



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.11.01.23-TDI

## **ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE CARGA ELÉTRICA NO INTERIOR DAS NUVENS DE TEMPESTADE**

Robson Jaques Verly

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Moacir Lacerda, aprovada em 10 de junho de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JLB86E>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

**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@sid.inpe.br

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

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

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

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
(CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

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 E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.11.01.23-TDI

## **ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE CARGA ELÉTRICA NO INTERIOR DAS NUVENS DE TEMPESTADE**

Robson Jaques Verly

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Moacir Lacerda, aprovada em 10 de junho de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JLB86E>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Verly, Robson Jaques.

V589e      Estimativa da densidade de carga elétrica no interior das nuvens de tempestade / Robson Jaques Verly. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxxviii + 195 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/06.11.01.23-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Moacir Lacerda.

1. Densidade de carga elétrica. 2. Nuvem de tempestade.  
3. Campo elétrico. 4. LMA. I.Título.

CDU 551.594.21

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

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

Dr. Ezequiel Echer



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Moacir Lacerda



Orientador(a) / UFMS / Campo Grande - MS

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato




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

Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez



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

Dr. Marco Antônio da Silva Ferro



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

Dra. Rachel Ifanger Albrecht



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

Este trabalho foi aprovado por:

☒ maioria simples

☐ unanimidade

Título: "Estimativa da densidade de carga elétrica no interior das nuvens de tempestade".

Aluno (a): **Robson Jaques Verly**

São José dos Campos, 10 de Junho de 2015



*“Existem apenas duas maneiras de viver a vida. Uma é tal que nada é um milagre. Na outra, tudo o é.”.*

ALBERT EINSTEIN  
em “*Journal of France and Germany*”, 1942



*A Deus pelo dom da vida, ao meu orientador Moacir pelas horas dedicadas e inestimável amizade e a minha esposa Brenda pelo companheirismo e dedicação.*



## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela minha existência, pela capacidade de ver, tocar, ouvir, sentir, entender, agir, refletir, chorar, sorrir, e pensar, de conhecer mais sobre o universo a minha volta, e descobrir meu lugar nele.

A minha esposa Brenda, por todo o cuidado, carinho, e pelas muitas horas agradáveis que passamos juntos.

Ao professor Moacir Lacerda, por todo empenho em minha formação como profissional e como ser humano. Por se dispor a ser amigo, por cada auxílio prestado ao longo destes anos, por transcender os limites do que lhe era exigido.

Ao projeto CHUVA - Vale do Paraíba, 2009/15235-8 FAPESP. Aos pesquisadores Evandro Anselmo, João Neves, Moacir Lacerda, Carlos Augusto Morales Rodriguez, Rachel Albrecht, e todos demais envolvidos na coleta de dados do projeto CHUVA, sem os quais, não seria possível este trabalho.

Aos pesquisadores Carina Schumann, Tom Warner, Ronald Thomas, Bill Rison, Paul Krehbiel e Julia Tilles, pelos dados cedidos, pois sem estes este trabalho também não seria possível.



## RESUMO

Este trabalho apresenta pela primeira vez um método que combina medidas de LMA e campo elétrico para determinar a densidade de carga elétrica no interior das nuvens de tempestade. Pela utilização do método desenvolvido nessa tese, é possível calcular a posição, a forma geométrica, e os volumes, dos centros de carga dentro da nuvem pelo uso do LMA, e a densidade de carga elétrica em cada centro pelas medidas de campo elétrico em solo. Foram escolhidos 24 casos, de nuvens com máximas refletividades de radar e máxima atividade elétrica concentrada próxima a rede de sensores de campo elétrico a fim de estimar-se as densidades de carga elétrica em cada um dos seus centros de carga elétrica. Verificou-se que o método acertou a polaridade de 53 dos 63, isto é 84% centros de carga elétrica estimados tomando-se como referencia a polaridade determinada pelo LMA segundo a teoria do líder bidirecional (MAZUR, 2002; WIENS, 2005). Os acertos das polaridades considerando-se apenas os casos da BASE 1 foram 24 entre 30 centros estimados, ou seja 83%. Para os casos da BASE 2 foram 28 acertos em 33 centros estimados, isto é 85%. Este resultado confirma os trabalhos de Mazur (2002), Wiens (2005). Valores típicos de densidade de carga elétrica negativa e positiva estimados pelo método foram respectivamente:  $-21,1nC/m^3$  e  $9nC/m^3$ , e confirmam os resultados de Stolzenburg et al. (1998), Zhao et al. (2010), Marshall et al. (1995) que através da utilização de sondas em balões mediram valores de densidade negativa e positiva respectivamente da ordem de:  $-11nC/m^3$  e  $5nC/m^3$ . Desta forma tanto as magnitudes dos valores quanto as polaridades predominantes em cada centro coincidiram com os trabalhos experimentais.

Palavras Chave:

Densidade de carga elétrica; nuvem de tempestade; campo elétrico; LMA.



# ESTIMATION OF ELECTRICAL CHARGE DENSITY INSIDE THE STORM CLOUDS

## ABSTRACT

This thesis shows for the first time a method that combines LMA and electric field measurements to determine the electric charge density within the storm clouds. By using the method developed in this thesis, it is possible to estimate the position, geometric shape, and the volumes of charge centers within the cloud by using the LMA, and the electric charge density at each center by the electric field measurements in ground. 24 cases were chosen, with maximum radar reflectivities and maximum electric activity closed to electric field sensor network in order to estimate the electric charge densities for each electric charge centers. It has been found that the method hit the polarity 53 of 63, i.e. 84% estimated electric charge centers taking as reference the polarity determined by the LMA according to the theory of a bidirectional leader (MAZUR, 2002; WIENS, 2005). Considering only cases of BASE 1, 25 of 30 centers have the same polarity, i.e. 83%. For cases of BASE 2, 28 in 33 centers, that is 85%, have the same polarity. This result confirms the works of Mazur (2002), Wiens (2005). Typical negatives and positives electric charge density were estimated by the method:  $-21, 1nC/m^3$  and  $9nC/m^3$ , and confirm the results of Stolzenburg et al. (1998), Zhao et al. (2010), Marshall et al. (1995) that by using probes on balloons measured negatives value and the positives density of approximately  $-11nC/m^3$  and  $5nC/m^3$ . In this way both the magnitudes of values as the predominant polarity in each center coincided with the experimental work. Key words:

Electric charge density; storm cloud; electric field; LMA.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Funcionamento do sensor eletrostático: (a) Cilíndrico (b) Forma de disco	3
1.2 Sensor de campo elétrico eletrostático (field mill) visto de perfil (esquerda) e de lado (direita)	4
1.3 Campo elétrico durante uma nuvem de tempestade	5
1.4 Esquema de um sensor de campo elétrico para balão	7
1.5 (a) Campo elétrico em função da altura (b) Densidade de carga elétrica em função da altura	8
1.6 (esquerda) Campo elétrico em função da altura; (centro) temperatura (linha constante), e campo elétrico (linha pontilhada) em função da altura, (direita) densidade de carga em função da altura	9
1.7 (a) Espectro de emissão eletromagnética das descargas elétricas proposto por Le Vine e medido (b) por Sonnadara	10
1.8 Emissão eletromagnética por raios NS e IN em várias bandas de emissão	11
1.9 - (a) Antena e datalogger antes da instalação, (b) Depois da instalação.	13
1.10 (a) Exemplo de medida de LMA (b) Projeção em 3D.	13
1.11 Radiação em VHF emitida por um relâmpago intra-nuvem típico	15
1.12 Principais bandas utilizadas nos radares	17
1.13 Ilustração de um volume de radar	18
1.14 Exemplo de leitura de RADAR obtida em 25 de março de 2001 as 18h06min	19
2.1 Condutor imerso em um campo elétrico, a terminação positiva atrai elétrons e a negativa repele os elétrons. Nas duas pontas existe intensificação do campo elétrico	22
2.2 a) Iniciação e etapas de um raio INTRA-NUVEM. b) Exemplo do mapeamento da radiação medida por um relâmpago intra-nuvem usando LMA	23
2.3 a) Iniciação e etapas de um raio NUVEM-SOLO NEGATIVO. b) Exemplo do mapeamento da radiação medida por um relâmpago intra-nuvem usando LMA	24
2.4 Duas estruturas de carga idealizadas mostrando a) grandes estruturas estratificadas horizontalmente e b) bolsões menores de carga elétrica. Cinza escuro e claro representam cargas positivas cargas negativas respectivamente	26
2.5 Estimativa da regiões e polaridade dos centros de carga elétrica: positivo(laranja) e negativo (azul)	28

3.1	Posição dos instrumentos - BASE 1 . . . . .	30
3.2	Posição dos instrumentos - BASE 2. As marcas em azul representam todas as posições do sensor móvel durante a campanha . . . . .	31
3.3	Distribuição de todas as medidas de campo elétrico para a BASE 1 em intervalos de 100V/m. Eixo horizontal (intervalos de 100V/m), eixo vertical (Número de ocorrência) . . . . .	33
3.4	Distribuição de todas as medidas de campo elétrico para a BASE 2 em intervalos de 100V/m. Eixo horizontal (intervalos de 100V/m), eixo vertical (número de ocorrência). . . . .	34
3.5	Distribuição do número de focos detectados pelo LMA em função da distância nas duas bases em intervalos de 2km. Eixo horizontal (intervalos de 2km), eixo vertical (número de ocorrência). . . . .	35
3.6	Distribuição do número de focos detectados pelo LMA em função das potências intervalos 0,1dBW. Eixo horizontal (intervalos de 0,1dBW), eixo vertical (número de ocorrência) . . . . .	36
4.1	Líderes positivos (em ciano) e líderes negativos (em laranja) identificados em cada relâmpago do intervalo . . . . .	39
4.2	Determinação dos volume dos centros de carga . . . . .	42
4.3	Teste de sensibilidade do parâmetro L . . . . .	43
4.4	Volume em função do parâmetro C . . . . .	44
4.5	Carga em função do parâmetro C . . . . .	44
4.6	Densidade de carga em função do parâmetro C . . . . .	45
4.7	Distância do sensor $i$ até porção $q_k$ da carga $Q_j$ . . . . .	47
4.8	Comparação dos volumes calculados com as refletividades do radar . . . . .	50
4.9	Plataforma MegaStorm by Robson Jaques, INPE 2015 . . . . .	54
5.1	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	56
5.2	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	57
5.3	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	58
5.4	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	58
5.5	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	59

5.6	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	59
5.7	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	59
5.8	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	61
5.9	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	62
5.10	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	63
5.11	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	63
5.12	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	64
5.13	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	64
5.14	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	64
5.15	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	66
5.16	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	67
5.17	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	68
5.18	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	68
5.19	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	69
5.20	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	69
5.21	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	69
5.22	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	70

5.23	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	70
5.24	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor novadutra, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	70
5.25	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor novadutra, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	71
5.26	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	72
5.27	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	73
5.28	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	74
5.29	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	74
5.30	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	75
5.31	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	75
5.32	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	75
5.33	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	76
5.34	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	76
5.35	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	77
5.36	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	78
5.37	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	79
5.38	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	79
5.39	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	80

5.40	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	80
5.41	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	80
5.42	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	81
5.43	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	81
5.44	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	82
5.45	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	83
5.46	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	84
5.47	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	84
5.48	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	85
5.49	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	85
5.50	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	85
5.51	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	86
5.52	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	86
5.53	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	87
5.54	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	88
5.55	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	89
5.56	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	89

5.57	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	90
5.58	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	90
5.59	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	90
5.60	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	91
5.61	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	91
5.62	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	91
5.63	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	92
5.64	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	93
5.65	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	94
5.66	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	95
5.67	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	95
5.68	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	96
5.69	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	96
5.70	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	96
5.71	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	97
5.72	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	97
5.73	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	98

5.74	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	99
5.75	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	100
5.76	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	100
5.77	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	101
5.78	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	101
5.79	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	101
5.80	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	103
5.81	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	104
5.82	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	105
5.83	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	105
5.84	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	106
5.85	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	106
5.86	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	106
5.87	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	107
5.88	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	107
5.89	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	108
5.90	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	109

5.91	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	110
5.92	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	110
5.93	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	111
5.94	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	111
5.95	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	111
5.96	a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	113
5.97	a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	114
5.98	a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	115
5.99	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	115
5.100	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	116
5.101a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	117
5.102a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	118
5.103a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	119
5.104	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	119
5.105	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	120
5.106	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	120

5.107	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	120
5.108	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	121
5.109	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	121
5.110a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	122
5.111a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	123
5.112a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	124
5.113	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	124
5.114	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	125
5.115	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	125
5.116	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	125
5.117a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	127
5.118a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	128
5.119a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	129
5.120	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	129
5.121	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	130
5.122	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	130
5.123	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	130

5.124	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	131
5.125	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	131
5.126a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	132
5.127a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	133
5.128a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	134
5.129	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	134
5.130	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	135
5.131	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	135
5.132	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	135
5.133	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	136
5.134	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	136
5.135a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	137
5.136a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	138
5.137a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	139
5.138	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	139
5.139	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	140
5.140	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	140

5.141	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	140
5.142	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	141
5.143	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	141
5.144a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	142
5.145a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	143
5.146a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	144
5.147	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	144
5.148	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	145
5.149	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	145
5.150	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	145
5.151a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	147
5.152a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	148
5.153a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	149
5.154	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	149
5.155	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	150
5.156	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	150
5.157	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	150

5.158	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	151
5.159	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	151
5.160a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	152
5.161a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	153
5.162a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	154
5.163	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	154
5.164	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	155
5.165a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	156
5.166a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	157
5.167a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	158
5.168	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	158
5.169	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	159
5.170a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	160
5.171a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	161
5.172a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	162
5.173	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	162

5.174	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	163
5.175a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	164
5.176a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	165
5.177a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	166
5.178	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	166
5.179	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	167
5.180	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	167
5.181	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	167
5.182a)	Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z) . . . . .	169
5.183a)	Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ ) . . . . .	170
5.184a)	Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ ) . . . . .	171
5.185	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	171
5.186	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	172
5.187	Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s) . . . . .	172
5.188	Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ ) . . . . .	172
6.1	Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar ou tripolar .	173
6.2	Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar, tripolar ou quadripolar somente para BASE 1 . . . . .	174

6.3	Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar, tripolar ou quadripolar somente para BASE 2 . . . . .	174
6.4	Número de focos de radiação e sensores de campo elétrico em cada caso da BASE 1 . . . . .	175
6.5	Número de focos de radiação e sensores de campo elétrico em cada caso da BASE 1 . . . . .	175
6.6	Alturas média dos centros para BASE 1 . . . . .	176
6.7	Alturas média dos centros para BASE 2 . . . . .	177
6.8	Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda) . . . . .	178
6.9	Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda), para BASE 1 . . . . .	178
6.10	Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda), para BASE 2 . . . . .	179
6.11	Comparação das polaridades predominantes e das densidades de carga da BASE 1 (centro) com medidas experimentais realizadas por sonda em balão(esquerda) e as densidades médias de carga obtidas pelo método (direita). . . . .	180
6.12	Comparação das polaridades predominantes e das densidades de carga da BASE 2 (centro) com medidas experimentais realizadas por sonda em balão(esquerda) e as densidades médias de carga obtidas pelo método (direita). . . . .	181
6.13	Comparativo entre as duas bases para as cargas líquidas médias por centro e por polaridade. Barras vermelhas indicam a média dos valores negativos e azuis indicam a média dos valores positivos para cada centro . .	182
6.14	Diâmetros médios para BASE 1 . . . . .	183
6.15	Diâmetros médios para BASE 2 . . . . .	183
6.16	Diâmetros médios para BASE 1 . . . . .	184
6.17	Diâmetros médios para BASE 2 . . . . .	185
6.18	Cobertura de campo elétrico para BASE 1 . . . . .	186
6.19	Cobertura de campo elétrico para BASE 2 . . . . .	187

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Posição dos sensores de campo elétrico da BASE 1 . . . . .	29
3.2 Posição dos sensores de LMA da BASE 1 . . . . .	29
3.3 Posição dos sensores de campo elétrico da BASE 2 . . . . .	31
3.4 Posição dos sensores de LMA da BASE 2 . . . . .	31
4.1 Dígitos imprecisos em função da quantidade de LMA. . . . .	52



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

KSC	–	Kennedy Space Center
LF	–	Very Low Frequency, de 3kHz até 30kHz
LMA	–	Lightning Mapping Array
MF	–	Medium Frequency, de 300kHz até 3000kHz
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
RADAR	–	RAdio Detection And Ranging
TOA	–	Time Of Arrival
VHF	–	Very High Frequency, de 30MHz até 300MHz
VLF	–	Very Low Frequency, de 3kHz até 30kHz



## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	– Campo elétrico (V/m)
$\sigma$	– Densidade superficial de carga elétrica ( $C/m^2$ )
$\varepsilon_0$	– Coeficiente de permissividade elétrica no vácuo ( $C/V.m^2$ )
$Q$	– Carga total ( $C$ )
$A$	– Área ( $m^2$ )
$I$	– Corrente elétrica ( $A$ )
$T$	– Tempo ( $s$ )
$C$	– Parâmetro de corte (adimensional)
$L$	– Parâmetro de precisão, unidade espacial mínima. ( $m$ )
$Q_j$	– Centro de carga $j$ ( $C$ )
$V_j$	– Volume do centro de carga $j$ ( $m^3$ )
$n_j$	– Número de cubos idênticos dentro do volume $V_j$
$\rho_j$	– Densidade volumetrica de carga do centro $j$ ( $C/m^3$ )
$q_j$	– Carga total em um pequeno cubo ( $C$ )
$E_{i,j}$	– Campo elétrico que a carga $j$ produz sobre o sensor $i$ ( $V/m$ )
$r_{i,j,k}$	– Distância do sensor $i$ até o cubo $k$ do volume do centro $j$
$R_{i,j}$	– Matriz de proporção ( $V/m * C$ )
$E.direto_i$	– Campo elétrico (teórico) sobre o sensor $i$ ( $V/m$ )



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	1
1.2 O estudo da eletricidade em núvens de tempestade . . . . .	1
1.3 Sensor de campo elétrico eletrostático . . . . .	2
1.4 Utilização do sensor eletrostático . . . . .	5
1.5 Sondas em balões . . . . .	6
1.6 Sondas em foguetes . . . . .	7
1.7 Detecção de relâmpagos pela radiação emitida . . . . .	9
1.8 Time of Arrival (TOA) . . . . .	12
1.9 Lightning Mapping Array(LMA) . . . . .	12
1.10 RAdio Detection And Ranging (RADAR) . . . . .	15
<b>2 INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DOS RELAMÂPGOS . . . . .</b>	<b>21</b>
2.1 Iniciação dos relâmpagos . . . . .	21
2.2 A teoria do lider bi-direcional . . . . .	22
2.3 Localização dos centros de carga pelo LMA . . . . .	26
<b>3 DADOS UTILIZADOS . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1 Base 1 . . . . .	29
3.2 Base 2 . . . . .	30
3.3 Comparativo das medidas . . . . .	32
3.3.1 Comparativo dos sensores de campo elétrico . . . . .	32
3.3.2 COMPARATIVO DAS MEDIDAS DO LMA . . . . .	34
<b>4 METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1 Separação dos dados de LMA por relâmpagos . . . . .	37
4.2 Determinação das alturas e polaridades dos centros . . . . .	37
4.3 Determinação dos volumes dos centros . . . . .	40
4.4 Determinação das densidades de carga elétrica . . . . .	46
4.5 Verificação dos resultados . . . . .	49
4.5.1 Comparação com RADAR . . . . .	49
4.5.2 Comparação com as polaridades esperadas . . . . .	50
4.5.3 Comparação com a literatura . . . . .	50

4.5.4	Ajuste do campo elétrico . . . . .	51
4.6	Condição do campo elétrico e distância . . . . .	51
4.7	Número de condição da matriz inversível . . . . .	52
4.8	A plataforma megastorm . . . . .	53
4.9	Mais informações meteorológicas . . . . .	54
<b>5</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS . . . . .</b>	<b>55</b>
5.1	Caso 31 . . . . .	55
5.2	Caso 32 . . . . .	60
5.3	Caso 48 . . . . .	65
5.4	Caso 84 . . . . .	71
5.5	Caso 88 . . . . .	76
5.6	Caso 89 . . . . .	81
5.7	Caso 113 . . . . .	86
5.8	Caso 114 . . . . .	92
5.9	Caso 116 . . . . .	97
5.10	Caso 146 . . . . .	102
5.11	Caso 234 . . . . .	107
5.12	Caso 261 . . . . .	112
5.13	Caso 583 . . . . .	116
5.14	Caso 612 . . . . .	121
5.15	Caso 631 . . . . .	126
5.16	Caso 705 . . . . .	131
5.17	Caso 707 . . . . .	136
5.18	Caso 738 . . . . .	141
5.19	Caso 739 . . . . .	146
5.20	Caso 753 . . . . .	151
5.21	Caso 756 . . . . .	155
5.22	Caso 757 . . . . .	159
5.23	Caso 865 . . . . .	163
5.24	Caso 953 . . . . .	168
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>173</b>
6.1	Tipo de estrutura elétrica . . . . .	173
6.2	Altura dos centros . . . . .	174
6.3	As polaridades dos centros . . . . .	177
6.4	As densidades de carga . . . . .	179
6.5	As magnitudes das cargas elétricas . . . . .	181

6.6	As formas dos centros . . . . .	182
6.7	O volume dos centros . . . . .	184
6.8	Comparação com RADAR . . . . .	185
6.9	Campo elétrico baixo . . . . .	186
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>189</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>191</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar a estimativa das densidades de cargas elétricas no interior das nuvens de tempestade durante duas campanhas de obtenção de dados. A primeira no Brasil, em São Paulo, na região do Vale do Paraíba entre setembro de 2011 e março de 2012, e a segunda na cidade de Rapid City / EUA entre Junho e Julho de 2014. As estimativas das densidades de cargas elétricas são realizadas a partir da utilização de um método que mapeia a posição, forma e volume dos centros de carga elétrica pelos focos de radiação em VHF emitidos pelos relâmpagos e a carga elétrica no interior dos centros por medidas de campo elétrico em solo.

## 1.2 O estudo da eletricidade em núvens de tempestade

Segundo os registros, a primeira pessoa a associar eletricidade e nuvens de tempestade foi o inglês William D. Wall ([WALL, 1708](#)). William notou que havia semelhança entre as faíscas produzidas ao se atritar um pedaço de âmbar e os raios produzidos pelas nuvens. Semelhantemente [Gray \(1735\)](#) descreveu em suas cartas uma serie de variados experimentos por ele realizados, envolvendo madeira, pêndulos, e outros objetos. Nestas cartas ele ressalta a semelhança entre as faíscas produzidas em laboratório e os raios. [Franklin \(1750\)](#) observou que pontas metálicas agudas atraíam raios, e isto poderia ser aplicado para proteger casas, igrejas, navios, e outras estruturas. Assim nasceu a ideia do para-raios, que embora promissora, nunca seria empreendida por Franklin. [D'Alibard \(1752\)](#) baseado nas ideias de Franklin construiu o primeiro para raios, na França dois anos depois, em 10 de maio de 1752. Apenas duas semanas depois em 1752, Franklin realizou na América seu famoso experimento com a pipa, e não só confirmou o caráter elétrico dos relâmpagos, mas também detectou pela primeira vez a existência de cargas negativas na base da nuvem e positivas acima. Pela primeira vez se conjecturou que a nuvem possuía um dipolo gigante flutuando na atmosfera. [Lemonnier \(1752\)](#) foi o primeiro a realizar um experimento sensível o bastante para detectar cargas elétricas na atmosfera mesmo na ausência das nuvens. Ele também notou que havia variação na intensidade elétrica durante o dia e durante a noite. [Beccaria \(1753\)](#) confirmou as descobertas de Lemonnier e fez uma importantíssima contribuição. Em seus experimentos notou que hastes e fios suspensos na atmosfera tornavam-se carregados positivamente em relação a superfície da terra sem a presença de nuvens de tempestade. Ele também notou que havia uma inversão desta polaridade quando uma nuvem de tempestade passava acima desta haste indicando a introdução de cargas negativas na atmosfera durante a tem-

pestade. Desta forma, acabaram por confirmar as ideias de Franklin, de que uma nuvem de tempestade possui geralmente cargas negativas abaixo e positivas acima. [Kelvin \(1860\)](#) foi o primeiro a postular a ideia do capacitor global. Segundo ele, havia um campo elétrico positivo que aumentava de intensidade em algumas centenas de volts a cada metro da superfície da terra. Essa ideia foi futuramente expandida por Kennely e Heavyside em 1902. Segundo eles uma taxa de aproximadamente 2000 coulombs por segundo era trocada entre a superfície da terra e a atmosfera. [Wilson \(1925\)](#) na tentativa de explicar a origem destas cargas, afirmou que todas as tempestades ao redor do mundo são geradoras elétricas, segundo ele, quando todo o planeta é considerado, ocorrem descargas elétricas continuamente, e portanto, as nuvens de tempestade alimentam o circuito elétrico global, como pilhas gigantes na atmosfera. Um marco decisivo na instrumentação para o estudo da eletricidade foi a invenção do osciloscópio por Ferdinand Braun em 1897. E futuramente o tubo de raios catódicos, que permitia ver as oscilações em um monitor ([BRAUN, 1981](#)). O osciloscópio era um instrumento revolucionário, pois permitia quantificar o campo elétrico e a carga elétrica de forma rápida e prática. Neste mesmo ano Thomson postulou a existência do elétron e o valor da carga elementar do elétron. Esta descoberta lhe rendeu o prêmio Nobel em Física em 1906. Embora as invenções de Ferdinand Braun tenham sido aplicadas principalmente a telecomunicações, suas contribuições também lhe renderam o prêmio Nobel em Física em 1909. Braun descreveu a instrumentação necessária para produzir e medir oscilações de natureza elétrica no espaço. Podemos então, atribuir a este feito o nascimento dos sensores modernos. Com o avanço na fabricação dos componentes eletrônicos, e a incrível revolução da informática, estas técnicas seriam apenas melhoradas futuramente, tornando-as cada vez mais precisas e com taxas de aquisição maiores. Atualmente os instrumentos mais comuns utilizados para medir o campo elétrico em nuvens de tempestade são os sensores eletrostáticos, cujo funcionamento será discutido, mais adiante, na seção que descreve a instrumentação utilizada. Estes instrumentos têm sido utilizados durante décadas por pesquisadores em todo o mundo.

### 1.3 Sensor de campo elétrico eletrostático

O sensor de campo elétrico eletrostático é popularmente conhecido no meio científico como field mill. Seu funcionamento é baseado na indução eletrostática. [Wahlin \(1987\)](#) descreve de forma detalhada o funcionamento do sensor eletrostático. Também é descrito por [Bruning e Macgorman \(2013\)](#). Nas Figuras 1.1.a e 1.1.b encontram-se duas formas possíveis para estes sensores. Em 1.1.a é mostrada a forma cilíndrica, do sensor eletrostático e em 1.1.b a forma em disco. Trata-se de duas placas metálicas,

que não se tocam, mas giram imersas em um campo elétrico. O campo elétrico induz em cada placa um potencial elétrico ligeiramente diferente da outra. Cada placa possui um contato. Quando os contatos desses terminais são ligados, flui por eles uma corrente alternada à medida que as placas giram devido à migração dos elétrons na direção de maior potencial. A corrente alternada é então amplificada por um circuito eletrônico e seu valor numérico registrado. A intensidade da corrente elétrica que flui através desse circuito está diretamente relacionada à magnitude do campo elétrico indutor. Existem outras formas possíveis para estes sensores, mas o fundamento é o mesmo.

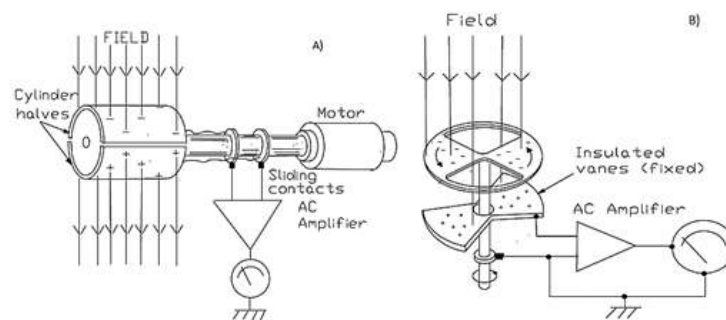


Figura 1.1 - Funcionamento do sensor eletrostático: (a) Cilíndrico (b) Forma de disco  
Fonte: Wahlin (1987)

A Figura 1.2 mostra um sensor de campo elétrico eletrostático semelhante ao modelo mostrado na Figura 1.1. Vale lembrar que existem muitos outros modelos de sensores eletrostáticos, que diferem em forma e tamanho do mostrado na figura.

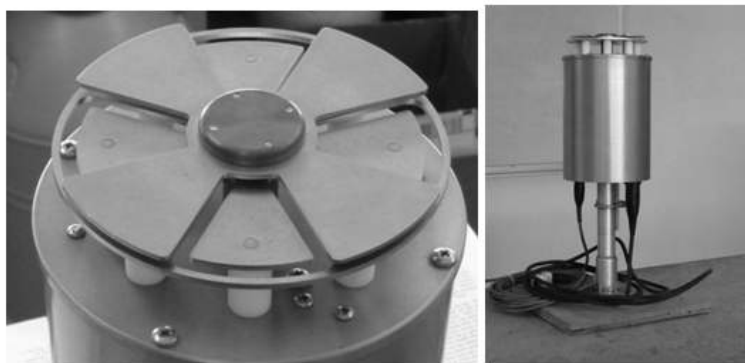


Figura 1.2 - Sensor de campo elétrico eletrostático (field mill) visto de perfil (esquerda) e de lado (direita)  
Fonte: [Krider \(2011\)](#)

A Figura 1.3 mostra um exemplo de medida desse tipo de sensor. Obtida durante a evolução de uma nuvem de tempestade em 23 de dezembro de 2013. As 14:00hs nota-se que o campo elétrico é característico de tempo bom. Com a aproximação da tempestade, por volta das 14:40hs há uma notável queda no campo medido. Por volta das 15:20hs o campo elétrico aumenta novamente se inicia a atividade elétrica da nuvem, isto é inicia-se a ocorrência de descargas elétricas. A partir deste ponto cada pico acentuado para cima ou para baixo representa uma descarga elétrica na nuvem de tempestade. Por volta das 16:50hs ocorre uma notável subida no valor do campo elétrico e a atividade elétrica cessa gradativamente. Após o afastamento da nuvem, por volta das 18:20hs o campo elétrico é novamente característico de tempo bom, igual ao das 14:00hs.

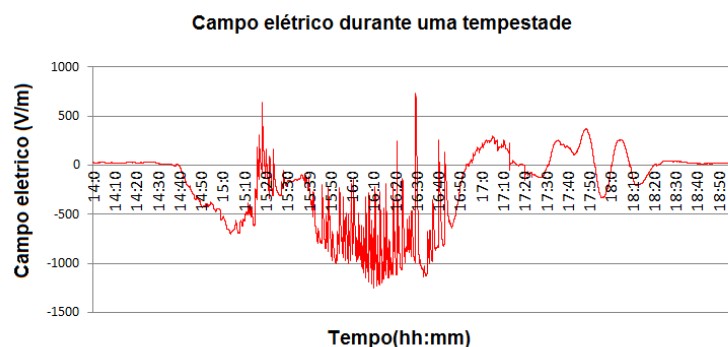


Figura 1.3 - Campo elétrico durante uma nuvem de tempestade  
 Fonte: Banco de dados do Laboratório de Ciências Atmosféricas (LCA)

A principal vantagem na utilização deste sensor é que, quando devidamente calibrado pode ajudar a inferir a magnitude e o sinal das cargas em repouso no interior das nuvens de tempestade que produzem o campo elétrico medido.

#### 1.4 Utilização do sensor eletrostático

Em 1970 o Centro Espacial Kennedy, instalou uma rede de 21 sensores eletrostáticos de campo elétrico com o objetivo de prever eventuais riscos elétricos a missões espaciais. Com a disponibilização destes dados aos pesquisadores, muitas pesquisas puderam ser realizadas. Esta foi a primeira rede densa de sensores de campo elétrico.

Krehbiel et al. (1979) estudou a distribuição das cargas elétricas no interior das nuvens de tempestades no Novo México e concluiu, juntamente com medições de radar, que cargas elétricas estavam espalhadas em grandes extensões horizontais dentro das nuvens por volta dos 8km e temperaturas entre  $-9^{\circ}\text{C}$  e  $-17^{\circ}\text{C}$ . Jacobson e Krider (1976) utilizaram a rede KSC (Kennedy Space Center) para estudar as modificações do campo elétrico das nuvens durante a ocorrência de descargas elétricas. Verificaram que as descargas nuvem-solo depositavam carga positiva entre 6 a 9 km de altura onde a temperatura do ar média entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $-34^{\circ}\text{C}$ , portanto nesta região deveriam existir cargas negativas. Maier e Krider (1986) analisaram dados da rede KSC durante meses de verão de 1976 até 1978. Concluíram que a altura média do centro de carga negativa poderia estar entre 6,9 km ( $-14^{\circ}\text{C}$ ) e 8,8 km ( $-26^{\circ}\text{C}$ ), e que a carga elétrica média transferida média entre 11 C e 44 C. Krider (1989) desenvolveu a partir destas medidas um método mais preciso para medir as

variações da carga elétrica dentro das nuvens de tempestade e verificou que elas são sistematicamente mais comuns a alturas maiores. William (1990) também utilizou a rede KSC, na Florida, para identificar a ocorrência de descargas elétricas em todo o estado a partir da variação do campo elétrico medido. Livingston e Krider (1978) utilizaram dados da rede KSC, nos verões de 1975 e 1976 e concluíram que a intensidade média do campo elétrico no solo, produzido pelas nuvens de tempestade ficou em torno de  $-0.8$  kV/m até  $-2.1$  kV/m. Além disso concluiu que 71% de todas as descargas elétricas ocorriam durante a parte ativa da tempestade o que representa apenas 27% do tempo total da tempestade. Concluíram também que cerca de 40% e 52% de todas as descargas elétricas eram do tipo nuvem-solo durante o período ativo da tempestade e durante o fim da tempestade, apenas 20% eram do tipo nuvem solo. Murphy et al. (1996) utilizou dados de sensores eletrostáticos obtidos entre 19 de julho e 9 agosto de 1991. Ao todo foram analisadas 394 descargas elétricas. 79 em 19 de julho e 315 em 9 agosto. Verificaram que 58% das descargas admitiam soluções de estrutura monopolar ou dipolar. Ao cruzarem estes dados com leituras de radar, identificaram que os pontos de solução para os centros de carga coincidiam com os pontos em que a refletividade do radar ficava entre 5dBZ e 35 dBZ. Qie et al. (2003) utilizou sensores eletrostáticos para estimar a estrutura de carga elétrica capaz de produzir as alterações medidas no campo elétrico na superfície, em uma tempestade ocorrida em Qinghai-Tibet Plateau, no verão de 2002. Com base nas medidas de campo elétrico, pude concluir que a nuvem iniciou sua atividade elétrica em uma estrutura dipolar, com o centro de carga positivo em torno de 2.5 km e o negativo a 4 km. Contudo a nuvem evoluiu para um estagio onde possuía uma estrutura quadriplar, com dois centros de carga negativos a 2 km e 4 km e dois centros de carga positivos a 3 km e 6 km. E por fim, no estagio final de dissipação da tempestade, verificaram que o centro de carga mais alto a 6 km retornou a aproximadamente 5 km.

### 1.5 Sondas em balões

Os sensores de balão são descritos em detalhes por MacGorman e Rust (1998). Conforme o exemplo mostrado na Figura 1.4.a são constituídos basicamente por duas esferas metálicas afixadas a uma haste isolante. Na ponta da haste que sustenta as esferas existe um motor que faz as esferas girarem sobre o eixo x, ( $f = 2.5\text{Hz}$ ,  $T = 0,4\text{s}$ ), e uma bateria para manter o motor em funcionamento. A haste que sustenta as esferas é sustentada pelas duas pontas e ligada a um fio que sai de um carretel conforme a figura 1.4.b. O carretel ao desenrolar faz todo o conjunto da haste composto pelas esferas, motor e bateria girarem com uma frequência angular

muito menor que a rotação das esferas e constante ( $f = 0.125\text{Hz}$ ,  $T = 8\text{s}$ ).

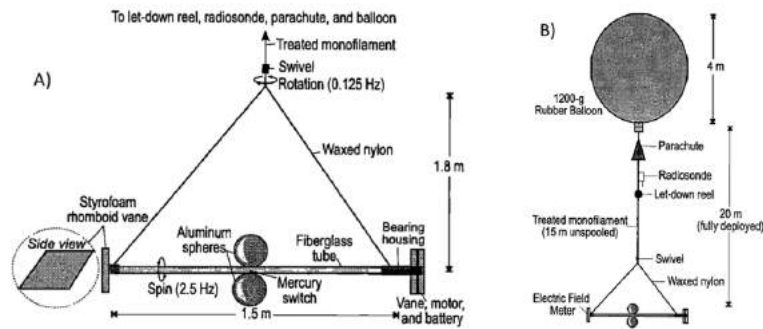


Figura 1.4 - Esquema de um sensor de campo elétrico para balão  
Fonte: Macgorman e Rust (1998)

A técnica consiste basicamente em medir a corrente elétrica que flui de uma esfera para outra à medida que as esferas giram. Pois, sob influência do campo elétrico vertical e horizontal, à medida que as esferas giram os elétrons se deslocam de uma esfera para outra, formando uma corrente conforme elétrica. Esta corrente elétrica se relacionada ao campo elétrico indutor. Estas medidas são transmitidas durante o voo do balão por uma radiossonda que fica logo acima do carretel. Após recebidos os dados são processados para se decompor as componentes vertical e horizontal do campo elétrico.

## 1.6 Sondas em foguetes

Marshall et al. (1995) utilizou sensores de campo elétrico em foguetes e em balões em duas tempestades diferentes e puderam comparar os métodos. E obtiveram para alturas iguais, perfis semelhantes. Verificou que cada uma das tempestades possuía regiões onde os centros de carga elétrica parecia se acumular. Verificou ainda que a ocorrência dos relâmpagos intensificavam o campo elétrico em regiões entre 9,7 e 14,3 km. Em lançamentos de foguetes com subida e de decida igual a 60 segundos, notaram que as maiores variações do campo elétrico nas nuvens estão acima de 7,5 km. Marshall e Stolzenburg (1998) utilizam sensores de campo elétrico em balões para estudar nuvens de tempestades no Novo México e concluíram que as densidades máximas de carga elétrica ficavam entre  $-2.1$  e  $+1.8\text{nC}/\text{m}^3$ . Marshall e Stolzenburg et al. (1998) através de medidas semelhantes formulou um modelo para as densidades de carga densidade de carga elétrica em função da altura, para estruturas quadripolares,

como mostra a Figura 1.5. Marshall et al. (2005) também combinaram leituras de campo elétrico obtidos por balões e dados de LMA. Verificaram que os picos de emissão de radiação no interior das nuvens coincidiam com os picos de campo elétrico medido.

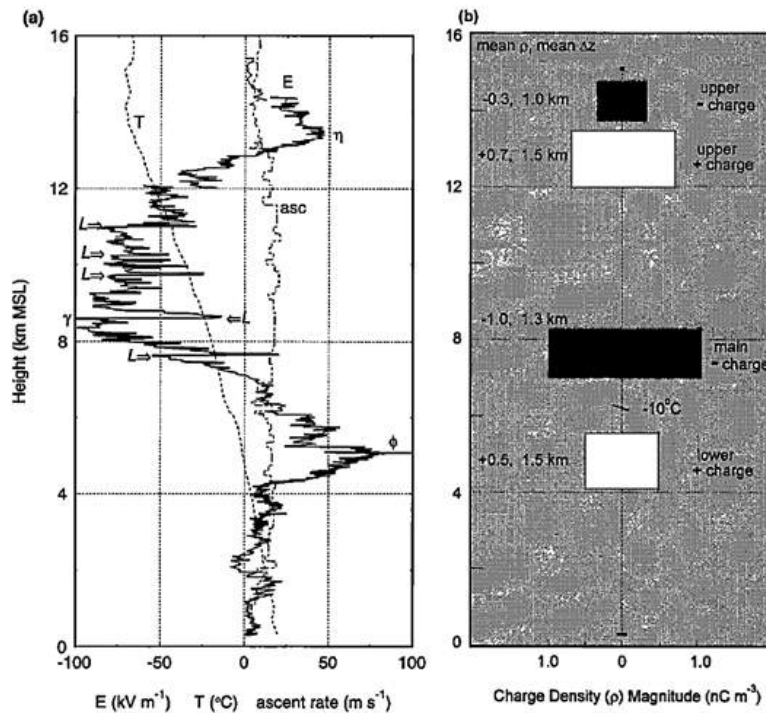


Figura 1.5 - (a) Campo elétrico em função da altura (b) Densidade de carga elétrica em função da altura

Fonte: Marshall e Stolzenburg (1998)

Zhao et al. (2010) utilizou sensores de descarga corona em balões para estudar uma nuvem de tempestade em 20 julho de 2008. Concluiu com base nos gráficos obtidos que se tratava de uma estrutura elétrica quadripolar. O centro positivo mais alto se encontrava a cerca de 7km. O centro positivo mais baixo se encontrava a cerca de 3km. O negativo mais intenso se encontrava a cerca de 5km. O resultado obtido por eles é o exemplo visto na Figura 1.6.

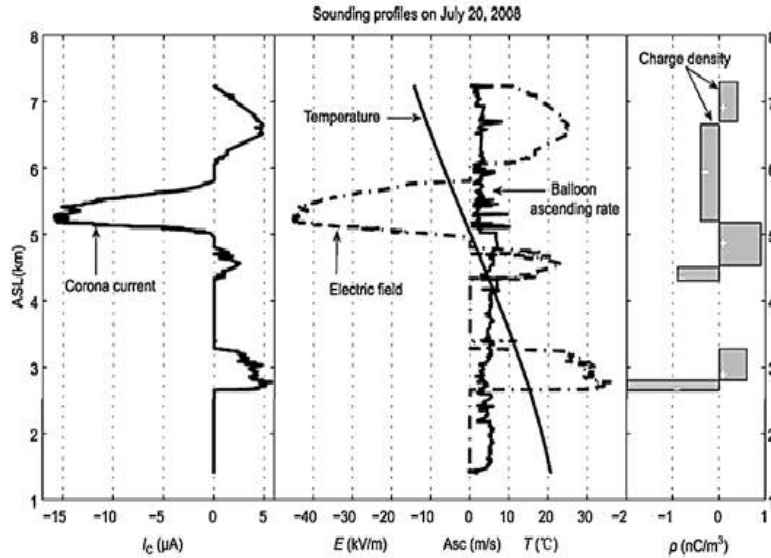


Figura 1.6 - (esquerda) Campo elétrico em função da altura; (centro) temperatura (linha constante), e campo elétrico (linha pontilhada) em função da altura, (direita) densidade de carga em função da altura

Fonte: Zhao et al. (2010)

É importante ressaltar que a estrutura elétrica descrita por Zhao e Qie difere do modelo proposto por Stolzenburg, e das medidas feitas por Marshall e Stolzenburg em relação as posições dos centros de carga, contudo em todos os trabalhos as densidades de carga encontrados são da mesma magnitude, não ultrapassando  $10 \text{ nC/m}^3$ . Estes resultados combinados fornecem ótimo parâmetro de comparação para as alturas mais prováveis dos centros de carga dentro das nuvens de tempestade, e um parâmetro ainda melhor para os valores esperados das densidades de carga elétrica nestas regiões.

## 1.7 Detecção de relâmpagos pela radiação emitida

Diferente do estudo do campo elétrico nas nuvens de tempestade, que já era estudado a mais de três séculos, o estudo da radiação emitida pelos relâmpagos é relativamente atual. Pode-se atribuir, o início deste estudo a compreensão da origem dos Whistlers, que já eram conhecidos em 1919, embora não se soubesse explicar ao certo suas origens (HELLIWELL, 1965; SMITH; ANGERAMI, 1968). Storey (1953) foi o primeiro

a mostrar que os Whistlers, eram ondas eletromagnéticas na banda VLF originadas de descargas elétricas e se propagavam pela magnetosfera. A partir deste feito, outras pesquisas sobre a emissão eletromagnética dos relâmpagos foram realizadas ao redor do mundo. Vine e Angerami (1987) foram capazes de montar o primeiro espectro de emissão eletromagnético para as descargas elétricas, conforme visto na figura 1.7.a através de medidas de emissão de descargas elétricas, feitas por outros pesquisadores em várias bandas. Trabalhos experimentais como o de Sonnadara et al. (2004), vistos na figura 1.7.b confirmaram experimentalmente os resultados obtidos por Le Vine:

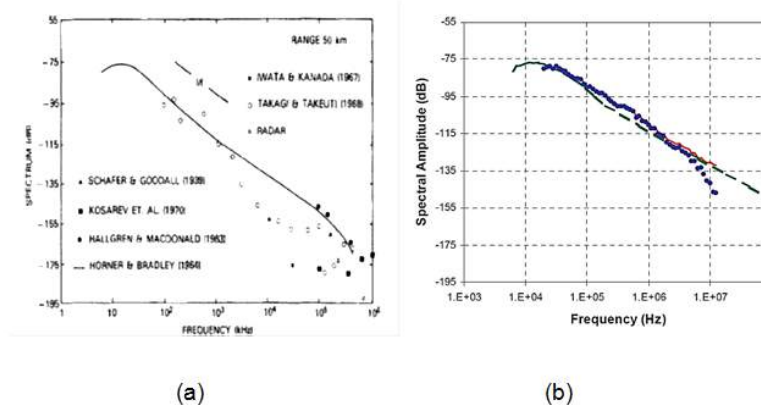


Figura 1.7 - (a) Espectro de emissão eletromagnética das descargas elétricas proposto por Le Vine e medido (b) por Sonnadara  
 Fonte: (SONNADARA et al., 2004; VINE; ANGERAMI, 1987)

A cooperação de outras pesquisas possibilitou uma melhor compreensão a respeito da radiação emitida pelos relâmpagos. Décadas atrás já se tinha conhecimento de que os relâmpagos emitem radiação em uma vasta gama de frequências (MALAN, 1963). Uman (1987) mostrou que descargas elétricas do tipo NS (Nuvem Solo) possuem emissão máxima de radiação de baixa frequência na banda LF (Low Frequency) 10 e 100kHz devido a emissão eletromagnética ocorrida durante as descargas de retorno. Krider (1996) mostrou que relâmpagos IN (Intra Nuvem), de forma geral não apresentam descargas de retorno, e possuem máxima emissão na banda VHF, entre 100-800MHz. Outro aspecto importante é que as emissões em VLF se propagam por uma distância maior e podem ser detectadas a milhares de quilômetros, já as emissões em LF e VHF podem ser detectadas a centenas de quilômetros. O avanço da instrumentação e da computação permitiu a classificação em tempo real dos relâmpagos em NS ou IN pela análise de seu espectro de radiação em varias bandas.

Em cada return-stroke de um relâmpago NS existe um pico de emissão em LF e pouca emissão em VHF, o que permite a classificação dos relâmpagos em NS ou IN (ABNT, 2002b). Além da classificação em NS ou IN também é possível determinar, pela radiação emitida, outras características importantes dos relâmpagos, tais como: duração, polaridade e pico de corrente elétrica, conforme mostra a Figura 1.8.

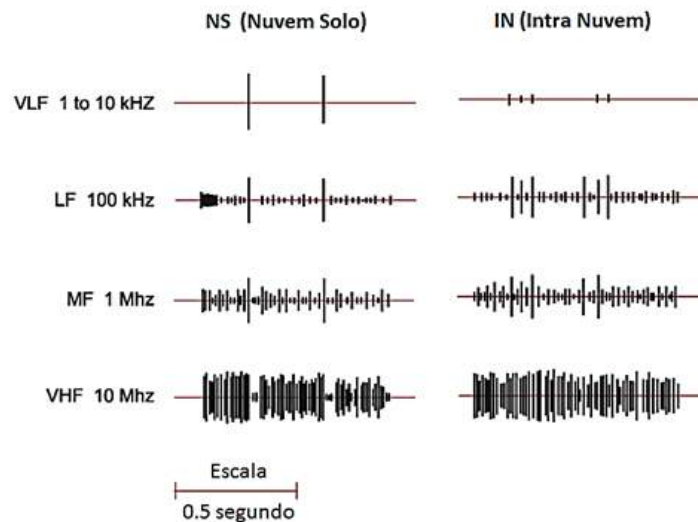


Figura 1.8 - Emissão eletromagnética por raios NS e IN em várias bandas de emissão  
Fonte: (MALAN, 1963)

Estas descobertas possibilitaram a construção das redes de detecção de relâmpagos. De acordo com os registros históricos, a primeira rede de detecção de relâmpagos foi implantada na década de 80 nos Estados Unidos e testada pela primeira vez em 8 de outubro de 1982 (ORVILLE; HUFFINES, 1999). Chamada de East Cost Lightning Detection Network, esta rede era constituída de nove sensores espalhados pela costa leste dos Estados unidos. Cada sensor possuía um alcance de 400km de forma que juntos eram capazes de identificar relâmpagos sobre uma área que cobria quatorze estados americanos e incluíam um quarto da população do país. Os sensores desta rede mediam a radiação emitida pelos relâmpagos nas bandas VLF e LF entre 10 e 300kHz e VHF entre 30 e 300MHz. Sua principal aplicação inicial era acompanhar a evolução das nuvens de tempestade através do mapeamento dos relâmpagos e monitorar o desenvolvimento de tornados. As primeiras redes de detecção utilizavam o método MDF (Magnetic Direction Finder) para determinar a

posição dos relâmpagos através da orientação do campo magnético produzido pelo relâmpago. Hoje, a técnica mais utilizada pela comunidade científica é o TOA (Time Of Arrival Lightning Location retrieval), cujo aprimoramento resultou no surgimento do LMA (Lightning Map Array).

### 1.8 Time of Arrival (TOA)

Esta técnica utiliza o tempo de chegada da radiação emitida por uma descarga elétrica, em várias antenas distribuídas ao longo da área de cobertura. O tempo é registrado para cada antena que recebe a radiação. Em seguida, para encontrar o ponto de origem, é necessário solucionar um sistema de equações com os tempos colhidos (KRIDER, 2011; SILVEIRA, 2004; UMAN, 1987; POELMAN, 2010). As antenas utilizadas para este método podem ser de banda única, ou não, nas bandas LF, VLF, LV, MF ou VHF. Se o objetivo for cobrir uma área maior, é preferível utilizar LF e VHF simultaneamente, pois LF possui alcance maior, podendo chegar a milhares de quilômetros, e junto com VHF permite classificar adequadamente as descargas elétricas. Contudo, se o objetivo for ter maior precisão na posição dos focos da radiação, é preferível utilizar VHF, mas com isso se ganha precisão e perde-se alcance. As redes que utilizam VHF cobrem em média 100 km. Para determinar a posição do foco da radiação, isto é, a posição estimada do relâmpago, pode-se utilizar um conjunto de equações hiperbólicas, sendo que em qualquer caso, é necessário um número de três ou mais sensores. Este sistema de equações pode ser resolvido tanto no espaço 3D ou no plano xy, como fazem a maioria dos autores (UMAN, 1987; POELMAN, 2010; KRIDER, 2011; SILVEIRA, 2004; CUMMINS et al., 2000).

### 1.9 Lightning Mapping Array(LMA)

Um sistema de LMA normalmente é constituído de uma dúzia ou mais antenas espalhadas na região de interesse, normalmente com raio inferior a 50km. Cada uma das antenas LMA registra com precisão o tempo de chegada (TOA) de radiação em altas frequências emitida pelos relâmpagos (VHF). Esta radiação ocorre quando cargas elétricas são aceleradas durante descargas atmosféricas. Cada uma destas acelerações impulsivas é denominada um evento ou uma fonte. A localização tridimensional de cada fonte é determinada por diferenças de tempo de chegada GPS em cada estação. Para um determinado raio, o LMA pode localizar centenas de milhares de tais fontes VHF, resultando em mapas detalhados da atividade do relâmpago. As Figuras 1.9.a e 1.9.b mostram um sensor de LMA.

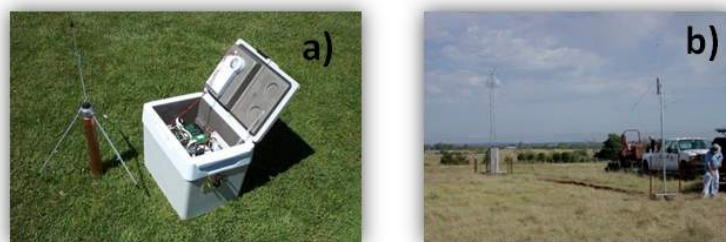


Figura 1.9 - - (a) Antena e datalogger antes da instalação, (b) Depois da instalação.  
 Fonte: (ALBRECHT, 2011)

As Figuras 1.10.a e 1.10.b mostram em exemplo de dados de LMA colhidos no estado de São Paulo, pelas redes LINET, SP-LMA e ENTLN que estiveram operacionais durante o projeto CHUVA - Vale do Paraíba, entre 2011 e 2012 (BLAKESLEE et al., 2013). Nesta figura cada ponto no gráfico representa uma emissão de radiação em um intervalo de apenas um segundo e meio. As cores, segundo as cores do arco íris, indicam o tempo em que cada foco de radiação ocorreu dentro do intervalo de um segundo e meio.

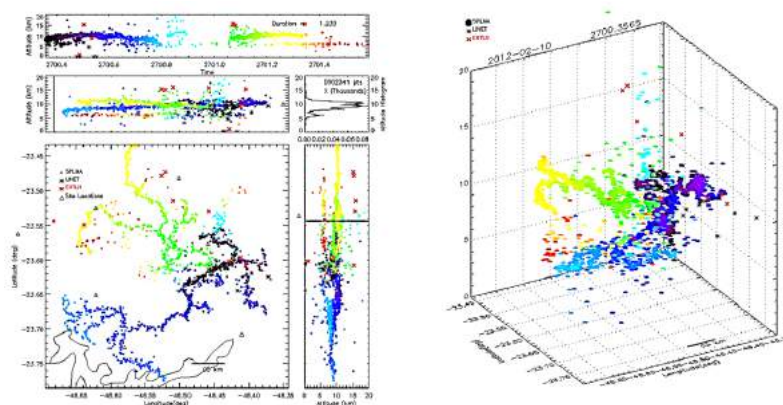


Figura 1.10 - (a) Exemplo de medida de LMA (b) Projeção em 3D.  
 Fonte: (BLAKESLEE et al., 2013)

O LMA pode ser usado para revelar muitas características de tempestades, incluindo estimativa do total de relâmpagos intra-nuvem, nuvem solo, para determinar posição dos centros de carga elétrica, ou mesmo a evolução desta a estrutura elétrica

durante toda a tempestade. Descrições detalhadas do LMA podem ser encontradas nos trabalhos autores tais como: [Rison et al. \(1999\)](#), [Wiens et al. \(2005\)](#). Em seu trabalho [Rison et al. \(1999\)](#) detalha a implantação de uma rede de LMA constituída de 10 estações distribuídas em uma área com cerca de 60km de diâmetro em torno do Laboratório de Tecnologia e Pesquisa Langmuir nas montanhas de Magdalena. Cada estação detectava o pico de radiação em VHF na banda de 6 MHz de um canal de televisão não utilizado, o canal 3 centrado em 63 MHz. O pico de radiação detectado era gravado durante um intervalo de  $100\mu s$ , tempo no qual a potência de RF excedia o limite de ruídos. A resolução de gravação dos picos era de 40ns. Para isso eram utilizados um digitalizador de 20MHz com precisão de fase travada em um pulso por segundo e um receptor GPS Motorola Oncore. Eventos detectados por seis ou mais estações eram mapeados em três dimensões no espaço e no tempo. O painel superior da Figura 1.11 mostra a evolução temporal de um relâmpago intra-nuvem comum detectado por esta rede durante o funcionamento. Conforme no painel superior da figura, o líder negativo do relâmpago é responsável pela maior parte da radiação em VHF, e se desloca até as alturas próximas dos 10km e permanece nesta altura durante a evolução onde existe concentração de cargas elétricas positivas. Já o líder positivo, que irradia menos em VHF, inicia-se cerca de 50ms depois do negativo, se desloca até as alturas próximas aos 7km, onde existe concentração de cargas negativas ([RISON et al., 1999](#)).

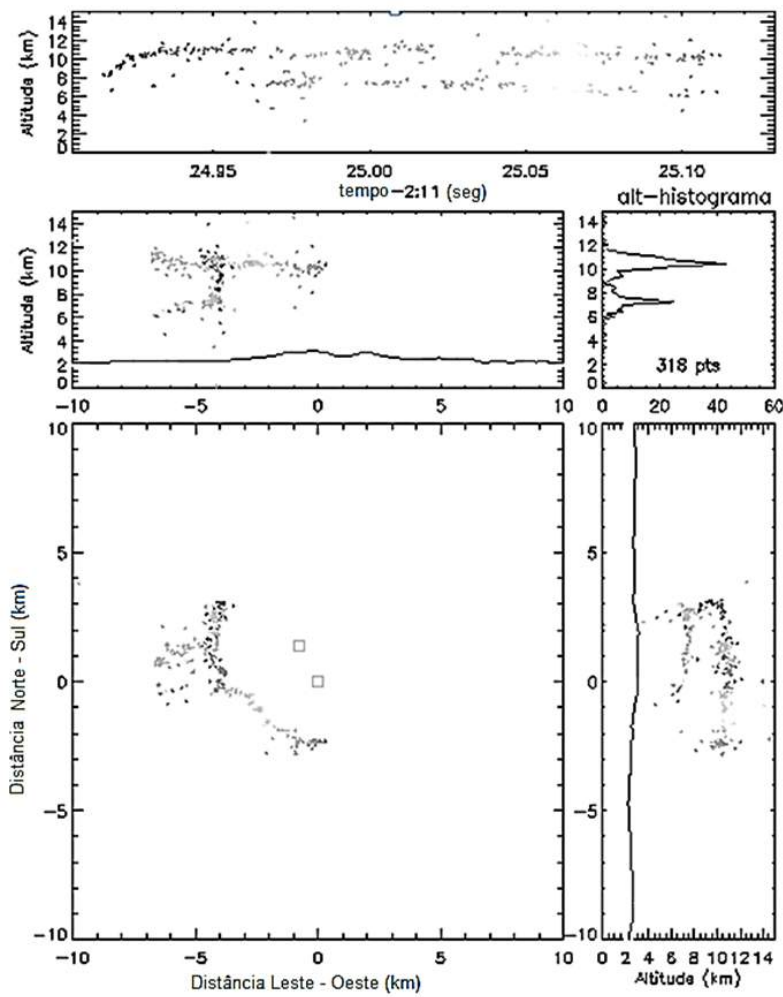


Figura 1.11 - Radiação em VHF emitida por um relâmpago intra-nuvem típico  
 Fonte: (RISON et al., 1999)

Essa sequência de eventos é típica de relâmpagos intra-nuvem observadas em VHF. Os focos de radiação do relâmpago detectados nas alturas normalmente estão associados a propagação de um líder negativo do relâmpago na direção de um centro de carga positivo mais alto. Já os focos de radiação da parte mais baixa, provavelmente estão relacionados a um líder positivo se propagando na direção de um centro de carga negativo mais baixo (RISON et al., 1999).

### 1.10 RAdio Detection And Ranging (RADAR)

Em grande parte o desenvolvimento do RADAR (RAdio Detection And Ranging) se deu para fins bélicos, e somente após a segunda guerra mundial começou a ser uti-

lizado para fins científicos (ANGELIS, 2011). Atualmente os radares meteorológicos são indispensáveis para o estudo da atmosfera, e para controle dos voos comerciais. As informações colhidas pelos radares meteorológicos contribuem para identificar as regiões onde existem tempestades severas, vendavais e chuvas de granizo entre outros fenômenos. Segundo Leitão (2011) o princípio de funcionamento do radar se dá em duas etapas: detecção e localização. Detecção: Uma antena direcional transmite uma onda eletromagnética. Qualquer obstrução ou alteração desta onda durante o percurso dará origem a um eco, produzido pela reflexão da onda incidente. Este eco pode ser detectado e fornece informações sobre a posição e propriedades do alvo que interagiu com a onda. No caso dos radares meteorológicos, o alvo é, neste caso, uma população de partículas que refletem certa potência de sinal. Cada tipo de partícula reflete o sinal com um certo ganho em relação à onda incidente e essa capacidade de reflexão é chamada refletividade e é medida em dBz. Localização: Sabendo-se que as ondas eletromagnéticas propagam-se a uma velocidade conhecida, é possível medir a diferença de tempo entre a emissão e o eco recebido para se obter a distância do alvo. A direção do alvo é obtida a partir da elevação do azimuth da antena. Os radares podem cobrir centenas de quilômetros, e devolver medidas muito precisas a regiões separadas de apenas 100 metros na atmosfera e utilizar variadas bandas de frequência, dependendo-se da aplicação e do que se espera detectar na atmosfera. A Figura 1.12 mostra as principais bandas utilizadas em radares:

<b>Bandas de sistemas de radar</b>		
Banda UHF	0,3 - 1	GHz
Banda L	1 - 2	GHz
Banda S	2 - 4	GHz
Banda C	4 - 8	GHz
Banda X	8 - 12	GHz
Banda Ku	12 - 18	GHz
Banda K	18 - 27	GHz
Banda Ka	27 - 40	GHz

Figura 1.12 - Principais bandas utilizadas nos radares  
 Fonte: (LEITÃO, 2011)

De forma simplificada a relação entre a potência irradiada por um radar e a potência recebida por ele após ter incidido sobre um alvo pode ser descrita pela equação do radar:

$$P_r = \frac{\sigma \lambda^2 G^2 P_t}{64\pi^3 r^4} = \left[\frac{1}{64\pi^3}\right][\lambda^2 G^2 P_t]\left[\frac{\sigma}{r^4}\right] \quad (1.1)$$

Na equação 1.1,  $P_r$  representa a potência recebida pelo radar após o pulso ser refletido por um alvo.  $P_t$ ,  $G$  e  $\lambda$  são características do radar e representam respectivamente: a potência transmitida pelo radar, o ganho da antena e o comprimento de onda utilizado.  $\sigma$  e  $r$  são características do alvo e representam respectivamente a área da seção transversal do alvo e a distância até o alvo. Em radares meteorológicos, o radar integra o sinal recebido durante períodos de tempo consecutivos para obter uma estimativa das partículas existentes em consecutivos volumes de radar. O volume de radar consiste na região do espaço que é iluminada por um pulso de radar. Os múltiplos alvos distribuídos dentro de um volume de radar pode conter,

por exemplo, bilhões de pingos de chuva iluminados por um pulso de radar, conforme ilustra a Figura 1.13:

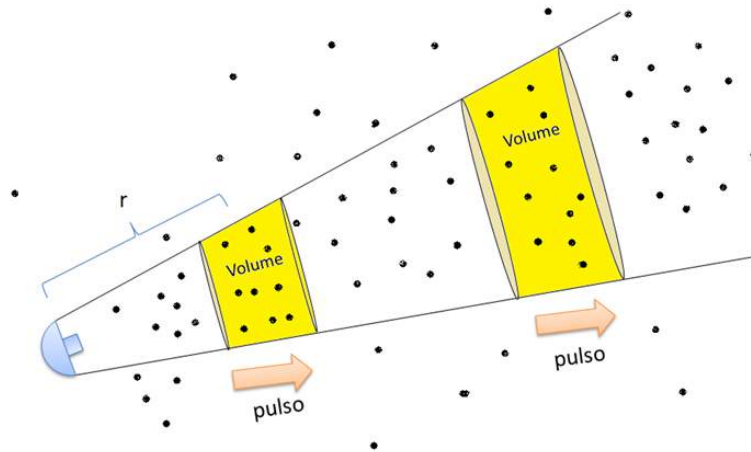


Figura 1.13 - Ilustração de um volume de radar

Quanto maior a quantidade de alvos, e quanto mais densos forem, mais refletiram o pulso de radar recebido. A refletividade recebida pelo radar pode fornecer um indicador do tipo de partículas presentes em cada volume do espaço coberto pelo radar. A Figura 1.14 mostra um exemplo de imagem que pode ser obtida pelo radar meteorológico utilizando-se a banda X. As cores indicadas na lateral, do mais azul para o mais avermelhado indicam a refletividade obtida em cada região.

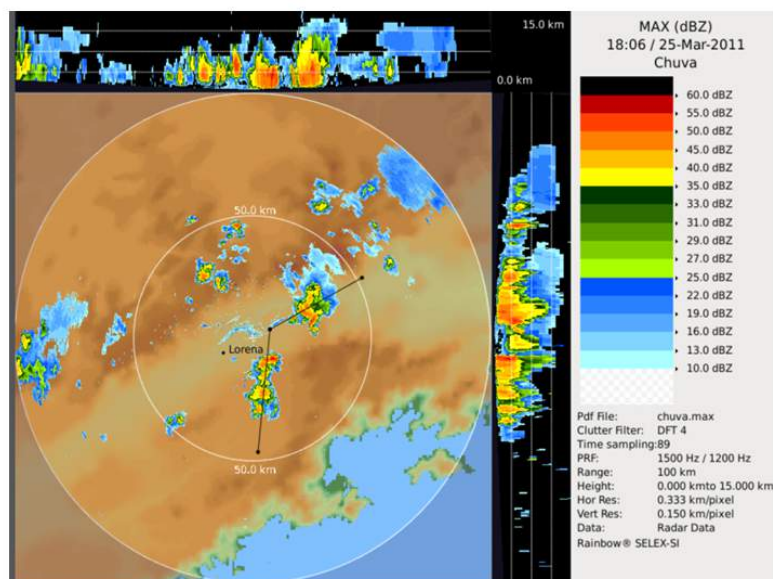


Figura 1.14 - Exemplo de leitura de RADAR obtida em 25 de março de 2001 as 18h06min  
 Fonte: (ANGELIS, 2011)



## 2 INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DOS RELAMÂPGOS

### 2.1 Iniciação dos relâmpagos

Um dos fatores determinantes para a iniciação dos relâmpagos é a rigidez dielétrica do ar. Segundo [Williams \(2006\)](#) a mobilidade de partículas eletricamente carregadas em gases é inversamente proporcional à densidade de matéria e, portanto a rigidez elétrica decai com a diminuição da pressão atmosférica. A rigidez do ar é rompida quando o campo elétrico atinge o valor de 3 MV/m ao nível do mar onde a pressão é igual a 1000 mb e na região dos 3 a 5 km, onde os relâmpagos se iniciam com mais frequência, a rigidez dielétrica é rompida em cerca de 1,1 MV/m, e a pressão fica em torno de 440 a 500 mb. Contudo, os campos elétricos medidos nestas regiões ficam entre 300 kV/m e 340 kV/m, de forma que a hipótese de [Rakov e Uman \(2003\)](#) de que apenas o campo elétrico nestas regiões seria suficiente para quebrar a rigidez dielétrica do ar é rebatida por [Williams \(2006\)](#) e seria preciso outro mecanismo para explicar a iniciação dos relâmpagos nestas regiões. Uma das hipóteses para o processo de intensificação do campo elétrico é chamada de instabilidade hidrodinâmica. Esta hipótese se baseia na possibilidade de gotas grandes de chuva serem alongadas por indução elétrica, ou pelo processo de colisão entre duas gotas. Experimentos em laboratório e comprovaram que objetos condutores, como esferas, ou agulhas, imersos em um campo elétrico seriam capazes de intensificar o campo elétrico ([RAKOV; UMAN, 2003](#)). Para entender melhor este conceito podemos imaginar um condutor imerso em um campo elétrico, conforme mostra a Figura 2.1. Segundo [Williams \(2006\)](#) seria necessário um campo elétrico de para iniciar a descarga elétrica, na ponta positiva deste condutor e um campo de para iniciar uma descarga na ponta negativa. Aceitando esta hipótese a descarga se iniciaria mais facilmente no terminal positivo, onde os elétrons seriam atraídos para a ponta condutora.

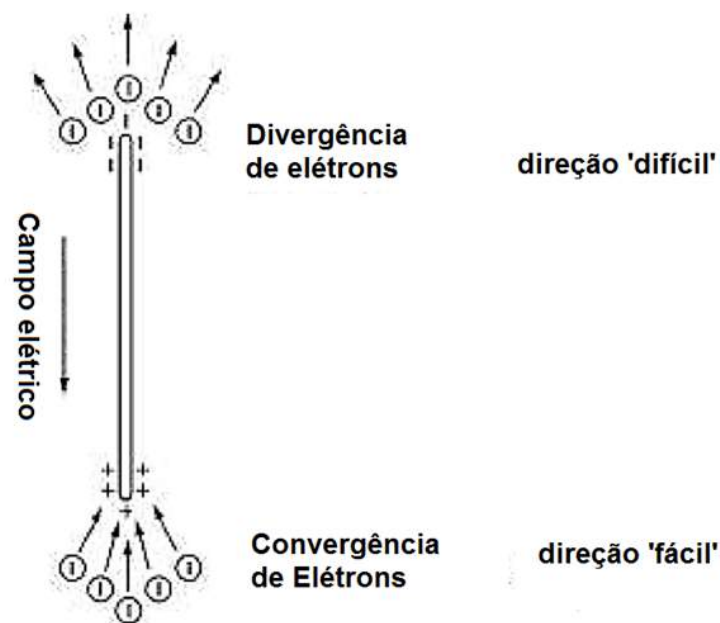


Figura 2.1 - Condutor imerso em um campo elétrico, a terminação positiva atrai elétrons e a negativa repele os elétrons. Nas duas pontas existe intensificação do campo elétrico

Fonte: Adaptada de [Williams \(2006\)](#)

## 2.2 A teoria do líder bi-direcional

A teoria atualmente mais discutida sobre a iniciação e propagação dos relâmpagos é a teoria do líder bi-direcional com carga total nula. Este conceito foi inicialmente introduzido por Heinz Kasemir nos anos 50. Futuramente através da observação de relâmpagos disparados por aeronaves foi possível obter provas experimentais para teoria ([MAZUR, 2002](#)). A ideia fundamental deste conceito é: a iniciação do relâmpago em uma nuvem eletrificada ocorre de forma bi-direcional e com carga líquida total nula. Este tipo de iniciação se dá em relâmpagos: intra-nuvem; nuvem-solo; disparados por aeronave ou disparados por foguetes. [Mazur \(2002\)](#) descreveu em seu trabalho, com a ajuda do LMA, a iniciação e as etapas dos relâmpagos intra-nuvem e nuvem-solo. Um resumo destas etapas é mostrado nas Figuras 2.2 até 2.3. Os painéis em preto nas Figuras 2.2.b e 2.3.b mostram as alturas (em quilômetros) dos focos de radiação do relâmpago (eixo vertical) em função do tempo em segundos (eixo horizontal). Os desenhos indicados pelos tempos de até mostram as fases do relâmpago desde sua iniciação e os pontos brancos representam as fontes de radiação.

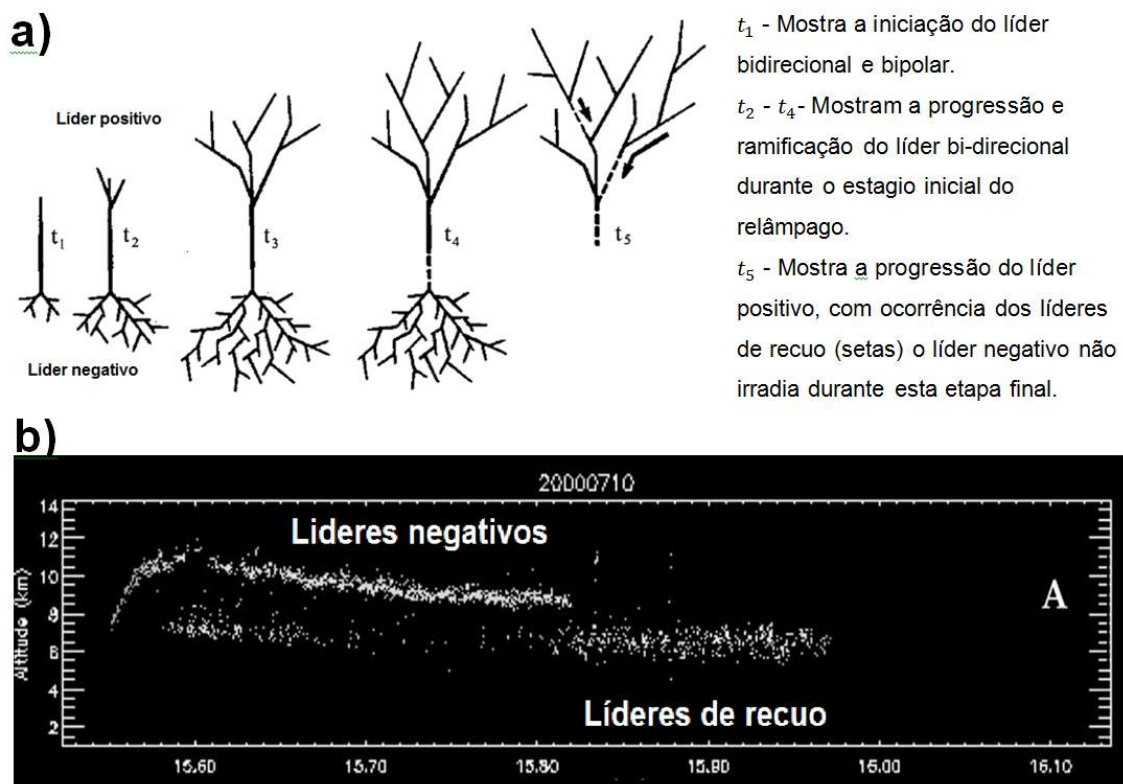
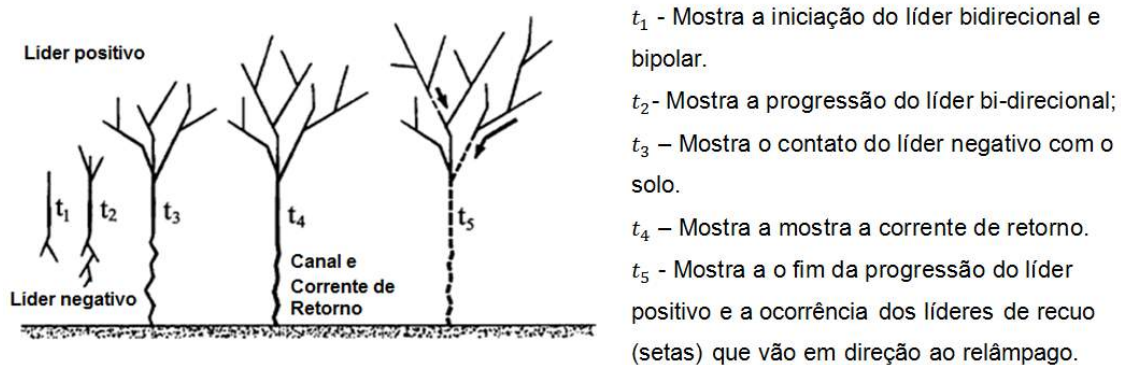


Figura 2.2 - a) Iniciação e etapas de um raio INTRA-NUVEM. b) Exemplo do mapeamento da radiação medida por um relâmpago intra-nuvem usando LMA  
 Fonte: Adaptada de Mazur (2002)



b)

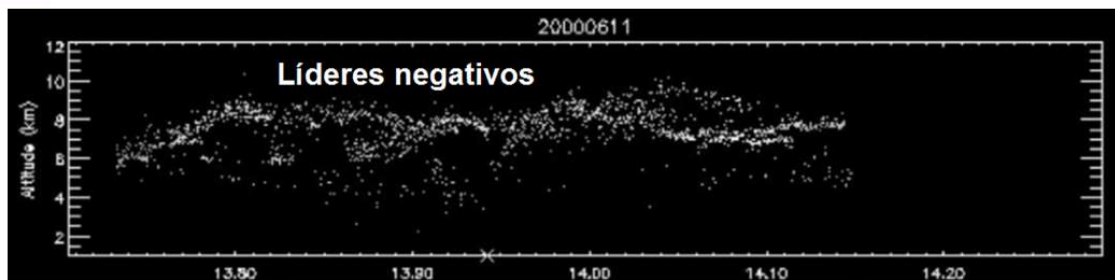


Figura 2.3 - a) Iniciação e etapas de um raio NUVEM-SOLO NEGATIVO. b) Exemplo do mapeamento da radiação medida por um relâmpago intra-nuvem usando LMA

Fonte: Adaptada de Mazur (2002)

Nos dois exemplos mostrados, tanto para raios intra-nuvens, como para os nuvem-solo, que representam a maioria dos relâmpagos existentes, os líderes negativos emitem a maior parte da radiação detectada pelo LMA. É importante ressaltar que líder positivo atrairá elétrons da atmosfera, e da mesma forma será atraído por eles, desta forma o líder positivo tende a se propagar na direção de centros de carga negativos. Analogamente, os líderes negativos repelem os elétrons da atmosfera, e tendem a ser atraídos para os centros de carga positiva. Utilizando estes conceitos, autores como Wiens et al. (2005), Bruning e Macgorman (2013) tem conseguido estimar a posição dos centros de carga elétrica no interior das nuvens de tempestade. Bruning e Macgorman (2013) baseando-se em outros trabalhos oferecem respostas a perguntas importantes a respeito dos relâmpagos:

i) Onde os relâmpagos iniciam? ii) Como os relâmpagos se propagam? iii) Em que direção os relâmpagos se propagam?

Bruning e Macgorman (2013) afirmam que para responder a estas duas perguntas

é necessário estudar a propagação de cada relâmpago separadamente e isto se tornou possível na última década pois houve um avanço significativo na obtenção de dados de radiação em frequências mais altas (VHF) com grande precisão temporal e espacial. Isto permitiu estudar a iniciação e a propagação dos relâmpagos de uma tempestade separadamente e desta forma determinar os padrões individuais dos relâmpagos em relação à tempestade, verificando para cada relâmpago, onde eles se iniciam e para onde eles se deslocam. Ao se superpor o comportamento dos relâmpagos, pode-se obter um perfil da estrutura elétrica da nuvem de tempestade. Segundo [Bruning e Macgorman \(2013\)](#) os relâmpagos se iniciam entre os centros de carga, em regiões de campo elétrico extremo, e o líder bidirecional se propaga simultaneamente, nas direções onde há concentração de cargas elétricas positivas e negativas, sendo que o líder negativo se propagará na direção das cargas positivas e o líder positivo se propagará na direção das cargas negativas. A Figura 2.4 descreve, segundo [Bruning e Macgorman \(2013\)](#) as regiões mais prováveis de iniciação dos relâmpagos e as direções de propagação dos mesmos em relação aos centros e carga. As linhas tracejadas indicam as regiões mais prováveis de iniciação dos relâmpagos, isto é, os locais onde a quebra de rigidez do ar seria mais provável devido a intensificação do campo elétrico. As linhas pretas contínuas indicam a propagação inicial do relâmpago na direção dos centros de carga elétrica. As manchas cinza escuras e claras representam respectivamente a concentração de cargas elétricas positivas e negativas.

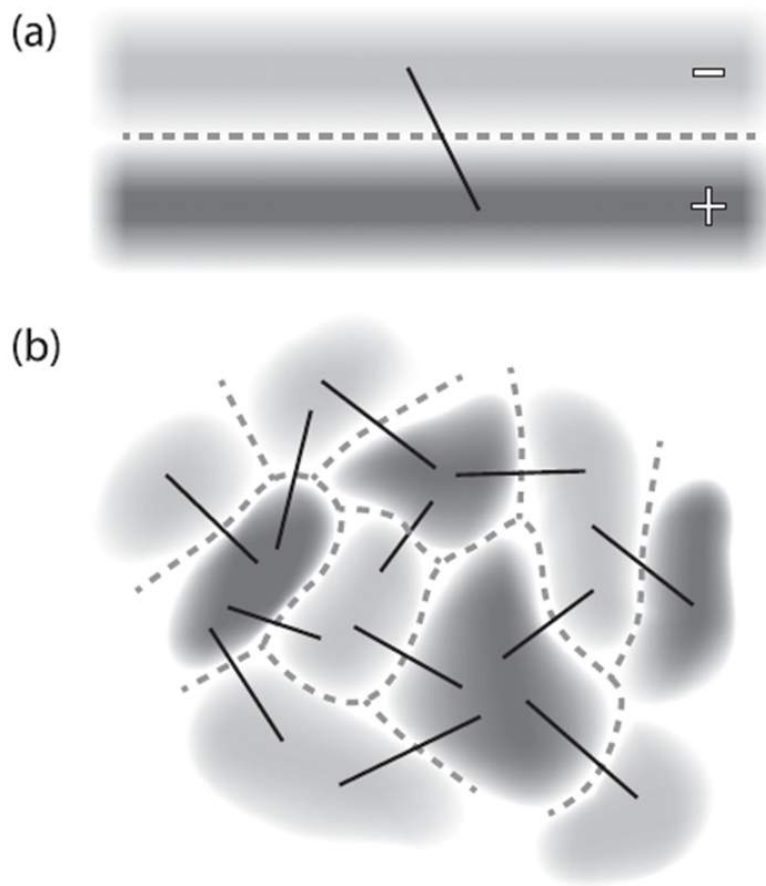


Figura 2.4 - Duas estruturas de carga idealizadas mostrando a) grandes estruturas estratificadas horizontalmente e b) bolsões menores de carga elétrica. Cinza escuro e claro representam cargas positivas e negativas respectivamente  
 Fonte: Adaptada de [Bruning e Macgorman \(2013\)](#)

### 2.3 Localização dos centros de carga pelo LMA

[Wiens et al. \(2005\)](#), [Wiens \(2005\)](#) mostrou que era possível determinar a estrutura elétrica das nuvens através do estudo da propagação de cada relâmpago da tempestade individualmente. Em seu trabalho, alguns pontos altos já mencionados são considerados por [Rison et al. \(1999\)](#), [Mazur \(2002\)](#), [Bruning e Macgorman \(2013\)](#):

- a) Os relâmpagos se iniciam nas regiões onde o campo elétrico é extremo, isto é, nas regiões entre os centros de carga positiva e negativa;
- b) Os relâmpagos se propagam de forma bidirecional, sendo constituídos por um líder positivo e por um líder negativo;
- c) Os líderes negativos geralmente se iniciam antes dos positivos o que permite determinar pelo início do relâmpago qual dos líderes é o positivo e qual é

o negativo. d) Os líderes negativos possuem mais focos de radiação em VHF e por isso são mapeados com um número maior de pontos pelo LMA. Eles se propagam na direção de regiões onde existem concentrações de carga positiva. e) Os líderes positivos possuem menos focos de radiação VHF, e por isso são mapeados com um número menor de pontos pelo LMA. Eles se propagam na direção de regiões onde existem centros de carga negativa.

A Figura 2.5 mostra este estudo feito para dez minutos de uma tempestade ocorrida em 23 de junho de 2000. Neste estudo, a propagação de cada relâmpago da tempestade foi considerada individualmente. E desta forma foi possível mapear a posição dos centros de carga elétrica positivos e negativos dentro da nuvem de tempestade. Na Figura 2.5 é possível ver em tom mais avermelhado a posição dos centros de carga elétrica positivos. Estas regiões atraem os líderes negativos, que representam a maior parte dos focos de radiação em VHF detectado pelo LMA. Em tom mais azulado os centros de carga negativos, que atraem os líderes positivos. Nota-se que existem três regiões de destaque, duas nas extremidades mais alta e mais baixa da nuvem (em laranja), para onde se propagam os líderes negativos, e uma central (em azul), para onde se propagam os líderes positivos. As regiões das extremidades mais altas e mais baixas representam centros de carga elétrica positivos, e a região central um centro de carga elétrica negativa. Portanto, a nuvem em questão possui uma estrutura elétrica tripolar.

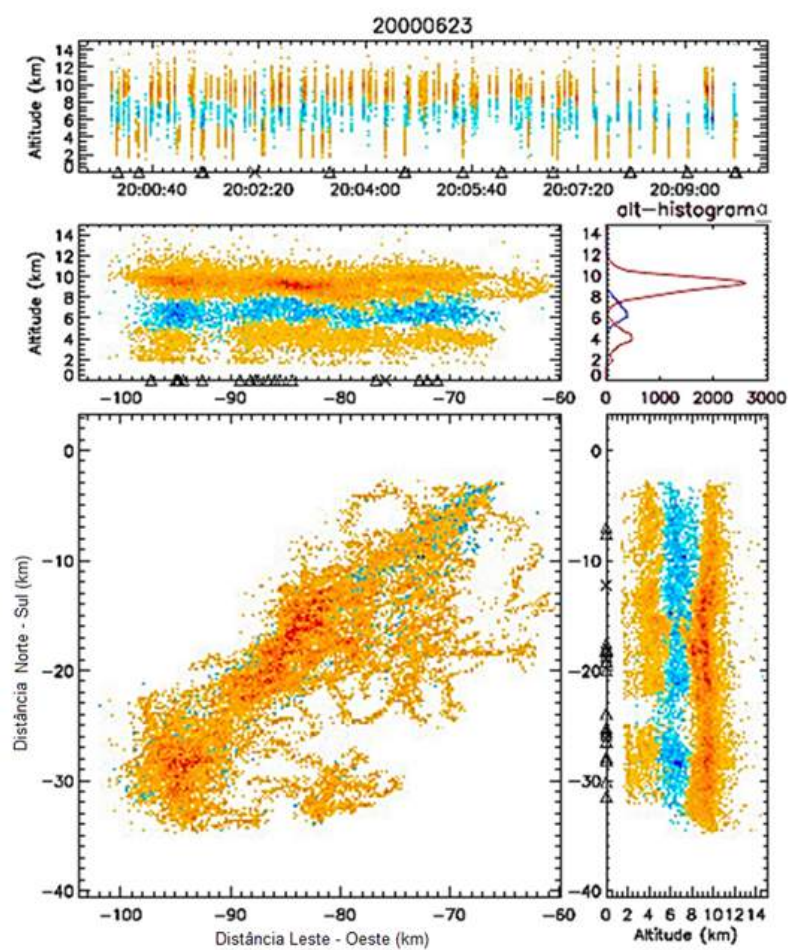


Figura 2.5 - Estimativa da regiões e polaridade dos centros de carga elétrica: positivo(laranja) e negativo (azul)  
 Fonte: Adaptada de Wiens (2005)

### 3 DADOS UTILIZADOS

#### 3.1 Base 1

A primeira base de dados utilizada foi obtida pela campanha do projeto CHUVA/Vale do Paraíba, que ocorreu no Brasil, entre setembro de 2011 e março de 2012. Esta campanha contou com 7 sensores de campo elétrico. Destes 5 foram instalados na cidade de São José dos campos, e uma rede de LMA constituída de 12 sensores distribuídos na cidade de São Paulo a aproximadamente 80km da rede de sensores de campo elétrico. As Tabelas 1.1 e 1.2 mostram a posição dos instrumentos utilizados durante esta campanha, e a Figura 3.1 mostra a posição dos instrumentos no mapa.

Tabela 3.1 - Posição dos sensores de campo elétrico da BASE 1

Sensor	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
ieav	-23,251728	-45,857773	682
met	-23,211283	-45,860278	632
aer	-23,224739	-45,862521	633
peq	-23,201461	-45,873773	607
bin	-23,209431	-45,880862	603
iag	-23,559251	-46,734083	733
novadutra	-23,35356	-46,181	778

Tabela 3.2 - Posição dos sensores de LMA da BASE 1

Sensor	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
A	-23,4878	-46,8316	808,8
B	-23,7022	-46,8251	783,8
C	-23,6507	-46,6219	825,3
D	-23,7257	-46,5796	828,3
E	-23,5616	-46,7351	805,6
F	-23,5242	-46,6218	750,3
G	-23,7078	-46,41	823,4
H	-23,5767	-46,4593	842,24
J	-23,4819	-46,5006	760,9
K	-23,5138	-46,1557	765,42
L	-23,536	-46,3274	749,35
M	-23,3749	-46,3503	841,61

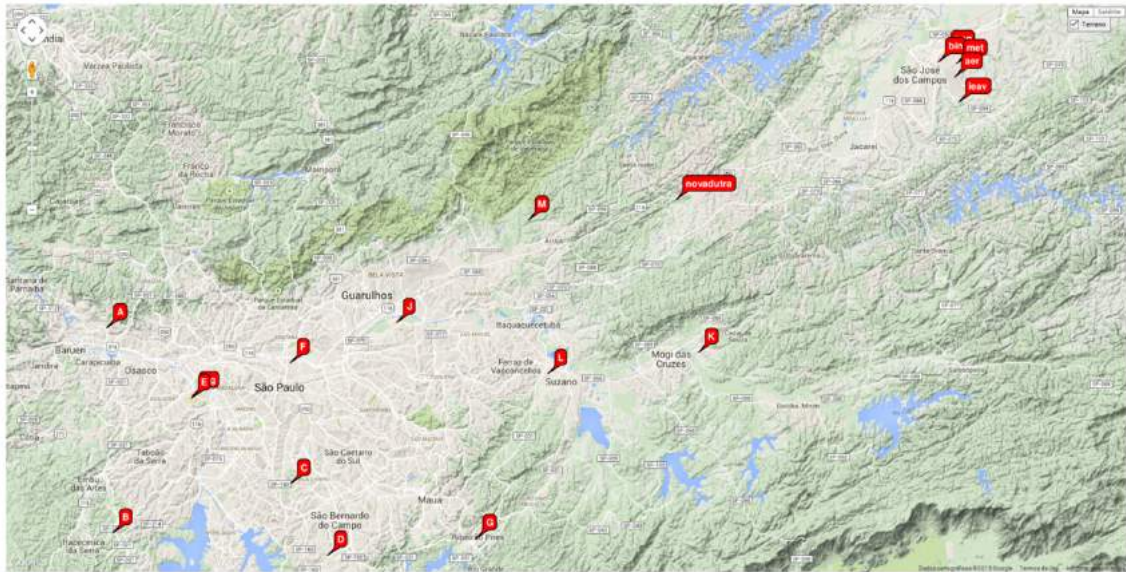


Figura 3.1 - Posição dos instrumentos - BASE 1

Fonte: Imagem gerada através do Google Maps

Pela análise dos dados, a eficiência da rede de LMA sobre São José dos Campos durante a campanha foi de 5

### 3.2 Base 2

A segunda base de dados foi cedida pelos pesquisados americanos: Tom Warner, Ronald Thomas, Bill Rison, Paul Krehbiel e Julia Tilles. Esta campanha ocorreu na cidade de Rapid City / EUA entre Junho e Julho de 2014, e teve como principal objetivo estudar os as descargas elétricas sobre as torres existentes na cidade de Rapid City. A rede possuía três sensores de campo elétrico. Dois permaneceram na mesma posição durante toda a campanha e um era móvel. O sensor móvel GR era levado para próximo da tempestade, onde permanecia durante toda a tempestade. A rede de sensores de LMA foi constituída por dez sensores distribuídos na cidade de Rapid City. As Tabelas 1.3 e 1.4 mostram a posição dos instrumentos, e a Figura 3.2 mostra as posições dos sensores sobre o mapa. As posições do sensor de campo elétrico móvel GR se encontram plotadas no mapa em azul, e as demais em vermelho.

Tabela 3.3 - Posição dos sensores de campo elétrico da BASE 2

Sensor de campo elétrico	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
SP	44,08114	-103,247	999
WN	44,0389	-103,295	1177
GR	MOVEL	MOVEL	MOVEL

Tabela 3.4 - Posição dos sensores de LMA da BASE 2

Sensor de LMA	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)
A	44,0516	-103,143	928,96
B	43,56203	-103,221	997,9
C	43,7214	-102,144	772,34
D	44,06861	-102,127	833,04
E	43,9443	-102,236	883,65
F	43,80753	-101,922	758,55
G	43,8	-101,9	800
H	43,81574	-102,546	873,45
I	44,1542	-102,964	958,33
J	43,80754	-101,922	764,84

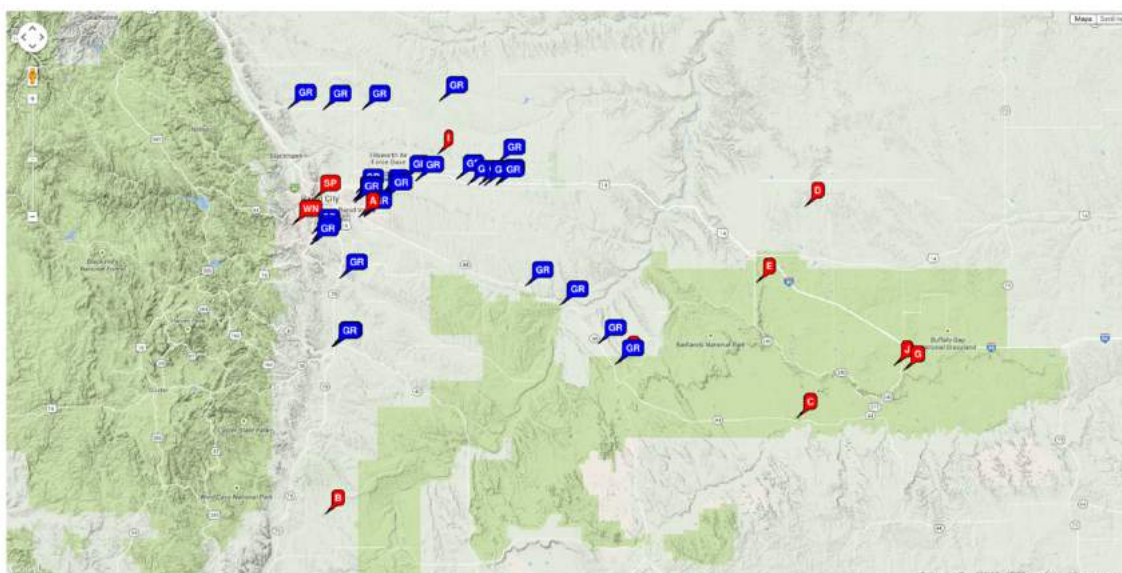


Figura 3.2 - Posição dos instrumentos - BASE 2. As marcas em azul representam todas as posições do sensor móvel durante a campanha

Fonte: Imagem gerada através do Google Maps

### 3.3 Comparativo das medidas

A fim de verificar a consistência das medidas dos instrumentos foram feitos histogramas comparativos medidas de campo elétrico e de LMA.

#### 3.3.1 Comparativo dos sensores de campo elétrico

O comparativo das medidas de campo elétrico consiste em verificar se sensores de campo elétrico possuem uma distribuição normal de probabilidade. Distribuições que diferem muito da distribuição normal podem indicar ruídos, diferenças na calibração dos instrumentos, ou outro fator de interferência nas medidas. Para cada instrumento foi feita a contagem de quantas vezes um determinado valor de campo elétrico foi medido em intervalos de contagem a cada 100 V/m. Com o objetivo de se assegurar que os sensores funcionaram adequadamente obtivemos o diagrama de frequência para cada um deles e analisamos visualmente as distribuições obtidas. A Figura 3.3 mostra esses diagramas para todos os sensores da BASE 1. Os eixos horizontais representam os intervalos de contagens e os verticais representam quantas medidas correram dentro do intervalo: O sensor MET apresentou uma significativa diferença na distribuição das medidas abaixo de 1000V/m em módulo. Contudo, acima de 1000 V/m e abaixo de -1000 V/m a cauda da distribuição é semelhante a dos demais sensores. Ainda não temos uma explicação para o desempenho anômalo desse sensor abaixo desse valor. O mesmo teste foi realizado para todos os sensores de campo elétrico da BASE 2, e verificou-se que apresentavam distribuição semelhante a uma distribuição normal. A figura 3.4 mostra este teste para os sensores da BASE 2.

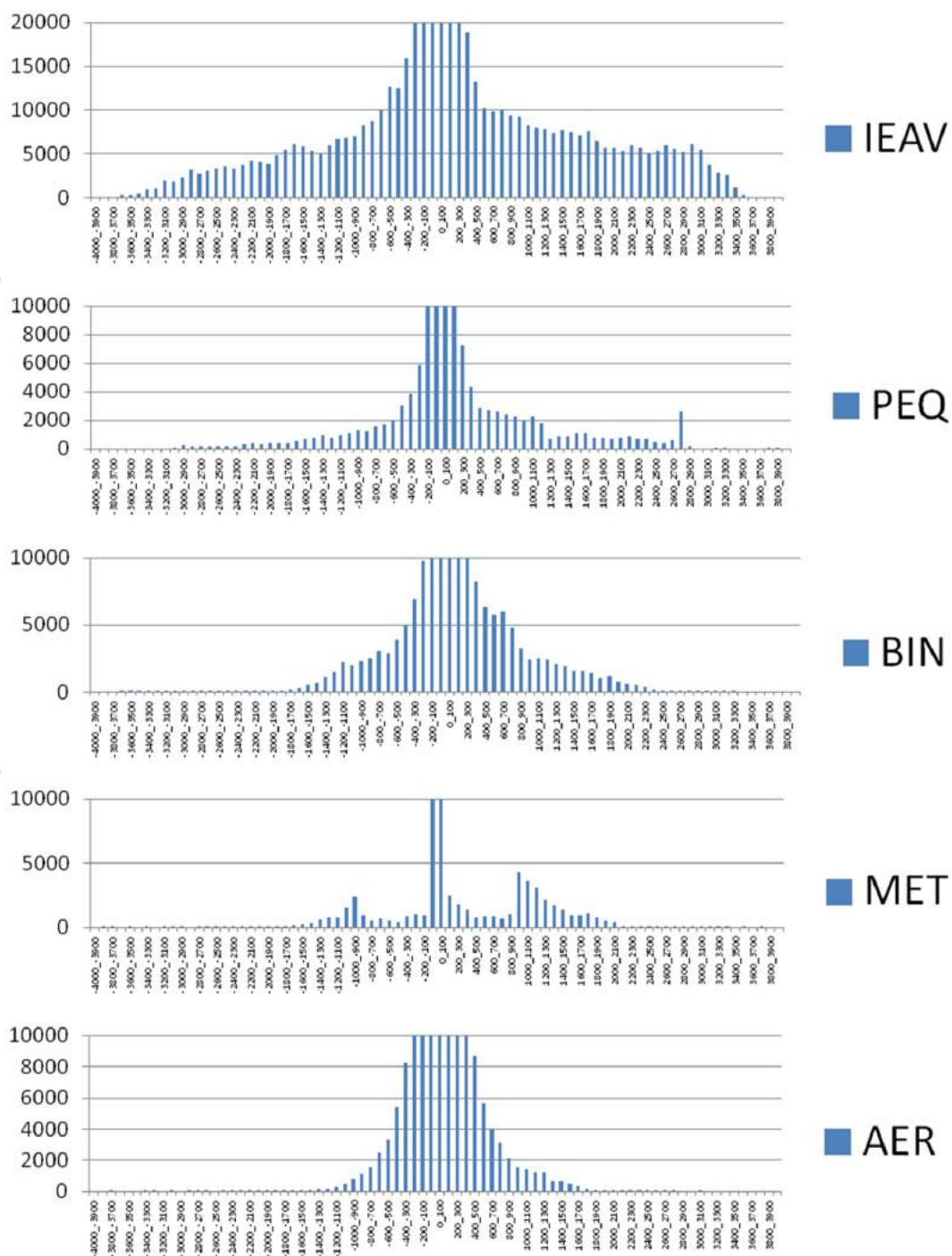


Figura 3.3 - Distribuição de todas as medidas de campo elétrico para a BASE 1 em intervalos de 100V/m. Eixo horizontal (intervalos de 100V/m), eixo vertical (Número de ocorrência)

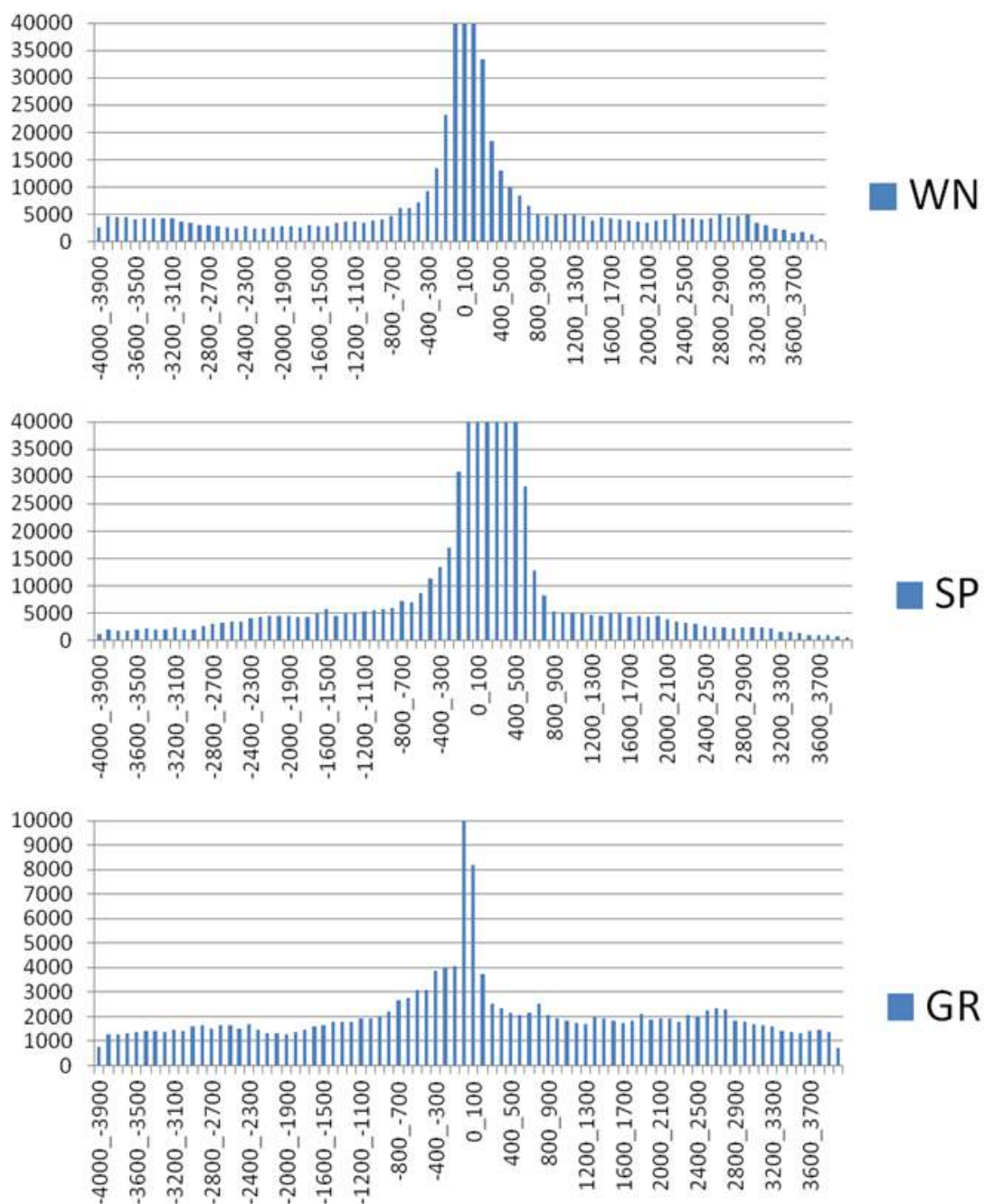


Figura 3.4 - Distribuição de todas as medidas de campo elétrico para a BASE 2 em intervalos de 100V/m. Eixo horizontal (intervalos de 100V/m), eixo vertical (número de ocorrência).

### 3.3.2 COMPARATIVO DAS MEDIDAS DO LMA

Para as medidas de LMA foram feitas duas comparações semelhantes, uma para verificar quantas vezes a rede mediu um valor com determinada potência, e outra

para determinar a quantidade de focos medidos em função da distância do centro da rede. A Figura 3.5 mostra a quantidade de focos em função da distância até o centro da rede, observa-se que a maior quantidade de focos de radiação para o LMA da BASE 1 foi em torno dos 20km do centro da rede, enquanto que para a BASE 2 por volta dos 97km.

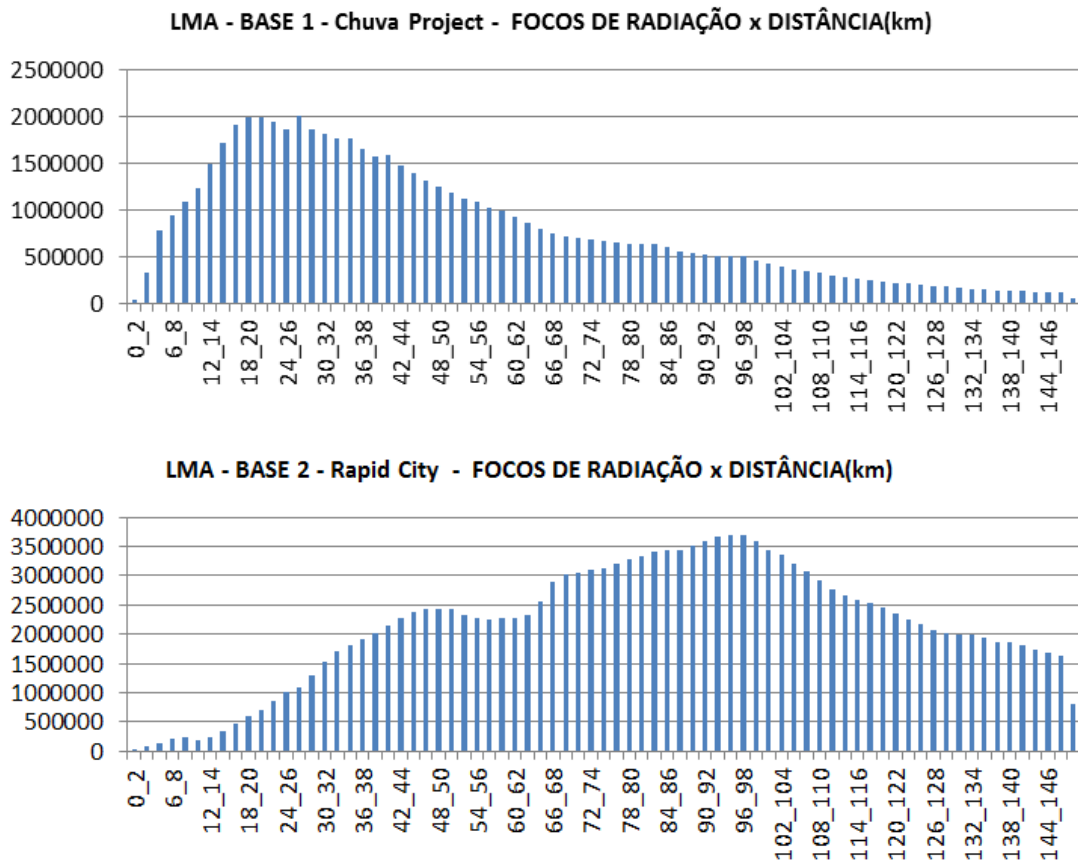


Figura 3.5 - Distribuição do número de focos detectados pelo LMA em função da distância nas duas bases em intervalos de 2km. Eixo horizontal (intervalos de 2km), eixo vertical (número de ocorrência).

A Figura 3.6 mostra a distribuição do número de focos em função das potências em intervalos de 0,1dBW. Os picos anormais por volta dos 7,5 dBW ocorrem devido a presença de torres de transmissão de TV que também utilizam bandas em VHF próximas a rede de detecção.

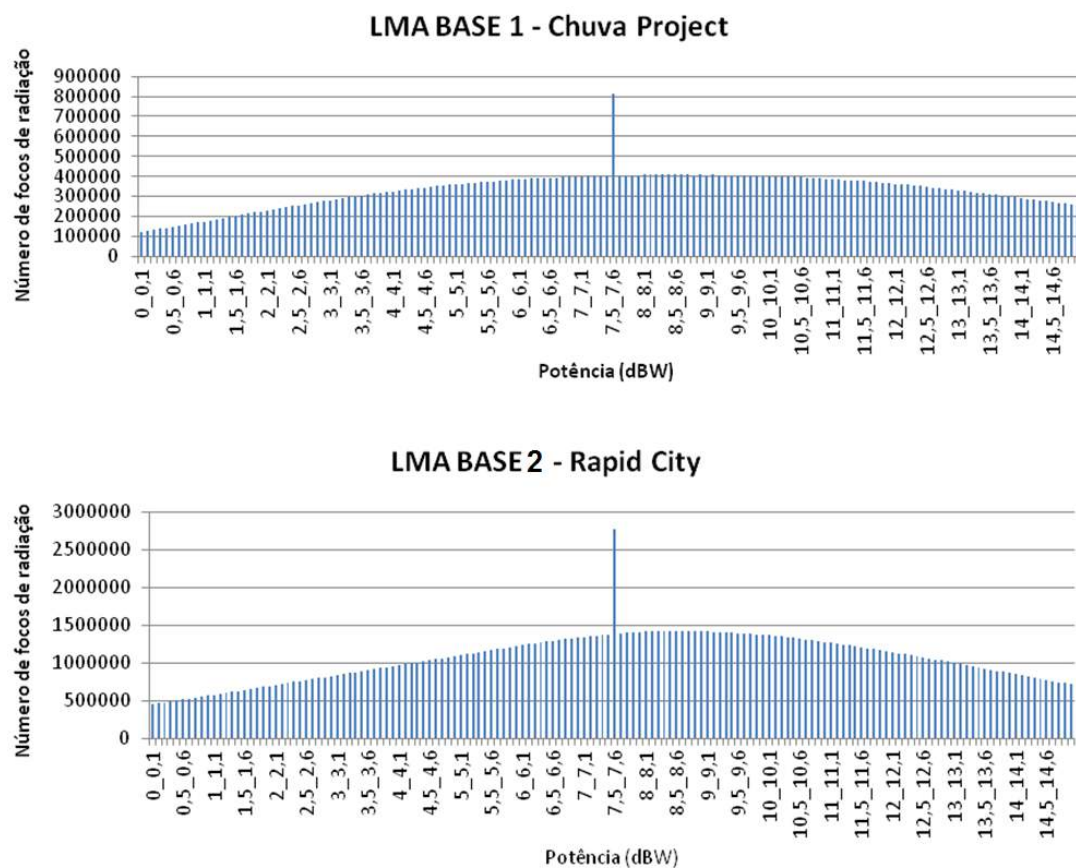


Figura 3.6 - Distribuição do número de focos detectados pelo LMA em função das potências intervalos 0,1dBW. Eixo horizontal (intervalos de 0,1dBW), eixo vertical (número de ocorrência)

## 4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se divide nas seguintes etapas: a) Separação dos relâmpagos por flash b) Determinação das alturas e polaridades dos relâmpagos c) Determinação dos volumes dos centros d) Determinação das densidades de carga elétrica e) Verificação dos resultados

### 4.1 Separação dos dados de LMA por relâmpagos

Para aplicação deste método é necessário estudar o comportamento de cada relâmpago. Para isso os dados de LMA precisam ser separados por relâmpagos. Os dados de LMA da BASE 1 estão disponíveis separados por relâmpagos no banco de dados do projeto CHUVA. Os dados da BASE 2 foram separados por relâmpago pela execução de um algoritmo sob a supervisão da Dra. Rachel Albrecht do IAG / USP. Exemplos desses dados plotados temporalmente serão mostrados nas Figuras 4.1.a 4.2.a, bem como em todas as demais figuras semelhantes apresentadas nos estudos de casos.

### 4.2 Determinação das alturas e polaridades dos centros

A detecção das alturas e polaridades dos centros de carga elétrica se vale de três conceitos já amplamente discutidos entre a comunidade científica:

- a) Os relâmpagos se iniciam nas regiões onde o campo elétrico é mais intenso, isto é, entre os centros de carga elétrica (BRUNING; MACGORMAN, 2013).
- b) Os relâmpagos se propagam de forma bidirecional, sendo que uma extremidade do canal possui polaridade positiva e a outra extremidade polaridade negativa, estas extremidades são chamadas de líderes positivos e líderes negativos (RISON et al., 1999).
- c) Após a quebra de rigidez elétrica do ar, o líder negativo é observado primeiro pelo LMA antes do líder positivo e é detectado por um número maior de focos de radiação em VHF pelo LMA (MAZUR, 2002).
- d) O líder negativo se propaga para regiões com carga elétrica positiva, enquanto o líder positivo se propaga para regiões com carga elétrica negativa (WIENS et al., 2005; WIENS, 2005; MAZUR, 2002; BRUNING; MACGORMAN, 2013)
- e) O líder negativo ao se propagar produz mais focos de radiação em VHF e portanto é detectado pelo LMA com um número maior de pontos que o líder positivo (MAZUR,

2002; WIENS, 2005).

Considerando-se estes fatores a respeito da iniciação e propagação dos relâmpagos é preciso identificar primeiro a polaridade de cada relâmpago, e isto foi feito observando-se a direção de propagação no início de cada relâmpago. Como o líder negativo é visto primeiro pelo LMA, e também emite mais focos de radiação que o positivo é possível identificá-los em cada relâmpago. Para identificar-se o líder negativo, verificou-se a direção de propagação predominante nos primeiros 10% focos de radiação de cada relâmpago. Esta direção de propagação, foi adotada como a direção do líder negativo, e a direção de propagação oposta como a do líder positivo. Nos casos em que esse parâmetro não foi suficiente para distinguir, a segunda forma de identificar foi verificar qual direção de propagação emitiu mais focos em VHF pelo número de focos detectados em cada direção. A direção com maior número de focos em VHF foi considerada a direção do líder negativo. A Figura 4.1.a mostra um intervalo de 20 min de LMA, onde os focos dos líderes negativos e positivos estão identificados respectivamente pelas cores laranja e ciano. Uma vez discriminados os focos pertencentes aos líderes positivos e os focos pertencentes aos líderes negativos são realizadas duas contagens em função da altura em cada intervalo. O motivo de L ser igual a 500m será discutido ao fim da próxima seção. Para encontrar a posição dos centros de cargas foram criadas funções dependentes da altura onde foram armazenados os resultados dessas contagens. Sejam respectivamente as funções de contagem em cada intervalo de  $z$  para os focos dos líderes positivos e negativos:

$$\begin{aligned} \text{positivos}(z) = \text{numero de focos de lideres positivos entre :} \\ z - \frac{L}{2} \text{ e } z + \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{negativos}(z) = \text{numero de focos de lideres negativos entre :} \\ z - \frac{L}{2} \text{ e } z + \frac{L}{2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Após feita a contagem as funções  $\text{positivos}(z)$  e  $\text{negativos}(z)$  foram normalizadas dividindo-se ambas pelo seu máximo valor. Quando a função for igual a 1 significa máximo número de focos por intervalo e quando for igual a zero significa ausência de focos no intervalo. As Figuras 4.1.b, 4.1.c e 4.1.d mostram as projeções dos focos de

radiação vistos respectivamente de frente (plano xz), de cima (plano xy) e de lado (plano yz) em que x representa a longitude, y a latitude e z a altura. A Figura 4.1.e mostra as contagens  $positivos(z)$  (em vermelho) e  $negativos(z)$  em azul:

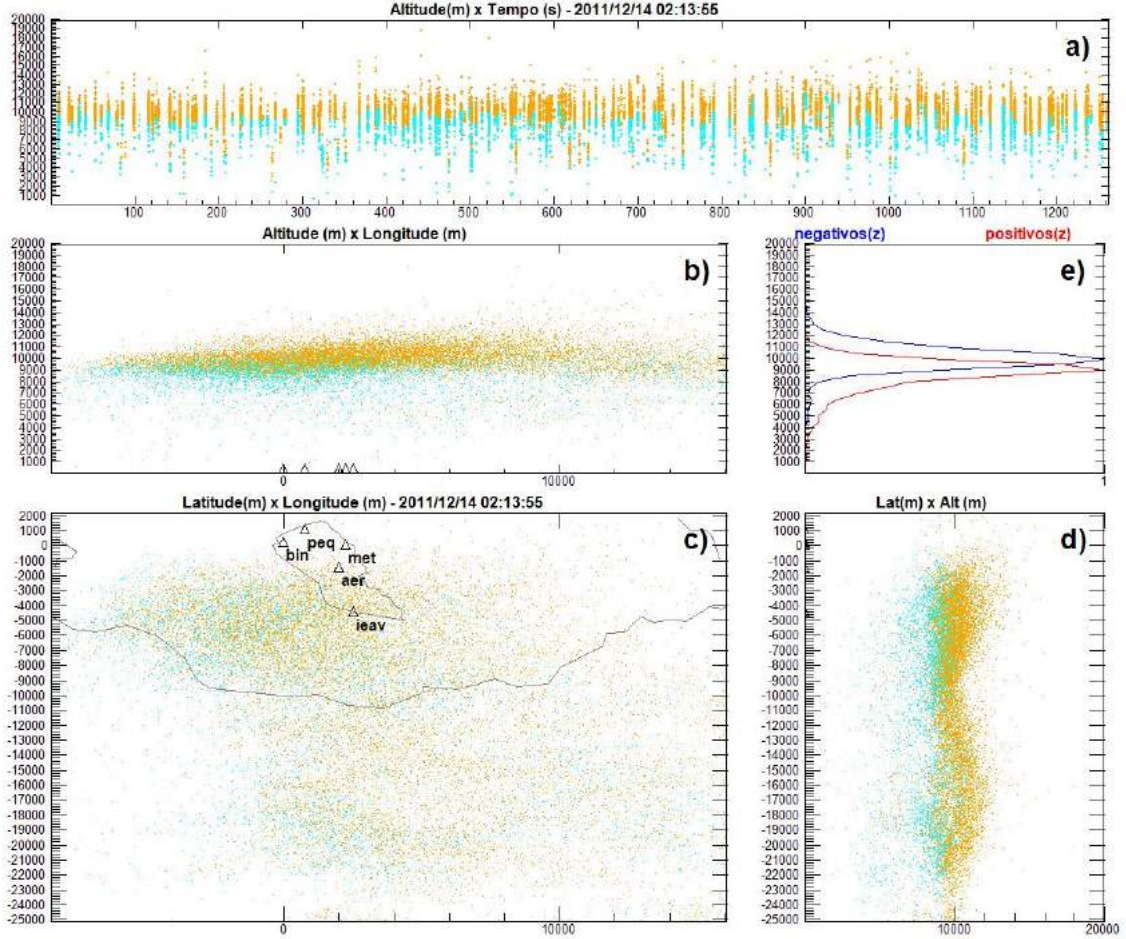


Figura 4.1 - Líderes positivos (em ciano) e líderes negativos (em laranja) identificados em cada relâmpago do intervalo

A polaridade dos centros em função da altura é determinada pela diferença das contagens  $positivos(z)$  e  $negativos(z)$

$$polaridade(z) = negativos(z) - positivo(z) \quad (4.3)$$

É importante destacar que  $polaridade(z)$  se refere a polaridade predominante de cargas elétricas cada altura. Observe que a função  $polaridade(z)$  pode variar de -1 até 1. Se  $polaridade(z) > 0$  então esta região foi predominantemente percor-

rida por líderes negativos indicando que devem existir cargas elétricas positivas. Se  $polaridade(z) < 0$  então esta região foi percorrida predominantemente por líderes positivos, indicando que ali devem existir cargas elétricas negativas. Finalmente, se  $polaridade(z) = 0$ , então esta região corresponde a regiões entre os centros onde os relâmpagos iniciam se  $negativos(z) = positivo(z) \neq 0$ , ou regiões onde não há atividade elétrica onde  $negativos(z) = positivo(z) = 0$ .

### 4.3 Determinação dos volumes dos centros

Considerando que as regiões com mais focos de radiação corresponderão as regiões onde existem centros de carga elétrica, a determinação dos volumes dos centros de carga elétrica pode ser feita buscando-se as regiões do espaço com maior atividade elétrica. Para isto faz-se um a contagem em todo o espaço, dividindo-se o espaço em cubos de arestas iguais a ( $L = 500m$ ) e determina-se para esse cubo a quantidade de focos de radiação presentes dentro deste volume. Seja  $focos(x, y, z)$  a contagem de focos de radiação para o espaço estudado, então:

$$focos(x, y, z) = \text{numero de focos nos intervalos :} \quad (4.4)$$

$$\left[x - \frac{L}{2} \text{ e } x + \frac{L}{2}\right] \left[y - \frac{L}{2} \text{ e } y + \frac{L}{2}\right] \left[z - \frac{L}{2} \text{ e } z + \frac{L}{2}\right]$$

Após feita a contagem, esta função também é normalizada, dividindo-a pelo seu máximo, de forma que se para um dado ponto  $(x, y, z)$  a contagem  $focos(x, y, z) = 1$  então em  $(x, y, z)$  existe o máximo número de focos por porção do espaço. Analogamente, se para um dado ponto  $(x, y, z)$  a contagem  $focos(x, y, z) = 0$  então em  $(x, y, z)$  não existem focos de radiação. Por fim para se identificar as regiões mais prováveis para existência dos centros de carga elétrica adota-se um parâmetro de corte  $C$  (adimensional,  $1 \geq C \geq 0$ ) relativo ao maximo numero de focos detectados em um cubo de volume  $L^3$  no espaço. A determinação das regiões do espaço mais prováveis para existencia dos centros é feita ao buscar-se as regiões do espaço onde:

$$focos(x, y, z) \geq C \quad (4.5)$$

E que ao mesmo tempo:

$$|polaridade(z)| \geq C \quad (4.6)$$

Se por exemplo  $C = 0,1$ , então as regiões selecionadas para prováveis para comporem os volumes dos centros de cargas serão aquelas em que o número de focos é igual ou maior a 10% do valor máximo. Neste caso, o volume será maior pois também compreenderá regiões com pouca atividade elétrica. Se  $C = 0,8$  então as regiões selecionadas para comporem os volumes dos centros de carga serão aquelas em que o número de focos de radiação é maior ou igual a 80% do ponto de máximo. E neste caso o volume será menor pois compreenderá apenas as regiões com alta atividade elétrica. A Figura 4.2 é análoga a Figura 4.1, mas com apenas o incremento das regiões onde e estas regiões são representadas pelos pequenos cubos na Figura 4.2 que juntos formam os volumes do centros. Os quadrados vermelhos indicam regiões de carga positiva e os azuis as regiões de carga negativa. Neste no exemplo mostrado o valor  $C$  está afixado em  $C = 0,2$ . O parâmetro  $C$  é indicado pela linha vertical preta nas Figuras 4.1.e e 4.2.e, bem como nas demais figuras semelhantes nos estudos de caso do item 5.

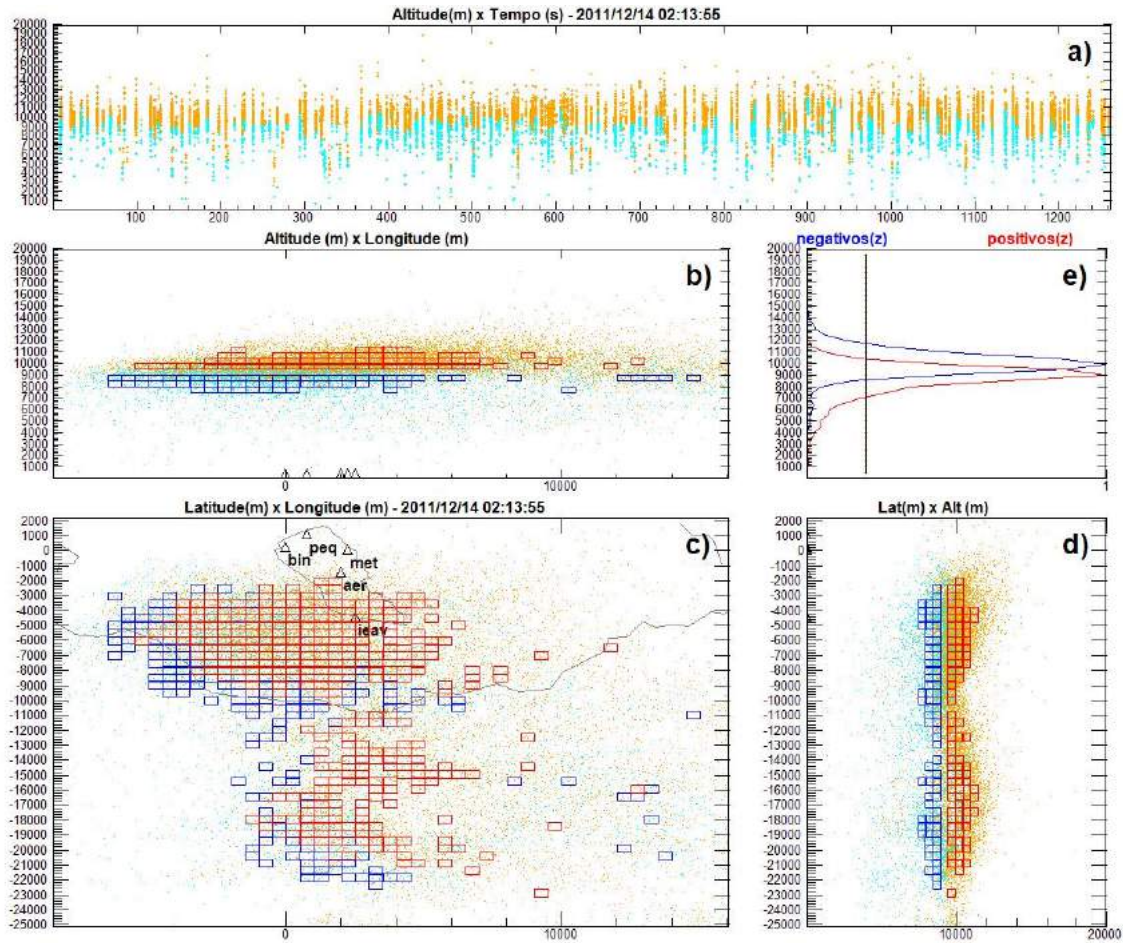


Figura 4.2 - Determinação dos volume dos centros de carga

O valor de ( $L = 500m$ ) foi determinado por teste de sensibilidade e é fixo para todos os casos analisados neste estudo, já o valor  $C$  possui um valor ótimo para cada caso para que o volume compreenda apenas as regiões que realmente limitam os centros de carga elétrica. Em testes de software o conceito de sensibilidade se refere ao quanto um resultado é afetado por uma variável de entrada. O teste de sensibilidade consiste em variar-se um parâmetro de entrada e verificar seu efeito sobre outro parâmetro dependente deste. Mais detalhes sobre este tipo de teste podem ser encontrados em (PEZZÈ; M., 1994).

Neste caso é importante verificar o quanto o parâmetros  $L$  e  $C$  afetam o valor da densidade de carga calculada de um determinado centro de carga elétrica. Verificou-se pela realização do teste de sensibilidade para  $L$  que a variação deste parâmetro (que é unidade de divisão espacial) não afeta de forma significativa ou tendenciosa o volume dos centros, a carga elétrica neles contida ou as densidades de carga elétrica.

A Figura 4.3 mostra os valores de densidade para um mesmo centro de carga variando-se apenas o valor de  $L$  de 200m até 1000m a cada 50m. Os valores que menos apresentam desvio em relação ao valor médio são  $L = 200m$ ,  $L = 500m$ ,  $L = 600m$  e  $L = 700m$ . O valor que mais apresentam desvio é  $L = 850m$ .

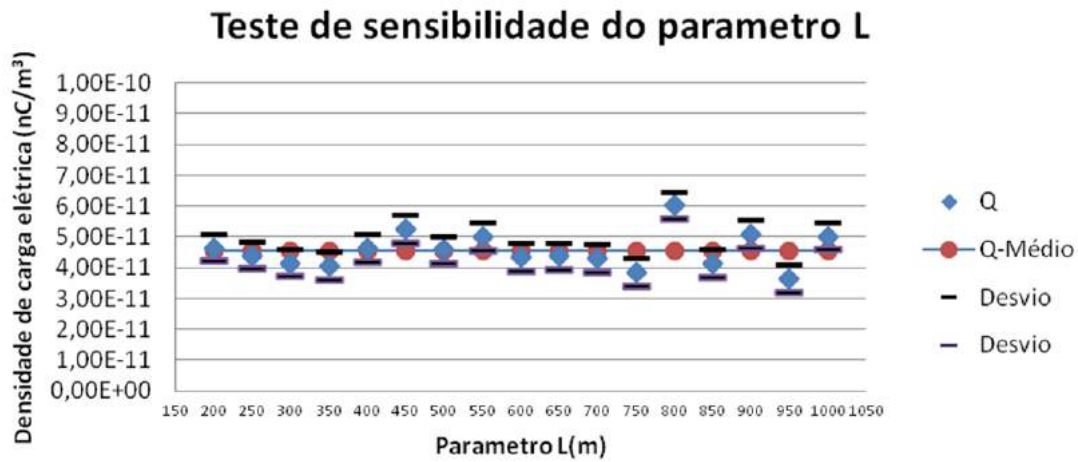


Figura 4.3 - Teste de sensibilidade do parâmetro L

Pelo fato de  $L = 500m$  apresentar o menor desvio e também pelo fato de ser igual a resolução (metros/pixel) vertical do radar o valor utilizado como padrão foi  $L = 500m$ . Por outro lado, como parâmetro  $C$  delimita o mínimo de focos de radiação por volume (relativo ao máximo da amostra) determinando o volume que conterà a carga líquida de cada centro, esse parâmetro portanto afeta diretamente a densidade de carga elétrica. Quando  $C$  aumenta os volumes dos centros diminuem ficando apenas as regiões do espaço com mais focos de radiação (maior atividade elétrica), e quando  $C$  diminui o volume dos centros aumentam incorporando também as regiões com menos focos de radiação (baixa atividade elétrica). Como a densidade de carga (neste método considerada constante nos cubos de volume  $L^3$ ) é igual a carga dividida pelo volume, se o volume for maior que o volume real do centro a densidade de carga elétrica calculada será menor que a real, e se o volume calculado for menor que o volume real do centro a densidade de carga será maior que a real. As Figuras de 4.4 até 4.6 mostram o volume, a carga líquida total e a densidade de carga elétrica para um determinado centro de carga variando-se apenas o parâmetro  $C$ .

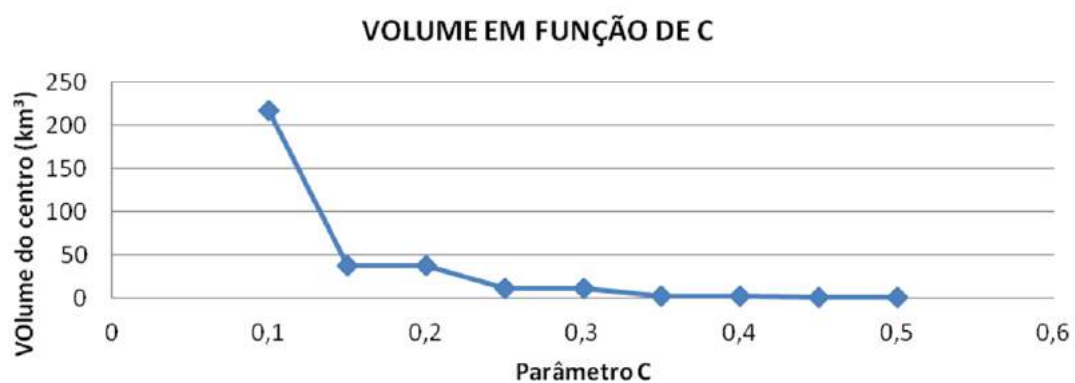


Figura 4.4 - Volume em função do parâmetro C

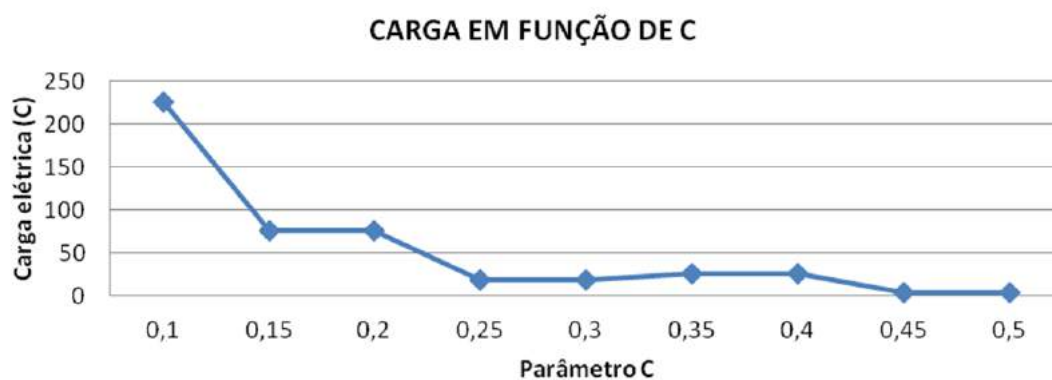


Figura 4.5 - Carga em função do parâmetro C

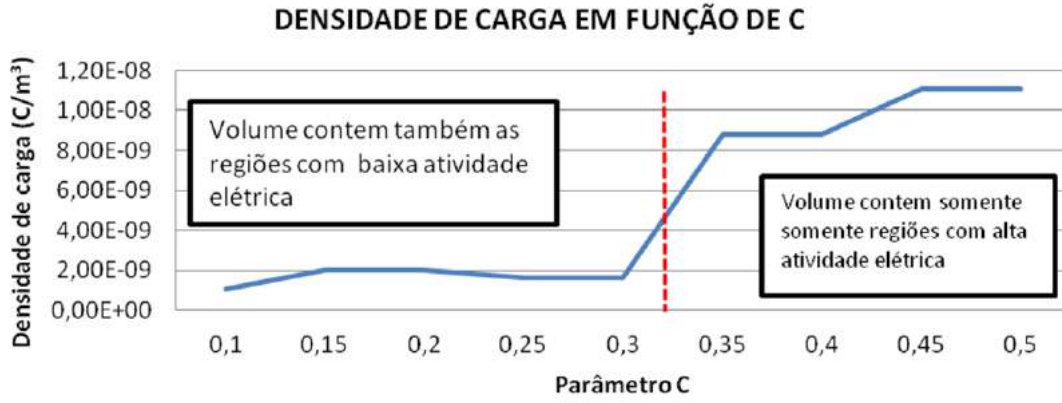


Figura 4.6 - Densidade de carga em função do parâmetro C

Note que para o exemplo mostrado na figura 4.6 existe uma notável descontinuidade entre  $C = 0,3$  e  $C = 0,35$ . Para valores de  $C$  anteriores a linha de corte vermelha o volume incorpora regiões com poucos focos de radiação (baixa atividade elétrica) em relação a amostra, isto é, o volume é maior que o volume do centro de carga real. A linha de corte delimita exatamente a região de transição de baixa atividade elétrica para muita atividade elétrica. Após a linha de corte, o volume conterá somente as regiões com maior número de focos de radiação (alta atividade elétrica) em relação a amostra. Como a atividade elétrica é devida à propagação dos líderes negativos ou positivos dos relâmpagos nas direções dos centros de carga elétrica (MAZUR, 2002; WIENS, 2005) esta descontinuidade está ligada ou não a regiões sem carga elétrica dentro do volume escolhido e podemos utilizá-la para estimar corretamente o volume pelo parâmetro  $C$ . O melhor valor para este exemplo para o parâmetro  $C$  é o valor que coincide exatamente sobre esta descontinuidade, entre 0,3 e 0,35, pois fará com que o volume contenha somente as regiões com alta atividade elétrica (em relação a amostra). Esta descontinuidade ocorre (para valores de  $C$  diferentes) em todos os casos estudados, e o valor  $C$  foi ajustado sobre a descontinuidade em cada caso. Portanto o valor em cada caso deve ser tal que o volume incorpore apenas as regiões com alta atividade elétrica. Note que o volume de cada centro de carga encontrado, é constituído de vários cubos ligados com arestas iguais a  $L$ . Cada cubo possui volume igual  $L^3$ . Portanto o volume  $V_j$  de cada centro de carga  $j$  constituído de  $n_j$  cubos semelhantes será dado por:

$$V_j = n_j L^3 \quad (4.7)$$

#### 4.4 Determinacao as densidades de carga elétrica

Se considerarmos que a densidade de carga  $\rho_j$  dentro destes volumes, para cada centro de carga é aproximadamente uniforme podemos relacionar a carga total  $Q_j$  da seguinte forma:

$$Q_j = \rho_j V_j \quad (4.8)$$

E, portanto:

$$Q_j = \rho_j L^3 \quad (4.9)$$

Desta forma a carga  $q_j$  contida em cada um dos pequenos cubos, que se somam para compor a carga total do centro de carga  $j$  será igual a:

$$q_j = \frac{Q_j}{n_j} = \rho_j L^3 \quad (4.10)$$

Consideremos que  $x_{j,k}$ ,  $y_{j,k}$  e  $z_{j,k}$  representam o centro do  $k - \text{esimo}$  cubo com volume igual a  $L^3$  pertencente centro de carga  $Q_j$ . E que  $X_i$ ,  $Y_i$  e  $Z_i$  representam a posição do sensor de campo elétrico  $i$ . Pelo método das imagens, a equação que relaciona o valor do campo elétrico vertical  $E_{i,j}$ , na posição  $(X_i, Y_i, Z_i)$  que a carga  $Q_j$  contida no volume  $V_j$  causará sobre o sensor  $i$  será dada por:

$$E_{i,j} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{2q_k}{r_{i,j,k}^2} \hat{z} \quad (4.11)$$

Onde  $r_{i,j,k}$  é a distância do sensor de campo elétrico  $i$  até o centro do  $k - \text{esimo}$  cubo que compõe o volume total do centro de carga  $j$ , conforme a mostra a figura 4.7:

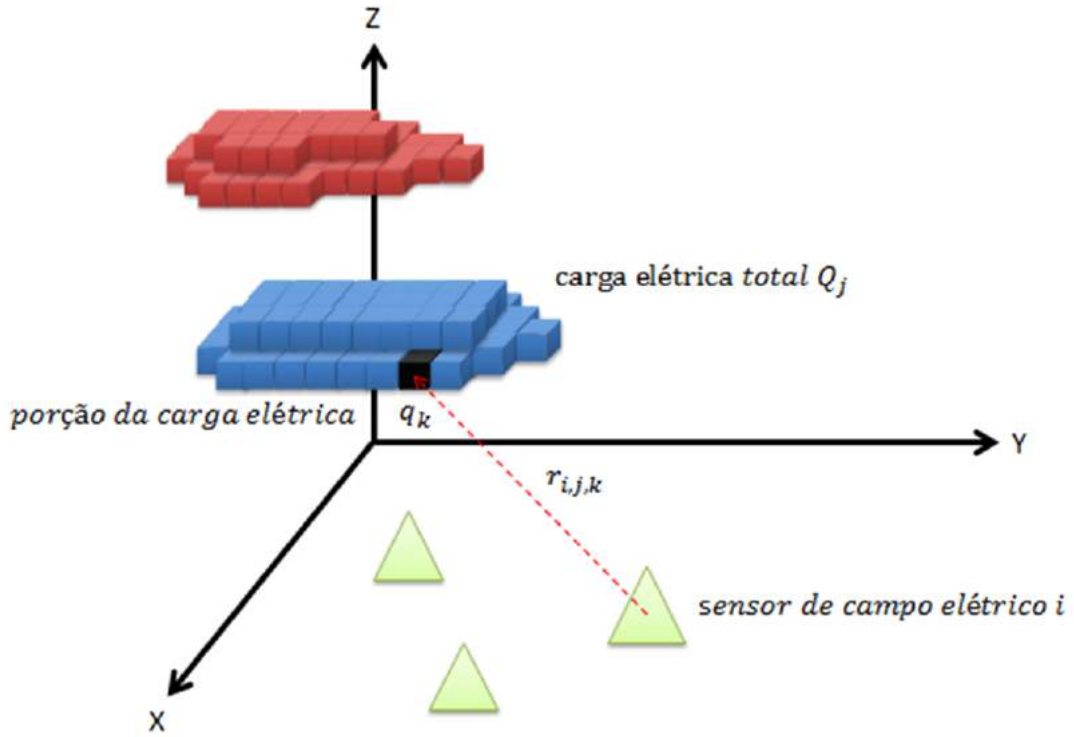


Figura 4.7 - Distância do sensor  $i$  até porção  $q_k$  da carga  $Q_j$

Utilizando a relação  $q_j = Q_j/n_j$  da equação 4.10 podemos reescrever a equação 4.11 da seguinte forma:

$$E_{i,j} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_j}{n_j} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{r_{i,j,k}^2} \hat{z} \quad (4.12)$$

Podemos então uma matriz  $R_{i,j}$  tal que:

$$R_{i,j} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{r_{i,j,k}^2} \hat{z} \quad (4.13)$$

De forma que o campo vertical que o centro de carga elétrica  $j$  produz sobre o sensor de campo elétrico  $i$  é dado pela seguinte expressão:

$$E_{i,j} = Q_i R_{i,j} \quad (4.14)$$

Observe que o campo elétrico total medido no sensor  $i$  deverá ser igual a soma de todos os campos elétricos produzidos por todas as  $n$  cargas elétricas sobre ele. Então, podemos afirmar que o campo elétrico medido experimentalmente pelo sensor deverá ser:

$$E_i = \sum_{k=1}^{k=n} Q_k R_{i,k} \quad (4.15)$$

Note que os valores de  $E_i$  nos são fornecidos pelas medidas experimentais de campo elétrico em solo, e os valores de  $R_{i,j}$  são fornecidos pelo uso do LMA. Desta forma as únicas incógnitas neste problema são agora os valores  $Q_j$  das cargas elétricas dentro dos volumes  $V_j$  também já conhecidos. Observe ainda que para  $n$  cargas elétricas e  $m$  sensores de campo elétrico podemos montar um sistema de equações com  $n$  incógnitas. Portanto e se  $m \geq n$ , isto é se existe o mesmo número de leituras de campo elétrico, ou mais, que centros de cargas, podemos encontrar o valor das cargas elétricas, bastando para isso:

$$\text{resolver} \left\{ \begin{array}{l} E_1 = Q_1 R_{1,1} + Q_2 R_{1,2} + Q_3 R_{1,3} + \dots + Q_{n-1} R_{1,n-1} + Q_n R_{1,n} \\ E_2 = Q_1 R_{2,1} + Q_2 R_{2,2} + Q_3 R_{2,3} + \dots + Q_{n-1} R_{2,n-1} + Q_n R_{2,n} \\ \dots \\ E_m = Q_1 R_{m,1} + Q_2 R_{m,2} + Q_3 R_{m,3} + \dots + Q_{n-1} R_{m,n-1} + Q_n R_{m,n} \end{array} \right. \quad (4.16)$$

Uma outra forma mais eficiente de se encontrar os valores das cargas elétricas é preencher uma matriz coluna com as leituras experimentais do campo elétrico, e uma matriz com os valores calculados com a ajuda do LMA e usar uma aproximação por mínimos quadrados descrita por [Meju \(1994\)](#). Obtendo-se então a matriz coluna que conterá os valores de carga elétrica que melhor se ajustam as medidas experimentais. Conforme mostra a equação [4.17](#):

$$Q_n = (R^T R)^{-1} R^T E \quad (4.17)$$

Onde  $Q_n$  será a matriz coluna com a magnitude dos centros de carga, que representa o melhor ajuste por mínimos quadrados. Os detalhes matemáticos da para se obter a equação 4.17 são explicados por [Tarantola \(2005\)](#). Uma vez calculados os valores das

cargas elétricas, podemos então calcular, as respectivas densidades de carga elétrica dos centros de carga utilizando a equação 4.9 da seguinte forma:

$$\rho_j = \frac{Q_j}{n_j L^3} \quad (4.18)$$

O método SVD (Singular Value Decomposition) também pode ser aplicado para solução deste problema. Mas, como as matrizes raramente ultrapassam cinco linhas ou cinco colunas, a utilização do SVD não representa ganhos de desempenho ou precisão significativos. Contudo se este método for utilizado em uma rede densa de sensores de campo elétrico, recomenda-se fortemente a utilização do método SVD ou semelhantes de melhor desempenho.

#### 4.5 Verificação dos resultados

Finalmente a consistência os resultados deve ser verificada. Para isso utilizam-se três comparações possíveis mostradas a seguir:

##### 4.5.1 Comparação com RADAR

Utilizando as imagens de radar superpostas ao LMA e aos volumes de carga elétrica calculados é possível verificar se os volumes para os centros de carga elétrica calculados correspondem os volumes de máxima refletividade no radar. As regiões acima de 30dBZ são regiões fortemente ligadas formação de partículas de gelo, e produção de cargas elétricas. (Murphy et al. 1996). A Figura 4.8 mostra o mesmo exemplo da Figuras 4.1.e e 4.2, mas agora com a imagem MAXCAPPI de RADAR superposta para comparação. Observa-se então, se volumes calculados, baseados na atividade elétrica coincidem com as regiões de máxima refletividade do radar, isto somente para a latitude e longitude, considerando-se que que em certas alturas podem existir hidrometeoros pequenos (na região dos centros de carga elétrica) que serão detectados pelo radar com baixa refletividade (<10dBZ).

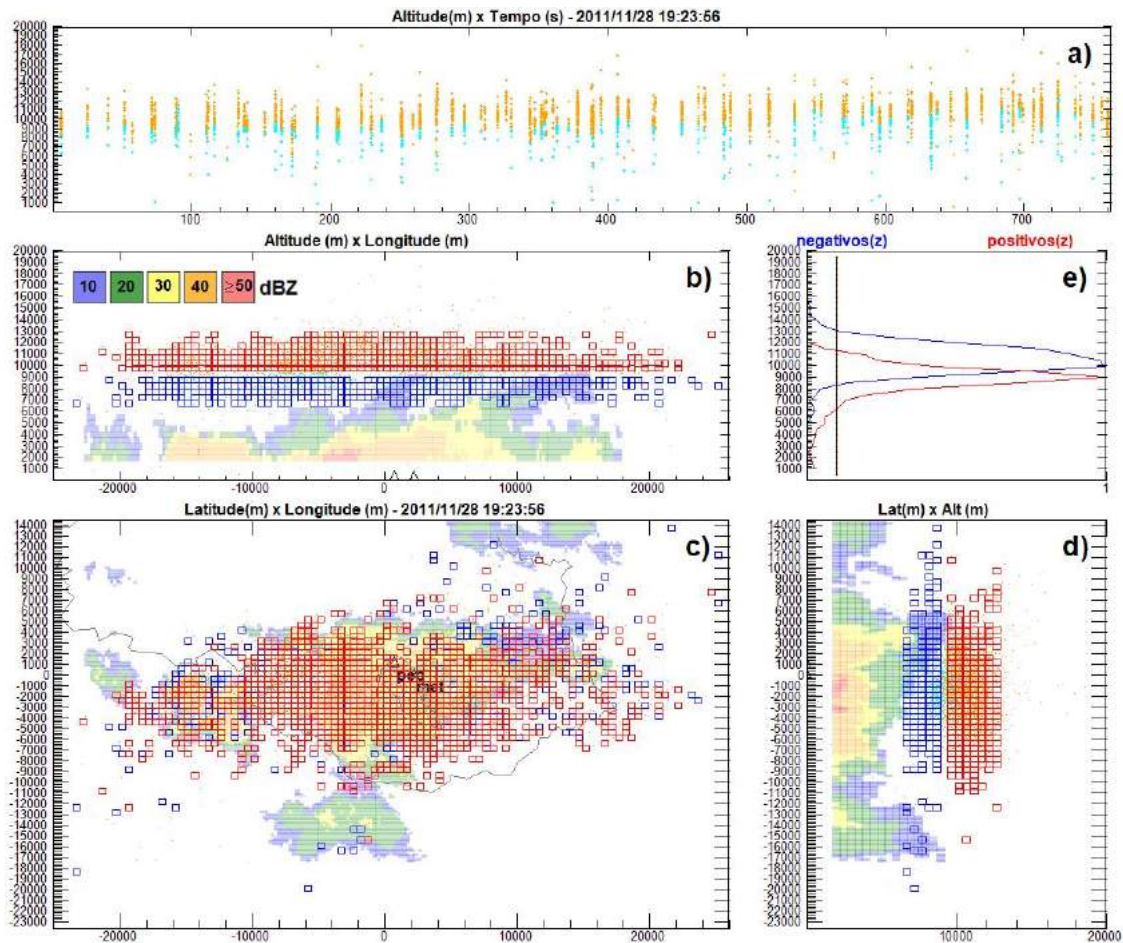


Figura 4.8 - Comparação dos volumes calculados com as refletividades do radar

#### 4.5.2 Comparação com as polaridades esperadas

Esta verificação consiste simplesmente em verificar se as polaridades calculadas pela propagação do líder bidirecional é igual a polaridade calculada pelo uso do campo elétrico em solo.

#### 4.5.3 Comparação com a literatura

Uma verificação ainda mais simples também deve ser feita para cada densidade de carga elétrica encontrada. Considerando-se os trabalhos experimentais de [Marshall et al. \(1995\)](#), [Stolzenburg et al. \(1998\)](#), [Zhao et al. \(2010\)](#), espera-se que as densidades de carga elétrica sejam da ordem nano coulombs. Valores com muitas ordens de grandeza acima, ou muito menores do que valores medidos experimentalmente podem representar soluções não físicas ou nuvens fora do padrão apresentado na literatura. O mesmo se aplica para os valores das cargas elétricas.

#### 4.5.4 Ajuste do campo elétrico

Esta verificação é puramente matemática e isoladamente não valida o método, simplesmente mostra se a inversão matricial foi feita com certa precisão. Consiste em verificar se as distribuições de carga elétrica encontradas pelo método reproduzem os campos elétricos experimentais em solo. Para isso verifica-se o campo elétrico calculado pela estrutura de carga elétrica obtida pela equação 4.17 reproduz o campo elétrico experimental medido em solo. Esse campo calculado chamamos de  $E_{direto}$  e é calculado pela expressão 4.19:

$$E_{direto_i} = \sum_{k=1}^{k=n} Q_k R_{i,k} \quad (4.19)$$

#### 4.6 Condição do campo elétrico e distância

Os valores de 1000 V/m foram escolhidos em função de considerações físicas e de resultados de estimativas de cálculo. Para valores menores que 1000 V/m para o campo elétrico medido no solo, a nuvem pode estar suficientemente longe da rede para que a sua verdadeira estrutura apareça simplificada por efeitos de blindagens dos centros de carga, uns sobre os outros (MONTEIRO, 2011). Em estimativas feitas para cálculo de campo elétrico no solo para uma nuvem quadripolar simulada, onde foram calculados os perfis verticais, somente foi possível a reconstituição da estrutura quadripolar para medidas não mais distantes que 6000m do centro da nuvem. Os campos medidos a distâncias menores que 6000m frequentemente ultrapassaram 1000V/m e identificavam a estrutura verdadeira da nuvem. A medida que se afastava da nuvem o valor do campo caía a valores menores que 1000 V/m e o perfil vertical identificava uma estrutura tripolar ou dipolar, evidenciando o efeito de blindagem. Campos abaixo desse valor representam dificuldades extras para a aplicação do problema inverso (MONTEIRO, 2011). Outro fato a ser considerado é que para baixos valores dos campos elétricos a precisão dos cálculos é baixa, considerando-se que o erro da medida se aproxima do valor da medida (R., 2014). Portanto a estrutura de cargas da nuvem a ser usada no problema inverso depende da distância à nuvem, bem como da região em que foram obtidas as medidas do campo elétrico no solo (MONTEIRO, 2011). Desta forma é recomendável utilizar apenas as medidas dos sensores que registram valores altos de campo elétrico no intervalo e descartar as medidas próximas a zero para não aumentar o erro da solução.

## 4.7 Número de condição da matriz inversível

A inversão de uma matriz pode ser feita através de vários métodos tais como: pela matriz adjunta; por sistemas lineares. Em todos eles existe a necessidade de se realizar várias operações de multiplicação, soma, divisão e subtração. Desta forma a inversão de uma matriz incorre em grande propagação de erros sobre a matriz inversa calculada. O método mais usual de se estimar a propagação de erros pela inversão da matriz  $A$ , é a determinação do chamado número de condição da matriz invertível  $k(A)$ , onde:

$$k(A) = \|A^{-1}\| \|A\| \quad (4.20)$$

E a estimativa de dígitos perdidos por impressão  $k$  é dada por:

$$k = \log_{10} k(A) \quad (4.21)$$

Conforme visto na equação 4.17 a matriz a ser invertida é:

$$A = R^T R \quad (4.22)$$

Verificou-se que para inversão de  $R^T R$  a quantidade de dígitos perdidos por imprecisão depende mais fortemente da quantidade de focos de LMA utilizados para se mapear os centros de carga elétrica. Conforme mostra a tabela 4.7:

Tabela 4.1 - Dígitos imprecisos em função da quantidade de LMA.

Focos de LMA	Dígitos perdidos
1262	6
4114	4
5620	3
6702	2

Observe que apenas dois dígitos de precisão são perdidos quando são utilizados 6702 focos de LMA. Baseando-se no fato de que utilizaremos o parâmetro  $L = 500m$  é

preciso que tenhamos a precisão na casa das centenas, isto é precisamos perder no máximo duas casas de precisão. Para isso adotaremos um parâmetro de seleção para utilização do método, isto é recomendado que existiam pelo menos 7000 focos de radiação de LMA no intervalo medido.

#### **4.8 A plataforma megastorm**

Para realizar todos estes procedimentos foi desenvolvida uma plataforma computacional, para o sistema operacional Windows, que recebe dados de LMA, RADAR, campo elétrico, em vários formatos. Após importar os dados de LMA e campo elétrico ela sincroniza as medidas pelo tempo e executa todos os procedimentos descritos na metodologia, isto é, a fim de determinar a estrutura elétrica da nuvem, a forma, o volume, as posições e as densidades de carga elétrica dos centros. A plataforma permite ainda importar arquivos do tipo KML, ou TXT, com informações de vetores de limites de municípios e posição dos instrumentos a fim de colocar estas informações junto com os resultados da simulações que são fornecidas em textos e gráficos. Outro recurso importante é a possibilidade de gerar animações das tempestades para acompanhar a evolução dos centros de carga elétrica, de um evento passado ou em tempo real, desde que hajam dados de LMA e campo elétrico disponíveis em tempo real. Finalmente, esta plataforma chamada de MegaStorm, terá uso livre e será disponibilizada a todos os pesquisadores que desejem utilizá-la. As análises descritas a seguir, bem como os gráficos foram gerados por esta plataforma. A Figura 4.9 mostra a plataforma MegaStorm em uso. As listas à direita da Figura 4.9 mostram os eventos selecionados com campo elétrico intenso. Ao clicar sobre um evento a plataforma carrega os dados de LMA, RADAR, campo elétrico e arquivos no formato KML. Estas informações são processadas e mostradas nas figuras à esquerda da Figura 4.9 Um arquivo no formato HTML é gerado automaticamente com um relatório detalhado sobre o evento, contendo as características mais importantes da estrutura elétrica da nuvem de tempestade.

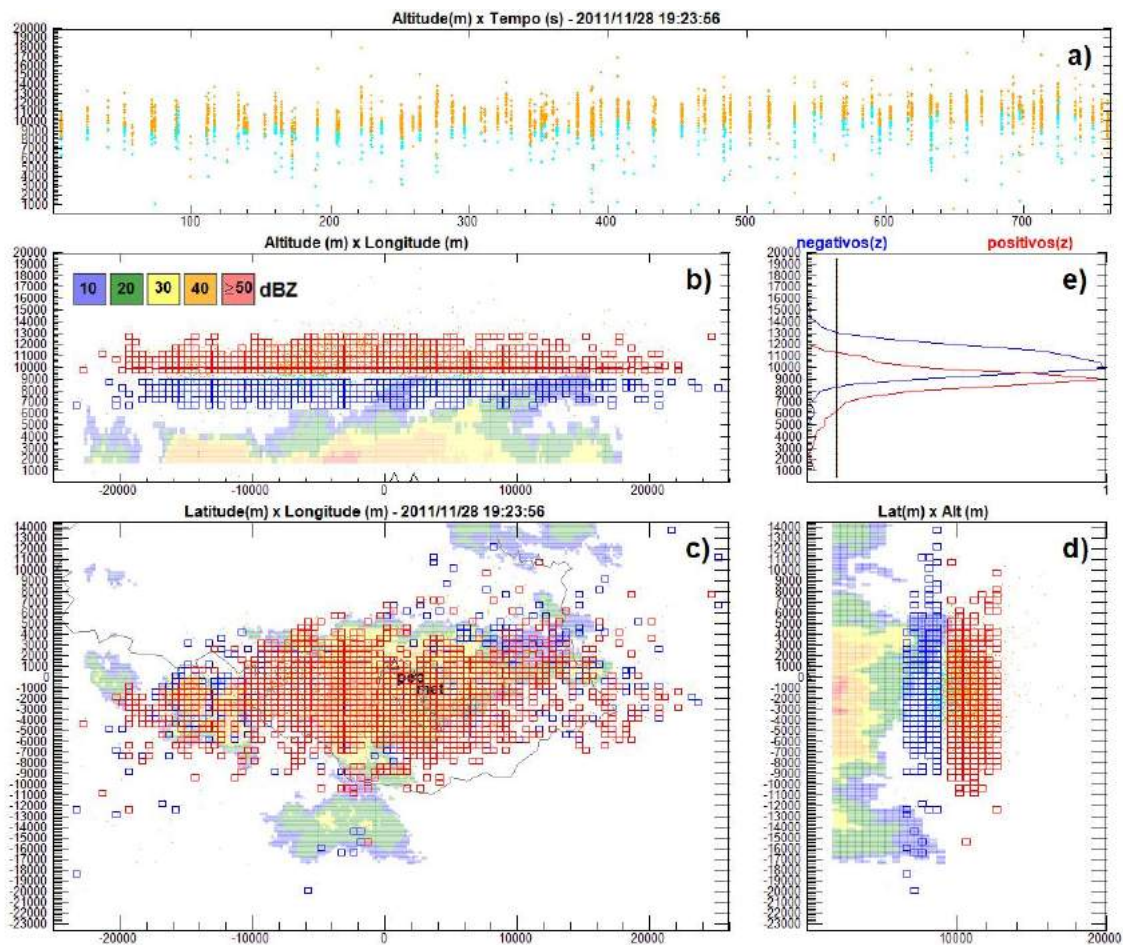


Figura 4.9 - Plataforma MegaStorm by Robson Jaques, INPE 2015

#### 4.9 Mais informações meteorológicas

Um boletim meteorológico diário com mais informações para os casos da BASE 1 está disponível em <<http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/relatorio.html>>.

Neste boletim pode-se obter características meteorológicas adicionais a respeito das nuvens escolhidas para estudo de casos no item seguinte.

## 5 ESTUDOS DE CASOS

### 5.1 Caso 31

Este evento ocorreu em 28 de novembro de 2011 às 19:14:54. Foram utilizados 537 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 1577 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $991,825 \text{ kW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,2$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.1.b (vista frontal), 5.1.c (vista superior) e 5.1.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.1.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6750 m até 8750 m para o primeiro centro e de 9250 m até 12250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $44,625 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $91 \text{ km}^3$  para o segundo . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $54,131 \text{ C}$  para o primeiro e  $-74,438 \text{ C}$  para o segundo . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $1,213 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-0,818 \text{ nC/m}^3$  para o segundo

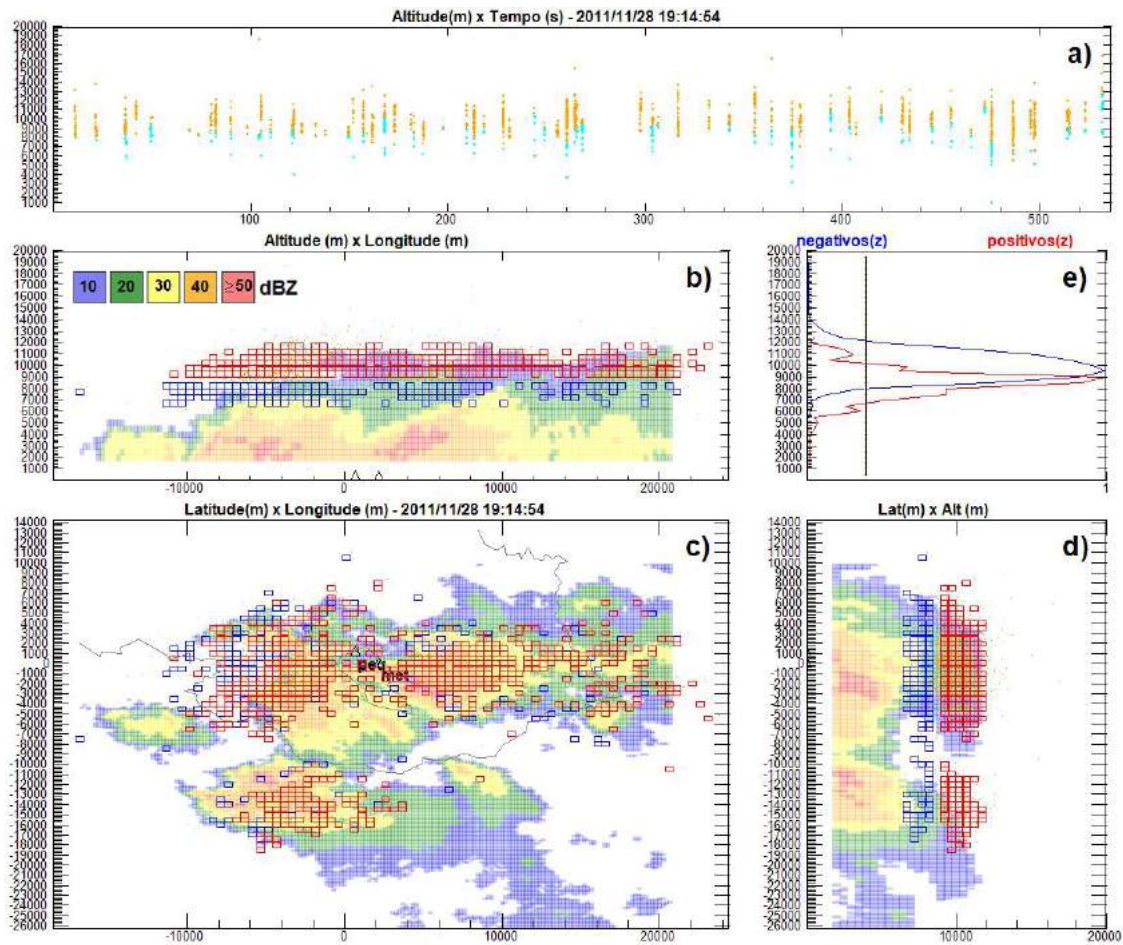


Figura 5.1 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.2.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.2.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.2.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.2.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

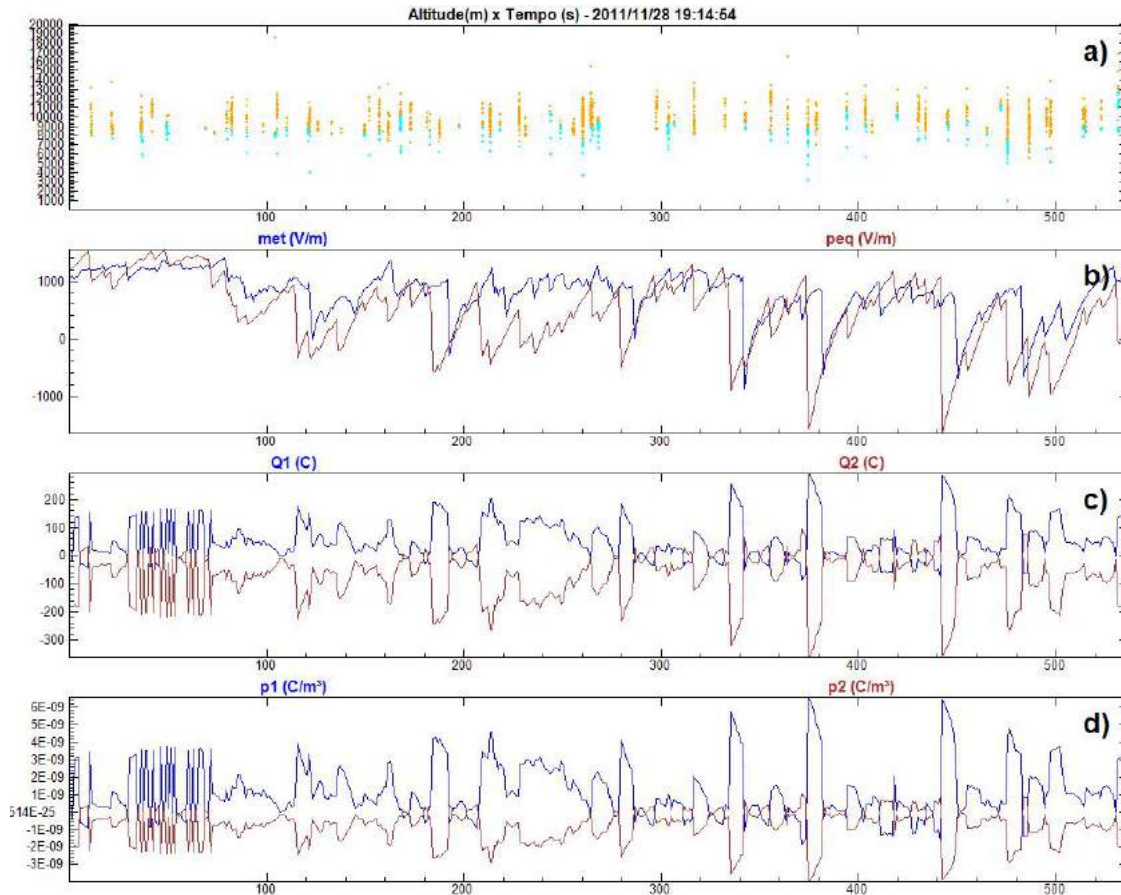


Figura 5.2 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.3.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.3.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.3.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

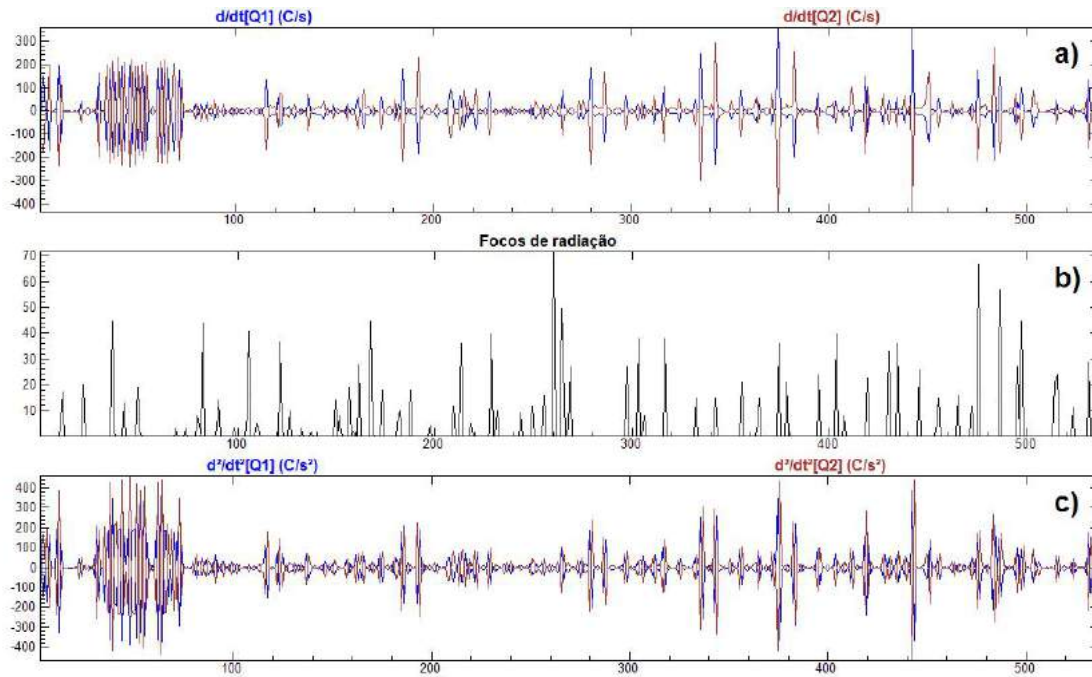


Figura 5.3 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

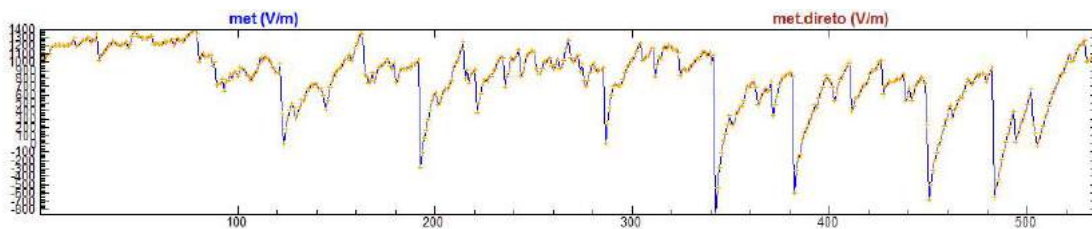


Figura 5.4 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

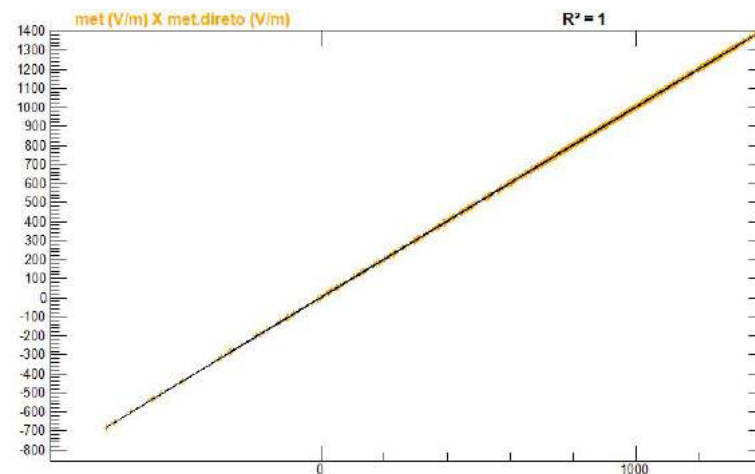


Figura 5.5 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em (V/m)

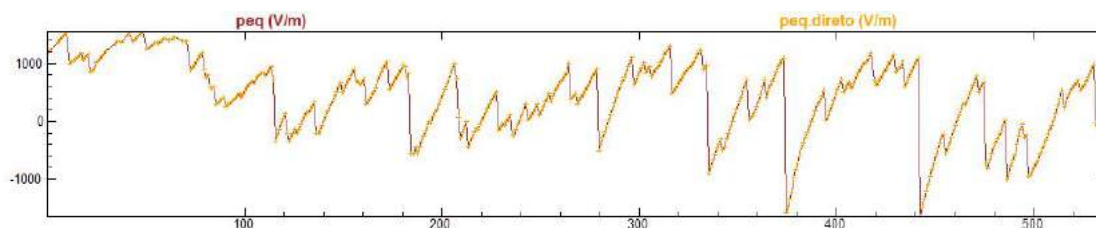


Figura 5.6 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

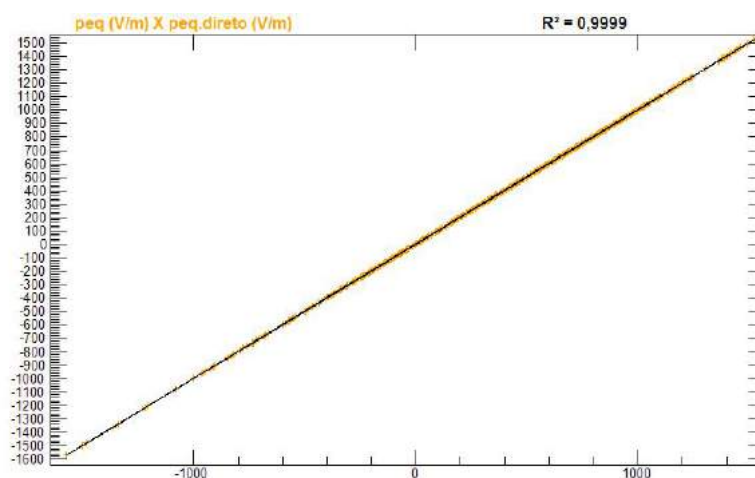


Figura 5.7 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.2 Caso 32

Este evento ocorreu em 28 de novembro de 2011 às 19:23:56. Foram utilizados 764 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 3796 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $991,825 \text{ kW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.8.b (vista frontal), 5.8.c (vista superior) e 5.8.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.8.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6750 m até 9250 m para o primeiro centro e de 9750 m até 13250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $96,75 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $209,75 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $77,076 \text{ C}$  para o primeiro e  $-89,307 \text{ C}$  para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $0,796 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-0,426 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

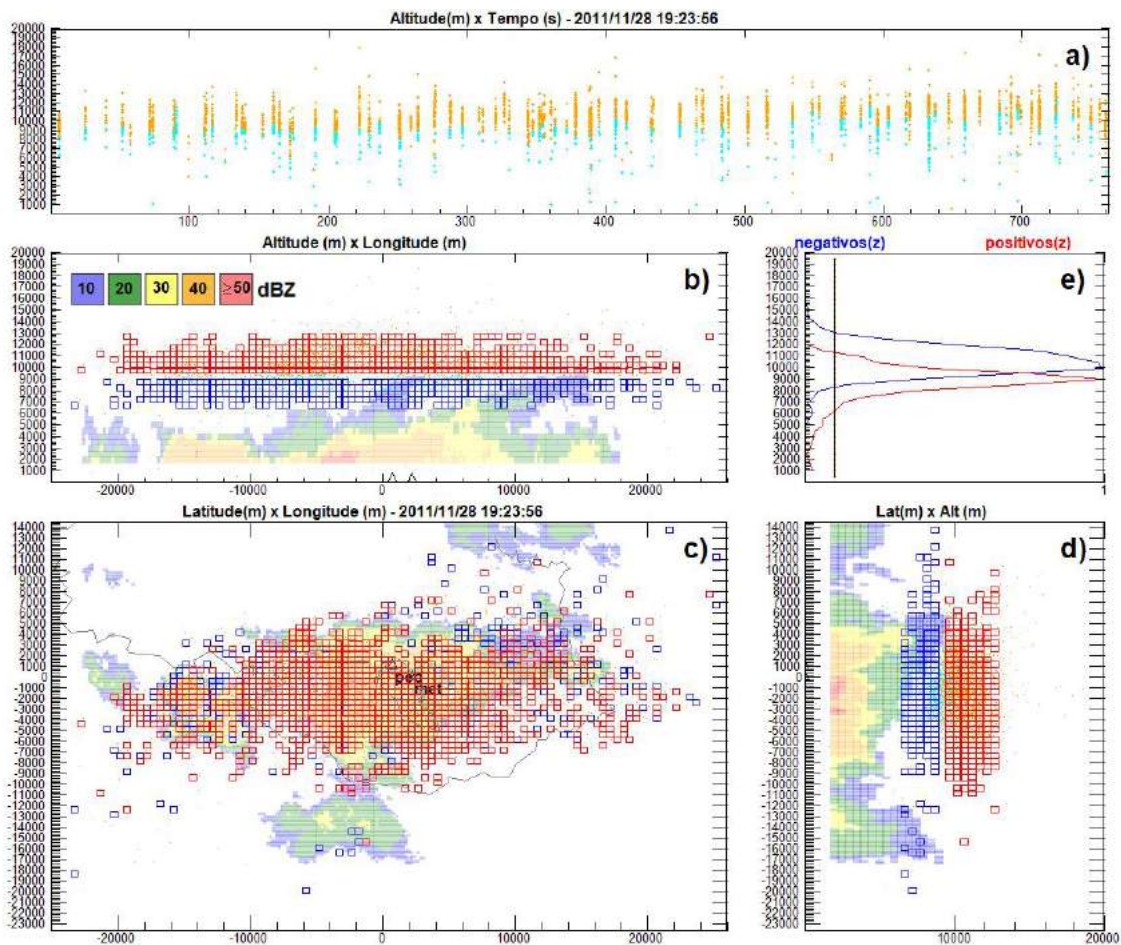


Figura 5.8 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.9.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.9.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.9.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.9.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

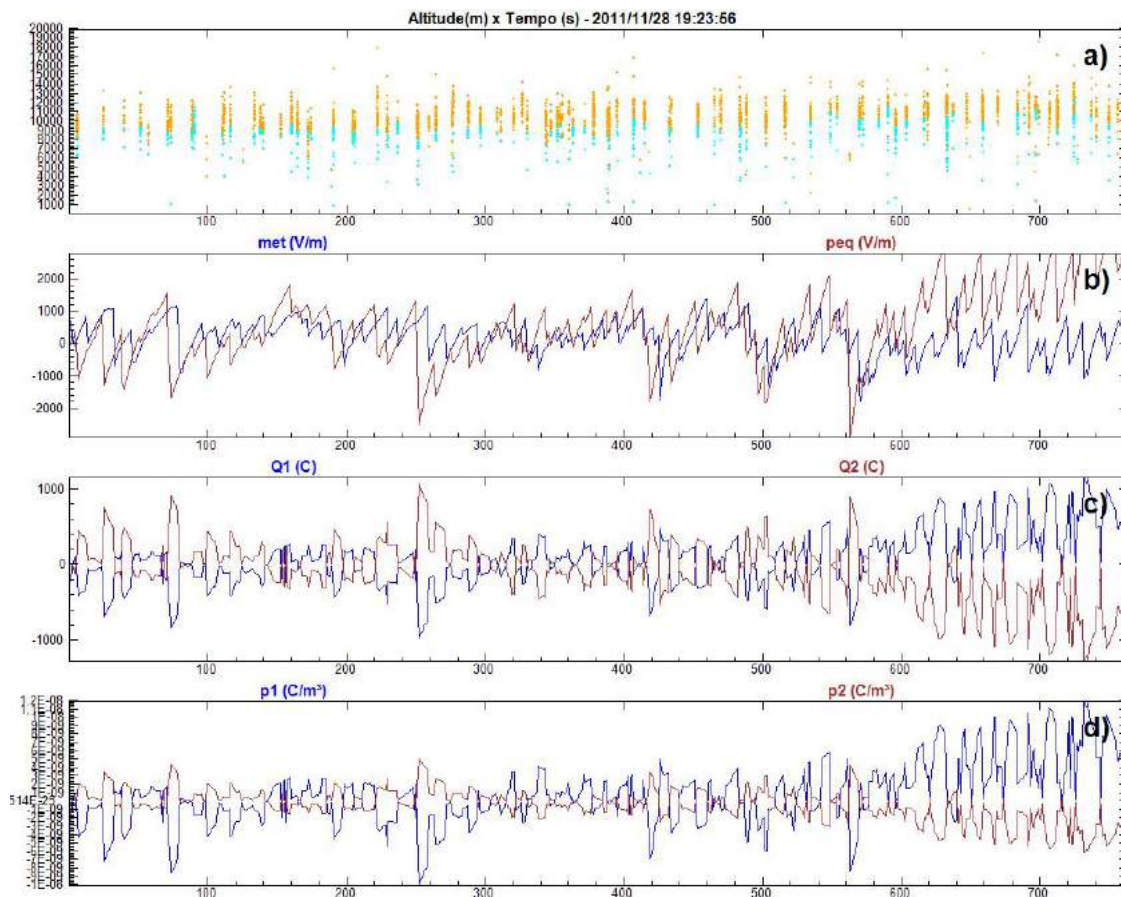


Figura 5.9 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.10.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.10.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.10.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

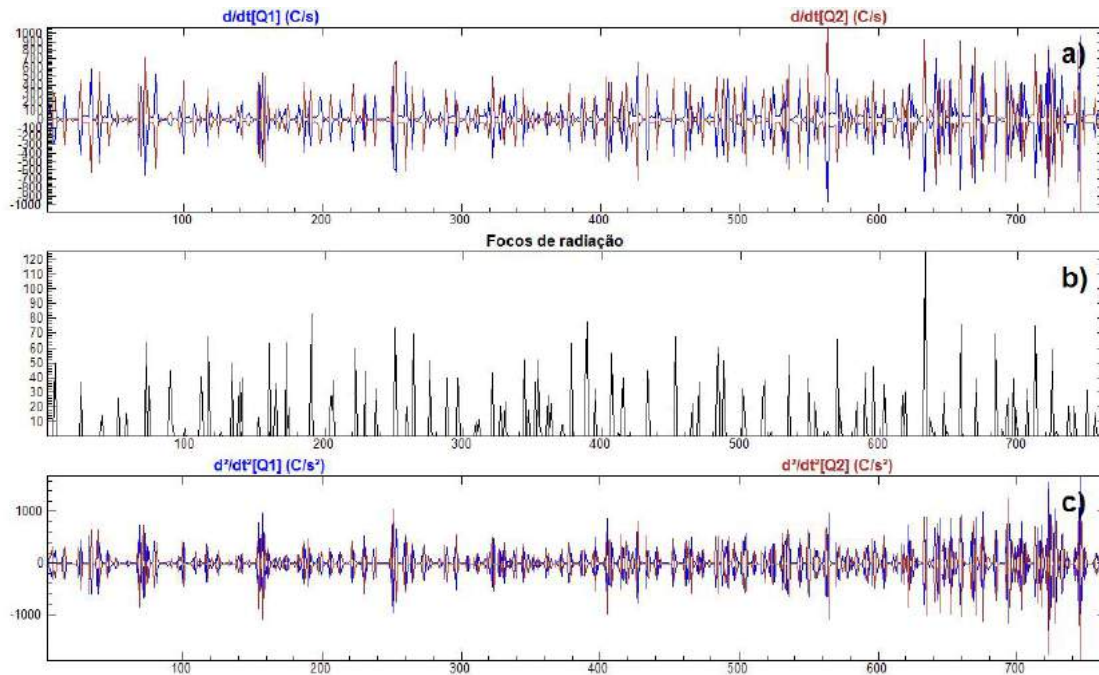


Figura 5.10 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

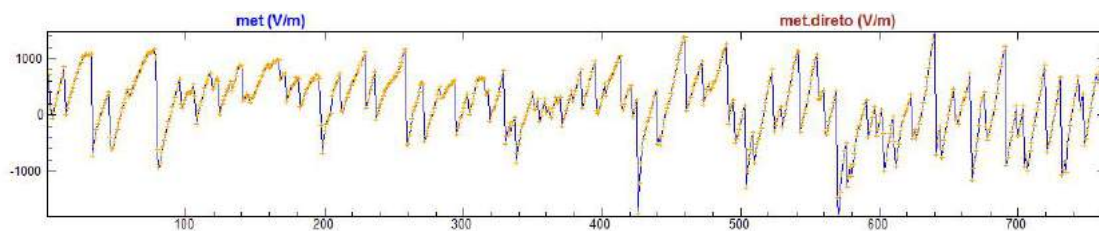


Figura 5.11 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

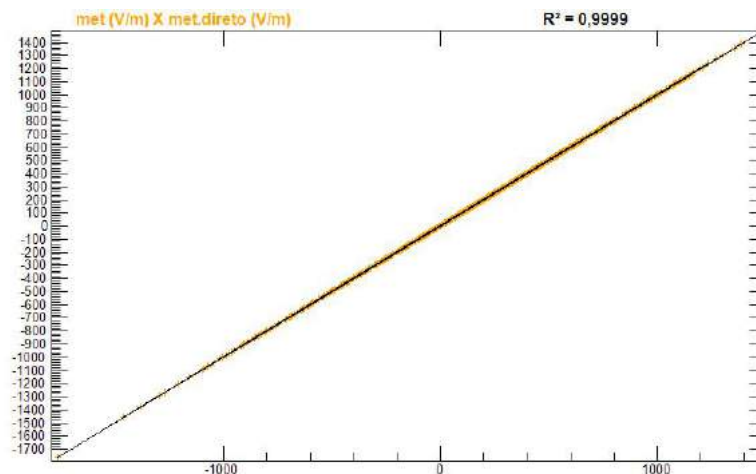


Figura 5.12 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em (V/m)

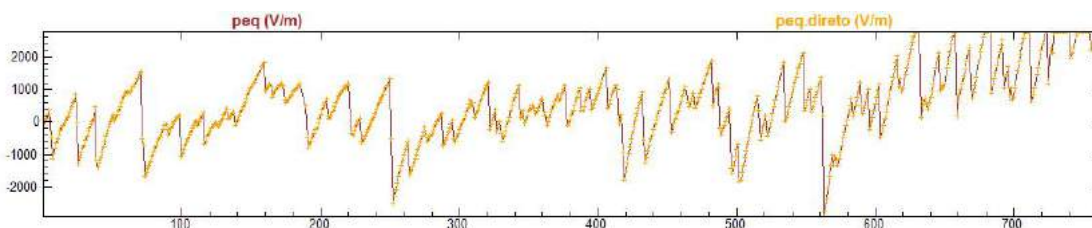


Figura 5.13 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

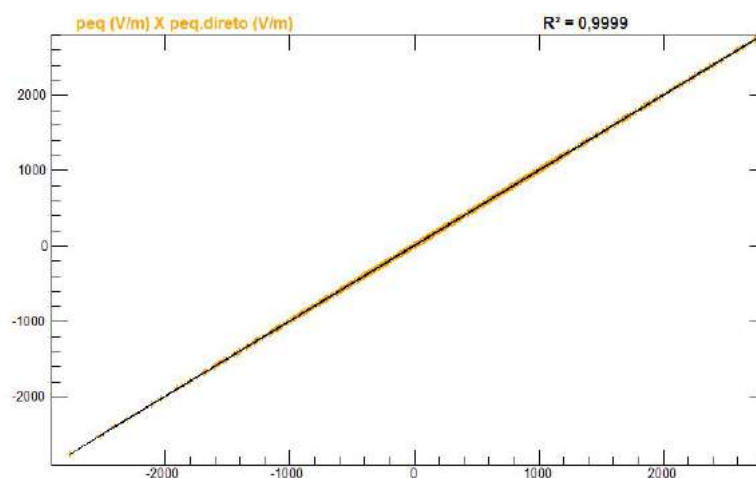


Figura 5.14 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.3 Caso 48

Este evento ocorreu em 29 de novembro de 2011 às 18:48:6. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia cinco sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 5335 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $1,54 \text{ GW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.15.b (vista frontal), 5.15.c (vista superior) e 5.15.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.15.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi quadripolar. As alturas encontradas foram: de 4750 m até 5250 m para o primeiro centro, de 5250 m até 9250 m para o segundo centro, de 9250 m até 10250 m para o terceiro centro e de 10250 m até 14250 m para o quarto centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $4,375 \text{ km}^3$  para o primeiro ,  $95,875 \text{ km}^3$  para o segundo ,  $94,375 \text{ km}^3$  para o terceiro e  $245,875 \text{ km}^3$  para o quarto . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $68,357 \text{ C}$  para o primeiro ,  $772,489 \text{ C}$  para o segundo ,  $-3673,172 \text{ C}$  para o terceiro e  $2210,171 \text{ C}$  para o quarto . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $15,624 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $8,057 \text{ nC/m}^3$  para o segundo ,  $-38,922 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro e  $8,989 \text{ nC/m}^3$  para o quarto

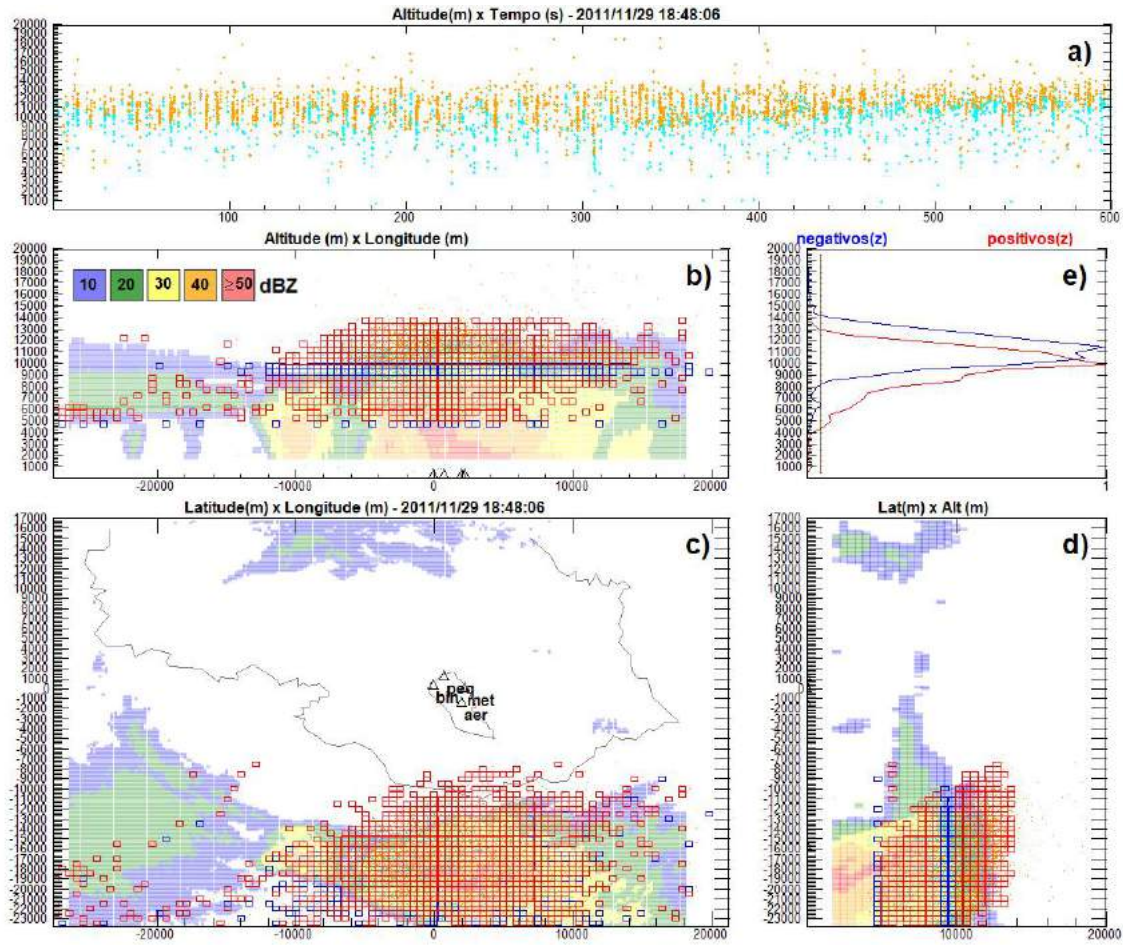


Figura 5.15 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.16.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.16.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.16.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.16.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

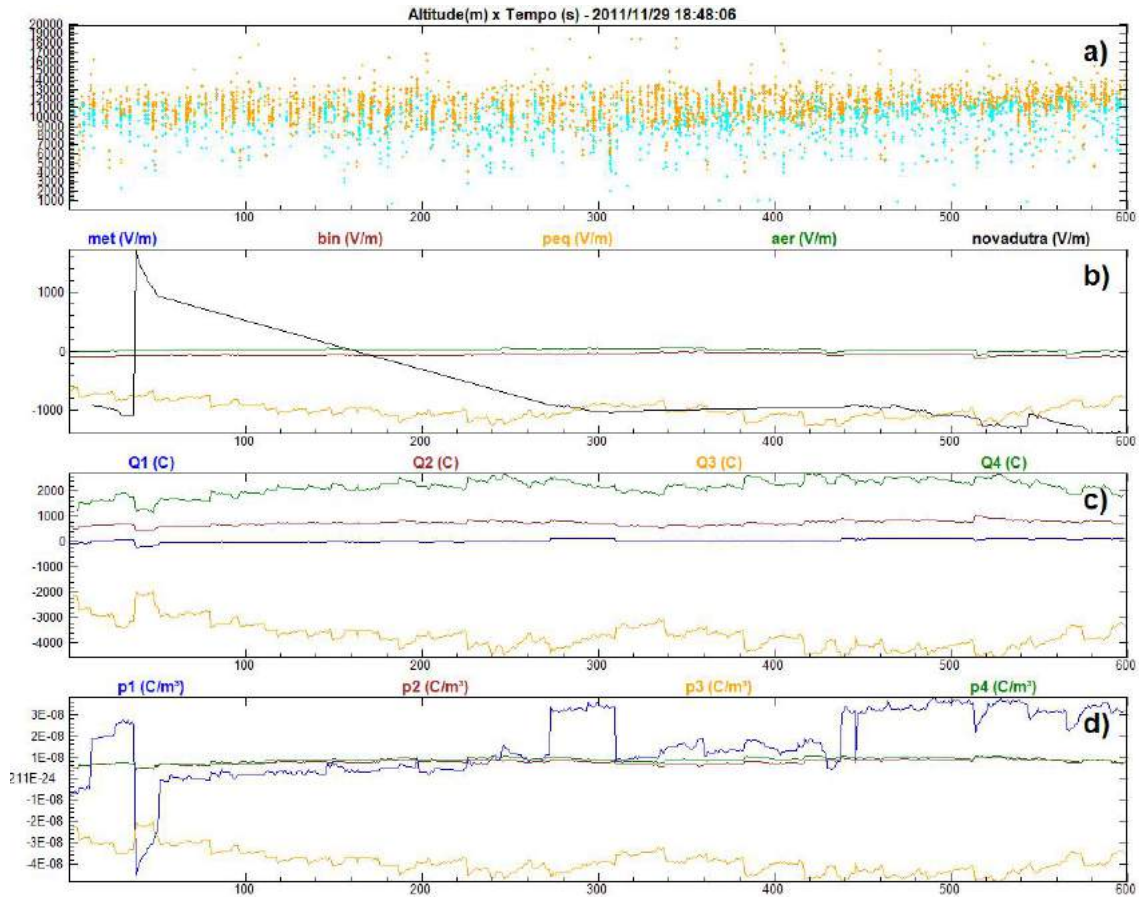


Figura 5.16 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.17.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.17.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.17.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

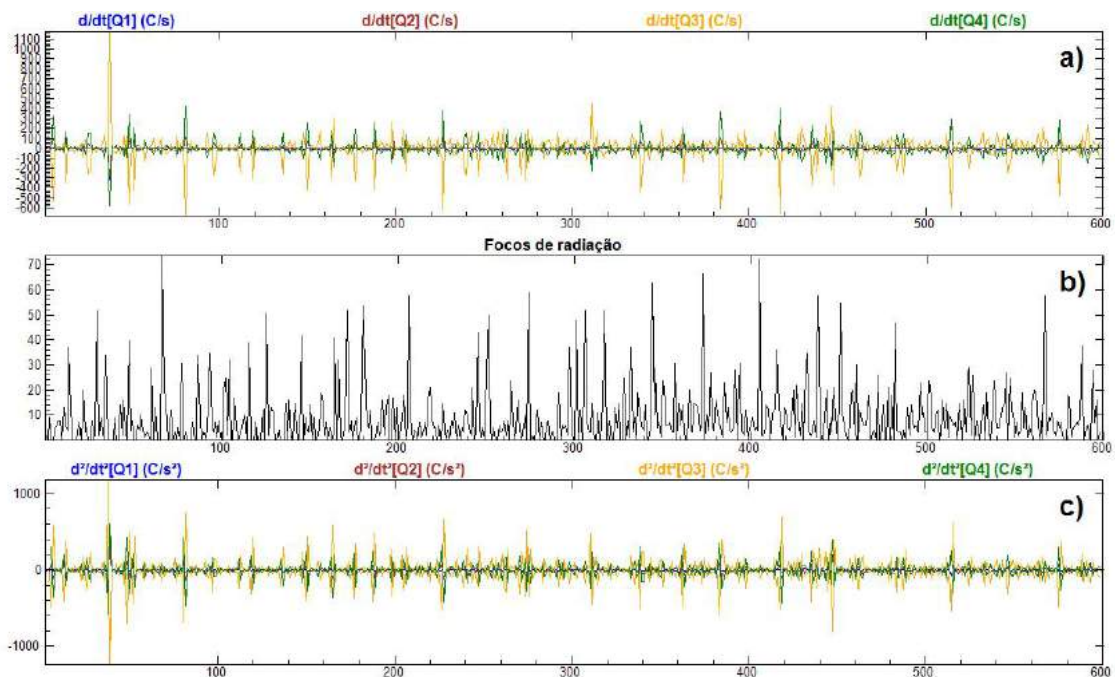


Figura 5.17 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

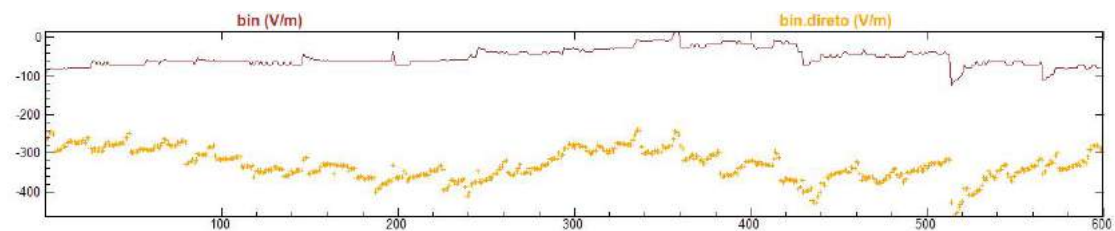


Figura 5.18 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em ( $s$ )

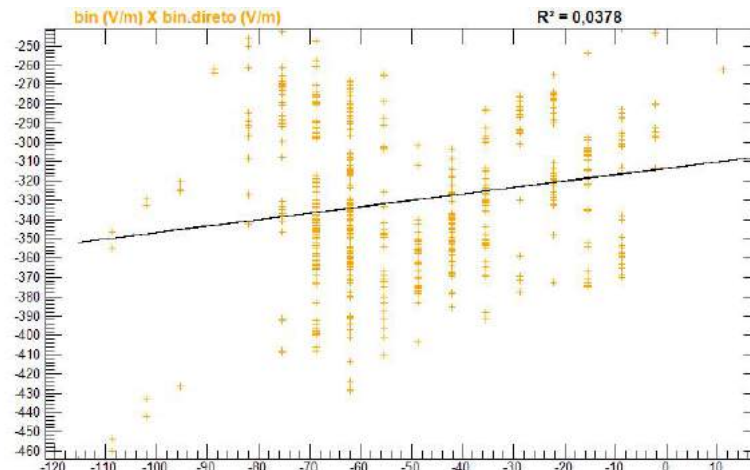


Figura 5.19 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em (V/m)

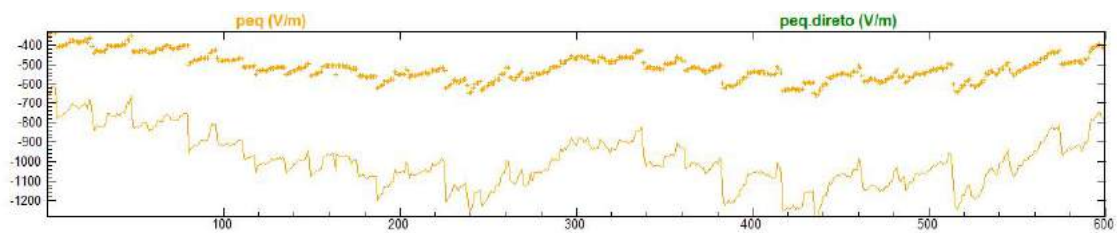


Figura 5.20 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

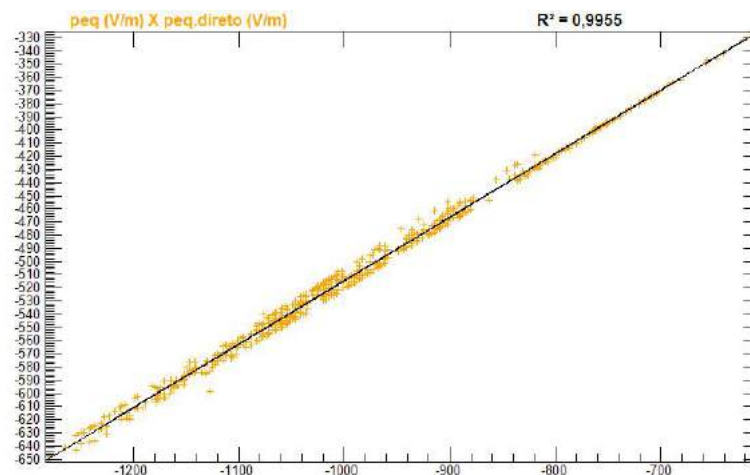


Figura 5.21 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

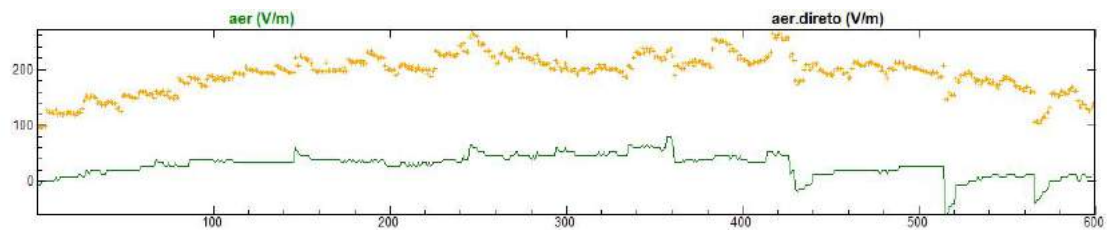


Figura 5.22 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

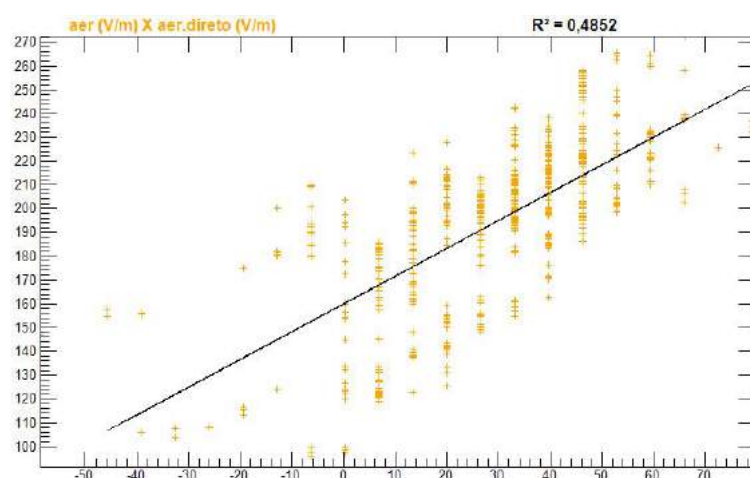


Figura 5.23 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

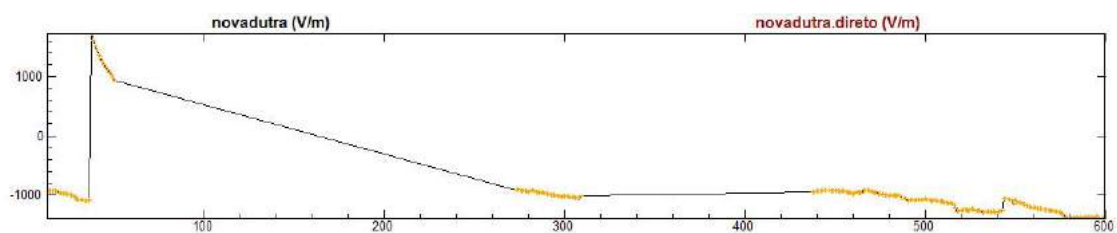


Figura 5.24 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor novadutra, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

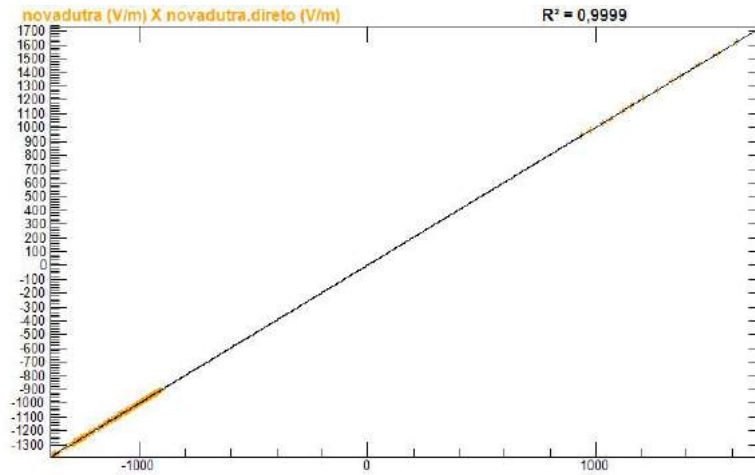


Figura 5.25 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor novadutra, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ )

#### 5.4 Caso 84

Este evento ocorreu em 07 de dezembro de 2011 às 18:37:14. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia quatro sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 V/m$ . Neste evento foram analisados 1758 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $1,24GW$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 m$  e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.26.b (vista frontal), 5.26.c (vista superior) e 5.26.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.26.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 3250 m até 5750 m para o primeiro centro, de 5750 m até 8750 m para o segundo centro e de 8750 m até 12250 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $11,5 km^3$  para o primeiro ,  $53,75 km^3$  para o segundo e  $102,125 km^3$  para o terceiro . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-8,599 C$  para o primeiro ,  $92,207 C$  para o segundo e  $-102,315 C$  para o terceiro . As densidades de

carga elétrica para cada centro foram:  $-0,748 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $1,715 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $-1,002 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

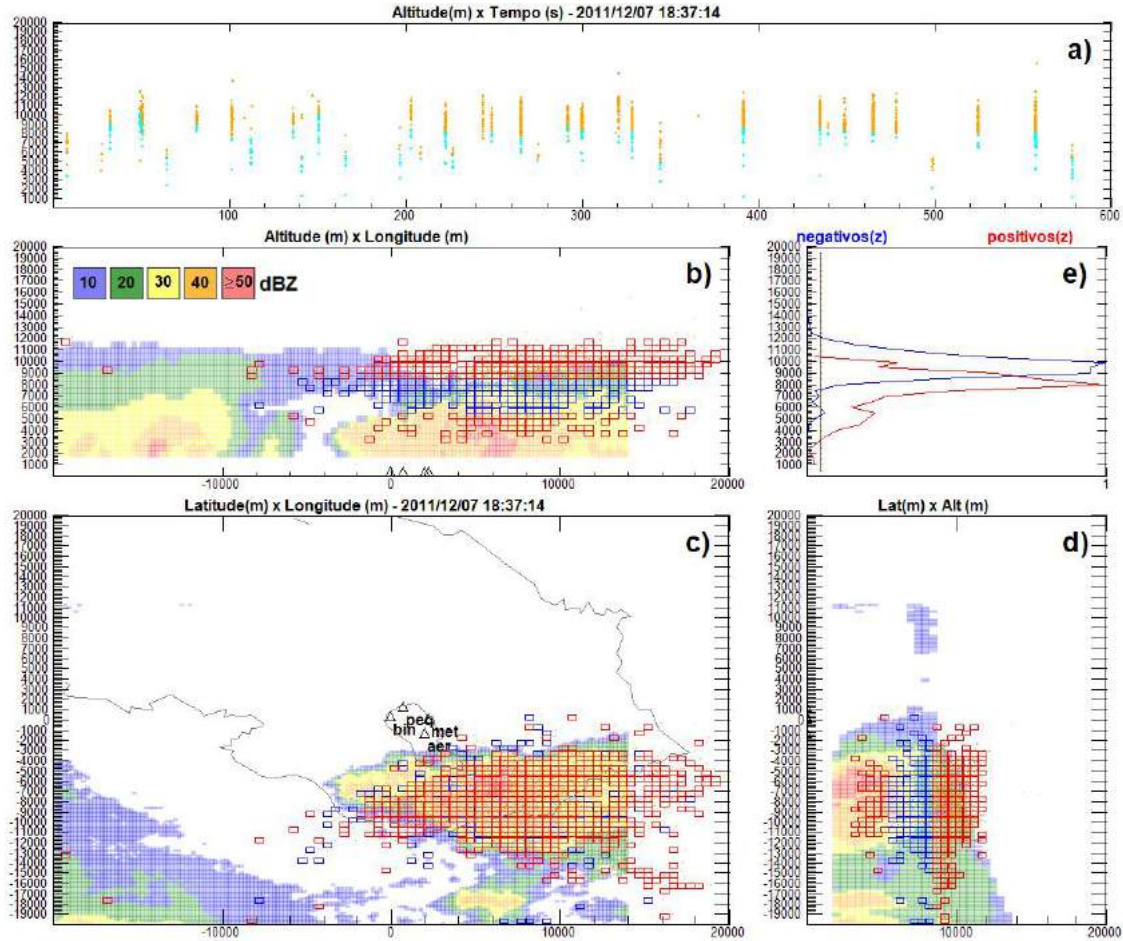


Figura 5.26 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.27.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.27.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.27.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.27.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

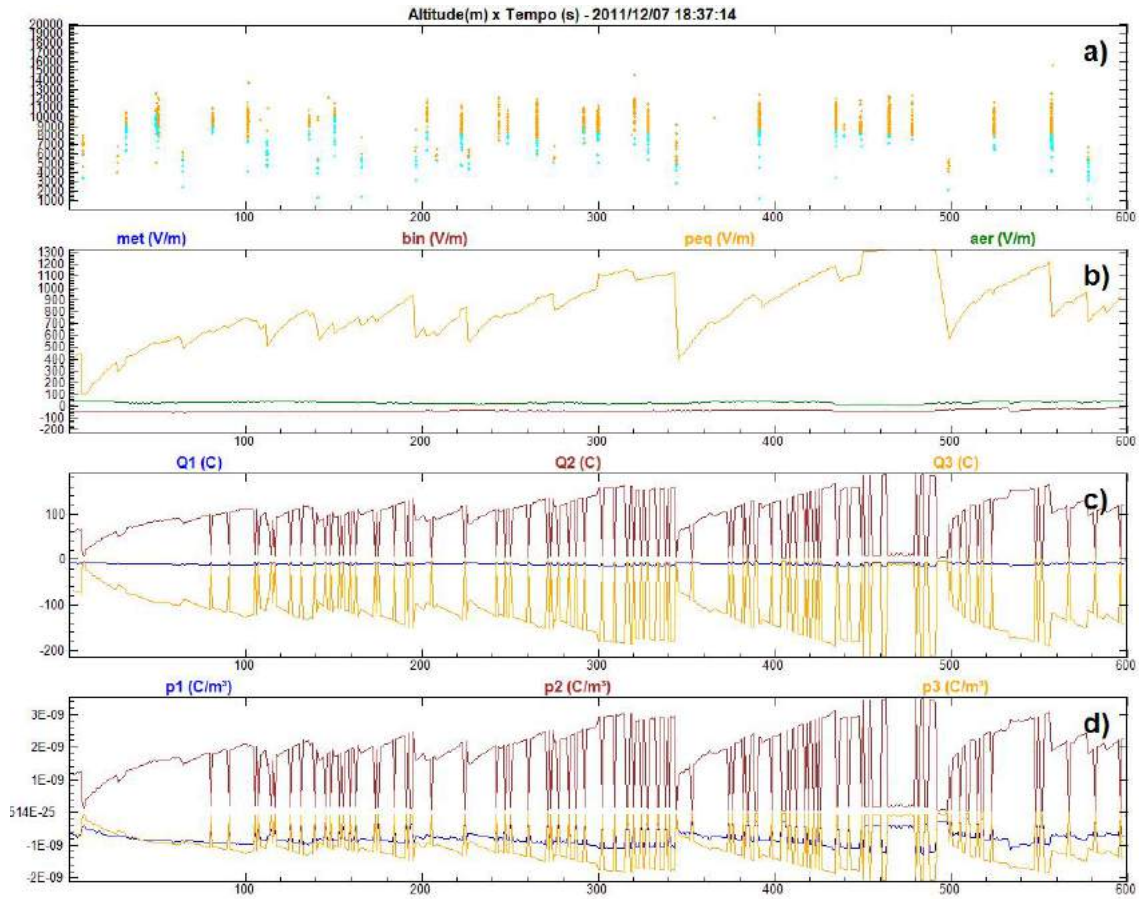


Figura 5.27 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.28.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.28.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.28.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

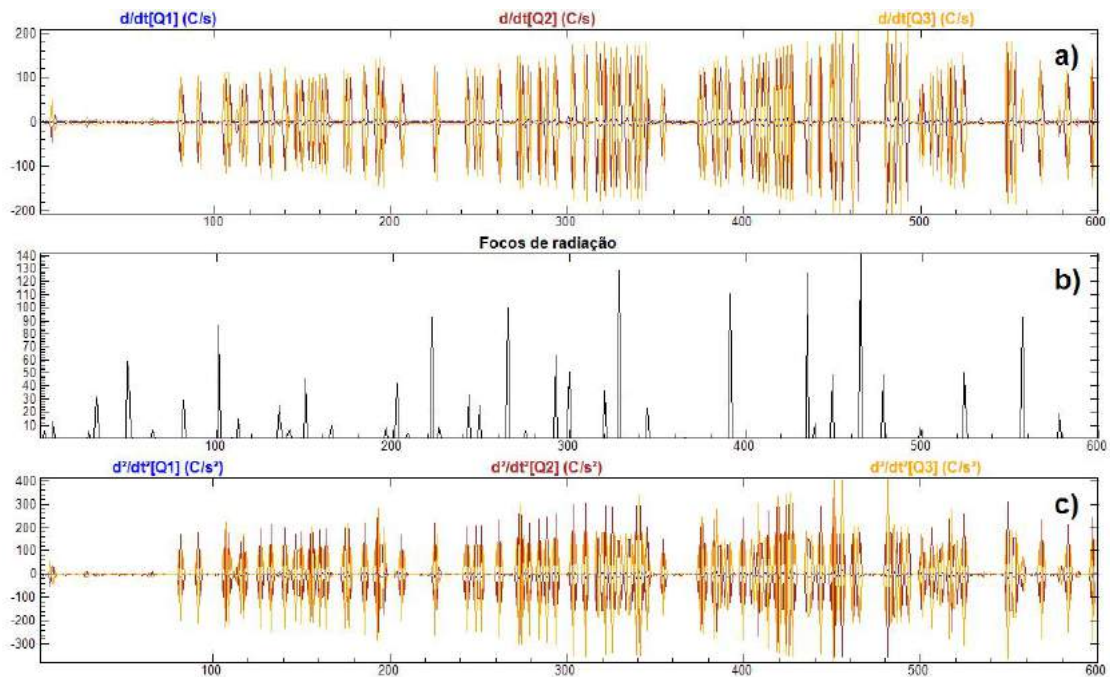


Figura 5.28 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

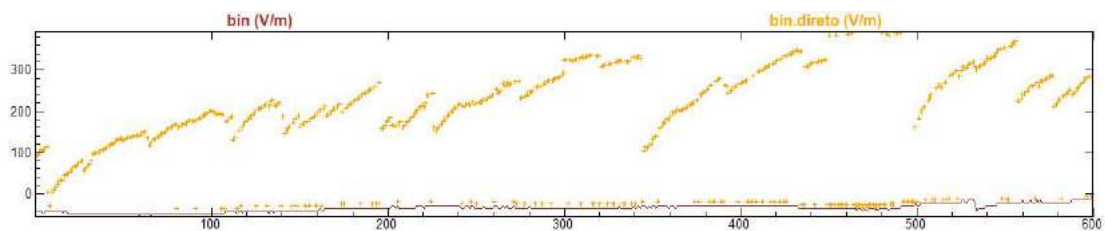


Figura 5.29 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

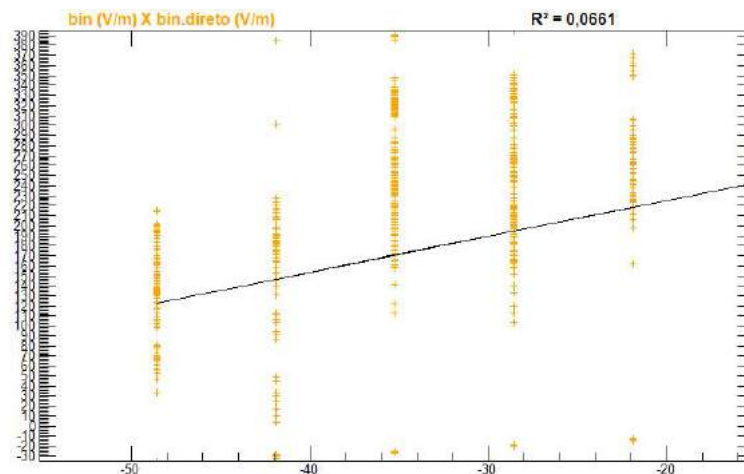


Figura 5.30 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em (V/m)

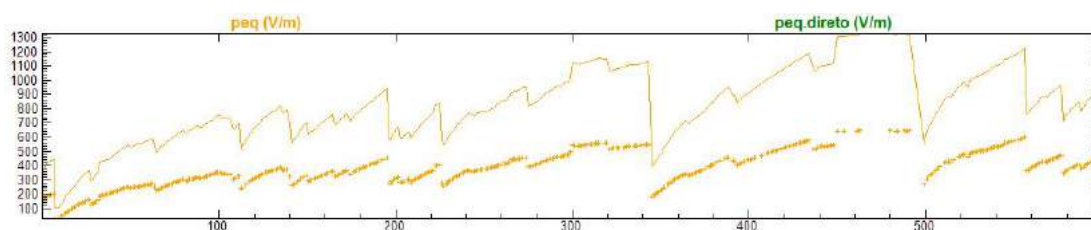


Figura 5.31 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

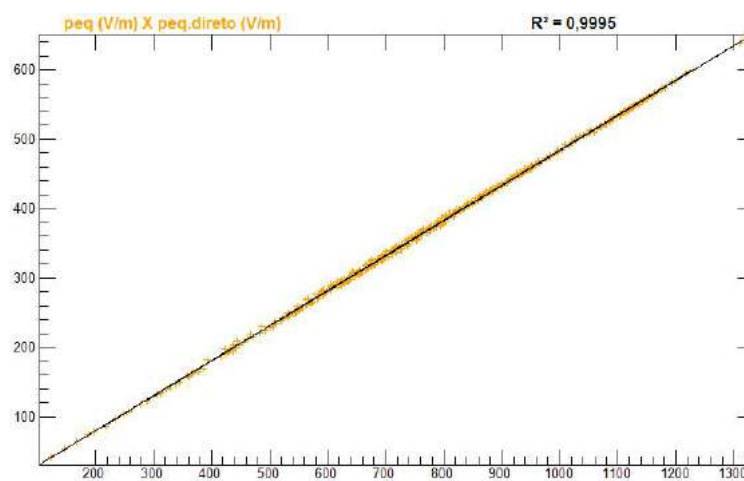


Figura 5.32 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

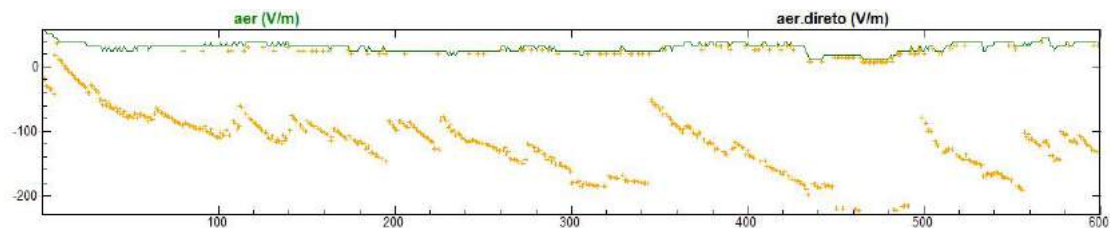


Figura 5.33 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

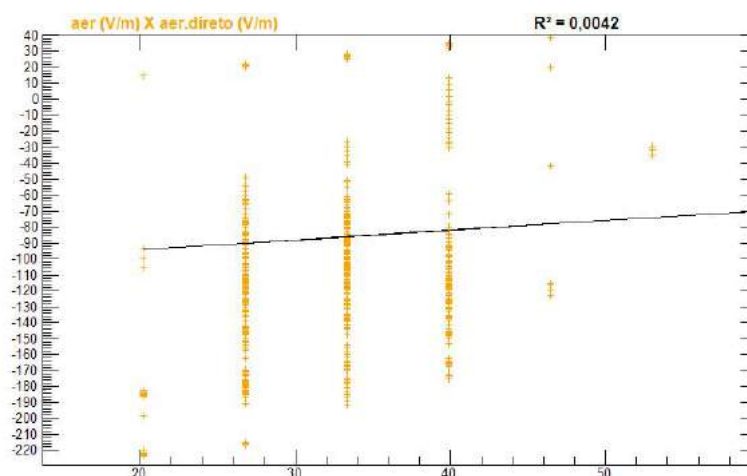


Figura 5.34 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.5 Caso 88

Este evento ocorreu em 08 de dezembro de 2011 às 16:19:48. Foram utilizados 1975 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 8935 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $473,029 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.35.b (vista frontal), 5.35.c (vista superior) e 5.35.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.35.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com

valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6250 m até 9250 m para o primeiro centro e de 9250 m até 12250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $95,625 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $131,375 \text{ km}^3$  para o segundo . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-3,128 \text{ C}$  para o primeiro e  $1,046 \text{ C}$  para o segundo . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-0,033 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $0,007 \text{ nC/m}^3$  para o segundo

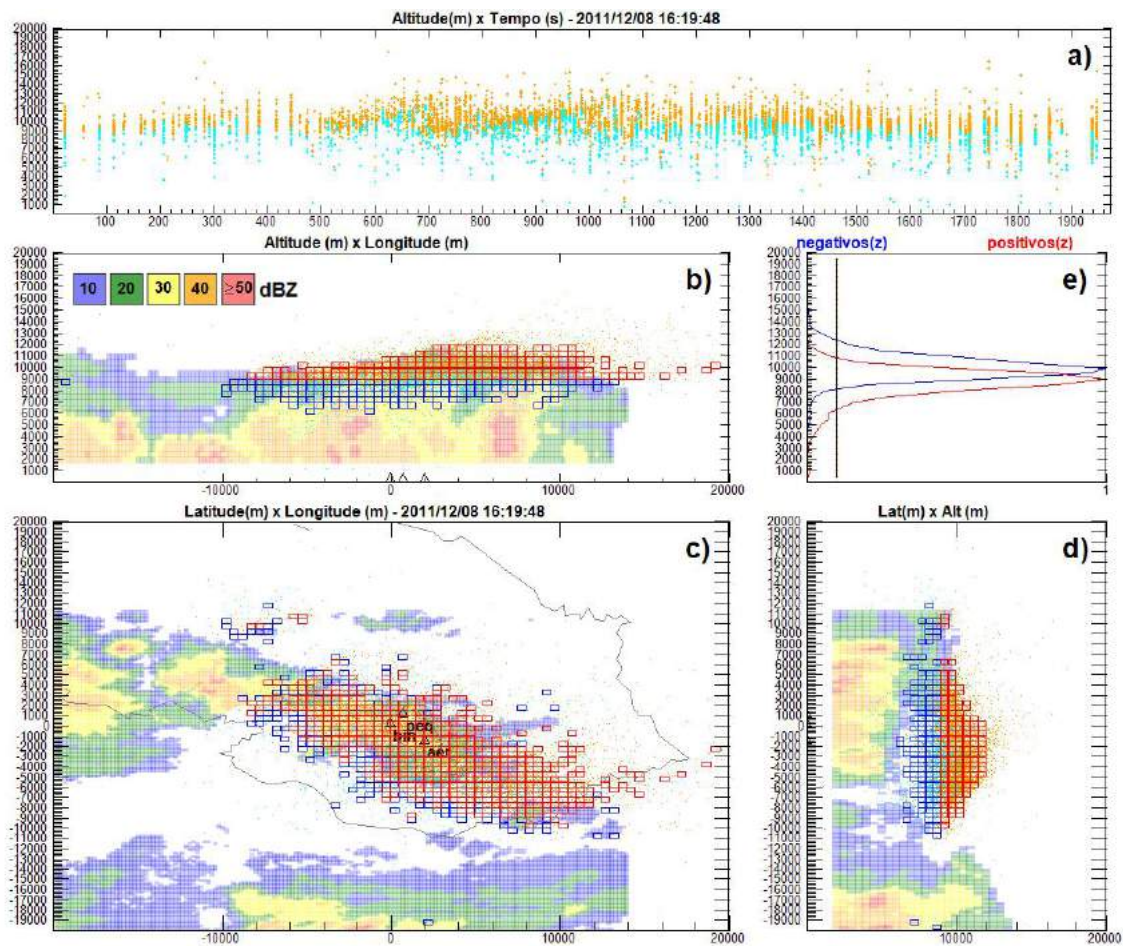


Figura 5.35 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.36.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.36.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.36.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.36.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

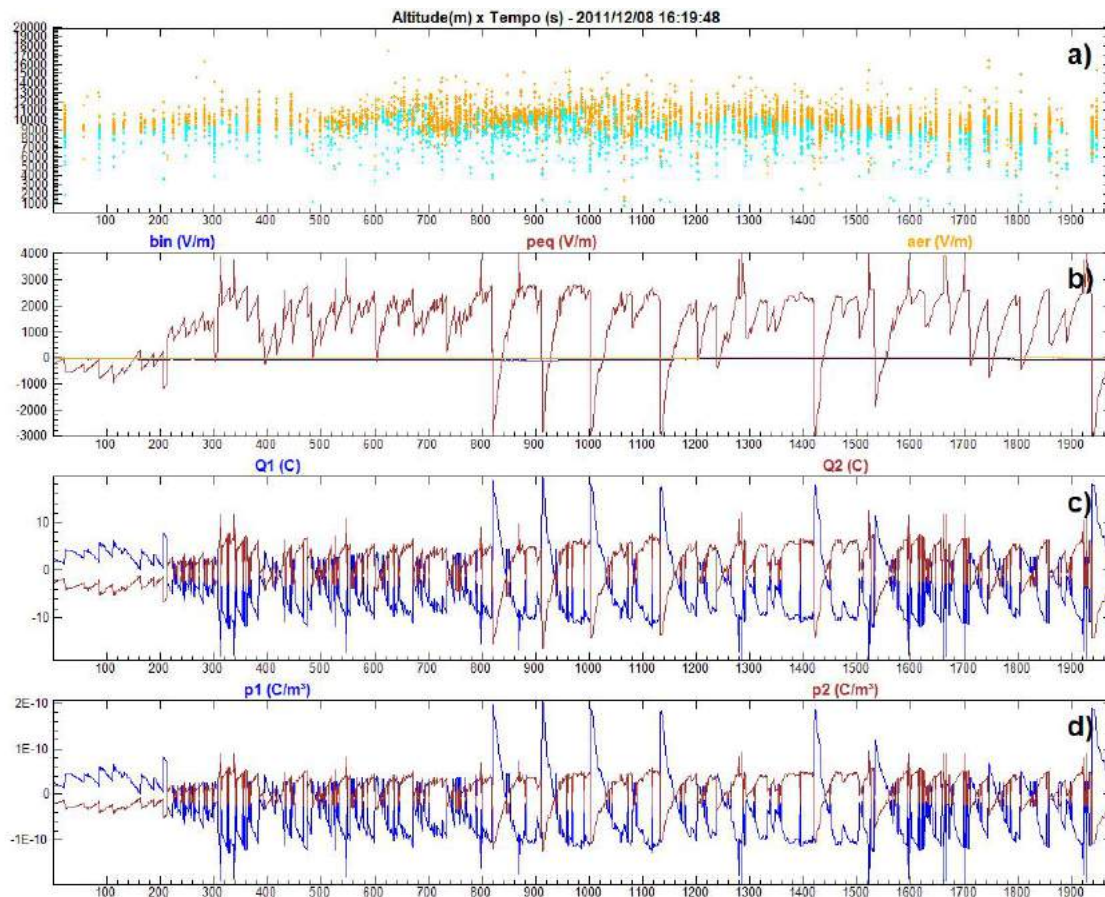


Figura 5.36 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.37.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.37.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.37.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

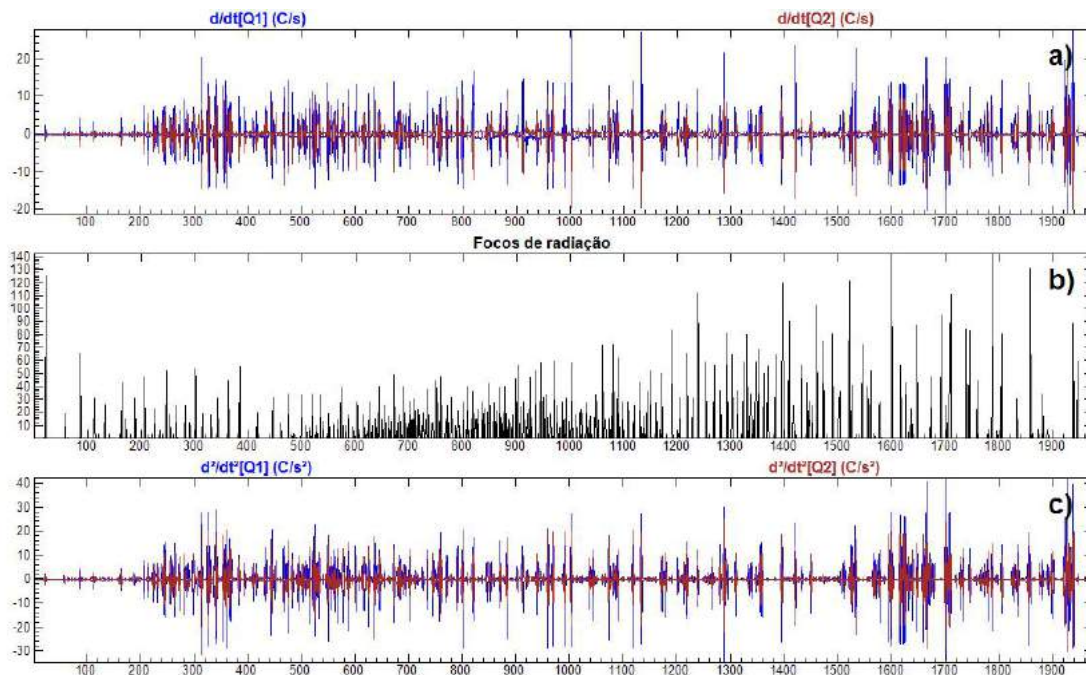


Figura 5.37 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

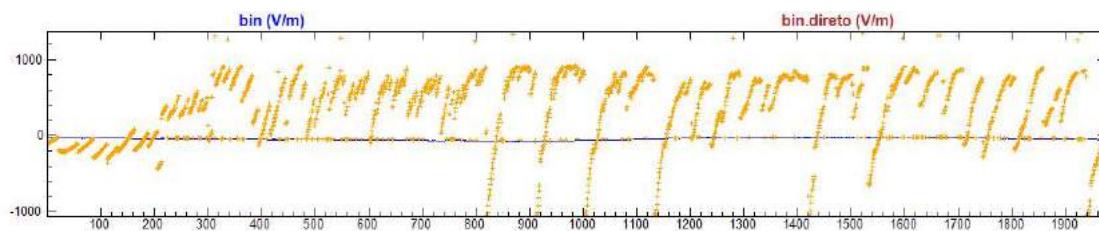


Figura 5.38 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

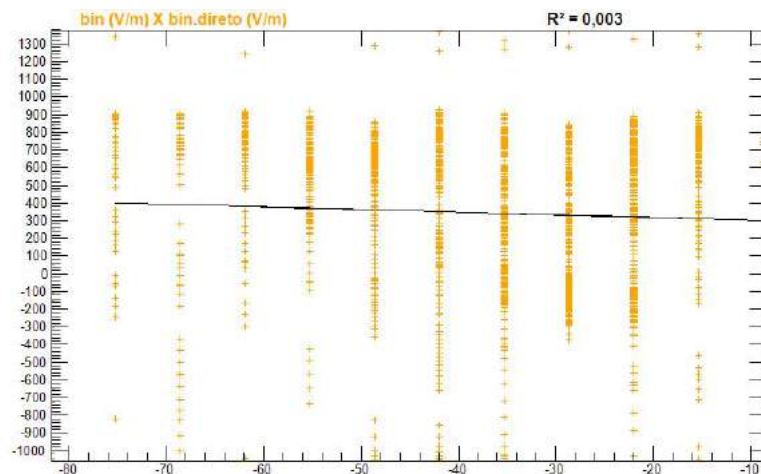


Figura 5.39 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em (V/m)

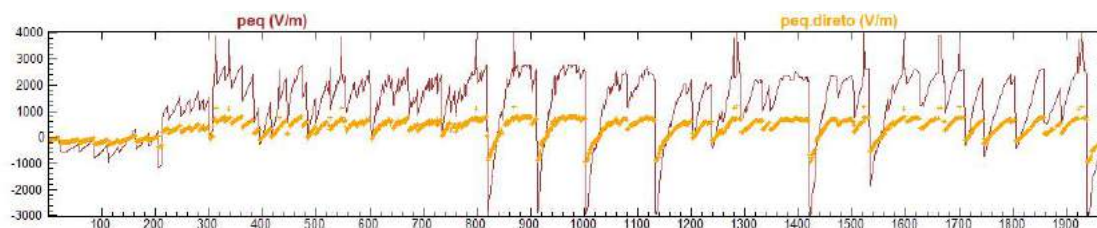


Figura 5.40 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

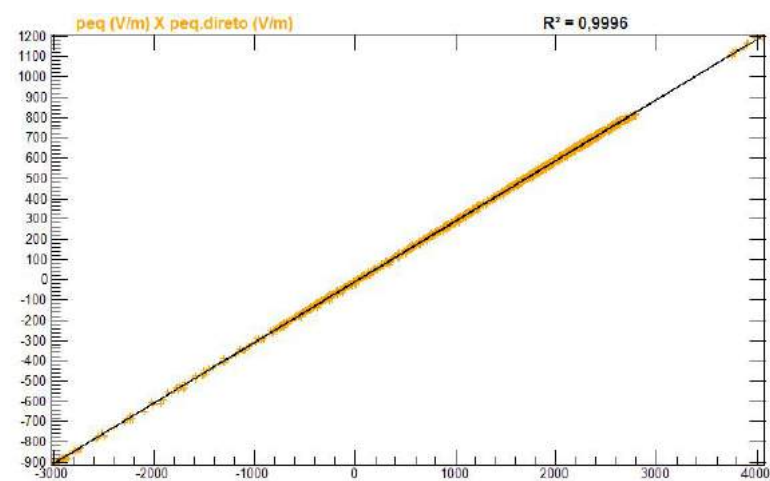


Figura 5.41 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

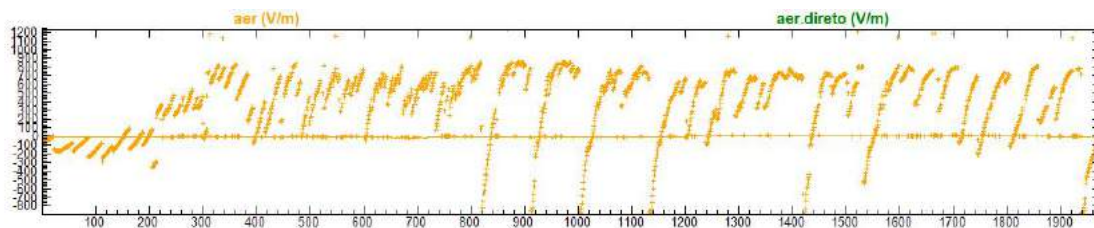


Figura 5.42 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

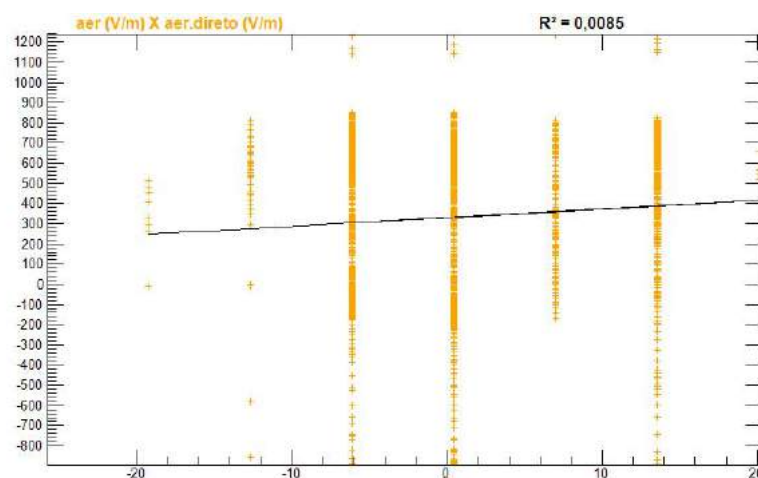


Figura 5.43 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.6 Caso 89

Este evento ocorreu em 08 de dezembro de 2011 às 16:37:21. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 3783 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $473,029 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.44.b (vista frontal), 5.44.c (vista superior) e 5.44.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.44.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com

valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6750 m até 9250 m para o primeiro centro e de 9750 m até 12250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $40,375 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $31,625 \text{ km}^3$  para o segundo . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-16,01 \text{ C}$  para o primeiro e  $18,693 \text{ C}$  para o segundo . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-0,397 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $0,591 \text{ nC/m}^3$  para o segundo

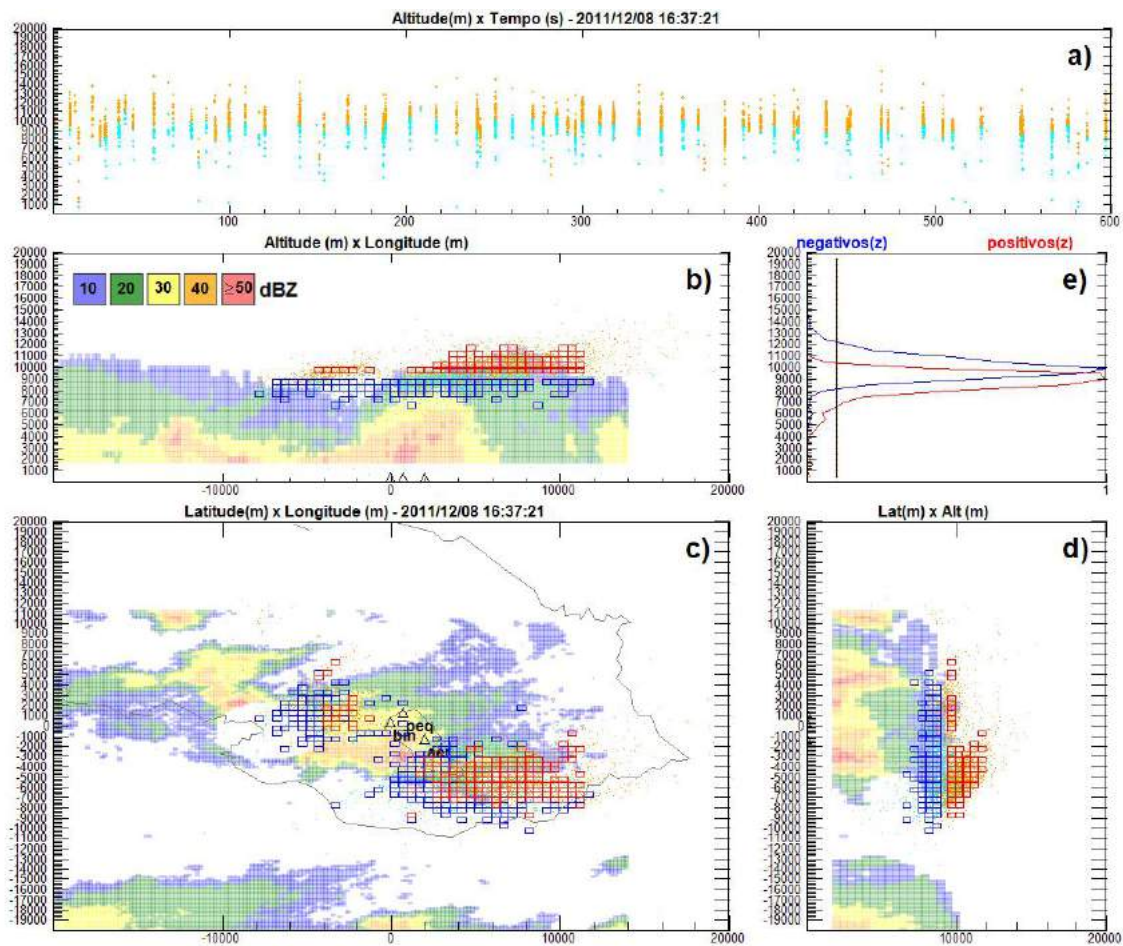


Figura 5.44 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.45.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.45.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.45.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.45.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

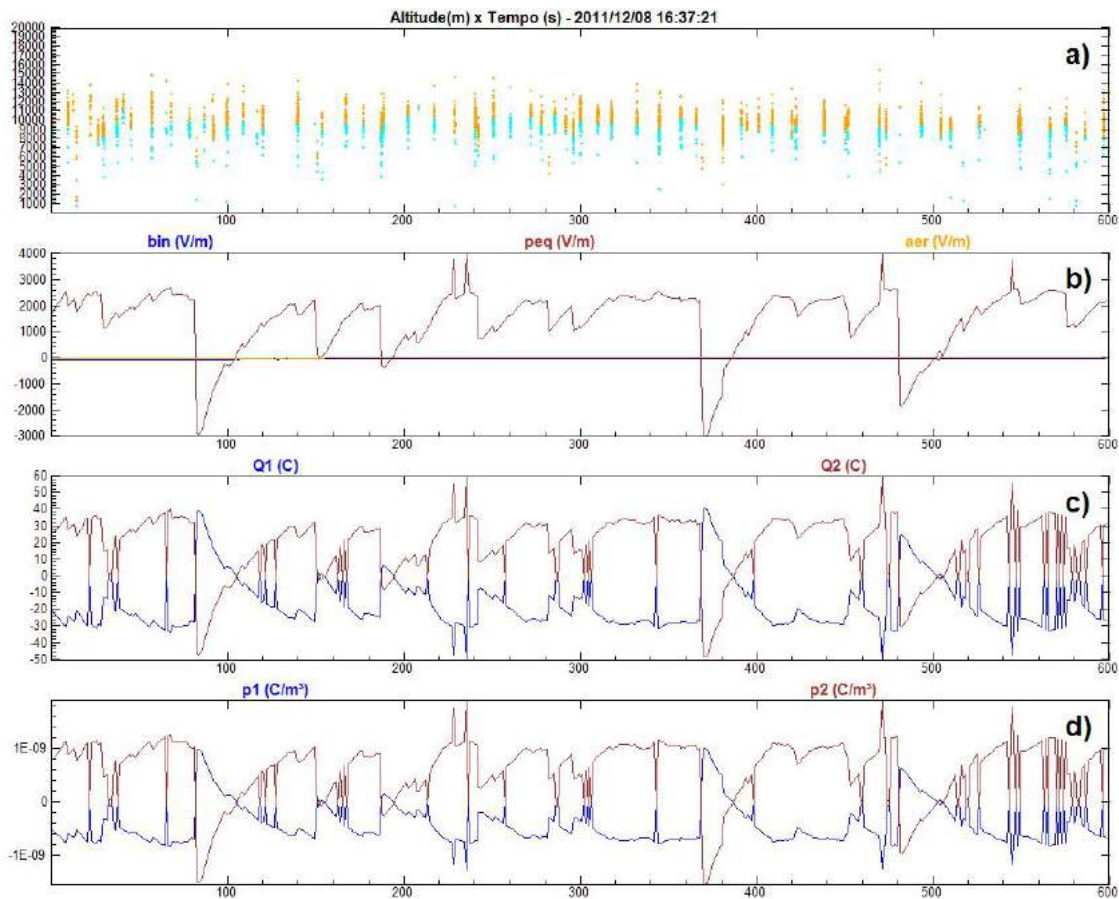


Figura 5.45 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.46.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.46.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.46.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

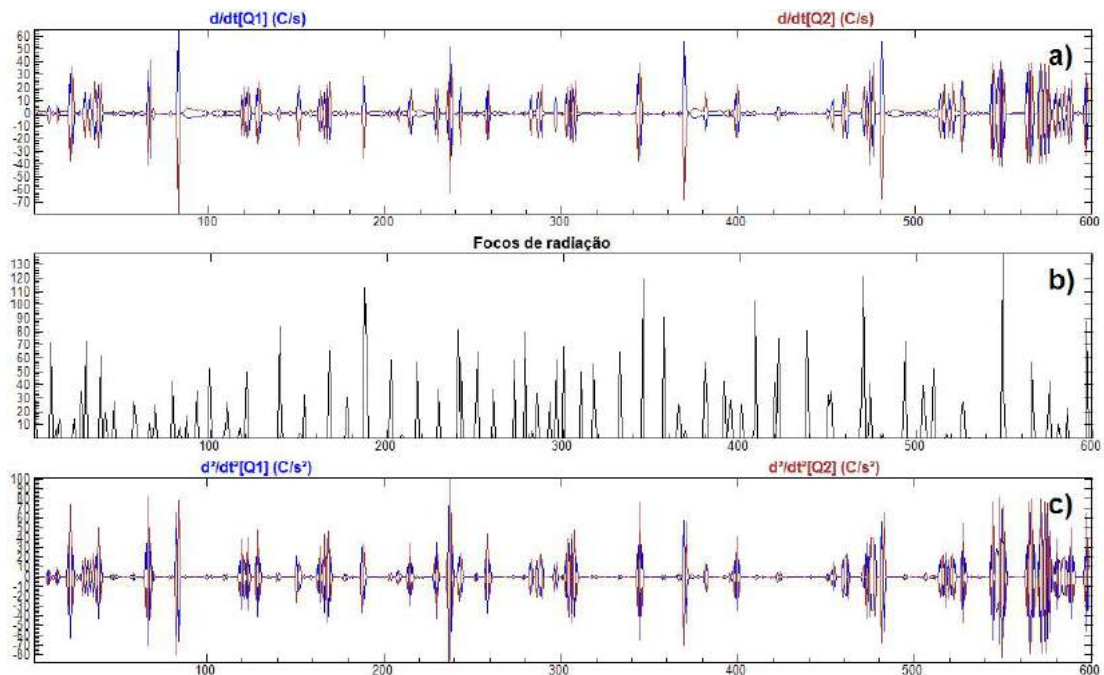


Figura 5.46 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

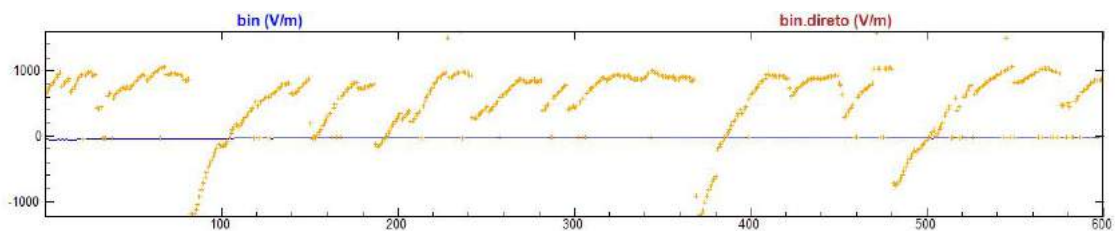


Figura 5.47 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

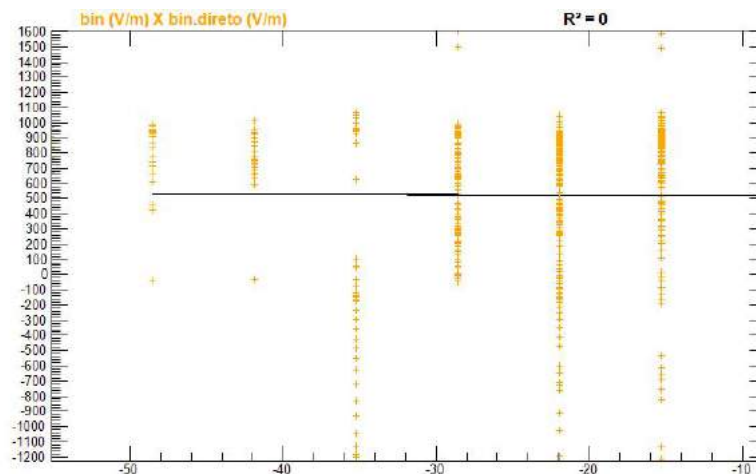


Figura 5.48 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em (V/m)

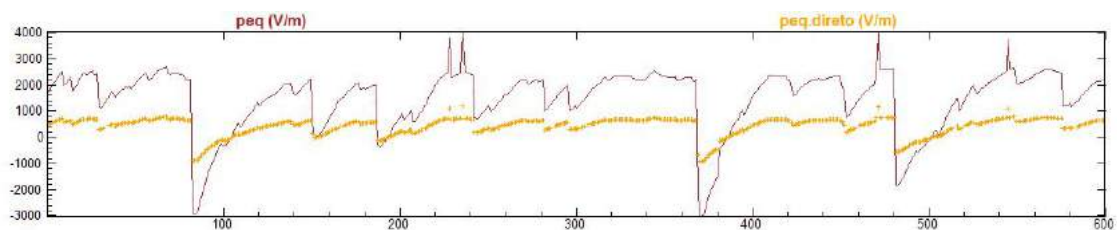


Figura 5.49 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

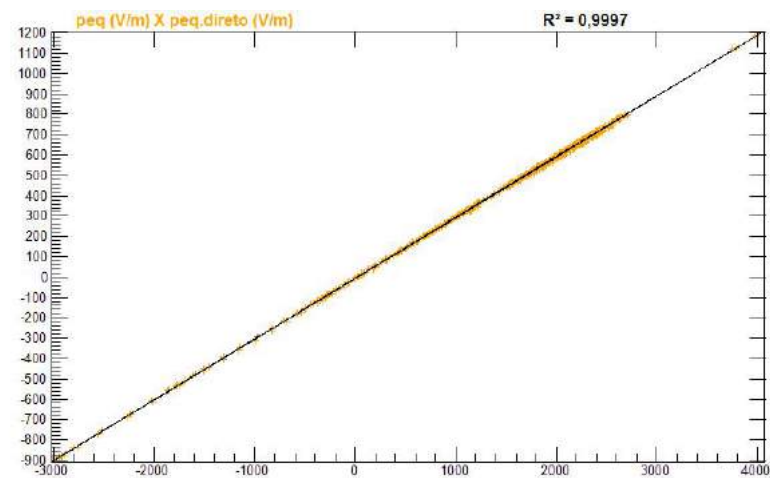


Figura 5.50 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

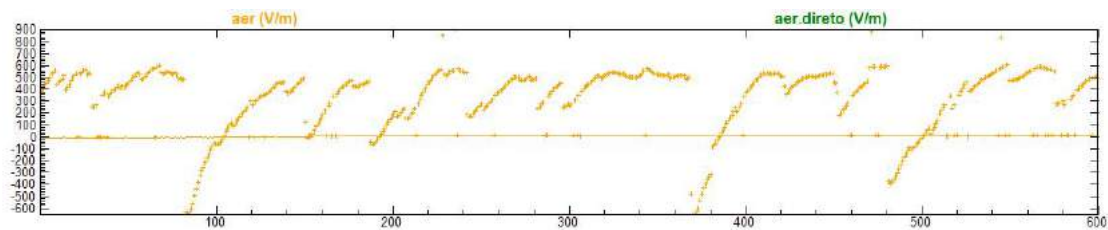


Figura 5.51 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

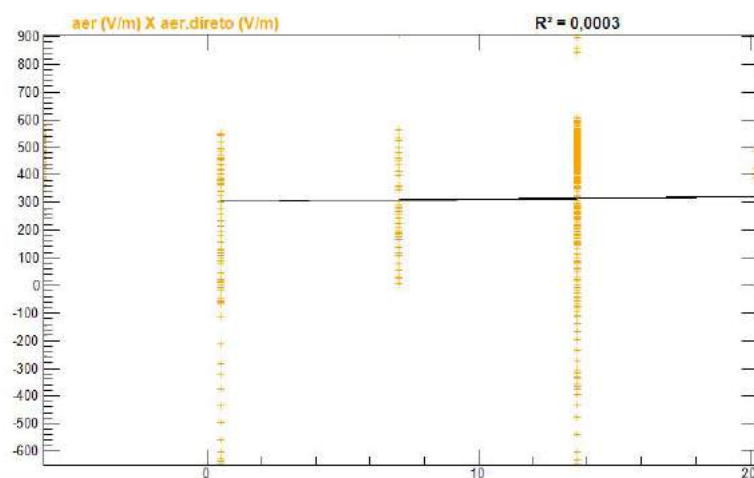


Figura 5.52 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.7 Caso 113

Este evento ocorreu em 14 de dezembro de 2011 às 02:05:8. Foram utilizados 388 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Haviam quatro sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 791 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $5,027 \text{ GW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.53.b (vista frontal), 5.53.c (vista superior) e 5.53.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.53.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com

valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 3750 m até 5250 m para o primeiro centro, de 5250 m até 8750 m para o segundo centro e de 9250 m até 12250 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $1,5 \text{ km}^3$  para o primeiro ,  $19,625 \text{ km}^3$  para o segundo e  $35,125 \text{ km}^3$  para o terceiro . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 17,372 C para o primeiro , -33,802 C para o segundo e 3,915 C para o terceiro . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $11,581 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $-1,723 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $0,111 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

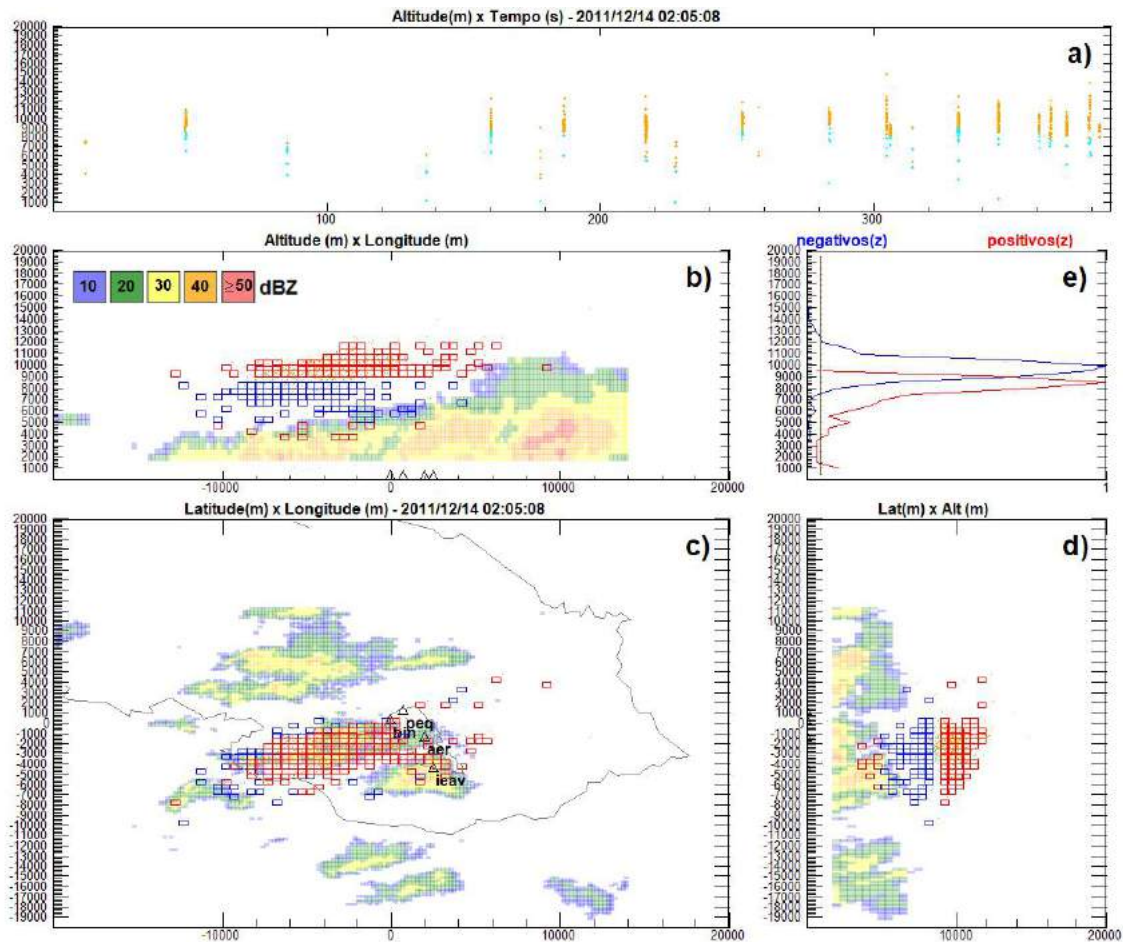


Figura 5.53 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.54.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.54.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.54.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.54.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

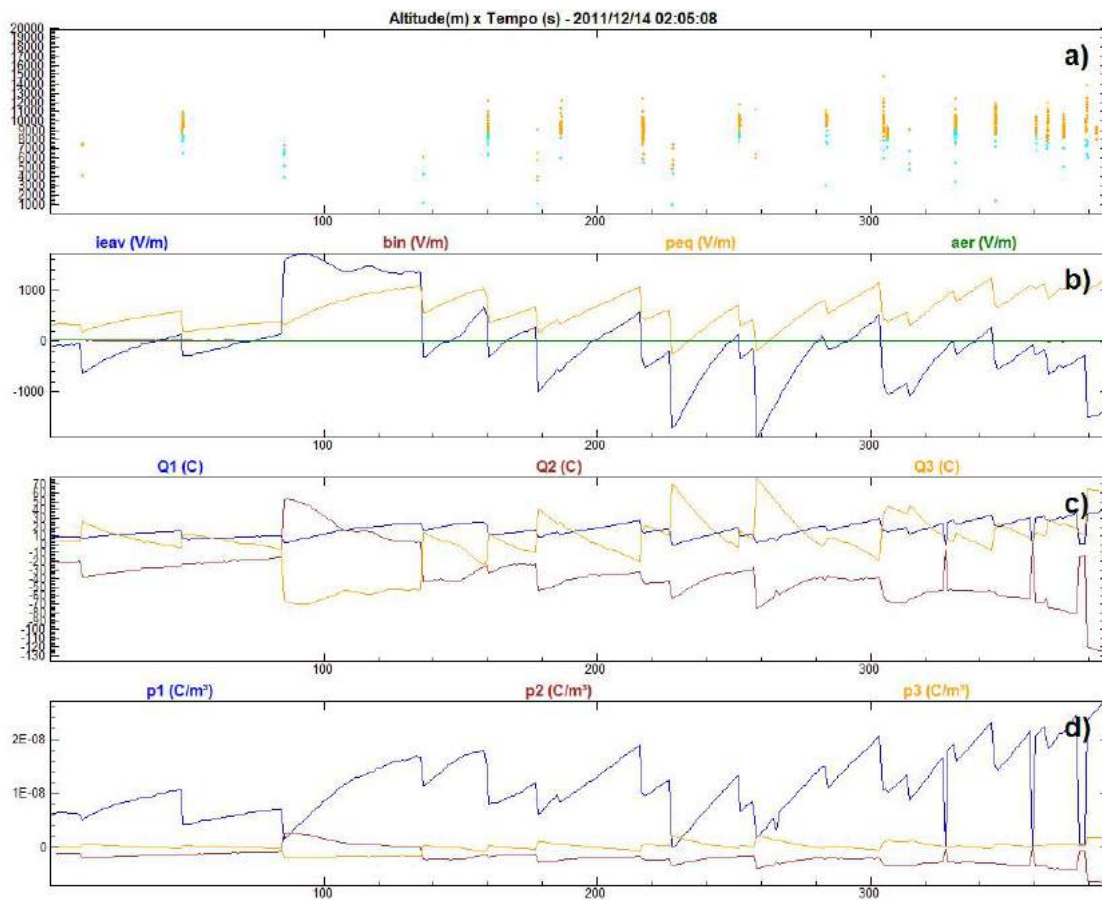


Figura 5.54 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.55.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.55.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.55.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no

eixo horizontal.

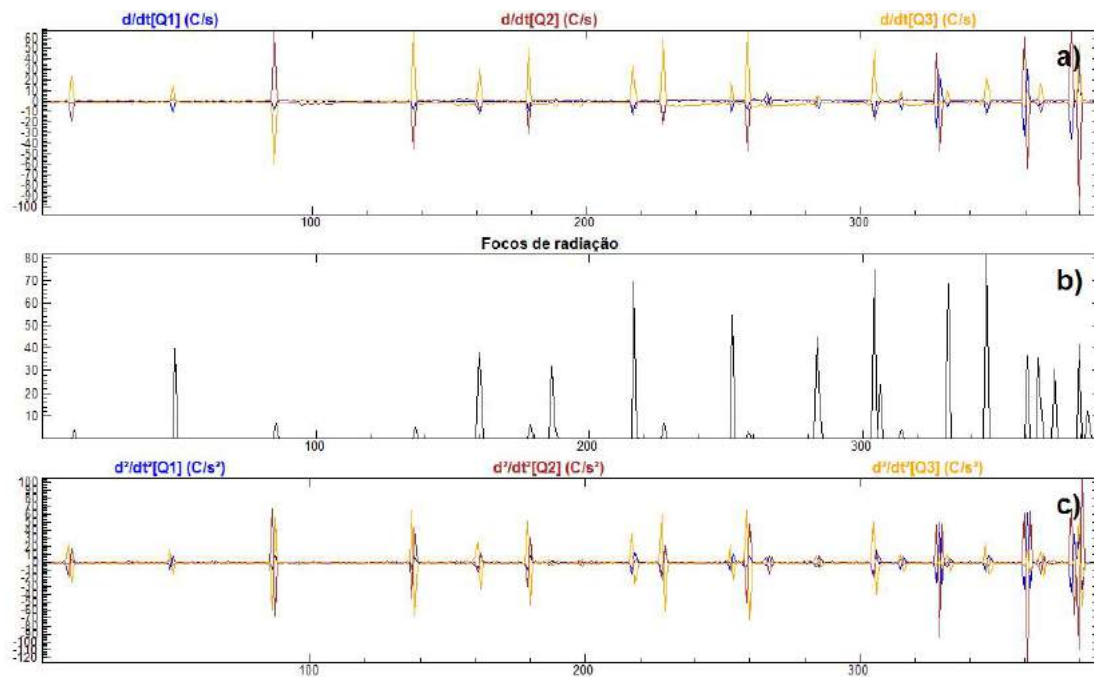


Figura 5.55 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

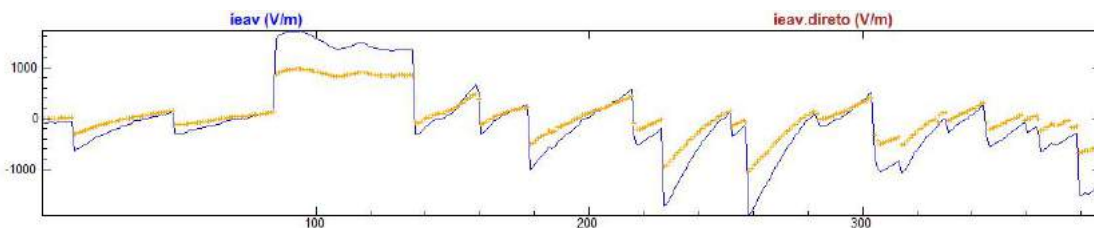


Figura 5.56 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em ( $s$ )

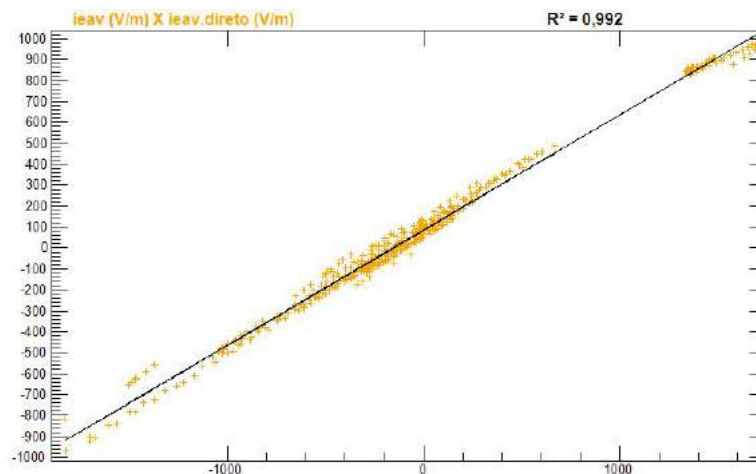


Figura 5.57 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em (V/m)

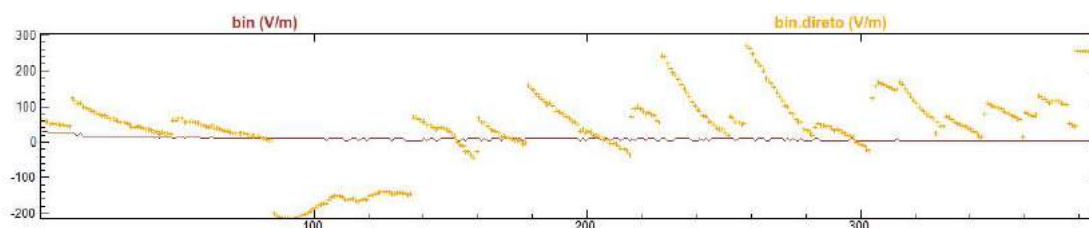


Figura 5.58 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor bin, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

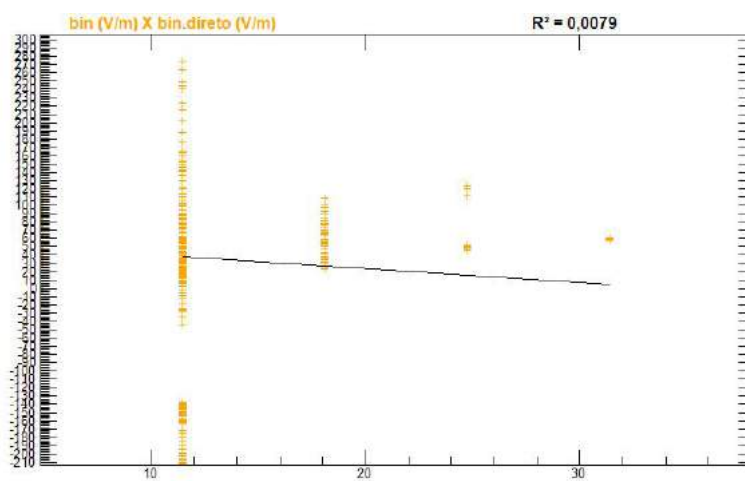


Figura 5.59 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor bin, eixos vertical e horizontal em (V/m)

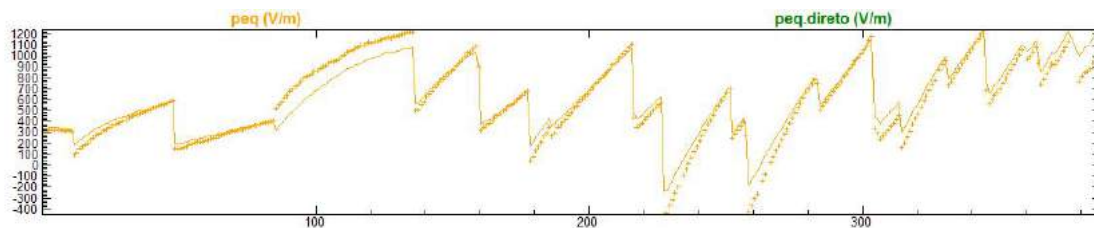


Figura 5.60 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

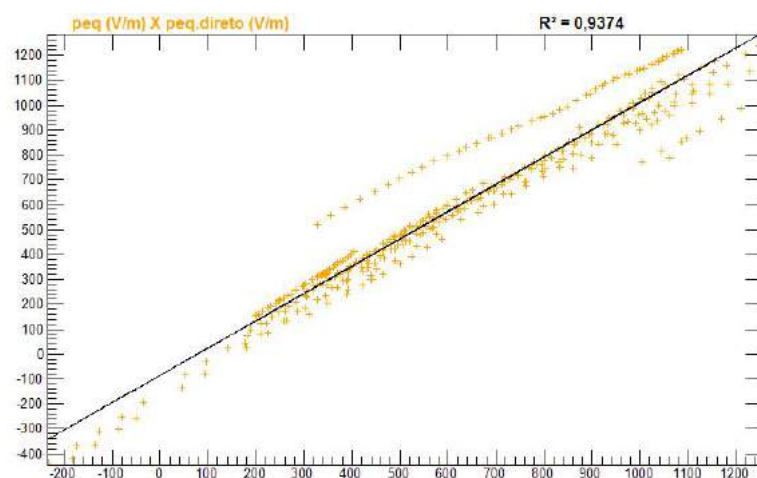


Figura 5.61 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

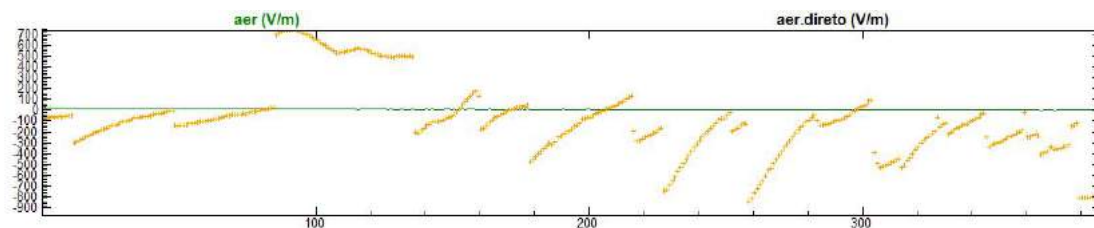


Figura 5.62 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

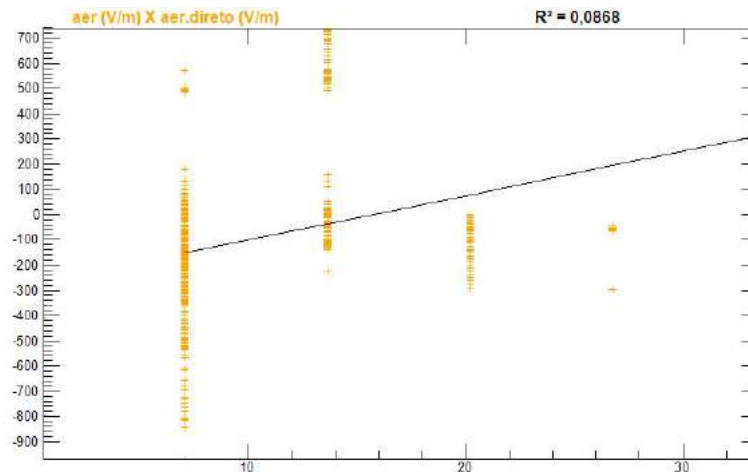


Figura 5.63 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.8 Caso 114

Este evento ocorreu em 14 de dezembro de 2011 às 02:05:11. Foram utilizados 424 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 1086 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $5,027 \text{ GW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.64.b (vista frontal), 5.64.c (vista superior) e 5.64.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.64.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de  $3750 \text{ m}$  até  $5250 \text{ m}$  para o primeiro centro, de  $5250 \text{ m}$  até  $8750 \text{ m}$  para o segundo centro e de  $8750 \text{ m}$  até  $12250 \text{ m}$  para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $1,625 \text{ km}^3$  para o primeiro ,  $22,875 \text{ km}^3$  para o segundo e  $61,875 \text{ km}^3$  para o terceiro . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $6,997 \text{ C}$  para o primeiro ,  $-73,63 \text{ C}$  para o segundo e  $61,947 \text{ C}$  para o terceiro . As densidades de

carga elétrica para cada centro foram:  $4,306 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $-3,219 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $1,001 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

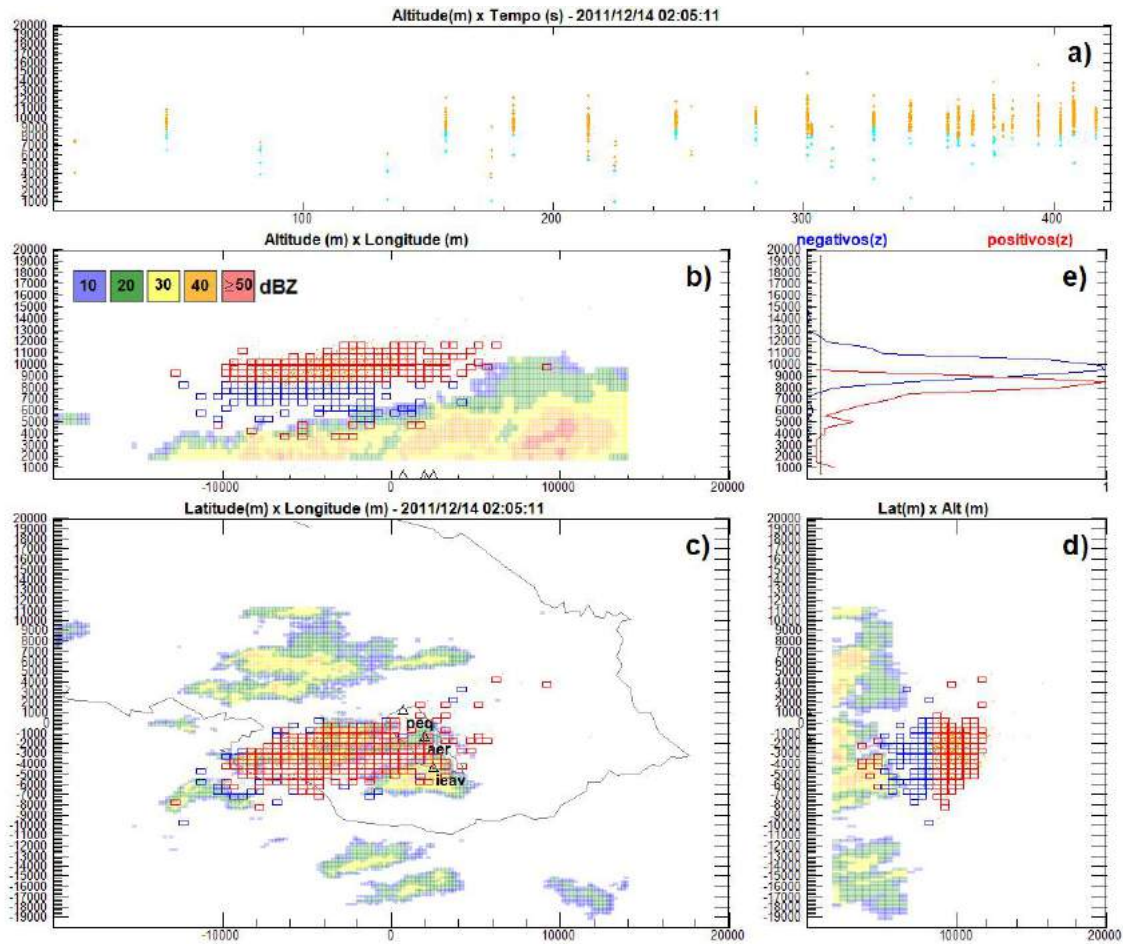


Figura 5.64 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.65.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.65.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.65.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.65.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

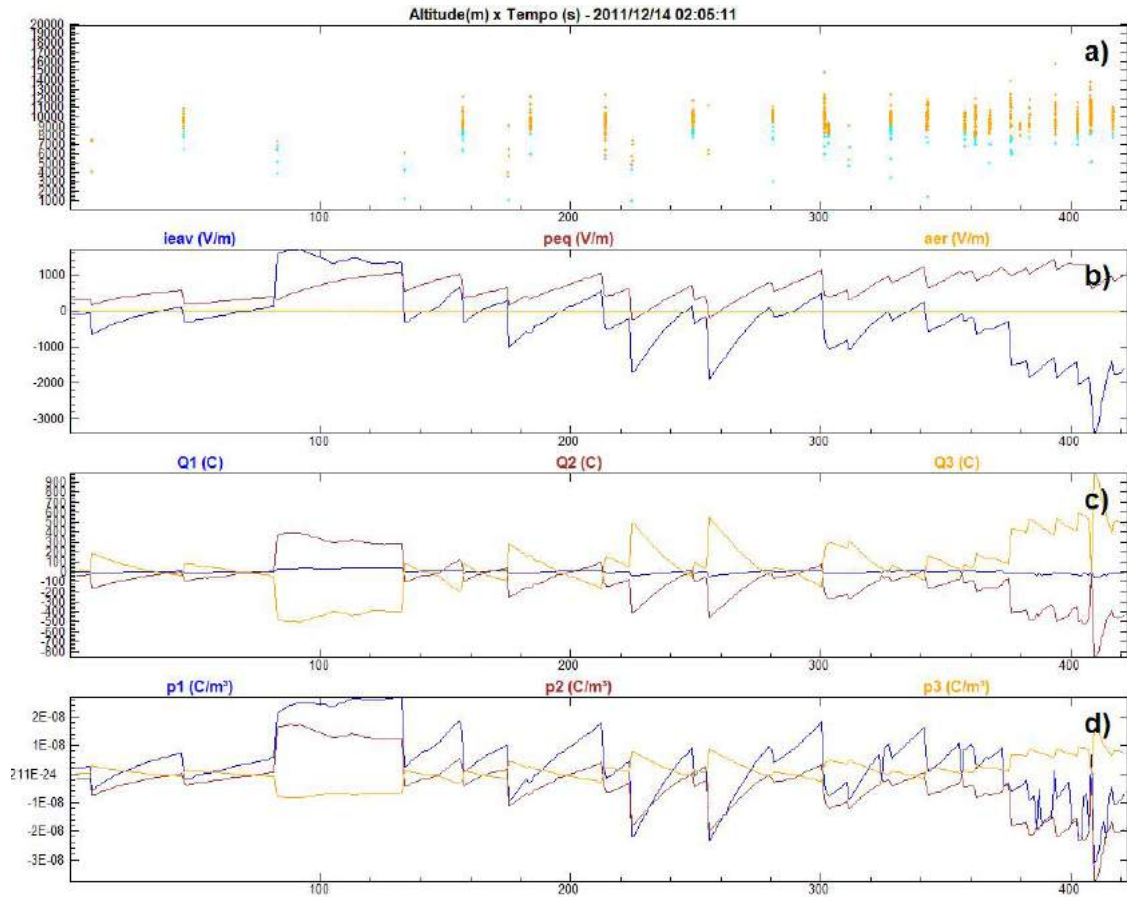


Figura 5.65 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.66.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.66.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.66.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

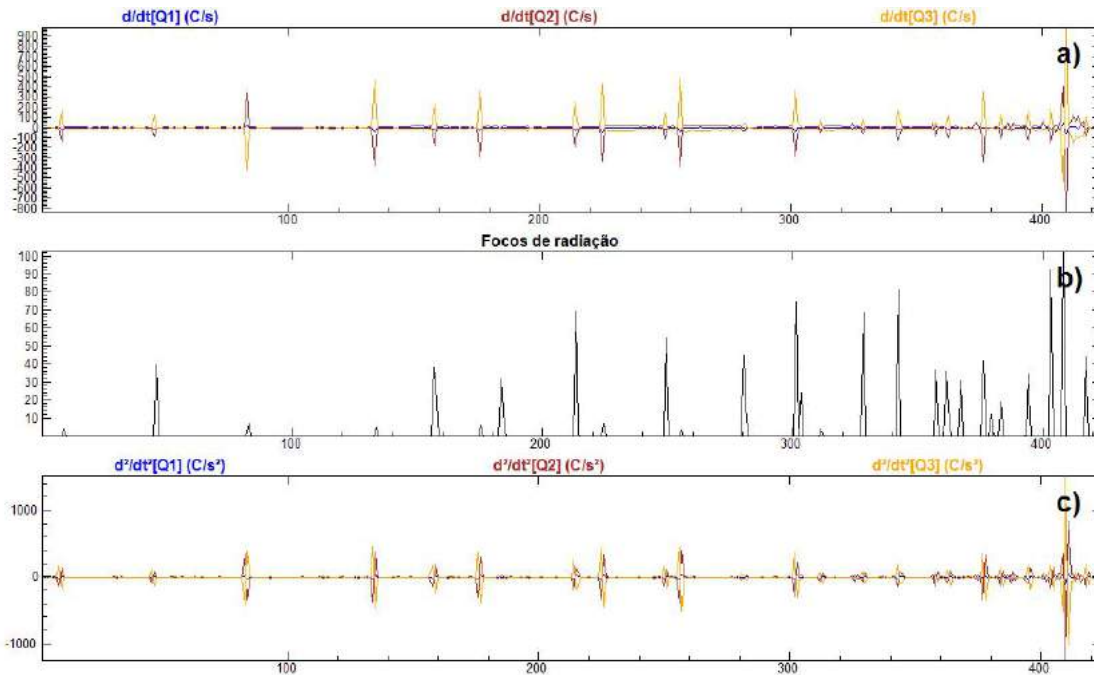


Figura 5.66 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

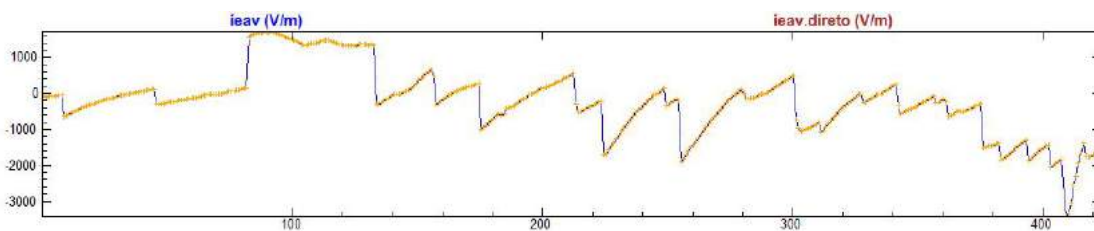


Figura 5.67 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

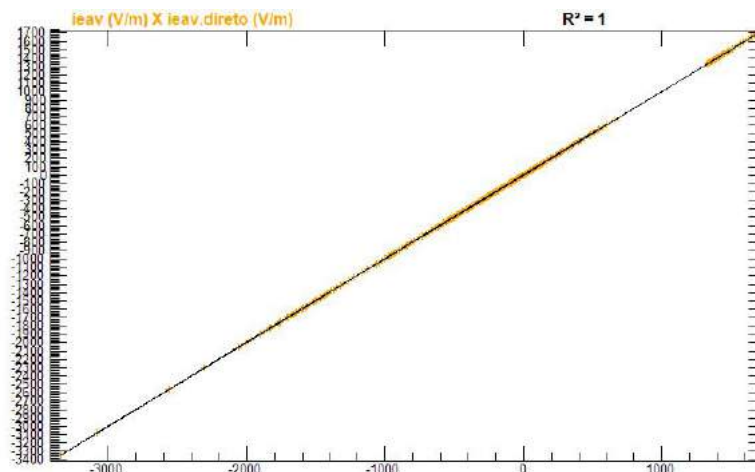


Figura 5.68 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em (V/m)

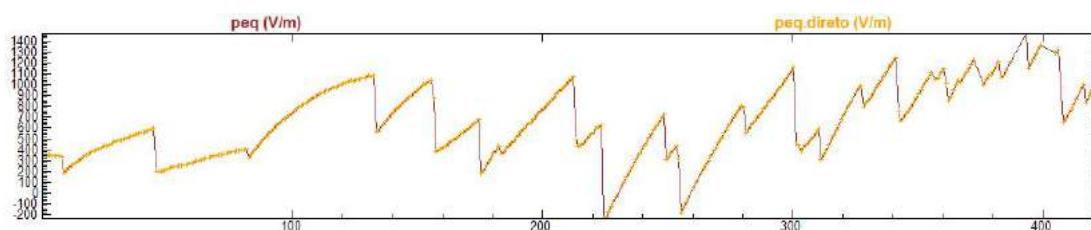


Figura 5.69 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

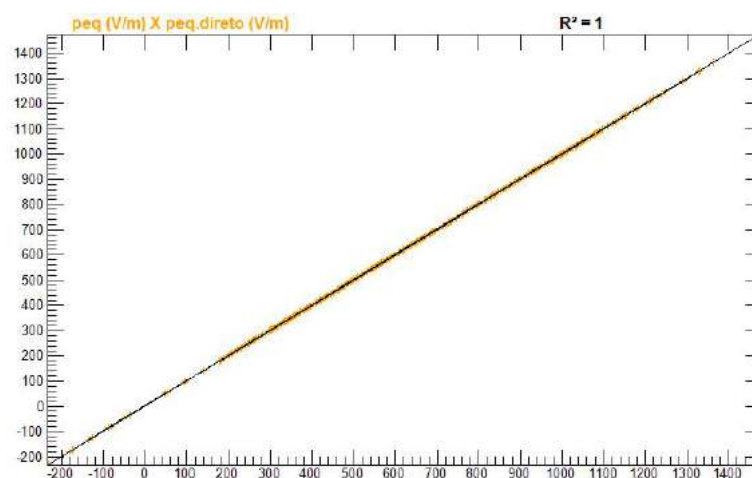


Figura 5.70 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

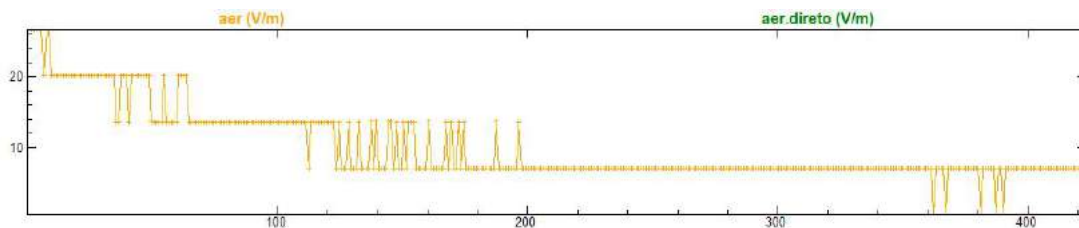


Figura 5.71 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor aer, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

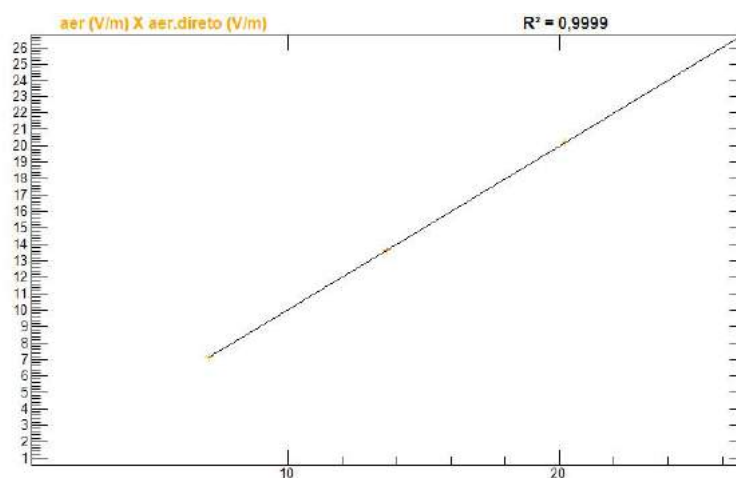


Figura 5.72 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor aer, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.9 Caso 116

Este evento ocorreu em 14 de dezembro de 2011 às 02:35:51. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 9900 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 5,027GW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,2$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.73.b (vista frontal), 5.73.c (vista superior) e 5.73.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.73.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com

valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6750 m até 8750 m para o primeiro centro e de 8750 m até 11250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $14 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $70,75 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-186,138 \text{ C}$  para o primeiro e  $150,782 \text{ C}$  para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-13,296 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $2,131 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

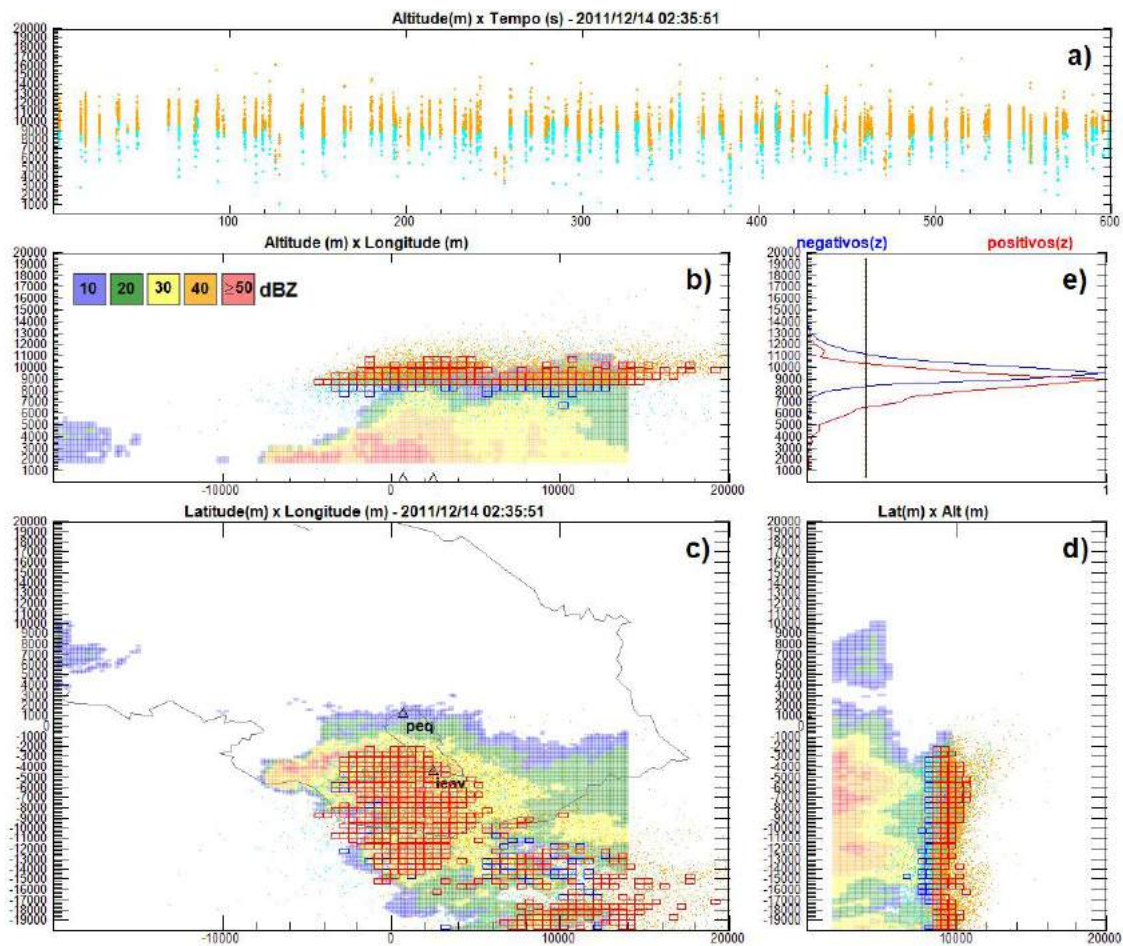


Figura 5.73 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.74.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.74.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.74.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.74.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

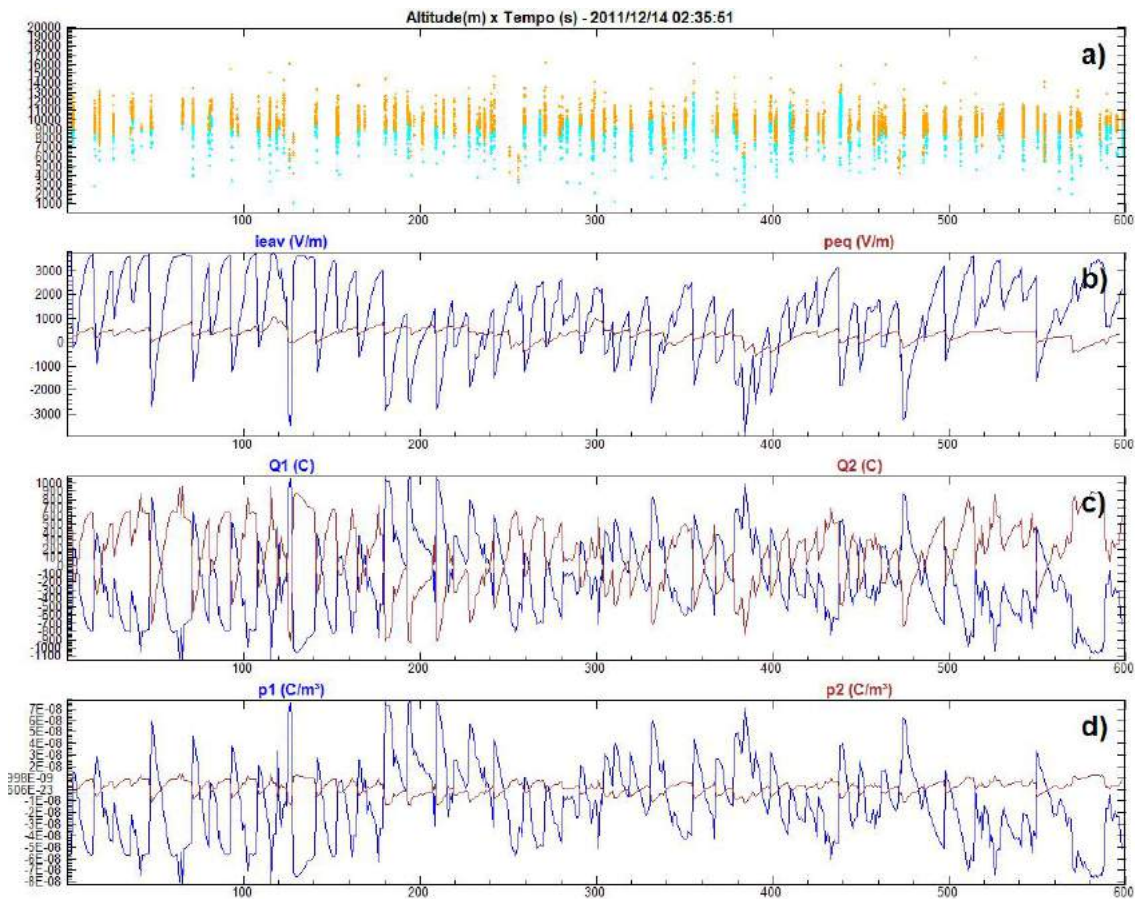


Figura 5.74 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.75.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.75.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.75.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

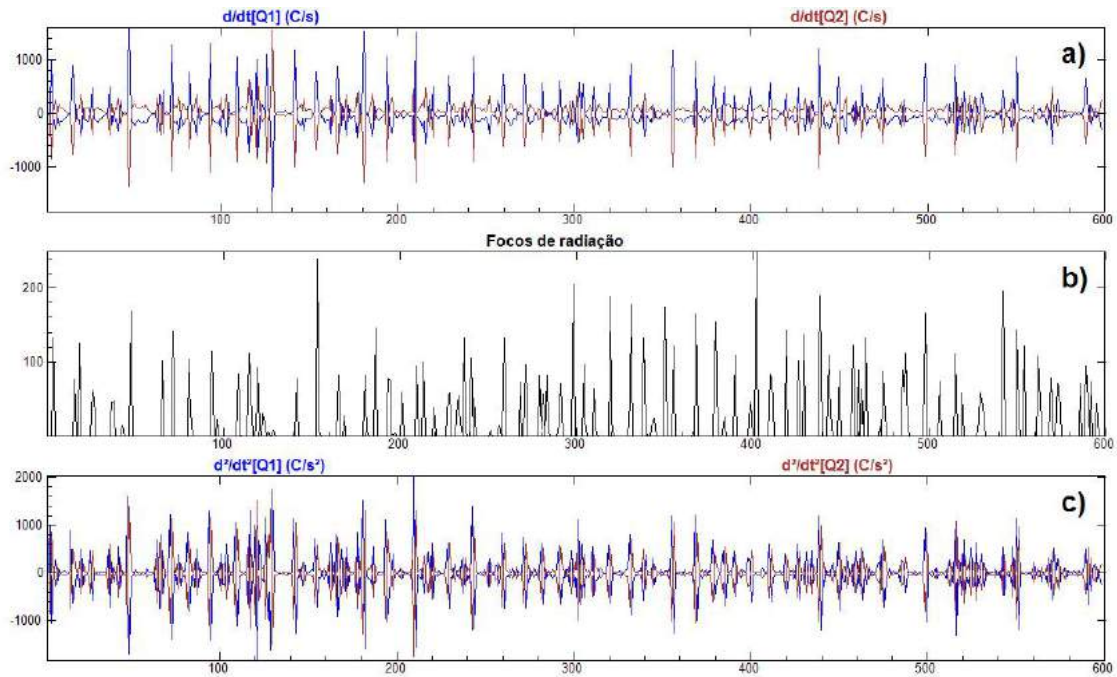


Figura 5.75 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

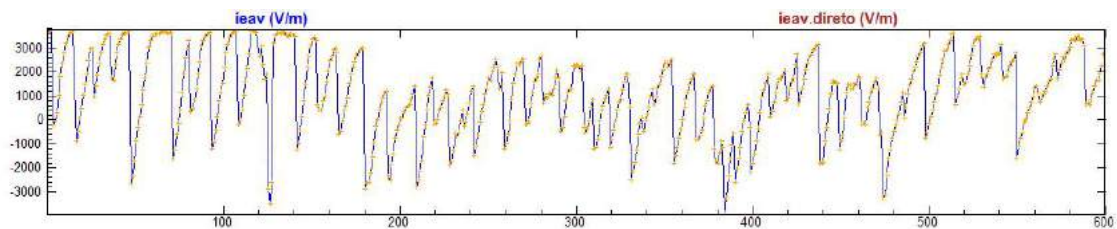


Figura 5.76 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

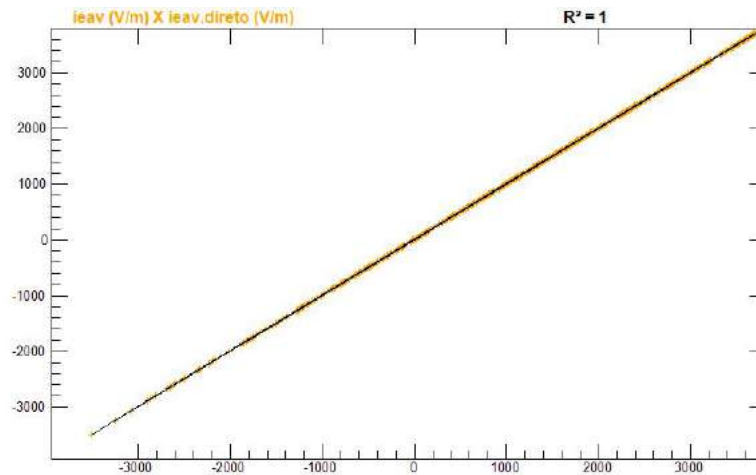


Figura 5.77 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em (V/m)

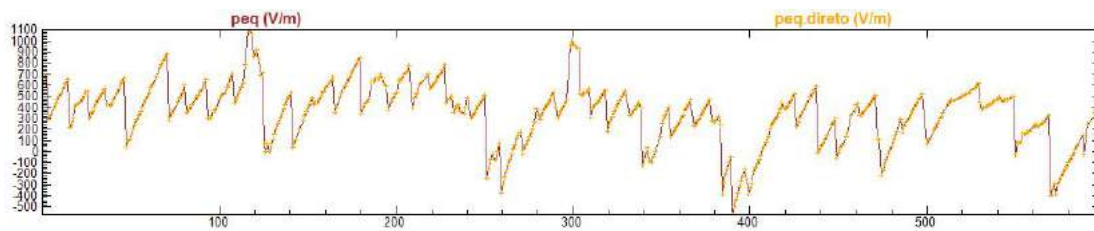


Figura 5.78 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

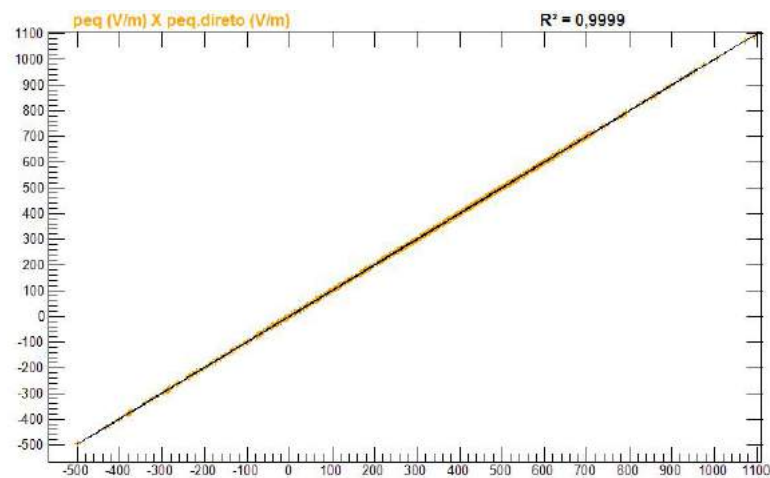


Figura 5.79 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.10 Caso 146

Este evento ocorreu em 18 de dezembro de 2011 às 17:08:25. Foram utilizados 1895 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 1641 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $137,202 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.80.b (vista frontal), 5.80.c (vista superior) e 5.80.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.80.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6250 m até 6750 m para o primeiro centro e de 7250 m até 12250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $2,75 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $155,375 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-18,585 \text{ C}$  para o primeiro e  $17,617 \text{ C}$  para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-6,758 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $0,113 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

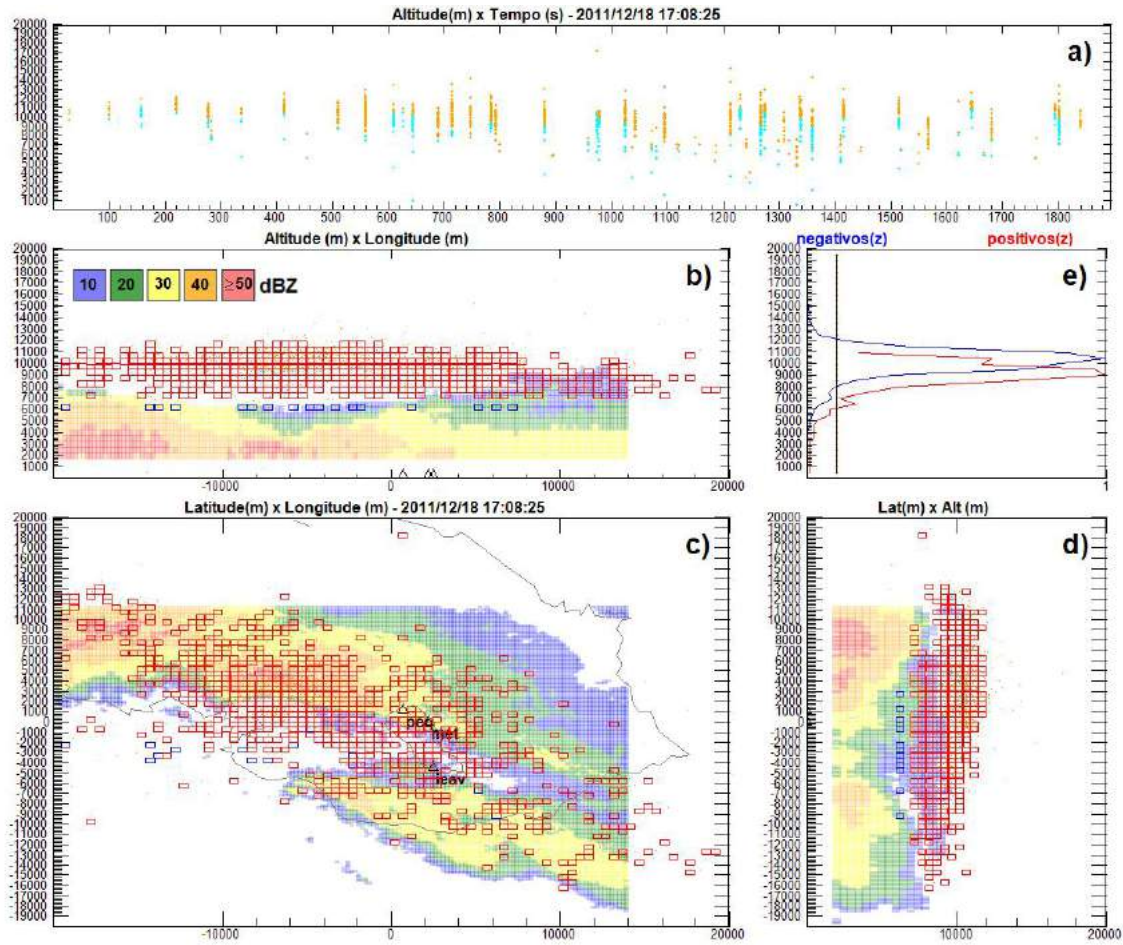


Figura 5.80 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.81.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.81.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.81.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.81.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

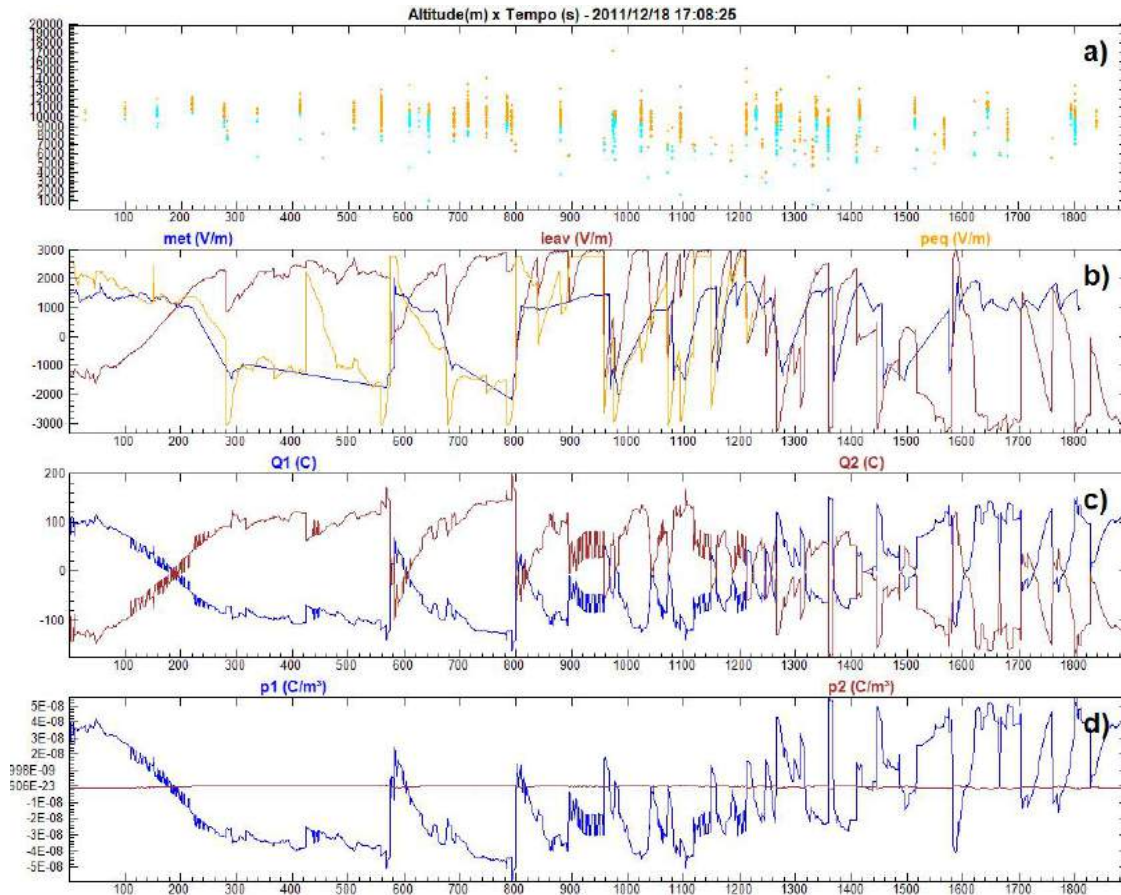


Figura 5.81 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.82.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.82.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.82.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

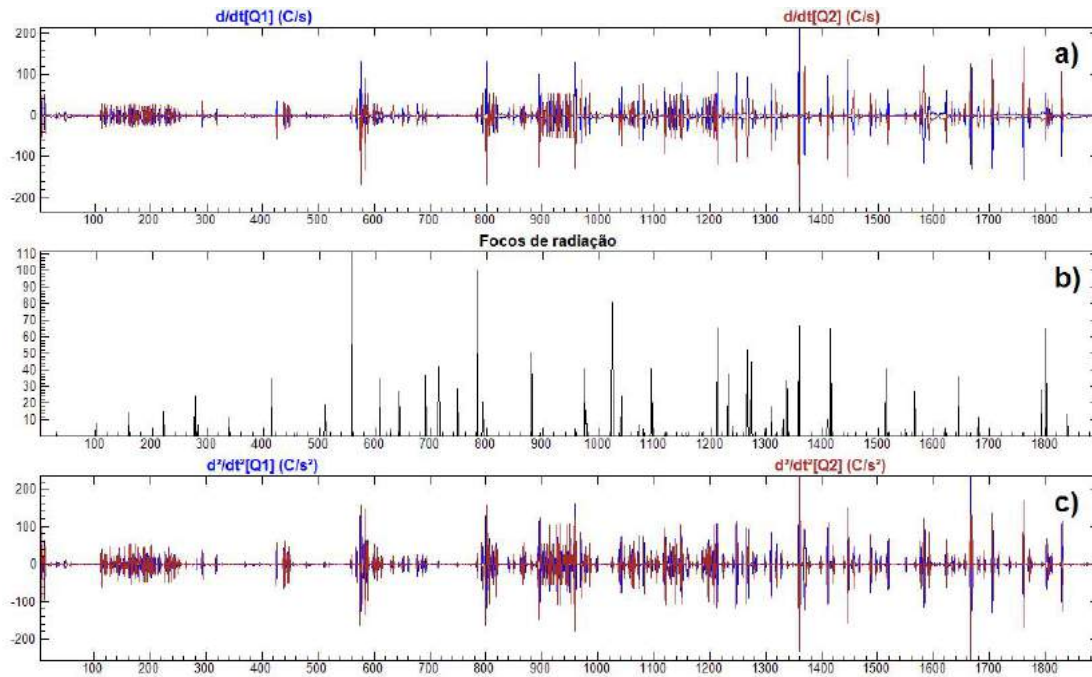


Figura 5.82 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

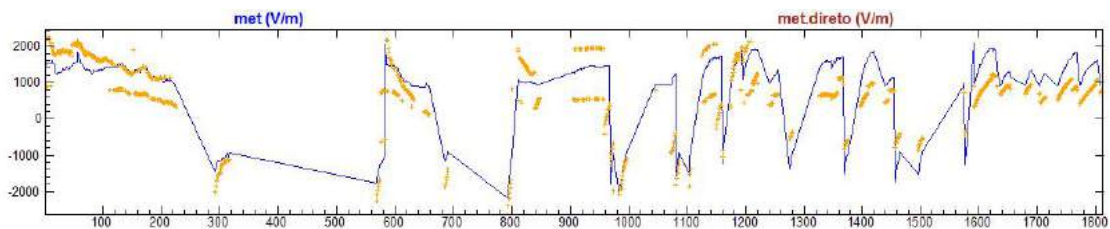


Figura 5.83 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

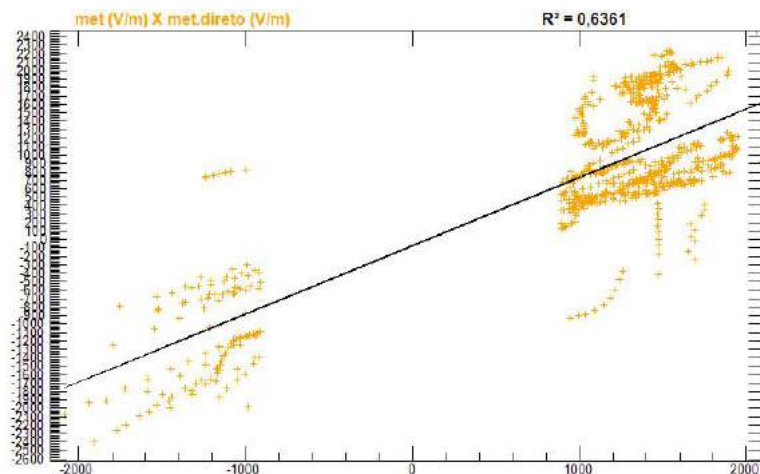


Figura 5.84 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em (V/m)

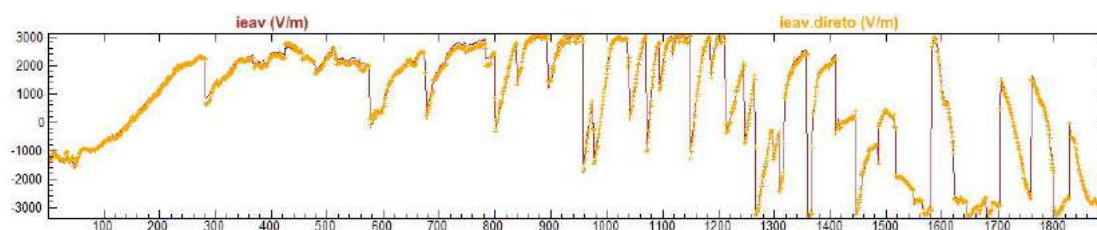


Figura 5.85 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

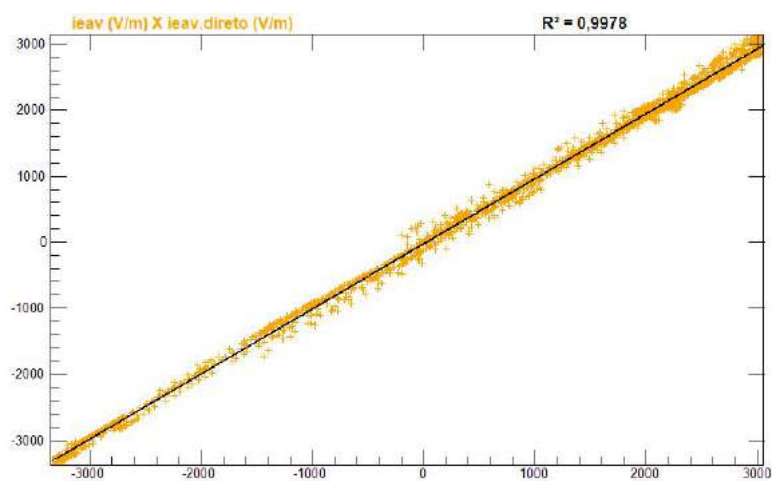


Figura 5.86 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em (V/m)

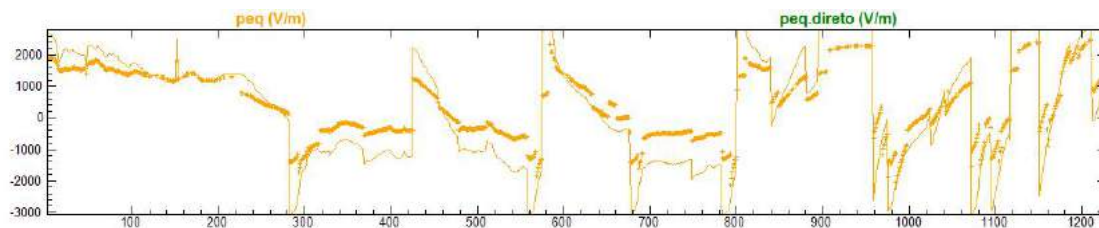


Figura 5.87 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor peq, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

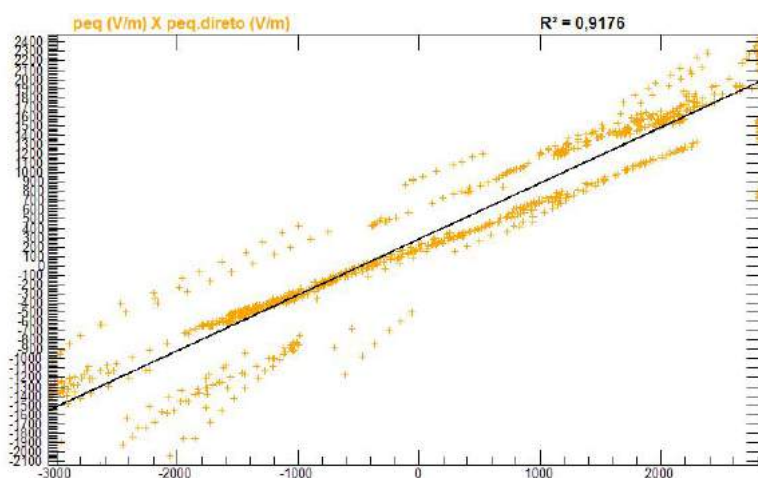


Figura 5.88 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor peq, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.11 Caso 234

Este evento ocorreu em 09 de janeiro de 2012 às 18:00:1. Foram utilizados 3598 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 3102 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $615,158 \text{ kW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.89.b (vista frontal), 5.89.c (vista superior) e 5.89.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.89.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com

valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 7250 m até 9250 m para o primeiro centro e de 9250 m até 12250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $24,625 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $55,25 \text{ km}^3$  para o segundo . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 59,615 C para o primeiro e -58,357 C para o segundo . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $2,42 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-1,057 \text{ nC/m}^3$  para o segundo

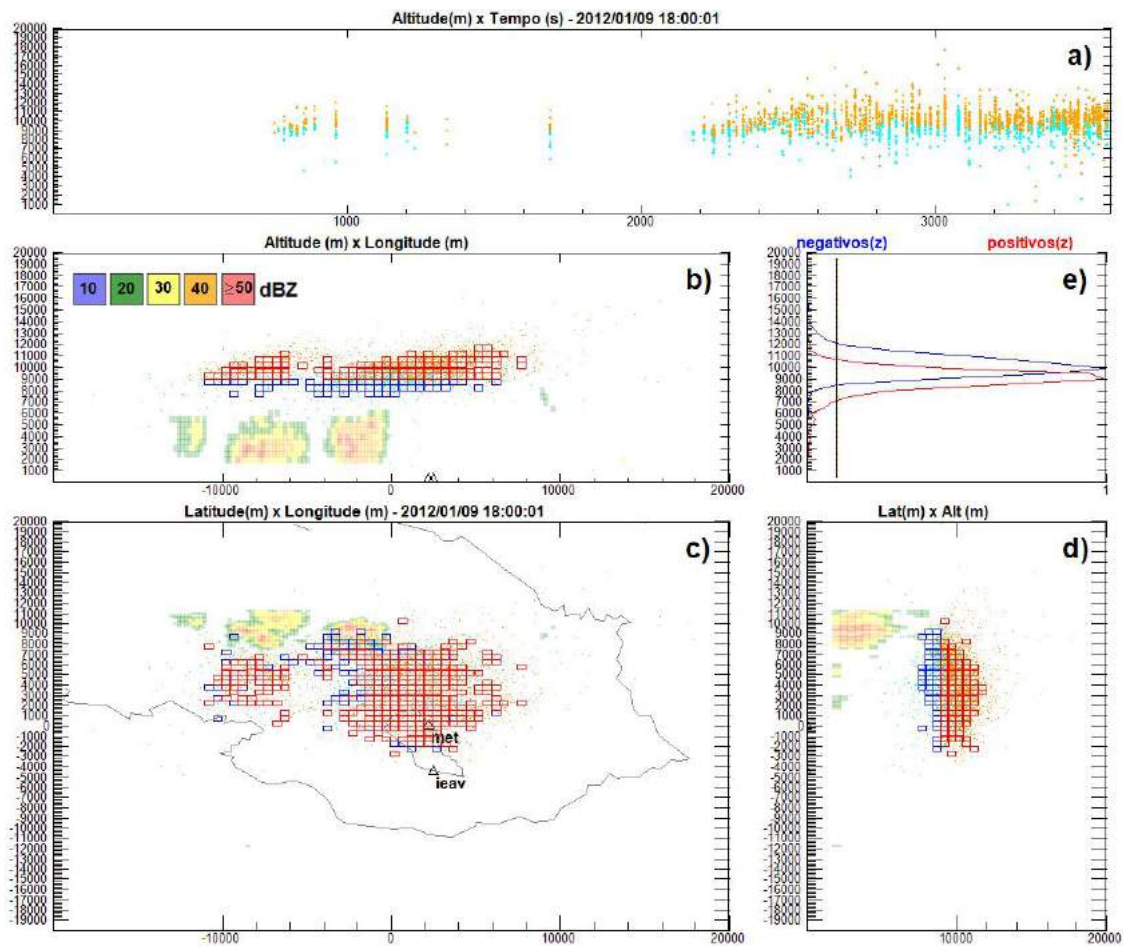


Figura 5.89 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.90.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.90.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.90.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.90.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

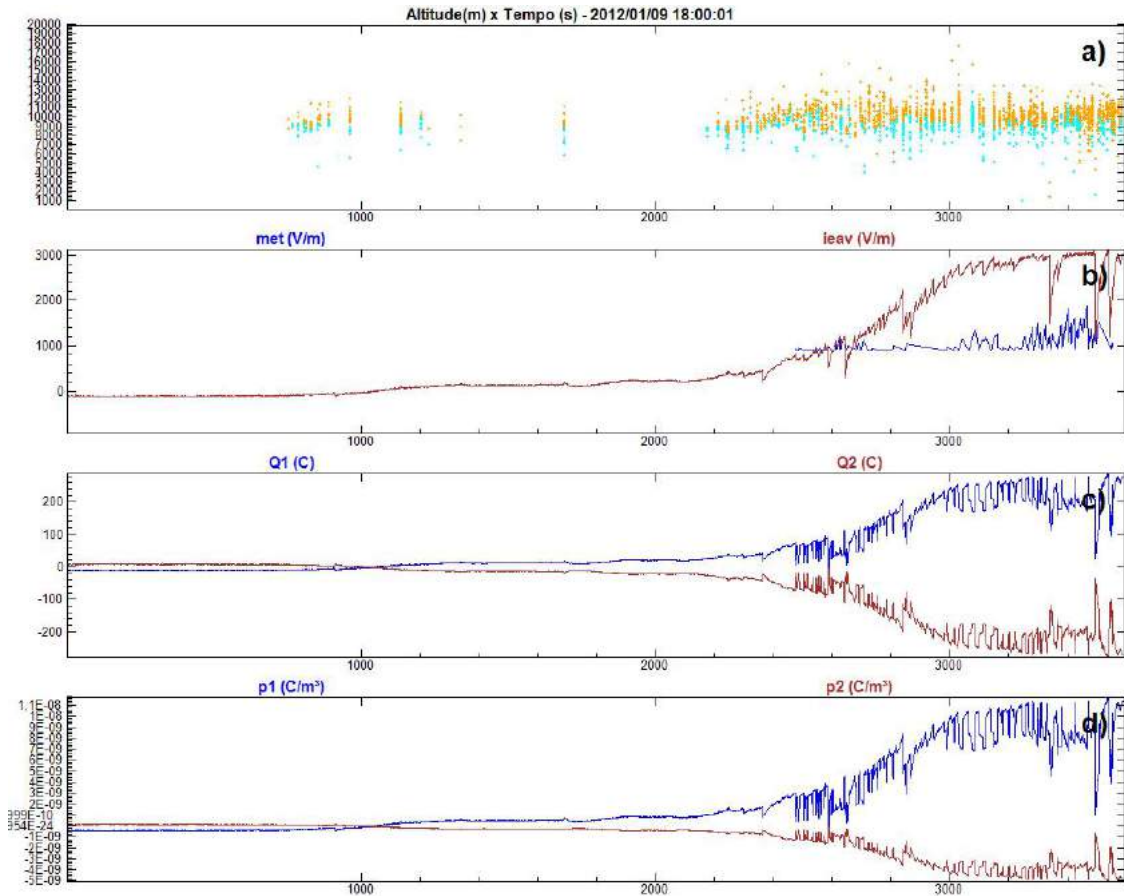


Figura 5.90 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.91.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.91.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.91.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

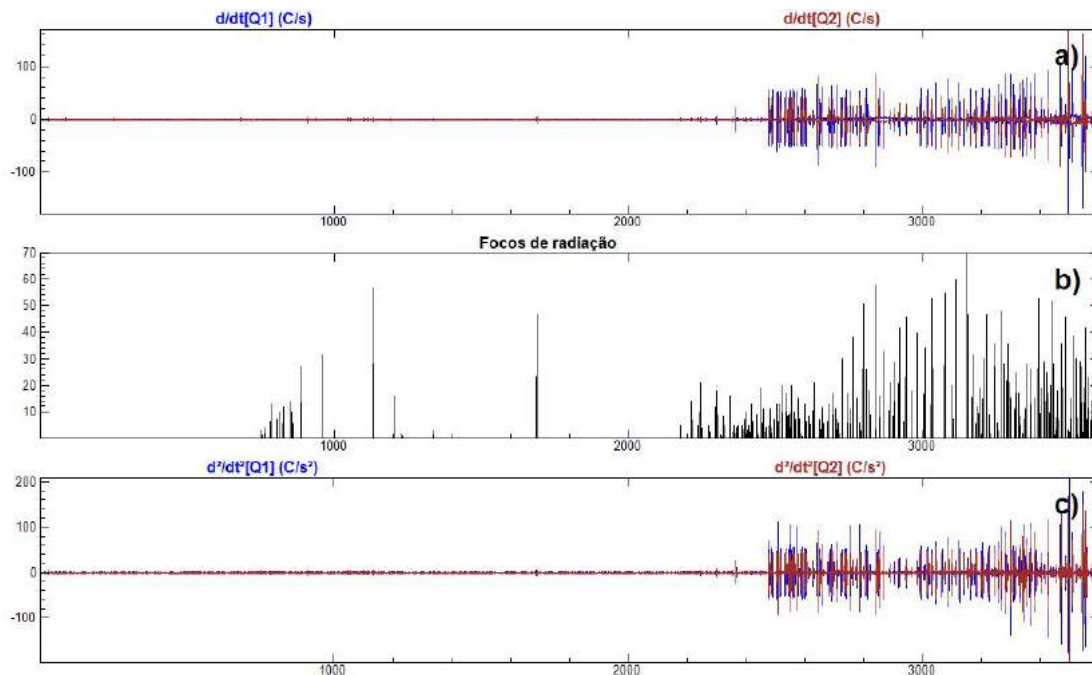


Figura 5.91 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

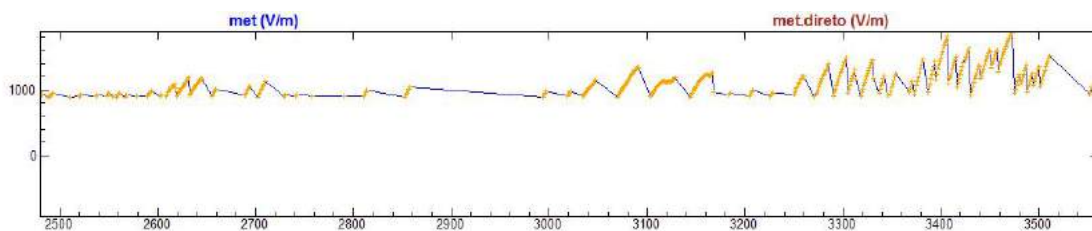


Figura 5.92 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor met, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

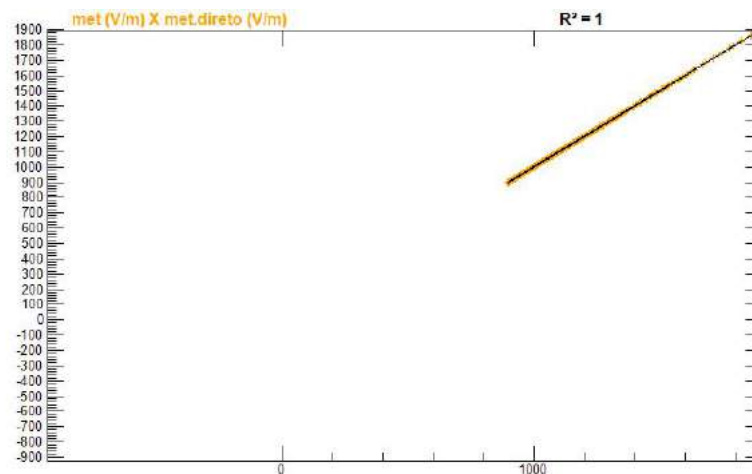


Figura 5.93 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor met, eixos vertical e horizontal em (V/m)

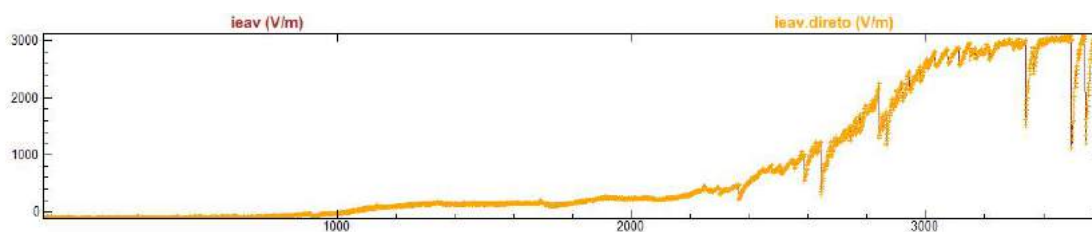


Figura 5.94 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

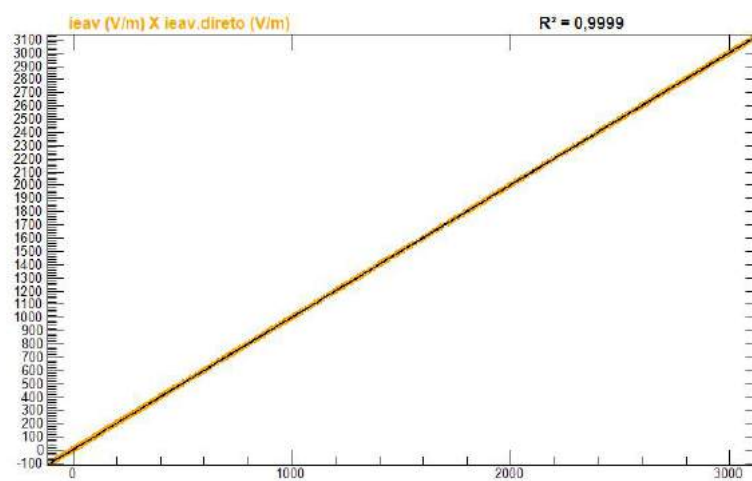


Figura 5.95 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.12 Caso 261

Este evento ocorreu em 13 de janeiro de 2012 às 17:52:35. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia um sensor de campo elétrico ativo registrando valores acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 2633 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $4,835 \text{ GW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.96.b (vista frontal), 5.96.c (vista superior) e 5.96.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.96.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6750 m até 9250 m para o primeiro centro e de 9250 m até 12750 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $76 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $132,125 \text{ km}^3$  para o segundo . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-1,492 \text{ C}$  para o primeiro e  $-1,505 \text{ C}$  para o segundo . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-0,02 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-0,012 \text{ nC/m}^3$  para o segundo

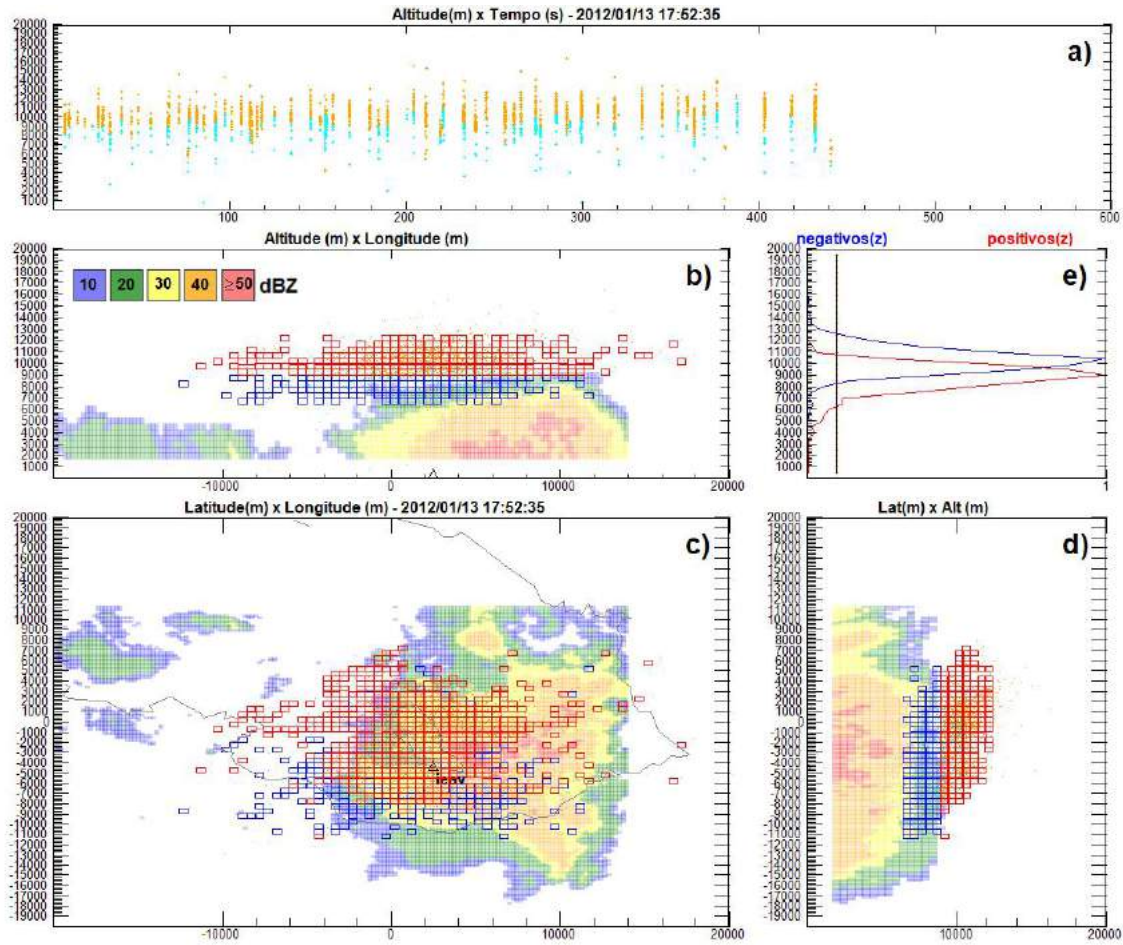


Figura 5.96 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.97.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.97.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.97.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.97.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

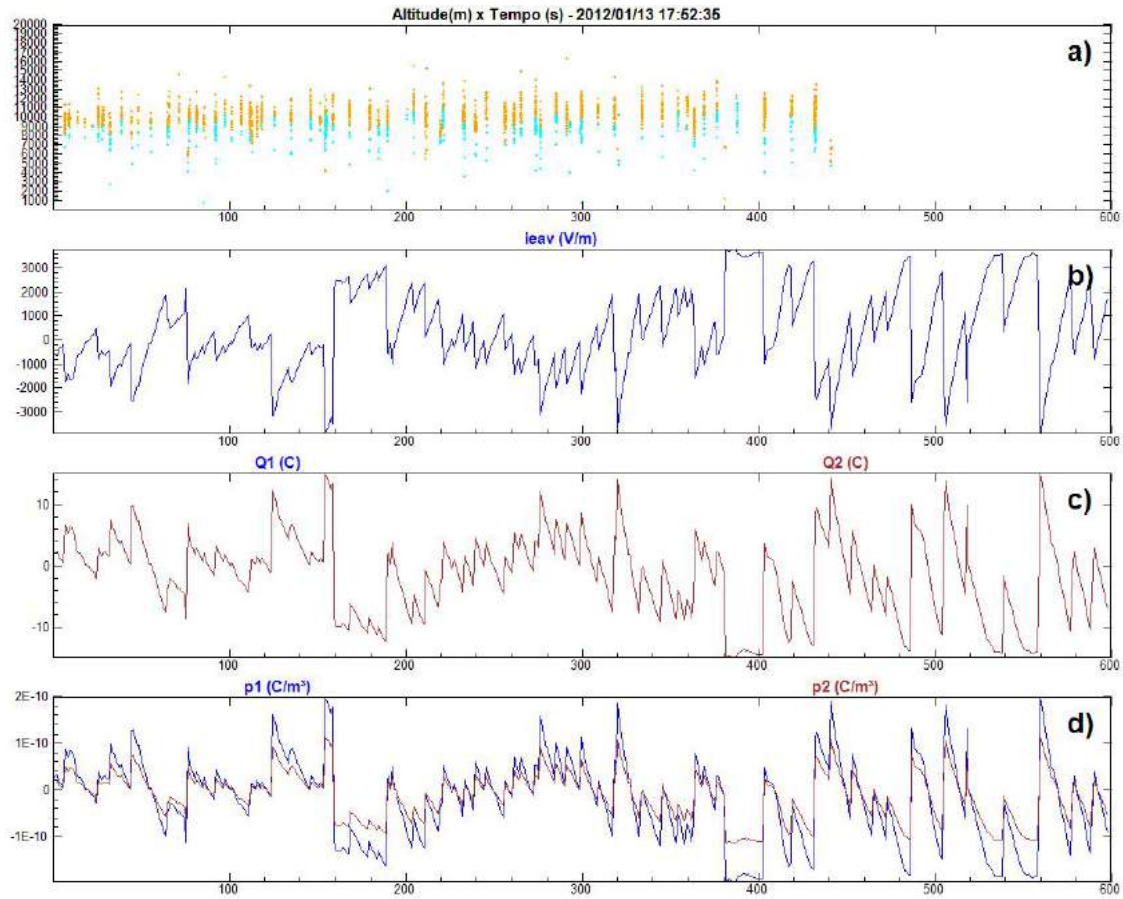


Figura 5.97 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.98.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.98.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.98.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

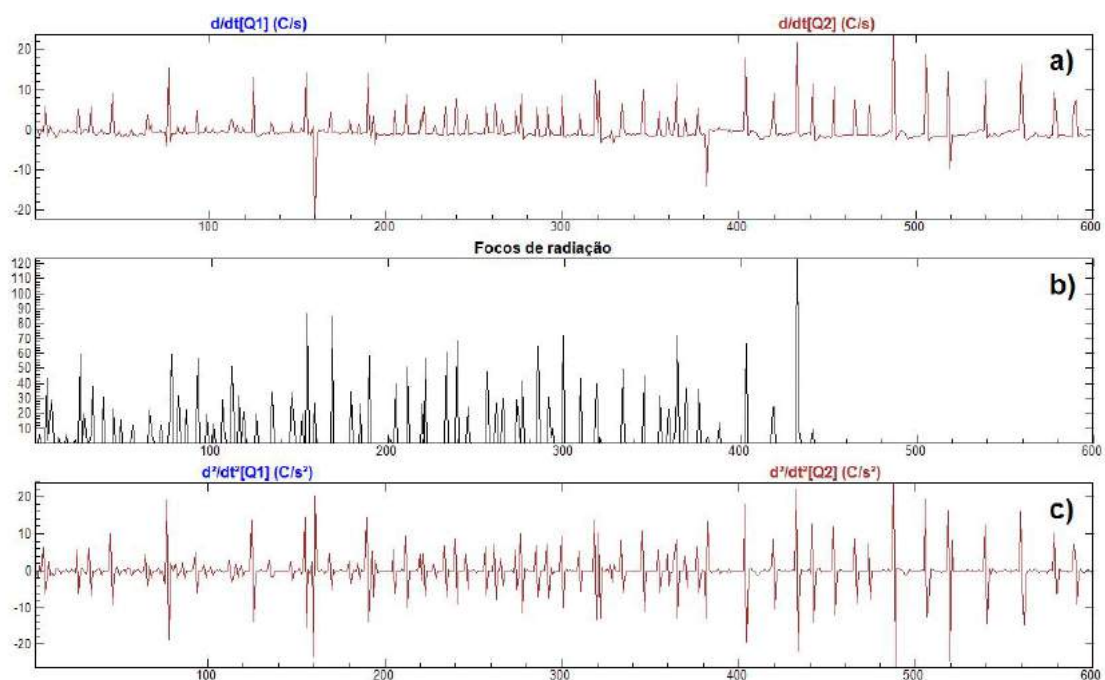


Figura 5.98 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

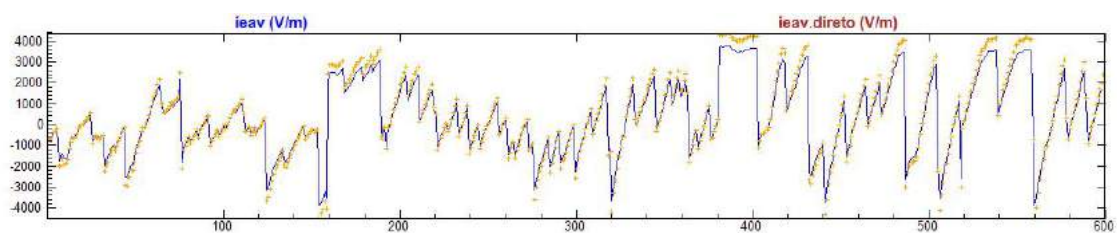


Figura 5.99 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor ieav, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

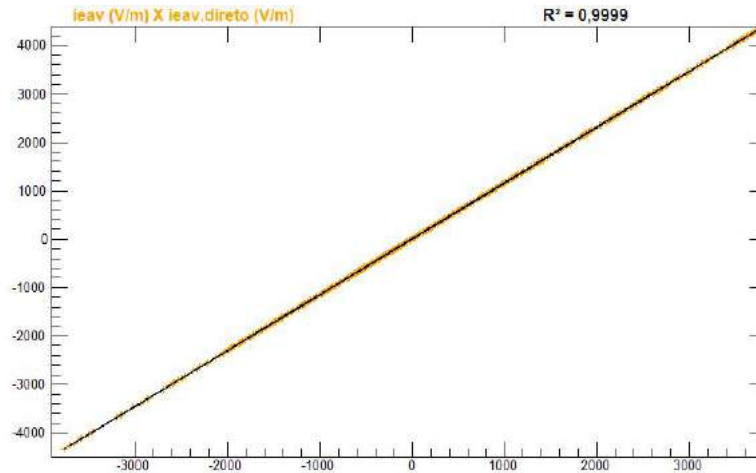


Figura 5.100 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor ieav, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ )

### 5.13 Caso 583

Este evento ocorreu em 03 de junho de 2014 às 23:41:28. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 V/m$ . Neste evento foram analisados 14044 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $11,15 MW$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 m$  e  $C = 0,12$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.101.b (vista frontal), 5.101.c (vista superior) e 5.101.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.101.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi quadripolar. As alturas encontradas foram: de 2750 m até 4250 m para o primeiro centro, de 4250 m até 5250 m para o segundo centro, de 5750 m até 6750 m para o terceiro centro e de 7750 m até 10750 m para o quarto centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $11,875 km^3$  para o primeiro,  $7,25 km^3$  para o segundo,  $21,875 km^3$  para o terceiro e  $90,125 km^3$  para o quarto. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-110,377 C$  para

o primeiro , 212,389 C para o segundo , -5,689 C para o terceiro e -117,011 C para o quarto . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-9,295 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $29,295 \text{ nC/m}^3$  para o segundo ,  $-0,261 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro e  $-1,299 \text{ nC/m}^3$  para o quarto

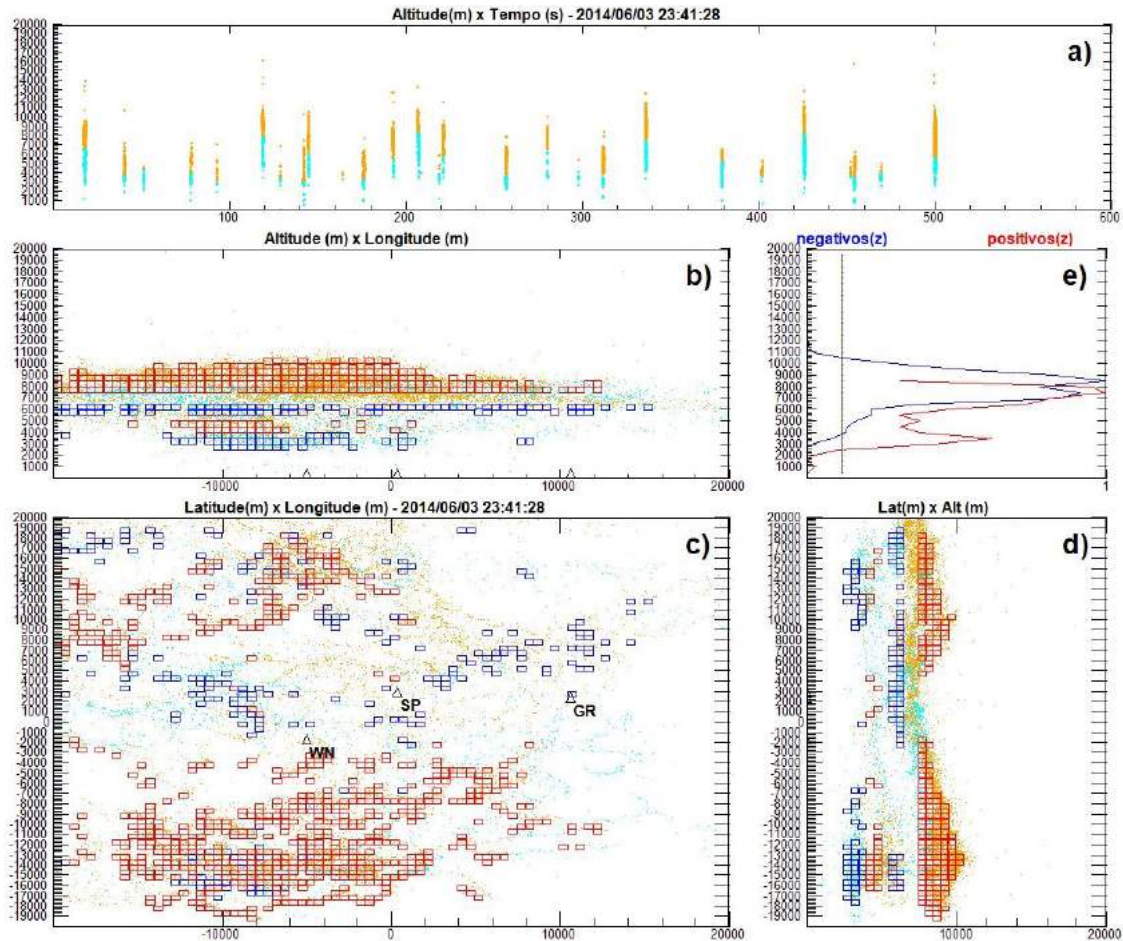


Figura 5.101 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.102.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.102.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.102.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.102.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

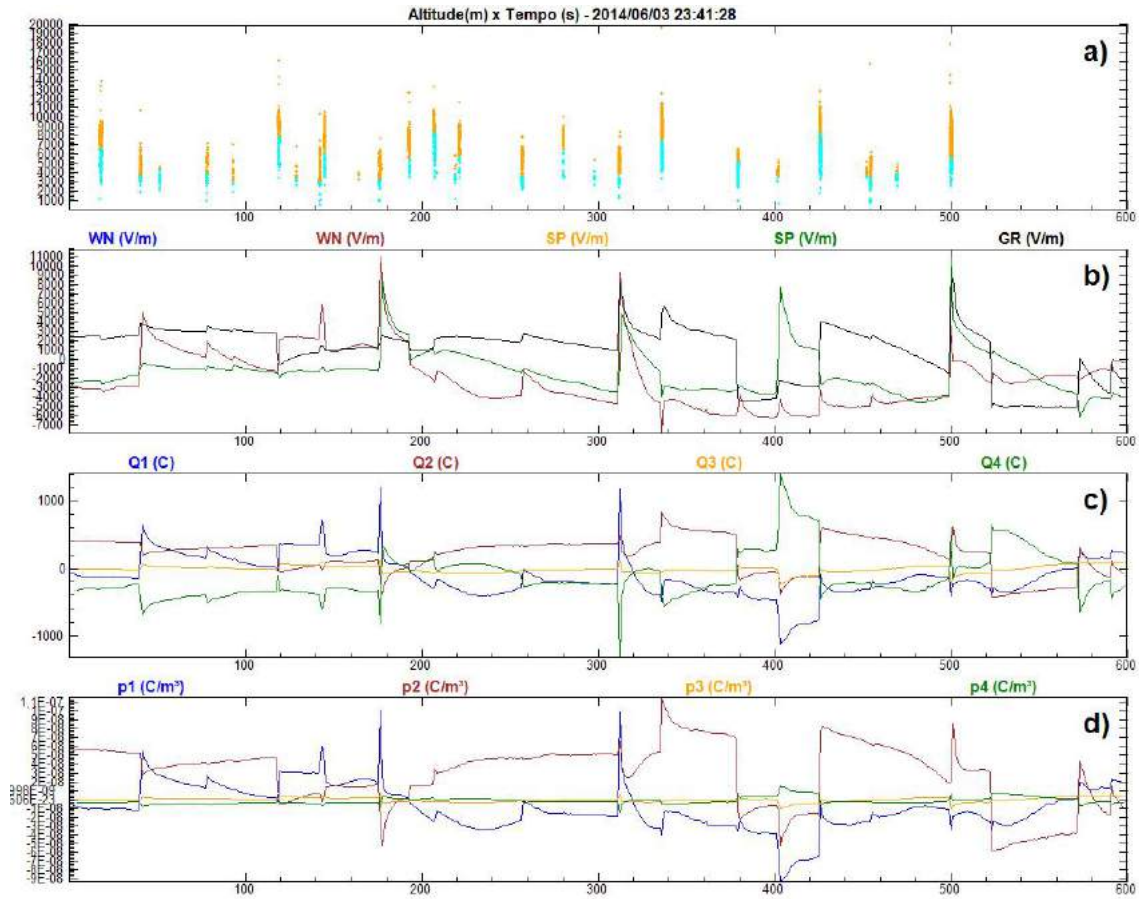


Figura 5.102 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.103.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.103.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.103.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

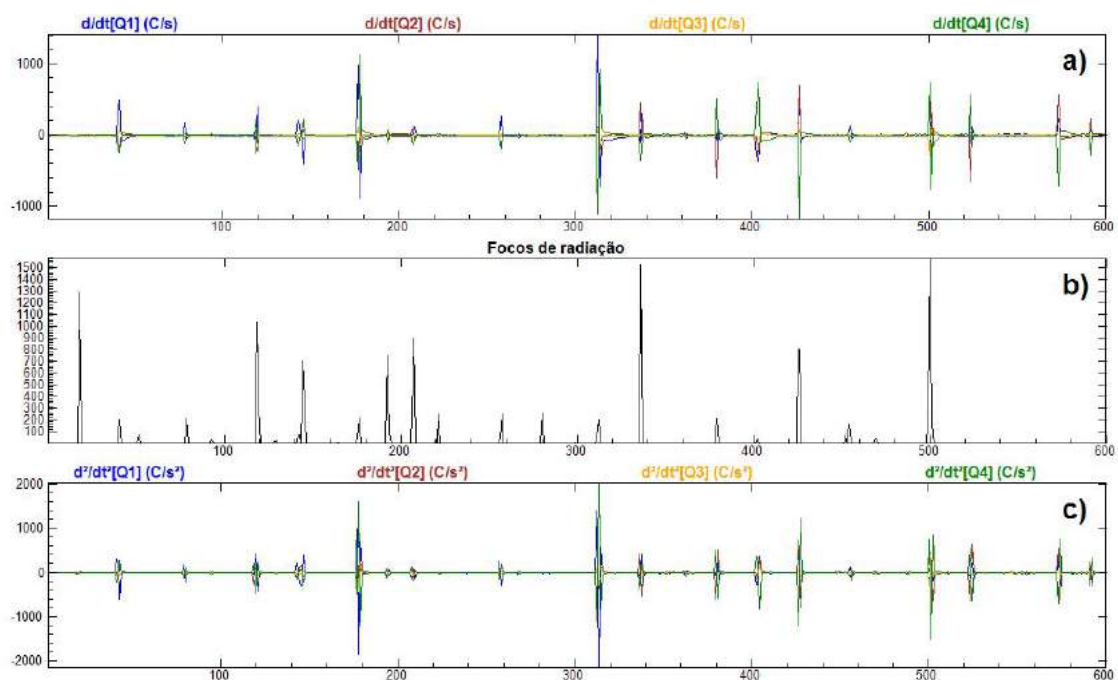


Figura 5.103 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

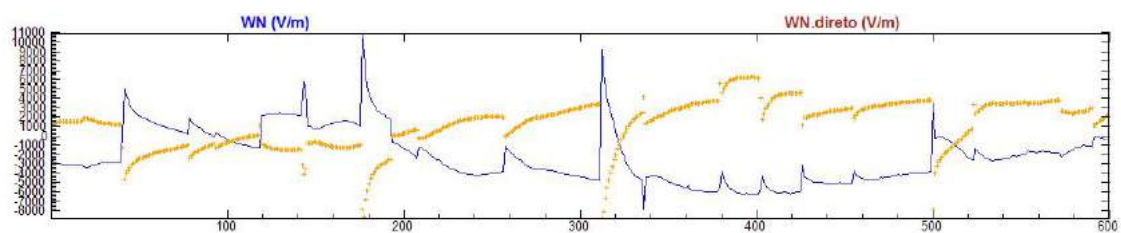


Figura 5.104 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

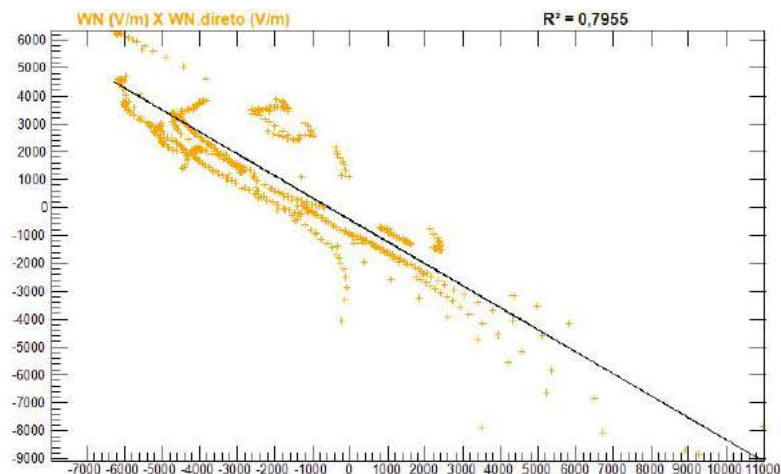


Figura 5.105 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

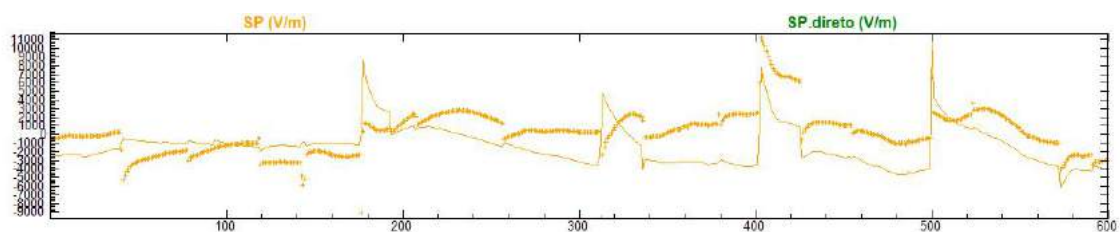


Figura 5.106 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

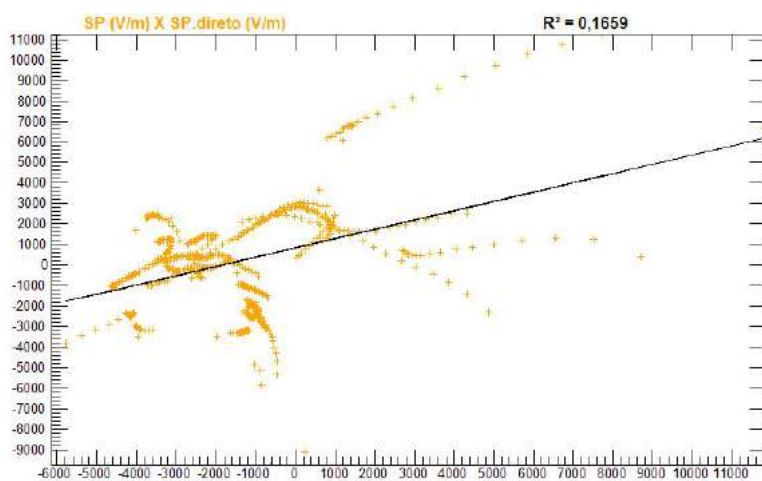


Figura 5.107 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

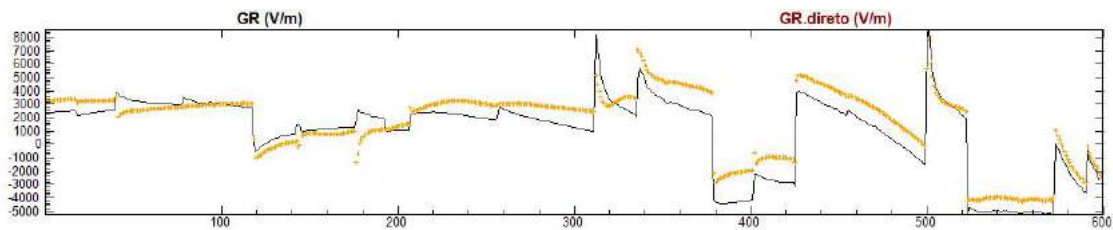


Figura 5.108 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

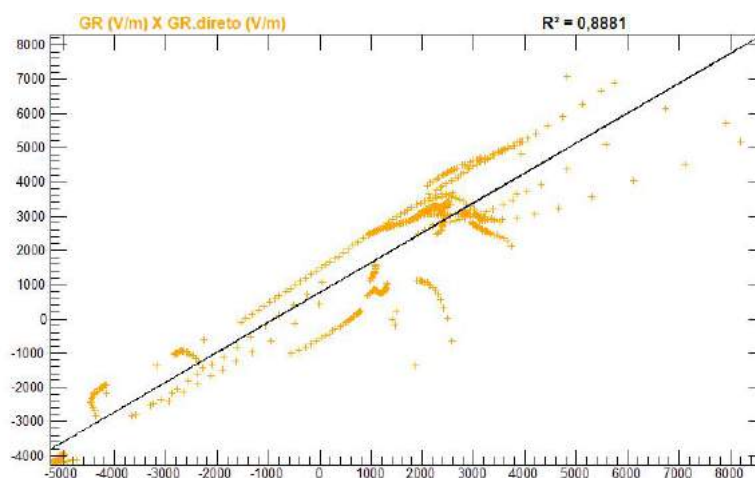


Figura 5.109 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em (V/m)

#### 5.14 Caso 612

Este evento ocorreu em 06 de junho de 2014 às 07:50:1. Foram utilizados 587 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de 1000 V/m. Neste evento foram analisados 11286 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 314,621 kW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500$  m e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.110.b (vista frontal), 5.110.c (vista superior) e 5.110.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.110.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respecti-

vamente, com valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 3250 m até 4750 m para o primeiro centro e de 4750 m até 8750 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $85,125 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $37,375 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 3,304 C para o primeiro e -10,957 C para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $0,038 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-0,294 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

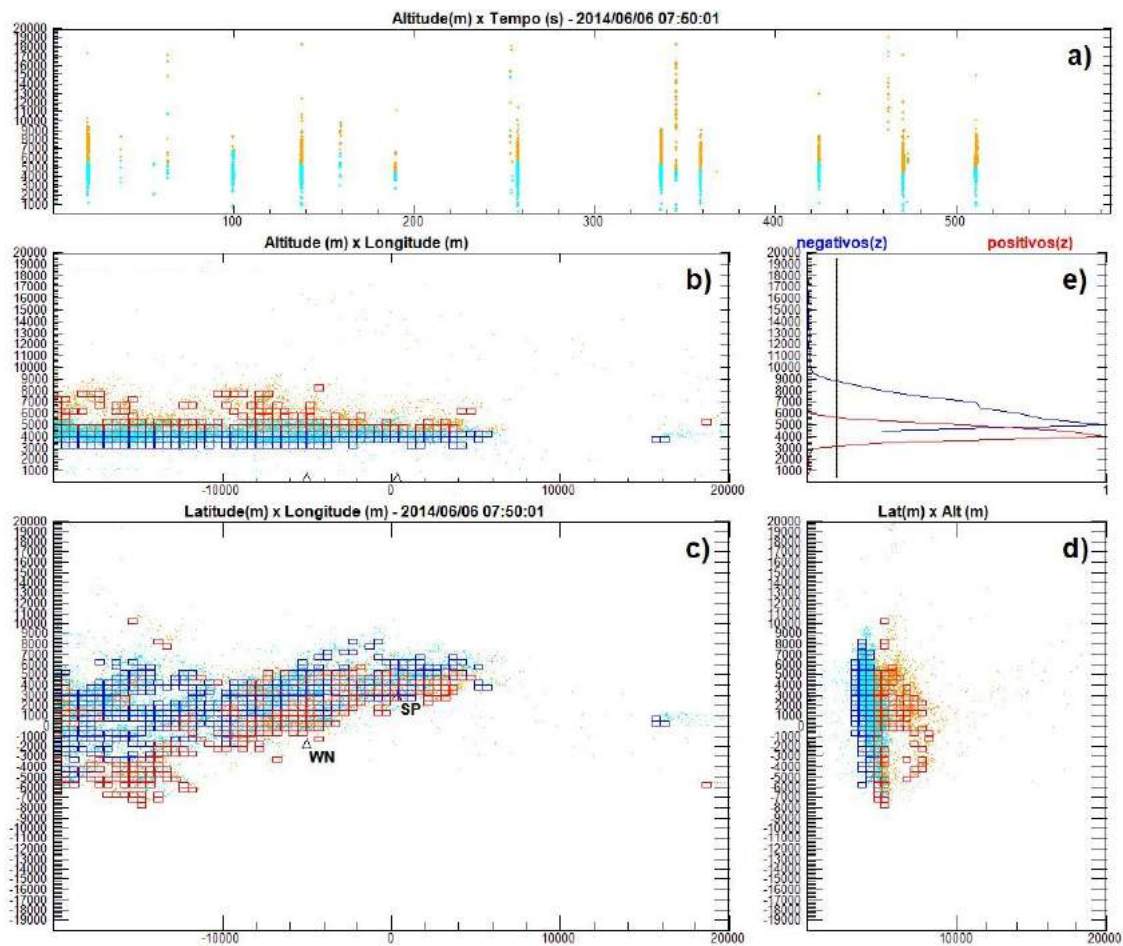


Figura 5.110 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.111.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.111.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.111.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.111.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

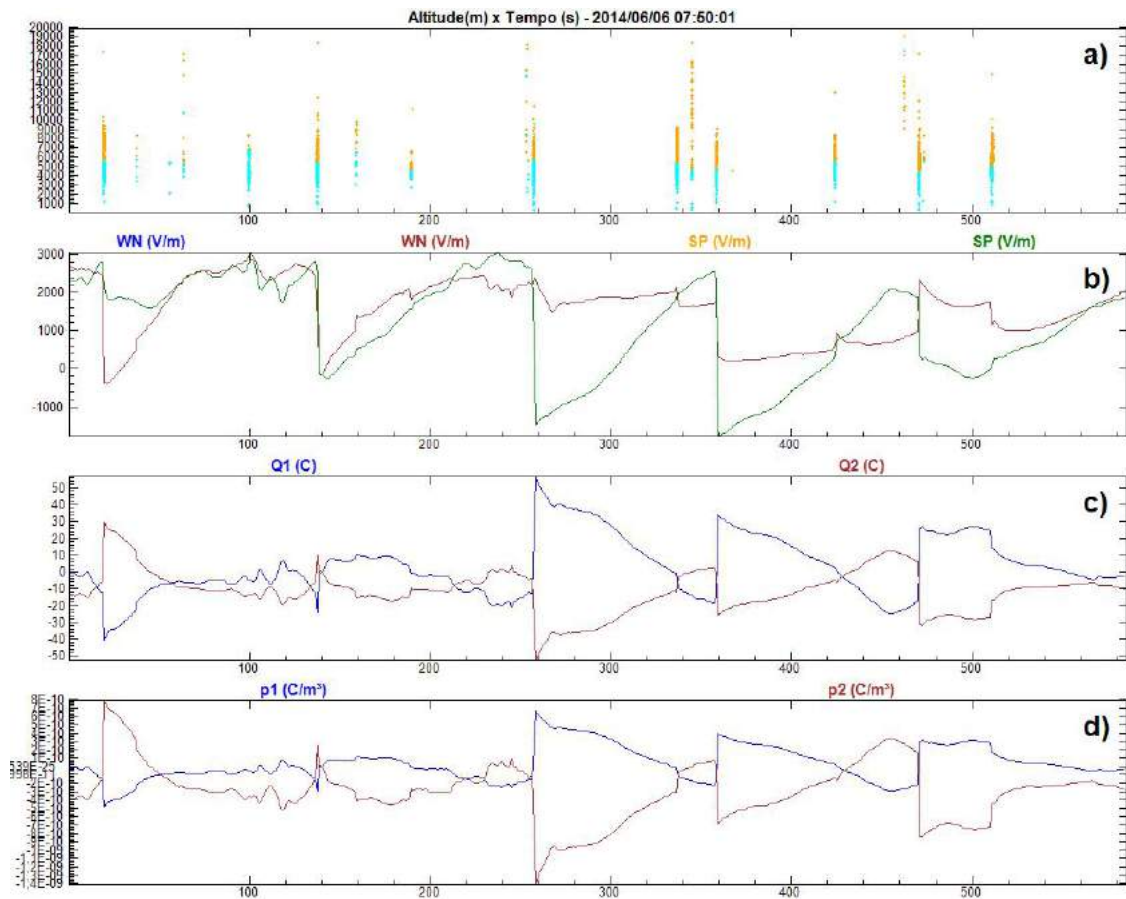


Figura 5.111 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.112.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.112.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.112.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s^2)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

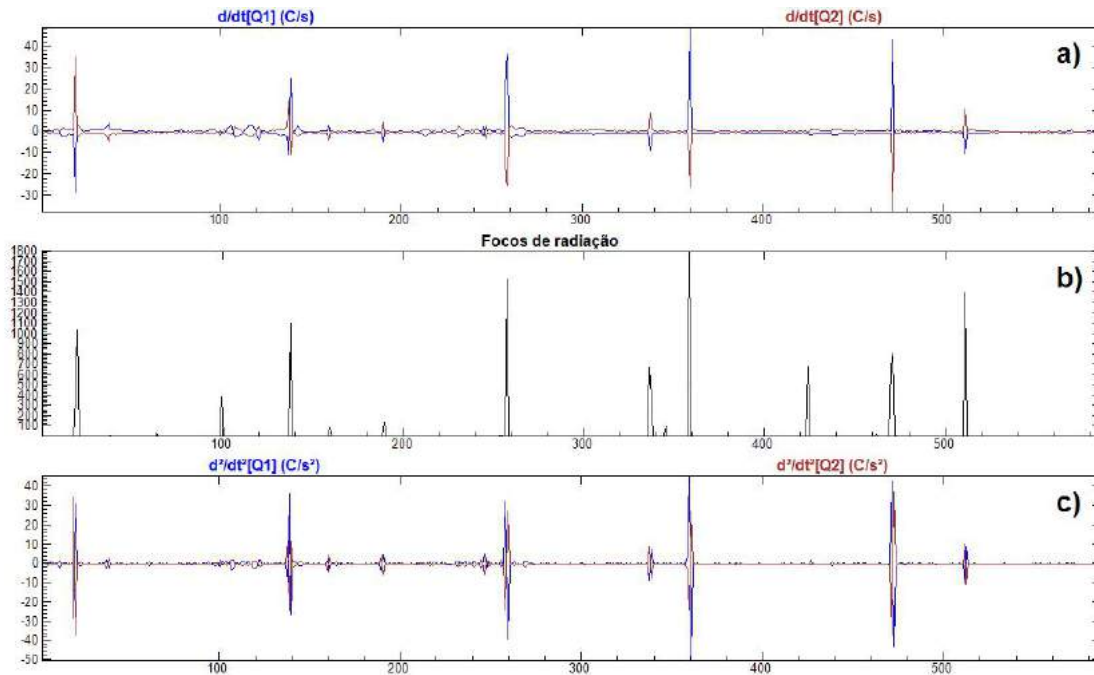


Figura 5.112 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga (C/s), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

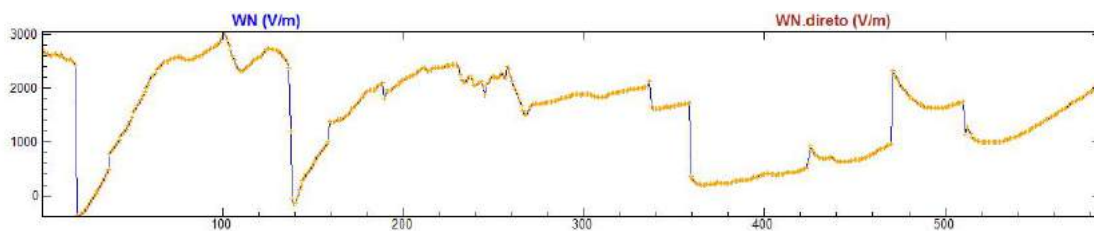


Figura 5.113 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

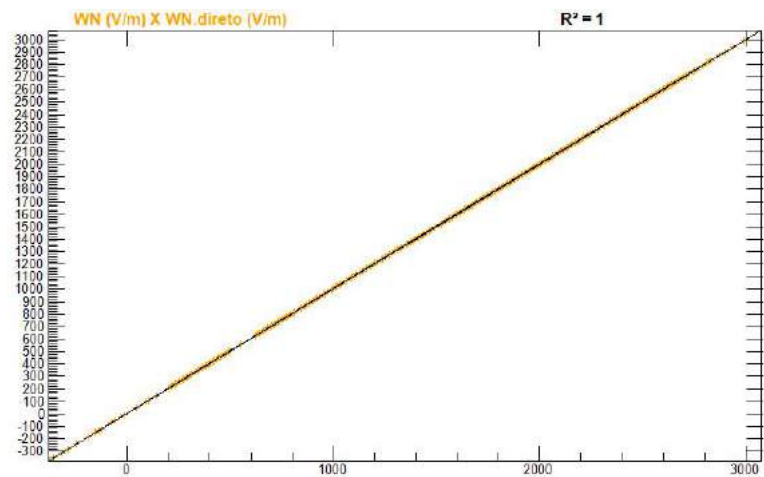


Figura 5.114 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

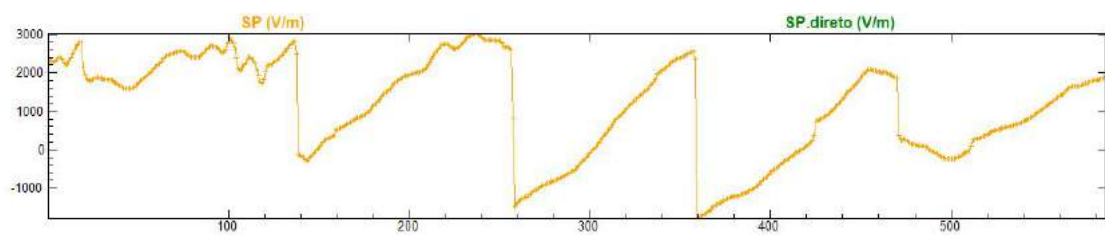


Figura 5.115 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

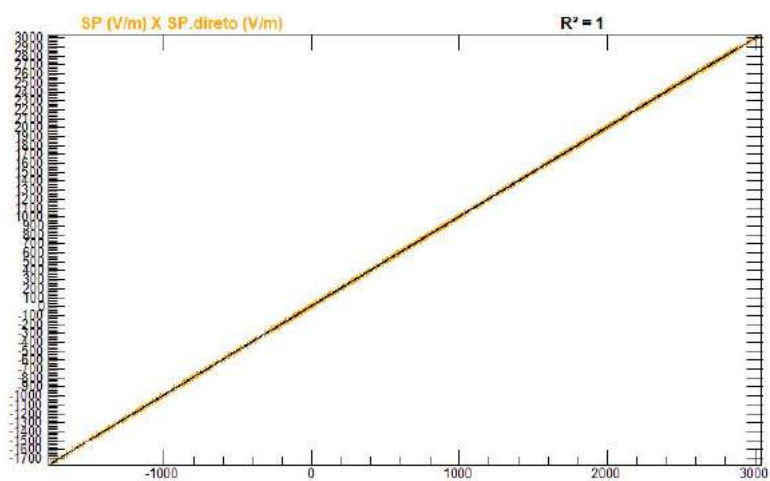


Figura 5.116 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.15 Caso 631

Este evento ocorreu em 11 de junho de 2014 às 02:10:0. Foram utilizados 600 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 46340 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $22,534 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.117.b (vista frontal), 5.117.c (vista superior) e 5.117.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.117.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 2750 m até 4250 m para o primeiro centro, de 4250 m até 7750 m para o segundo centro e de 7750 m até 11250 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $10,25 \text{ km}^3$  para o primeiro ,  $90,125 \text{ km}^3$  para o segundo e  $182,75 \text{ km}^3$  para o terceiro . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $16,524 \text{ C}$  para o primeiro ,  $79,86 \text{ C}$  para o segundo e  $-92,304 \text{ C}$  para o terceiro . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $1,612 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $0,886 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $-0,506 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

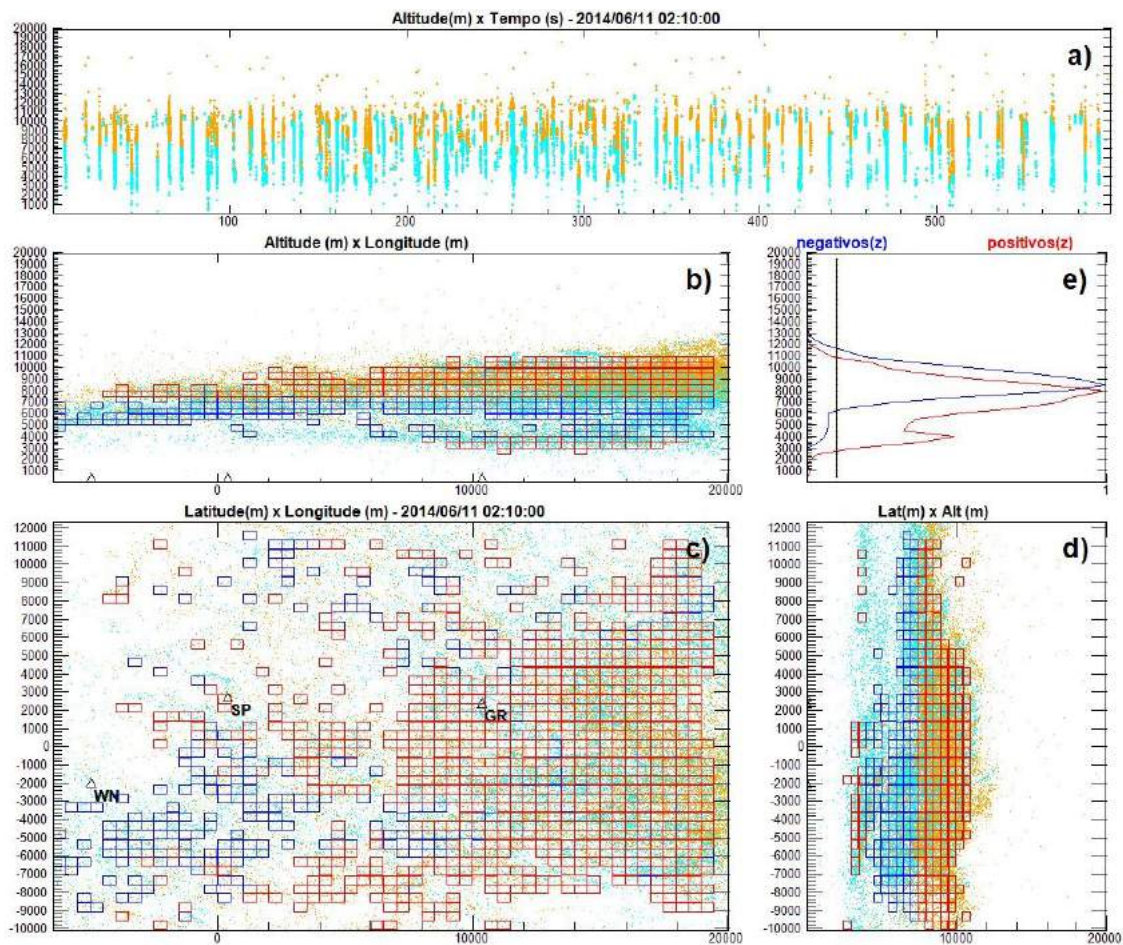


Figura 5.117 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.118.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.118.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.118.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.118.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

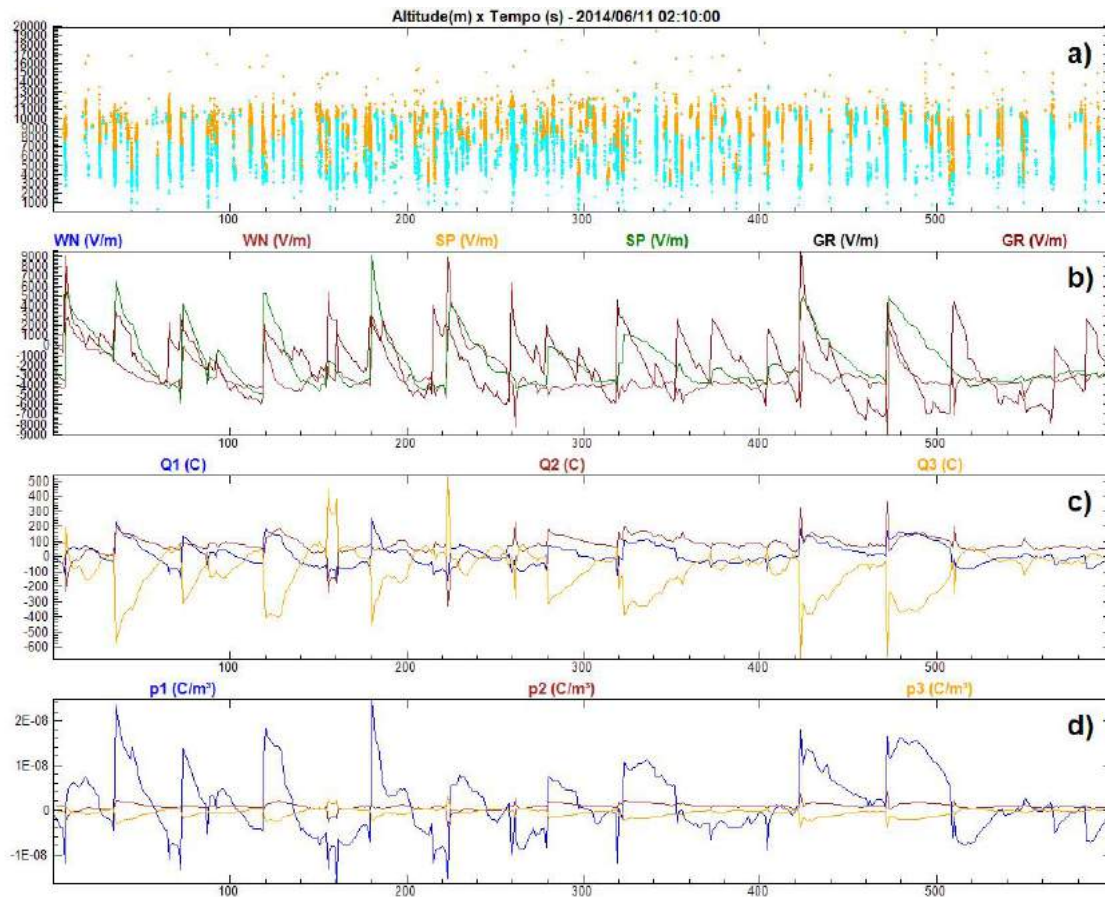


Figura 5.118 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.119.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.119.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.119.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

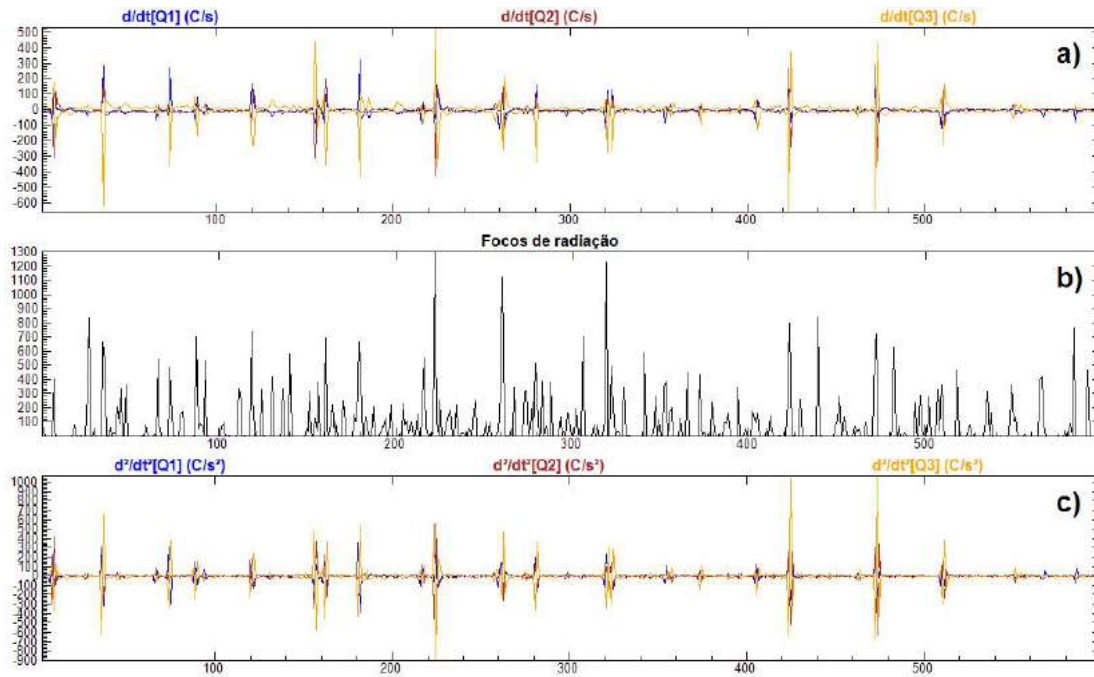


Figura 5.119 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

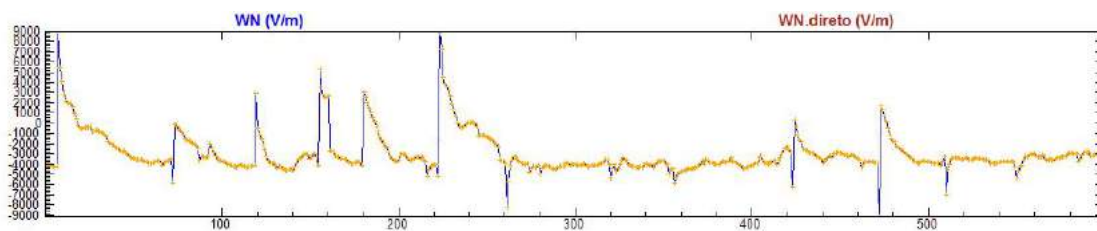


Figura 5.120 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

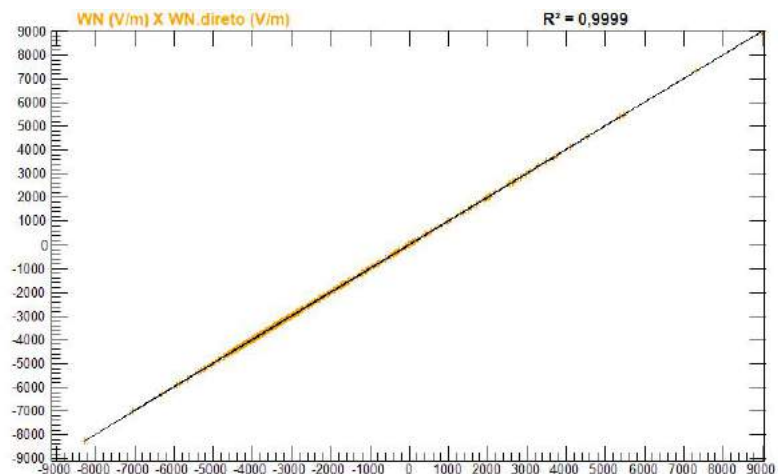


Figura 5.121 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

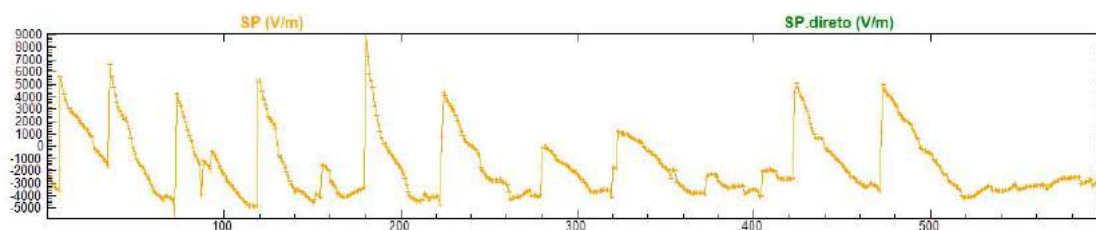


Figura 5.122 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

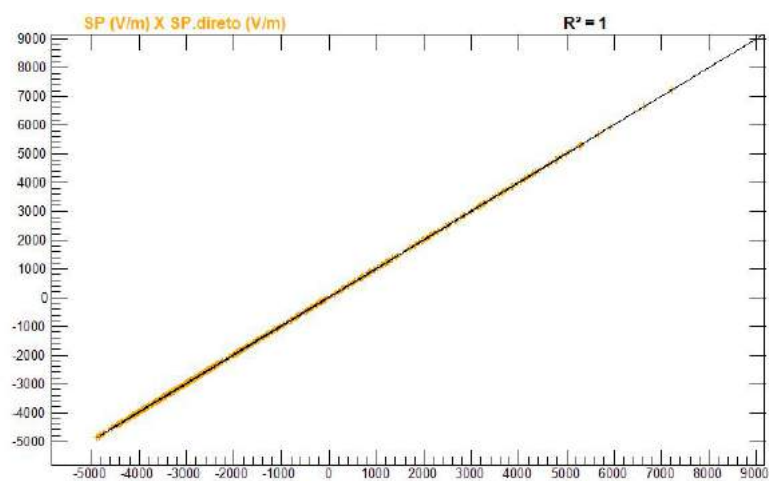


Figura 5.123 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

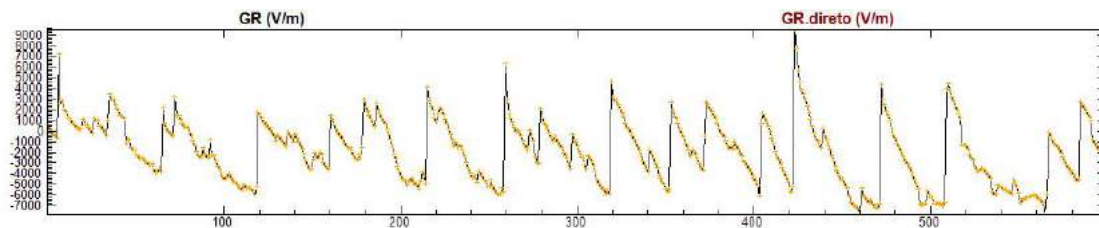


Figura 5.124 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

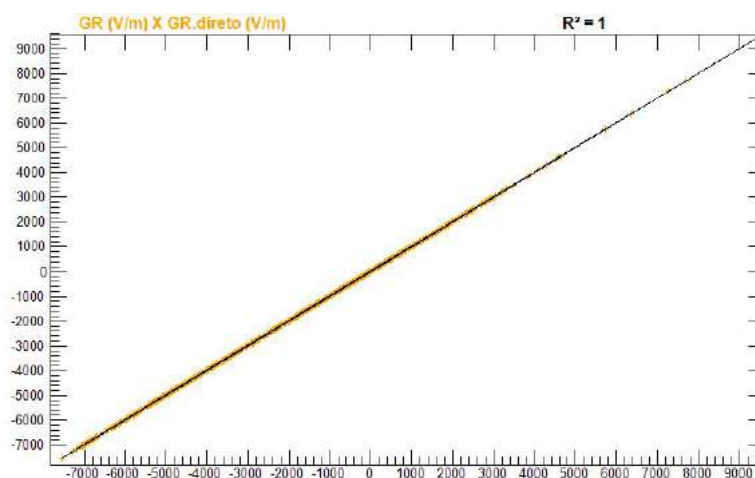


Figura 5.125 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.16 Caso 705

Este evento ocorreu em 17 de junho de 2014 às 00:48:3. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 260277 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $7,996 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.126.b (vista frontal), 5.126.c (vista superior) e 5.126.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.126.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respecti-

vamente, com valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 4250 m até 7750 m para o primeiro centro, de 7750 m até 8750 m para o segundo centro e de 8750 m até 12750 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $146,25 \text{ km}^3$  para o primeiro,  $95 \text{ km}^3$  para o segundo e  $103,875 \text{ km}^3$  para o terceiro. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 672,717 C para o primeiro, -1155,152 C para o segundo e 278,337 C para o terceiro. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $4,599 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro,  $-12,16 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $2,679 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro.

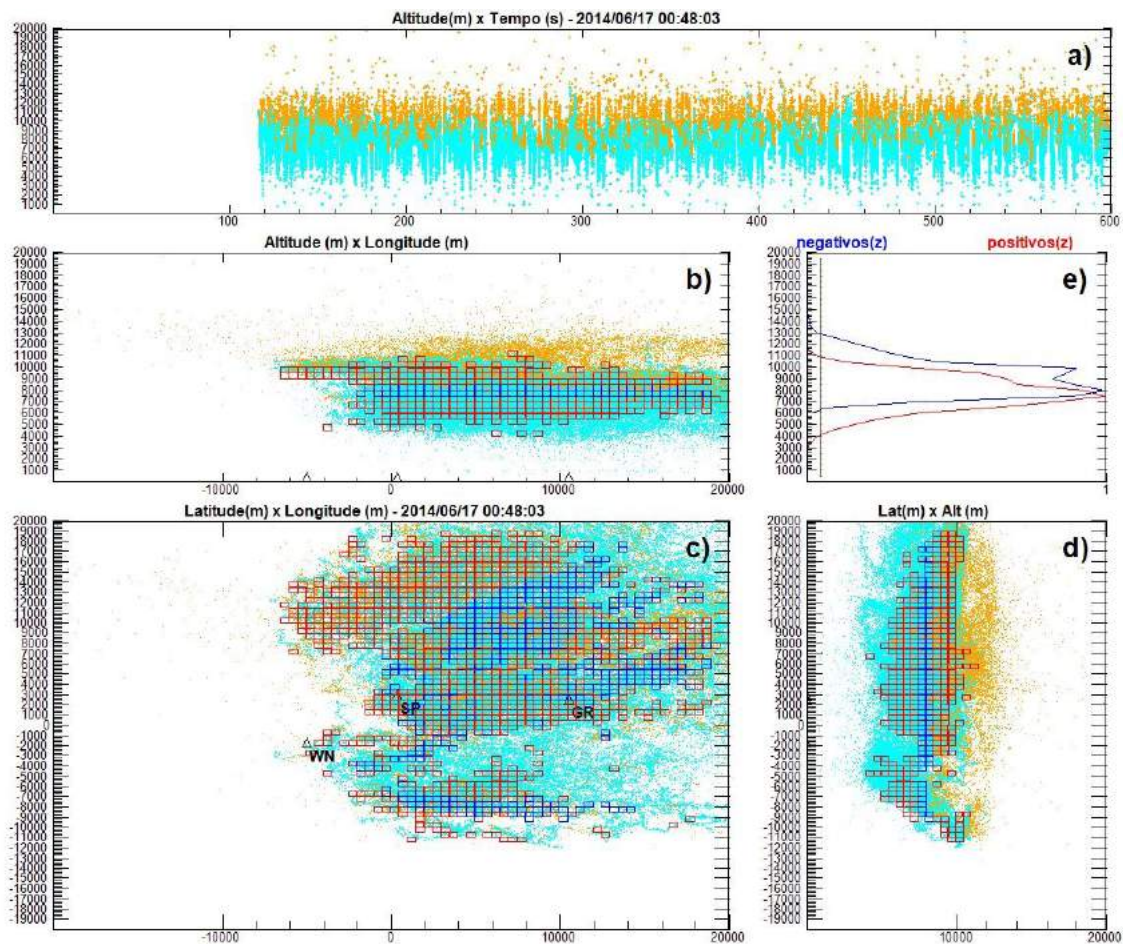


Figura 5.126 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.127.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.127.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.127.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.127.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

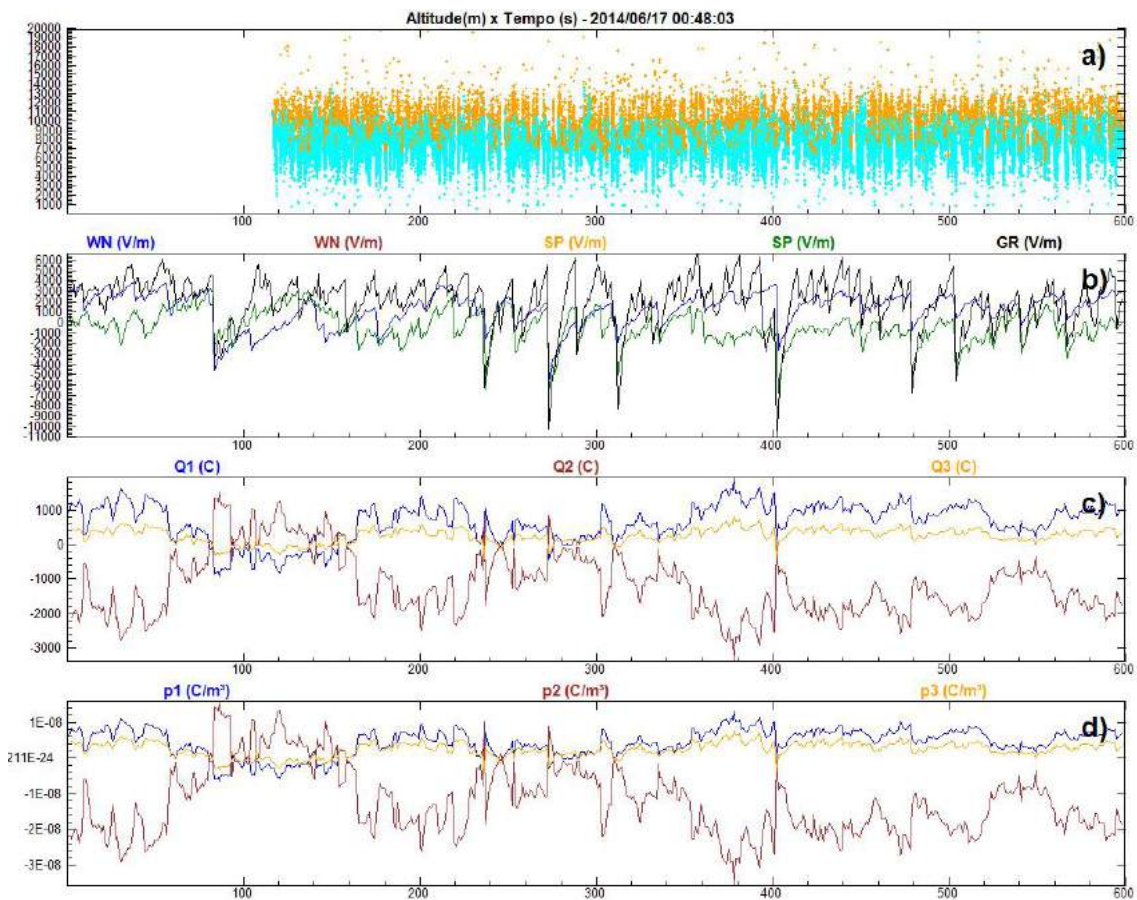


Figura 5.127 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.128.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.128.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.128.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em

segundos, no eixo horizontal.

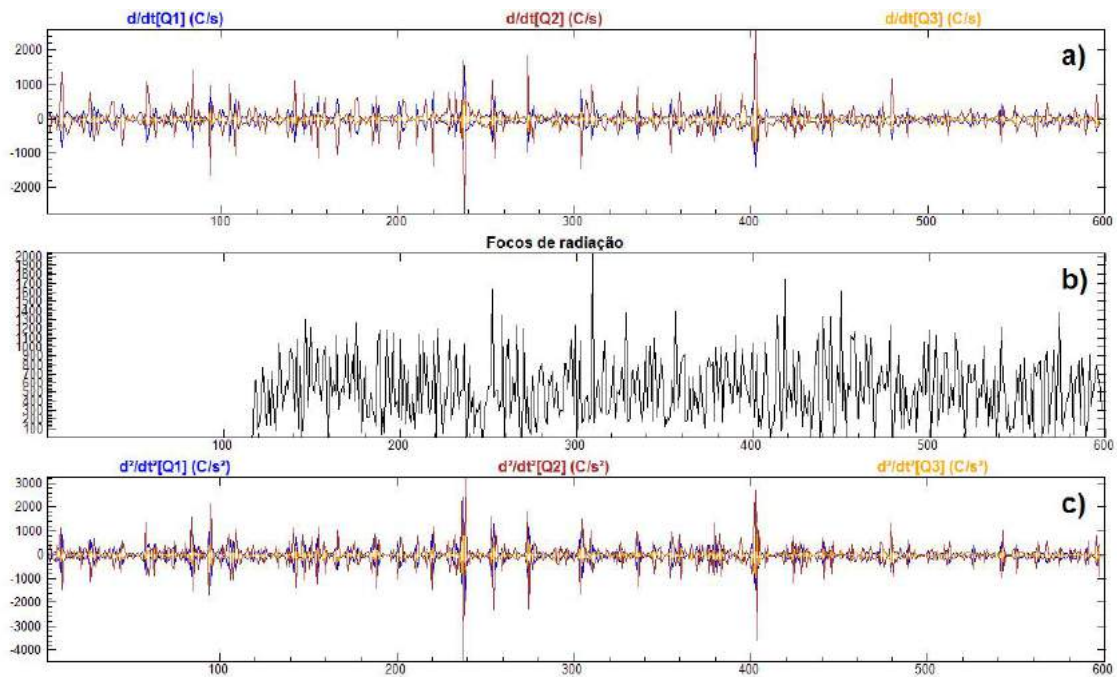


Figura 5.128 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

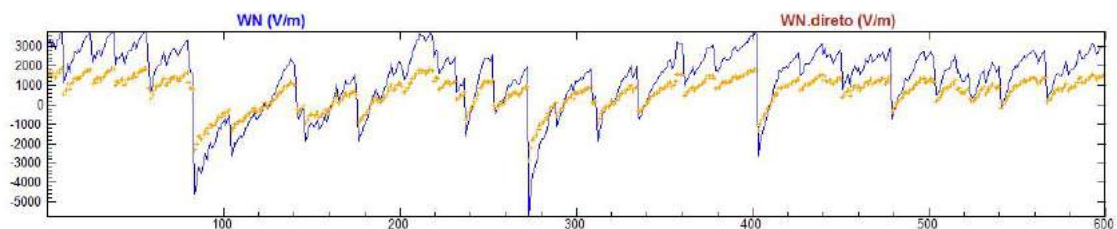


Figura 5.129 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

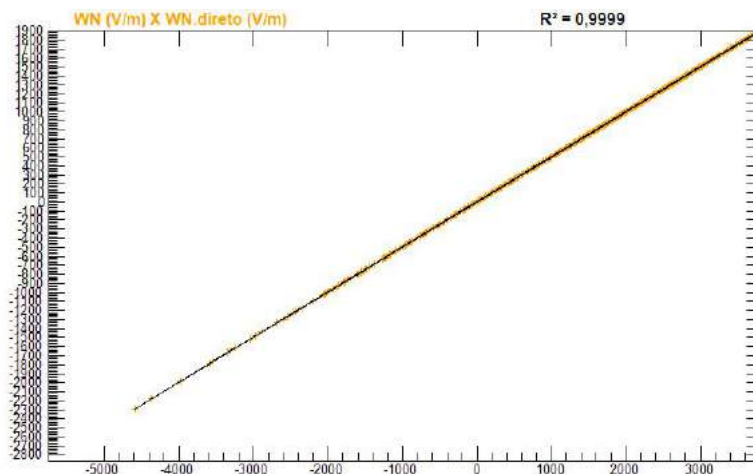


Figura 5.130 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

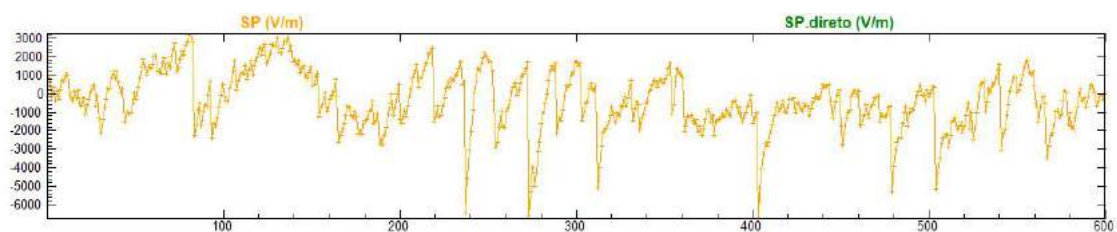


Figura 5.131 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

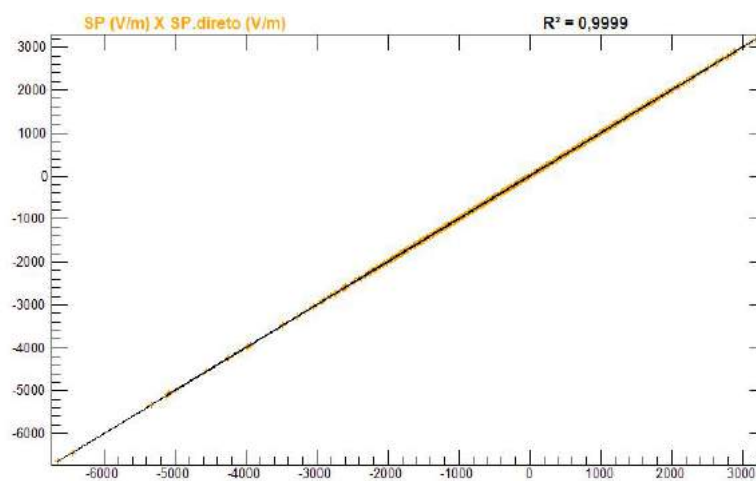


Figura 5.132 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

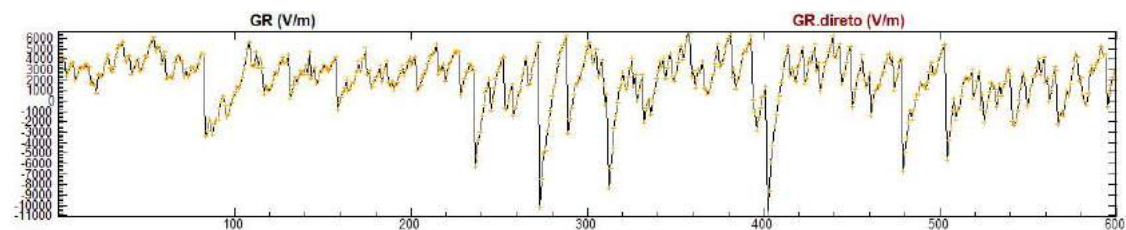


Figura 5.133 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

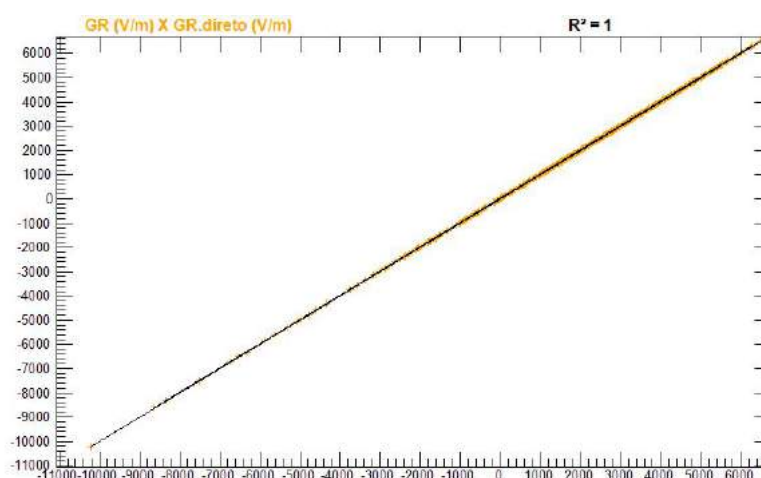


Figura 5.134 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.17 Caso 707

Este evento ocorreu em 17 de junho de 2014 às 00:53:1. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Haviam três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de 1000 V/m. Neste evento foram analisados 221963 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 7,996 MW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500$  m e  $C = 0,05$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.135.b (vista frontal), 5.135.c (vista superior) e 5.135.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.135.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respecti-

vamente, com valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 4250 m até 7250 m para o primeiro centro, de 7250 m até 8750 m para o segundo centro e de 8750 m até 12750 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $215,625 \text{ km}^3$  para o primeiro,  $255,375 \text{ km}^3$  para o segundo e  $221,125 \text{ km}^3$  para o terceiro. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 963,499 C para o primeiro, -1545,732 C para o segundo e 362,054 C para o terceiro. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $4,468 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro,  $-6,053 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $1,637 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro.

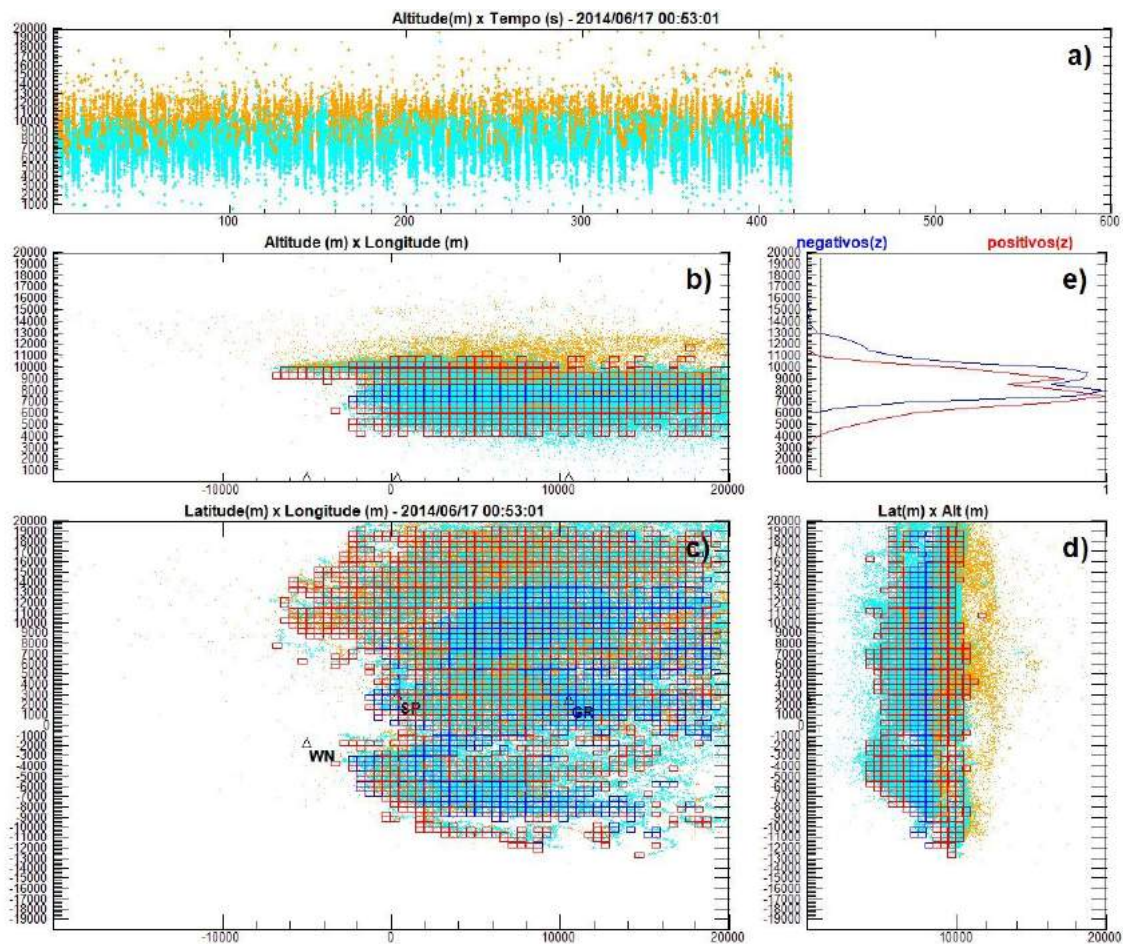


Figura 5.135 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.136.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.136.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.136.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.136.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

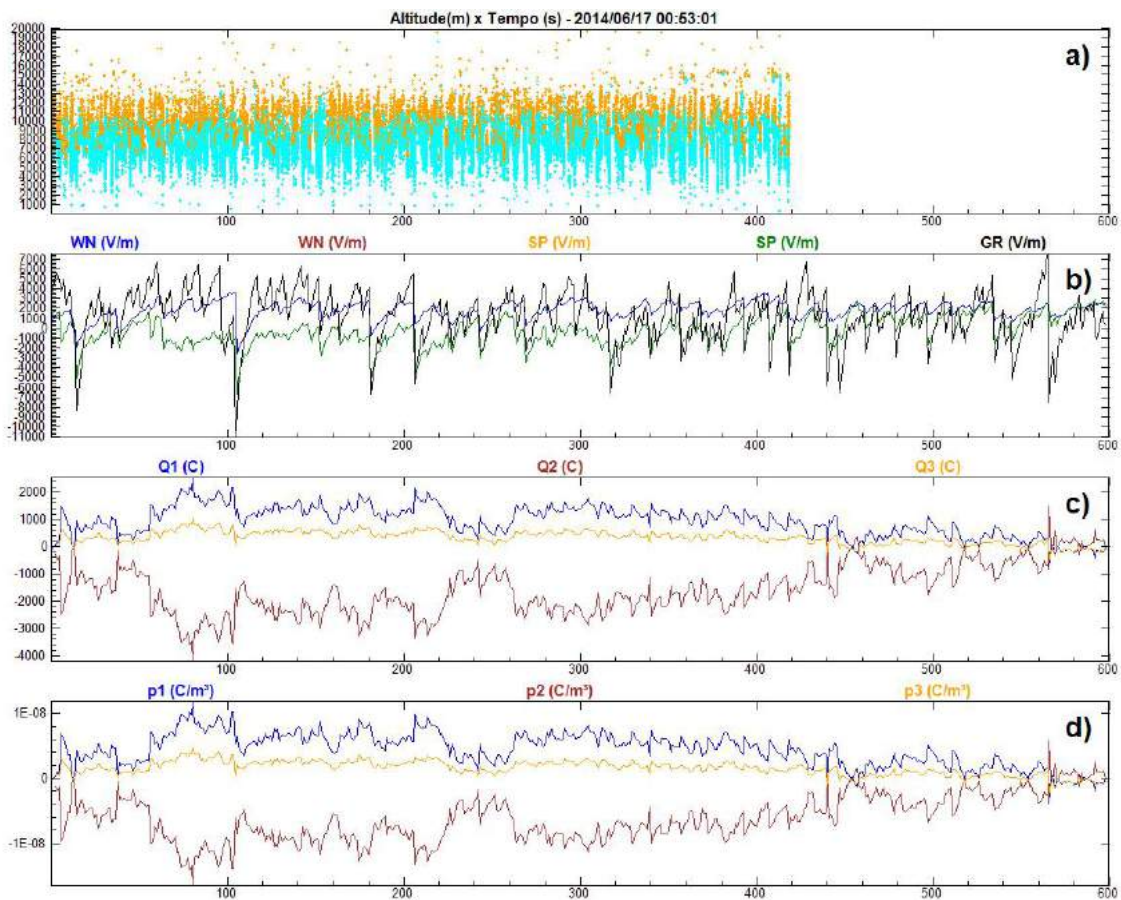


Figura 5.136 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.137.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.137.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.137.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em

segundos, no eixo horizontal.

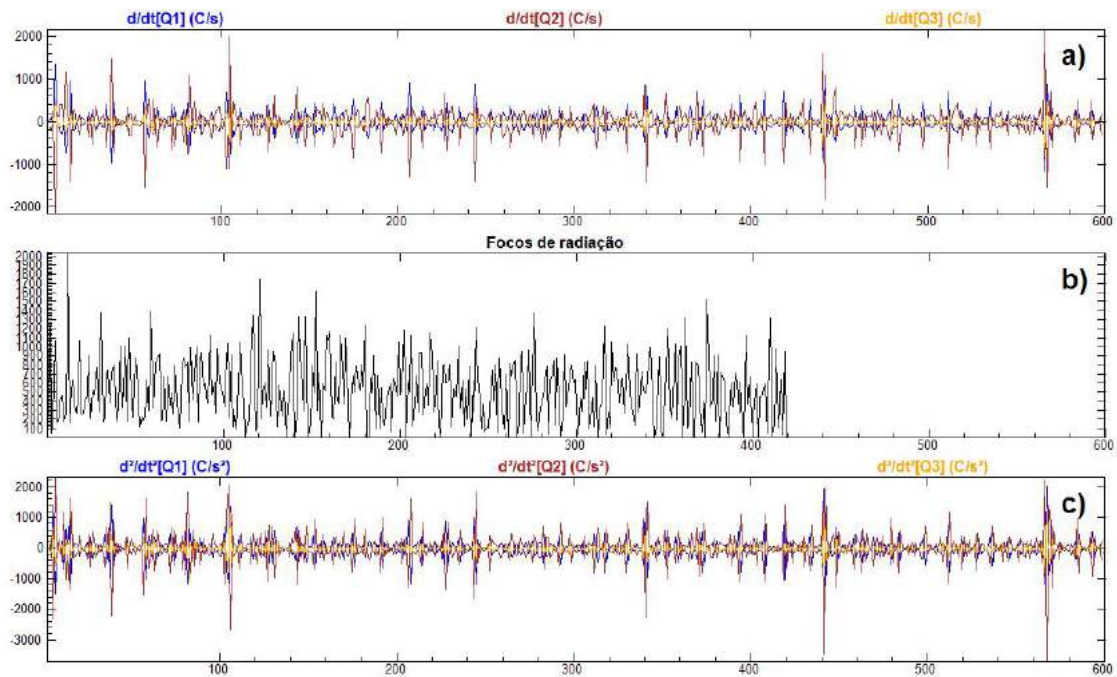


Figura 5.137 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

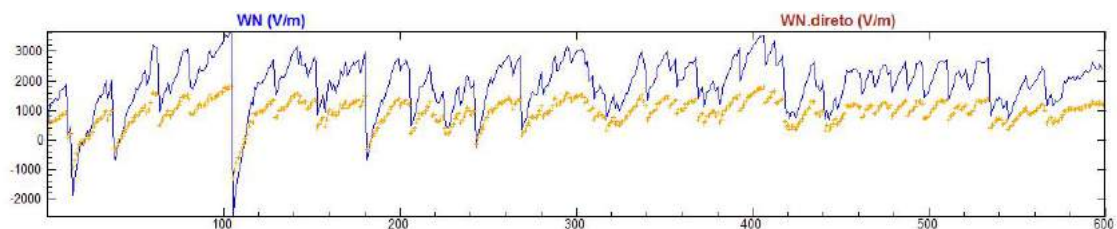


Figura 5.138 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

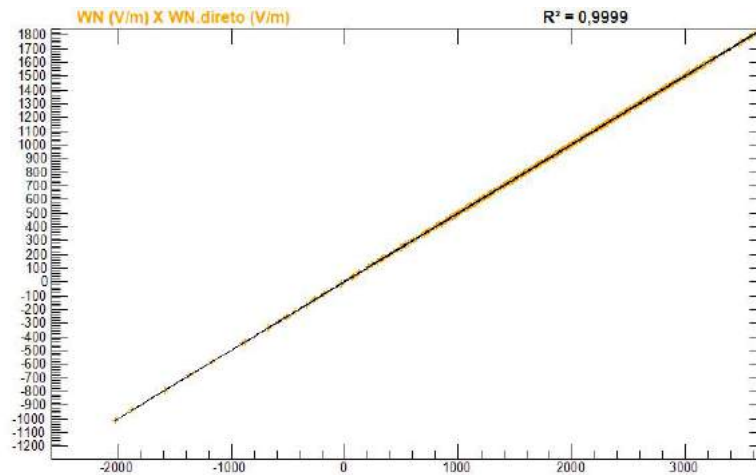


Figura 5.139 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

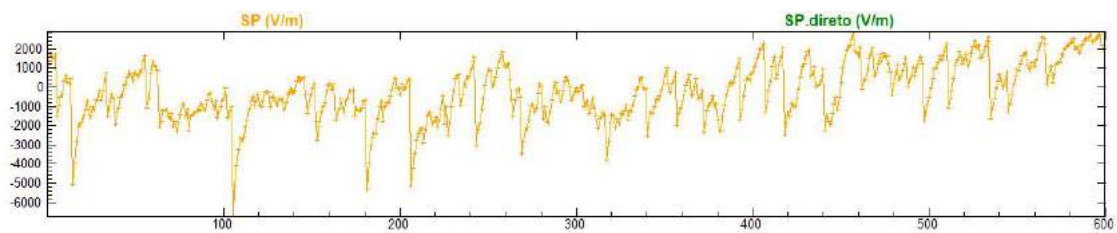


Figura 5.140 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

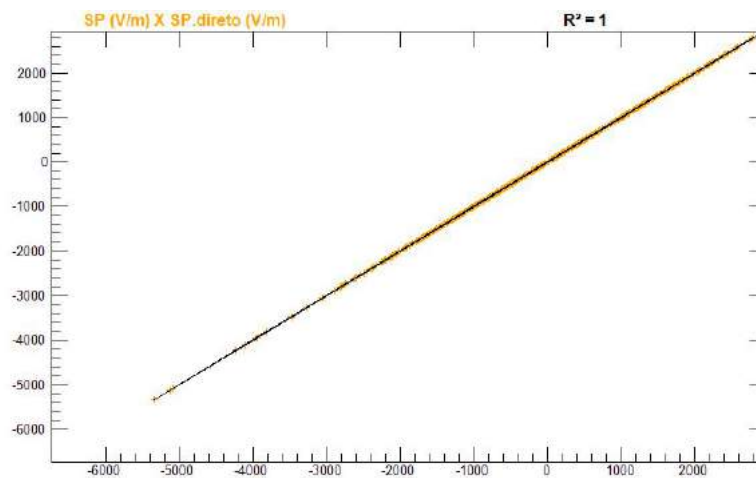


Figura 5.141 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

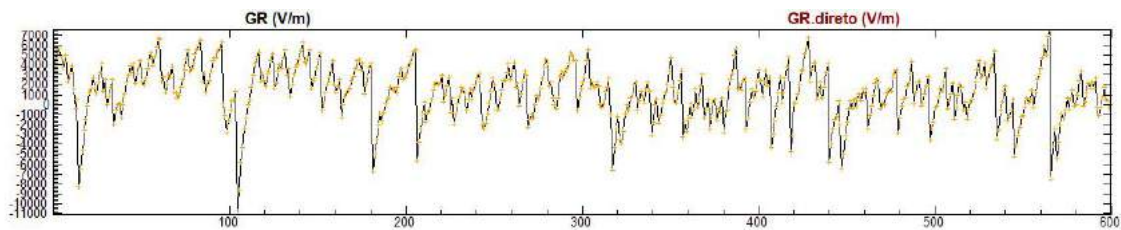


Figura 5.142 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

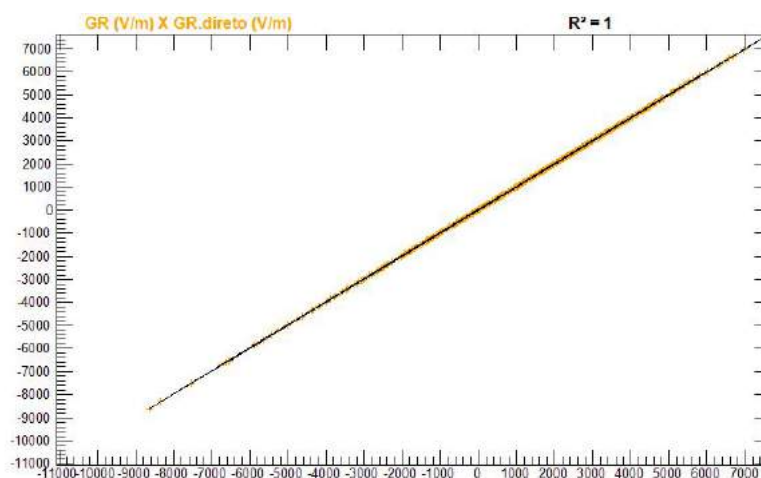


Figura 5.143 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.18 Caso 738

Este evento ocorreu em 18 de junho de 2014 às 10:08:43. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de 1000 V/m. Neste evento foram analisados 12363 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 10,345 MW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500$  m e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.144.b (vista frontal), 5.144.c (vista superior) e 5.144.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.144.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respecti-

vamente, com valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 3750 m até 5750 m para o primeiro centro e de 6250 m até 8250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $106,25 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $50 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 406,399 C para o primeiro e -616,41 C para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $3,824 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-12,329 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

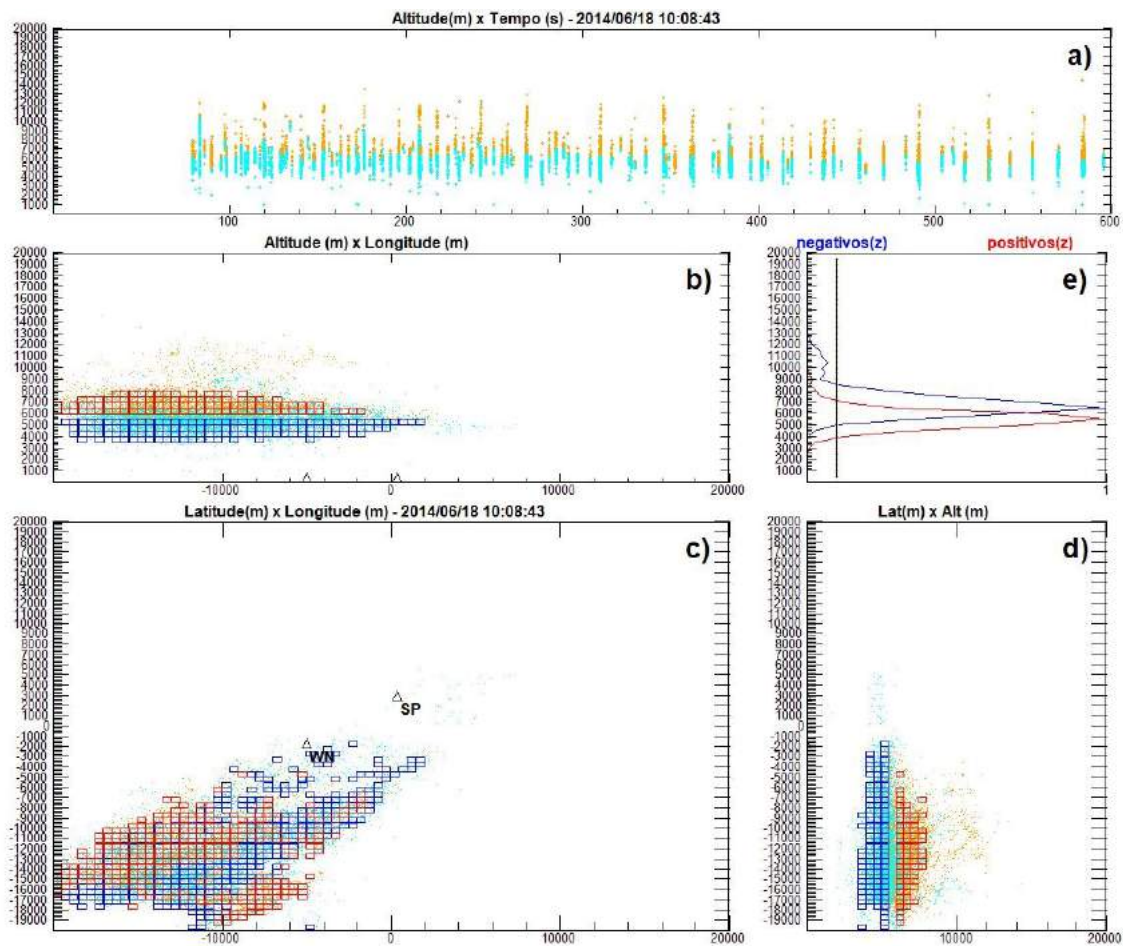


Figura 5.144 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.145.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.145.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.145.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.145.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

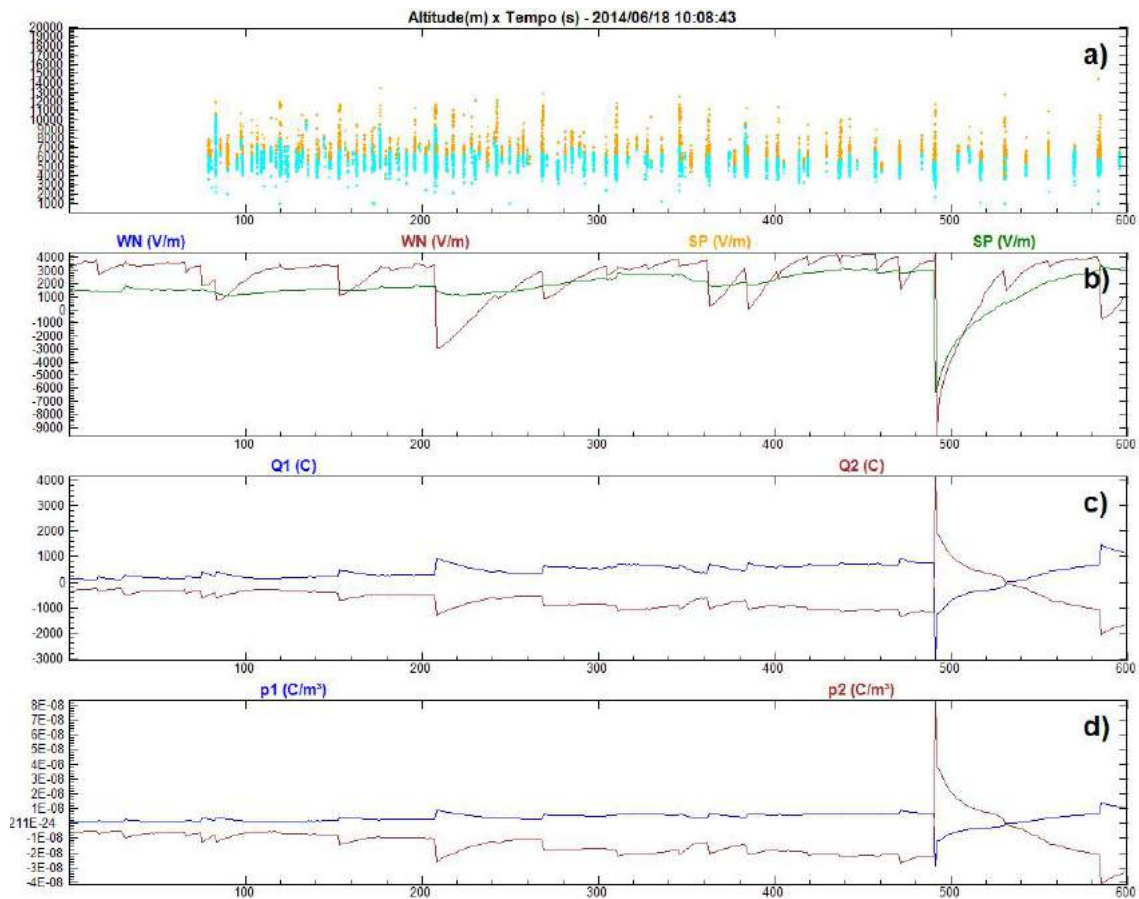


Figura 5.145 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica  $(C/m^3)$

A Figura 5.146.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.146.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.146.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s^2)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

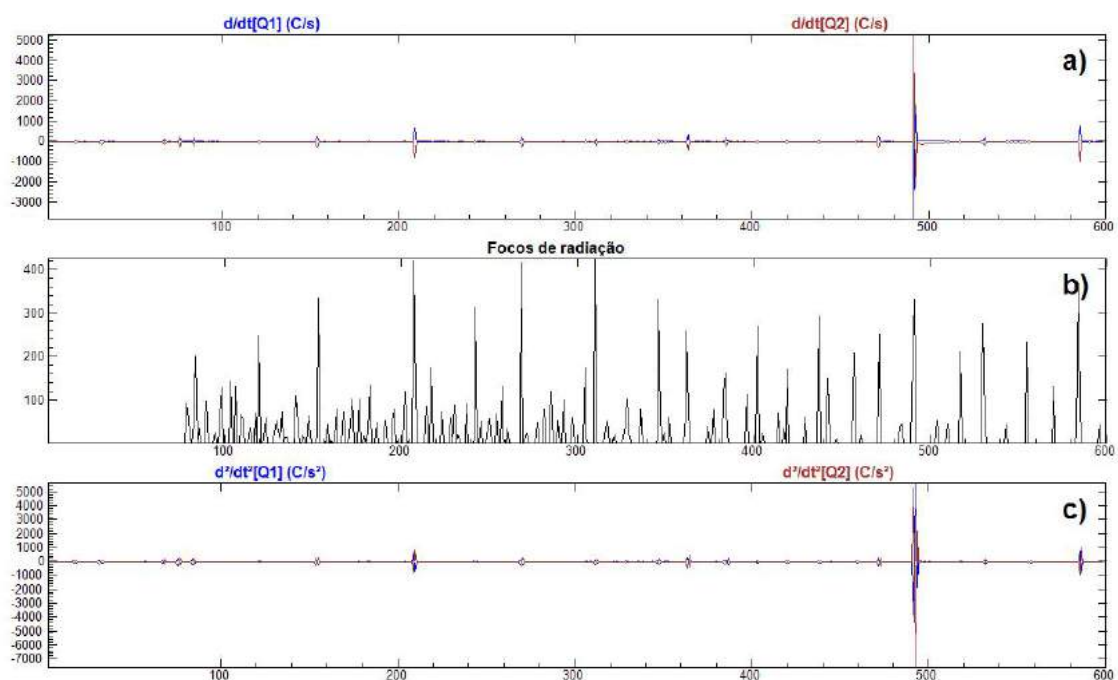


Figura 5.146 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

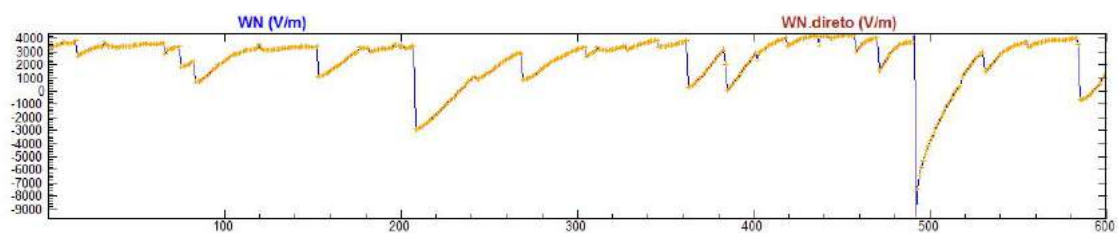


Figura 5.147 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

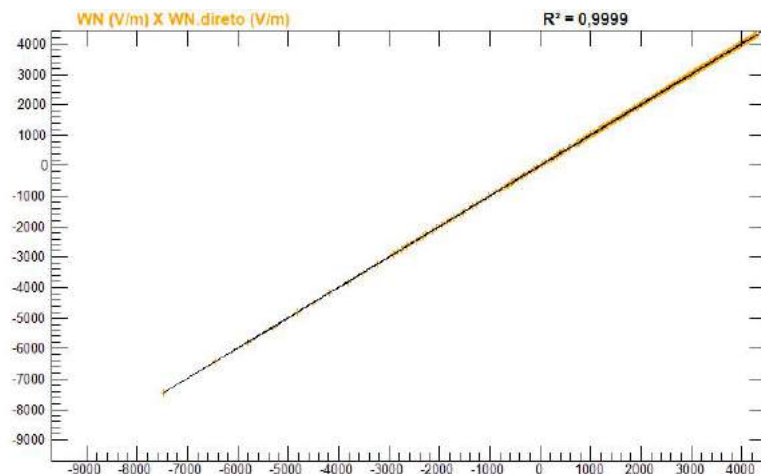


Figura 5.148 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

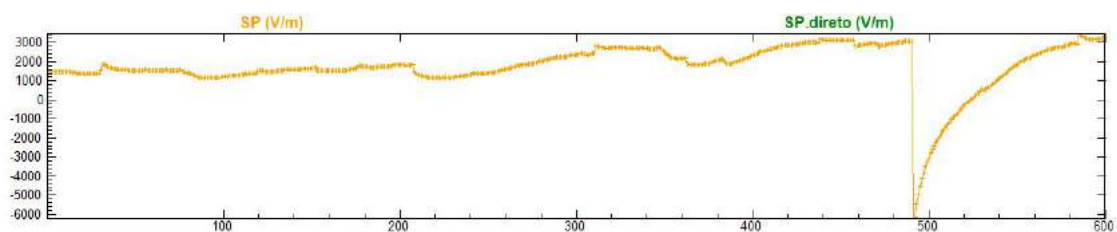


Figura 5.149 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

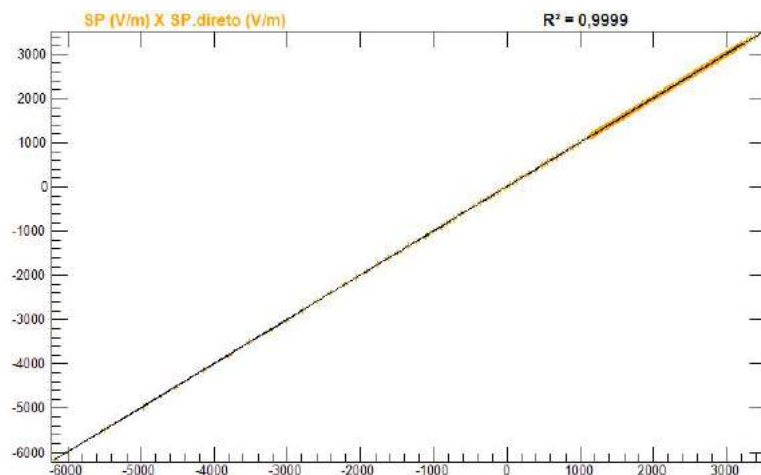


Figura 5.150 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.19 Caso 739

Este evento ocorreu em 18 de junho de 2014 às 10:13:50. Foram utilizados 601 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 7059 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $10,345 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.151.b (vista frontal), 5.151.c (vista superior) e 5.151.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.151.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 3750 m até 5750 m para o primeiro centro e de 5750 m até 8250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $66,875 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $42,875 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $802,175 \text{ C}$  para o primeiro e  $-1103,503 \text{ C}$  para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $11,995 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-25,738 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

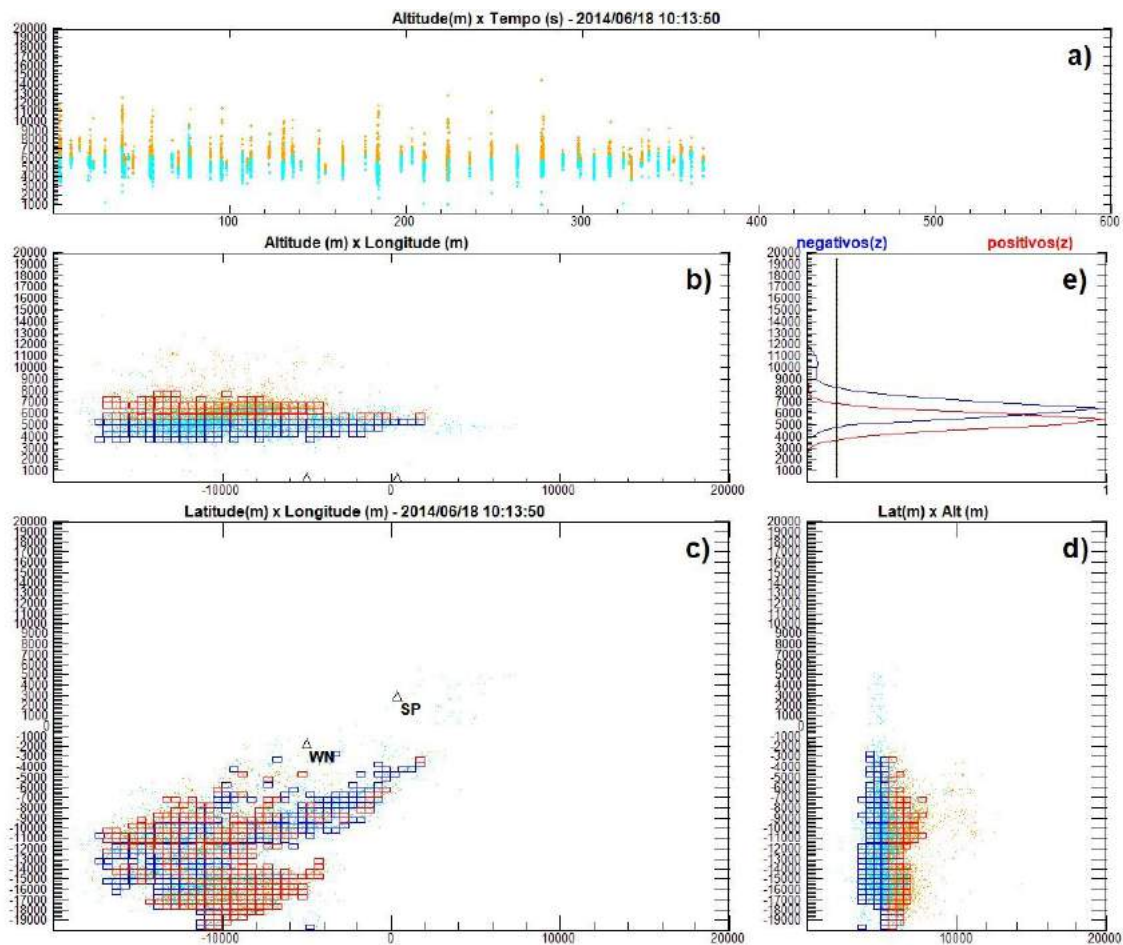


Figura 5.151 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.152.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.152.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.152.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.152.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

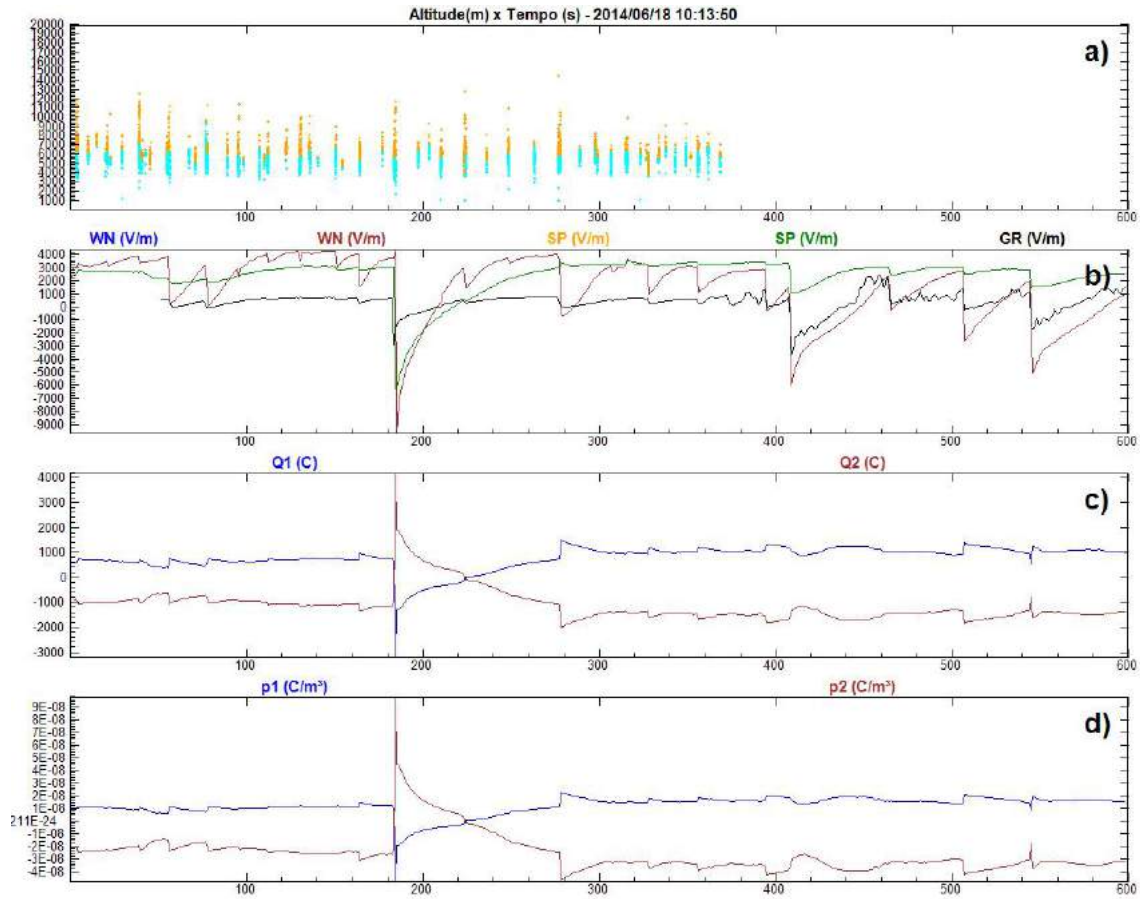


Figura 5.152 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.153.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.153.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.153.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

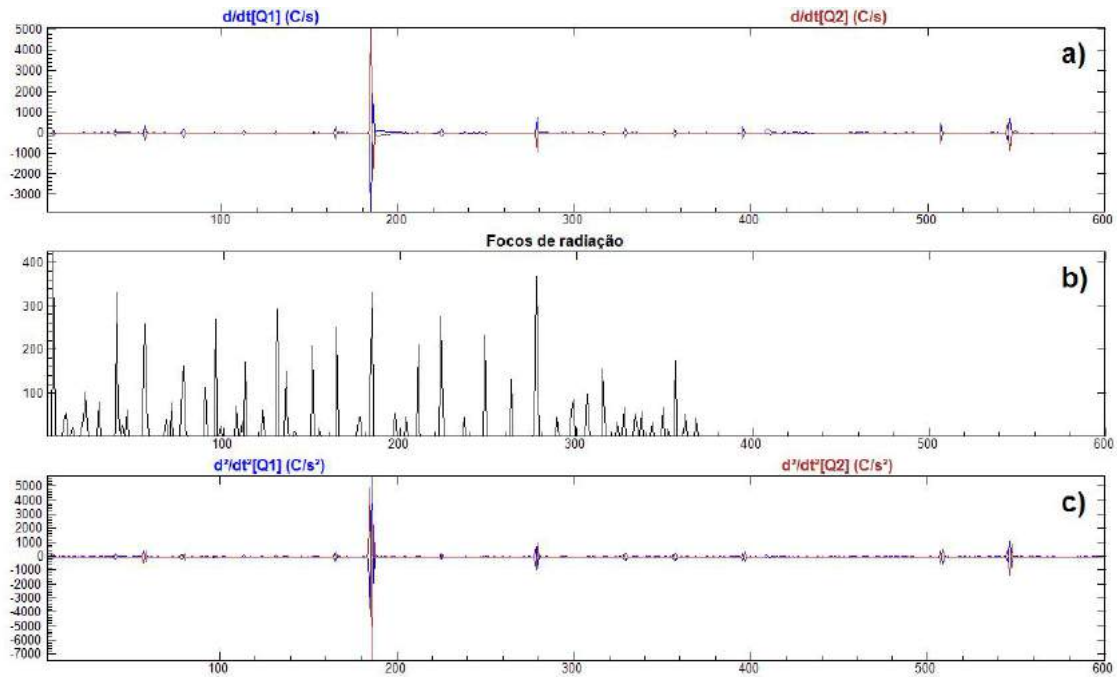


Figura 5.153 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

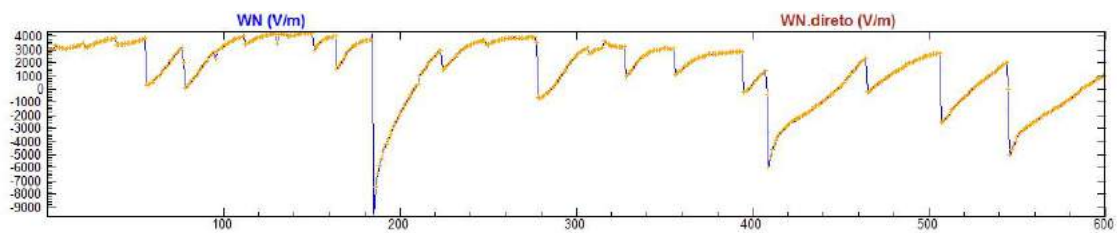


Figura 5.154 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

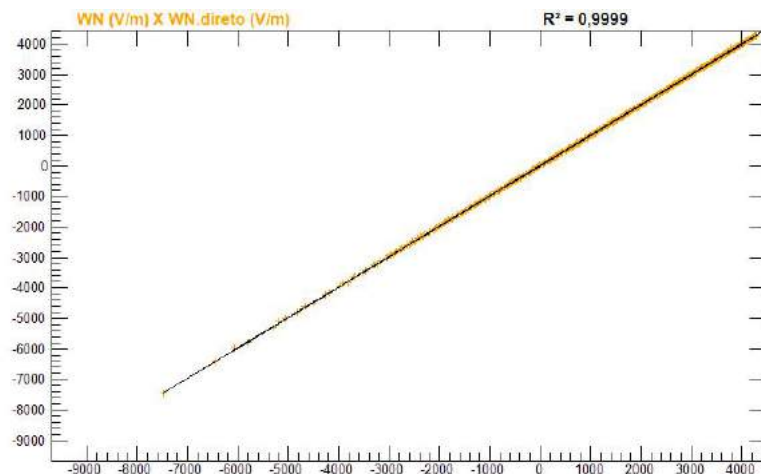


Figura 5.155 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

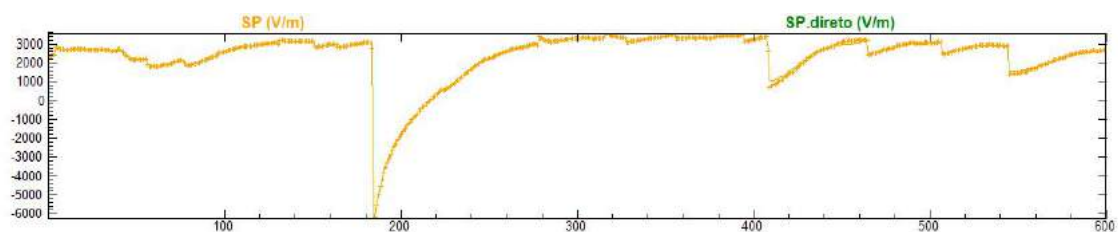


Figura 5.156 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

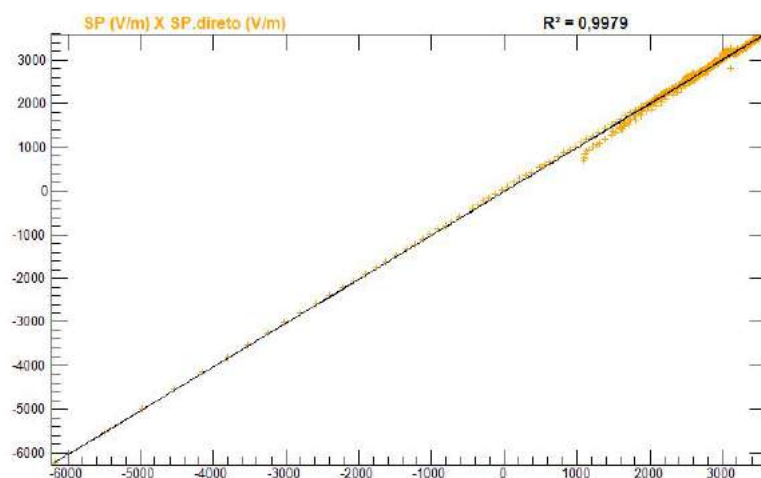


Figura 5.157 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

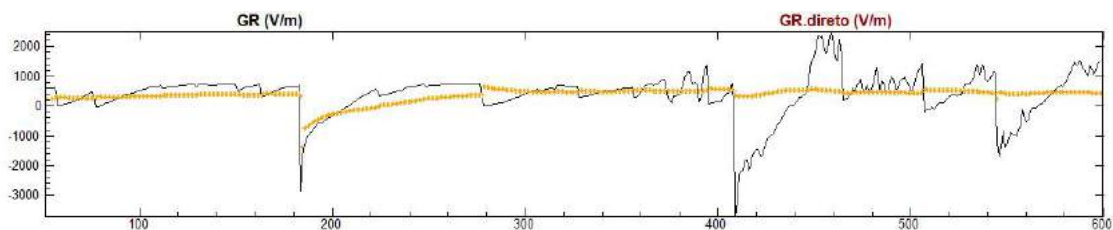


Figura 5.158 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor GR, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

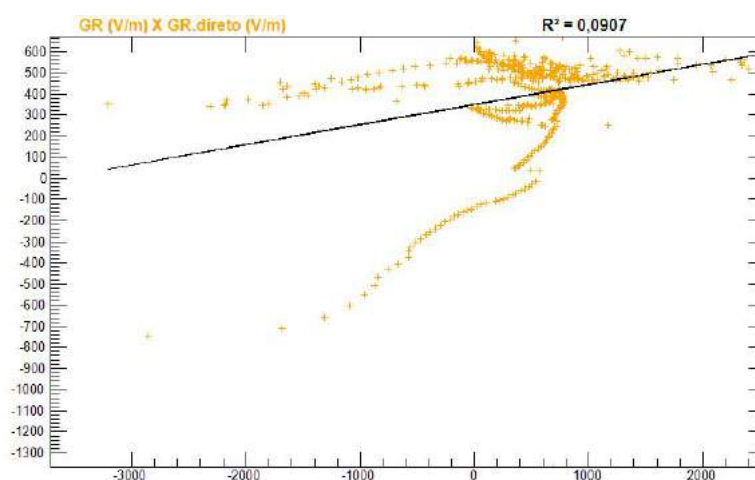


Figura 5.159 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor GR, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.20 Caso 753

Este evento ocorreu em 21 de junho de 2014 às 23:00:0. Foram utilizados 600 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de 1000 V/m. Neste evento foram analisados 18136 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 22,461 MW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500$  m e  $C = 0,2$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.160.b (vista frontal), 5.160.c (vista superior) e 5.160.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.160.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respecti-

vamente, com valores normalizados (máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 6250 m até 8250 m para o primeiro centro e de 9250 m até 10250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $58,75 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $21,625 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 113,558 C para o primeiro e -139,872 C para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $1,932 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-6,469 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

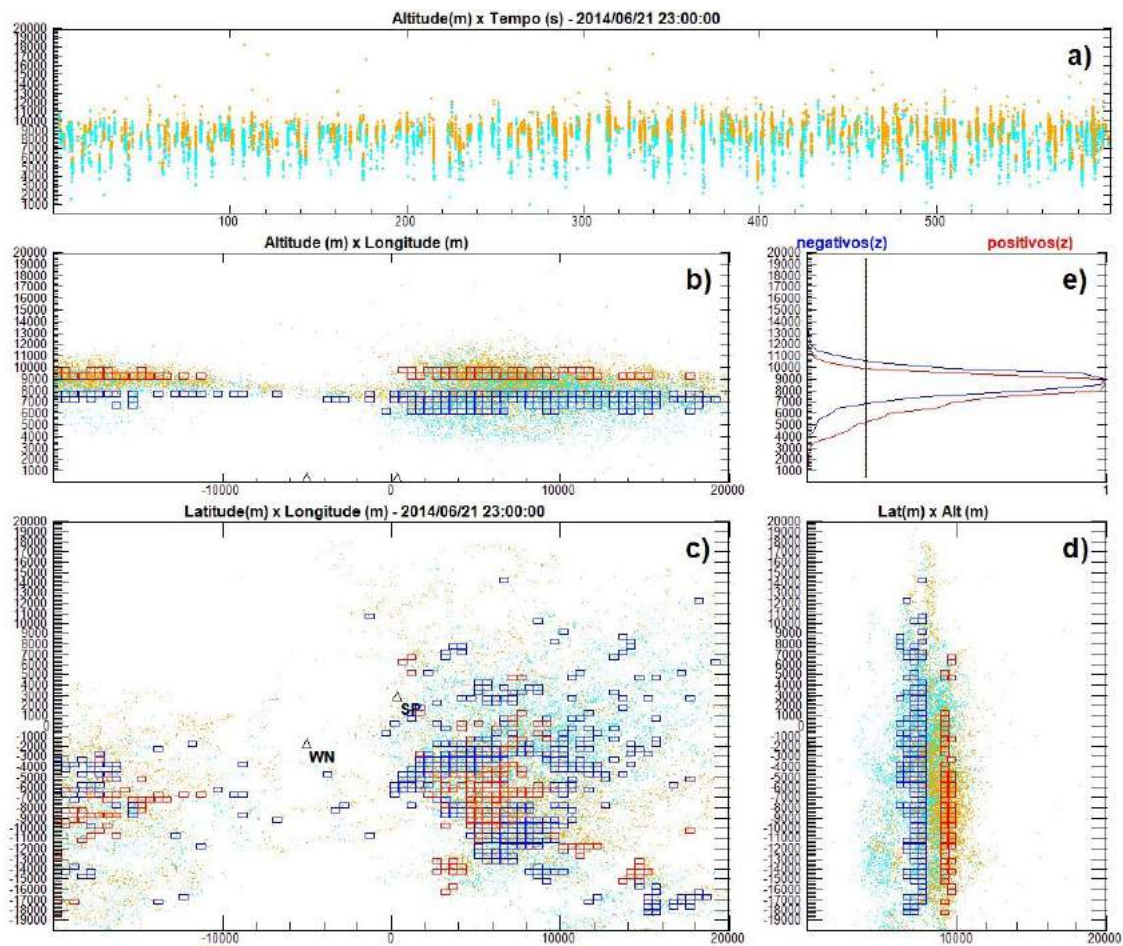


Figura 5.160 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.161.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no

eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.161.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.161.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.161.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

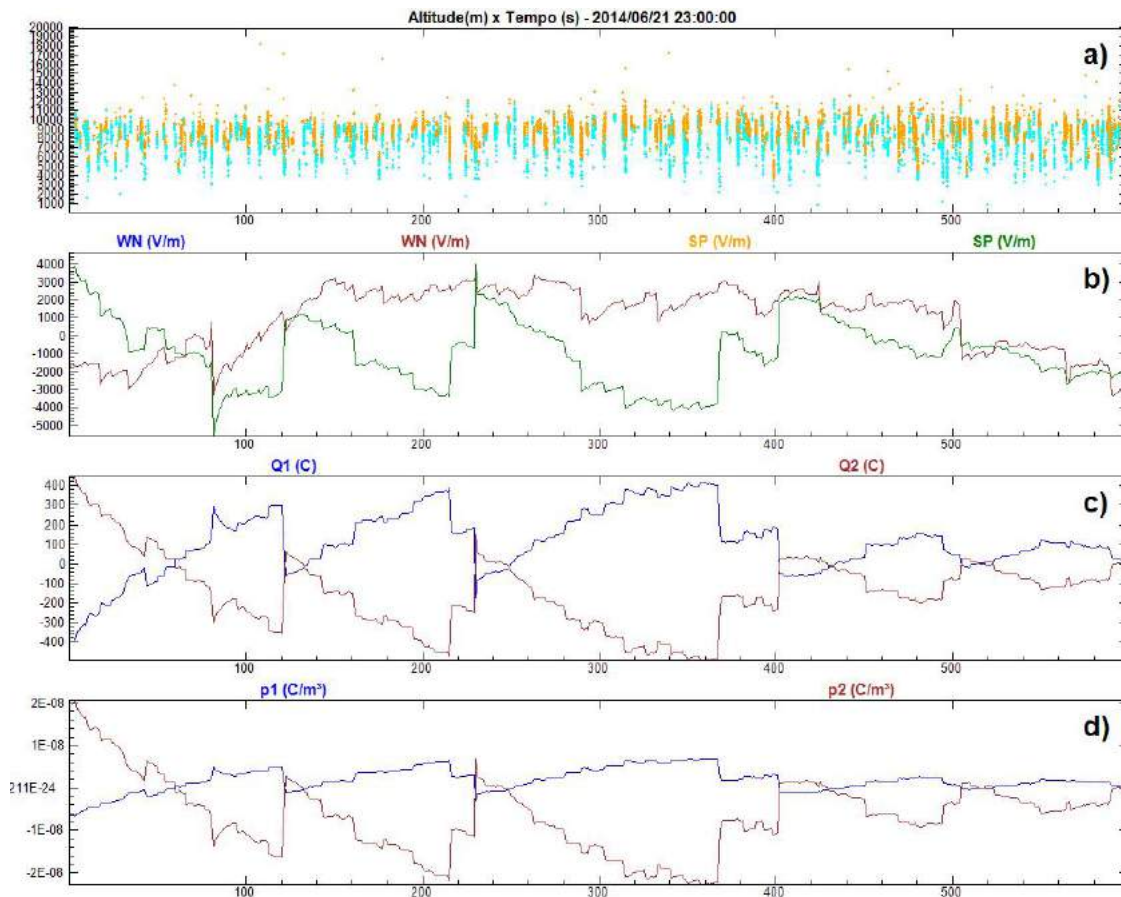


Figura 5.161 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica  $(C/m^3)$

A Figura 5.162.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.162.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.162.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em  $(C/s^2)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

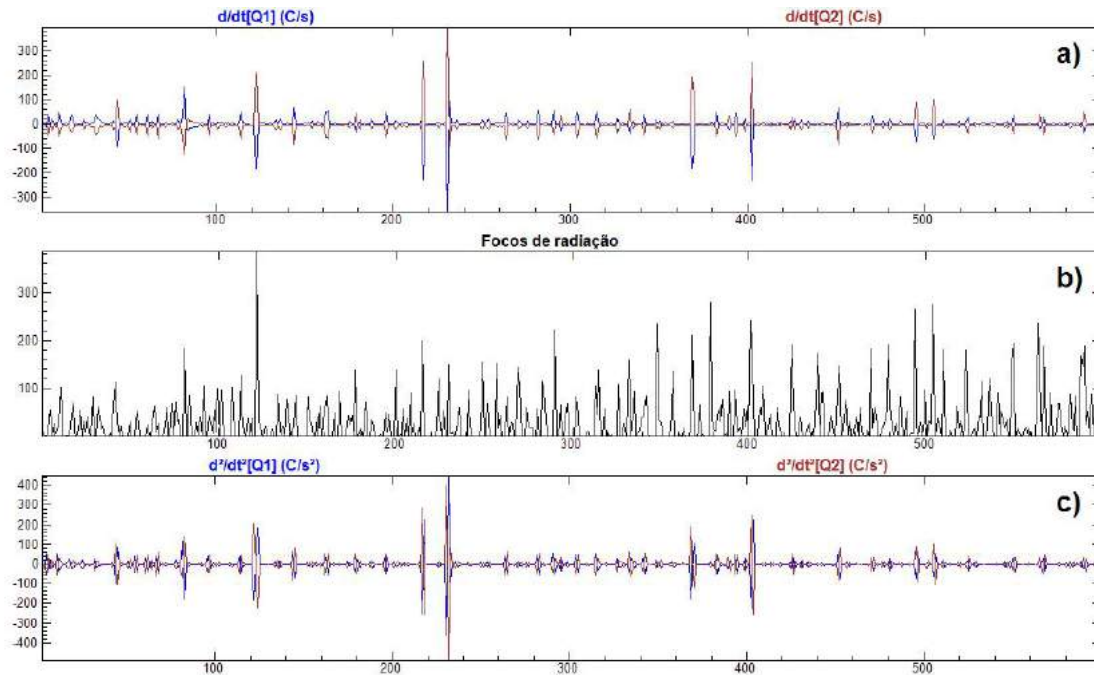


Figura 5.162 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

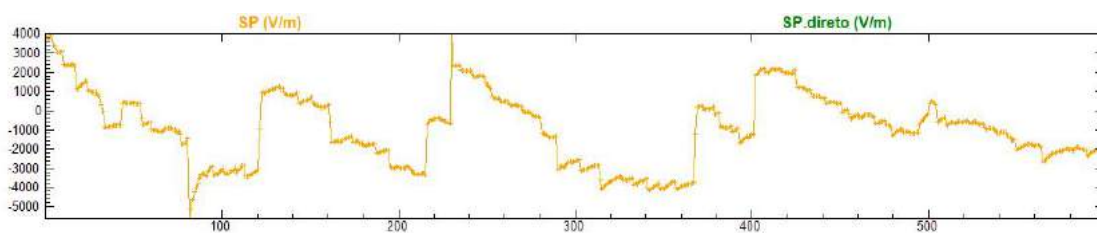


Figura 5.163 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

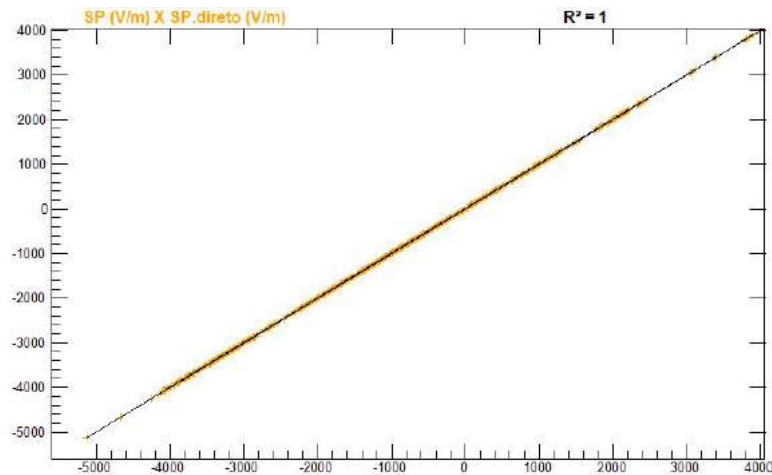


Figura 5.164 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em ( $V/m$ )

## 5.21 Caso 756

Este evento ocorreu em 21 de junho de 2014 às 23:35:2. Foram utilizados 201 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 V/m$ . Neste evento foram analisados 10164 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $19,692 MW$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 m$  e  $C = 0,25$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.165.b (vista frontal), 5.165.c (vista superior) e 5.165.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.165.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 4750 m até 5250 m para o primeiro centro, de 7250 m até 8250 m para o segundo centro e de 8750 m até 10750 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $1 km^3$  para o primeiro,  $11,375 km^3$  para o segundo e  $18 km^3$  para o terceiro. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $32,615 C$  para o primeiro,  $-35,603 C$  para o segundo e  $1,111 C$  para o terceiro. As densidades de

carga elétrica para cada centro foram:  $32,615 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $-3,13 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $0,061 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

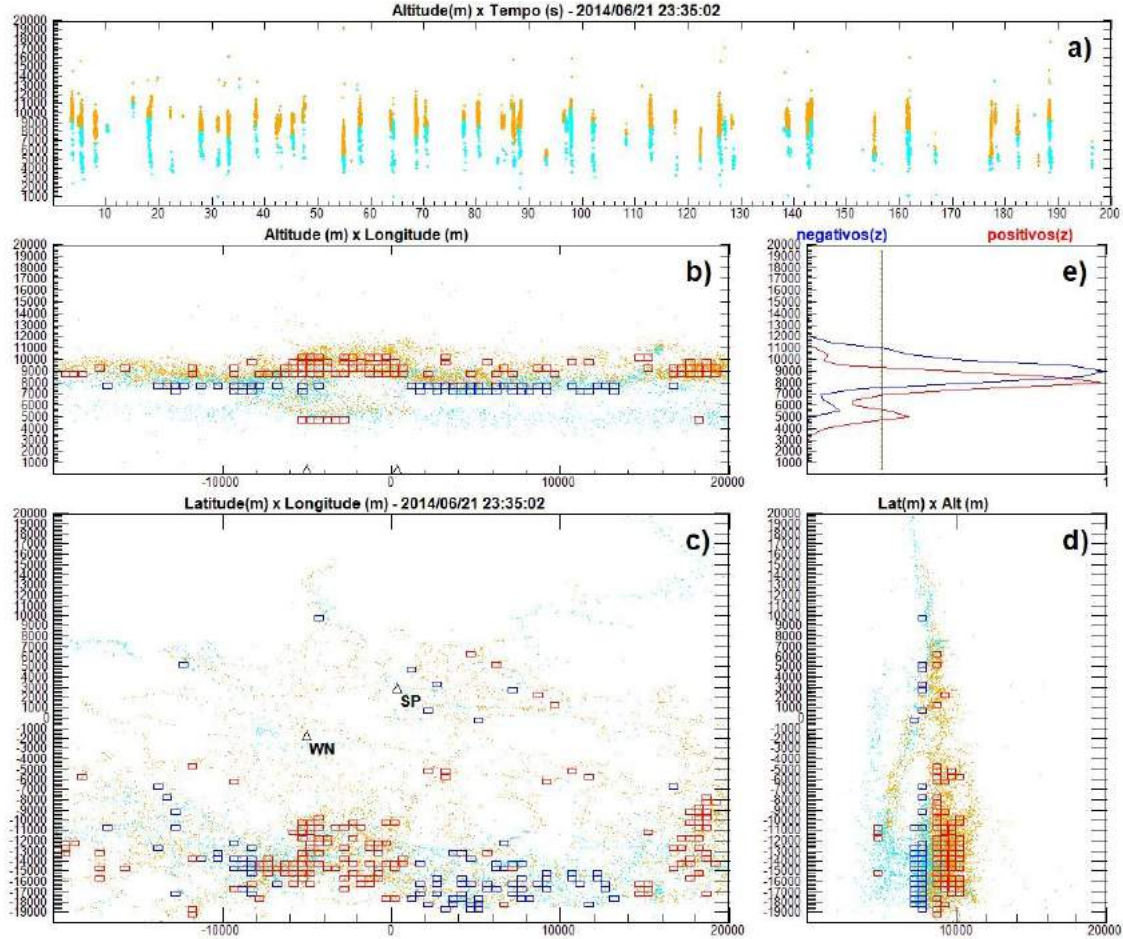


Figura 5.165 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.166.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.166.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.166.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.166.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

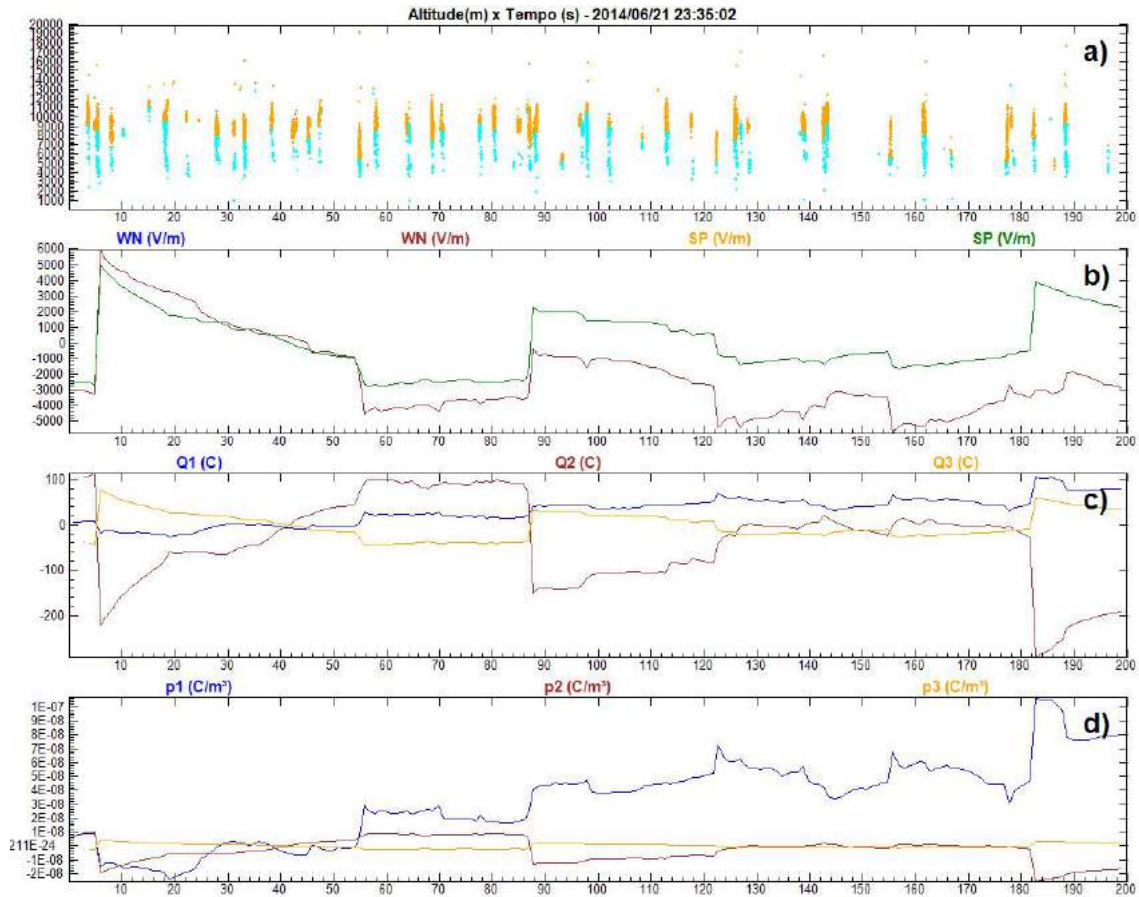


Figura 5.166 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.167.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.167.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.167.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

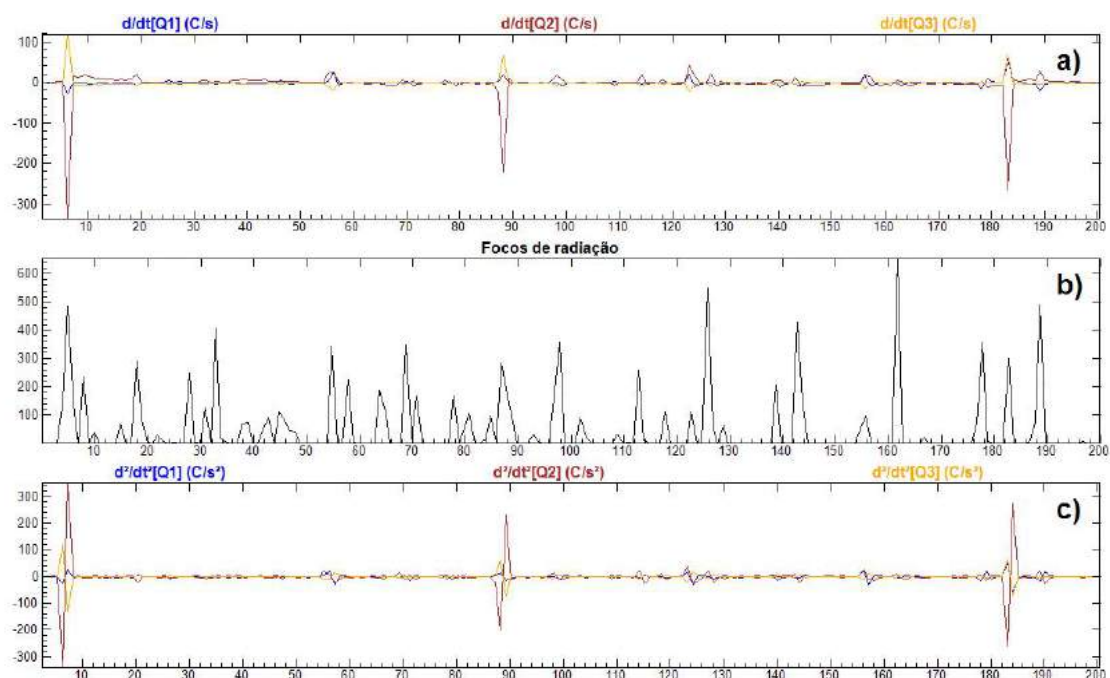


Figura 5.167 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

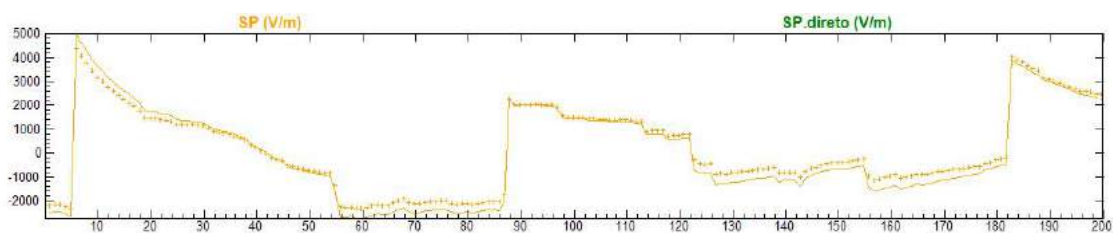


Figura 5.168 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

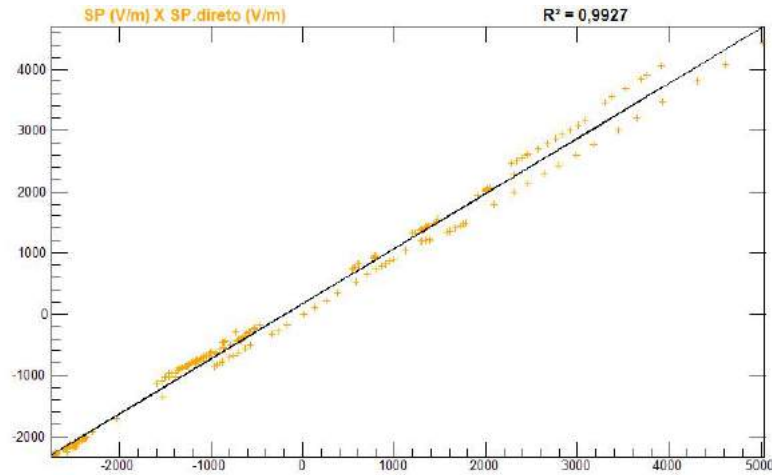


Figura 5.169 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.22 Caso 757

Este evento ocorreu em 21 de junho de 2014 às 23:30:45. Foram utilizados 555 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de 1000 V/m. Neste evento foram analisados 29134 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi 19,692 MW. Nesta solução foram utilizados  $L = 500$  m e  $C = 0,15$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.170.b (vista frontal), 5.170.c (vista superior) e 5.170.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.170.e mostra a aplicação do parâmetro de corte C, indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos(z) e negativos(z) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi tripolar. As alturas encontradas foram: de 4250 m até 5750 m para o primeiro centro, de 5750 m até 8250 m para o segundo centro e de 8750 m até 11250 m para o terceiro centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $2,875 \text{ km}^3$  para o primeiro,  $65,375 \text{ km}^3$  para o segundo e  $85 \text{ km}^3$  para o terceiro. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram: 7,545 C para o primeiro, 17,485 C para o segundo e 15,151 C para o terceiro. As densidades de

carga elétrica para cada centro foram:  $2,624 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $0,267 \text{ nC/m}^3$  para o segundo e  $0,178 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro

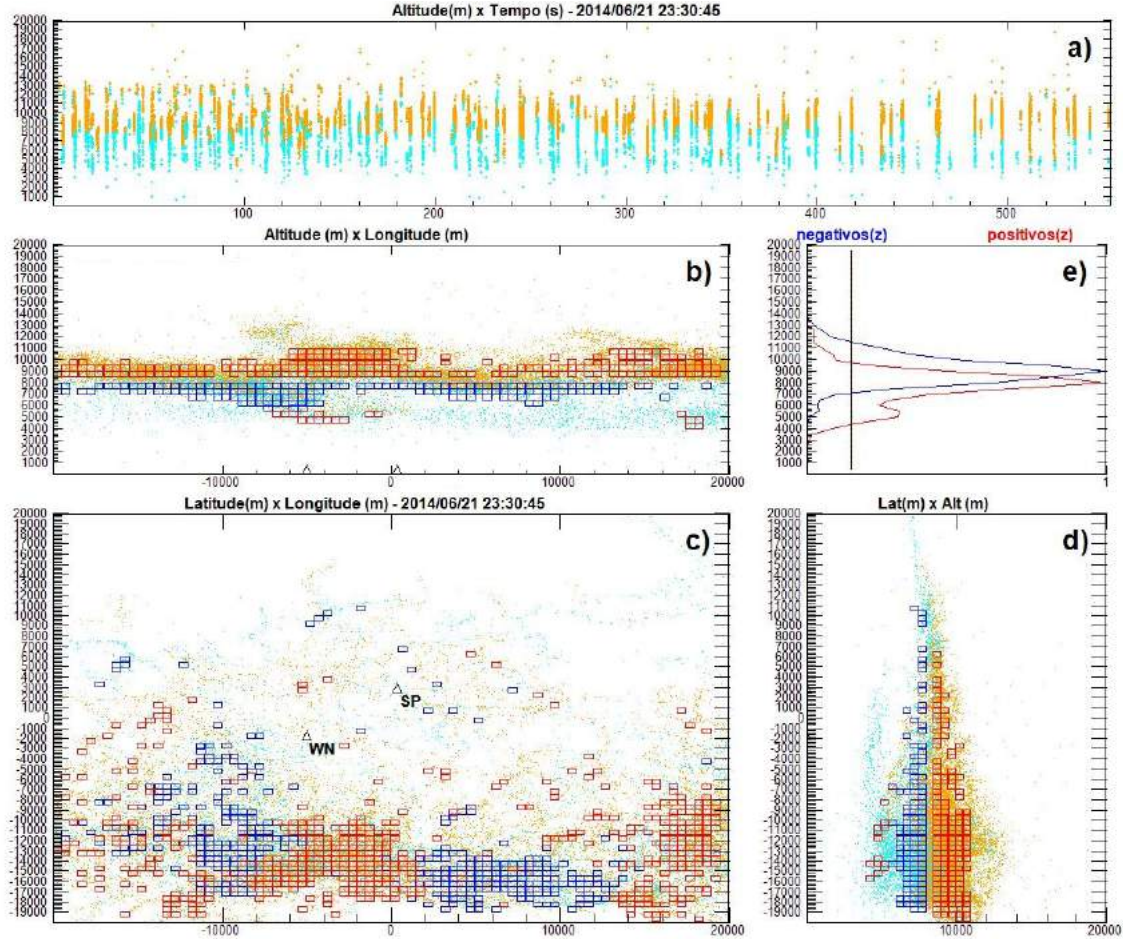


Figura 5.170 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.171.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.171.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.171.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.171.d mostra as densidades de cargas elétricas em  $(C/m^3)$  no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

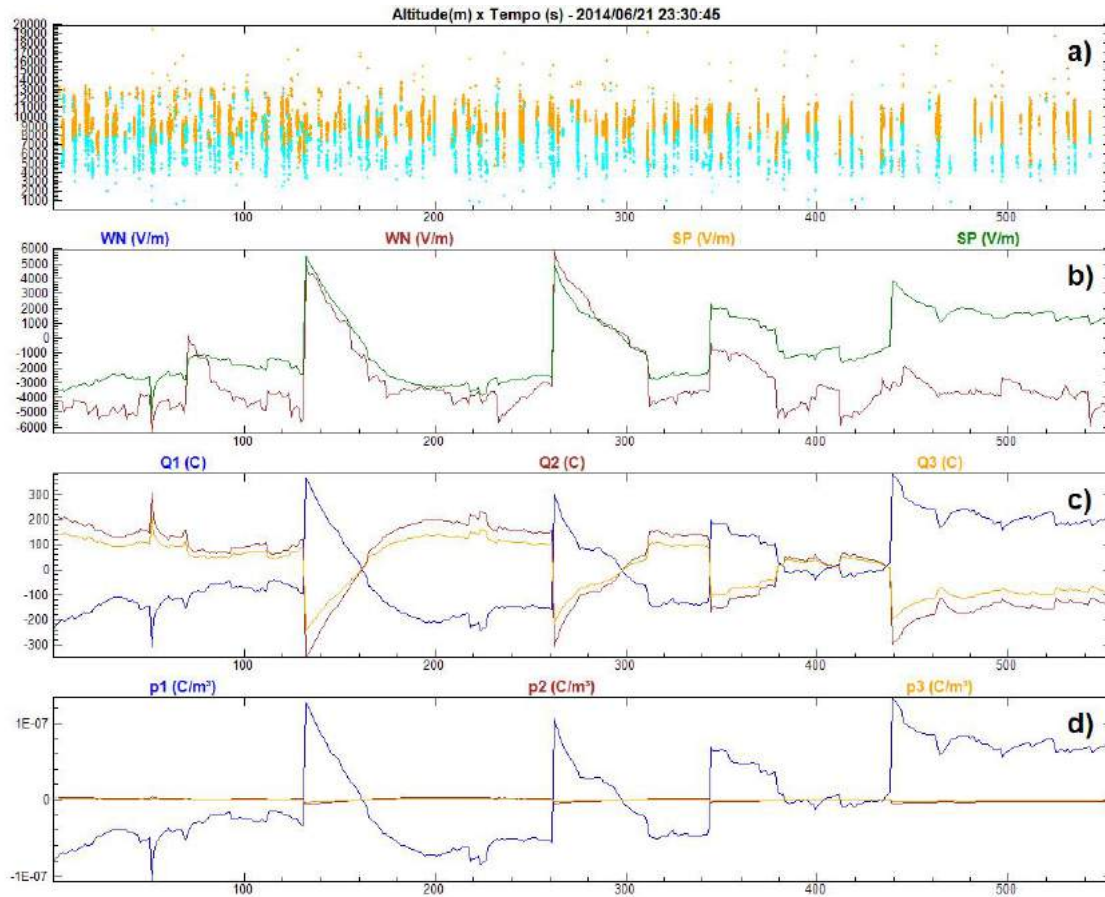


Figura 5.171 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos ( $V/m$ ), c) Cargas elétricas ( $C$ ), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.172.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.172.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.172.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

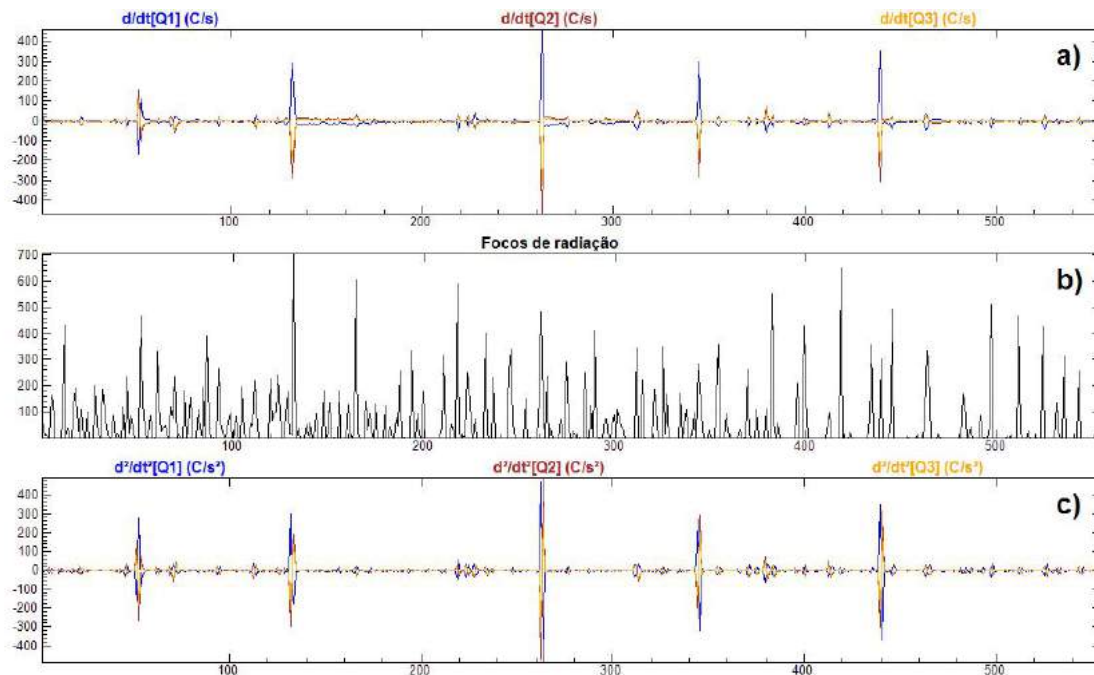


Figura 5.172 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

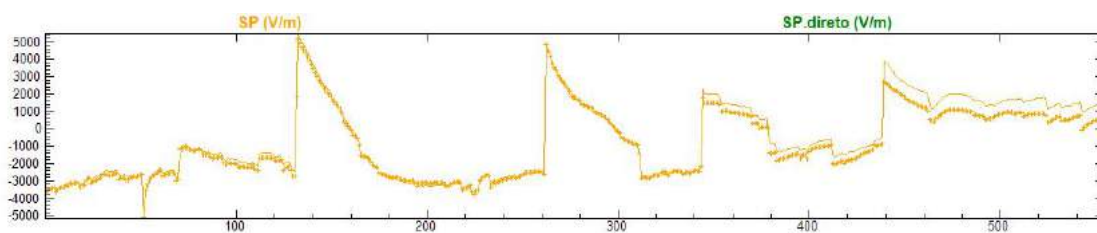


Figura 5.173 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

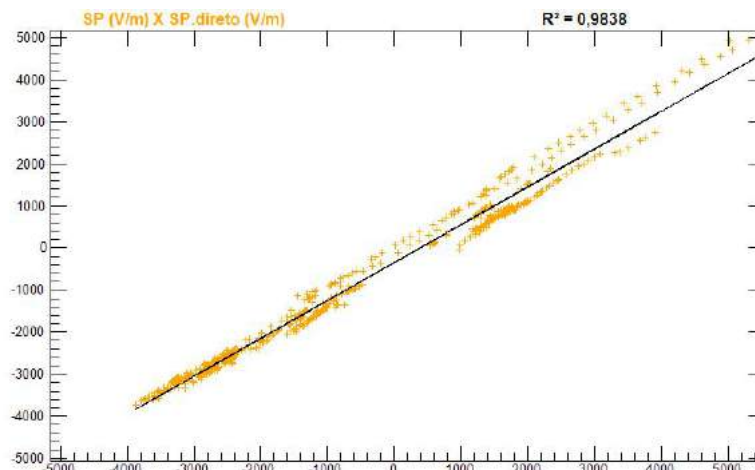


Figura 5.174 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

### 5.23 Caso 865

Este evento ocorreu em 28 de junho de 2014 às 23:50:2. Foram utilizados 597 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia três sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 25935 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $4,387 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,1$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.175.b (vista frontal), 5.175.c (vista superior) e 5.175.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.175.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi dipolar. As alturas encontradas foram: de 2750 m até 7250 m para o primeiro centro e de 7750 m até 10250 m para o segundo centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $53,125 \text{ km}^3$  para o primeiro e  $64,75 \text{ km}^3$  para o segundo. As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $201,259 \text{ C}$  para o primeiro e  $-444,875 \text{ C}$  para o segundo. As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $3,788 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro e  $-6,871 \text{ nC/m}^3$  para o segundo.

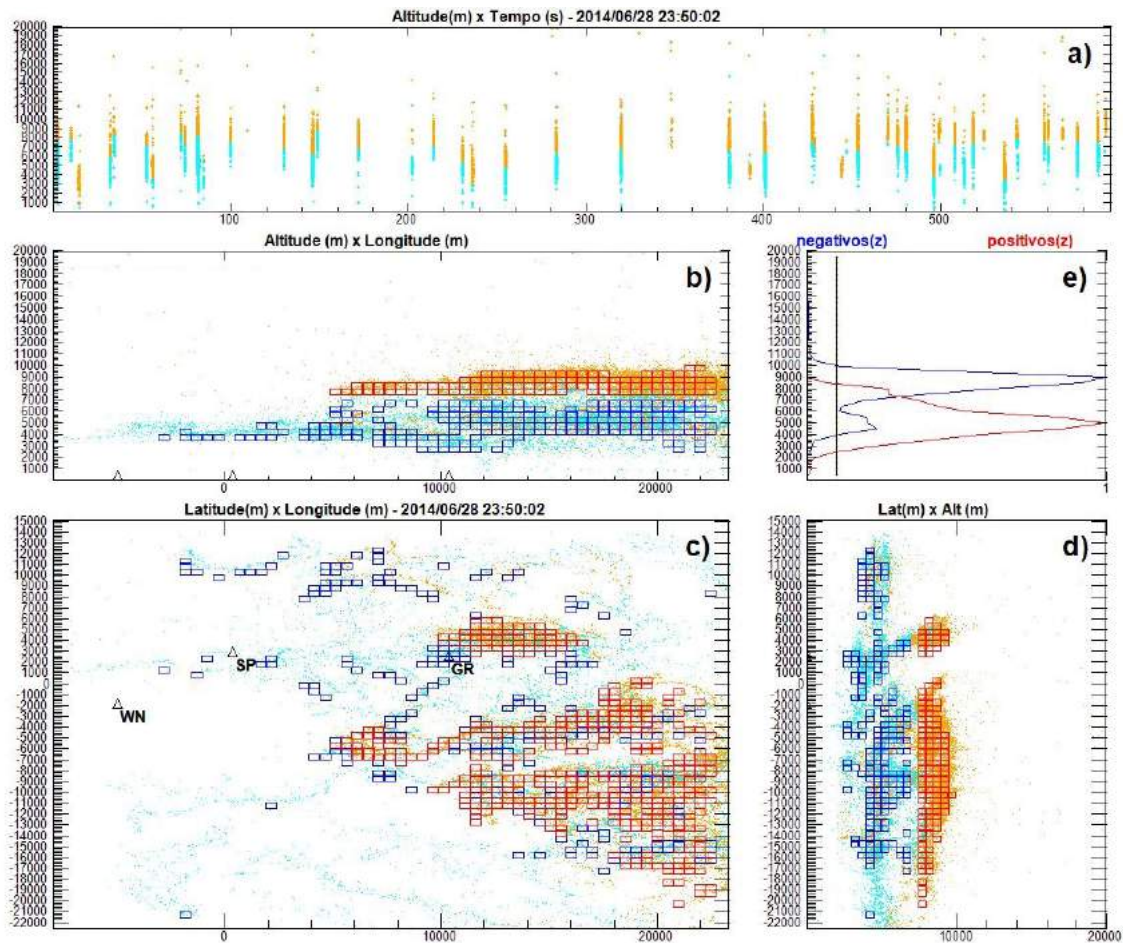


Figura 5.175 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.176.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.176.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.176.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.176.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

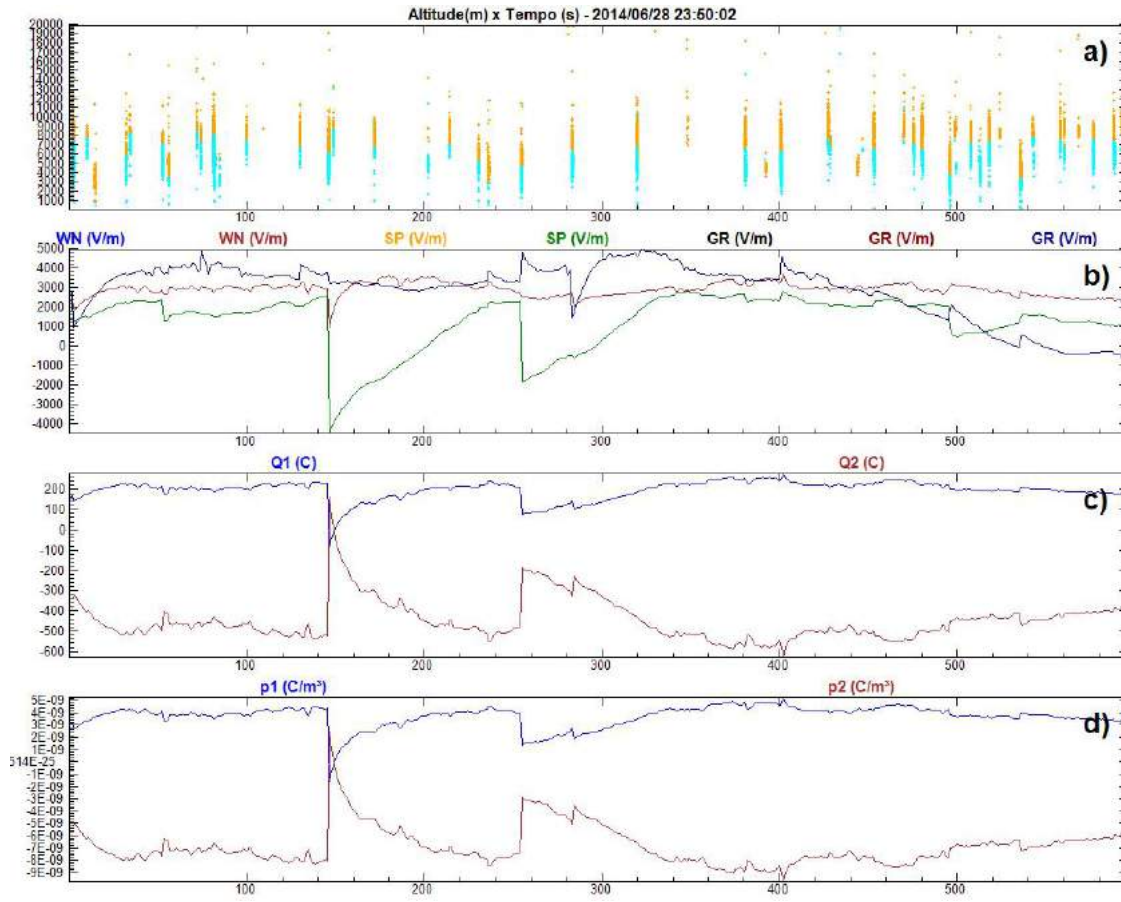


Figura 5.176 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.177.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.177.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.177.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

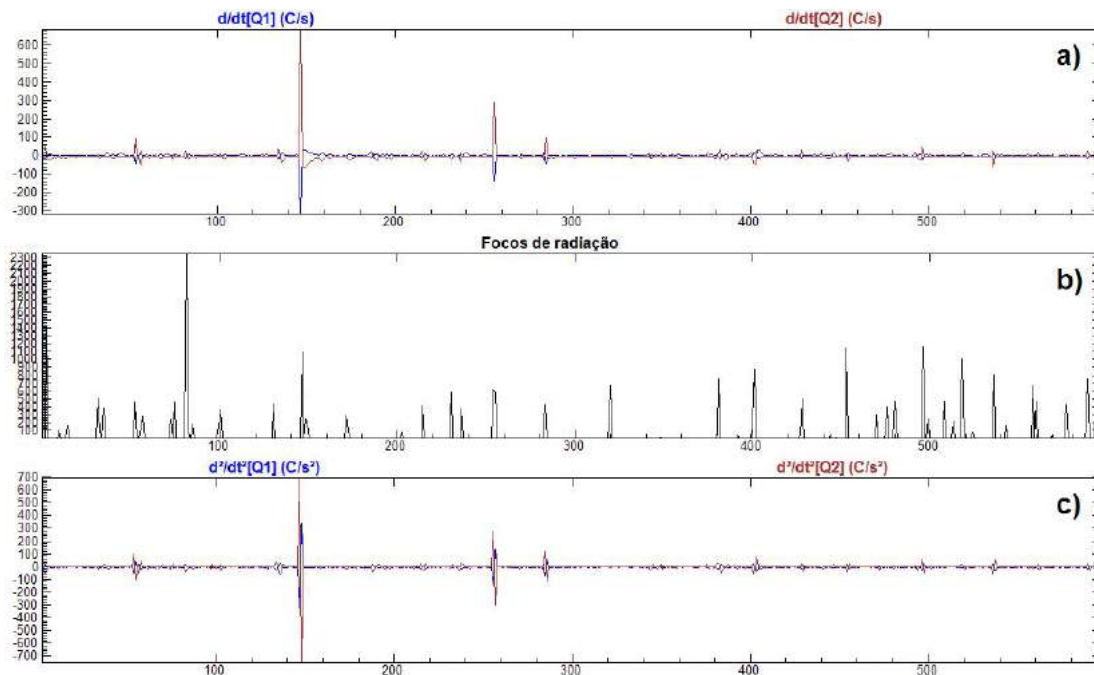


Figura 5.177 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga ( $C/s$ ), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) ( $C/s^2$ )

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

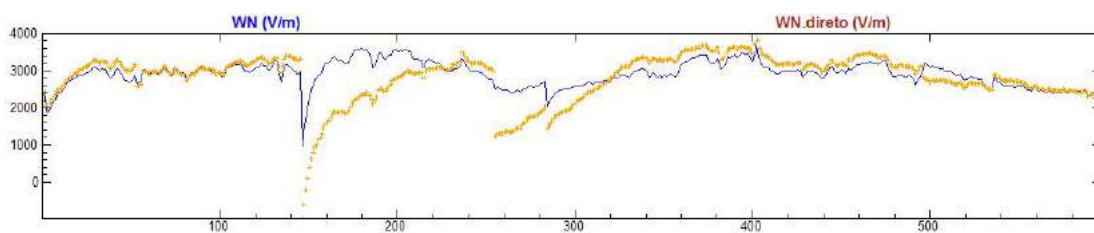


Figura 5.178 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em ( $V/m$ ) e horizontal em (s)

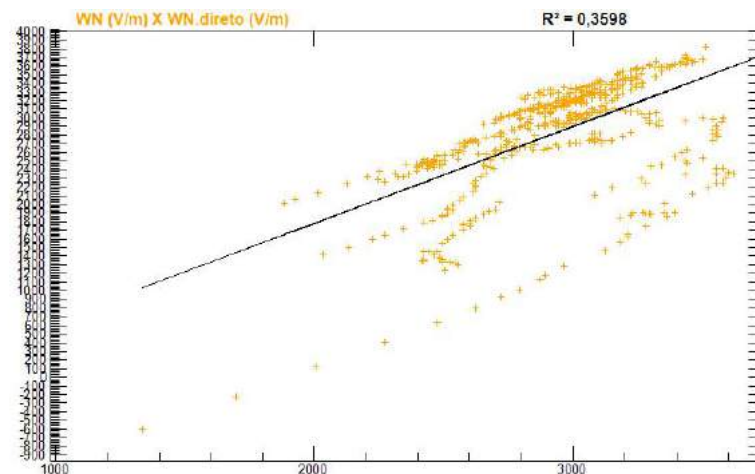


Figura 5.179 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

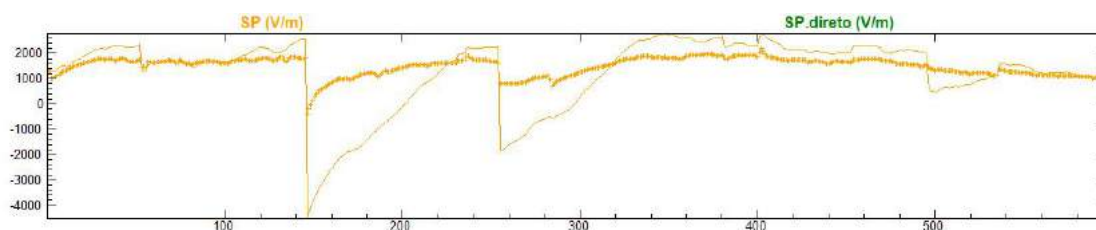


Figura 5.180 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

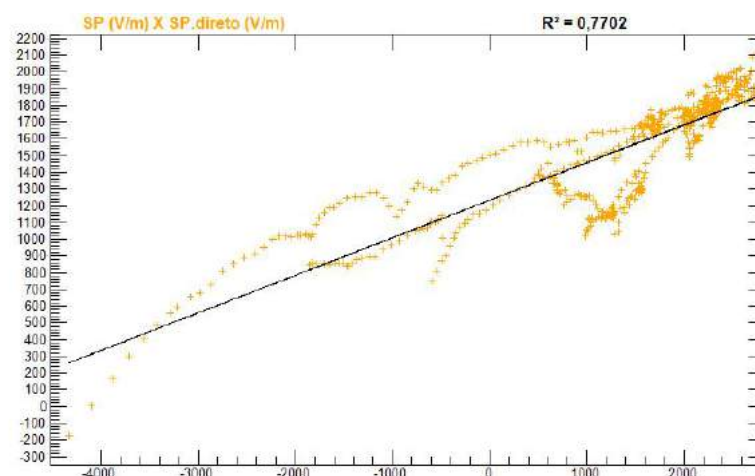


Figura 5.181 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 5.24 Caso 953

Este evento ocorreu em 19 de julho de 2014 às 09:10:0. Foram utilizados 600 segundos de LMA para mapear os centros de carga elétrica. Havia dois sensores de campo elétrico ativos registrando valores intensos acima de  $1000 \text{ V/m}$ . Neste evento foram analisados 3812 focos de radiação. A soma das potências dos focos de radiação detectados pelo LMA durante o intervalo foi  $10,05 \text{ MW}$ . Nesta solução foram utilizados  $L = 500 \text{ m}$  e  $C = 0,2$ . Os centros de carga elétrica estão representados nas Figuras 5.182.b (vista frontal), 5.182.c (vista superior) e 5.182.d (vista lateral) os pontos em laranja representam os focos de radiação pertencentes aos líderes negativos e os pontos em ciano os focos de radiação pertencentes aos líderes positivos. A Figura 5.182.e mostra a aplicação do parâmetro de corte  $C$ , indicado pela linha vertical preta, e a contagens positivos( $z$ ) e negativos( $z$ ) em azul e vermelho respectivamente, com valores normalizados(máximo = 1 e mínimo = 0) no eixo horizontal, o eixo vertical mostra a altura em metros. As regiões marcadas pelos quadrados vermelhos e azuis representam respectivamente as regiões do espaço onde os centros de carga elétrica positivos e negativos estão contidos. A estrutura que melhor se ajustou ao modelo foi quadripolar. As alturas encontradas foram: de 3250 m até 4250 m para o primeiro centro, de 4750 m até 6250 m para o segundo centro, de 7250 m até 7750 m para o terceiro centro e de 7750 m até 10250 m para o quarto centro. Os volumes calculados para cada centro de carga foram:  $2,75 \text{ km}^3$  para o primeiro ,  $3,25 \text{ km}^3$  para o segundo ,  $2,125 \text{ km}^3$  para o terceiro e  $8,25 \text{ km}^3$  para o quarto . As cargas elétricas encontradas para cada centro foram:  $-61,714 \text{ C}$  para o primeiro ,  $41,811 \text{ C}$  para o segundo ,  $16,407 \text{ C}$  para o terceiro e  $11,159 \text{ C}$  para o quarto . As densidades de carga elétrica para cada centro foram:  $-22,442 \text{ nC/m}^3$  para o primeiro ,  $12,865 \text{ nC/m}^3$  para o segundo ,  $7,721 \text{ nC/m}^3$  para o terceiro e  $1,352 \text{ nC/m}^3$  para o quarto

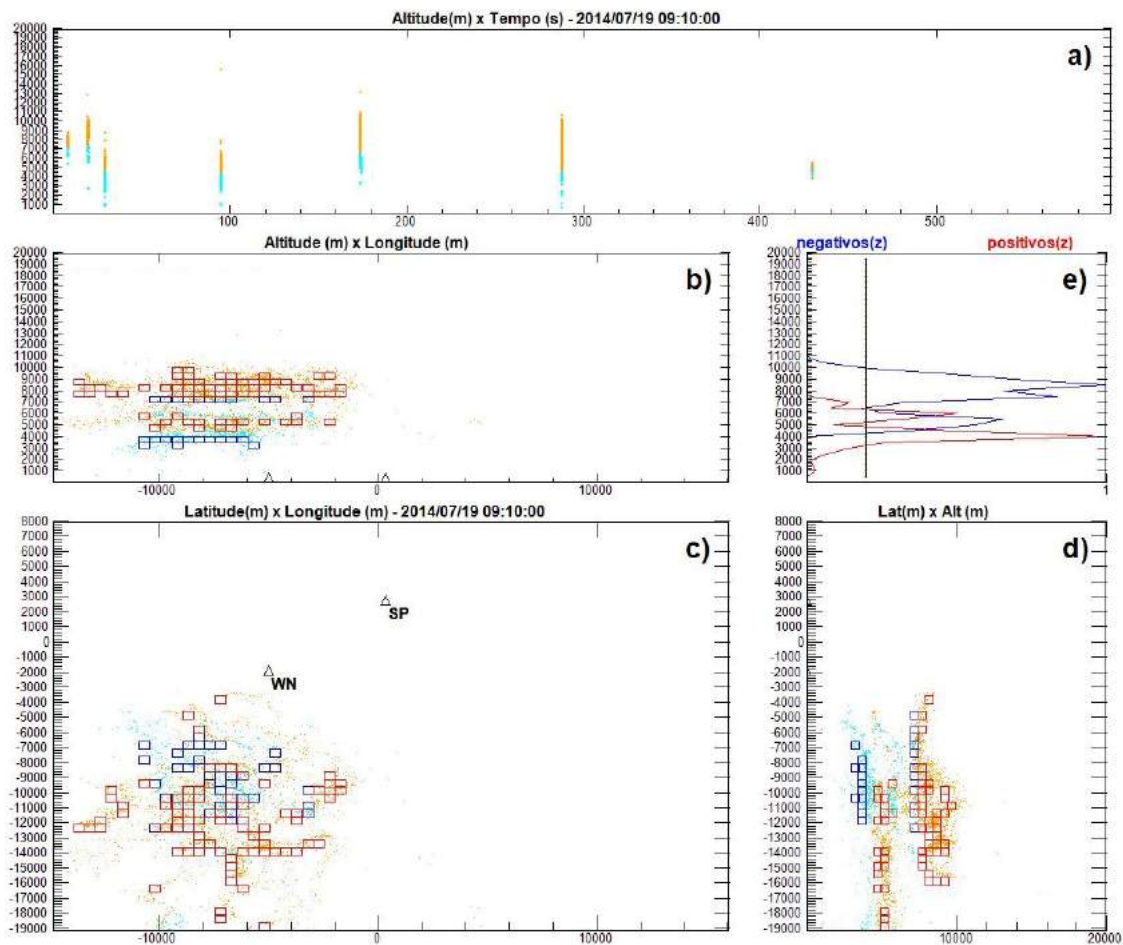


Figura 5.182 - a) Focos de radiação, b) Vista frontal, c) vista superior, d) vista lateral, e) parâmetro C (linha preta vertical) e as contagens e positivos(z) e negativos(z)

A Figura 5.183.a mostra os focos de radiação em função da altura em metros, no eixo vertical, e do tempo, em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.183.b mostra todas as leituras de campo elétrico em volts por metro, no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.183.c mostra as cargas elétricas em coulombs no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.183.d mostra as densidades de cargas elétricas em ( $C/m^3$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

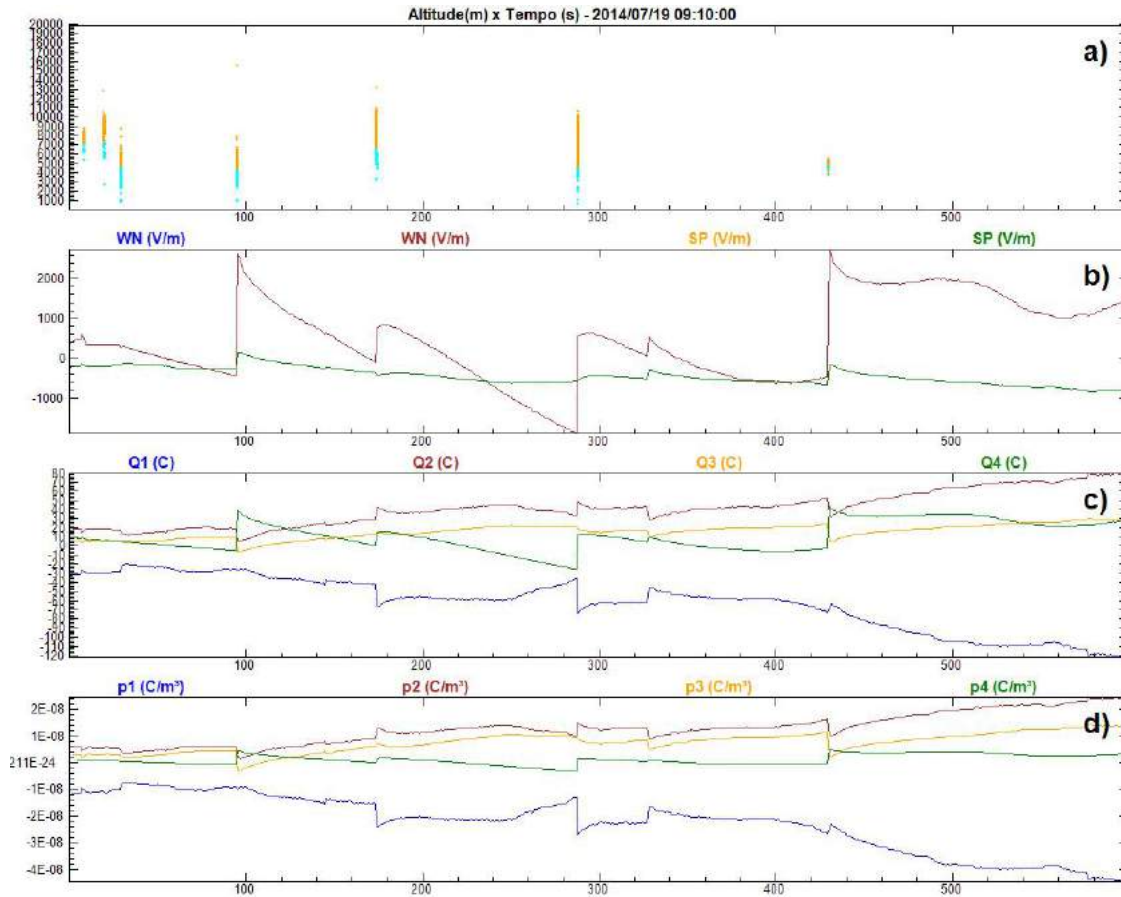


Figura 5.183 - a) Focos de radiação detectados pelo LMA, b) Campos elétricos (V/m), c) Cargas elétricas (C), d) Densidades de carga elétrica ( $C/m^3$ )

A Figura 5.184.a mostra as correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal. A Figura 5.184.b mostra o número de focos de radiação detectados (eixo vertical) em cada segundo do intervalo (eixo horizontal). A Figura 5.184.c mostra as variações das correntes elétricas (estimadas) em cada centro em ( $C/s^2$ ) no eixo vertical, e o tempo em segundos, no eixo horizontal.

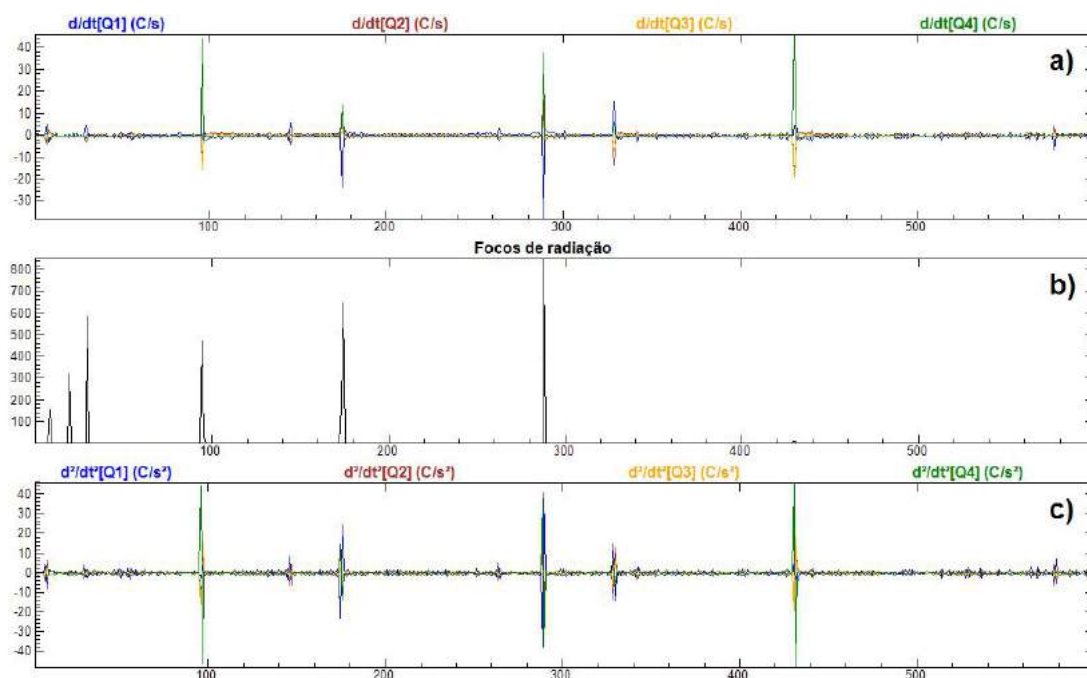


Figura 5.184 - a) Correntes elétricas (estimadas) nos centros de carga (C/s), b) número de focos de radiação detectados, c) e variação das correntes (estimadas) (C/s<sup>2</sup>)

As Figuras seguintes mostram o quanto a estrutura elétrica gerada reproduz as leituras de campo elétrico em solo através da comparação dos campos elétricos medidos experimentalmente com os campos diretos, isto é, a comparação dos valores experimentais com os valores que a estrutura encontrada produziria sobre o cada sensor.

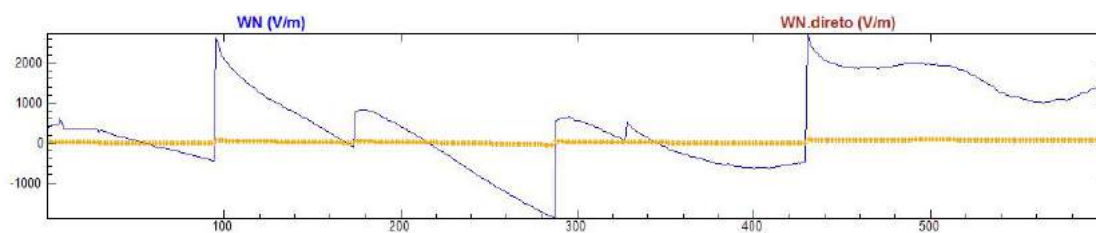


Figura 5.185 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor WN, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

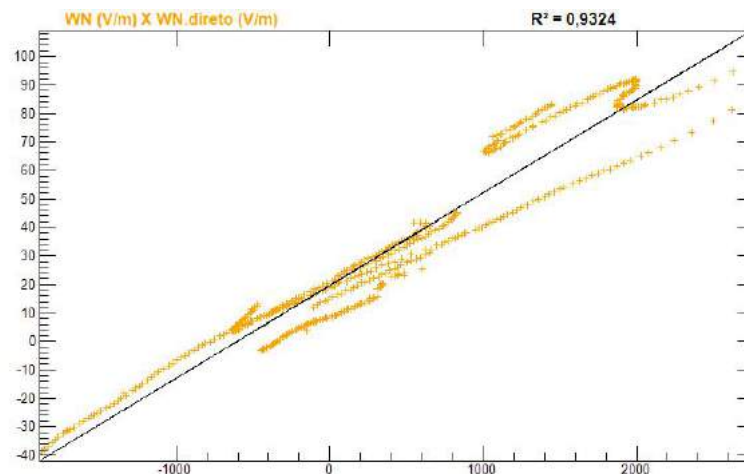


Figura 5.186 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor WN, eixos vertical e horizontal em (V/m)

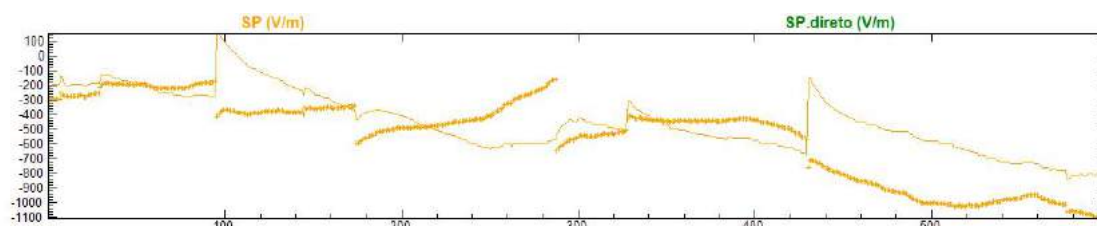


Figura 5.187 - Comparação dos campos elétricos experimentais e diretos para o sensor SP, eixo vertical em (V/m) e horizontal em (s)

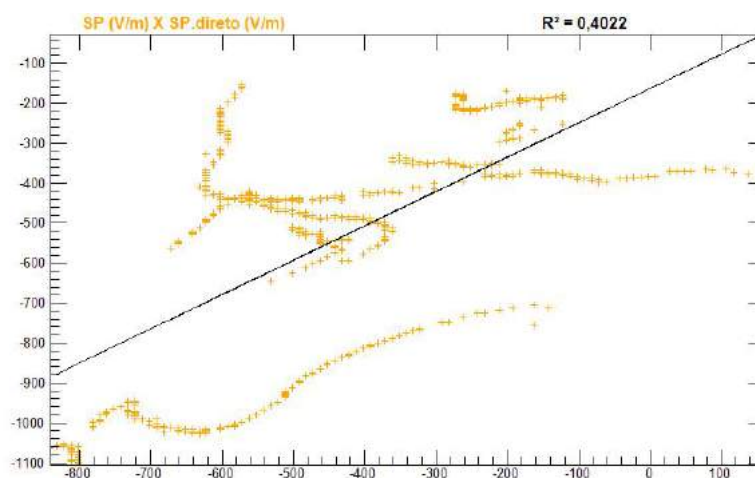


Figura 5.188 - Regressão linear dos valores diretos e experimentais para o sensor SP, eixos vertical e horizontal em (V/m)

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Tipo de estrutura elétrica

As figuras de 6.1, 6.1 e 6.3 mostram o quantitativo de estruturas dipolares e tripolares ou quadripolares encontradas, para todos os casos, para a BASE 1 e para a BASE 2 respectivamente. Nota-se que tanto para a primeira base quanto para segunda base as estruturas encontradas foram predominantemente dipolares ou tripolares. Dos 24 casos analisados apenas 3 foram estimados com estrutura elétrica quadripolar, 9 com estruturas tripolares e 12 com estruturas dipolares. Uma proporção semelhante foi encontrada em ambas as bases, contudo na BASE 2 um número maior de estruturas tripolares e quadripolar foi encontrado.

#### Tipo de estrutura - TODOS

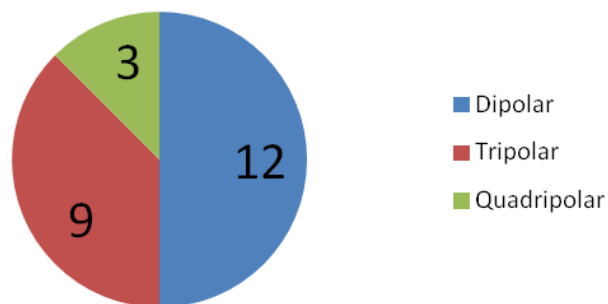


Figura 6.1 - Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar ou tripolar

### Tipo de estrutura - BASE 1



Figura 6.2 - Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar, tripolar ou quadripolar somente para BASE 1

### Tipo de estrutura - BASE 2

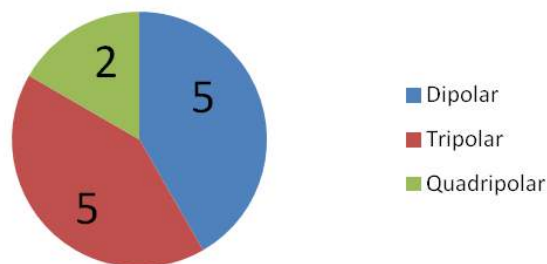


Figura 6.3 - Indicativo de quantos casos apresentaram estrutura dipolar, tripolar ou quadripolar somente para BASE 2

## 6.2 Altura dos centros

Conforme visto no estudo de casos, os casos da BASE 1 mostrados nos itens de 5.1 a 5.12 os centros de carga elétrica mais baixos não puderam ser detectados devido impossibilidade de detectar focos de radiação nestas alturas. Isto se dá devido a falta de linha de visada do centro da rede de LMA até o centro da rede de campo elétrico. Somente os focos de radiação da parte mais alta da nuvem puderam ser detectados na BASE 1, e conseqüentemente os primeiros centros de carga elétrica foram detectados a maiores alturas que na BASE 1. Outro fator importante a ser

destacado é o fato de que na BASE 1 o centro da rede de LMA se encontrava a 80km da região de interesse e a quantidade de focos de radiação detectados também foi reduzida. As Figuras 6.4 e 6.5 mostram um comparativo entre a o número de focos de radiação combinado ao número de sensores de campo elétrico utilizados em cada solução para as bases 1 e 2 respectivamente:

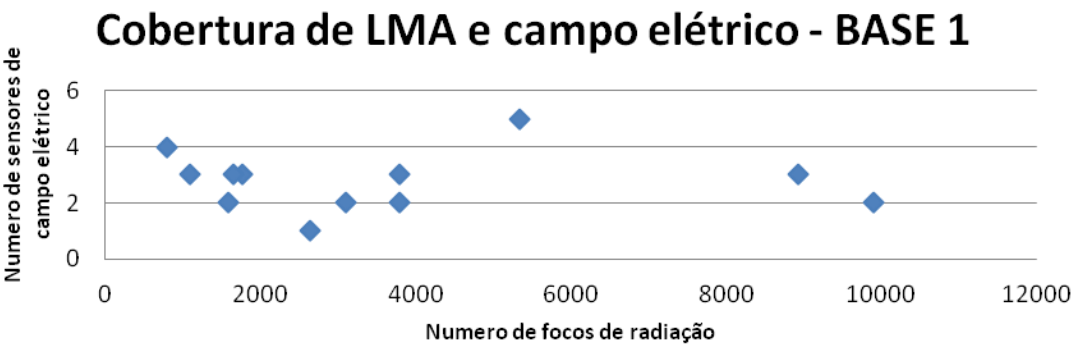


Figura 6.4 - Número de focos de radiação e sensores de campo elétrico em cada caso da BASE 1

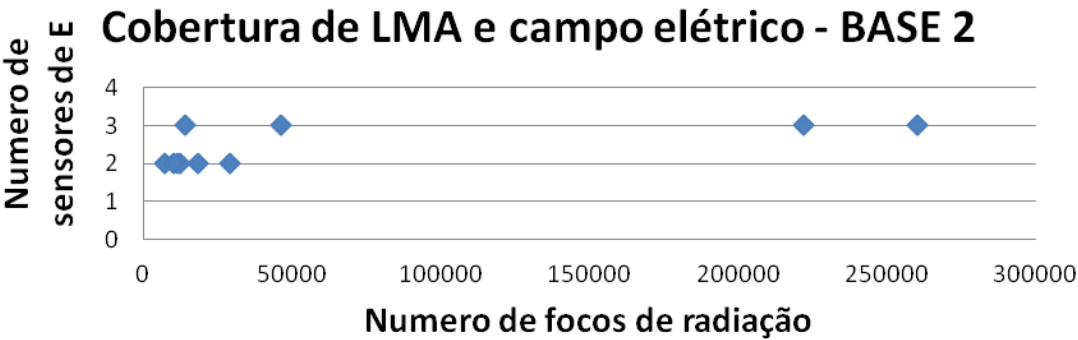


Figura 6.5 - Número de focos de radiação e sensores de campo elétrico em cada caso da BASE 1

As Figuras 6.6 e 6.7 mostram respectivamente as alturas médias dos centros para os casos da BASE 1 e da BASE 2, observe que as altitudes médias dos centos de carga elétrica, representadas nessas figuras pelas barras horizontais azuis, foram sistematicamente maiores para os casos da BASE 1. As barras acima da barra azul

representam o valor máximo e as abaixo o valor mínimo para cada altura, os centros estão enumerados em ordem crescente do mais baixo para o mais alto. É possível que apenas os focos mais potentes e mais altos de radiação na região do Vale do Paraíba tenham sido detectados durante a campanha devido a ausência de linha de visada até a base das nuvens, pois como já mencionado anteriormente a rede de LMA se encontrava a 80km da rede de campo elétrico.

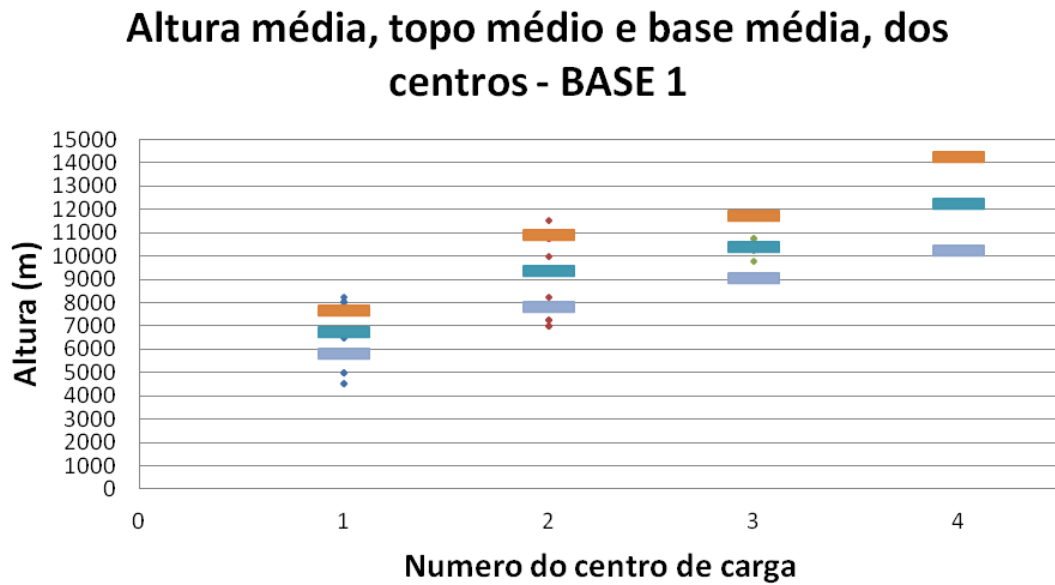


Figura 6.6 - Alturas média dos centros para BASE 1

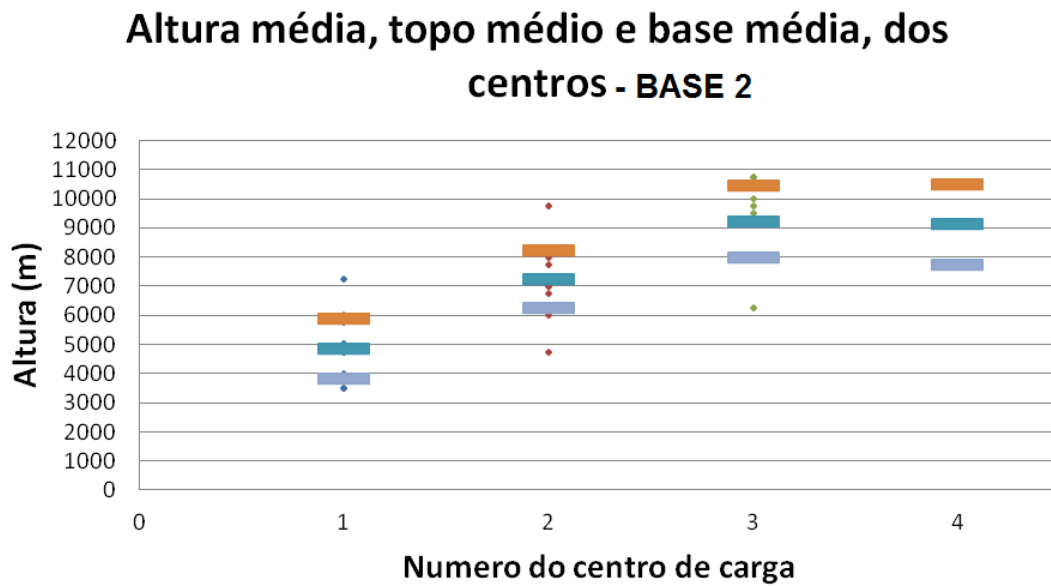


Figura 6.7 - Alturas média dos centros para BASE 2

### 6.3 As polaridades dos centros

As figuras 6.8, 6.9 e 6.10 mostram um comparativo importante para aferição do método. Em cada caso, e para cada centro de carga elétrica verificou-se se o número de vezes em que a polaridade calculada pelo método inverso coincidia com a polaridade calculada somente pelo LMA através da propagação do líder bidirecional. Verificou-se que o método acertou a polaridade de 53 dos 63 centros de carga elétrica calculada, tomando-se como base a polaridade determinada pelo LMA, isto é 84%. O acerto apenas para o caso da BASE 1 foi de 83%, e para os casos da BASE 2 foi de 85%. Este resultado confirma o resultado de [Wiens \(2005\)](#) e fornece embasamento para o método inverso utilizado aqui. O método inverso erra mais sistematicamente o sinal dos centros de carga mais altos. Não existe uma explicação ainda para esse fato mas possivelmente devido a distância desses centros à rede de sensores deve produzir alguma interferência na precisão do método.

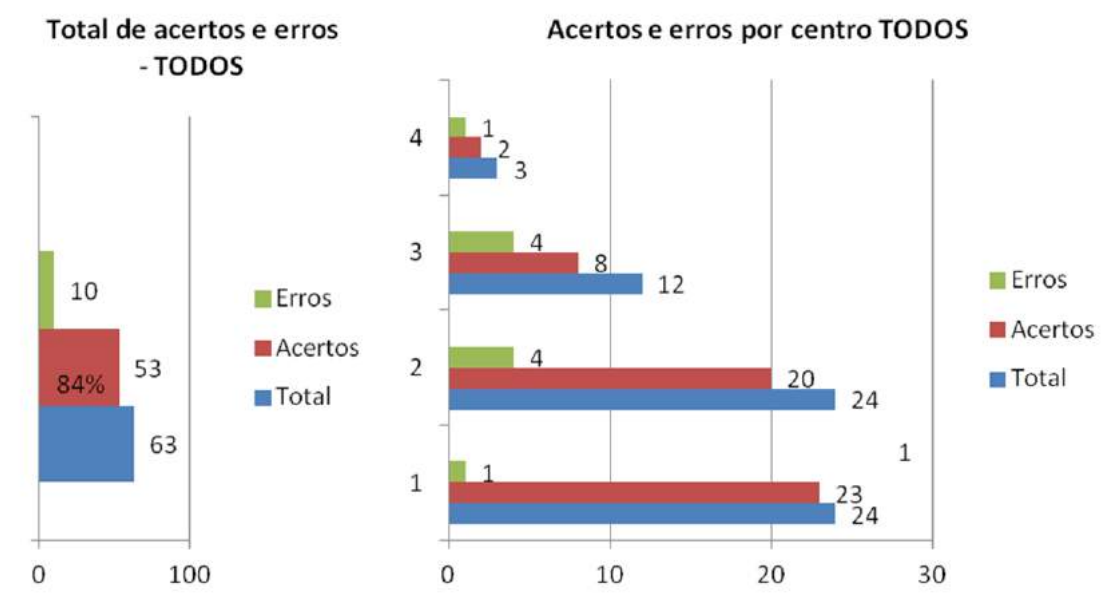


Figura 6.8 - Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda)

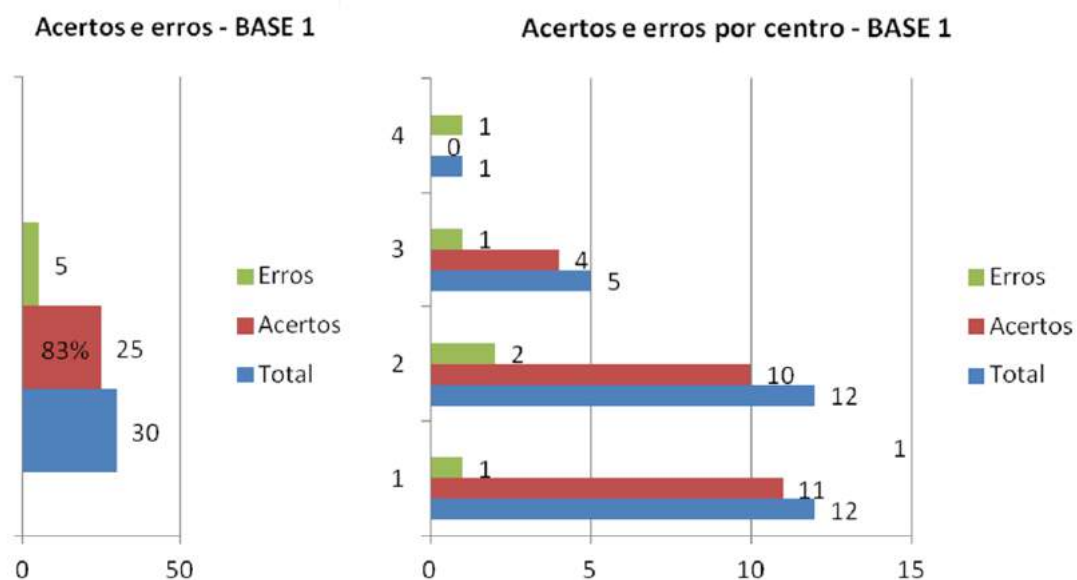


Figura 6.9 - Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda), para BASE 1

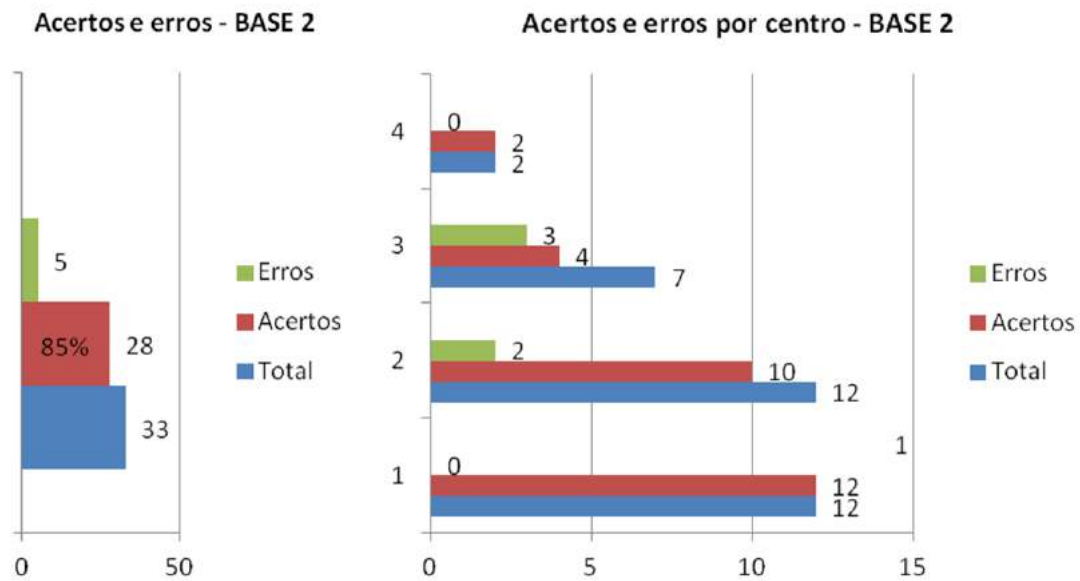


Figura 6.10 - Indicativo de quantas vezes a polaridade calculada pelo método inverso foi igual a polaridade determinada pela propagação dos líderes bidirecionais para cada centro (direita) e total (esquerda), para BASE 2

#### 6.4 As densidades de carga

Uma comparação adicional dos valores das densidades de carga elétrica encontrados nos casos estudados com os valores da literatura. Em todos os casos, a magnitude das densidades de carga, se manteve próximo aos valores esperados de acordo com as medidas experimentais realizadas por [Marshall et al. \(1995\)](#), [Stolzenburg et al. \(1998\)](#), [Zhao et al. \(2010\)](#). O lado esquerdo das Figuras 6.11 e 6.12 contém medidas experimentais realizadas por sondas em balão [Stolzenburg et al. \(1998\)](#). O centro da figura indica a polaridade predominante em todos os casos para cada centro. O lado esquerdo das figuras mostra as densidades de carga elétrica médias separadas por polaridade e por centro. Observa-se que tanto nas medidas experimentais quanto os valores estimados pelo método uma polaridade predominante idêntica nos primeiros centros da nuvem de baixo para cima em: positivo, negativo e positivo.

Os valores típicos de densidade de carga elétrica negativa e positiva estimados pelo método foram respectivamente:  $-21,1nC/m^3$  e  $9nC/m^3$ , e confirmam os resultados de [Stolzenburg et al. \(1998\)](#), [Zhao et al. \(2010\)](#), [Marshall et al. \(1995\)](#) que através da utilização de sondas em balões mediram valores de densidade negativa e positiva respectivamente da ordem de:  $-11nC/m^3$  e  $5nC/m^3$ . Tanto os valores de mínimo

quanto de máximo se encontram na mesma ordem de grandeza das medidas experimentais. Realizadas por [Stolzenburg et al. \(1998\)](#). Nas medidas realizadas por [Zhao et al. \(2010\)](#) as densidades mínima e máxima foram aproximadamente  $-2nC/m^3$  e  $1nC/m^3$ , e o padrão da polaridade predominante nos primeiros centros de baixo para cima também é visto.

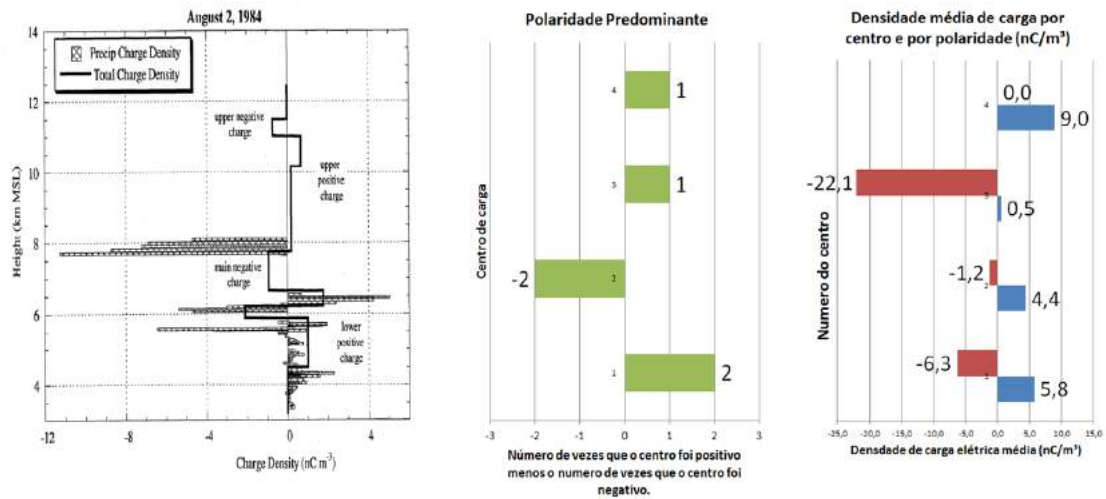


Figura 6.11 - Comparação das polaridades predominantes e das densidades de carga da BASE 1 (centro) com medidas experimentais realizadas por sonda em balão(esquerda) e as densidades médias de carga obtidas pelo método (direita).  
Fonte: Figura a esquerda adaptada de [Stolzenburg et al. \(1998\)](#)

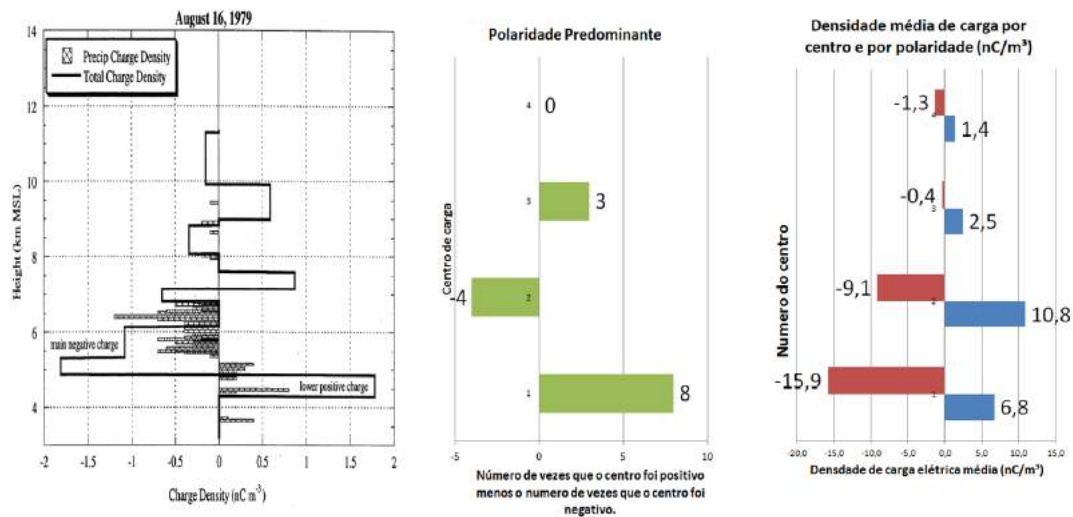


Figura 6.12 - Comparação das polaridades predominantes e das densidades de carga da BASE 2 (centro) com medidas experimentais realizadas por sonda em balão(esquerda) e as densidades médias de carga obtidas pelo método (direita).  
Fonte: Figura a esquerda adaptada de [Stolzenburg et al. \(1998\)](#)

## 6.5 As magnitudes das cargas elétricas

A Figura 6.13 mostra as cargas líquidas médias por centro e por polaridade para as duas bases. Verifica-se que os valores das cargas elétricas líquidas contidas nos centros variou consideravelmente entre BASE 1 e a BASE 2. Isto possivelmente devido ao fato de que os cetros mais baixos puderam ser melhor mapeados na BASE 2 devido a falta de linha de visada na BASE 1. Também vale ressaltar que na BASE 1 apenas uma nuvem foi quadripolar e portanto o os valores médios do 4º centro são referentes a apenas uma nuvem.

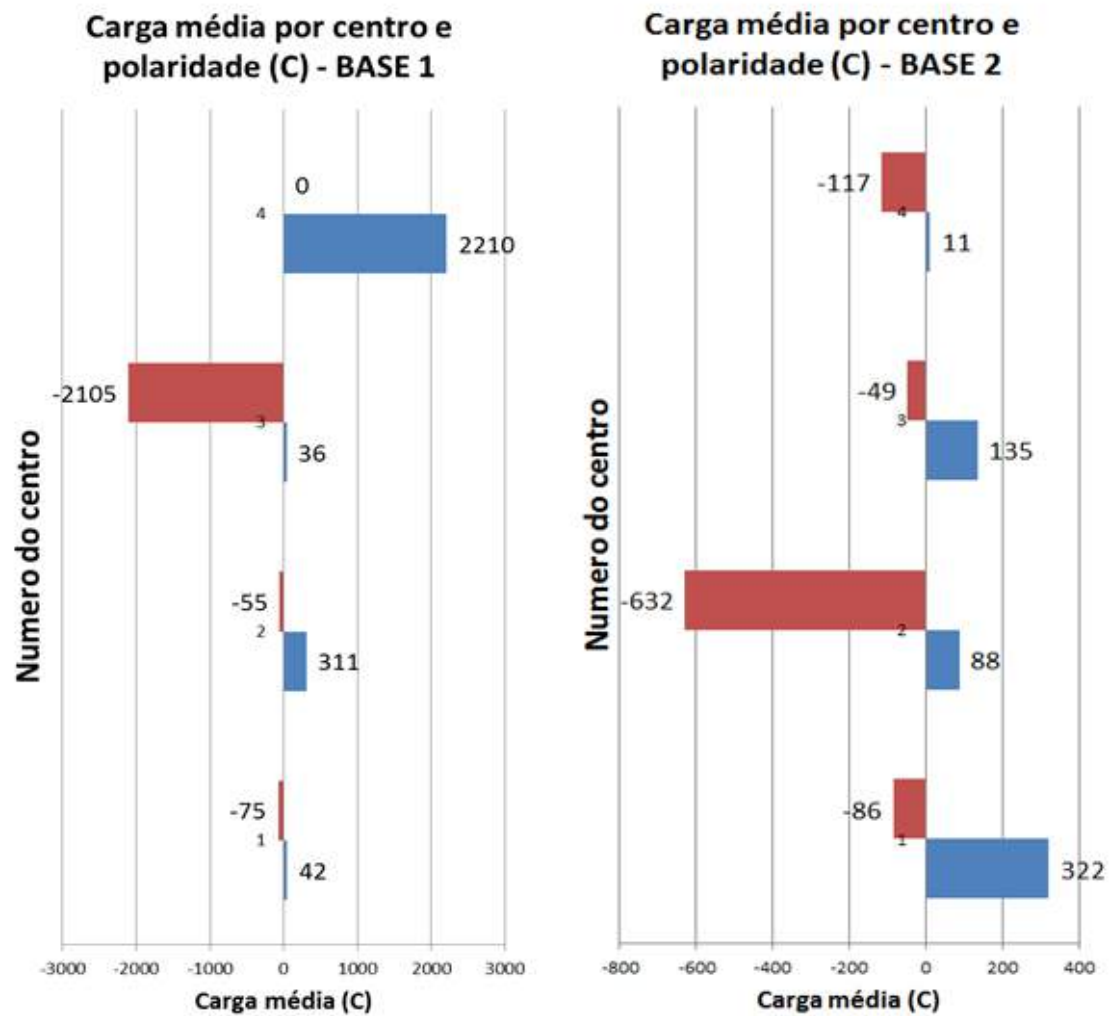


Figura 6.13 - Comparativo entre as duas bases para as cargas líquidas médias por centro e por polaridade. Barras vermelhas indicam a média dos valores negativos e azuis indicam a média dos valores positivos para cada centro

## 6.6 As formas dos centros

Nas Figuras 6.14 e 6.15 mostram as dimensões médias dos centros de carga elétrica. Este resultado confirma as hipóteses apresentadas na literatura de que os centros de carga elétrica nas nuvens de tempestade possuem forma de discos dispostos sobre a horizontal (MARSHALL et al., 1995). Observe que a dimensão vertical é sempre muito menor que as dimensões horizontais.

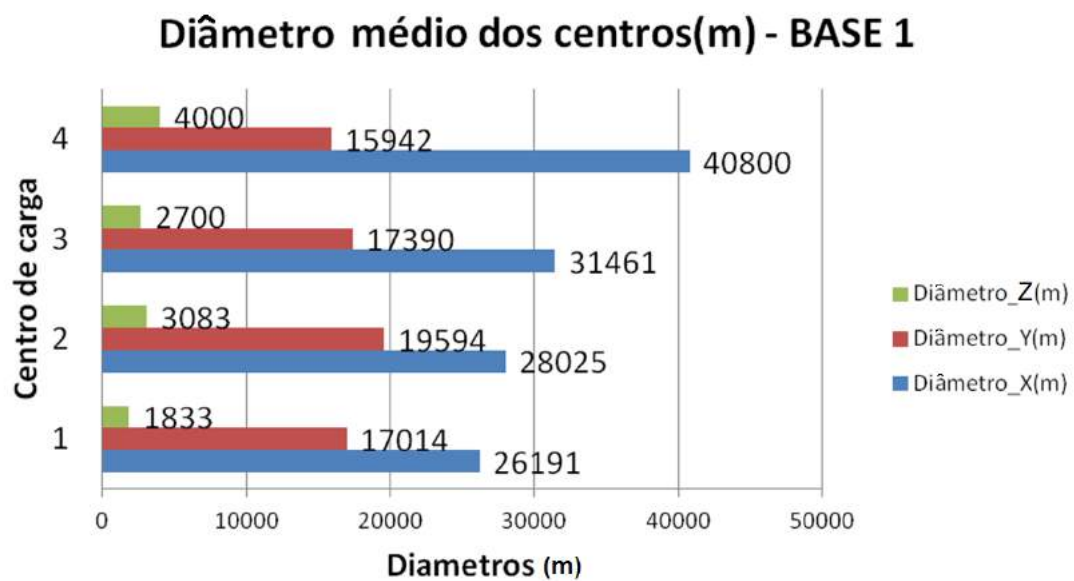


Figura 6.14 - Diâmetros médios para BASE 1

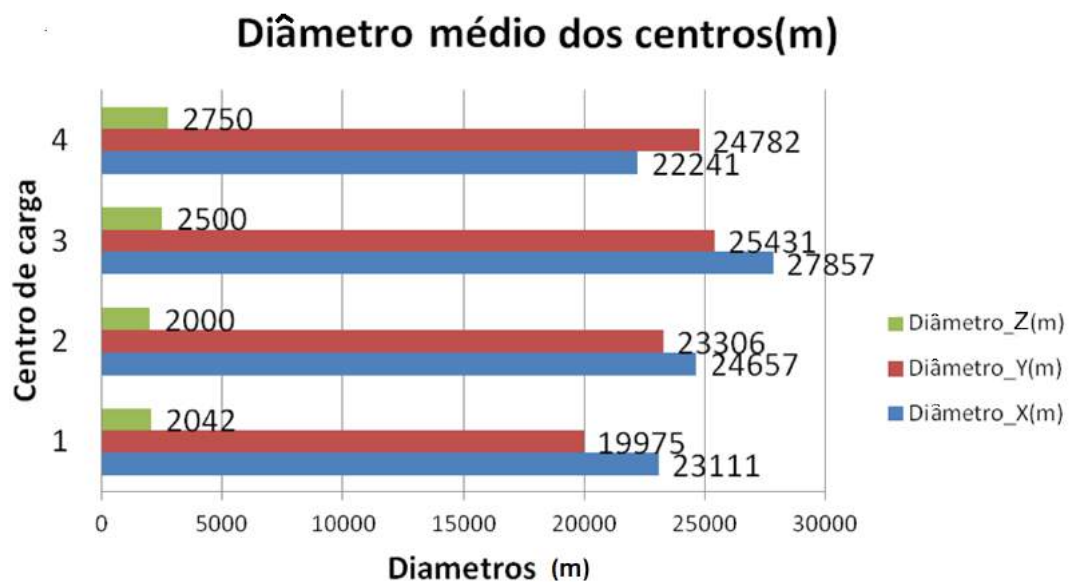


Figura 6.15 - Diâmetros médios para BASE 2

## 6.7 O volume dos centros

Nas Figuras 6.16 e 6.17 mostram os volumes dos centros de carga elétrica para cada centro. Note que o comportamento do volume em relação ao centros é distinto nas duas bases. O volume dos centros de carga elétrica nos casos da BASE 1 tentem a aumentar com a altura, enquanto que na BASE 2 os volumes dos centros de carga elétrica são maiores mais ao centro da nuvem.

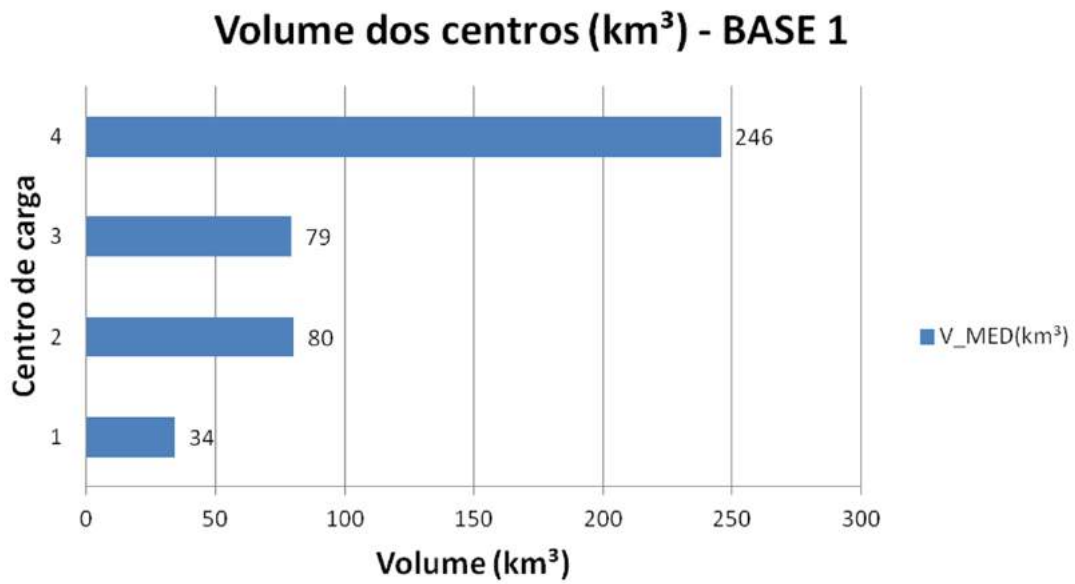


Figura 6.16 - Diâmetros médios para BASE 1

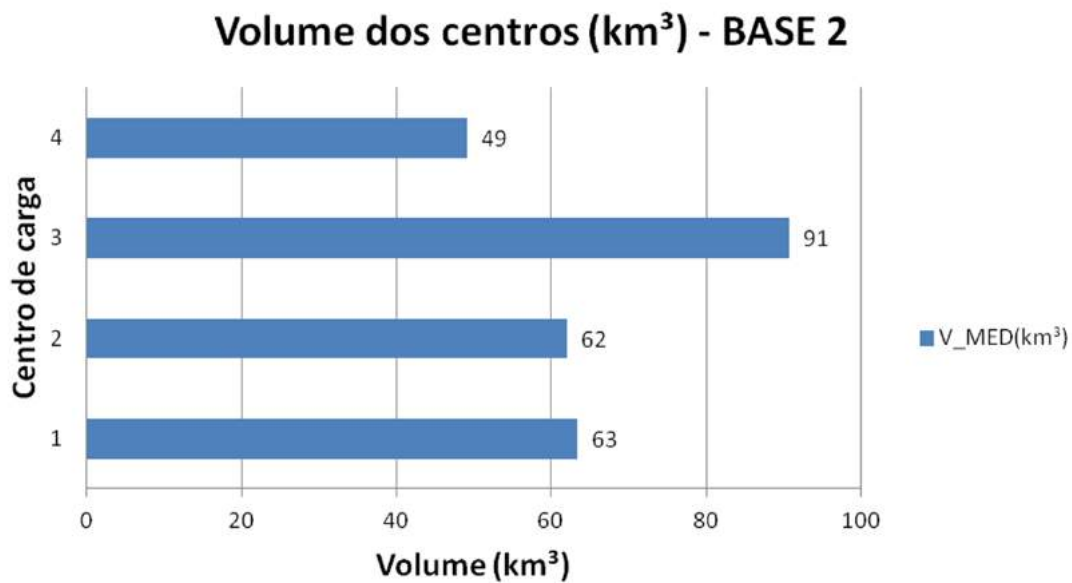


Figura 6.17 - Diâmetros médios para BASE 2

## 6.8 Comparação com RADAR

Outro importante resultado obtido, conforme mostrado nos estudos de casos, é o fato que em todos os 12 casos da BASE 1 os volumes dos centros estavam parcialmente ou totalmente compreendidos em regiões da nuvem de tempestade com refletividades de RADAR maiores que 20 dBZ o que pode ser mais objetivamente visto na projeção do plano horizontal nas Figuras 5.1.c até 5.96.c. Este resultado está de acordo com os resultados obtidos por [Murphy et al. \(1996\)](#) que ao analisar 394 descargas elétricas verificou que 58% das descargas admitiam soluções de estrutura monopolar ou dipolar e ao cruzarem estes dados com leituras de radar, identificaram que os pontos de solução coincidiam com regiões entre 25 e 35dBZ. Esta situação contudo não ocorre em relação a altura. Em 6 de 12 casos da BASE 1 aparecem centros de carga em regiões de baixa refletividades <10dBZ as quais não foram representadas nas Figuras 5.1.b até 5.96.b e Figuras 5.1.d até 5.96.d. Isto ocorre devido ao fato que em certas alturas podem existir pequenos cristais de gelo (na região dos centros de carga elétrica) que seriam detectados pelo radar com baixa refletividade (<10dBZ). Além disso nestes casos não havia dados de RADAR para baixas refletividades, e sim o PseudoCAPPI. Esta faixa de refletividade portanto não foi representada nas Figuras.

## 6.9 Campo elétrico baixo

Em muitas das soluções mostradas no Item 5, foram incluídas medidas de campo elétrico com valores próximos a zero, isto para enriquecer a discussão. Conforme visto nos Itens de 5.4 e 5.9. Nestes casos alguns sensores de campo elétrico apresentam valores próximos a zero, e aparentemente não sentem a presença da nuvem de tempestade, consequentemente existe mais erro na determinação da estrutura elétrica. Estes valores podem ser baixos devido a duas causas: a) os sensores estão a distancias grandes dos centros de carga elétrica (Item 5.4, por exemplo), onde não sentirão a influencia destes centros; b) os sensores estão em regiões de transição do campo elétrico próximo a nuvem (Item 5.9, por exemplo). Na segunda possibilidade, isto é, sendo valores de campo elétrico em transição de sinal próximos a nuvem, seria necessário um número maior de sensores de campo elétrico espalhados próximos ao que registrou valores baixos para realizar um cálculo mais preciso. Com um número maior de sensores de campo elétrico portanto, seria possível utilizar estes valores que registram campo elétrico baixo próximo a nuvem sem comprometer o calculo da estrutura elétrica da nuvem. As figuras 6.18 e 6.19 mostram a o número de sensores de campo elétrico utilizados nas soluções durante as duas campanhas:

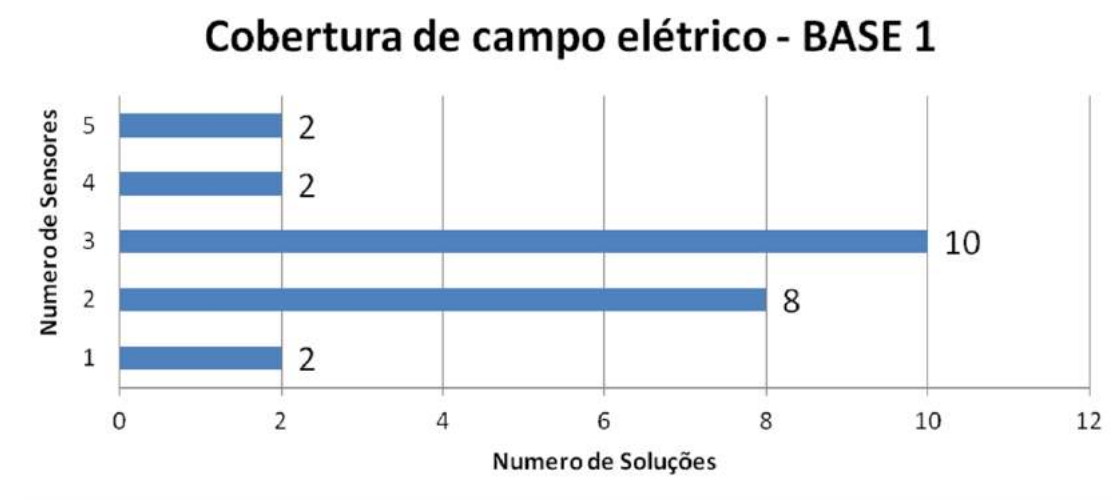


Figura 6.18 - Cobertura de campo elétrico para BASE 1

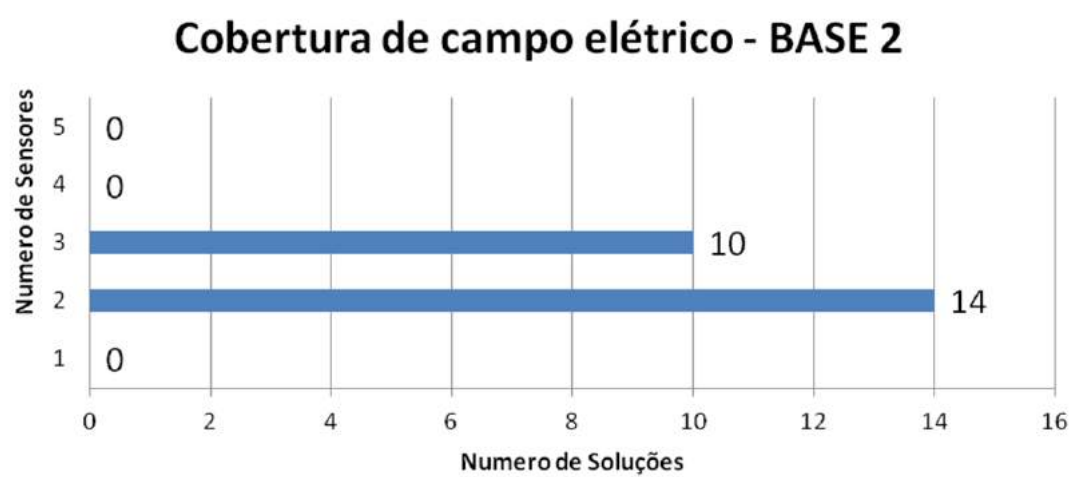


Figura 6.19 - Cobertura de campo elétrico para BASE 2



## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta pela primeira vez um método que combina medidas de LMA e campo elétrico para determinar a densidade de carga elétrica no interior das nuvens de tempestade. Pela utilização do método desenvolvido nessa tese, é possível calcular a posição, a forma geométrica, e os volumes, dos centros de carga dentro da nuvem pelo uso do LMA, e a densidade de carga elétrica em cada centro pelas medidas de campo elétrico em solo. Ao contrário do uso de sondas que estimam a densidade de carga dentro das nuvens baseado na medida pontual do campo elétrico vertical ao longo da trajetória da sonda, o método apresentado neste trabalho necessita de medidas de campo elétrico (eletrostático) que podem ser feitas com sensores no solo e por terem um alcance maior, podem mapear a distribuição de cargas em toda a nuvem. Foram escolhidos 24 casos, de nuvens com máximas refletividades de radar e máxima atividade elétrica concentrada próxima a rede de sensores de campo elétrico a fim de estimar-se as densidades de carga elétrica em cada um dos seus centros de carga elétrica. As estruturas encontradas foram predominantemente dipolares ou tripolares. Dos 24 casos analisados apenas 3 foram estimados com estrutura elétrica quadripolar, 9 com estruturas tripolares e 12 com estruturas dipolares. Uma proporção semelhante foi encontrada em ambas as bases, contudo na BASE 2 um número maior de estruturas tripolares e quadripolar foi encontrado. Verificou-se que o método acertou a polaridade de 53 dos 63, isto é 84% centros de carga elétrica estimados tomando-se como referencia a polaridade determinada pelo LMA segundo a teoria do líder bidirecional (MAZUR, 2002; WIENS, 2005). Os acertos das polaridades considerando-se apenas os casos da BASE 1 foram 24 entre 30 centros estimados, ou seja 83%. Para os casos da BASE 2 foram 28 acertos em 33 centros estimados, isto é 85%. Este resultado confirma o resultado de Mazur (2002), Wiens (2005). Valores típicos de mínima e máxima densidade de carga elétrica estimados pelo método foram:  $-21,1nC/m^3$  e  $9nC/m^3$ , e confirmam os resultados de Stolzenburg et al. (1998), Zhao et al. (2010), Marshall et al. (1995) que através da utilização de sondas em balões mediram valores de mínima e máxima densidade de aproximadamente  $-11nC/m^3$  e  $5nC/m^3$ . Desta forma tanto as magnitudes dos valores quanto as polaridades predominantes em cada centro coincidiram com os trabalhos experimentais. Verificou-se ainda que o método inverso erra mais sistematicamente o sinal dos centros de carga mais altos, que estão entre 8 e 12 km de altura. Verificou-se também a necessidade de julgar a inclusão ou não das medidas de campo elétrico com valores muito próximos ao zero. Pois ao incluir estas medidas na solução, havendo poucos sensores, elas podem aumentar consideravelmente o erro da solução. Medidas com valores muito baixos podem ser tanto devido a não

influencia da nuvem ou a transição do campo elétrico na posição do sensor. Em apenas alguns casos neste trabalho foram admitidos valores baixos para enriquecer a discussão. Recomenda-se para estudos futuros que este trabalho seja realizado com uma rede densa de sensores a fim de se esclarecer melhor esta questão. Podemos concluir através da análise realizada, e comparações de resultados que este método permite estimar a posição, a forma, o volume dos centros de carga, a magnitude das cargas elétricas neles contidos e finalmente fornecer uma estimativa das densidades de cargas elétricas no interior das nuvens de tempestade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, R. I. **Sensoriamento Remoto e Modelagem dos Processos de Formação da Precipitação - Eletrificação das Nuvens**. São Paulo, SP, 2011. Disponível em: <<http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/rachel/EletricidadeAtmosferica.pdf>>. Acesso em: 05 agosto 2015. 13
- ANGELIS, C. F. **Radar Meteorológico: Teoria, Conceitos e Aplicações**. São Paulo, SP, 2011. Disponível em: <[http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/angelis/UFRJ\\_radar.pdf](http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/saoluis/curso/angelis/UFRJ_radar.pdf)>. Acesso em: 05 agosto 2015. 16, 19
- BECCARIA, G. B. **Dell'elettricismo artificiale e naturale**. Turín: Phil. Trans, 1753. 1
- BLAKESLEE, R. J.; BAILEY, J. C.; CAREY, L. D.; GOODMAN, S. J.; RUDLOSKY, S. D.; ALBRECHT, R.; MORALES, C. A.; ANSELMO, E. M.; NEVES, J. R. São paulo lightning mapping array (sp-lma): Network assessment and analyses for intercomparison studies and goes-r proxy activities. **CHUVA Workshop**, v. 8 maio 2013, 2013. 13
- BRAUN, F. A life of the nobel prizewinner and inventor of the cathode-ray oscilloscope. **MIT Press**, 1981. 2
- BRUNING, E. C.; MACGORMAN, D. R. Theory and observations of controls on lightning flash size spectra. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 70, p. 4012, 2013. 2, 24, 25, 26, 37
- CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; TUEL, J. V. Global atmospherics, inc. tucson arizona, u.s.a lightning detection methods and meteorological applications. **IV International Symposium on Military Meteorology**, 2000. 12
- D'ALIBARD, T. F. Letter to acad. de sci. paris. **Gentleman's Magazine**, le 13 mai, 1752. 1
- FRANKLIN, B. By a number of experiments, lately made in philadelphia, several of the principle properties of the electrical fire were demonstrated, and its effect shewn. **Gentleman's Magazine**, January 1750, 1750. 1
- GLOBAL ATMOSPHERICS. **IMPACT ES Advanced Lightning Direction Finder**: Model 141-tes aldf: installation, operation and maintenance manual. Tucson, ago. 2002b. 386 p. 11

GRAY, F. R. S. A letter from stephen gray, f. r. s. to dr. mortimer, secr. r. s. containing some experiments relating to electricity. **Phil. Trans.**, v. 39, p. 166–170, 1735. 1

HELLIWELL, R. A. **Whistlers and Related Ionospheric Phenomena**. California: Stanford University Press, 1965. 9

JACOBSON, E. A.; KRIDER, E. P. Electrostatic field changes produced by florida lightning. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, p. 103–117, 1976. 5

KELVIN, L. Roy. instn. lecture. p. 208–226, 1860. 2

KREHBIEL, P. R.; BROOK, M.; MCCRORY, R. A. Analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, 1979. 5

KRIDER, E. P. Electric field changes and cloud electrical structure. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 145–13,149, 1989. 5

\_\_\_\_\_. 75 years of research on the physics of a lightning discharge. **American Meteorological Society**, v. 11, p. 321–350, 1996. 10

\_\_\_\_\_. **Atmospheric Electricity Lecture Notes**. Arizona, EUA, 2011.  
Disponível em: <[http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATM0489\\_online/CONTENTS.html](http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATM0489_online/CONTENTS.html)>. Acesso em: 05 agosto 2015. 4, 12

LEITÃO, J. M. **Sistemas de Telecomunicações II - Sistemas de Radar**. São Paulo, SP, 2011. Disponível em:  
<[https://web.fe.up.pt/~mleitao/SRCO/Teoricas/SRCO\\_RAD.pdf](https://web.fe.up.pt/~mleitao/SRCO/Teoricas/SRCO_RAD.pdf)>. Acesso em: 05 agosto 2015. 16, 17

LEMONNIER, L. Memoires de l'academie des sciences. v. 2, p. 233, 1752. 1

LIVINGSTON, M. J.; KRIDER, E. P. Electric fields produced by florida thunderstorms, journal of geophysical research. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, 1978. 6

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms**. [S.l.]: Oxford University, 1998. 118-123 p. 7

MAIER, L. M.; KRIDER, E. P. The charges that are deposited by cloud-to-ground lightning in florida. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. 13, p. 289, 1986. 5

MALAN, D. J. **Physics of lightning**. London: The English Universities Press, Ltd., 1963. [10](#), [11](#)

MARSHALL, T.; RISON, W.; RUST, M.; STOLZENBURG, J. W.; WINN, W. Rocket and balloon observations of electric field in two thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. 20, p. 815–20,828, 1995. [xi](#), [xiii](#), [7](#), [50](#), [179](#), [182](#), [189](#)

MARSHALL, T. C.; STOLZENBURG, M. Estimates of cloud charge densities in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 16, p. 19,759–19,775, 1998. [7](#), [8](#)

MARSHALL, T. C.; STOLZENBURG, M.; COLEMAN, L.; KREBIEL, R. R.; HAMLIN, T.; THOMAS, J.; RISON, W. Observed electric fields associated with lightning initiation. **Journal Research Letters**, v. 32, n. L03813, 2005. [8](#)

MAZUR, V. Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 331–332, 2002. [xi](#), [xiii](#), [22](#), [23](#), [24](#), [26](#), [37](#), [38](#), [45](#), [189](#)

MEJU, M. A. **Meju Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1994. 118-123 p. ISBN-10: 1560800275. [48](#)

MONTEIRO, H. J. **Simulação do perfil do campo elétrico e o cálculo do problema inverso em nuvens eletricamente carregadas, com estruturas tri e quadripolares**. Dissertação de Mestrado em Física — Universidade Federal do Mato Grosso do Sul(UFMS), Mato Grosso do Sul, 2011. [51](#)

MURPHY, J. M.; KRIDER, E. P.; MAYER, E. Lightning charge analyses in small convection and precipitation electrification (cape) experiment storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. d23, p. 29615–29626, 1996. [6](#), [185](#)

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G. R. Lightning ground flash measurements over the contiguous united states: 1995 to 1997. **Mon. Wea. Rev.**, v. 127, n. 11, p. 2693–2703, 1999. [11](#)

PEZZÈ, M.; M., Y. **Teste e Análise de Software: Processos, Princípios e Técnicas**. São Paulo, SP: Bookman Editora, 1994. [42](#)

POELMAN, D. **On the Science of Lightning: An Overview**. 2010. Disponível em: <[http:](#)

[//www.meteo.be/meteo/download/en/4549355/pdf/rmi\\_scpub-1389-2.pdf](http://www.meteo.be/meteo/download/en/4549355/pdf/rmi_scpub-1389-2.pdf)>.

Acesso em: 05 agosto 2015. 12

QIE, X.; KONG, X.; ZHANG, G.; ZHANG, T.; YUAN, T.; ZHOU, Y.; ZHANG, Y.; WANG, H.; SUN, A. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of qinghai-tibetan plateau.

**Atmospheric Research**, v. 76, p. 231–246, 2003. 6

R., J. Method lma-ef for determination of position and intensity of electric charges inside thunderstorm clouds. **XV International Conference on Atmospheric Electricity**, 2014. 51

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 21

RISON, W.; THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P. R.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. A gps-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central new mexico. **Atmospheric Sciences**, v. 10, n. 1029, 1999. 14, 15, 26, 37

SILVEIRA, S. W. G. **Um estudo sobre os dispositivos de localização de descargas elétricas**. Dissertação de Mestrado em Física — Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), Mato Grosso do Sul, 2004. 12

SMITH, R. L.; ANGERAMI, J. J. Magnetospheric properties deduced from ogo observations of ducted and nonducted whistlers. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, n. 1, 1968. 9

SONNADARA, U.; COORAY, V.; FERNANDO, M. Lightning radiation field spectra of cloud flashes. **International Conference on Lightning Protection**, 2004. 10

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; COLEMAN, L.; KREBIEL, R. R.; HAMLIN, T.; THOMAS, J.; RISON, W. Electrical structure in thunderstorm convective regions. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 12, p. p12,059–12,078, 1998. xi, xiii, 7, 50, 179, 180, 181, 189

STOREY, L. R. O. An investigation of whistling atmospherics. **Phil. Trans.**, n. 246, p. 113, 1953. 9

TARANTOLA, A. **Inverse Problem Theory, methods for data fitting and model parameter estimation**. Paris, France: Siam, 2005. ISBN 0-89871-572-5.

48

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Siam, 1987. 356-377 p. ISBN 0-89871-572-5. [10](#), [12](#)

VINE, D. M. L.; ANGERAMI, J. J. Review of measurements of the rf spectrum of radiation from lightning. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 37, p. 195–204, 1987. [10](#)

WAHLIN, M. A. **Atmospheric Electrostatics**. Colorado, USA: Research Studies Press, 1987. 106 p. [2](#), [3](#)

WALL, W. Experiments of the luminous qualities of amber, diamonds, and gum lac, by dr. wall, in a letter to dr. sloane, r. s. secr. **Phil. Trans.**, v. 26, p. 313–324, 1708. [1](#)

WIENS, K. C. **Kinematic, microphysical, and electrical structure and evolution of thunderstorms during the severe thunderstorm electrification and precipitation study**. Tese de Doutorado — Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2005. [xi](#), [xiii](#), [26](#), [28](#), [37](#), [38](#), [45](#), [177](#), [189](#)

WIENS, K. C.; RUTLEDGE, S. A.; TESSENDORF, S. A. The 29 june 2000 supercell observed during steps. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, p. 4151–4177, 2005. [14](#), [24](#), [26](#), [37](#)

WILLIAM, K. J. Problem in lightning physics-the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 26, p. 313–324, 1990. [6](#)

WILLIAMS, E. R. Problem in lightning physics the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 15, p. 91–108, 2006. [21](#), [22](#)

WILSON, C. Lightning, solar flares and radio galaxies. **Phil. Trans.**, v. 221, n. 73, 1925. [2](#)

ZHAO, Z.; QIE, X.; ZHANG, T.; ZHANG, T.; H., Z.; WANG, Y.; SHE, Y.; SUN, B.; WANG, H. Electric field soundings and the charge structure within an isolated thunderstorm. **Chinese Science Bulletin**, Mach 2010, n. 9, p. 872–876, 2010. [xi](#), [xiii](#), [8](#), [9](#), [50](#), [179](#), [180](#), [189](#)