

ESTUDO DAS TEMPESTADES QUE GERAM RAIOS ASCENDENTES

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

Jessica Cristina dos Santos Souza (Universidade de São Paulo, Bolsista
PIBIC/CNPq)

E-mail: jessica.cristina.souza@usp.br

Marcelo Magalhães Fares Saba (ELAT/INPE, Orientador)

E-mail: marcelo.saba@inpe.br

COLABORADORA

Dra. Rachel Ifanger Albrecht (DCA/IAG/USP)

Julho de 2015

RESUMO

O Brasil é um país com grande incidência de relâmpagos em virtude de sua grande extensão e proximidade do Equador geográfico. A estimativa é que 50 milhões de raios incidam no território brasileiro a cada ano. E, com o aumento da verticalização das cidades, pode haver um correspondente aumento de raios, no caso ascendentes, isto é, iniciados de uma estrutura ligada ao solo para nuvem, então riscos relacionados a esses raios também devem ser considerados para a proteção de pessoas e patrimônios. Nesse contexto, objetiva-se determinar as características das tempestades que geram raios ascendentes. A partir da coleta de dados no verão 2011/2012, pôde-se registrar quatorze raios ascendentes que tiveram início a partir de uma das torres situadas sobre o Pico do Jaraguá, na cidade de São Paulo com o auxílio de algumas câmeras de vídeo ultrarrápidas. Para análise desses raios e das tempestades geradoras foram coletadas imagens de satélite e do acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA); e foram geradas imagens das fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA e LINET e dos dados de refletividade dos radares São Roque, FCTH e IACIT que mediram a precipitação durante o experimento CHUVA-GLM Vale do Paraíba (produto CAPPI). Sobre a cidade de São Paulo, nota-se a atuação de sistemas convectivos produzindo acumulados diários de fontes eletromagnéticas superiores a 1000 nessa região (exceto em 15/03/2012). Baseado em análises da estrutura horizontal e da assinatura da banda brilhante do radar as precipitações podem ser categorizadas como estratiforme nos locais de ocorrências dos raios, com valores de refletividade menores que 40 dBZ, ou seja, valores de refletividade médios da superfície até o nível de degelo, onde há o pico de refletividade e rápido decréscimo com a altura. Além disso, todos os raios ascendentes, exceto um, foram iniciados pela propagação de raios intranuvem ou nuvem-solo sobre a torre. Apenas um raio ascendente foi iniciado na própria torre.

ABSTRACT

Brazil is a country with a high incidence of lightning because of its large extension and its geographic proximity to the equator. It is estimated that 50 million lightning occurs in Brazil each year. And, with the increasing of vertical cities, there may be a corresponding increase of upward lightning started from a tall structure connected to the ground to cloud. Then risks associated with these discharges should also be considered for the protection of persons and property. In this context, the objective of this study is to determine the characteristics of storms that generate upward lighting. From the data collected in the summer 2011/2012, it could be recorded fourteen upward flashes that started from one of the towers located on Pico do Jaraguá, in São Paulo with the aid of a few ultra-fast cameras. For analysis of these discharges and corresponding storms, satellite imagery and the daily cumulative electromagnetic sources of lightning measured by the São Paulo Lightning Mapping Array (SP-LMA) were collected; images of electromagnetic sources of lightning measured by SPLMA and LINET and images of reflectivity data from radar São Roque, FCTH and IACIT that measured precipitation during the experiment CHUVA-GLM Vale do Paraíba (CAPPI product) were generated. In the city of São Paulo, there is the action of convective systems producing daily electromagnetic sources accumulated over 1000 in this region (except in 15/03/2012). Based on analyzes of the horizontal structure and on the signature of the radar bright band, the rainfall can be categorized as stratiform, with reflectivity lower than 40 dBZ. Besides, all upward lightning, except one, were initiated by intracloud or cloud-to-ground lightning propagating over the tower. Only one upward lightning was initiated by the tower itself.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 15/01/2012.	15
Figura 2. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 15/01/2012 às 21:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.....	16
Figura 3. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar IACIT para o dia 15/01/2012 às 22:56 GMT com a altura em função da longitude (a), altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d)	17
Figura 4. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar IACIT para o dia 15/01/2012 às 22:56 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).....	18
Figura 5. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 15/01/2012 no horário de 22:56 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.	19
Figura 6. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os quatro raios ascendentes ocorridos no dia 15/01/2012 nos horários (a) 21:34:46 GMT; (b) 21:38:29 GMT; (c) 21:40:49 GMT e (d) 22:58:56 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.....	20
Figura 7. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 10/03/2012	22

Figura 8. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 10/03/2012 às 20:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.....	23
Figura 9. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 10/03/2012 às 20:01 GMT com a altura em função da longitude (a), altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d)	24
Figura 10. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 10/03/2012 às 20:01 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).....	25
Figura 11. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 10/03/2012 no horário de 20:01 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras	26
Figura 12. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os dois raios ascendentes ocorridos no dia 10/03/2012 nos horários (a) 19:58:01 GMT e (b) 20:17:24 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio	27
Figura 13. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 15/03/2012	28
Figura 14. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 16/03/2012 às 00:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.....	29
Figura 15. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 15/03/2012 às 23:22 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando	

com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d)	30
Figura 16. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 15/03/2012 às 23:22 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).....	31
Figura 17. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 15/03/2012 no horário de 23:22 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras	32
Figura 18. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os três raios ascendentes ocorridos no dia 15/03/2012 nos horários (a) 23:17:48 GMT; (b) 23:21:44 GMT e (c) 23:24:40 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio	33
Figura 19. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 23/03/2012	34
Figura 20. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 23/03/2012 às 03:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.....	35
Figura 21. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 23/03/2012 às 02:35 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d)	36
Figura 22. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 23/03/2012 às 02:35 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).....	37

Figura 23. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 23/03/2012 no horário de 02:34 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras	38
Figura 24. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para o raio ascendente ocorrido no dia 23/01/2012 no horário 02:34:49 GMT em um intervalo de ± 1 segundos..	39
Figura 25. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 27/03/2012	40
Figura 26. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 27/03/2012 às 21:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.....	41
Figura 27. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 27/03/2012 às 19:28 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).	42
Figura 28. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 27/03/2012 às 19:28 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).....	43
Figura 29. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 27/03/2012 no horário de 19:28 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.	44
Figura 30. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os quatro raios ascendentes ocorridos no dia 27/03/2012 nos horários (a) 19:28:55 GMT; (b) 19:38:53 GMT; (c) 19:42:41 GMT; (d) 19:49:02 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condições meteorológicas gerais das tempestades que produziram os raios ascendentes estudados..	12
---	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPPI - *Constant Altitude Plan Position Indicator*

CCI – Corrente contínua inicial

CHUVA-GLM - *Cloud processes of the main precipitation systems in Brazil: A contribution to cloud resolving modeling and to the GPM (Global Precipitation Measurement) -Geostationary Lightning Mapper*

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

IACIT – Empresa brasileira fabricante de equipamentos.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LMA - *Lightning Mapping Array*

LINET - *Lightning detection network*

SP-LMA - *São Paulo Lightning Mapping Array*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Histórico	1
1.2 Motivação e objetivos.....	1
2. DESENVOLVIMENTO.....	3
2.1 Revisão de literatura	3
2.1.1 Formação de nuvens	3
2.1.2 Formação de precipitação.....	4
2.1.3 Eletrificação das nuvens	6
2.1.4 Relâmpagos : tipos, etapas e características	7
2.1.5 Radares	9
2.2 Material e métodos	11
2.3 Resultados e discussão	14
3. CONCLUSÃO.....	46
4. REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Relâmpagos iniciados de altas estruturas são estudados desde os trabalhos de McEachron (1939, 1941) que obteve imagens e mediu a corrente de um leader ascendente, e Hagenguth e Anderson (1952) que adquiriu mais dados sobre as características dessas descargas elétricas, ambos trabalhos no Empire State Building em Nova York. Mais tarde Berger (1967, 1969, 1977) e Berger et al. (1975) acrescentaram informações de dados óticos e de corrente.

E, recentemente ao redor do mundo alguns trabalhos sobre raios ascendentes, muitos de torres instrumentais, são destaque como os de Rakov e Uman (2003, capítulo 6) incluindo Áustria, Canadá, Alemanha, Japão e Rússia, Miki et al. (2005) nos países: Áustria, Alemanha, Japão e Estados Unidos; Takagi et al. (2006); Wang et al. (2008) e Lu et al. (2009) no Japão; Flache et al. (2008) na Alemanha; Diendorfer et al. (2009) e Zhou et al. (2012) na Áustria e Mazur e Runkhe. (2011) nos Estados Unidos.

1.2 Motivação e objetivos

O Brasil é o país com maior incidência de relâmpagos do mundo em virtude de sua grande extensão e proximidade do Equador geográfico. A estimativa é que 50 milhões de raios incidam no país a cada ano (PINTO JR E PINTO, 2000, 2009). Em relação direta a esse fato, um estudo feito entre 2000 e 2009 por Cardoso et al. (2014) e baseado em dados coletados de diferentes fontes mostra um registro total de 1321 casos fatais relacionados a raios, que é uma média de 132 casos por ano. Considerando a população média brasileira de 180 milhões de habitantes durante o período, a anual taxa de fatalidades é de 0.8 por

milhão enquanto que a média observada em países desenvolvidos é de 0.2 por milhão (HOLLE, 2008).

E, com o aumento da verticalização das cidades, pode haver um correspondente aumento de raios, no caso ascendentes, ou seja, iniciados de uma estrutura ligada ao solo para nuvem, então riscos relacionados a esses raios também devem ser considerados. Uma vez que seu primeiro registro no Brasil foi realizado em 2012 no Pico do Jaraguá, ponto mais alto da cidade de São Paulo, muitas questões devem ser esclarecidas. Como os atuais padrões de proteção contra raios são baseados em raios descendentes, pode-se identificar riscos exclusivamente associados com raio ascendentes, que não são incluídos em normas de proteção.

Dessa forma, estudos sobre os raios ascendentes são de grande relevância para aumentar o entendimento sobre o fenômeno e contribuir para a proteção de pessoas e pertences em edifícios altos. E, para a proteção de estruturas altas, tais como torres de telecomunicações, de distribuição de energia, e também de produção de energia como no caso de turbinas eólicas, tipo de geração de energia que tem grandes chances de expansão e aplicação no Brasil.

Com base no exposto, este projeto de pesquisa objetiva determinar as características das tempestades que geram raios ascendentes, classificando a precipitação do radar em convectiva e estratiforme com a finalidade de identificar qual o tipo de precipitação pelo qual os raios ascendentes se propagaram e também examinando a estrutura vertical das tempestades que geraram esses raios ascendentes. E, em favor de um maior entendimento, visa-se analisar a propagação dos raios ascendentes e dos demais raios dos sistemas precipitantes.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão de literatura

2.1.1 Formação de nuvens

Por Ahrens (2008), movimentos verticais de ar são requisitos para formação de nuvens e importantes na determinação das características e quantidade de precipitação que uma nuvem pode produzir. Correntes ascendentes fornecem umidade a uma nuvem, além de prover mais tempo para que as partículas de precipitação cresçam.

Uma atmosfera estável pode ser causada pelo resfriamento do ar de superfície, pelo aquecimento da camada de ar logo acima ou pela subsidência de uma camada inteira de ar, caso em que camadas de inversão geralmente se formam. Nessa atmosfera, uma parcela levantada de ar será mais fria (densa) que o ar ao redor em cada nível, e descenderá para a posição inicial. Por esse fato, ar estável tende a resistir a movimento vertical ascendente, então a formação de nuvens em uma atmosfera estável geralmente cresce e se propaga horizontalmente, além de apresentar uma aparência estratificada como cirrostratus (Cs) e altostratus (As).

Em uma atmosfera condicionalmente instável, uma parcela insaturada de ar pode ascender a uma altura onde começa a condensação, calor latente é liberado e resulta em instabilidade conforme a temperatura dentro da parcela ascendente se torna mais quente que o ar em volta. Nesse caso, o ar ascendente tende a formar nuvens com desenvolvimento vertical, como cumulonimbus (Cb).

Em atmosfera instável, uma parcela levantada de ar estará mais quente que o ambiente ao redor em cada nível, e continuará a ascender e se afastar de sua posição original. A instabilidade pode ser causada pelo aquecimento do ar da superfície, resfriamento do ar acima do superficial ou também pelo levantamento ou mistura de uma camada inteira de ar. Em dias quentes e úmidos a instabilidade gerada pelo aquecimento da superfície pode produzir nuvens cumulus (Cu) em uma altura determinada pela temperatura e conteúdo de umidade da parcela de ar. A instabilidade pode causar mudanças em nuvens existentes como altostratus (As) e altocumulus (Ac) pela convecção.

2.1.2 Formação de precipitação

Como gotas de nuvens são muito pequenas e leves para alcançar a superfície na forma de chuva, o crescimento dessas gotas por condensação é lento para uma precipitação significativa. Então, há a presença de outros processos.

Em nuvens com o topo mais quente que -15°C o processo de coalescência-colisão desempenha um papel significativo na formação de precipitação. Gotas grandes colidem com gotas pequenas em seus caminhos. Essa mescla de nuvens por colisão é chamada de coalescência que é aprimorada se as gotas possuem cargas elétricas opostas (AHRENS, 2008).

Se a temperatura do ar de uma nuvem diminui abaixo da temperatura de congelamento, cristais de gelo passam a desempenham importante influencia na formação de nuvens (AHRENS, 2008).

De acordo com Steiner e Smith (1998), dependendo se as interações das partículas são na forma líquida ou sólida, os processos podem ser distinguidos: coalescência de partículas líquidas, agregação de partículas de gelo, captura de partículas líquidas por partículas de

gelo (*riming* ou acreção) e vice versa, captura de cristais de gelo por gotas de chuva congelando. E, a quebra pode ocorrer espontaneamente ou por colisões entre partículas.

A coleta de gotas (de nuvem ou de chuva) super-resfriadas por cristais de gelo é provavelmente o mais importante método de crescimento em nuvens com fases mistas. Por causa da diferença de pressão de vapor entre água e gelo, um cristal de gelo ao redor de gotas cresce.

O processo pelo qual partículas de gelo com tamanho para precipitar coletam partículas de nuvem líquida não precipitante ou pequenas gotas de *drizzle* é chamado *riming*, enquanto que a coleta de partículas precipitantes de *drizzle* ou gotas é nomeado acreção. *Riming* pode ser observado tanto em precipitações mais desenvolvidas horizontalmente como nas precipitações convectivas. Entretanto, acreção é um processo de natureza convectiva.

A coleta de partículas de gelo por partículas de gelo é chamada agregação. Esse é um processo típico ocorrido em precipitações mais estratiformes e é facilmente identificada em *display* de radares pela banda brilhante, uma fina camada horizontal de retroespalhamento aprimorado relacionado ao nível de 0°C (AUSTIN AND BEMIS, 1950; BATTAN, 1973). As agregações ocorrem mais perto ou na própria camada de derretimento (STEWART ET AL., 1984).

As partículas de precipitação crescem, em nuvens convectivas, enquanto são carregadas para cima por significativo movimento vertical até que saiam da corrente ascendente ou se tornem muito pesadas para serem sustentados. Em contraste, em uma precipitação estratiforme ou com crescimento mais horizontal, assim como uma convecção em decaimento, as partículas crescem enquanto estão estabelecidas em níveis altos da nuvem e em um mais fraco movimento vertical. Pode-se então usar a magnitude do movimento

vertical para classificar a precipitação em convectiva ou estratiforme (STEINER AND SMITH, 1998).

2.1.3 Eletrificação das nuvens

O início da eletrificação da nuvem é visto no solo pela reversão do campo elétrico vertical. Este chega a valores da ordem de 5000 V/m, enquanto que dentro da nuvem o campo elétrico pode chegar a 400000 V/m, dando início a descargas elétricas dentro da nuvem (VOLLAND, 1984).

O mecanismo que dá origem a campos elétricos intensos não é ainda totalmente conhecido. As teorias mais aceitas estão baseadas em dois processos diferentes: o processo indutivo (que exige previamente um campo elétrico na nuvem) e o não-indutivo (que não necessita de um campo elétrico prévio) e ambos baseiam-se na precipitação como elemento gerador do processo.

O campo elétrico de tempo bom não é suficiente para polarizar as partículas de gelo das nuvens, logo o carregamento indutivo, baseada nas propriedades microscópicas das partículas de gelo e no momento de dipolo permanente da molécula de água não explica o início da transferência de cargas entre os hidrometeoros (MACGORMAN E RUST, 1998). Enquanto que o mecanismo não-indutivo é apontado como o principal mecanismo responsável pela estrutura tripolar de cargas nas tempestades. Os *rimers* (mais pesados) ficam concentrados no meio da nuvem, enquanto que os cristais de gelo (de sinal oposto aos *rimers* e mais leves) são carregados para níveis altos da nuvem, que promove então uma segregação de partículas por tamanho e sinal de carga. E, Stolzenburg et al. (1998b) sugerem que processos adicionais (como carregamento indutivo, camada de blindagem, captura de íons) podem ser mais eficientes na presença de fortes campos elétricos em

regiões de correntes descendentes, podendo contribuir para uma estrutura mais complexa (ALBRECHT, 2008).

Uma outra teoria baseada na convecção está intimamente ligada à dinâmica geral do desenvolvimento da nuvem. De acordo com Vonnegut (1953, 1955) e Wagner e Telford (1981), um campo elétrico normal de tempo bom estabelece uma concentração de íons positivos na baixa troposfera. Esses íons positivos são transportados para o interior da nuvem através das correntes ascendentes e são capturados pelos hidrometeoros, tornando a nuvem inicialmente carregada positivamente. Conforme a nuvem cresce, ela penetra em níveis mais altos na troposfera, encontrando ar no qual a mobilidade de íons livres (ou condutividade do ar) aumenta com o aumento da altura. Esses íons são produzidos na ionosfera ou acima de 6km de altura por radiação cósmica. A nuvem em ascensão e positivamente carregada atrai preferencialmente os íons livres negativos, tornando o topo da nuvem negativamente carregado, também conhecido como camada de blindagem. Os hidrometeoros dessa camada capturam os íons livres negativos que são transportados para níveis mais baixos da nuvem através das correntes descendentes e entranhamento lateral. Simulações numéricas de carregamento elétrico pela teoria da convecção não conseguiram produzir carga suficiente numa nuvem para induzir um fluxo de cargas positivas perto do solo por efeito de corona (CHIU E KLETT, 1976).

2.1.4 Relâmpagos: tipos, etapas e características

Relâmpago é definido como sendo uma descarga transitória de alta corrente cujo comprimento percorrido tem dimensão de quilômetros (UMAN E KRIDER, 1989). Denomina-se os tipos de relâmpagos em função de sua origem e do ponto onde terminam. Eles podem ocorrer (1) de uma nuvem para o solo (chamado Nuvem-solo ou NS), (2) do solo para a nuvem (chamado Solo-Nuvem ou SN), (3) dentro da nuvem (chamado Intranuvem ou IN), (4) entre nuvens, (5) de uma nuvem para a atmosfera acima dela e (6) de uma nuvem para um ponto qualquer no ar (descargas no ar). Os relâmpagos que

envolvem o solo podem ser divididos em negativos e positivos. Assim, existem quatro tipos: NS negativo, NS positivo, SN negativo e SN positivo (SABA, 1997).

As seguintes etapas de um raio ascendentes, ou seja SN, podem ocorrer quando sob uma tempestade há uma estrutura metálica alta, e a partir dela a intensificação do campo elétrico no topo desta estrutura pode exceder a quebra de rigidez dielétrica do meio e iniciar um líder ascendente que se propaga em direção à base da nuvem. Uma vez estabelecido o caminho entre o solo e a nuvem, uma corrente contínua inicial (CCI) fluirá por esse canal durante dezenas ou centenas de milissegundos. A diminuição ou interrupção da corrente pode gerar a ocorrência de líderes descendentes e produzir descargas subsequentes similares às de um raio descendente (SCHUMANN, 2013).

A formação desses raios ascendentes foi estudada por Wang e colegas em 2008 que descreveram dois tipos de mudança de campo elétrico associada a eles de um cata-vento e sua torre de proteção de raios. O primeiro tipo de mudança resulta de um *leader* positivo ascendente auto iniciado de um objeto alto (i.e., não por uma atividade luminosa precedente). O segundo tipo está associado com descargas em nuvens seguida de uma mudança no campo elétrico resultando no desenvolvimento de um *leader* positivo ascendente que apoia a noção que uma descarga precedente rapidamente muda o ambiente do campo elétrico sob um objeto alto e desencadeia um *leader* ascendente desse objeto. Dados de campo elétrico sugeriram que a aproximação de um brilho intranuvens estava horizontalmente propagando a ocorrência do desenvolvimento de um *leader* negativo durante a corrente contínua de um raio nuvem-solo positivo, e a mudança no campo elétrico criado pela aproximação de *leaders* negativos causou a iniciação de *leaders* positivos das torres (WARNER ET AL, 2013).

Por muitos anos, relâmpagos foram detectados primariamente por observação visual. Hoje, raios entre a nuvem e a superfície são localizados por meios de um instrumento chamado lightning direction-finder, que funciona detectando ondas de rádio produzidas pelo raio.

2.1.5 Radares

Os radares meteorológicos enviam ondas eletromagnéticas para atmosfera que incidem em alvos suspensos. Ao incidir nesses alvos, parte da radiação eletromagnética é refletida de volta ao radar. O radar então mede a potência de retorno da onda eletromagnética que foi emitida através do fator de refletividade do radar. A refletividade do radar (Z) é então proporcional à concentração de hidrometeoros ($N(D)$) à sexta potência do diâmetro (D) dos hidrometeoros presente no volume de amostra, ou seja:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD \quad (1)$$

A unidade de Z é $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$, gerando valores da ordem ou superiores a 10^6 , logo comumente é apresentada como dBZ:

$$\text{dBZ} = 10 \log_{10} Z \quad (2)$$

A taxa de precipitação (R) também é proporcional à concentração de hidrometeoros ($N(D)$), mas neste caso à terceira potência do diâmetro (D) dos hidrometeoros e à velocidade de queda dos hidrometeoros ($v(D)$), ou seja:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D)D^3 v(D) dD \quad (3)$$

Logo, Z e R possuem funções semelhantes e podemos relacionar então a refletividade medida pelo radar com a intensidade da precipitação através de uma relação entre as duas variáveis da forma:

$$Z = aR^b \quad (4)$$

Onde a e b dependem do tipo da precipitação, como convectiva e estratiforme.

Além de medir a intensidade da chuva, o radar Doppler pode mensurar a velocidade com que a precipitação está se movendo horizontalmente (se aproximando ou se afastando da antena) pelo pulso de retorno do radar que mudará em frequência. Porque partículas de precipitação são carregadas pelo vento, o radar Doppler pode em uma tempestade severa revelar seus ventos (AHRENS, 2008).

Entretanto, algumas das limitações apresentadas pelos radares são: *Range Folding*, Ângulo de visão, Resolução, Atenuação, Homogeneidade, Fase e Uniformidade (WEATHER RADAR FUNDAMENTALS, 2012).

Range Folding consiste no tempo entre os pulsos emitidos por um radar que não devem ser longos, o suficiente para que a energia interceptada do primeiro pulso retorne antes que o radar tenha emitido outro pulso, assim, a localidade da precipitação será plotada em correta posição.

O ângulo de visão pode ser um empecilho para alvos muito longes do radar, dependendo o tipo de precipitação e das condições atmosféricas. Quando o alvo está muito distante do radar, ainda que utilizando os menores ângulos, componentes importantes podem ser ultrapassadas. Outro problema são as obstruções físicas, por exemplo as causadas pela topografia local, que recebe o nome de *beam blocking*.

Outra limitação consiste na resolução pois as imagens obtidas pelo radar contem áreas de variadas resoluções. É evidente o pequeno tamanho relativo dos pixels perto da localização do radar e um grande tamanho para aqueles na borda do *radar's range*.

A atenuação pode ocorrer nas condições em que uma intensa tempestade está perto do radar, fazendo com que áreas de precipitação mais distante pareçam menos intensas. Em casos severos de atenuação, precipitações distantes podem nem aparecer no *display* do radar.

A limitação da homogeneidade acontece quando o tamanho da partícula é muito menor que o comprimento de onda do radar. Devido as equações dos radares serem baseadas nas aproximações de *Rayleigh scattering*, qualquer tamanho menor de alvo resultará em erros para calcular a interceptação e valores de reflectividade.

A fase e a uniformidade também são limitantes pois equações de radar assumem que partículas de precipitação estão em uma mesma fase e considera que todas as partículas são distribuídas uniformemente pela amostra de volume, mas isso geralmente não é o caso.

2.2 Material e métodos

Com base na coleta de dados no verão 2011/2012, pôde-se registrar quatorze raios ascendentes que tiveram início a partir de uma das torres situadas sobre o Pico do Jaraguá, na cidade de São Paulo, com o auxílio de algumas câmeras ultrarrápidas. Em termos geográficos, a torre se encontra nos arredores de um marco correspondente à latitude $23^{\circ}27'31.3''$ S e à longitude $46^{\circ}46'00.4''$ W.

No período do registro dos raios, o experimento de campo CHUVA-GLM Vale do Paraíba (MACHADO ET AL., 2014) mediu detalhadamente a estrutura da precipitação e também realizou medições de raios com 11 redes de sensores diferentes, incluindo o Lightning Mapping Array (LMA), que mapeia as fontes eletromagnéticas de emissão dos raios em 3D fornecendo o caminho por onde a descarga se propagou e o Lightning detection NETWORK (LINET).

A partir da tabela 1, de informações da Climanálise boletim (2012) e boletins técnicos do CPTEC/INPE pode-se ter uma configuração geral das condições atmosféricas nos dias dos registros dos raios ascendentes.

Tabela 1. Condições meteorológicas gerais das tempestades que produziram os raios ascendentes estudados.

Data da Tempestade	Quantidade de raios ascendentes	Condição Meteorológica Geral
15/01/2012	4	Convecção associada a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)
10/03/2012	2	Áreas de instabilidades associadas à alta umidade e temperatura
15/03/2012	3	Áreas de instabilidades associadas à aproximação de uma frente fria
23/03/2012	1	Áreas de instabilidades associadas à aproximação de uma frente fria
27/03/2012	4	Áreas de instabilidades associadas à aproximação de uma frente fria

Fonte: Adaptado de Saba et al (2012)

Para aprimorar a análise e identificar o tipo de sistema (e.g., complexo convectivo de mesoescala, supercélulas, multicélulas), a região de precipitação (e.g., bigorna, núcleo convectivo, área estratiforme traseira) e o estágio de desenvolvimento (e.g., iniciação, maturação ou dissipação) da tempestade que gerou o raio ascendente, além da evolução temporal da tempestade, verificação de sua estrutura vertical e determinação do caminho de

propagação das descargas elétricas coletou-se imagens de satélite, dados de radar, dados e imagens do SPLMA e dados do LINET.

Três radares mediram a precipitação durante o experimento CHUVA-GLM Vale do Paraíba: São Roque, FCTH e IACIT. Os dados de radar são um produto chamado CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator), que transforma os dados medidos de coordenadas polares para cartesianas, gerando mapas de refletividade do radar em níveis de altura constante. Como foi mencionada anteriormente, a refletividade do radar (equação 1) está relacionada com a precipitação (equação 3) através da equação 4, logo quanto maior a refletividade maior será a taxa de precipitação.

A classificação da precipitação em convectiva ou estratiforme baseou-se em Steiner e Houze (1995) em uma altitude de 3km com auxílio de um algoritmo no qual qualquer ponto de grade do campo de refletividade do radar maior que 40 dBZ é automaticamente categorizado como convectivo. Se um pixel não é identificado como convectivo no primeiro passo, calcula-se a refletividade de fundo em um raio de 11km. Para ser considerado um centro convectivo, a diferença de refletividade dada pelo *echo* de um radar deve exceder a intensidade de refletividade de fundo do ambiente local. O resultado é a seguinte curva (5), em que ΔZ é a diferença entre a refletividade em um pixel e a refletividade de fundo Z_{bg} , a qual deve ser excedida pelo pixel para ser designada como centro convectivo:

$$\Delta Z = \begin{cases} 10, & Z_{bg} < 0 \\ 10 - \frac{Z_{bg}^2}{180}, & 0 \leq Z_{bg} \leq 40 \\ 0, & Z_{bg} \geq 40 \end{cases} \quad (5)$$

ΔZ é dado em decibel e Z_{bg} em dBZ. Pontos acima ou na curva são classificados como convectivos. O restante dos pixels é estratiforme se a refletividade for maior que 5 dBZ (refletividades menores que 5 dBZ não são consideradas por estarem próximas ao nível de ruído do radar).

As figuras dos raios usando dados de LMA e LINET foram feitas considerando o horário dos dados de radar mais próximos do instante de ocorrência dos raios ascendentes mais cinco minutos de forma a obter o acumulado dos raios ocorridos nesse melhor intervalo. Os raios plotados usando LINET puderam ser divididos entre intranuvem e nuvem-solo. E, também plotou-se os flashes no horário dos raios ascendentes registrados usando o LMA.

2.3 Resultados e discussão

As imagens analisadas foram escolhidas de modo que representassem melhor as condições atmosféricas no momento de ocorrência dos raios ascendentes.

Os resultados mostram que no dia 15/01/2015 a região de estudo estava sob efeito de um episódio de ZCAS pela tabela 1 e é perceptível pelas imagens de satélite, que mostram uma banda de nebulosidade orientada de noroeste para sudeste (Figura 2). A atuação desse sistema influenciou na produção de pequena área de acumulados diários de fontes eletromagnéticas superiores a 1000 (Figura 1). Pela figura 2, nota-se também que as nuvens que cobrem o estado de São Paulo, minutos antes da ocorrência dos quatro raios ascendentes, são núcleos convectivos que possuem maior desenvolvimento vertical (topo da nuvem atinge -60°C) e a área estratiforme traseira com menor temperatura no topo da nuvem, também visto na conjuntura da figura 3c. Esse fato relaciona-se com a variação da refletividade do radar com a altura indicando a presença da banda brilhante do radar (Figura 3a e 3b). O valor de refletividade a 2km é 20dBZ, é máximo em 3km, altura normalmente afetada pela assinatura da banda brilhante com 30dBZ e decresce rapidamente com o

aumento dos níveis (Figura 3d). A plotagem LMA na figura 5a destaca a parte leste da torre do pico do Jaraguá com forte presença de fontes eletromagnéticas mas também há um pouco de atuação na própria região. Na figura 5b há uma predominância de raios intranuvens (373) em relação aos raios nuvem-solo (122). Vê-se a propagação de um raio intranuvem sobre a torre, um rápido período sem atividade e em seguida uma propagação partindo da torre (raio ascendente) (Figura 6a); na figura 6c nota-se raios nuvem-solo e na figura 6b e 6d vê-se um raio intranuvem se aproximando da torre e em seguida o raio ascendente.

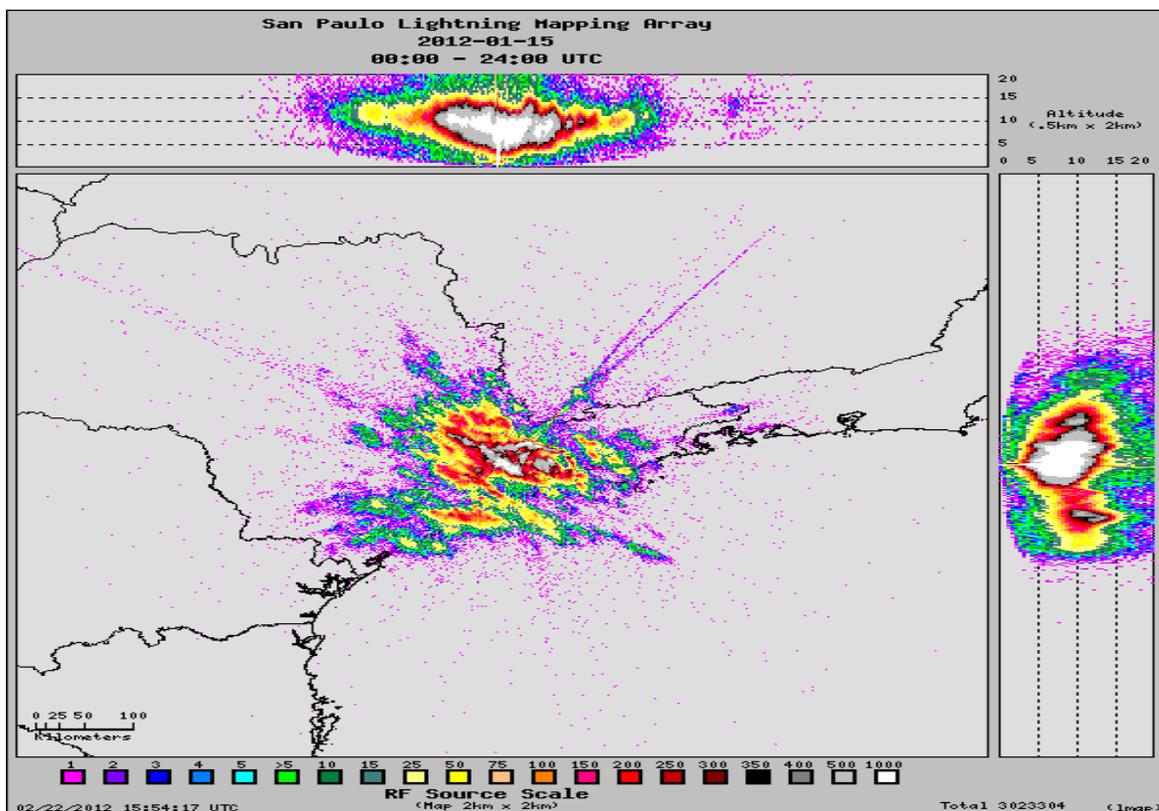
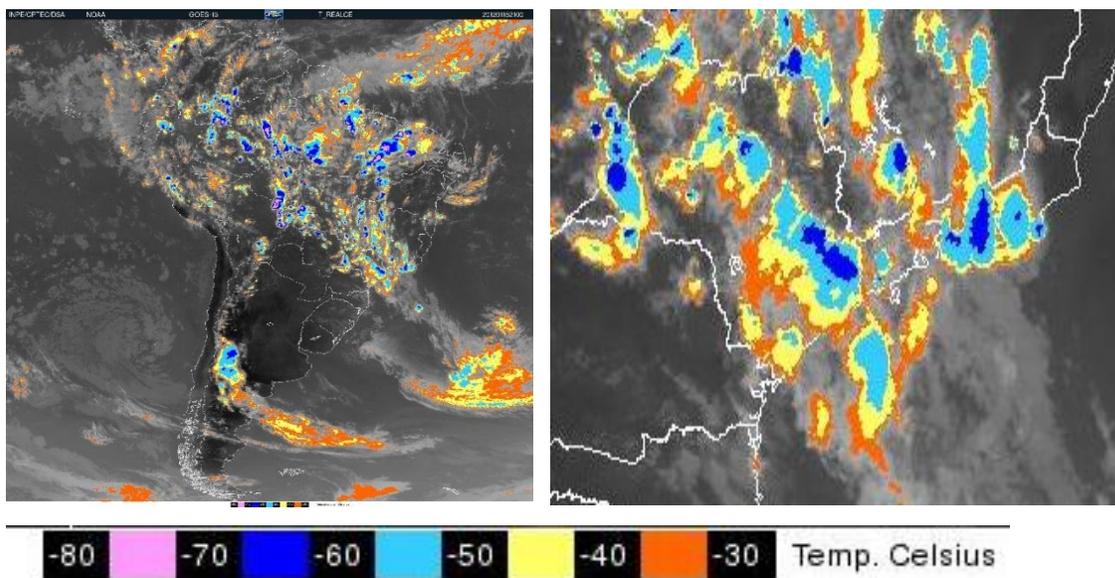


Figura 1. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 15/01/2012.



(a)

(b)

Figura 2. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 15/01/2012 às 21:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.

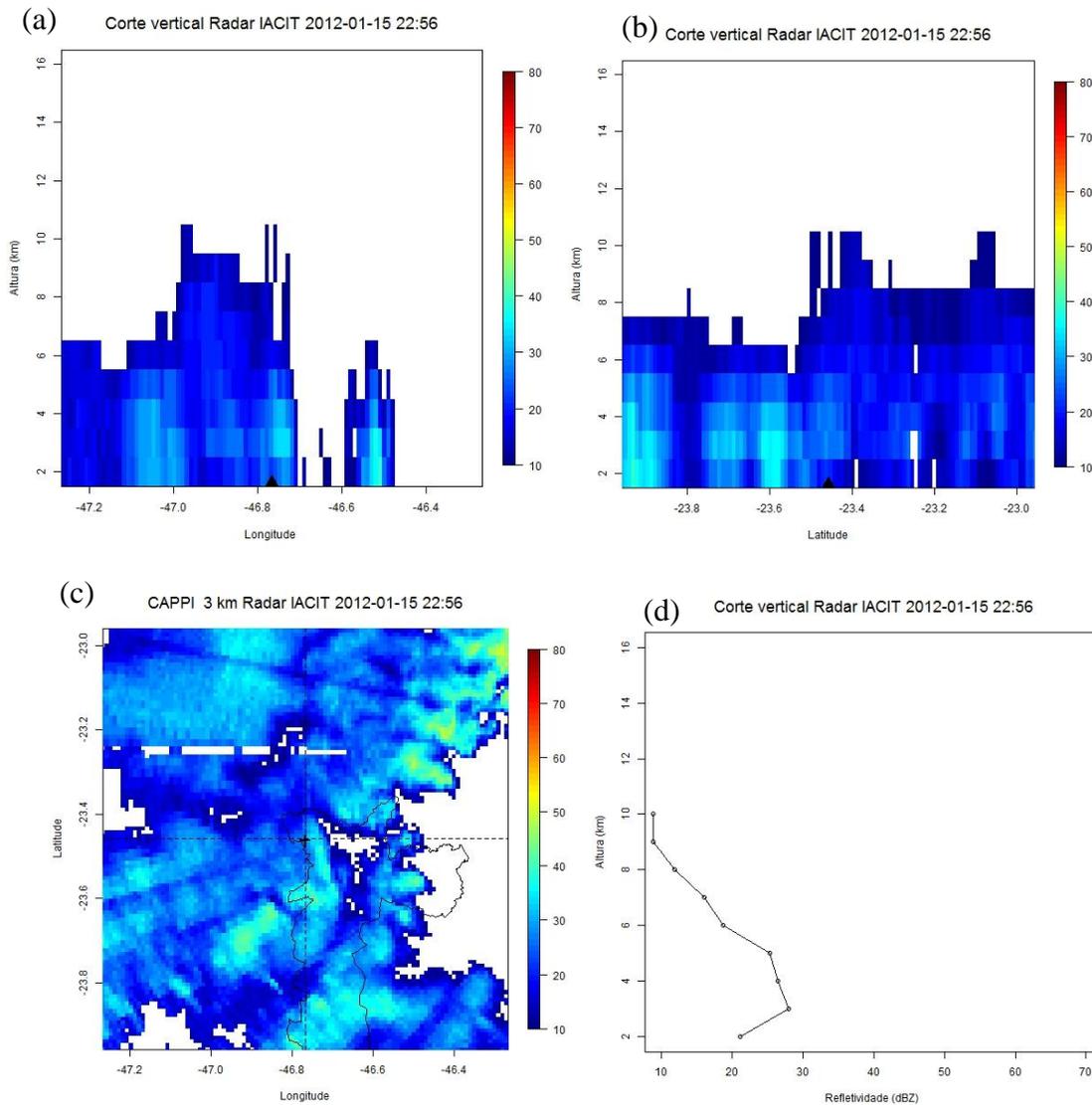


Figura 3. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar IACIT para o dia 15/01/2012 às 22:56 GMT com a altura em função da longitude (a), altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).

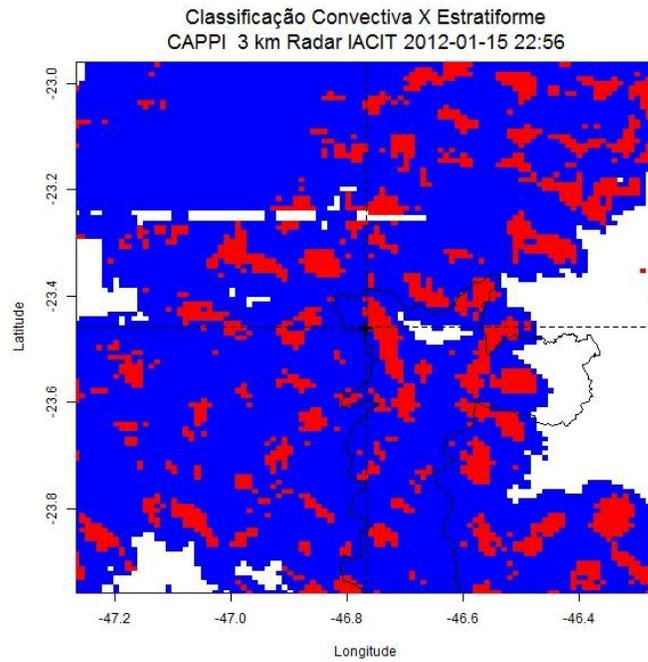


Figura 4. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar IACIT para o dia 15/01/2012 às 22:56 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).

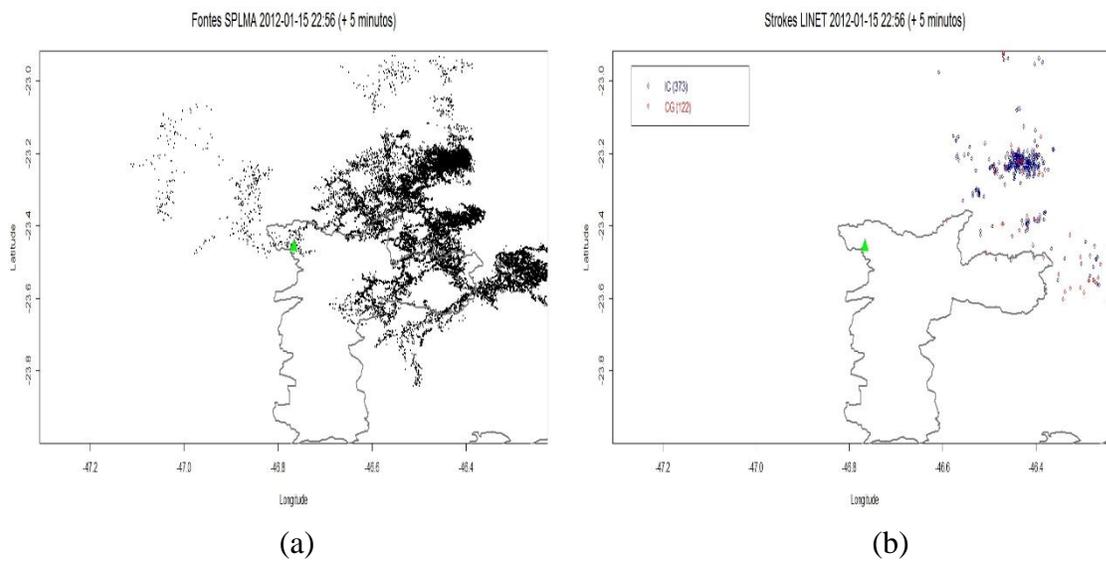


Figura 5. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 15/01/2012 no horário de 22:56 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.

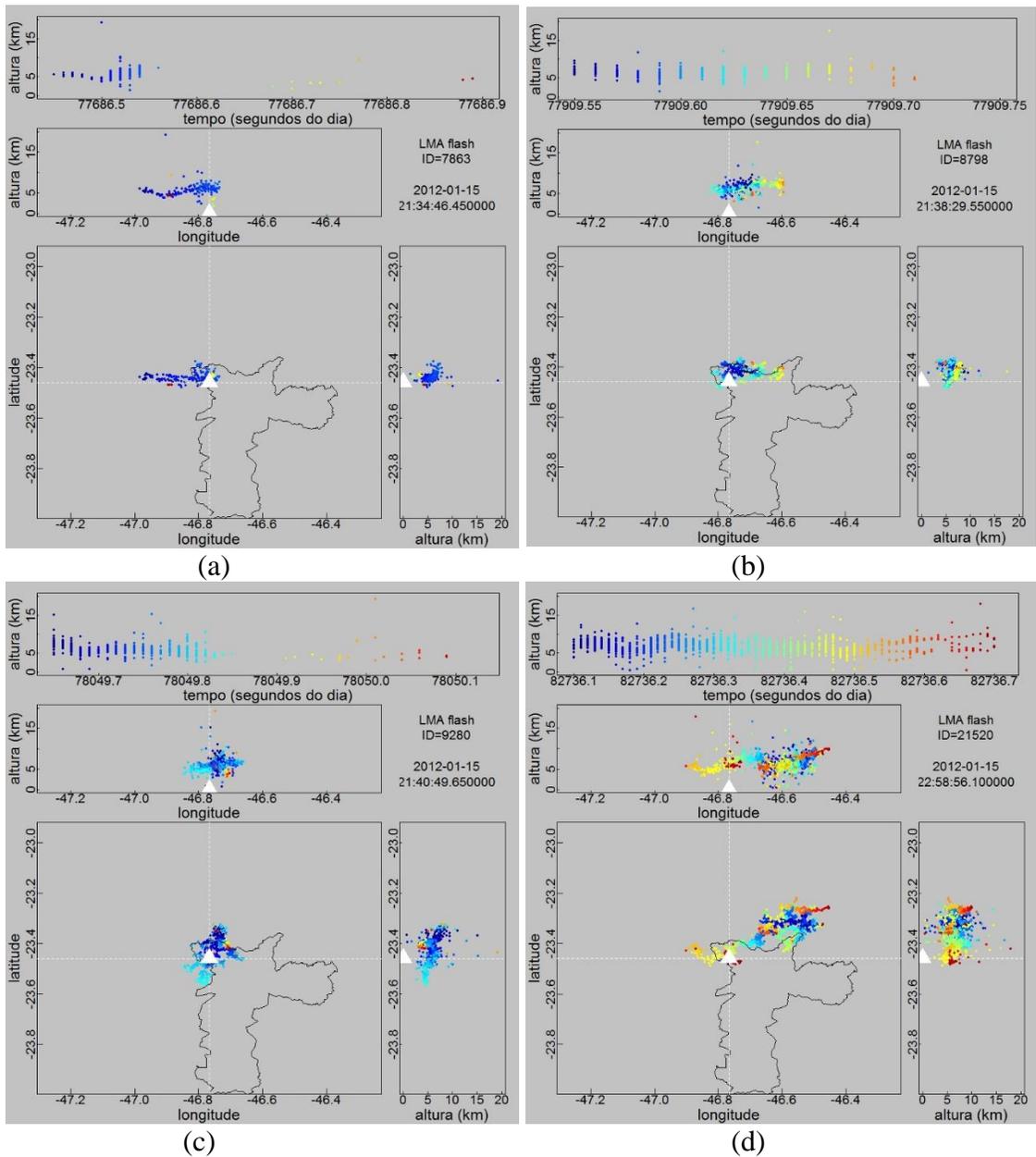


Figura 6. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os quatro raios ascendentes ocorridos no dia 15/01/2012 nos horários (a) 21:34:46 GMT; (b) 21:38:29 GMT; (c) 21:40:49 GMT e (d) 22:58:56 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.

O dia 10/03/2012 em que registrou-se a ocorrência de dois raios ascendentes estava sob influência de áreas de instabilidades com convecção associada a umidade e temperatura altas (tabela 1) como visto pelo grande sistema convectivo da figura 8, e observado aglomerados de alta dBZ, indicando possíveis núcleos convectivos (Figura 9c). A figura 7 mostra que foi produzido acumulados superiores a 1000 em grande região do estado de São Paulo, incluindo a região de estudo. A refletividade do radar vista na figura 9a, 9b e 9d confirma também a banda brilhante do radar em uma altura de cerca de 5 km em que atinge seu máximo valor próximo de 40dBZ quando passa a decrescer com a altitude. A figura 11a mostra a distribuição de raios detectados pelo SPLMA mais concentrada a oeste da torre do pico do Jaraguá, nota-se nesse caso a identificação de mais raios nuvem-solo (535) do que intranuvens (347) (Figura 11b). A plotagem no horário do raio ascendente mostra a propagação das descargas elétricas, onde vê-se em 12a uma atividade intensa com a mesma configuração que em 11a na proximidade da torre. O flash em 12b localiza-se sobre a torre e propaga-se afastando-se dela.

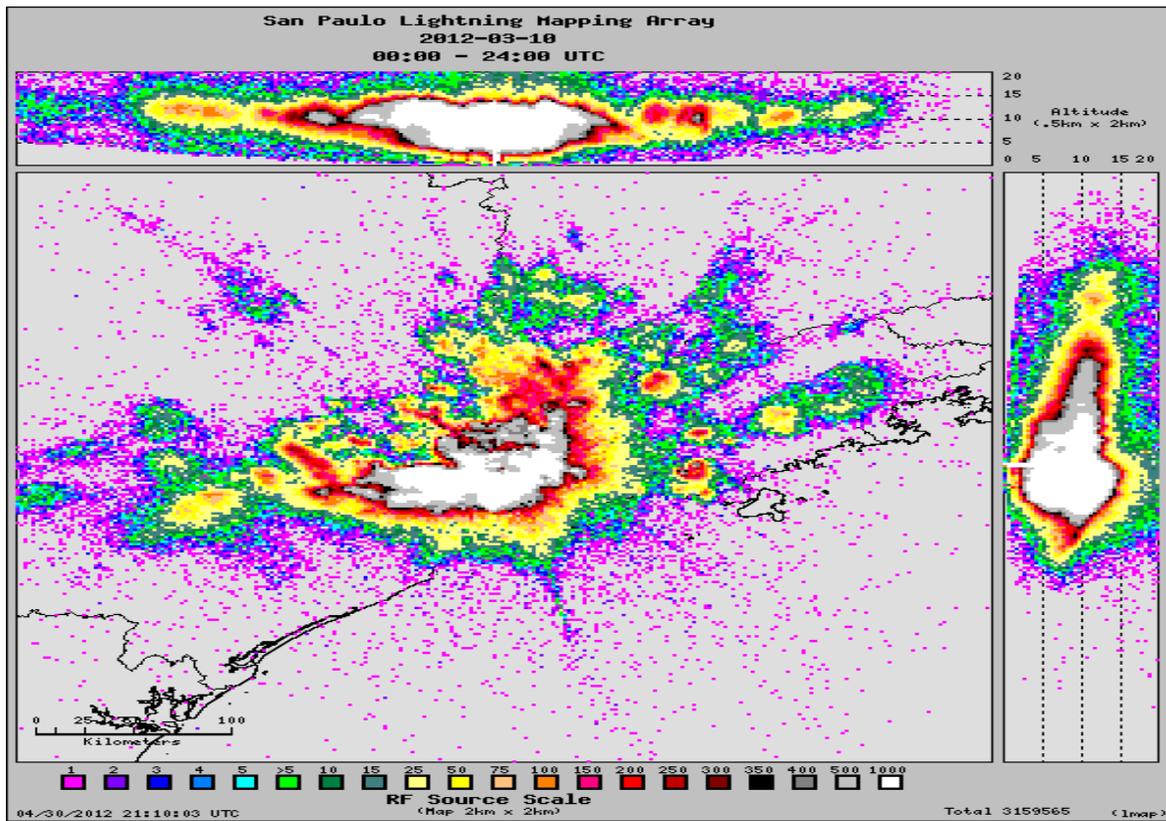


Figura 7. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 10/03/2012.

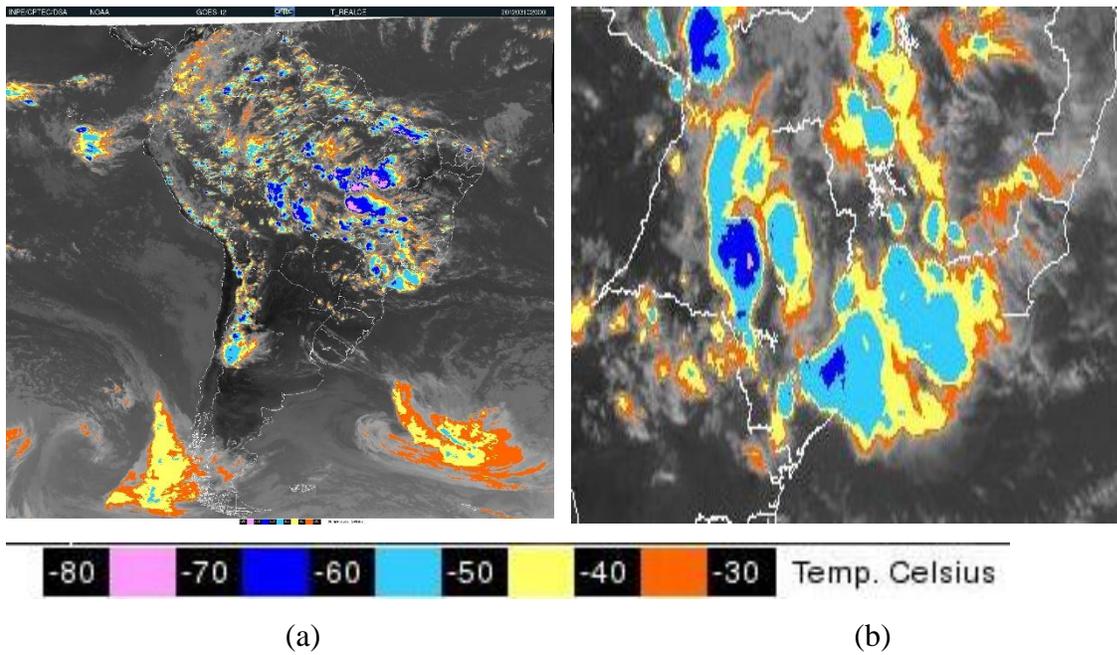


Figura 8. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 10/03/2012 às 20:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.

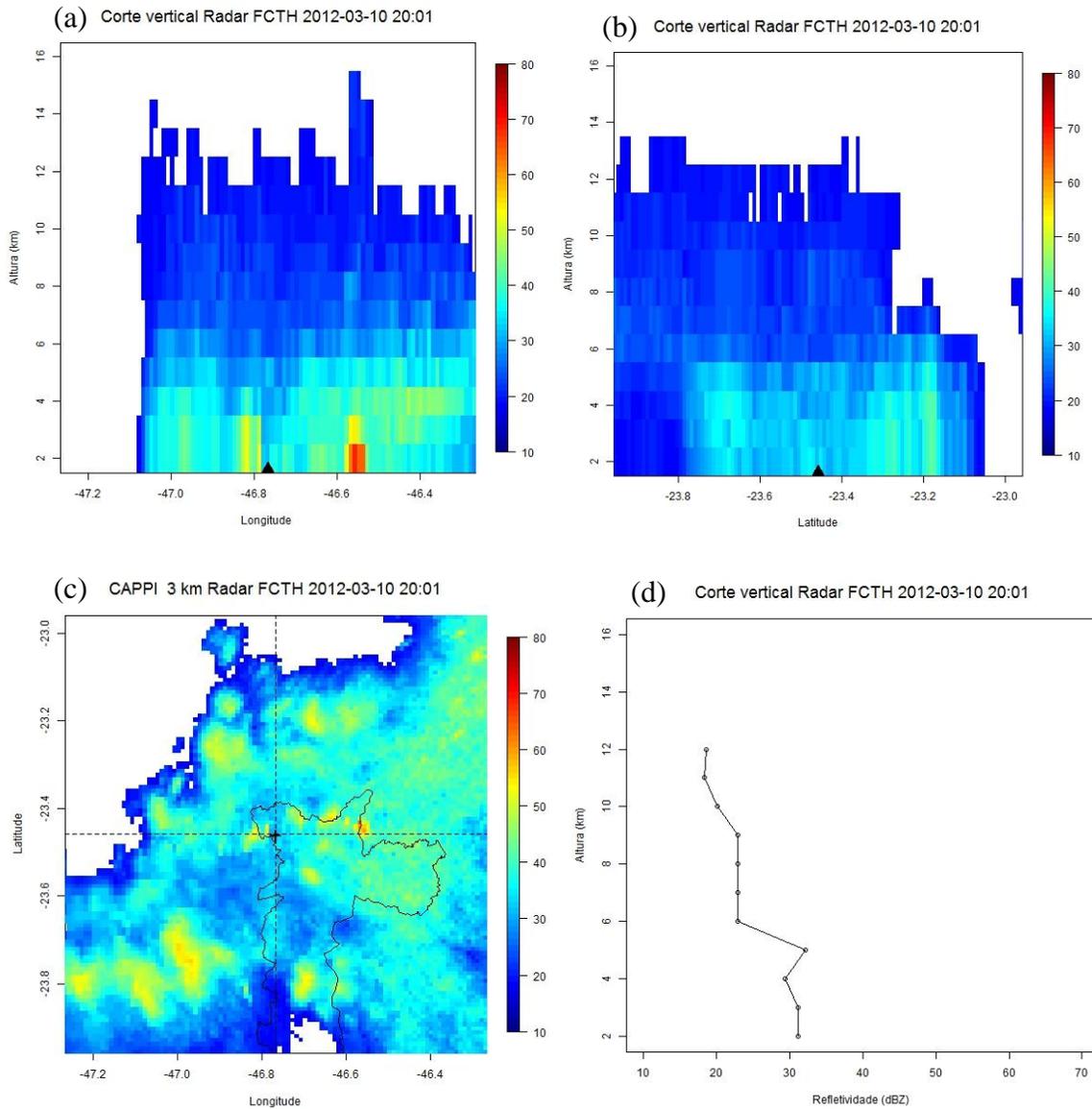


Figura 9. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 10/03/2012 às 20:01 GMT com a altura em função da longitude (a), altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).

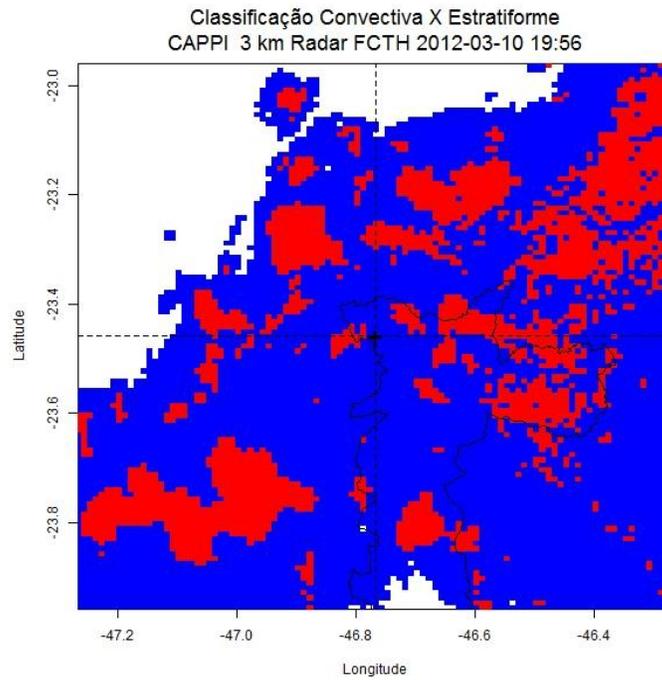


Figura 10. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 10/03/2012 às 20:01 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).

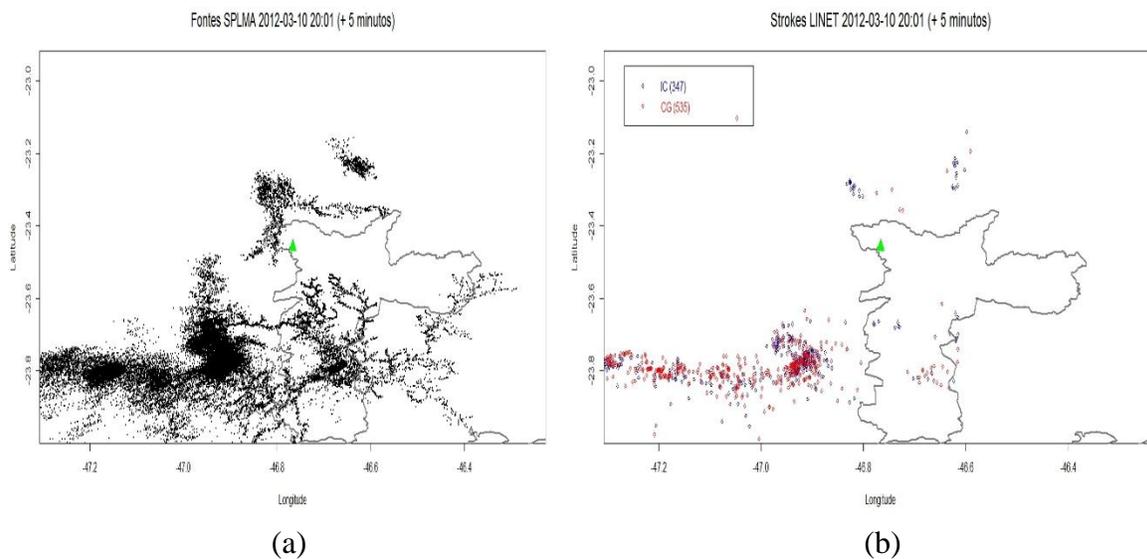


Figura 11. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 10/03/2012 no horário de 20:01 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.

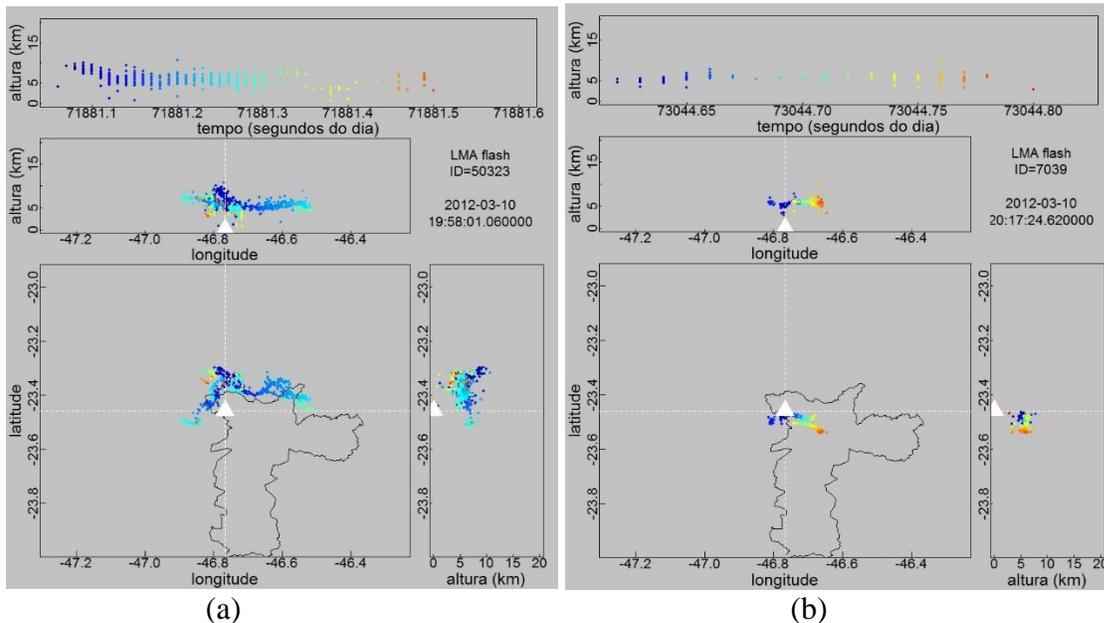


Figura 12. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os dois raios ascendentes ocorridos no dia 10/03/2012 nos horários (a) 19:58:01 GMT e (b) 20:17:24 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.

Destaca-se que para os dias 15/03/2012, 23/03/2012 e 27/03/2012, linhas de instabilidade associada a frentes frias eram a condição geral da atmosfera para a região de estudo. Em 15/03/2012, o acumulado de fontes eletromagnéticas foi o único dia de estudo de ocorrência de raios ascendentes abaixo de 1000 (Figura 13). Na figura 14 nota-se áreas de nuvens de pouco desenvolvimento vertical, com topo das nuvens apresentando temperatura de -30°C perto de nuvens bem desenvolvidas verticalmente sobre o estado de São Paulo, também destacado pela figura 15c. E, quando ao localizar o ponto de estudo (torre localizada no pico do Jaraguá) na figura 15a e 15b, percebe-se que se encontra nessa região valores medianos de refletividade e uma proximidade de núcleos com altos valores. Pela figura 15d é visto que os valores de refletividade variam pouco ao redor de 35dBZ entre os 2km e 5 km até decrescer seu valor. A precipitação pode ser classificada como estratiforme pois é menor que 40dBZ e dificilmente precipitação com maior refletividade seria

estratiforme. Sendo o único evento em que não se notou a assinatura da banda brilhante, pode-se sugerir que a precipitação estratiforme não estava bem definida na localização. Fontes LMA, na figura 17a, atingem uma grande área em torno da torre do pico do Jaraguá. Pela figura 17b, identifica-se 54 como raios nuvem-solo e 28 como raios intranuvem. A propagação do raio é vertical, horizontal e retorna para a torre (Figura 18a). Nota-se a presença de um raio nuvem-solo a leste da torre e em seguida o raio ascendente (Figura 18b). Vê-se uma propagação sobre a torre (raio intranuvem), um rápido período sem atividade e em seguida uma propagação partindo da torre (raio ascendente) intenso e de ampla extensão que chega a descender nos arredores (Figura 18c).

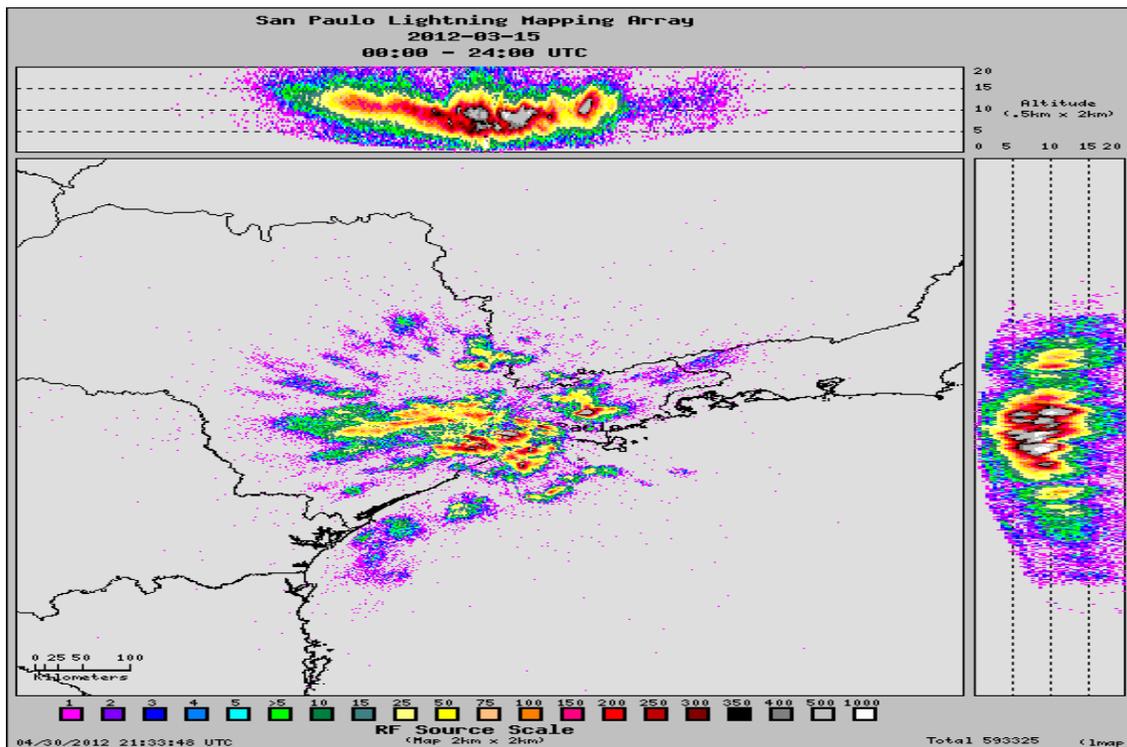
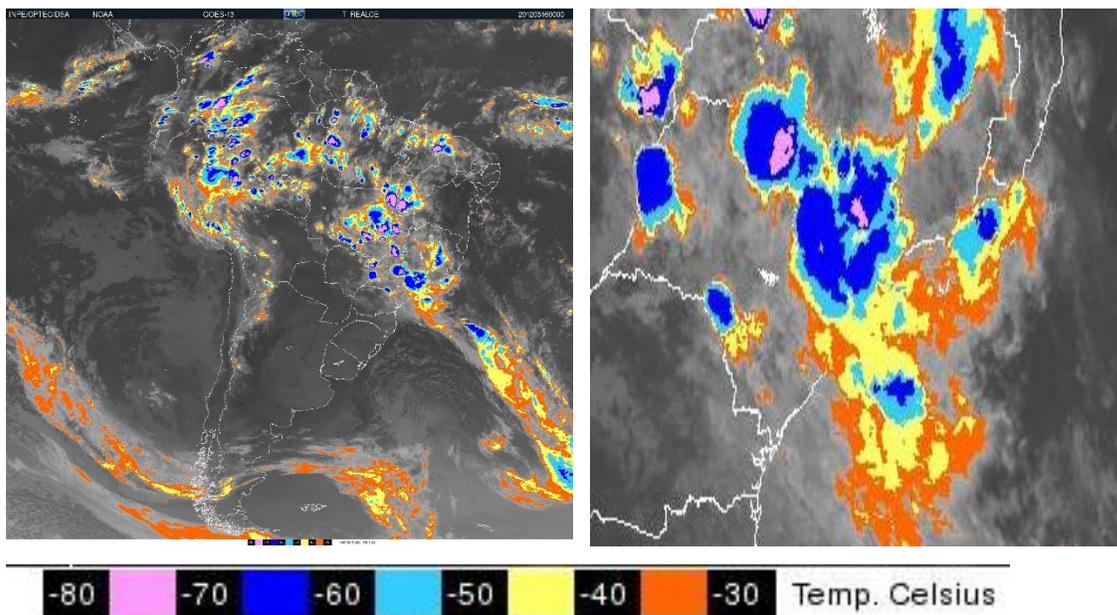


Figura 13. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 15/03/2012.



(a)

(b)

Figura 14. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 16/03/2012 às 00:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.

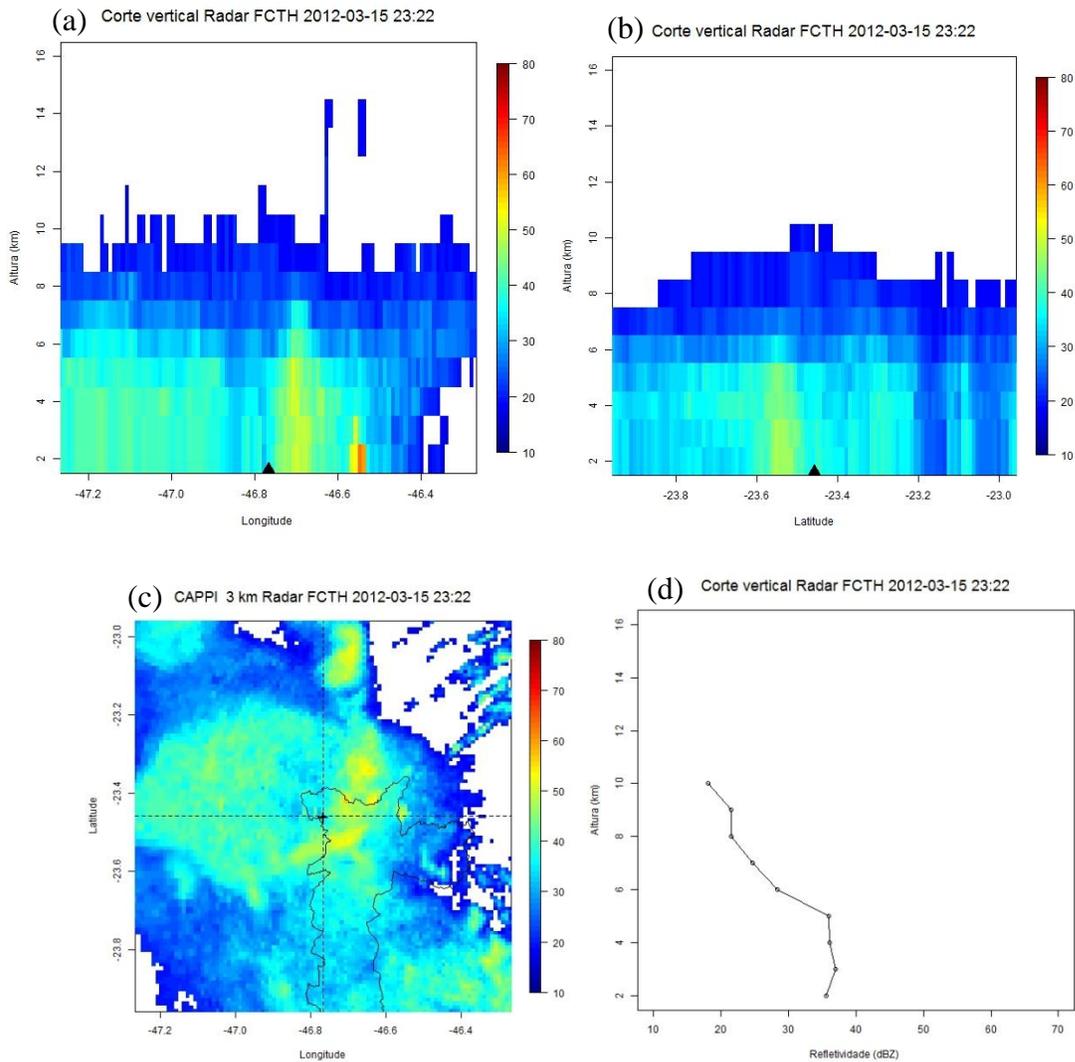


Figura 15. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 15/03/2012 às 23:22 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).

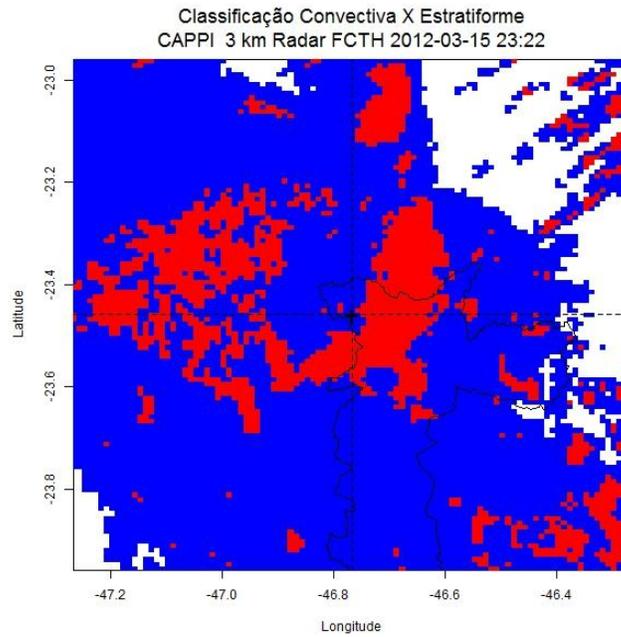


Figura 16. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 15/03/2012 às 23:22 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).

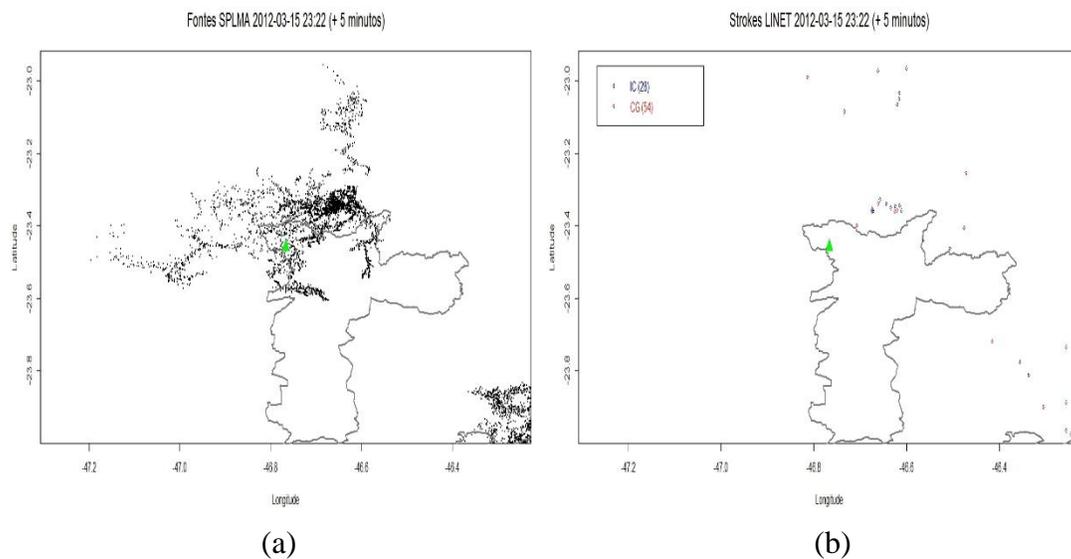


Figura 17. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 15/03/2012 no horário de 23:22 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.

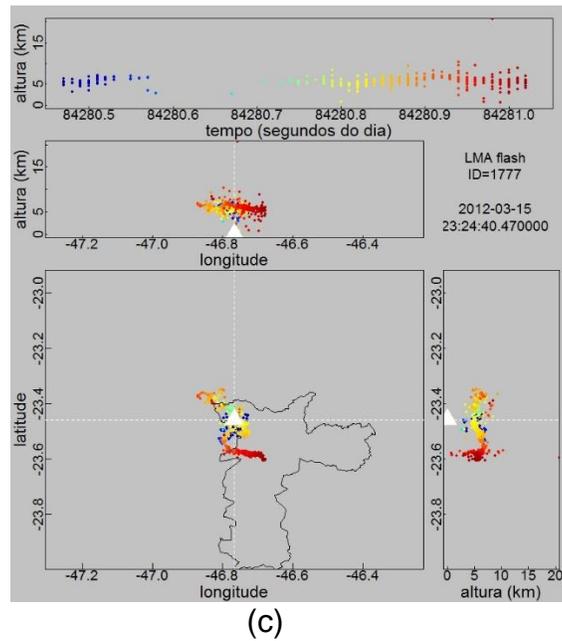
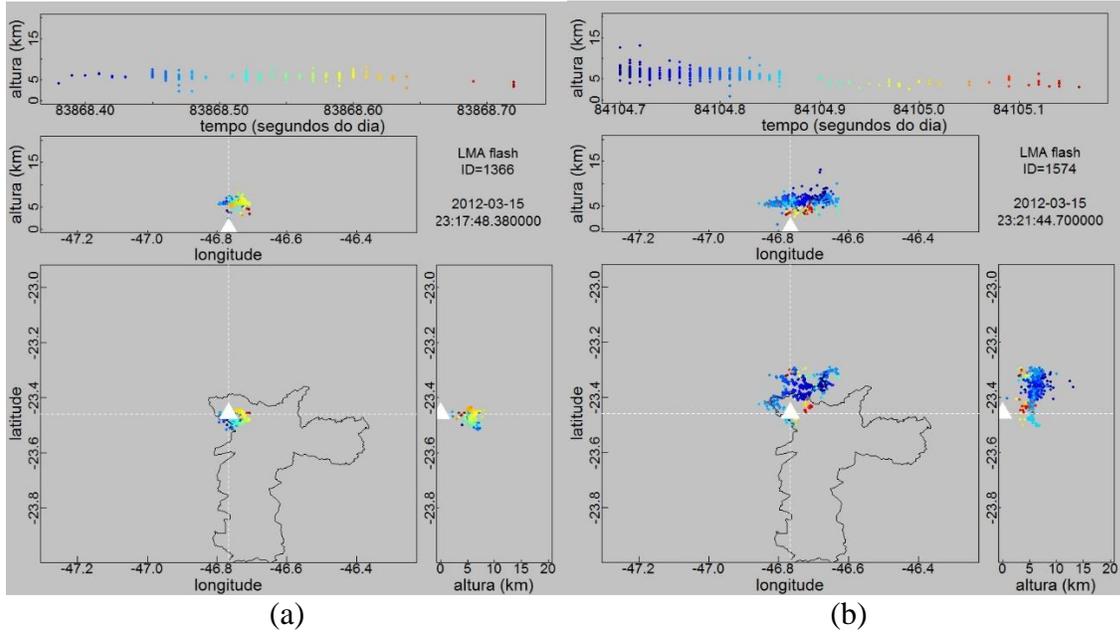


Figura 18. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os três raios ascendentes ocorridos no dia 15/03/2012 nos horários (a) 23:17:48 GMT; (b) 23:21:44 GMT e (c) 23:24:40 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.

Observa-se que o acumulado de fontes eletromagnéticas superou o valor de 1000 em 23/03/2012 e 27/03/2012, sendo a região atingida no dia 23 (Figura 19) maior que no dia 27 (Figura 25). Pela figura 20, vê-se grande região sob nuvens com pouco desenvolvimento vertical e topo de -30°C a leste de um núcleo com grande desenvolvimento e temperaturas de até -60°C . Confirma-se essa conjuntura na figura 21a ao analisar longitudinalmente a região, em que a torre do pico do Jaraguá encontra-se a leste de uma área de grande refletividade até mais altos níveis enquanto que sua própria região possui valores medianos. E, a figura 21d apresenta a banda brilhante do radar com máximo valor de refletividade próximo de 40 dBZ em 5 km e descréscimo com a altura., podendo-se classificar como precipitação estratiforme. Pela imagem 23a percebe-se fontes LMA distribuídas a oeste da torre do pico do Jaraguá, a identificação com a plotagem dos dados LINET apresentam 61 raios intranuvens e 174 de raios nuvem-solo. No horário do raio ascendente, pela figura 24 há a propagação de um extenso raio intranuvem que passa pela torre.

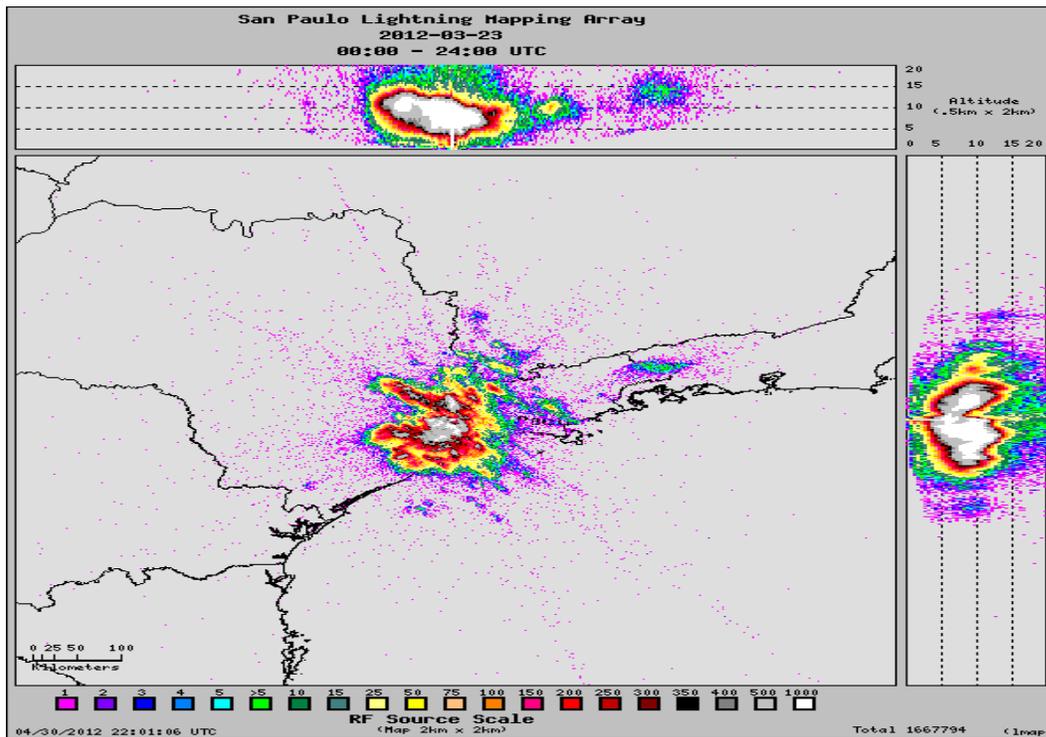
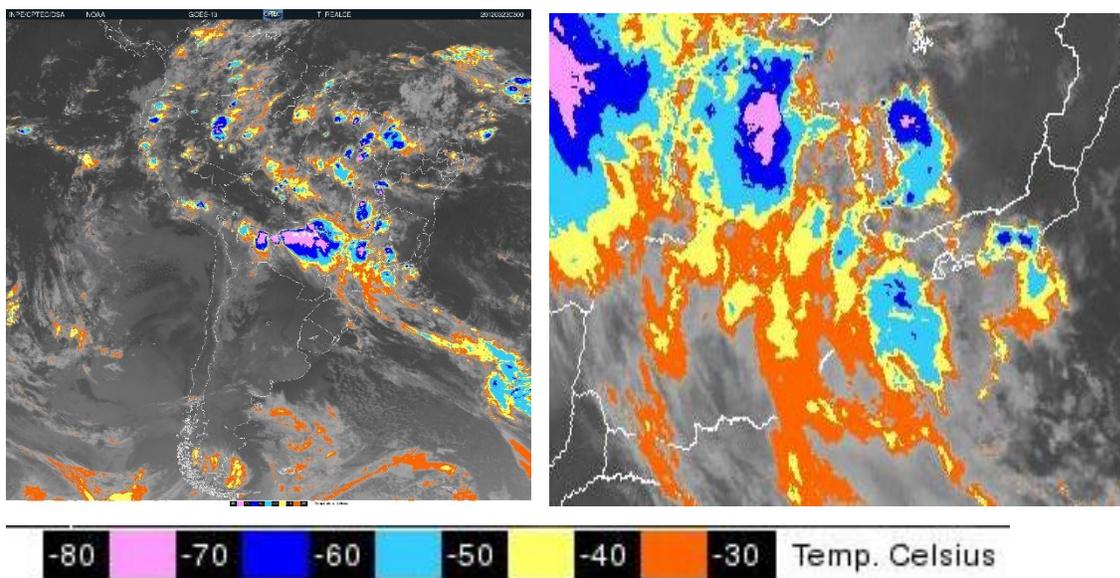


Figura 19. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 23/03/2012.



(a)

(b)

Figura 20. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 23/03/2012 às 03:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.

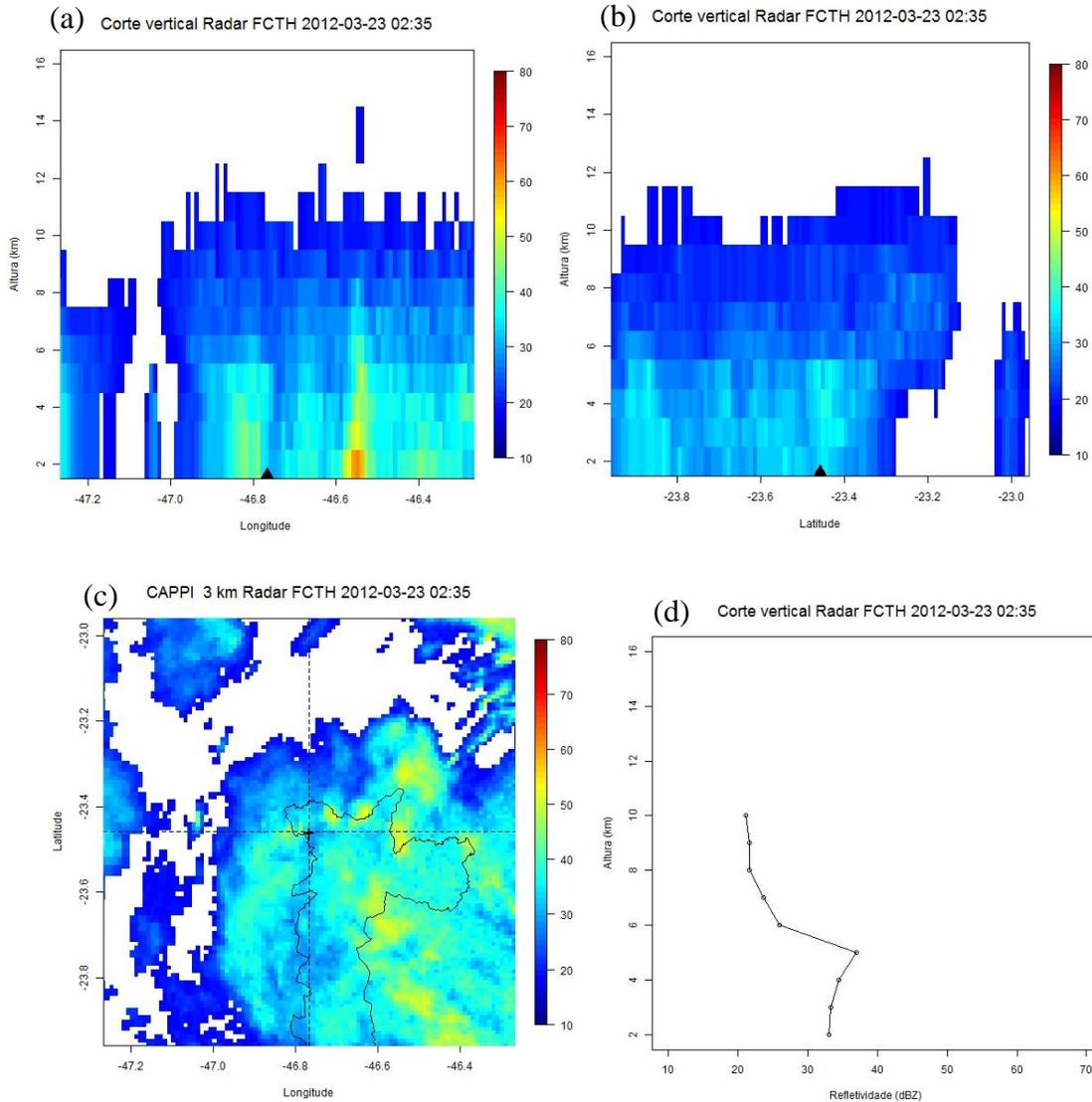


Figura 21. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 23/03/2012 às 02:35 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).

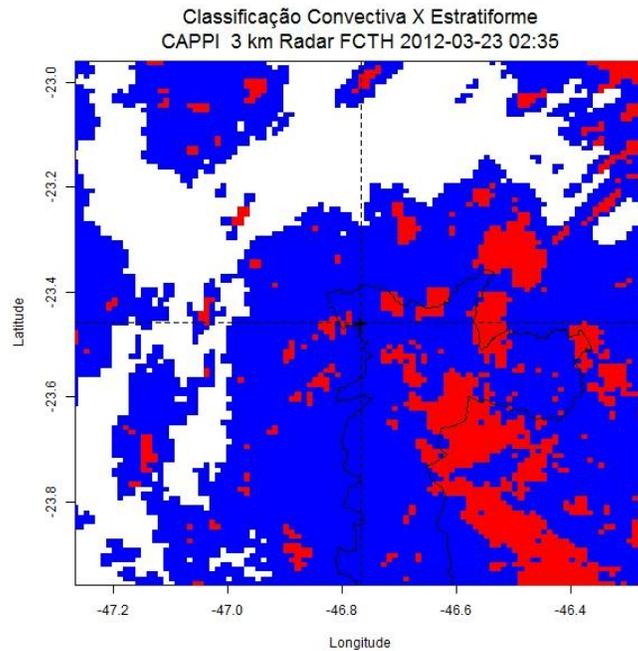


Figura 22. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 23/03/2012 às 02:35 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).

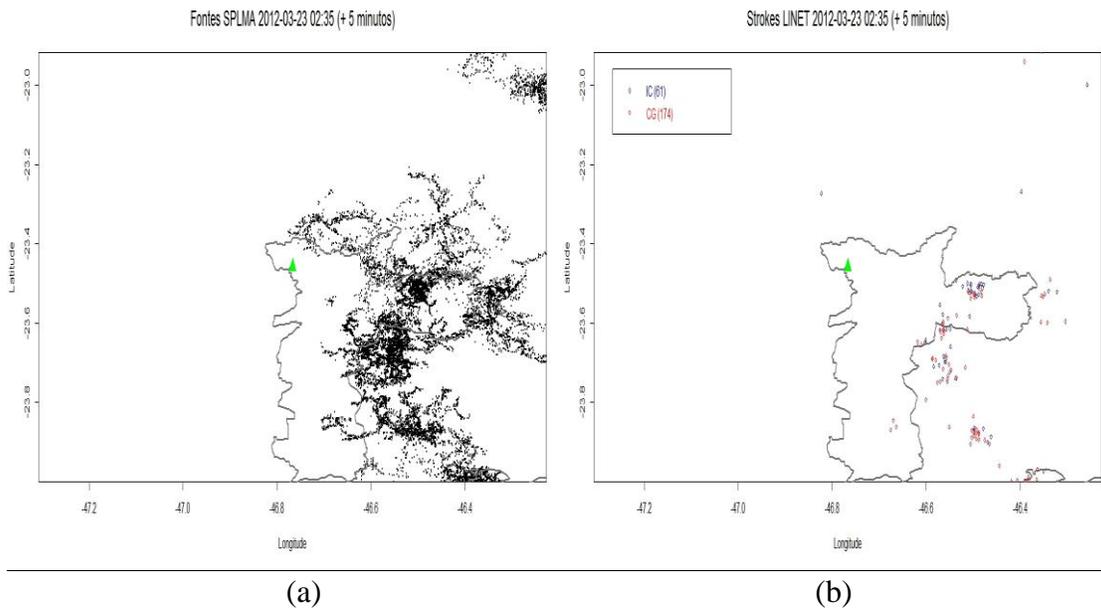


Figura 23. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 23/03/2012 no horário de 02:34 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.

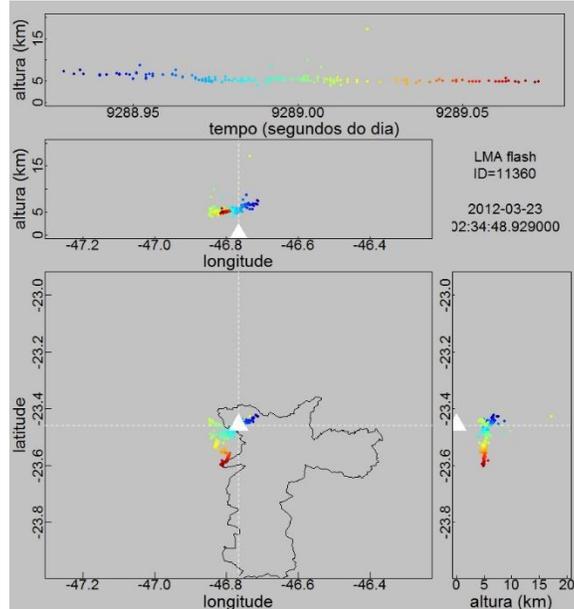


Figura 24. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para o raio ascendente ocorrido no dia 23/01/2012 no horário 02:34:49 GMT em um intervalo de ± 1 segundos.

Para 27/03/2012, tem-se que na figura 26 é perceptível um grande núcleo convectivo com temperaturas no topo da nuvem de até -80°C , confirmado pela figura 27a, em que a região de estudo se encontra a leste de uma área de valores altos de refletividades (50dBZ) até cerca de 8 km de altura. A figura 27c mostra a conjuntura abordada e a figura 27d evidencia a presença da banda brilhante do radar a uma altura de 4km, com valor de refletividade atingindo 40 dBZ e decréscimo com a altitude, indicando a precipitação do tipo estratiforme (área estratiforme traseira). Fontes LMA a oeste da torre do pico do Jaraguá estão indicadas na figura 29a e somente há a identificação de 4 raios intranuvens e de 2 raios nuvem-solo na figura 29b. No horário dos quatro raios ascendentes registrados no dia, o da figura 30a mostra um raio intranuvem circundando a torre, na figura 30b tem-se um raio intranuvem se aproximando da torre e na figura 30c e 30d mostram descargas afastadas.

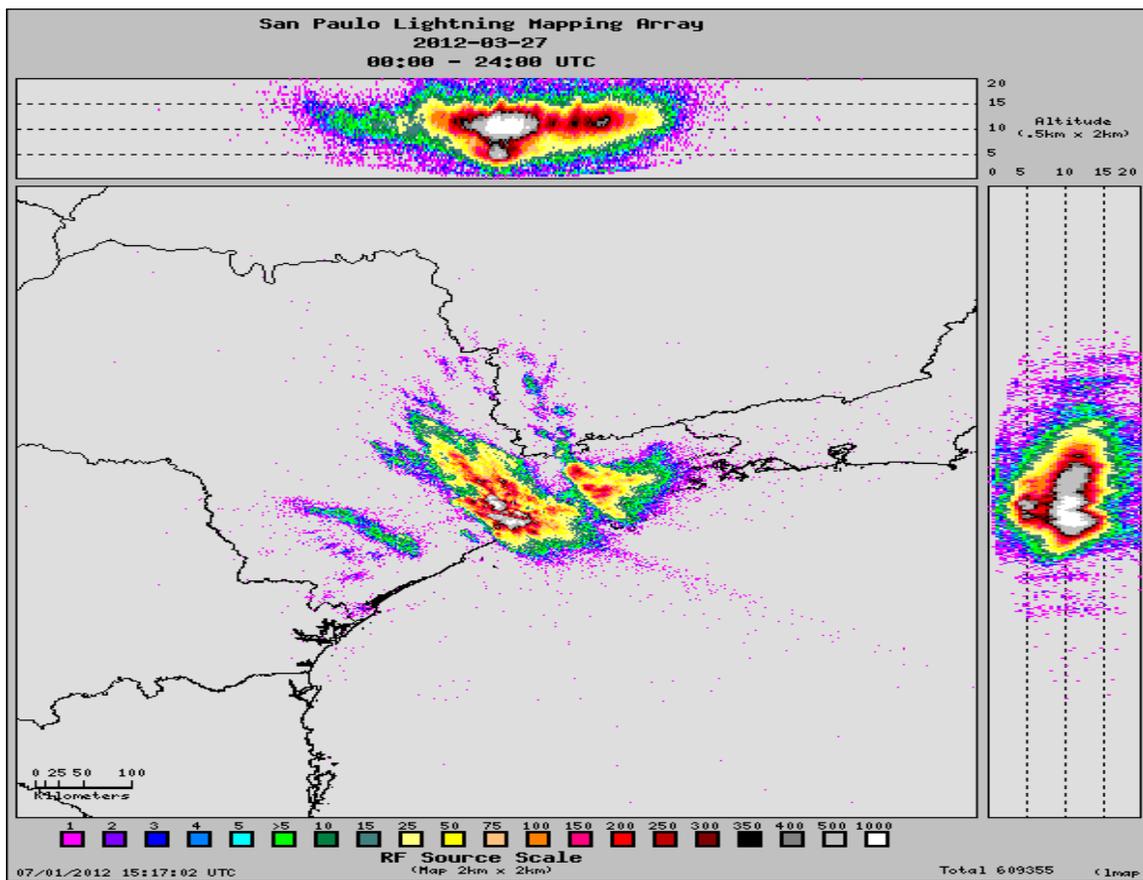
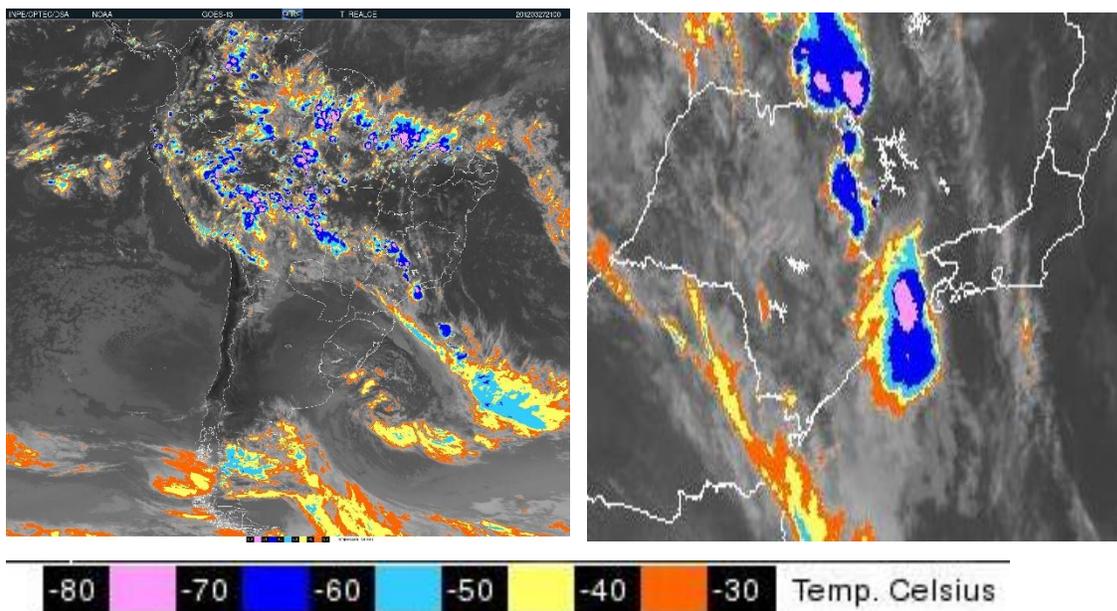


Figura 25. Acumulado diário de fontes eletromagnéticas de raios do São Paulo Lightning Mapping Array (SPLMA) para o dia 27/03/2012.



(a)

(b)

Figura 26. Imagens de satélite com Temperatura realçada para o dia 27/03/2012 às 21:00 GMT (a) América do Sul; (b) Sudeste.

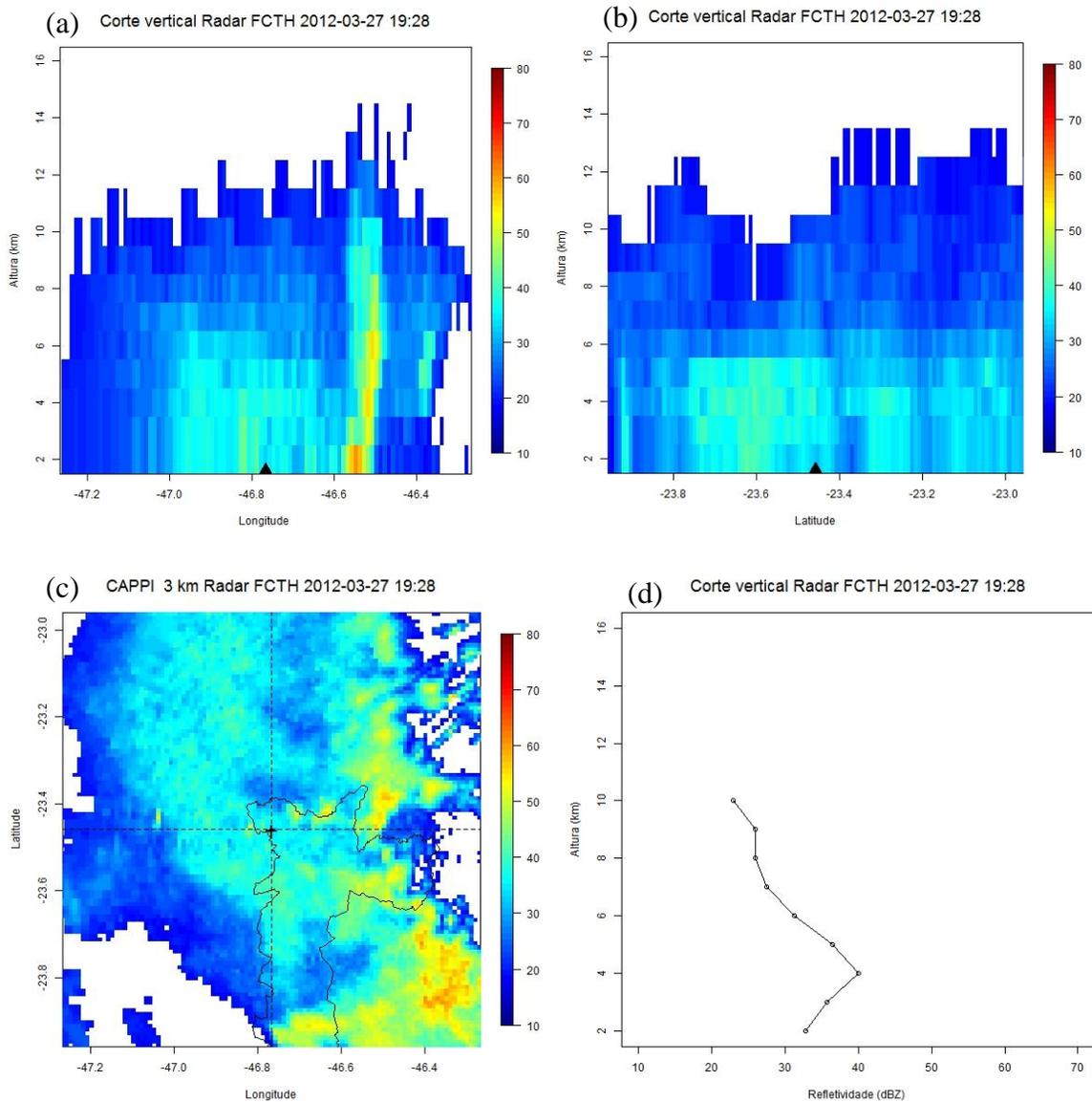


Figura 27. Dados de refletividade do radar (dBZ) do produto CAPPI do radar FCTH para o dia 27/03/2012 às 19:28 GMT com a altura em função da longitude (a); altura em função da latitude (b), respectivamente latitude e longitude fixas e torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” nas figuras; para o segundo nível (3 km) (c) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras); e valores de refletividade variando com a altura, plotados com latitude e longitude fixas nas coordenadas da torre do pico de Jaraguá (d).

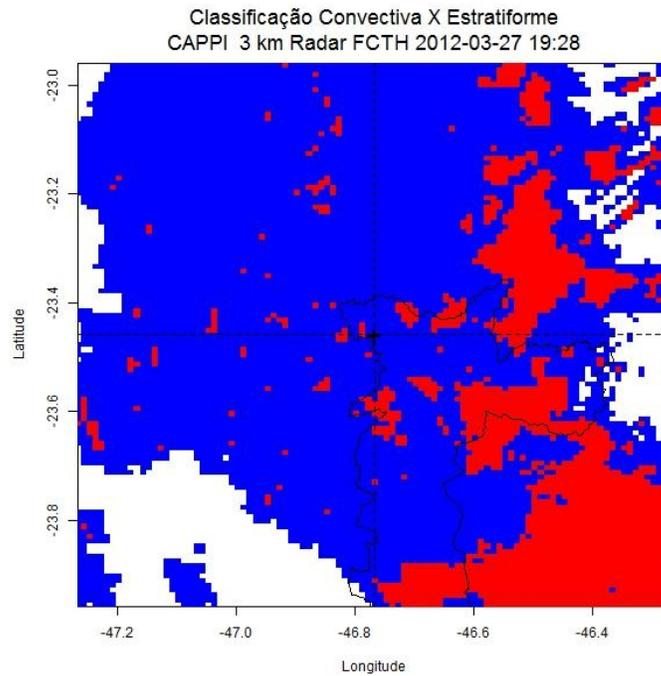


Figura 28. Classificação da precipitação em convectiva (= vermelho) e estratiforme (= azul) com dados do radar FCTH para o dia 27/03/2012 às 19:28 GMT plotados no segundo nível (3 km) com zoom de 2 graus ao redor da torre do pico do Jaraguá (marcado com “+” nas figuras).

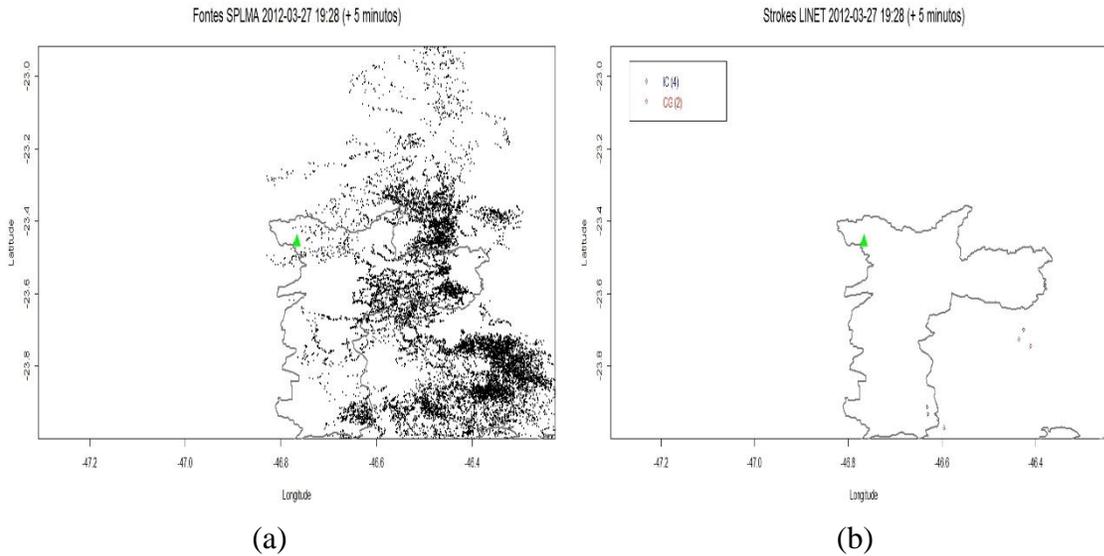


Figura 29. Fontes eletromagnéticas do acumulado de raios ocorridos no dia 27/03/2012 no horário de 19:28 GMT mais cinco minutos medidas pelo SPLMA (a) e pelo LINET com distinção dos raios intranuvens (azul) e nuvem-solo (vermelho) (b). Torre do pico do Jaraguá marcado com “▲” verde nas figuras.

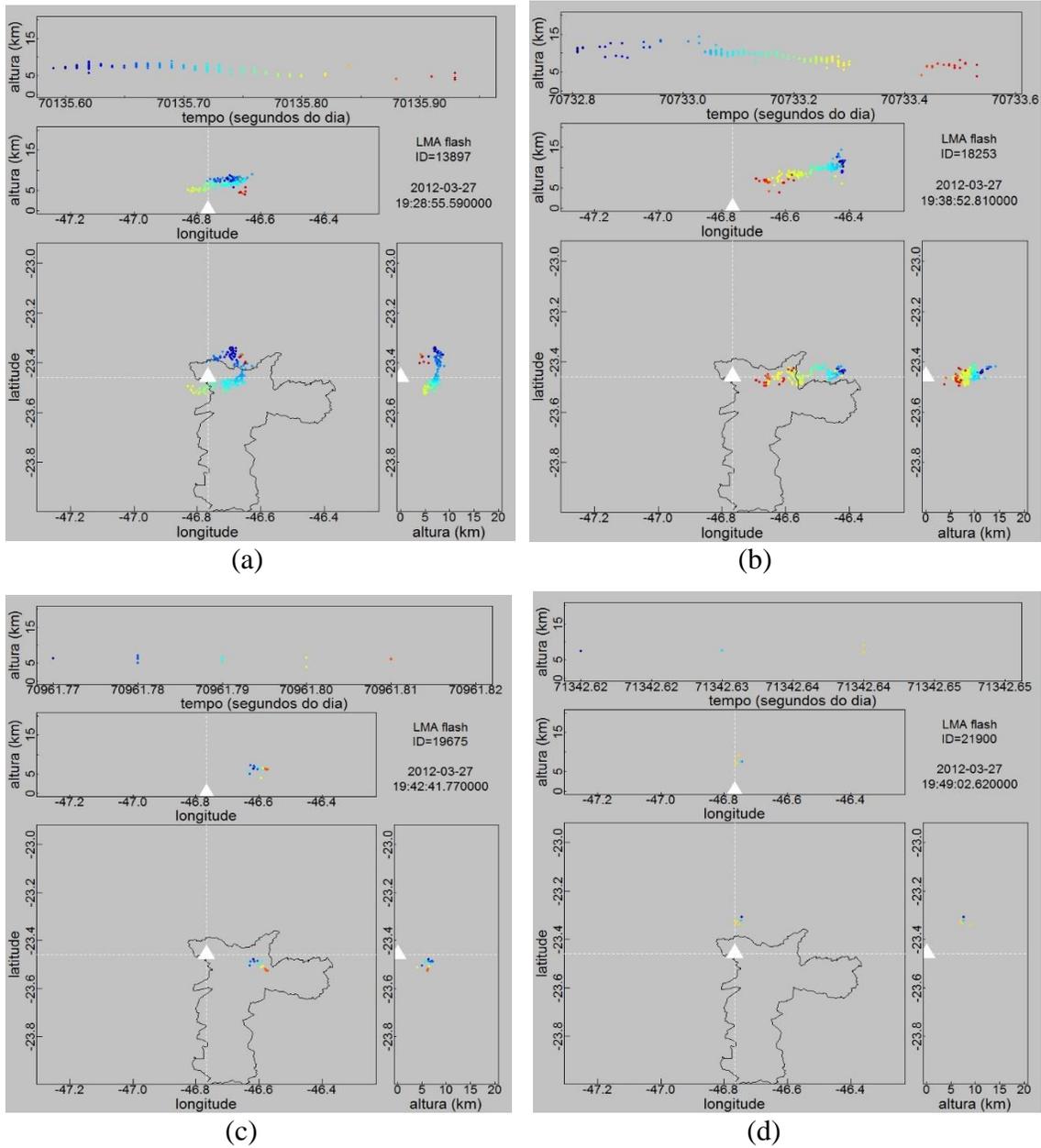


Figura 30. Fontes eletromagnéticas de raios medidas pelo SPLMA para os quatro raios ascendentes ocorridos no dia 27/03/2012 nos horários (a) 19:28:55 GMT; (b) 19:38:53 GMT; (c) 19:42:41 GMT; (d) 19:49:02 GMT, sendo as plotagens em um intervalo de ± 1 segundos do horário do raio.

Nas figuras 4, 10, 16, 22 e 28, que mostram a classificação feita com o algoritmo explicitado em materiais e métodos, percebe-se que a precipitação sobre a torre do pico do Jaraguá em estudo era estratiforme (cor azul) e também em todos os casos havia grande proximidade com núcleos convectivos (cor vermelha). Destaca-se, então uma preferência pela área estratiforme traseira.

3. CONCLUSÃO

Pode-se destacar com o presente estudo uma preferência da ocorrência de raios ascendentes na região estratiforme dos sistemas convectivos. Os casos tiveram a banda brilhante do radar perceptível indicando uma precipitação estratiforme e no caso ocorrido no dia 15/03/2012 esse aspecto não se mostrou evidente, mas apresentando valores de refletividade menores que 40 dBZ e decréscimo com a altura. Sugere-se que a precipitação estratiforme não estava bem definida na localização, podendo estar na região de transição entre as precipitações convectiva e estratiforme.

Nos dias 10/03/2012, 23/03/2012 e 27/03/2012 as fontes LMA se concentraram a oeste da torre do pico do Jaraguá. No dia 15/01/2015 a concentração era a leste e em 15/05 a distribuição era sobre a região. Houve predominância de raios nuvem-solo nos dias 10/03/2012, 15/03/2012, 23/03/2012 e de raios intranuvem nos dias 15/01/2012 e 27/03/2012. Na plotagem no horário dos raios ascendentes pode-se notar que dez tiveram influência de raios intranuvens (três no dia 15/01/2012, um nos dias 10, 15 e 23/03/2012 e quatro no dia 27/03/2012), que três raios foram precedidos de raio nuvem-solo (um nos dias 15/01/2012, 10 e 15/03/2012) e que um raio ascendente (o de 15/03/2012 23:17:48 UTC) se mostrou auto-iniciado pela própria torre, sem ser precedido outro raio intranuvem ou nuvem-solo.

Entretanto análises mais minuciosas e com maior número de casos é necessário para acrescentar maiores informações sobre a conjuntura atmosférica para o acontecimento dos raios ascendentes.

4. REFERÊNCIAS

AHRENS, D.C. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment**. Ninth Edition. Brooks Cole, 2008, 624p.

ALBRECHT, R. I. **Eletrificação dos sistemas precipitantes na região Amazônica: processos físicos e dinâmicos do desenvolvimento de tempestades**. 2008. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Austin, P.M., Bemis, A.C., **A quantitative study of the ‘bright band’ in radar precipitation echoes**. J.Meteorol. 7, 145–151, 1950.

Battan, L.J., **Radar Observations of the Atmosphere**. The Univ. of Chicago Press, Chicago, 324 pp, 1973.

Berger, K. **Novel observation on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore**, J. Franklin Inst., 283, 478–525, 1967.

Berger, K. **The Earth flash**, in Lightning, edited by R. H. Golde, pp. 119– 190, Elsevier, New York, 1977.

Berger, K., R. B. Anderson, and H. Knoninger. **Parameters of lightning flashes**, Electra, 41, 23– 37, 1975.

Berger, K., Vogelsanger, E.. **New results of lightning observations**. In: Coroniti, S.C., Hughes, J. (Eds.), Planetary Electrodynamics. Gordon and Breach, New York, pp. 489–510, 1969.

Boletim técnico CPTEC_INPE disponível em :

<http://tempo1.cptec.inpe.br/boletimTecnico/faces/buscar.jsp;jsessionid=FF577DF035A46258BF60CC598FCF97FD.911> Acesso em: 10/01/2015.

Chiu C. S., Klett J. D., **Convective electrification of clouds**, J. Geophys. Res., vol. 81, p. 1111, 1976

Climanálise Boletim Volume 27 - N°01 - Janeiro/2012 disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0112.shtml> Acesso em 20/12/2014

Climanálise Boletim Volume 27 - N°03 - Março/2012 disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0312.shtml#> Acesso em 20/12/2014

Diendorfer, G., H. Pichler, and M. Mair. **Some Parameters of Negative Upward-Initiated Lightning to the Gaisberg Tower (2000-2007)**, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 51, no. 3, pp. 443–452, 2009.

Flache, D., Rakov, V.A., Heidler, F., Zischank, W., Thottappillil, R. **Initialstage pulses in upward lightning: leader/return stroke versus M-component mode of charge transfer**

to ground. Geophys. Res. Lett. 35, L13812, 2008.
<http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034148>.

Hagenguth, J. H., and J. G. Anderson, **Lightning to the Empire State Building, part III**, Trans. Am. Inst. Electr. Eng., Part 3, 71, 641–649, 1952.

Lu, G., Cummer, S.A., Li, J., Han, F., Blakeslee, R.J., Christian, H.J. **Charge transfer and in-cloud structure of large-charge-moment positive lightning strokes in a mesoscale convective system.** Geophys. Res. Lett. 36, L15805, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1029/2009GL038880>.

MacGorman D. R., Rust W. D., **The electrical nature of storms.** Oxford University Press New York, 1998, 422 p.

Luiz A. T. Machado, Maria A. F. Silva Dias, Carlos Morales, Gilberto Fisch, Daniel Vila, Rachel Albrecht, Steven J. Goodman, Alan J. P. Calheiros, Thiago Biscaro, Christian Kummerow, Julia Cohen, David Fitzjarrald, Ernani L. Nascimento, Meiry S. Sakamoto, Christopher Cunningham, Jean-Pierre Chaboureaud, Walter A. Petersen, David K. Adams, Luca Baldini, Carlos F. Angelis, Luiz F. Sapucci, Paola Salio, Henrique M. J. Barbosa, Eduardo Landulfo, Rodrigo A. F. Souza, Richard J. Blakeslee, Jeffrey Bailey, Saulo Freitas, Wagner F. A. Lima, and Ali Tokay, 2014: **The Chuva Project: How Does Convection Vary across Brazil?**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, 1365–1380.
doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1>

Mazur, V., and L. H. Ruhnke. **Physical processes during development of upward leaders from tal structures.** J. Electrostatics, 69, 97-110, 2011.

Miki, M., Rakov, V.A., Shindo, T., Diendorfer, G., Mair, M., Heidler, F., Zischank, W., Uman, M.A., Thottappillil, R., Wang, D.. **Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning**. J. Geophys. Res. 110 (D02109), 375, 2005. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JD004474>.

McEachron, K. B. **Lightning to the Empire State Building**, J. Franklin Inst., 227, 1149–1217, 1939.

McEachron, K. B. **Lightning to the Empire State Building II**, Electr. Eng. Am. Inst. Electr. Eng., 60, 885–889, 1941.

PINTO JUNIOR, O. ; PINTO, I. R. C. A. . **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. 1. ed. São José dos Campos: Independente, 2000. v. prelo. 200p.

PINTO JUNIOR, O. ; PINTO, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 2008.

Rakov, V. A., and M. A. Uman **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge Univ. Press, New York , 2003.

Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. junho, 1997. 180 p. (INPE-6675-TDI/625). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

Saba, M. M. F. ; schumann, C. ; Alves, J. ; Campos, D. R. ; Warner, T. A. ; Albrecht, R. I. ; Morales, C. A. . **Upward lightning in Brazil First results**. In: Ground 2012 International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects, 2012, Bonito - MS. Ground 2012 International Conference on

Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects, 2012.

Schumann, C. **Caracterização dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e medidas de campo elétrico**, 2013. 26p. Proposta de Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Steiner, M., R.A. Houze Jr. e S.E. Yuter. **Climatological characterizations of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data**. J. Appl. Meteor., 34, 1978 – 2007, 1995.

Steiner, M., Smith, J. A. **Convective versus stratiform rainfall: An ice-microphysical and kinematic conceptual model**. Atmospheric Research 47-48, 317-326, 1998.

Stewart, R.E., Marwitz, J.D., Pace, J.C., Carbone, R.E., **Characteristics through the melting layer of stratiform clouds**. J. Atmos. Sci. 41, 3227–3237, 1984.

Stolzenburg M., Rust W. D., Marshall T. C., **Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis**, J. Geophys. Res., vol. 103, p. 14097, 1998b

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. 126, 256–259, 2006.

Uman, M. A.; Krider, E. P. **Natural and artificially initiated lightning**. Science: p.457-464, Vol. 246, Oct 1989.

Volland, H. **Atmospheric Electrodynamics**. New York, N.Y., Springer Verlag, 1984.

Vonnegut B., **Aircraft measurements of electric field charge carried to ground through thunderstorms**. Thunderstorm Electricity, (ch. 10). ed. H.R. Byers, Univ. Chicago Press, 231, 1953.

Vonnegut B., **Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity** in Proc. Conf. Atmospheric Electricity No.42. pp 169–181, 1955

Wagner P. G., Telford J. W., **Cloud dynamics and an electric charge separation mechanism in convective clouds**, J. Rech. Atmos., vol. 15, p. 97, 1981.

Wang, D., N. Takagi, T. Watanabe, H. Sakurano, and M. Hashimoto, **Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower**, Geophys. Res. Lett., 35, L02803,2008 doi:10.1029/2007GL032136.

Warner, T. A., Helsdon Jr, J. H., Bunkers M. J., Saba, M. M. F., Orville, R. E., **UPLIGHTS: Upward Lightning Triggering Study**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 94, 631–635, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00252.1>

Weather Radar Fundamentals, The COMET program. The University Corporation for Atmospheric Research, 2012. Disponível em: http://www.meted.ucar.edu/radar/basic_wxradar/ Acesso em: 15/01/2015.

Zhou, H., Diendorfer, G., Thottappillil, R., Pichler, H., Mair, M. **Measured current and close electric field changes associated with the initiation of upward lightning from a tall tower.** J. Geophys. Res. 117, D08102, 2012. <http://dx.doi.org/10.1029/2011JD017269>.