles: (i) a descarga de retorno; (ii) um líder associado a uma corrente contínua e; (iii) a propagação do líder dentro da nuvem.

As 3 situações observadas nas quais diferentes processos deram origem a raios ascendentes são representadas na Figura 8.5, Figura 8.6, Figura 8.7. Nessas figuras, a extremidade positiva do líder da descarga matriz está representada pela cor vermelha e a extremidade negativa pela cor azul.

A Figura 8.5 exemplifica a situação em que a descarga de retorno é o processo que dispara o líder ascendente. É mostrada a seguinte sequência: (I) a extremidade negativa do líder se propaga dentro na nuvem e, durante o seu trajeto passa sobre a torre; (II) e (III) a extremidade positiva do líder se propaga em direção ao solo; (IV) o líder descendente toca o solo e a rápida transferência de cargas provoca uma variação brusca no campo sobre a torre dando início ao líder ascendente.

Figura 8.5 Descarga de retorno dispara o líder ascendente

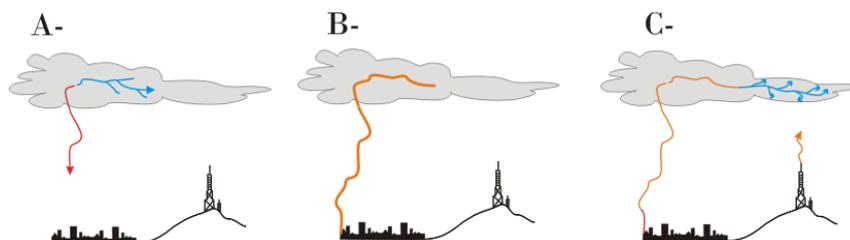


Fonte: Produção da autora

Dos 87 casos registrados 8 são associados a essa primeira situação.

A Figura 8.6 exemplifica a segunda situação na qual o processo que provoca a iniciação do líder ascendente é a propagação do líder da descarga matriz dentro da nuvem associada à corrente contínua da descarga matriz. É mostrada a seguinte sequência: (A) propagação do líder bidirecional, (B) A descarga de retorno acontece; (C) a extensão da extremidade negativa do líder dentro na nuvem passando por sobre a torre e alimentando a corrente contínua no canal da descarga matriz e fazendo com que o líder ascendente se inicie.

Figura 8.6 Líder ascendente disparado devido ao líder associado à corrente contínua da descarga matriz.



Fonte: Produção da autora

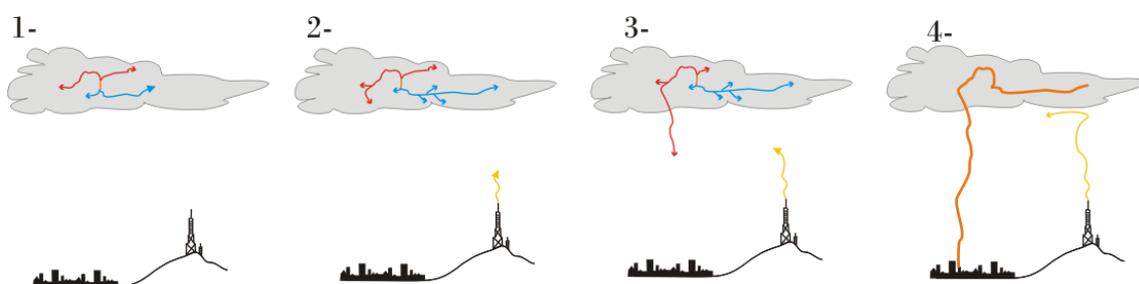
Essa segunda situação é a mais frequente entre os casos observados com 57 de 87 casos registrados nos dois países.

A Figura 8.7 exemplifica a terceira situação na qual o processo que provoca a iniciação do líder ascendente é a propagação da extremidade negativa do líder

bidirecional da descarga matriz por sobre a torre. Assim, o horário da descarga de retorno da descarga matriz é registrado após o início do líder ascendente.

É mostrada a seguinte sequência: (1) o líder bidirecional se inicia, (2 e 3) a extremidade negativa do líder bidirecional se propaga por sobre a torre provocando uma variação no campo elétrico com intensidade suficiente para o disparo do raio ascendente enquanto continua seu trajeto dentro da nuvem e (4) a descarga de retorno do raio descendente ocorre.

Figura 8.7 Descarga de retorno do raio descendente após o início do líder ascendente



Fonte: Produção da autora

Nesta terceira situação o líder bidirecional, altera o campo elétrico ambiente de tal forma que o líder ascendente da torre inicia antes da descarga matriz ter seu trajeto completo. A descarga matriz, nessa situação, pode ser intra-nuvem ou completar seu caminho e tocar o solo (nuvem-solo).

Nesta terceira situação foram observados 12 dos 87 casos registrados.

A Tabela 8.1 resume os casos de cada situação e a classificação dos casos dada **pelos sistemas de localização** (lembrando que nas análises de campo elétrico houve classificações errôneas por estes sistemas).

Tabela 8.1 Resumo dos casos e as situações

	<i>São Paulo</i>		<i>Rapid City</i>	
	<i>Nuvem Solo</i>	<i>Intra-nuvem</i>	<i>Nuvem Solo</i>	<i>Intra-nuvem</i>
<i>Situação 1</i>	6	3	2	0
<i>Situação 2</i>	46	0	11	8
<i>Situação 3</i>	10	1	2	0

8.1.2 Centro de cargas e regiões onde os líderes se propagam.

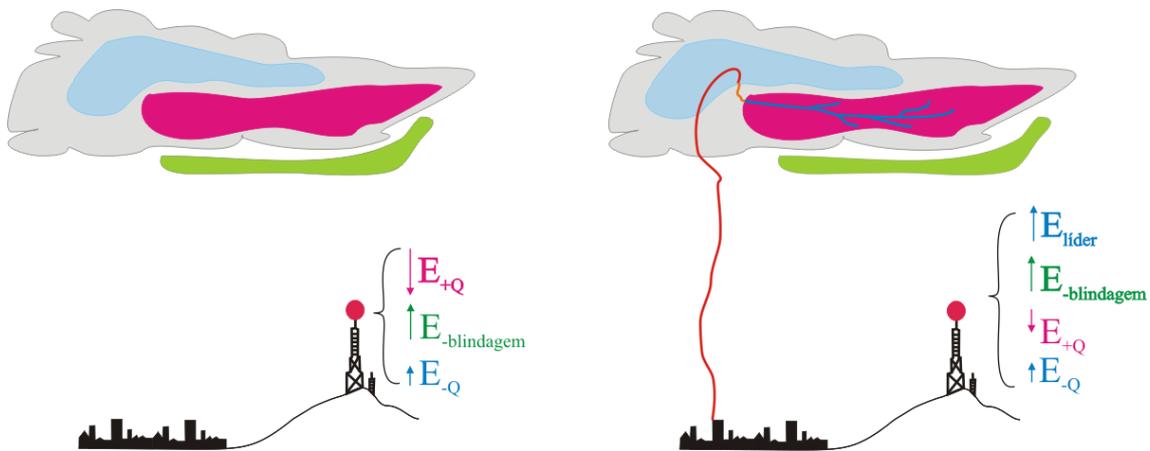
A partir das situações descritas anteriormente, será feita uma análise do campo elétrico resultante dos processos que têm mais influência.

O campo elétrico devido ao centro de carga positivo sobre as torres tem uma intensidade e polaridade. A camada de blindagem situada logo abaixo do centro de carga positivo tem menor intensidade e polaridade invertida, pois são cargas negativas que fazem a blindagem nessa região.

Em um primeiro momento, o campo elétrico resultante na extremidade da torre é afetado pelo centro de carga positivo, centro de cargas negativo, camada de blindagem (Figura 8.8a).

Num segundo momento, após a descarga de retorno ou os líderes negativos trazerem cargas negativas para dentro do centro de carga positivo, o campo elétrico sofre uma variação brusca na região (Figura 8.8b).

Figura 8.8 Campo elétrico resultante sobre a torre



Campo elétrico resultante sobre a torre – (a) antes da descarga matriz, o centro de cargas positivas tem maior influência sobre o campo elétrico resultante; (b) após a descarga matriz as cargas da camada de blindagem passam a ter maior influência sobre o campo elétrico resultante

Fonte: Produção da autora

Essa variação brusca do campo elétrico na região faz que um líder positivo ascendente se inicie em direção à região da camada de blindagem (cargas negativas).

A câmera rápida e o LMA foram utilizados para determinar a altura de propagação do líder ascendente.

A altura da propagação horizontal do líder ascendente pode ser determinada utilizando-se as imagens da câmera e tomando por base o tamanho da torre (130 metros) presente na mesma imagem (Figura 8.9).

A partir da análise dos registros em vídeo foi determinado que os líderes ascendentes se propagaram horizontalmente entre 1.232 m (altura mínima) e 3.380 m (altura máxima) com média de 1.920 metros.

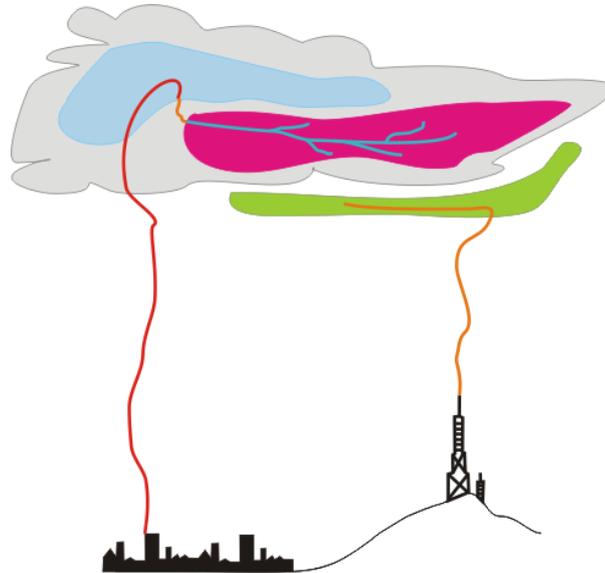
Figura 8.9 Estimativa da altura da propagação horizontal do líder ascendente



Fonte: SCHUMANN et al. (2012)

Conforme visto na seção 6.2, a análise do LMA mostra que as fontes de radiação associadas aos líderes da descarga matriz estão numa altura superior às fontes de radiação associadas ao líder ascendente, isto é, os líderes associados à descarga matriz se propagam na região do centro de carga positivo enquanto o líder ascendente se propaga na região da camada de blindagem, conforme mostra a Figura 8.10.

Figura 8.10 Centro de cargas e propagação dos líderes



Líder da descarga matriz se propaga no centro de carga positivo enquanto o líder ascendente se propaga horizontalmente na camada de blindagem.

Fonte: Produção da autora

Essas características puderam ser observadas tanto em Rapid City como no Brasil.

8.2 Variação do campo elétrico em função do relevo (φ_r)

Durante o projeto também foi estudada a topografia de cada região e sua influência na quantidade de raios ascendentes.

Na literatura existem sugestões de fórmulas para análise da influência do terreno na probabilidade de ocorrência de raios ascendentes (ERIKSSON, 1978, 1984, RIZK, 1994, SHINDO, 2011).

Ocorre uma intensificação do campo elétrico quando as linhas equipotenciais são comprimidas devido à deformação causada pela presença de montanha.

Essa intensificação é ainda maior quando existe uma torre instalada no topo da montanha (ver Figura 8.1)

Nos dois próximos subitens serão apresentados os resultados da análise da influência do formato da montanha na intensificação do campo elétrico ambiente e como isso afeta na ocorrência de raios ascendentes.

8.2.1 Medidas da influência da montanha na intensificação do campo elétrico

No período de preparação das campanhas de aquisição de dados foram selecionados dois locais, um no Brasil e outro nos EUA, que apresentavam boas probabilidades de ocorrência de raios ascendentes. No Brasil, as regiões do Pico do Jaraguá e da Avenida Paulista, ambas na cidade de São Paulo, a princípio, apresentam alta incidência de raio como mostrado no capítulo 3. Por outro lado, em Rapid City, nos EUA, o mapa de densidade de descargas não indicava alta atividade na região sobre as torres (WARNER et al., 2011).

No caso de São Paulo, cada uma das duas regiões apresenta características que poderiam estar influenciando a frequência de ocorrência de descargas: na Avenida Paulista existe uma grande quantidade de estruturas altas, por outro lado, no Pico do Jaraguá as torres encontram-se a cerca de 300 metros acima da região circunvizinha.

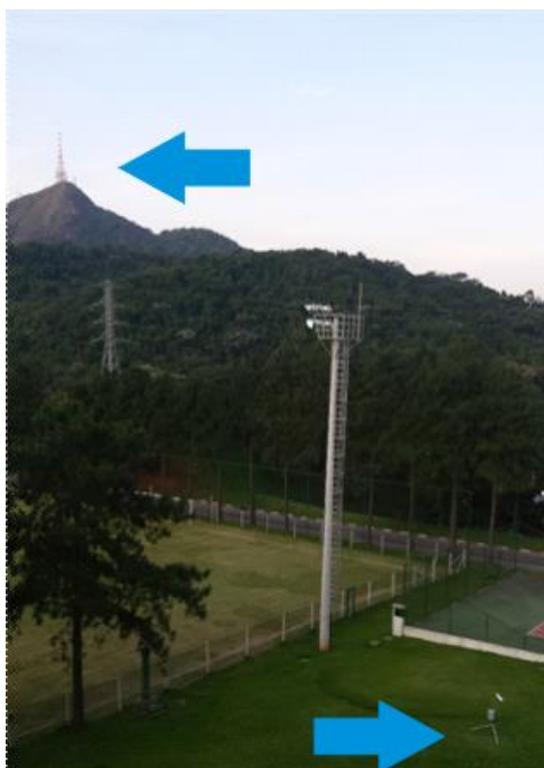
O resultado da primeira campanha de aquisição em ambas as regiões de São Paulo mostrou que houve mais casos de raios ascendentes no Pico do Jaraguá do que na Av. Paulista.

Em Rapid City, uma das torres (denominada Torre 1), como mostrado na Figura 3.7, é a única estrutura instalada no topo de uma das montanhas. Esta torre, mesmo sendo menor do que outras do conjunto de torres na região, apresenta uma alta incidência, comparável à de outras torres mais altas que dividem o cume de outras montanhas (WARNER et al., 2012).

A influência do relevo foi analisada a partir dos dados fornecidos pelos sensores de campo elétrico ambiente. Como descrito no capítulo 3 sobre os locais de observação e equipamentos utilizados, um sensor de campo elétrico ambiente foi instalado no topo da montanha e, com auxílio de uma segunda unidade calibrada (mais informações sobre a calibração no Anexo 2), foi verificado o fator de amplificação do campo devido à presença da montanha (Figura 8.11).

O segundo sensor foi instalado a 1 quilometro da base da montanha, ao nível da cidade (base de observação SBT), durante um período de 4 dias. Duas situações foram testadas durante esse período: uma situação de “tempo bom”, isto é, sem a ocorrência de tempestade, e uma situação de tempestade na região.

Figura 8.11 Locais de instalação dos sensores para verificação do fator de intensificação do campo devido à presença da montanha

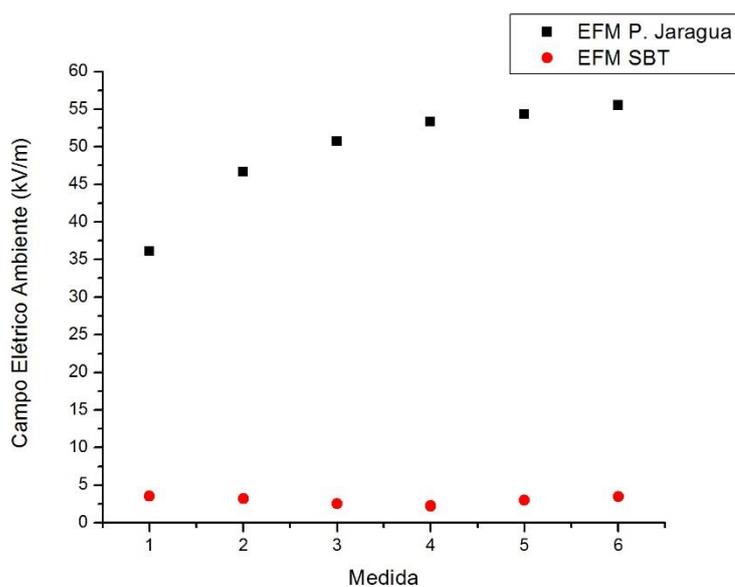


Fonte: Foto tirada pela autora

Os sensores fornecem, a cada minuto, a média das últimas 60 medidas do campo elétrico ambiente. A Figura 8.12 e a Figura 8.13 mostram gráficos obtidos

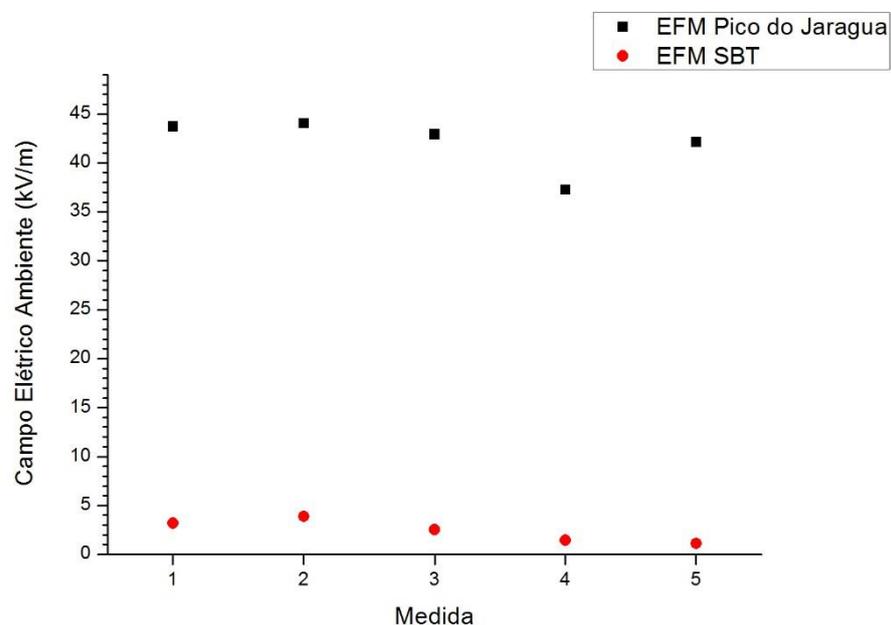
para períodos de tempestade com menor atividade impulsiva, com o objetivo de evitar uma possível média de minuto perturbada por descargas atmosféricas. Os fatores de amplificação encontrados, durante a ocorrência de tempestade, obtidos em dois períodos distintos, foram 11 e 17 vezes.

Figura 8.12 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a tempestade período 1 – dados de média de minuto



Fonte: Produção da autora

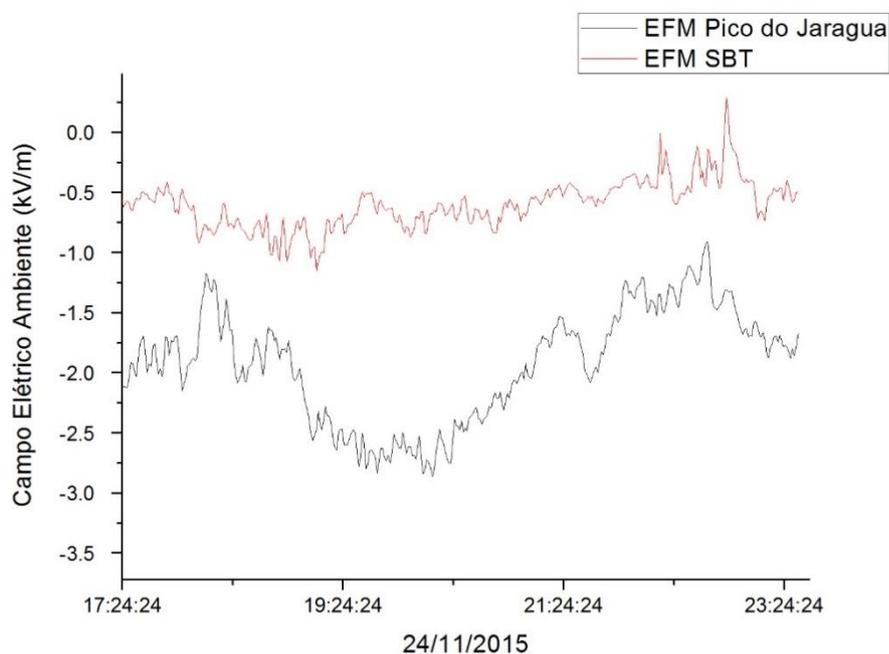
Figura 8.13 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a tempestade período 2



Fonte: Produção da autora

A Figura 8.14 mostra o gráfico obtido para os valores de campo registrados durante a condição de tempo bom, isto é, quando não há ocorrência de tempestade e sem variações impulsivas de campo elétrico. O fator de amplificação devido à presença da montanha para a situação de “tempo bom” variou até 7 vezes.

Figura 8.14 Fator de amplificação do campo elétrico devido à presença da montanha durante a condição de tempo bom



Fonte: Produção da autora

Quando não há presença de tempestade o fator de amplificação do campo está associado única e exclusivamente à presença da montanha. Durante a ocorrência de tempestade, além do efeito da montanha, a amplificação do campo pode sofrer influência de outros fatores, tal como a proximidade dos centros de carga, podendo, por exemplo, gerar efeito corona.

Essas observações sugerem que mesmo torres com menor altura, instaladas no cume de montanhas, podem ser tão propícias a iniciarem raios ascendentes quanto torres com altura maior instaladas em regiões planas, devido à distorção do campo elétrico causada pela presença da montanha.

Para comparar as torres que produzem raios ascendentes em outras regiões foi estudado um novo método para determinar a altura da montanha.

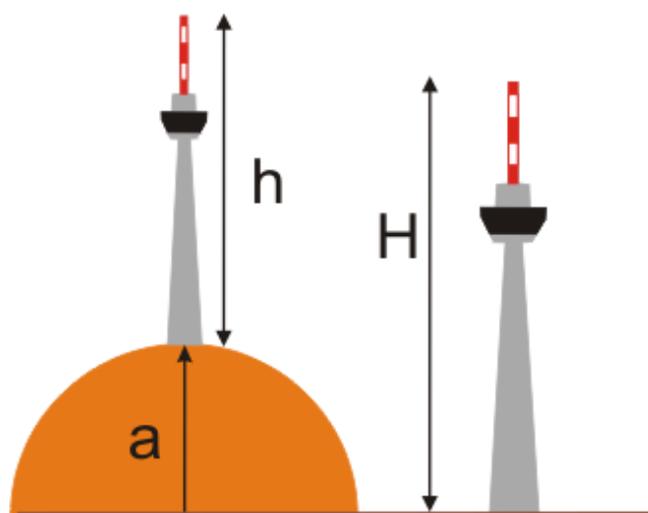
8.3 Determinação da altura da montanha (φ_t)

Durante as campanhas de aquisição de dados, a observação das tempestades em São Paulo revelou um fato intrigante: uma região como a avenida Paulista, com torres tão altas quanto as torres do Pico do Jaraguá, não produzia o mesmo número de raios ascendentes.

Buscando entender a importância relativa da topografia do terreno e da altura da torre na geração de raios ascendentes, foi feita uma análise da altura efetiva do conjunto torre/montanha (SCHUMANN et al 2015a).

RIZK (1994) se propôs a encontrar uma estrutura com uma altura tal que, mesmo instalada em uma região plana, produzisse o mesmo número de descargas ascendentes que uma torre com altura menor instalada no cume de uma montanha (Figura 8.15). Para tanto, equacionou a relação entre a altura da torre (h) e a altura da montanha (a). O resultado da equação fornece a altura da nova estrutura, denominada altura efetiva (H).

Figura 8.15 Altura efetiva da torre



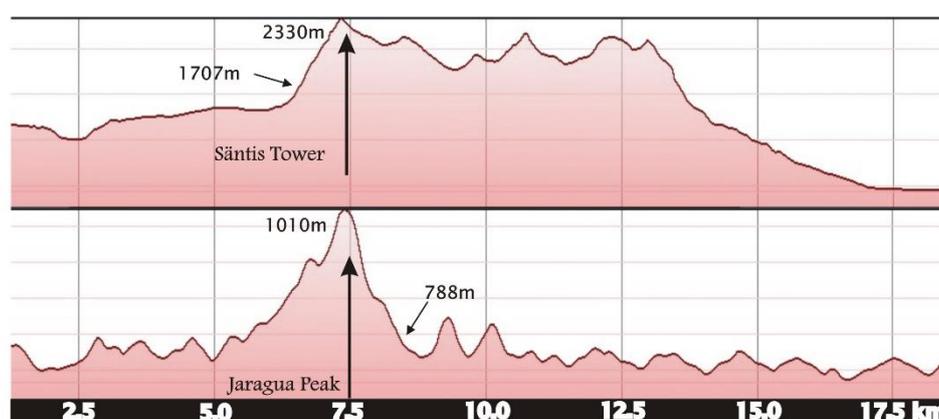
Fonte: Adaptada de Zhou et al. (2010).

Schumann et al. (2015a) realizou um estudo incluindo várias torres onde há registro de raios ascendentes no mundo. Foram comparados os resultados dos

diferentes métodos sugeridos na literatura para o cálculo da altura efetiva, porém, na literatura, o critério utilizado para determinar a altura da montanha era diferente de um método para outro.

Com o objetivo de padronizar o critério para determinar a altura das montanhas foi utilizado o perfil gerado pelo software Google Earth®. Analisando o perfil de cada montanha em todas as direções, foi escolhido a direção em que apresentava a variação de nível mais abrupta (Figura 8.16).

Figura 8.16 Exemplos do perfil utilizado para determinar a altura das montanhas (Google Earth®)



Fonte: Produção da autora

Uma vez determinada a direção do perfil da montanha a ser utilizado, a altura considerada foi a diferença entre altitudes de um ponto localizado a 1 quilômetro do local de instalação da torre e o local da torre.

Esse método foi aplicado a várias torres onde se observam raios ascendentes no mundo. Foram, então, determinadas as alturas efetivas utilizando as fórmulas propostas na literatura por Rizk (1994).

Rizk (1994), sugere que a altura efetiva pode ser calculada através da equação 1 abaixo, na qual o perfil da montanha é aproximado por um semicírculo de raio a e a altura da torre é indicada por h .

$$R = \frac{2(h + a)}{\left[1 + \frac{2a(h + a)}{(h + a)^2 - a^2} - \frac{2a(h + a)}{(h + a)^2 + a^2} \right]}$$

Eq.1

A Tabela 8.2 apresenta os valores da altura da torre, a altura da montanha segundo o método adotado neste trabalho e a utilizada no estudo anterior, o número de raios ascendentes em cada torre e a altura efetiva calculada. As informações contidas na Tabela 8.2 sobre total de raios na torre, porcentagem de raios ascendentes e altura da torre foram extraídas de Cigre, (2015), Uman (1969), Rakov e Uman (2003), CN Tower (2015), Hunt et al. (2014), Monochernia et al. (2001), Zhou et al. (2010), Visacro et al. (2004), Diendorfer et al. (2000, 2009) e Smorgonskyi et al. (2014).

A Figura 8.17 mostra, em escala, uma ilustração das torres e a respectiva altura da montanha determinada pelo critério adotado neste estudo. As alturas efetivas determinadas pelos diferentes métodos encontrados na literatura também estão representadas pelos traços de diferentes cores.

Na Figura 8.18 estão ilustradas as alturas efetivas calculadas pela fórmula de Rizk (1994) caso as torres estivessem instaladas em terreno plano.

No anexo 4 os estudos de altura efetiva feitos por diferentes métodos que levam em consideração a probabilidade de raios ascendentes e não o formato da montanha são apresentados para comparação.

Tabela 8.2 Altura efetiva de torres do mundo

Localização	h Torre	a = Montanha		Número de Raios por ano	Altura efetiva Risk (1994)	
		Método Análise de Perfil (1km)	Literatura		Altura Efetiva - Montanha pela Método Análise de Perfil (1km)	Altura Efetiva - Montanha pela Literatura
<i>Fukui Thermal Power Plant</i>	200	0	0	20		
<i>Empire States Building</i>	433	0	0	23		
<i>Ostankino Tower</i>	540	0	0	30		
<i>CN Tower</i>	553	0	0	75		
<i>Tokyo Skytree</i>	634	0	0	12		
<i>Brixton Tower</i>	250	50	60	15	296	304
<i>Peissenberg Tower</i>	160	64	288	19	221	346
<i>Chrischona Tower</i>	250	90	0	10	327	251
<i>CSIR Research mast</i>	60	107	80	44	134	118
<i>Morro do Cachimbo Station</i>	60	253	200	7	215	186
<i>Eagle Nest Tower</i>	22	300	N/A	11	205	***
Pico do Jaraguá	130	318	N/A	31	327	***
<i>Gaisberg Tower</i>	100	456	800	54	354	479
<i>TV Tower on Mount Orsa</i>	40	600**	600	***	364	364
<i>Sântis Tower</i>	124	623	900	120	439	526
<i>Tower on Mount San Salvatore</i>	70	640	640	21	400	400

- As torres que não estão sobre uma montanha não foram calculas as alturas efetivas, constando na tabela somente para comparação

Figura 8.17 Alturas efetivas por diferentes métodos

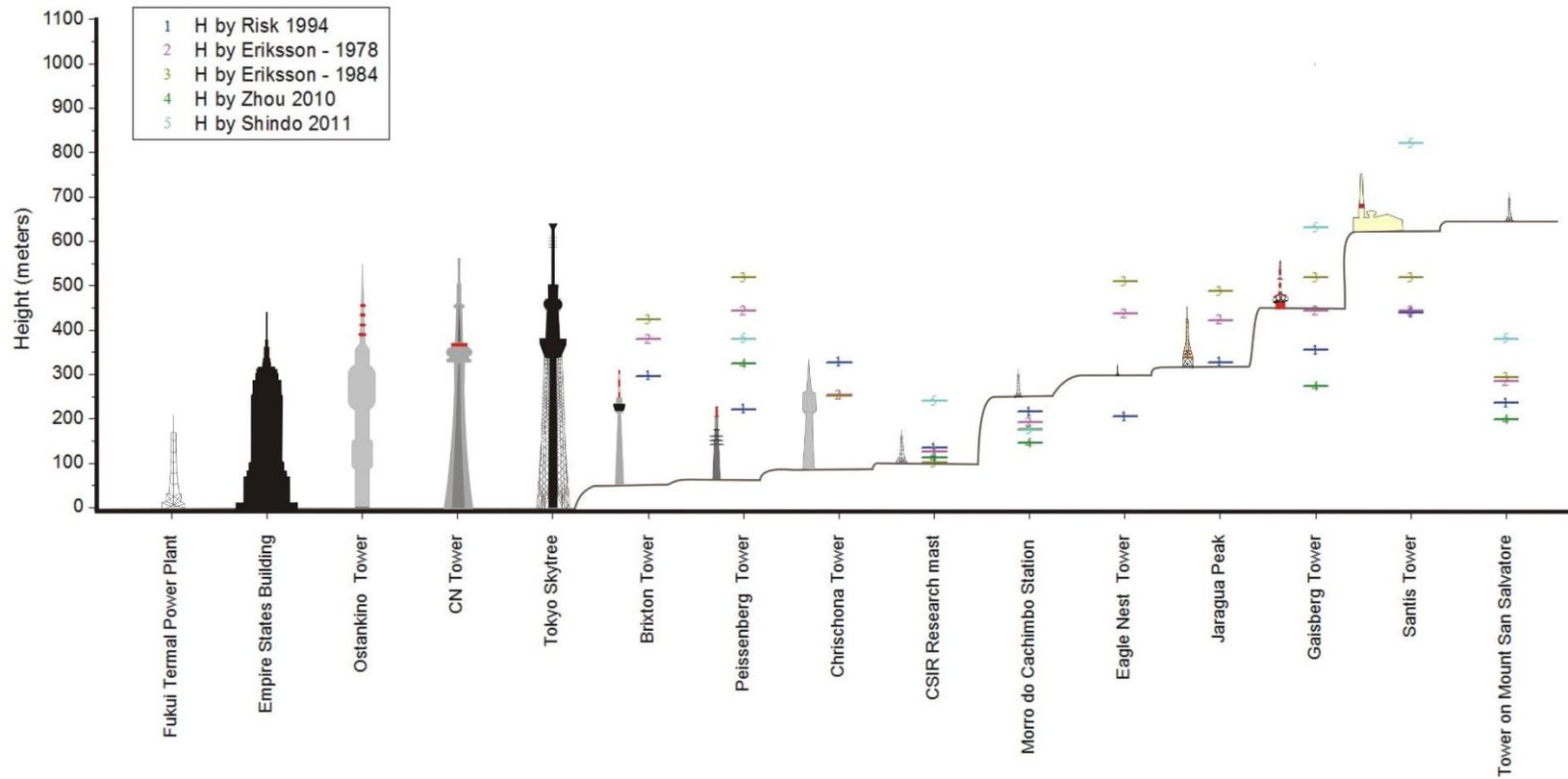


Ilustração em escala. Montanha determinada pelo método da análise de perfil em 1 km. Alturas efetivas por diferentes métodos

Fonte: SCHUMANN et al. (2015a)

Figura 8.18 As alturas que teriam as torres sobre um terreno plano

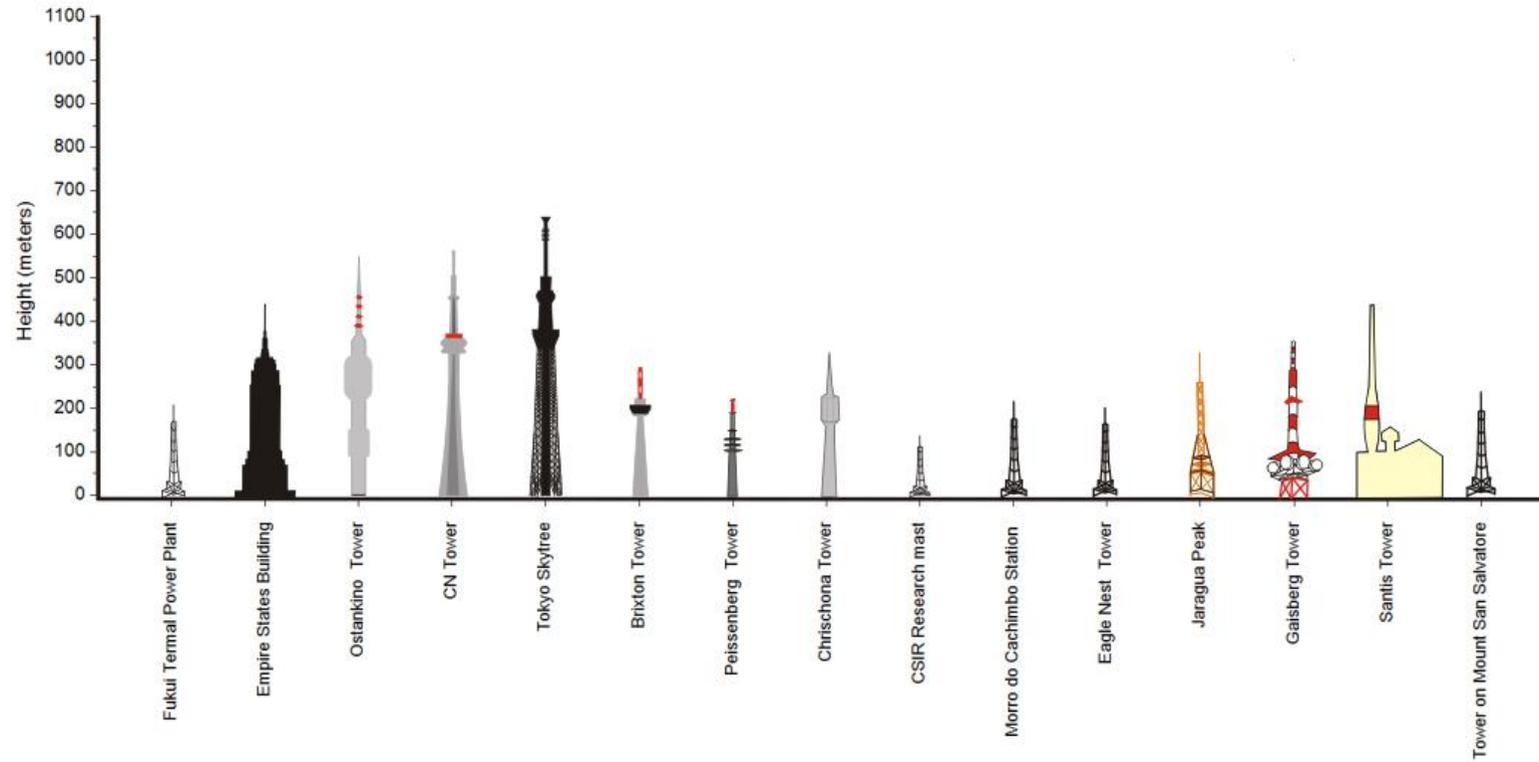
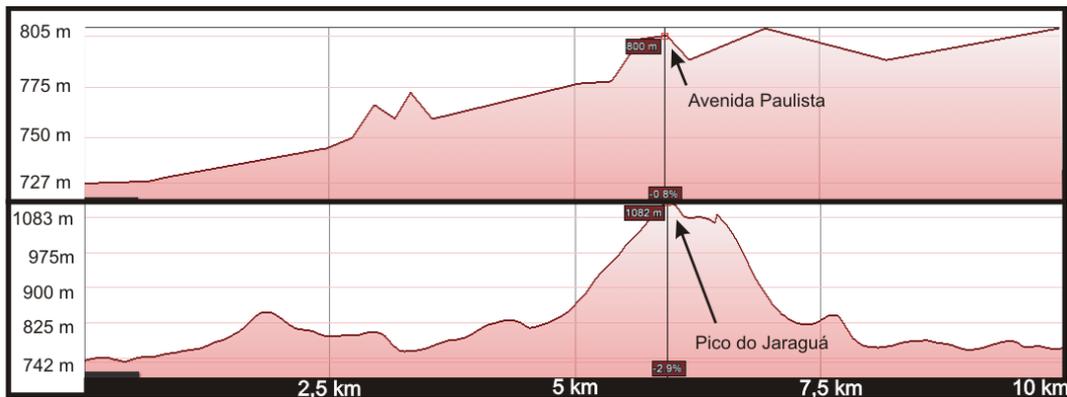


Ilustração em escala da altura das torres pelo método de Rizk (1994).

Fonte: SCHUMANN et al. (2015)

A análise realizada para a Avenida Paulista utilizando o critério para determinação do perfil da montanha adotado neste estudo (Google Earth®), mostrou que, mesmo estando localizada em uma região alta da cidade, a Av. Paulista não apresenta um desnível acentuado no perfil do terreno. Em consequência, as linhas equipotenciais são deformadas, mas não de forma a intensificar tanto quanto em uma montanha pontiaguda. A Figura 8.19 apresenta o perfil de cada região em São Paulo.

Figura 8.19 Perfil de relevo das regiões em São Paulo



Fonte: Produção da autora (na ferramenta Google Earth®)

O método de determinar a altura da montanha pela análise do perfil de elevação da região permite a padronização da estimativa da altura da montanha. Essa padronização permitirá a análise da influência do terreno e sua influência no número de casos de registrados e esperados de raios ascendentes.

9. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados durante o estudo de raios ascendentes no Brasil e nos Estados Unidos possibilitaram a caracterização dos raios ascendentes e o entendimento de como se iniciam. Foram propostas hipóteses para explicar a iniciação do raio ascendente e obtiveram-se confirmações parciais das mesmas.

Neste estudo para a caracterização dos raios ascendentes foram utilizados 100 registros em vídeo efetuados por câmeras rápidas. Pela primeira vez no mundo, registros em vídeo foram analisados para determinar características de raios ascendentes tais como: duração, presença de *líderes de recuo*, intervalo entre descargas, ramificações, pulsos de CCI, entre outras.

Dos 100 casos de raios ascendentes registrados, todos tiveram confirmação visual ou através de sistema de detecção e localização de descargas de que foram desencadeados por uma descarga matriz. 95% das descargas matrizes foram do tipo nuvem-solo positivas e 5% descargas intra-nuvem. As descargas matrizes foram registradas a distâncias de até 65 quilômetros das torres.

As descargas matrizes desencadearam líderes ascendentes a partir de uma ou mais torres. No Brasil, 11% dos raios ascendentes iniciaram simultaneamente em duas ou mais torres. Em Rapid City o envolvimento de 2 ou mais torres ocorreu em 57% dos casos.

Os líderes ascendentes podem se ramificar em seu trajeto até a base da nuvem. No Brasil, 60% dos casos apresentaram ramificações e 63% em Rapid City. Entre os casos que ramificaram, somente 8% no Brasil e 18% em Rapid City começaram ramificados desde a extremidade da torre.

Em média 50% dos casos de raios ascendentes possuem pulsos sobrepostos à corrente contínua inicial.

A duração da corrente contínua inicial de um líder ascendente foi, em média, de 370ms no Brasil e de 233ms em Rapid City. O baixo valor da duração da corrente contínua inicial nos casos de Rapid City pode ter relação com a grande porcentagem de líderes simultâneos partindo de duas ou mais torres.

Além da corrente contínua inicial, um quarto dos casos apresentaram descargas de retorno que utilizaram o mesmo canal criado pelo líder ascendente. Para os casos em que ocorreram descargas de retorno, a multiplicidade foi de 2,0 no Brasil e 3,4 em Rapid City. Se considerarmos todos os casos temos que 1 em cada 2 raios ascendentes no Brasil tem descarga de retorno, isto é, a multiplicidade é de 0,5. Em Rapid City a multiplicidade encontrada foi de 0,9.

As descargas de retorno no Brasil foram seguidas, em 90% dos casos, por corrente contínua, sendo 26% dos casos por corrente contínua longa. Em Rapid City somente 40% das descargas de retorno apresentaram alguma corrente contínua sendo que 5% apresentaram corrente contínua longa.

A duração total de um raio ascendente, isto é, considerada desde o início da corrente contínua inicial até o final da última corrente contínua de uma descarga de retorno, encontrada no Brasil foi de 427 ms e em Rapid City 365ms.

As iniciações dos raios ascendentes ocorreram durante uma “janela de tempo” das tempestades. Os raios ascendentes acontecem com espaçamento de poucos minutos entre si. As janelas de tempo das tempestades observadas foram de, no máximo, 1 hora de duração.

Informações sobre as descargas matrizes puderam ser obtidas a partir das medidas da posição de líderes dentro da nuvem, altitude, campo elétrico ambiente e variação no campo elétrico rápido. As observações feitas pelas câmeras rápidas permitiram determinar a altitude de propagação do líder. Os registros de LMA mostraram que o líder ascendente se propaga em uma região na nuvem abaixo da região onde a descarga matriz se desenvolve,

além de confirmar o que era observado nos registros em vídeo, de que há uma aproximação do líder da descarga matriz dentro da nuvem, em relação à torre, antes do início do líder ascendente.

Durante a análise da influência da topografia, as medidas feitas no topo e na base da montanha confirmaram que as montanhas intensificam o campo elétrico, e que essa intensificação pode chegar a ser três vezes maior durante uma tempestade. Ainda nas análises da influência da topografia, um critério novo e único adotado neste estudo para a análise do perfil da montanha permitiu a determinação da altura efetiva da torre pela fórmula de Rizk (1994) para várias localidades. Foi utilizado o mesmo método para comparar as torres ao redor do mundo em que foram observados raios ascendentes.

O campo elétrico induzido pela nuvem de tempestade na extremidade de algumas torres pode se intensificar de tal maneira que ocorra a iniciação espontânea de um líder ascendente. Tal modo de iniciação não foi observado neste estudo. Os raios ascendentes observados, tanto em S. Paulo como em Rapid City, foram sempre iniciados por uma descarga matriz.

Foram propostas hipóteses que buscam explicar como uma descarga matriz pode causar a iniciação do raio ascendente. As hipóteses partem do pressuposto que um nível de campo elétrico crítico deve ser ultrapassado para que o líder ascendente se inicie. As hipóteses preveem que o campo elétrico crítico pode ser ultrapassado em duas situações: (1) ocorrendo uma pequena variação no campo elétrico ambiente quando ele já está alto, ou (2) ocorrendo uma grande variação quando o campo elétrico ambiente está baixo. Estas variações são bruscas e requerem sempre a existência de um líder da descarga matriz passando próximo à torre. O momento da iniciação do líder ascendente pode estar associado a uma descarga de retorno, ao líder associado à corrente contínua da descarga matriz ou ao líder que forma a descarga matriz (que pode ou não tocar o solo). Nos casos de iniciação espontânea do líder ascendente, quando não há uma descarga

matriz envolvida na iniciação do líder ascendente, uma simples variação lenta do campo, como por exemplo a aproximação natural do centro de cargas por vento (segundo Rizk, 1994) seria suficiente.

Para trabalhos futuros sugere-se utilizar a informação de um sensor de campo elétrico ambiente próximo à torre, combinada com informações de radar sobre a região da torre, para estimar a janela de tempo em que os raios ascendentes podem ocorrer. Ainda poderá ser estudado o material de que são feitas, o aterramento dessas estruturas e o tipo de terreno em que estão instaladas as estruturas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALLAROTTI, M. G., C. MEDEIROS, M. M. F. SABA, W. SCHULZ ; O. PINTO JR. Frequency distribution of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **J. of Geophys. Res.**, v.117, n. D06112, 2012. doi:10.1029/2011JD0171135.

BERGER, K. **Novel observations on lightning discharges:** results of research on Mount San Salvatore. **J. Franklin Inst.**, v. 283, n. 6, p. 478– 525, 1967.

BOARO J. São Paulo: <<https://www.flickr.com/photos/julioboaro/8264606991/>> .Acesso em: 04/03/2016 12:40

CAMPBELL – Informações sobre Field Mill Campbell, 2015, disponível em: <<http://s.campbellsci.com/images/14-221.png>> Acesso em: 20 de novembro de 2015

CAMPOS L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations **Atmospheric Research**, v. 84, p. 302–310, 2007. doi:10.1016/j.atmosres.2006.09.002.

CAMPOS L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2–4, p. 416-424, Febr. 2009.

CHUVA Project Imagens dos equipamentos: <<http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/pdf/estrategias.pdf>> Acesso em 01 de maio 2016.

CIGRE – **Lightning Striking Characteristics to very high structures** CIGRE Technical Brochure - EPFL-ARTICLE-215010, num. 633, 2015.

CN TOWER Informação da torre: disponível em: http://www.cntower.ca/site_Files/Content/PDF/Press_Kit/CN_Tower_General_Information_2013_Revised.pdf, Acessado em 20 de Maio de 2015.

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 power utilities. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* , v. 40, n. 4, P. 465-480,Nov. 1998.

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. **Journal of Geophysical Research**, v.103, N. D8, p.9035-9044, 1998.

DIENDORFER, G.; PICHLER, H.; MAIR, M. Characteristics of positive upward lightning measured on an instrumented tower, **Geophysical Research Abstracts**, v. 7,10175, 2005.

- DIENDORFER, G.; MAIR, M.; SCHULZ W.; HADRIAN, W. Lightning current measurements in Austria – experimental setup and first results. In INT.CONF.ON LIGHTNING PROTECTION, 25., 2000, Rhodes Greece. **Proceedings...** Rhodes, 2000. p 44-7.
- DIENDORFER, G.; PICHLER, H.; MAIR, M. Characteristics of positive upward lightning measured on an instrumented tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 28., 2006, Kanazawa, Japan. **Proceedings...** Kanazawa, 2006.
- DIENDORFER, G.; PICHLER, H.; MAIR, M. Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg tower (2000-2007). **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.51, n.3, p.443-452, 2009. doi:10.1109/TEMC.2009.2021616.
- ERIKSSON A.J.; Meal, D. V. The incidence of direct lightning strikes to structures and overhead lines. in: **Lightning and power systems**. London: IEE Conf. Publication 236, 1984. p. 67e71.
- ERIKSSON, A. J. Lightning and tall structures. **Trans. South African IEE**, v. 69, p. 2-16, 1978.
- FLACHE, D.; RAKOV, A. A.; HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; THOTTAPPILLI, R. Initial-stage pulses in upward lightning: Leader/return stroke versus M-component mode of charge transfer to ground. **Geophysical Research Letters**, v.35, L13812, 2008. doi:10.1029/2008GL034148.
- GOOGLE EARTH, programa utilizado. Disponível em: <https://earth.google.com/> Acesso em 01 de maio de 2016.
- GOOGLE MAPS, programa utilizado. Disponível em: <https://maps.google.com.br/> Acesso em 01 de maio de 2016.
- GOOGLE MY MAPS, programa utilizado. Disponível em: https://www.google.com/maps/d/?hl=en_US&app=mp Acesso em: 01 de maio de 2016.
- HEIDLER, F. Lightning current measurements at the Peissenberg telecommunication tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, GROUND'2002, 2002, Nov. 4-7, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IEE, 2002.
- HUNT H. G. P.; LIU, Y. C.; NIXON, K. J. Evaluation of the South African lightning detection network using photographed tall tower lightning events from 2009 – 2013. In: INTERNATIONAL LIGHTNING PROTECTION CONFERENCE, 2014, Shanghai. **Proceedings...** Shanghai: IEEE, 2014.
- HUSSEIN A. M.; JANISCHEWSKYJ, W.; MILEWSKI, M.; SHOSTAK, V.; CHAN, J. S.; CHISHOLM, W. Current waveform parameters of CN tower lightning return strokes. **Journal of Electrostatics**, v.60, n. 2-4, p.149-162, 2004.
- JIANG R.; QIE, X.; WUA, Z.; WANG, D.; LIU, M.; LU, G.; LIU, D. Characteristics of upward lightning from a 325-m-tall meteorology tower. **Atmospheric**

Research, v. 149, p. 111–119, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.007>.

LU, W.; WANG, D.; ZHANG, Y.; TAKAGI, N. Two associated upward lightning flashes that produced opposite polarity electric field changes. *Geophysical Research Letters*, 36, L05801, doi:10.1029/2008GL036598.

MANOOCHEHRNIA P.; SCHULZ, W.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M. Lightning Statistics in the Regions of Saentis and St.Chrischona Towers in Switzerland . In: INT.CONF.ON LIGHTNING PROTECTION, 29., 2001,Uppsala Sweeden. Proceedings... Uppsala Sweeden, 2001.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **C.R. Physique**, v. 3, p. 1393-1409, 2002.

MAZUR, V.; L. H. RUHNKE, 2011, **Physical processes during development of upward leaders from tall structures**, *Journal of Electrostatics*, 69, 97-110.

MCEACHRON K. B. **Lightning to the Empire State Building**. *J. Franklin Inst.*, v. 227, p.149-217, 1939.

MIKI, M.; RAKOV, V. A.; SHINDO, T.; DIENDORFER, G.; MAIR, M.; F. HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R.; WANG, D. Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket triggered lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, N. D02109, 2005. doi:10.1029/2003JD004474.

NACCARATO, K. P.; PINTO JR., O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT), **Atmospheric Research**, v.91, p. 546-563, 2009. doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.019.

NEW MEXICO TECH 2016, Description of the New Mexico Tech Lightning Mapping Array (LMA), Disponível em:
<http://www.lightning.nmt.edu/nmt_lms/descrip.html> Acesso em: 01 de maio de 2016.

ORVILLE, R. E.; BERGER, e. k. An unusual lightning flash initiated by an upward-propagating leader. **J. Geophys. Res.**, v. 78, n. 21, p. 4520–4525, 1973. doi:10.1029/JC078i021p04520.

PAIVA, A. R. **Estudo das descargas de retorno e componentes M e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos**. 2015. 103 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HSSTRS>>. Acesso em: 01 maio 2016.

PHANTOM 2016 v310 Imagem, Service & Support :
<https://www.phantomhighspeed.com/Service-Support/Products/id/27> Acesso em: 15 fev. 2016

PHOTRON. **FASTCAM-512 PCI hardware manual**. Rev. 1.03. Tokyo: Photron Limited, 2003. 55 p.

- RAKOV V.A.; UMAN, M. A. **Lightning**: physics and effects. Cambridge: University Press, 2003, 687 p. ISBN 0521583276, PB ISBN 0521035414.
- RIZK, F. Modelling of lightning incidence to tall structures, part I & II. **IEEE Trans. Power Del.** V. 9, n. 1, p. 162-193, 1994.
- ROMERO C.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M.; PAOLONE, M.; RAKOV, V. A.; PAVANELLO, D. Positive lightning flashes recorded on the Sântis tower from May 2010 to January 2012. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, n. 23, p. 12'879-12'892, 2013.
- SABA, M. M. F.; ALVES, J.; SCHUMANN, C.; CAMPOS, D. R.; WARNER, T. A. Upward lightning in Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 22., 2012, Apr 2 – 5, Boulder, Colorado, USA. Proceedings... Bolder: AGU, 2012.
- SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JR., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v.111, n. D03101, 2006. doi:[10.1029/2005JD006415](https://doi.org/10.1029/2005JD006415).
- SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; SCHUMANN, C. Features of lightning flashes obtained from high-speed recordings. In: COORAY, V. (ed.). **The Lightning Flash**. 2. ed. London: Institute of Engineering and Technology, 2014.
- SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; K. L. CUMMINS, K.L.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v.115, n. D24201, 2010. doi:10.1029/2010JD014330.
- SABA, M. M. F.; PINTO JÚNIOR, O.; BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 23, p. L23807 (4pp), Dec. 2006. doi: <10.1029/2006GL027455>.
- SABA, M.M.F.; SCHUMANN C.; WARNER T.A.; FERRO M.A.S.; PAIVA, A.R.; HELSDON JR. J.; ORVILLE,R.C. Upward flashes characteristics from high-speed cameras. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres** (in print), 2016.
- SCHUMANN C.; SABA M.M.F.; FERRO M.A.S.; WARNER T.A.; ALBRECHT R.I.; PAIVA A.R.; HELSDON JR. J.; TILLES J.; THOMAS, R. Characteristics of Positive Cloud-to-ground Flashes Triggering Upward Flashes in Rapid City-SD. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 24., 2016, San Diego, 2016. **Proceedings...** San Diego, 2016.
- SCHUMANN, C. ; SABA, M. M. F. ; WARNER, T. A. ; ALVES, J. ; ALBRECHT, R. I. ; HELSDON JR, J. Why some positive cloud-to-ground flashes trigger upward lightning and why some do not?. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY ANNUAL MEETING, 93., 2013, Austin. CONFERENCE ON THE METEOROLOGICAL APPLICATIONS OF LIGHTNING DATA, 6., 2013, Austin. **Proceedings...** Austin: AMS, 2013.
- SCHUMANN, C. **Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico**. 2012. 125 p. Errata publicada em 14 de agosto de 2013. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.23.13.25-TDI).

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BPDNCS>>. Acesso em: 01 maio 2016.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R.; SILVA FERRO, M. A.; WARNER, T. A. High-speed observation of upward lightning flashes in Brazil. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 23., 2014, Mar 18 - 19, Tucson, Arizona. **Proceedings...** Tucson: AMS, 2014a.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R.; SILVA FERRO, M. A.; WARNER, T. A.; HELSDON JR, J. H.; Triggered Upward Flashes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2014, Oct 13 - 17, Shanghai, China. **Proceedings...** Shanghai, 2014.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; SILVA FERRO, S. F.; WARNER, T. A.; PAIVA, A. R.; JAQUES, R. Mechanism of Triggering Upward Lightning from Towers in São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING /INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 6., 2014, Manaus, Brazil, May 2014. **Proceedings...** SBRAI/CCST/INPE, 2014b.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; FERRO, M. A. S.; SCHULZ, W.; DIENDORFER, G.; WARNER, T. A.; PAIVA, A. R. Analysis of terrain and atmospheric conditions for upward flashes in Sao Paulo-Brazil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SIPDA), Balneário Camburiu, SC. **Proceedings...** 2015. DVD.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; FERRO, M. A. S.; WARNER, T. A.; PAIVA, A. R.; RODRIGUEZ, C. A. M.; JAQUES, R.; HELSDON, J. H. Upward lightning flashes in Brazil and USA. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING, Nagoya, Japan. **Anais...** 2015. DVD.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; SILVA, R. B. G.; SCHULZ, W. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 92, n. 6, p. 37-42, Jan. 2013. doi: <[10.1016/j.jastp.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.008)>.

SHINDO, T. A calculation method of effective height of structures in lightning studies. **IEEJ Trans. on Power & Energy**, v.132-B, n.3, p. 292-293, 2011.

SMORGONSKIY, A.; TAJALLI, A.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M.; DIENDORFER, G.; PICHLER, H. Analysis of lightning events preceding upward flashes from Gaisberg and Säntis Towers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2014, Shanghai, China. **Proceedings...** Shanghai, 2014. p. 1382–1385.

SOUZA, J. C. S.; SABA, M. M. F.; ALBRECHT, R. I. Estudo das tempestades que geram raios ascendentes. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, São José dos Campos, SP. 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3K27NKL>>. Acesso em: 01 maio 2016.

- TAKAGI, N.; WANG, D.; WATANABE, T. A study of upward positive leaders based on simultaneous observation of E-fields and high-speed images. **Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn.**, v.126, p. 256– 259, 2006.
- UMAN, M.A. **Lightning** New York: McGraw-Hill, 1969. 264p.
- VISACRO, S.; SOARES JR., A.; SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; SOUSA, V. J. Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo Station. **J. Geophys. Res.**, v.109, n. D01105, 2004. doi:10.1029/2003JD003662.
- VOLLAND, H. **Atmospheric electrodynamics**. New York, N.Y.: Springer Verlag, 1984.
- WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; SAKURANO, H.; HASHIMOTO, M. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. **Geophys. Res. Lett.**, v.35, n. L02803, 2008. doi:10.1029/2007GL032136.
- WARNER T. A, “**Upward leader development from tall towers in response to downward stepped leaders**”, 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, Italy, 2010.
- WARNER, T. A. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures. **Atmospheric Research**, v.117, p. 45–54, 2012. doi:10.1016/j.atmosres.2011.07.004.
- WARNER, T. A.; CUMMINS, K.L.; ORVILLE, R. E. Comparison of upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota with National Lightning Detection Network data - preliminary findings. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WINTER LIGHTNING, 3., 2011, June 13-15, Tokyo, Japan. Proceedings... Tokyo, 2011.
- WARNER, T. A.; CUMMINS, K. L; ORVILLE, R. E. Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with National Lightning Detection Network data, 2004–2010. **J. Geophys. Res.**, v. 117, n. D19109, 2012. doi:10.1029/2012JD018346.
- ZHOU, H.; THEETHAYI, N.; DIENDORFER, G.; THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A. On estimation of the effective height of towers on mountaintops in lightning incidence studies. **Journal of Electrostatics**, v. 68, n. 5, p. 415-418, 2010. doi:10.1016/j.elstat.2010.05.014.

10. Anexo 1 - Calibração campo elétrico rápido

O valor de campo elétrico registrado no topo de um prédio sofre uma amplificação. Para obtermos o valor real da medida uma calibração foi necessária.

Para a calibração do campo elétrico rápido registrado no topo do prédio do Instituto de Geofísica e Astrofísica foi instalado outra unidade no solo e registrado simultaneamente.

A Figura A1 mostra a disposição dos sensores.

Figura A1 : Calibração USP – Sensores no topo do Prédio de 2 andares e para calibração sensor instalado no jardim.

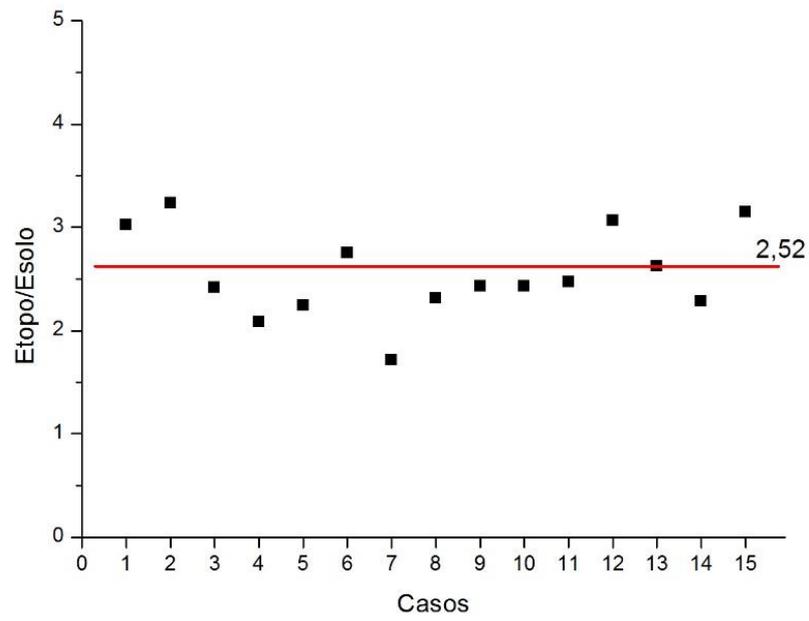


Fonte: Foto tirada pela autora

A partir das formas de ondas registradas durante uma tempestade foram obtidos o valor de pico de 15 raios que ocorreram na região.

Os valores encontrados para 15 medidas foram que o coeficiente de amplificação devido ao prédio é de 2,52. A Figura A2 mostra a distribuição dos valores encontrados para as 15 medidas.

Figura A2: Fator correção do campo elétrico devido ao prédio



Fonte: Produção da autora

11. Anexo 2 - Calibração campo elétrico ambiente

Durante a aquisição de dados dois sensores de campo elétrico ambiente foram instalados: um próximo à torre do Pico do Jaraguá e outro no SBT. Para uma comparação dos dados, a calibração entre os sensores foi necessária para corrigir eventuais diferenças nas medidas.

Para essa calibração entre as duas unidades, os dois sensores de EFM foram instaladas a uma distância de 27 metros da torre. Essa disposição dos sensores para a calibração é mostrada na figura A3.

Figura A3: Instalação lado a lado de duas unidades de EFM.



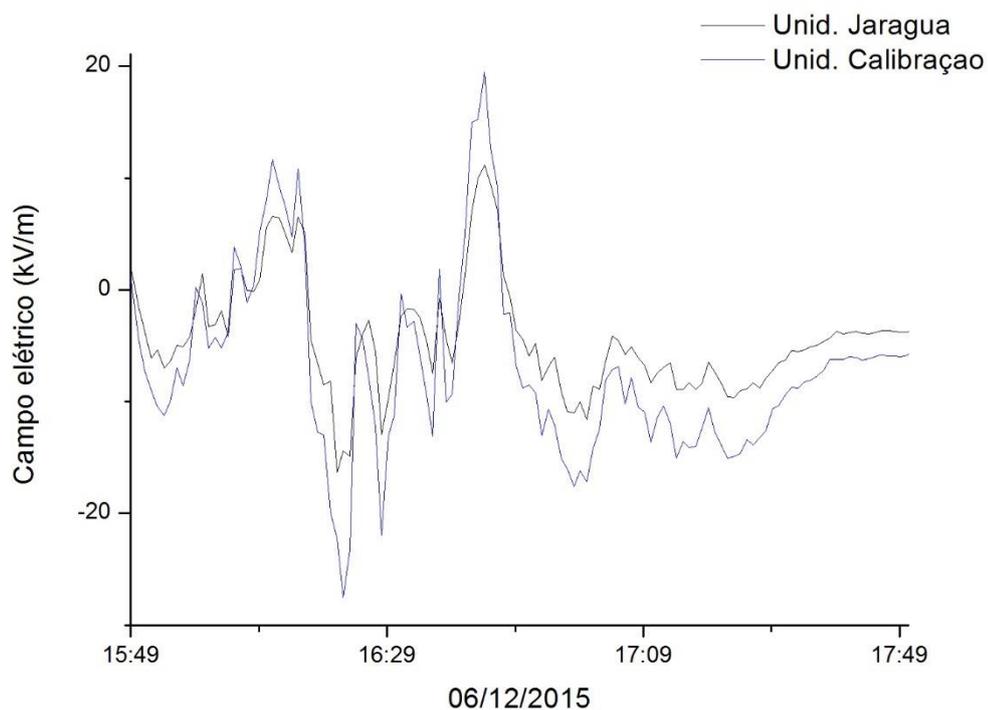
Fonte: Campanha de 2015; Foto tirada e cedida por Diogo Custódio

Os registros em ambas as unidades foram realizados de maneira obter o valor da média de minuto de registro.

Os dois sensores lado a lado tiveram comportamento semelhante (Figura A4). As unidades registraram valores 1,5 vezes menores na unidade do Jaraguá do que os da unidade que foi instalada na base da montanha.

Na análise da influência da montanha apresentada no Capítulo 8 os valores de campo elétrico utilizados para comparação entre sensores foram corrigidos.

Figura A4: Calibração unidades lado a lado no Pico do Jaraguá.



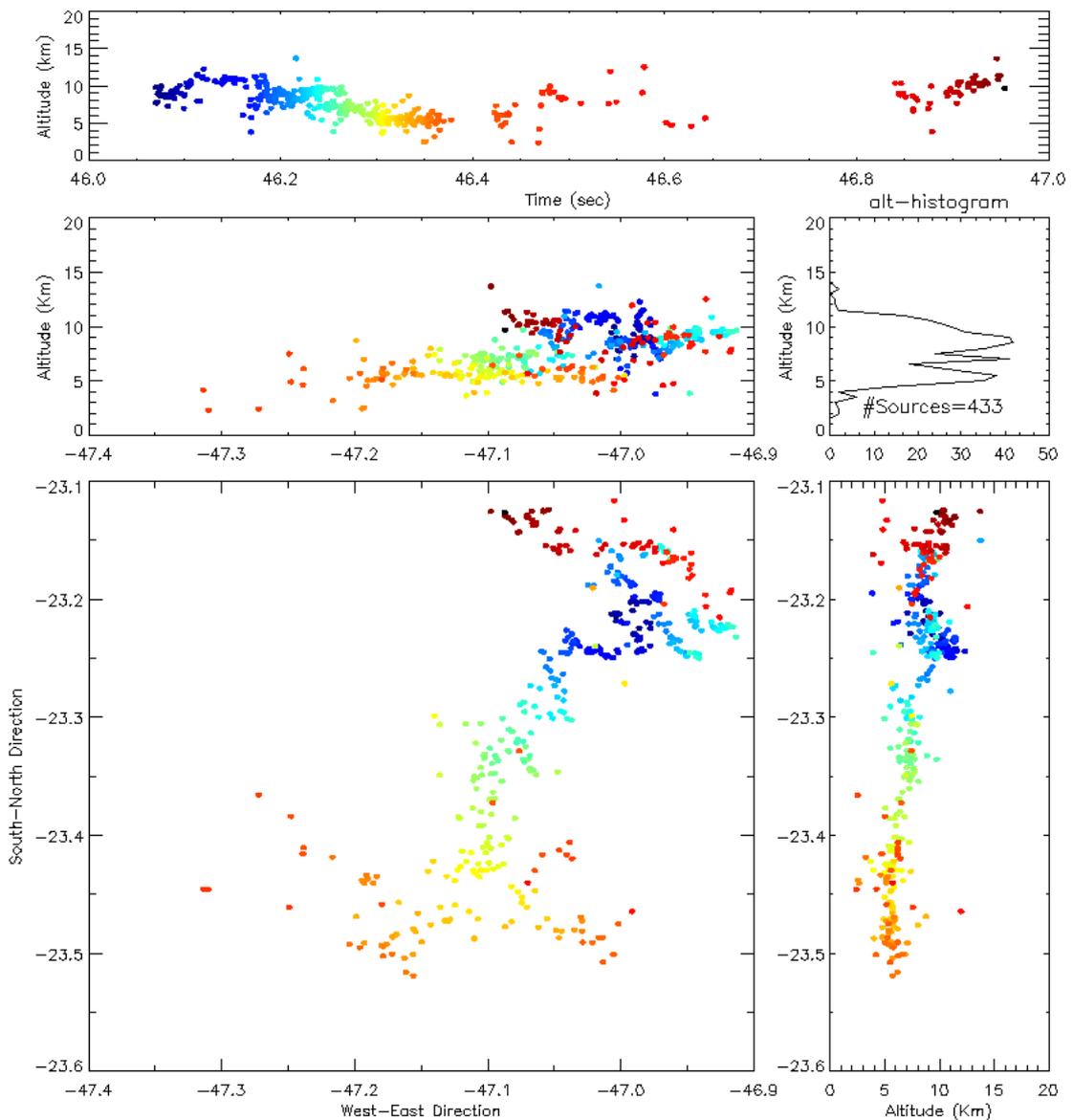
Fonte: Produção da autora

12. Anexo 3 - Imagens de LMA

Neste anexo estão todas as imagens dos casos de raios ascendentes registrados por mapeamento tridimensional – LMA.

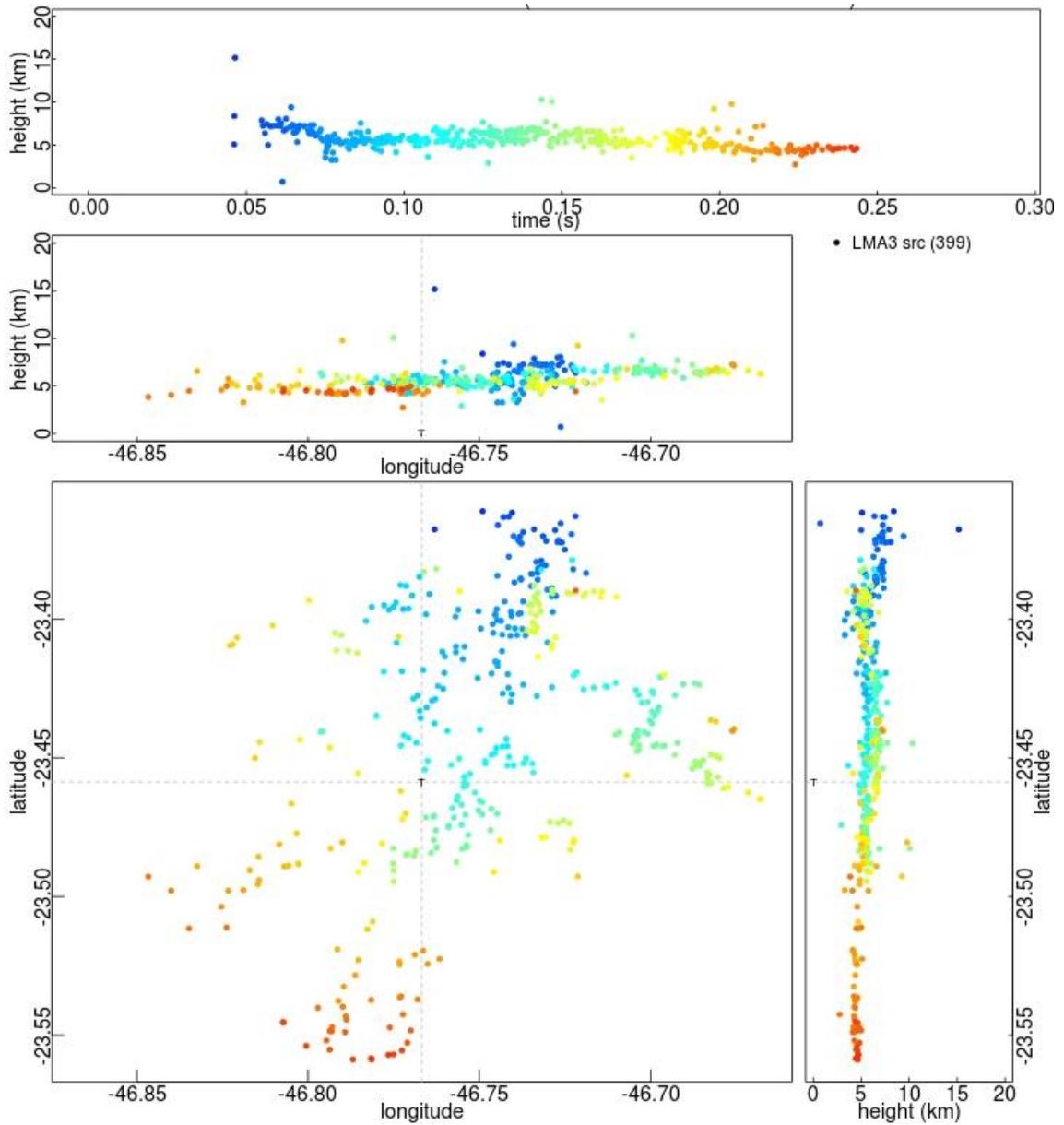
No Brasil os dados de LMA foram registrados durante a campanha CHUVA – São Paulo (Albrecht, 2011). E em Rapid City foram registrados durante o verão de 2014.

São Paulo – 15 de Janeiro de 2012 - Horário 21:34:46



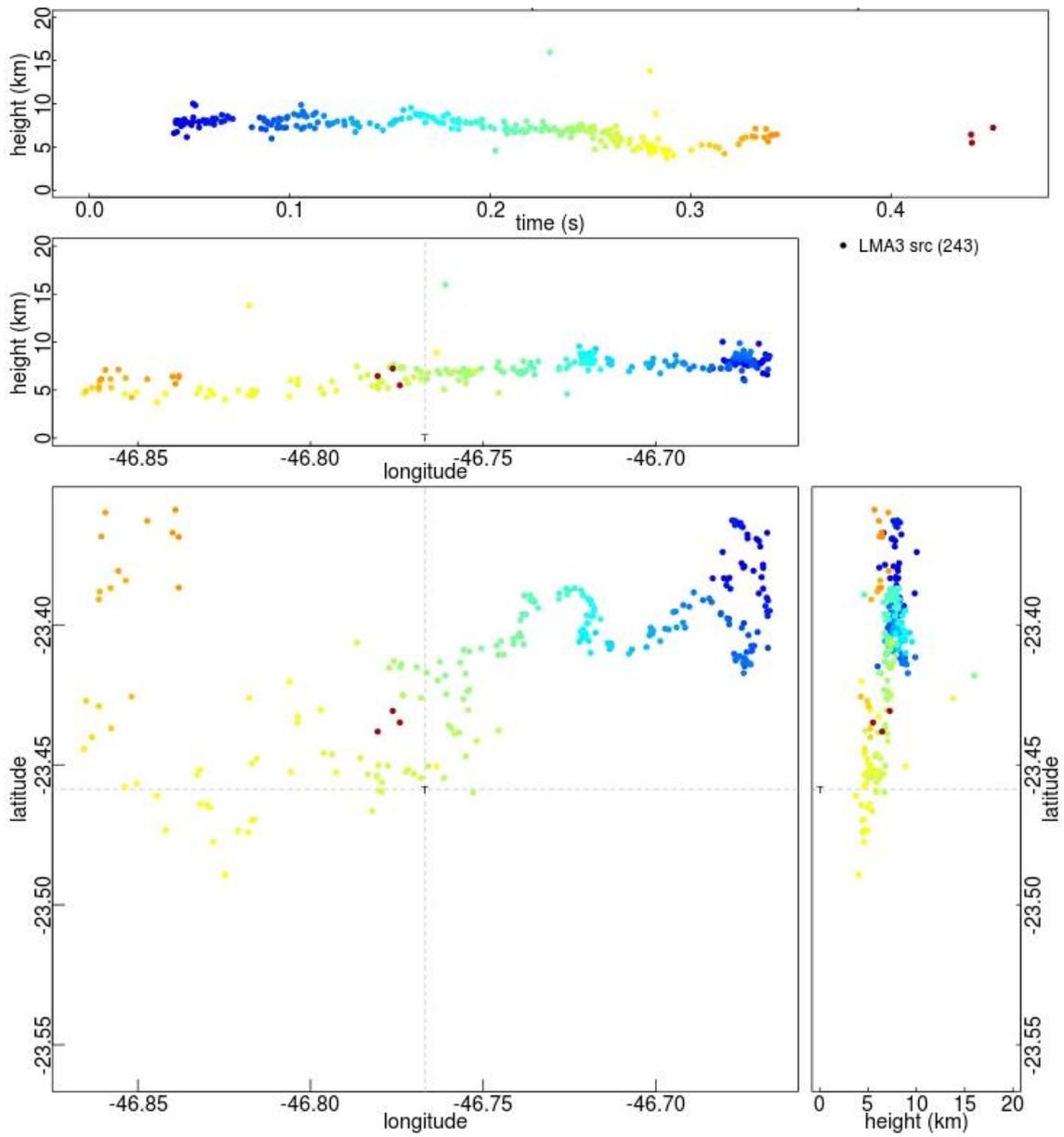
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 15 de janeiro de 2012 - Horário 21:40:49



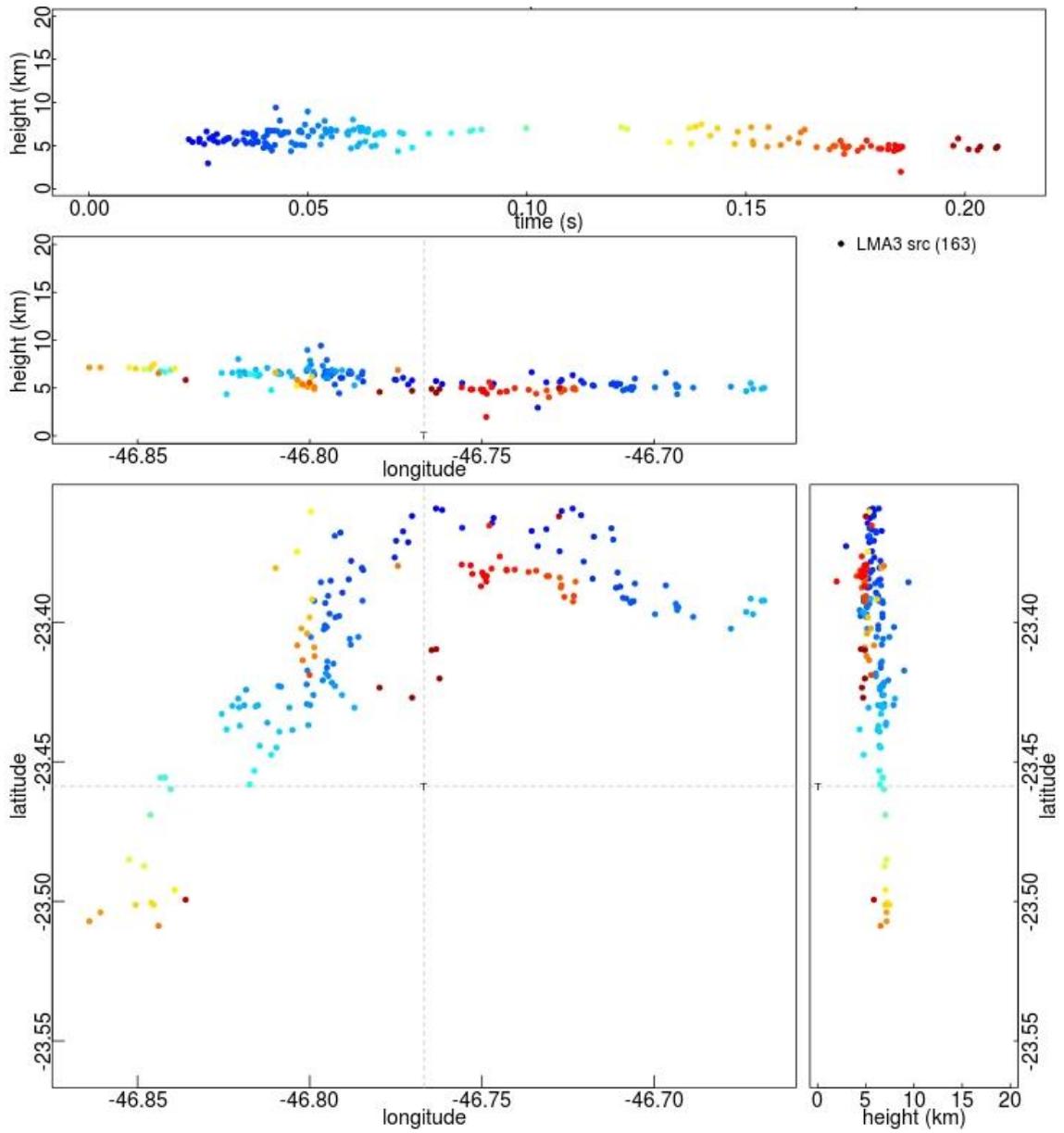
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 15 de janeiro de 2012 - Horário: 22:58:56



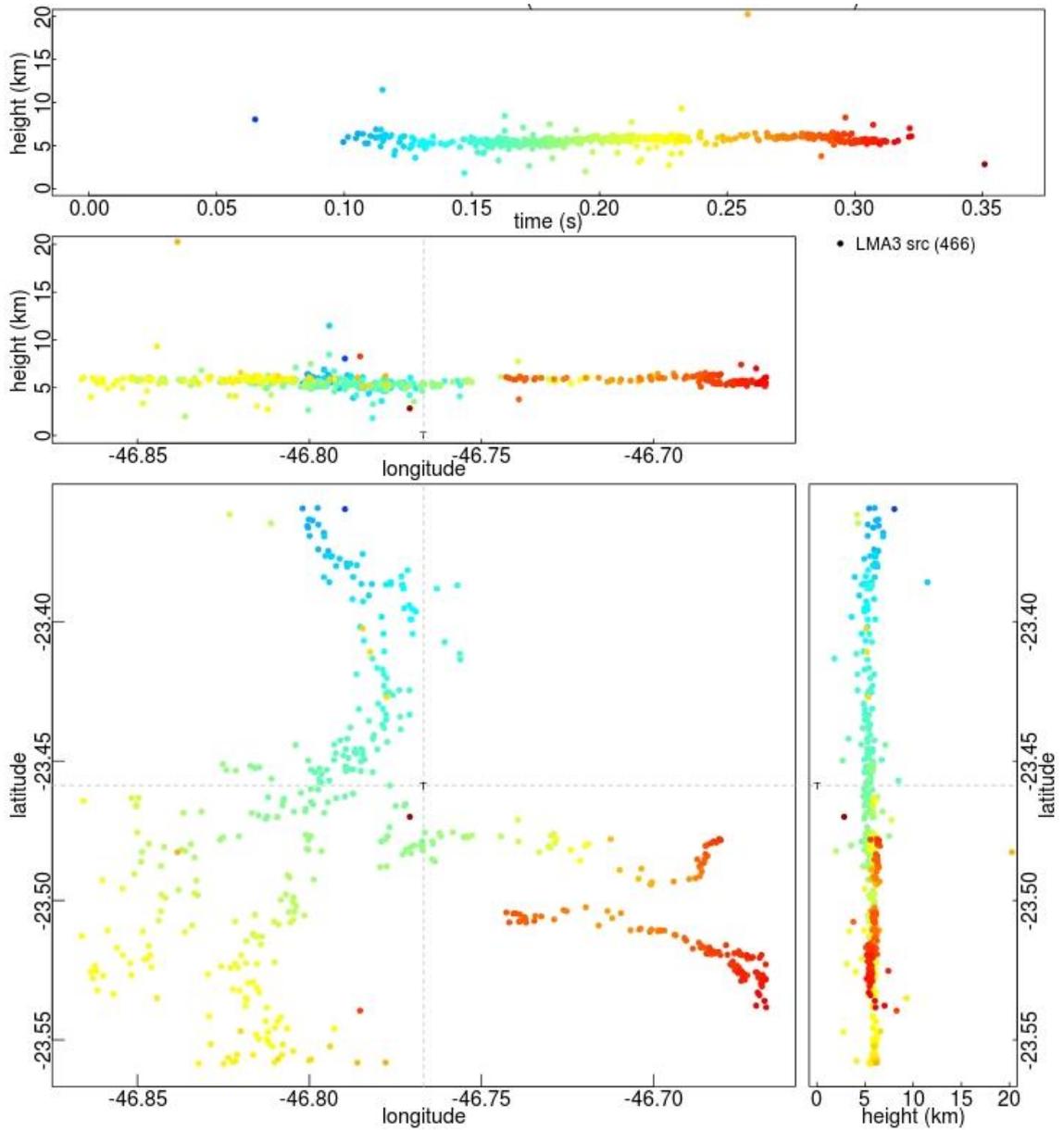
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 10 de março de 2012 - Horário: 19:58:01



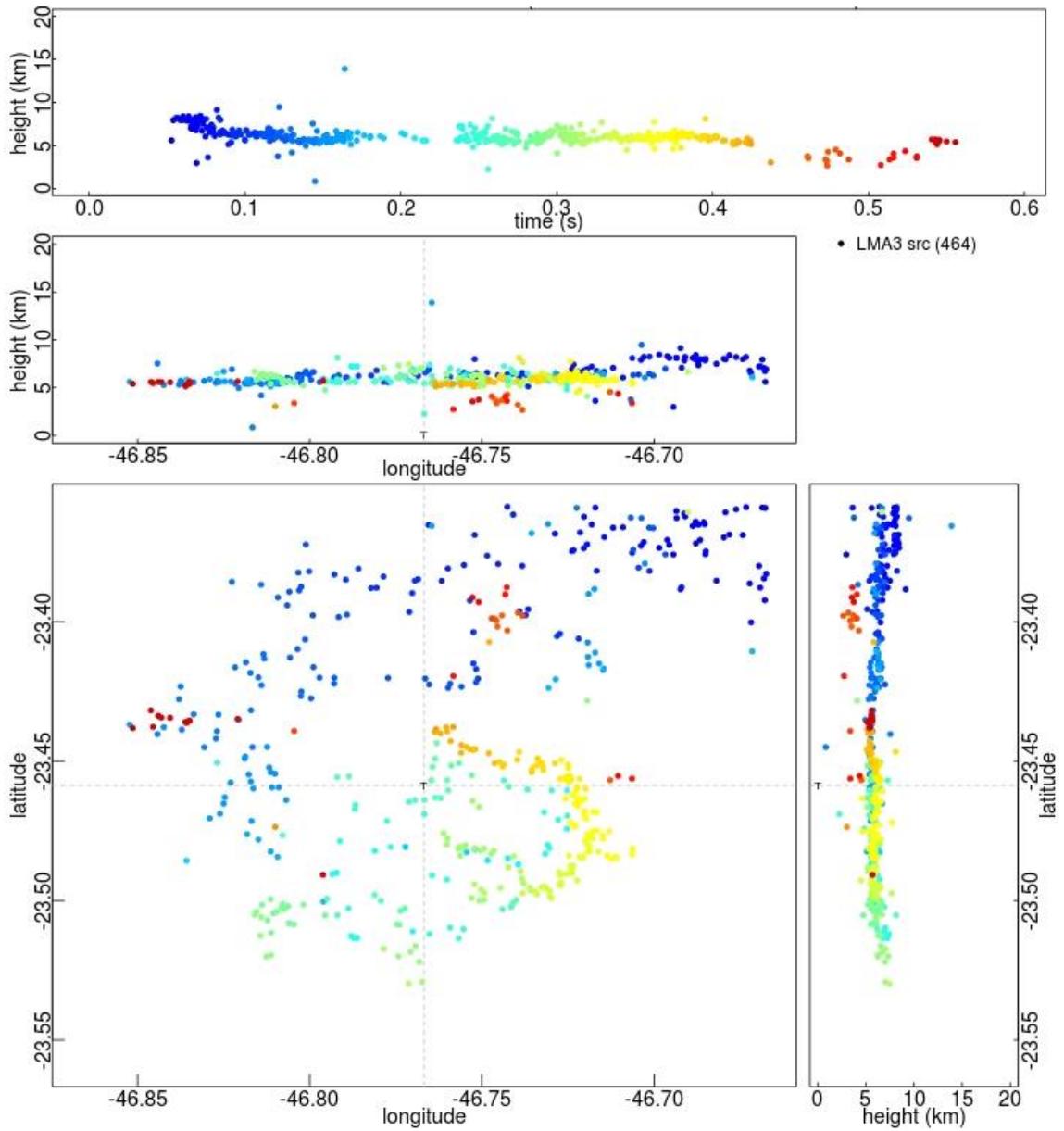
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 10 de março de 2012 - Horário: 20:17:24



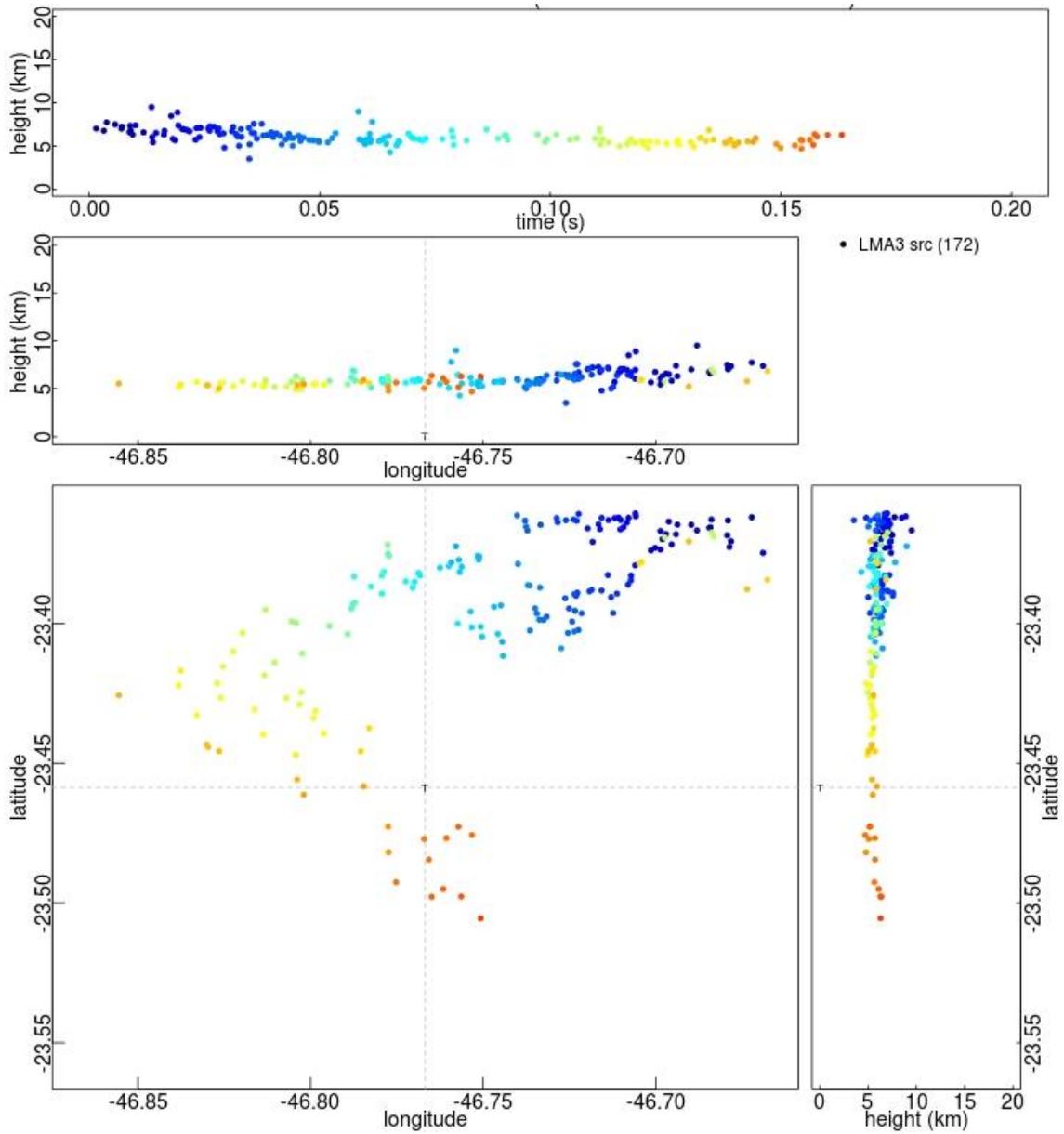
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 15 de março de 2012 - Horário: 23:17:48



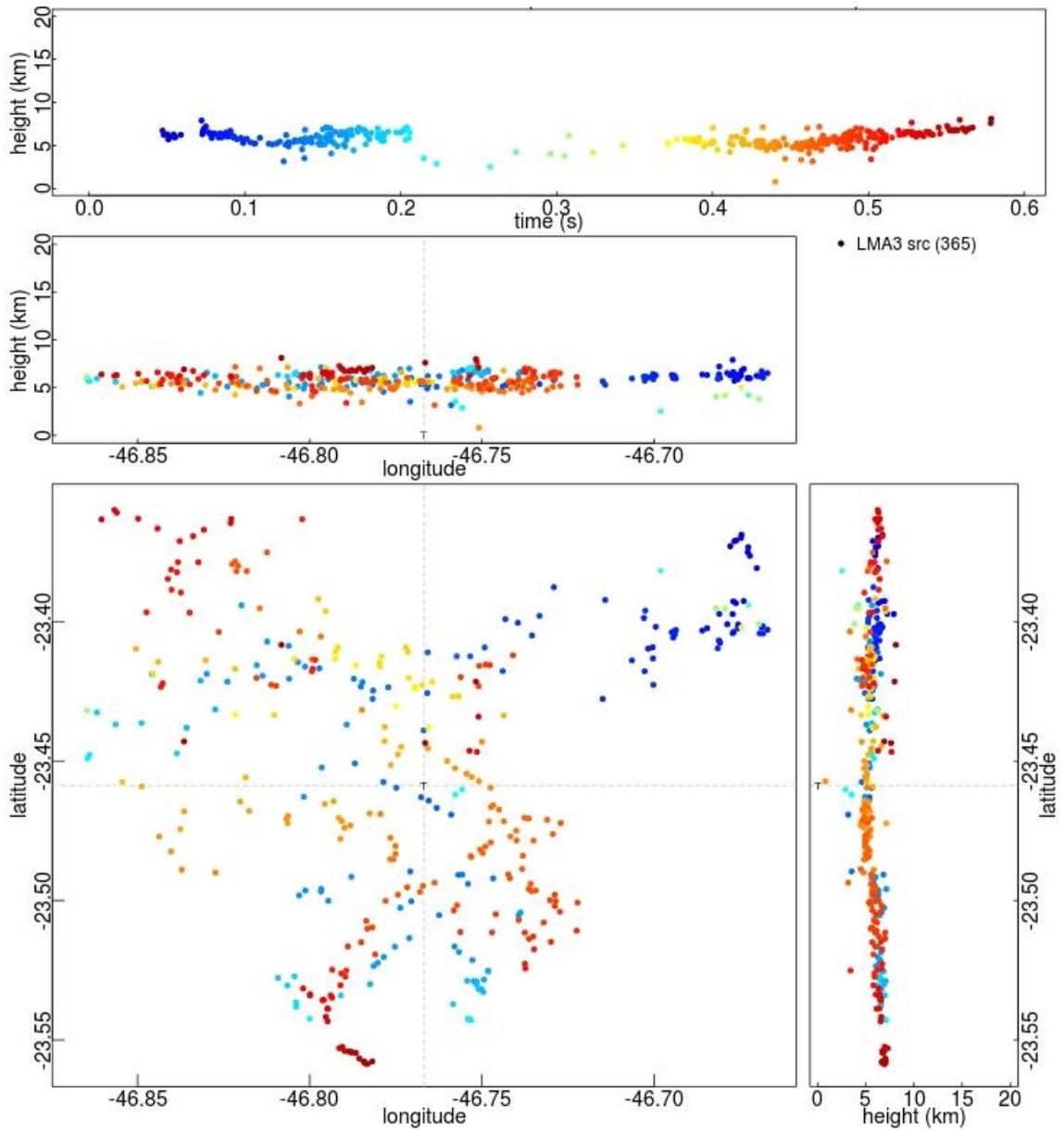
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 15 de março de 2012 - Horário: 23:21:44



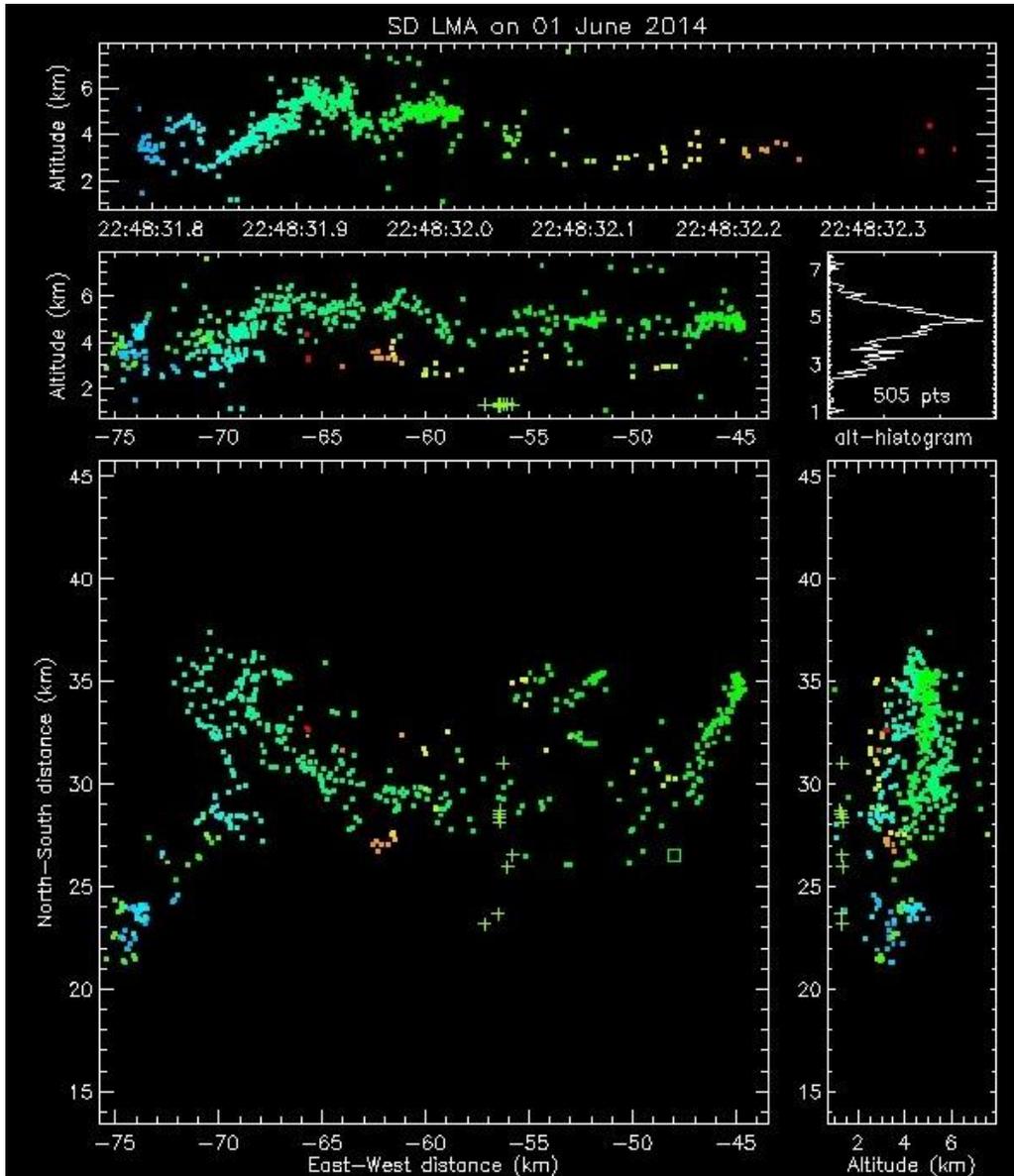
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

São Paulo – 15 de março de 2012 - Horário: 23:24:40



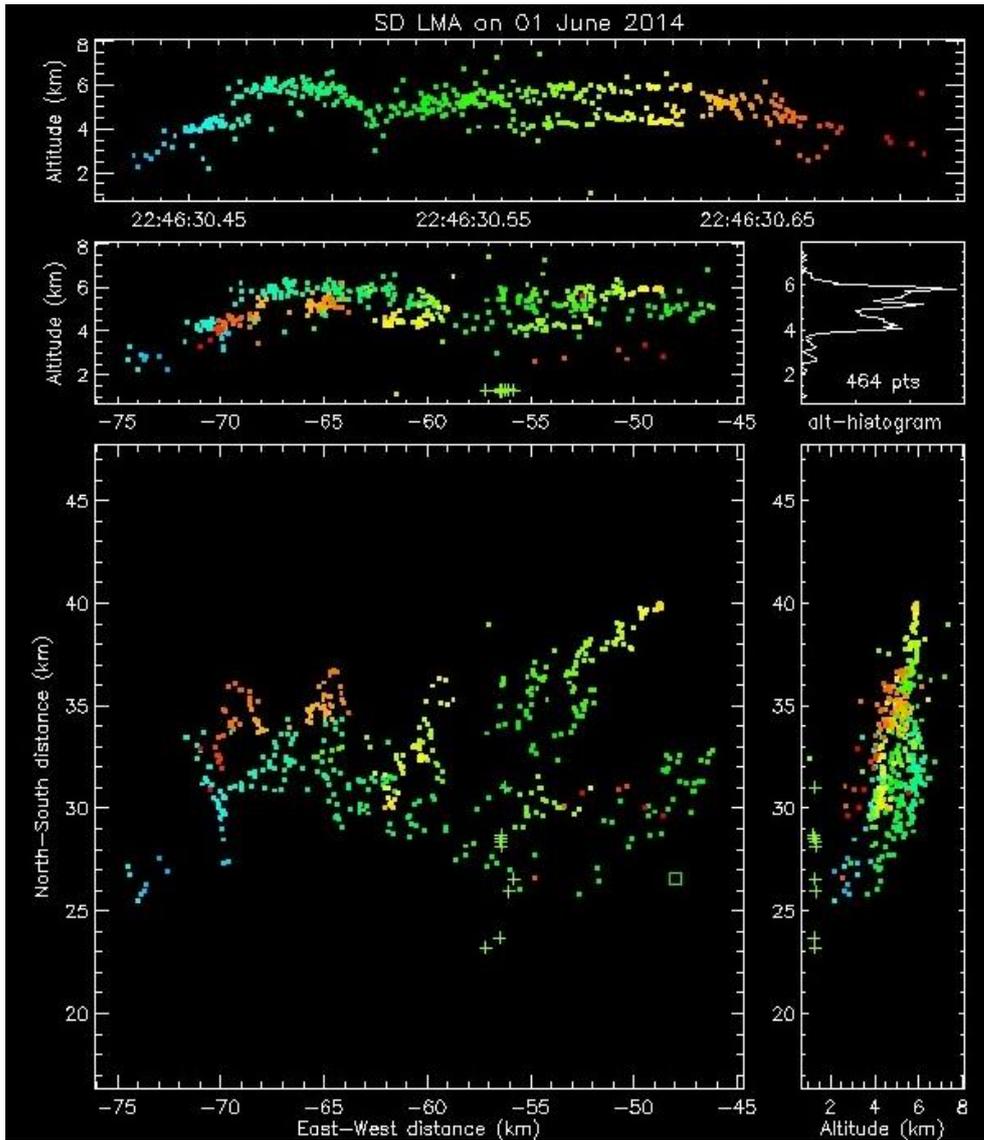
Fonte: Banco de Imagens ELAT (2013)

Rapid City - 01 de Junho de 2014 - Horário: 22:48:32



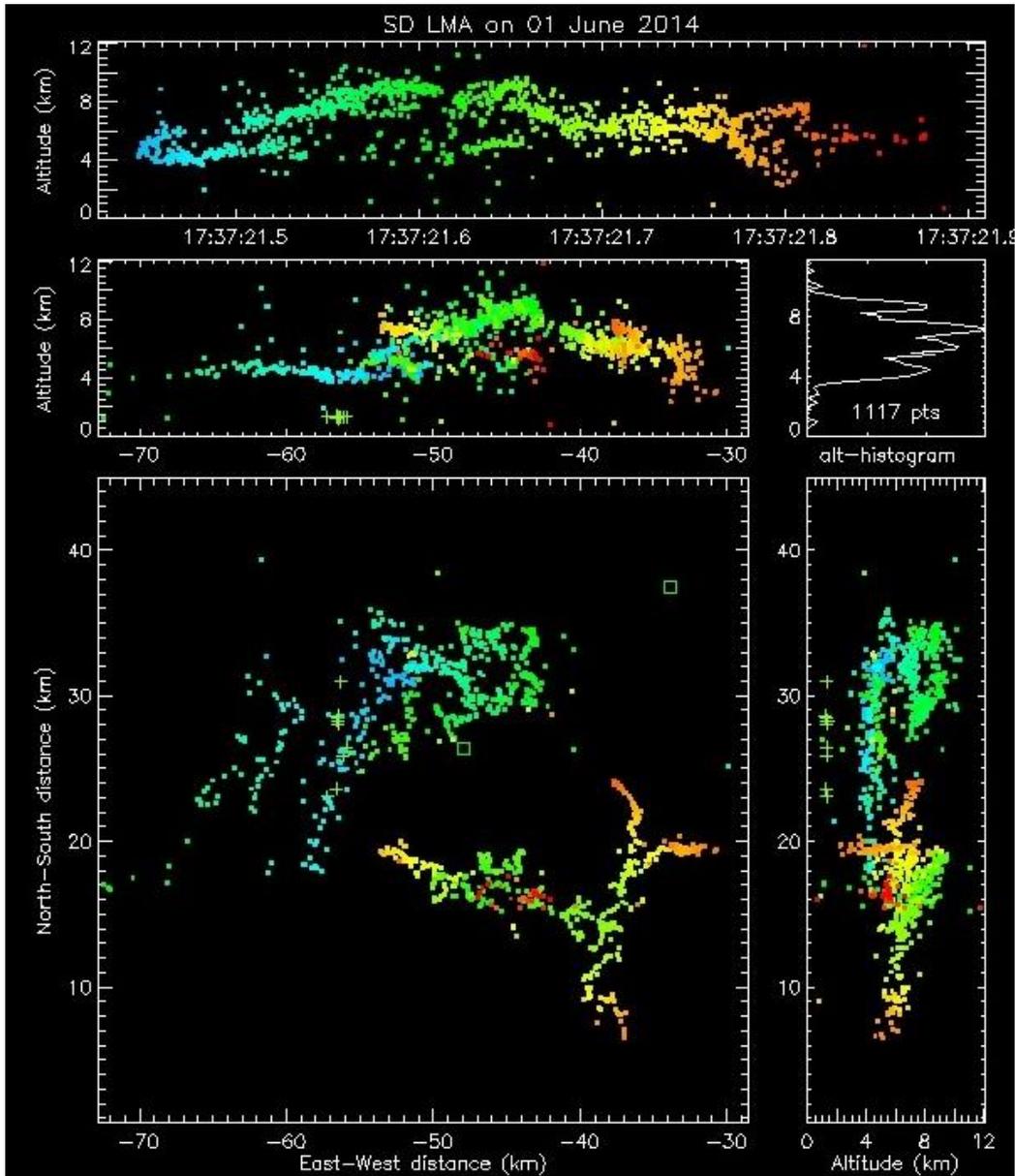
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 01 de junho de 2014 - Horário: 22:46:30



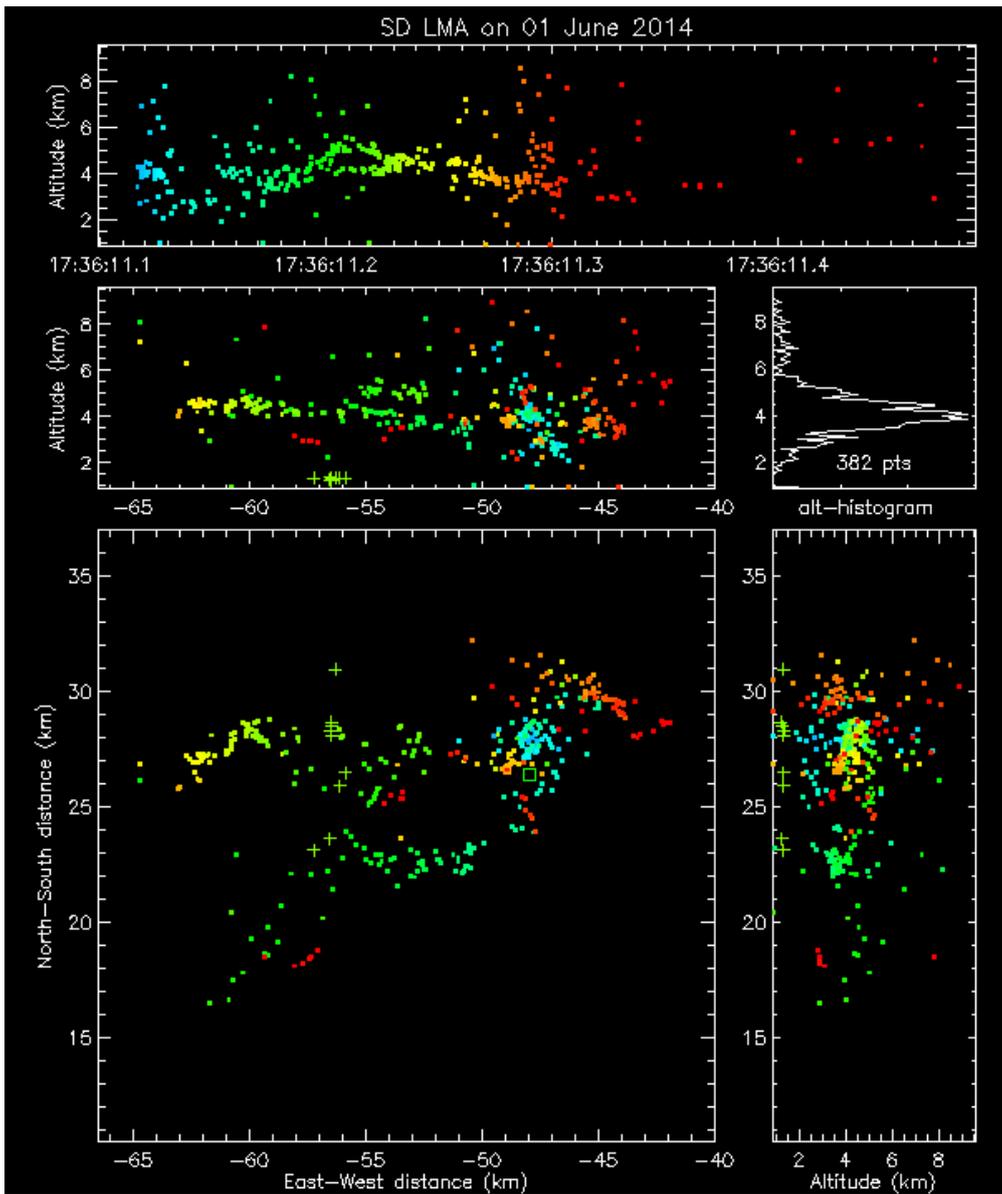
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 01 de junho de 2014 - Horário: 17:37:21



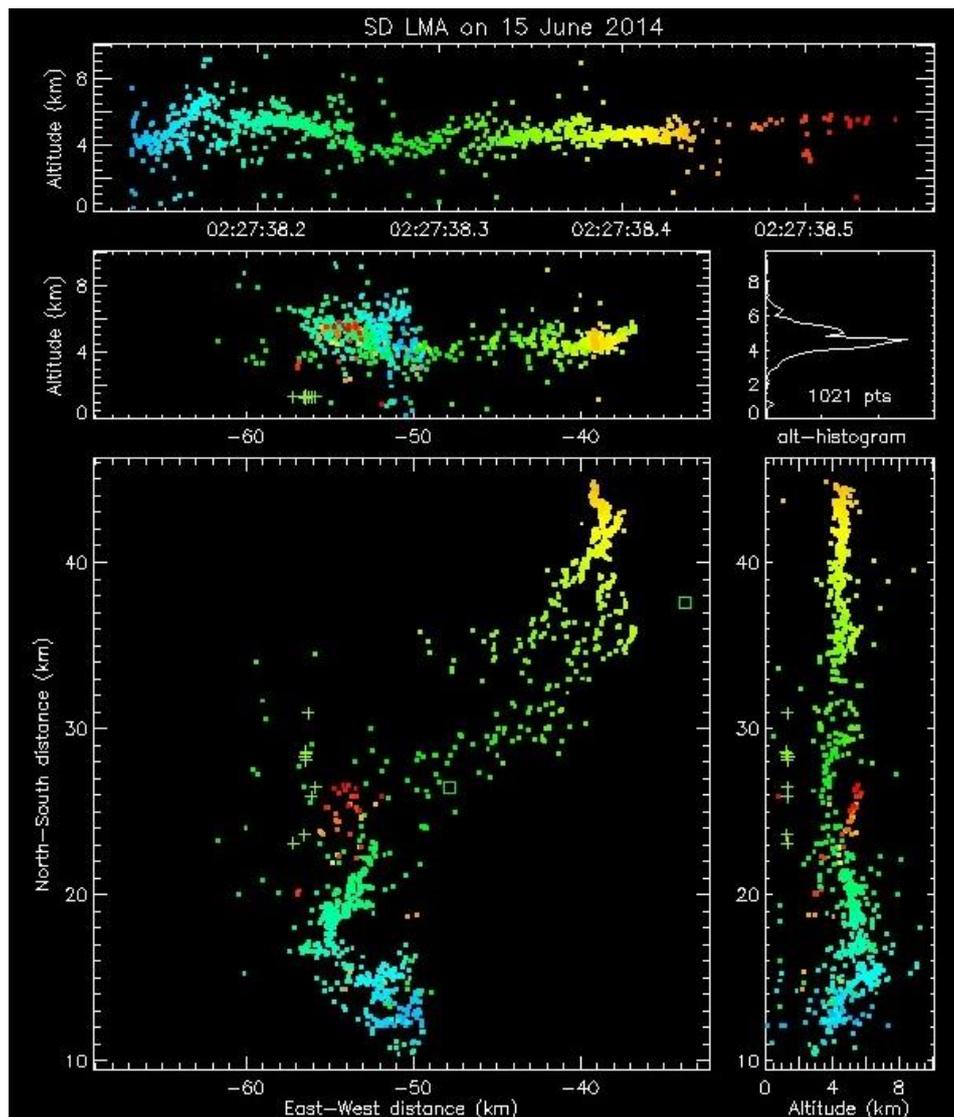
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 01 de Junho de 2014 - Horário:17:36:11



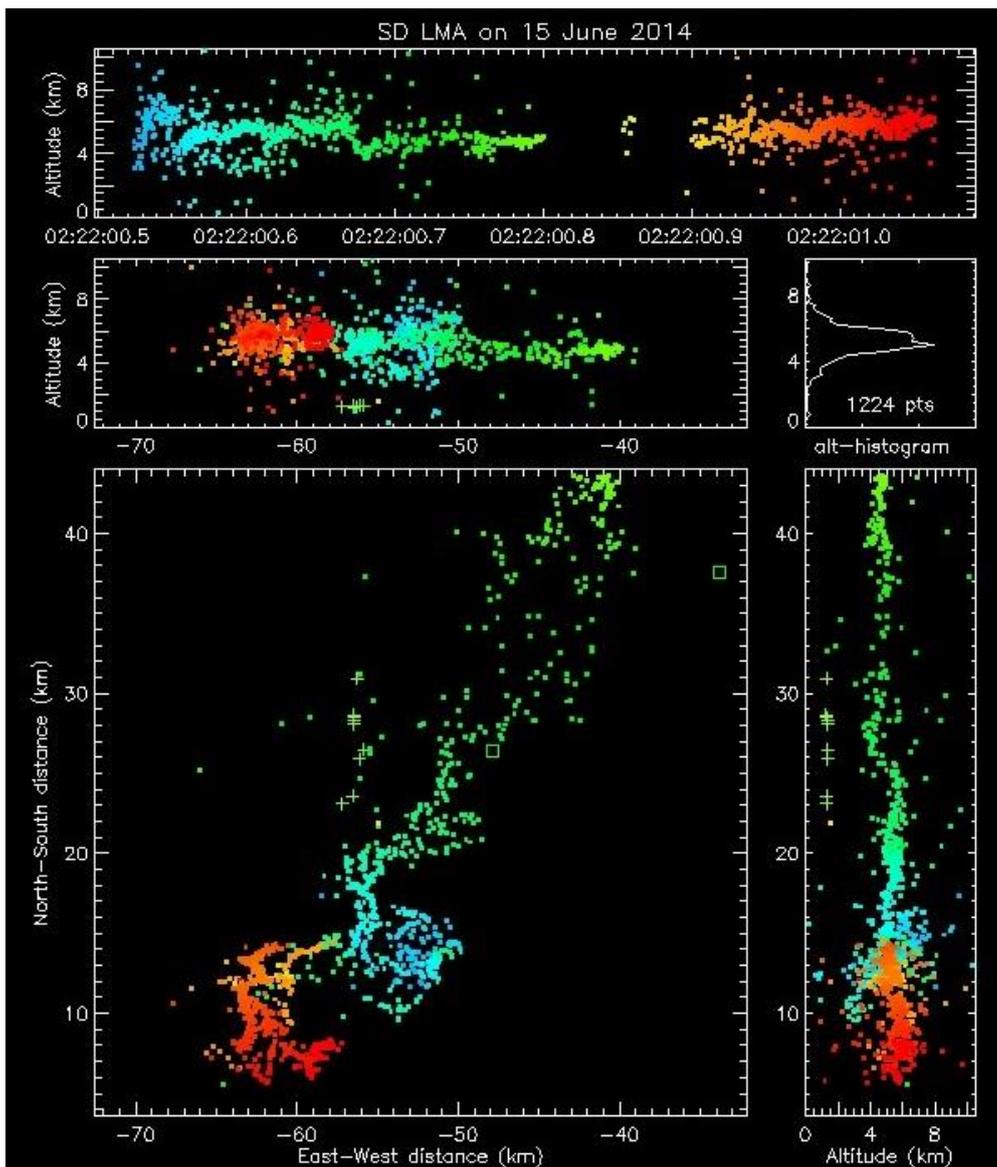
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 15 de Junho de 2014 - Horário: 02:27:38



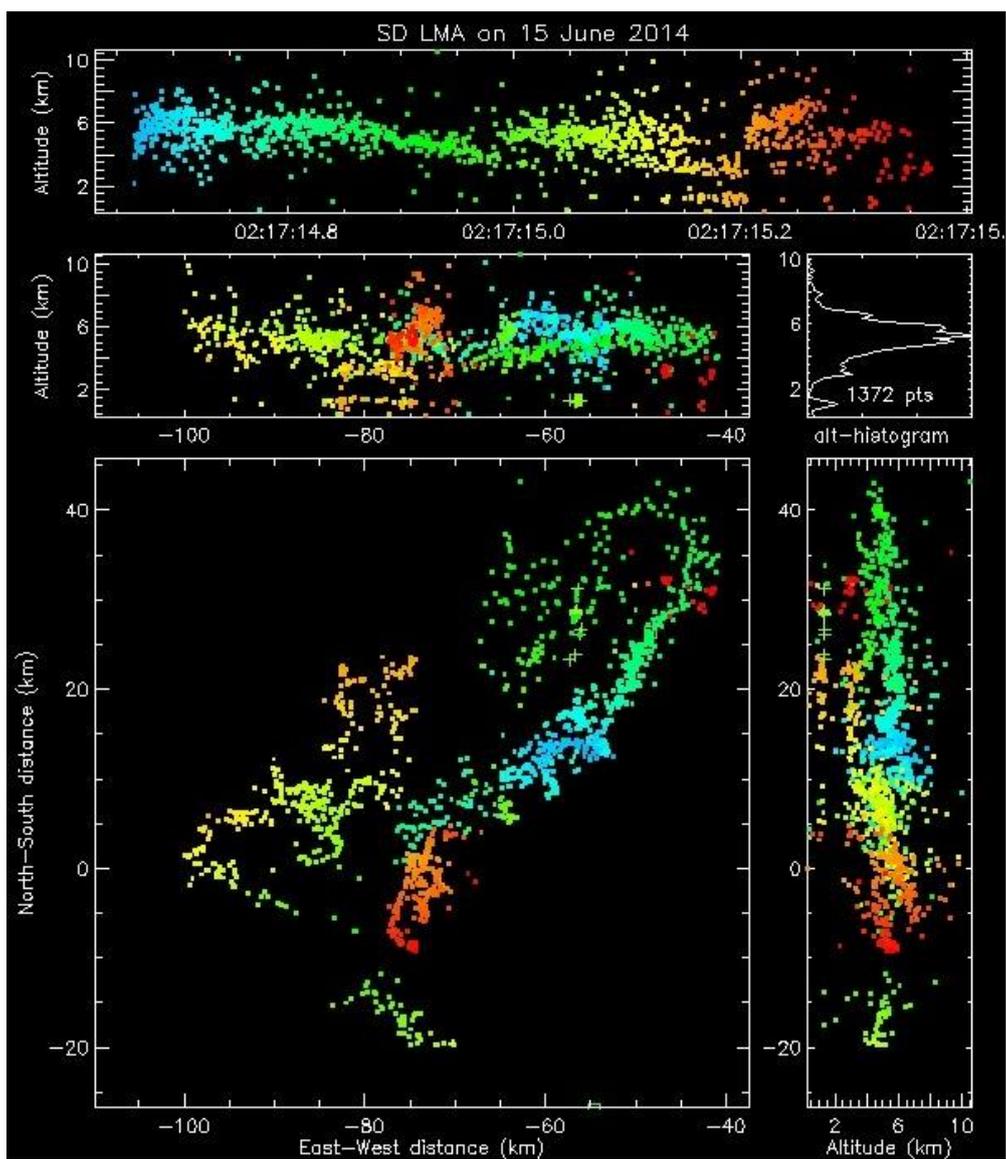
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 15 de Junho de 2014 - Horário: 02:22:00



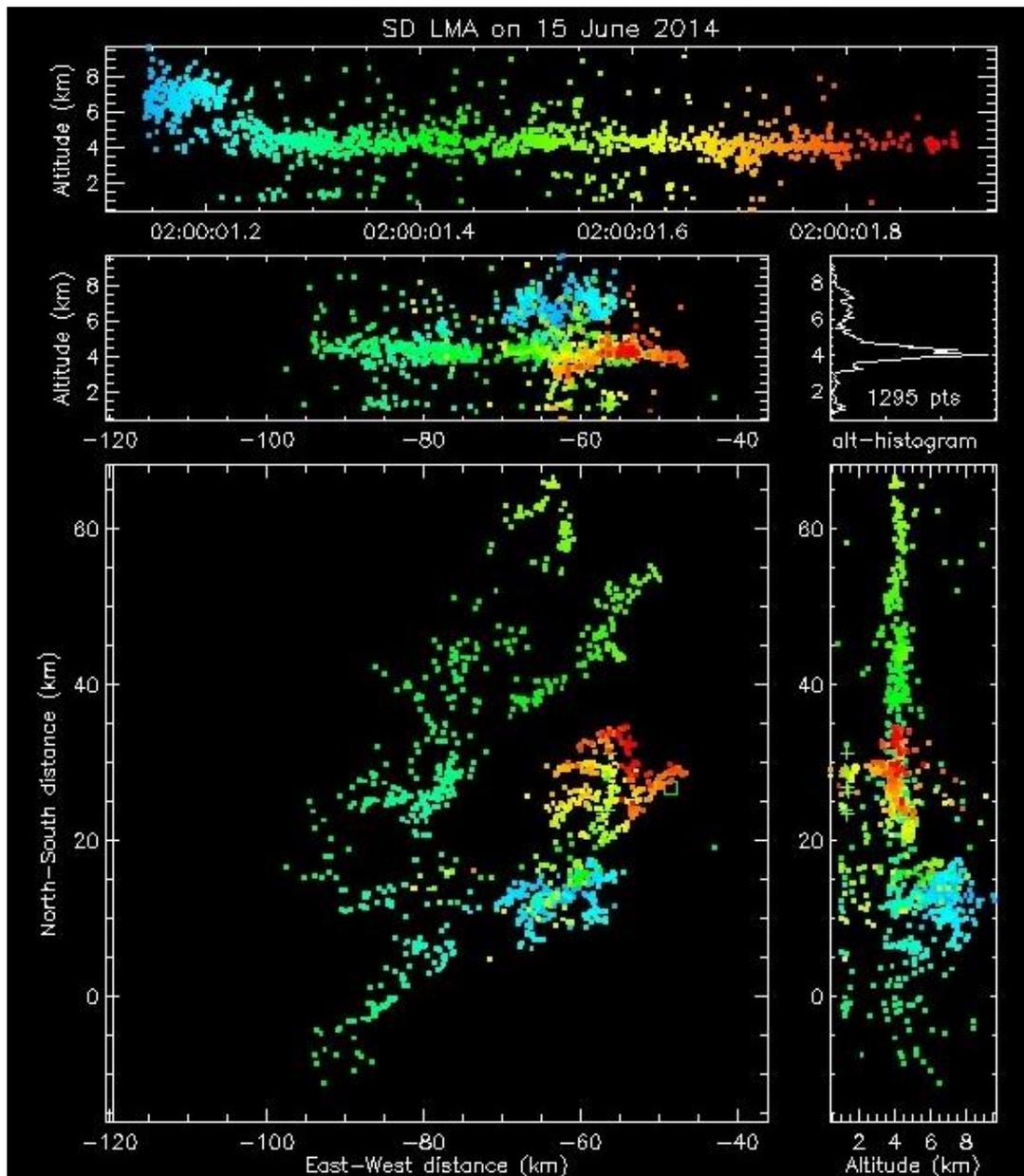
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 15 de Junho de 2014 - Horário: 02:17:15



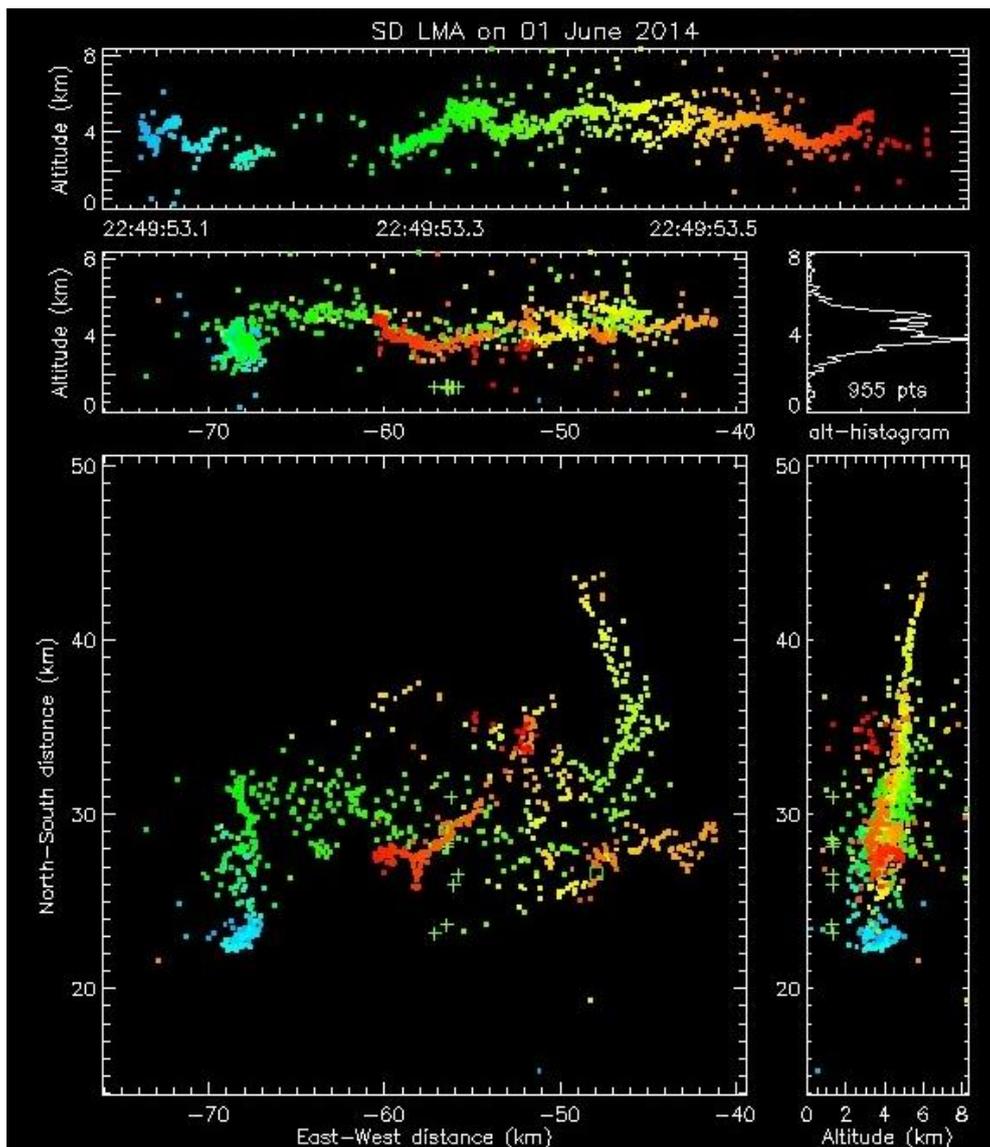
Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 15 de Junho de 2014 - Horário: 02:00:01



Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

Rapid City - 01 de Junho de 2014 - Horário: 22:49:53



Fonte: Banco de Imagens UPLIGHTS (2015)

13. Anexo 4 - Altura efetiva por diferentes métodos

Localização	Altura da Torre h	a = Montanha		Probab. de RA (%)	Número de Raios na Torre por ano	Altura efetiva (Risk 1994)		Altura efetiva por Eriksson – (1978)	Altura efetiva por Eriksson – (1984)	Altura efetiva por Zhou 2010	Altura efetiva por Shindo 2011
		Análise de perfil 1 km	Literatura			Análise de perfil 1 km	Montanha da literatura				
Fukui Thermal Power Plant	200	0	0	99	20						
Empire States Building	433	0	0	100	23						
Ostankino Tower	540	0	0	92	30						
CN Tower	553	0	0	100	75						
Tokyo Skytree	634	0	0	46	12						
Brixton Tower	250	50	60	89	15	296	304	379	424	***	***
Peissenberg Tower	160	64	288	100	19	221	346	442	518	324	380
Chrischona Tower	250	90	0	62	10	327	251	253	252	***	***
CSIR Research mast	60	107	80	14	44	134	118	125	102	113	240
Morro do Cachimbo Station	60	253	200	43	7	215	186	192	176	145	175
Eagle Nest Tower	22	300	N/A	99*	11	205	***	437	509	***	***
Jaragua Peak	130	318	N/A	97	31	327	***	422	487	***	***
Gaisberg Tower	100	456	800	100	54	354	479	442	518	274	630
TV Tower on Mount Orsa	40	600**	600	59	***	364	364	243	238	***	***
Säntis Tower	124	623	900	100	120	439	526	442	518	***	820
Tower on Mount San Salvatore	70	640	640	70	21	400	400	285	293	198	380

