



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.19.13.59-TDI

ESTUDO DE EMISSÕES DE ALTA ENERGIA PRODUZIDAS POR CAMPOS ELÉTRICOS DE RELÂMPAGOS E NUVENS DE TEMPESTADES

Iver Ronald Winkelmann Mendizabal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pela Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares, aprovada em 01 de abril de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GBBC7E>>

INPE
São José dos Campos
2014

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

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

Dr^a 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)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.19.13.59-TDI

ESTUDO DE EMISSÕES DE ALTA ENERGIA PRODUZIDAS POR CAMPOS ELÉTRICOS DE RELÂMPAGOS E NUVENS DE TEMPESTADES

Iver Ronald Winkelmann Mendizabal

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pela Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares, aprovada em 01 de abril de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GBBC7E>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Mendizabal, Iver Ronald Winkelmann.

M523e Estudo de emissões de alta energia produzidas por campos elétricos de relâmpagos e nuvens de tempestades / Iver Ronald Winkelmann Mendizabal. – São José dos Campos : INPE, 2014. xix + 74 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.19.13.59-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadora : Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares.

1. Emissões de alta energia. 2. Tempestades. 3. Testes estatísticos. 4. Observatório de raios cósmicos Pierre Auger. 5. Lightning imaging sensor-LIS. I. Título.

CDU 551.594.21



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

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

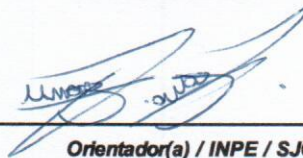
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Ezequiel Echer



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Fernanda de São Sabbas Tavares



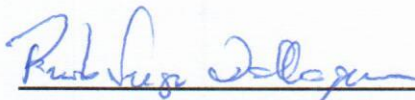
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Delano Gobbi



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Renato Sérgio Dallaqua



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

Dr. Inacio Malmonge Martin



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Iver Ronald Winkelmann Mendizabal**

São José dos Campos, 01 de Abril de 2014

A Carola Ayllon, quem sacrificou muito por este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha avó Arminda, meu avô Felix e meu irmão Adhemar, por todo o apoio e bons conselhos durante meus anos de estudo e por sempre terem acreditado em mim.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Fernanda São Sabbas, pelas orientações, apoio para participar em congressos e, principalmente, por sempre ter acreditado em mim, sobre tudo nos momentos mais difíceis. Ao Dr. Xavier Bertou, quem gentilmente cedeu parte dos dados e ajudou com orientações para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas, amigos e amigas de turma: Regia, Tardelli, Bárbara, Carina, Jonah, André e Jeferson, pelo companheirismo e amizade. Aos amigos de moradia: Carlos, Juliano, Caitano, Rodrigo, Vandoir, Ricardo, Ramón, Binod, Baburam, David e Raul, por estarem aí nos momentos bons quanto nos difíceis.

Ao Rafael, quem me ajudou muito para chegar ao INPE. Ao Marcos, por toda a ajuda na minha chegada a São José dos Campos, em especial pela paciência com a língua.

Aos amigos de churrascos, almoços, viagens e do dia a dia: Marcio, Cláudia, Joiner, Varlei, David-peruano, Manilo, Regia, Carina, Arian, Larissa, German, Julio e Jenny. Em especial ao Siomel e Manuel, pela amizade, conversas, e todos os ensinamentos.

Ao povo brasileiro que, através da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), me deu o auxílio financeiro para realizar meu mestrado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

RESUMO

Embora teorizada na década de 1920, a emissão de partículas e fótons energéticos por nuvens de tempestade e relâmpagos vem sendo alvo de intenso estudo apenas nas últimas décadas. Essa nova área de pesquisa, denominada como Física Atmosférica de Alta Energia, ganhou grande interesse com a descoberta inicial de flashes de raios gama com origem terrestre, registrados por um dos instrumentos do satélite Observatório Compton de Raios Gama (CGRO). Diversos estudos experimentais e teóricos revelaram muitas características da origem e da produção desse fenômeno, o mais energético produzido em nosso planeta. Entretanto, existem questões fundamentais que permanecem sem resposta. Uma delas é o origem do campo elétrico capaz de acelerar elétrons que possam emitir fótons com energias de até 100 MeV . Neste trabalho, pela primeira vez, explorou-se dados de relâmpago, coletados pelo Sensor Imageador de Relâmpagos (LIS) a bordo do satélite Missão de Medida da Precipitação Tropical (TRMM), conjuntamente com dados de partículas/fótons de alta energia detectados no solo pelos sensores do Observatório Pierre Auger, localizado na Argentina, na procura de tais emissões. Utilizando cinco anos de dados foi realizada uma análise preliminar procurando coincidências com uma diferença máxima de $\pm 100 \text{ ms}$, resultando apenas 1,72% dos dados do LIS em coincidência com os eventos registrados pelo Auger. Foram implementados testes estatísticos para averiguar se essa percentagem poderia ou não ser resultado de uma associação puramente aleatória. Os testes mostraram que a probabilidade de encontrar coincidências espaço-temporais aleatórias é aproximadamente três vezes menor do que a percentagem encontrada. Para aperfeiçoar a análise, os Grupos foram agrupados em Flashes utilizando-se os critérios tempo-espaciais do LIS, assim o conjunto de dados foi reduzido em 209 Grupos e 209 eventos T3, eventos que estão compostos por 841 registros de tanques individuais. Posteriormente foi analisado o tipo de traço registro de cada tanque, separando-os entre traços produzidos por partículas/fótons (73,9%) e traços produzidos por emissões VHF dos relâmpagos (26,1%). Do total de tanques com traço de emissões VHF 96% foram registradas a uma distância $\leq 32 \pm 4 \text{ km}$ da localização dos primeiros Grupos dos Flashes. Por outro lado, cinco tanques com traço de partículas/fótons foram registrados a uma distância $\leq 4 \pm 4 \text{ km}$. Uma análise detalhada dos cinco tanques foi realizada devido a duas razões: 1) uma análise comparativa entre distribuições de diferenças espaciais mostrou que todos os registros de tanques com $\Delta s \leq 20 \text{ km}$ não eram bem explicados; e 2) a restrição espacial, reportada na literatura, que estabelece o alcance máximo das partículas emitidas pelas nuvens de tempestade em $\sim 500 \text{ m}$. A análise detalhada dos cinco tanques mostrou que a taxa de detecção de partículas/fótons emitidas pelo primeiro Grupo dos Flashes foi de $7,8 \times 10^{-5}$. A duração dos registros variou entre $0,27 \mu\text{s}$ e $0,50 \mu\text{s}$ e sua energia ficou entre $489,4 \text{ MeV}$ e $2493,2 \text{ MeV}$. O Δt entre eles e os Flashes associados variou entre $-31 \pm 26 \mu\text{s}$ e $11 \pm 26 \mu\text{s}$ e em um dos casos foi possível estabelecer que o Grupo aconteceu antes do registro no tanque.

STUDY OF HIGH ENERGY EMISSIONS PRODUCED BY ELECTRICAL FIELDS OF LIGHTNING AND THUNDERSTORMS

ABSTRACT

Theorized in the 1920s, emission of particles and energetic photons by thunderclouds and lightning has been the subject of intense study within the last couple of decades. This new area of research, called High-Energy Atmospheric Physics, became subject of great interest with the accidental discovery of gamma-ray burst of terrestrial origin, as registered by one of the instruments of the satellite Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO). Several experimental and theoretical studies have revealed many of the features related to the origin and production of this phenomenon, the most energetic produced in our planet. However, there are fundamental questions that remain unanswered. One is the origin of the electric field capable of accelerating electrons that can emit photons with energies up to 100 MeV . In this work, the data of the Lightning Imaging Sensor (LIS), onboard the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) satellite, was explored for the first time in combination with the high energy particle/photon data of the tank detectors of the Pierre Auger Observatory, located in Argentina, in seeking of such emissions. Using five years of data, a preliminary analysis was performed looking for coincidences with a maximum difference of $\pm 100\text{ ms}$, resulting in only 1.72% of the LIS data in coincidence with the events recorded by Auger. Statistical tests were implemented to determine whether this percentage could result from a purely random association or not. The tests showed that the probability of finding space-time random coincidences is approximately three times less than the percentage found. In order to refine the analysis, we grouped the Group data into Flashes using LIS space-time criteria, such that the resulting data set was reduced to 209 Groups and 209 events T3, events that are composed of 841 individual detector tanks records. Subsequently we analyzed the type of trace recorded in each tank, classifying them into traces produced by particles/photons (73.9%) and traces produced by VHF emissions (26.1%). Of the total of the tanks with VHF emission traces 96% were recorded at a distance $\leq 32 \pm 4\text{ km}$ from the location of the first Group of the Flash. On the other hand, five tanks with particles/photons traces were recorded at a distance $\leq 4 \pm 4\text{ km}$. A detailed analysis of the five tanks was carried out for two reasons: 1) a comparative analysis of spatial differences between distributions showed that all records with tanks $\Delta s \leq 20\text{ km}$ were not well explained; and 2) the spatial constraint, reported in the literature, establishing the maximum range of particles emitted by thunderclouds in $\sim 500\text{ m}$. Detailed analysis of five tanks showed that the detection rate of particles/photons per group was 7.8×10^{-5} . The duration of the records varied between $0.27\ \mu\text{s}$ and $0.50\ \mu\text{s}$ and their energy varied between 489.4 MeV and 2493.2 MeV . The Δt between the records and the associated Flashes ranged from $-31 \pm 26\ \mu\text{s}$ and $11 \pm 26\ \mu\text{s}$, and in one of the cases it was possible to establish that the Group happened before the recording of the tank trace.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Esquema da Avalanche de Elétrons Fugitivos Relativísticos (AEFR).	2
1.2 Calculo do comprimento da avalanche λ como variação do campo elétrico E	4
1.3 Espectro de energia produzido por AEFR calculado com simulação Monte Carlo (diamantes) e por um modelo analítico (linha solida).	5
1.4 Energia média de elétrons fugitivos em função do campo elétrico a nível do mar. A linha vertical representa o E_{th} . A linha horizontal é a energia média esperada pela Equação 1.4, $7.3 MeV$	6
1.5 Evolução dos mecanismos de aceleração e produção de partículas relativísticas.	8
1.6 Taxa de contagem como função do tempo.	9
1.7 Histograma de amplitudes para os TGE's detectados pelo detector MARKET no Monte Aragats, Armênia. Os eventos com maior aumento são mostrados com datas.	11
1.8 Energia depositada no detector. Cada painel é uma janela temporal de $75 \mu s$, com um total de $450 \mu s$	12
1.9 Localização geográfica do RHESSI, marcada com cruces, durante cada um dos FGT registrados. No painel superior, a distribuição esperada de FGTs caso fossem distribuídos homogeneamente no mundo, com a escala de cores representando a fração de máxima exposição temporal do satélite multiplicada pela sensibilidade do satélite aos FGTs. O painel inferior mostra a frequência de relâmpagos por quilômetro quadrado por ano com dados do LIS/OTD.	14
1.10 Espectro de energia para o conjunto de 130 FGTs registrados pelo AGILE entre Junho de 2008 e Janeiro de 2010. A linha sólida mostra o ajuste em lei de potências dividido em dois segmentos, e a linha pontilhada é um modelo esperado do espectro de energia dos fótons.	16
1.11 Esquema do processo da quebra da rigidez dielétrica do ar pelo modelo Quasi-Eletrostáticos.	18
2.1 Localização dos detectores do Observatório Pierre Auger na Argentina. Os pontos pretos com linhas verdes mostram a localização dos detectores de fluorescência, chamados de "Loma Amarilla", "Coihueco", "Leones" e "Morados". Os pontos vermelhos mostram os detectores de solo.	22

2.2	Fotografia adaptada de um dos detectores de superfície do Observatório. Os principais componentes são etiquetados.	23
2.3	Histograma de carga para muons verticais em vermelho e histograma de carga para mouns de todas direções em preto.	24
2.4	Ilustração da condição mínima para o critério espacial $2C1&3C2&4C4$. Os pontos pretos representam aos tanques que foram disparados. O primeiro anel ilustra a condição $2C1$, onde um tanque além do central foi disparado. O segundo anel refere-se à condição $3C2$. No último anel mostra-se a posição do tanque mais afastado para cumprir a condição $4C4$	26
2.5	Frequência de amostragem dos diferentes critérios separados hierarquicamente.	27
2.6	Ilustração da geometria que deve se cumprir para o disparo T4. No painel superior, a configuração do disparo $3ToT$ e no inferior, a configuração mínima do disparo $4C1$	28
2.7	Ilustração da geometria do disparo T5. O tanque pivô fica rodeado por outros 6 tanques funcionais.	28
2.8	Esquema exemplificador da coleta de dados do LIS. Para $t = 0 \text{ ms}$ acontecem 3 Eventos que são designados hierarquicamente ao Grupo a , Flash A e Área α	32
2.9	Esquema do exemplo para $t = 100 \text{ ms}$. São detectados outros 3 Eventos que fazem parte de um novo Grupo, b . O Flash e a Área são as mesmas que no caso anterior.	32
2.10	Esquema do exemplo para $t = 350 \text{ ms}$. São detectados 4 novos Eventos que são separados em 2 Grupos. As condições temporais e espaciais fazem com que o Grupo c seja designado ao Flash A , e o Grupo d seja designado a um novo Flash B que a sua vez pertence a Área β	33
2.11	Esquema para $t = 400 \text{ ms}$. Dois novos Eventos são detectados e são designados a Grupos diferentes, mas pertencem ao mesmo Flash B e Área β	34
2.12	Esquema para $t = 700 \text{ ms}$. Foram registrados mais dois Eventos, 13 e 14. Pelas características espaço-temporais, o Evento 13 é designado ao Grupo g , Flash C e Área α . Porém, o Evento 14 é designado ao Grupo h , Flash D e Área γ	34

3.1	Mapa da localização do Observatório Pierre Auger. A mancha amarela representa a localização dos tanques detectores de partículas e fótons. O quadrado vermelho delimita a área de localização dos Grupos detectados pelo LIS que foram selecionados.	36
3.2	Esquema do tempo de integração.	36
3.3	Diferença espacial e temporal entre Grupos e eventos T3 do Auger num intervalo preliminar de ± 100 ms centrado nos eventos T3 do Auger.	38
3.4	Duração das observações do LIS que continham registro de pelo menos um Grupo durante sua passagem sobre o Auger durante os cinco anos de dados analisados, em intervalos de 10 segundos.	40
3.5	Histograma do número de tempos de referência aleatórios de Grupos gerados com simulação Monte Carlo com $\Delta t \leq \pm 100$ ms dos eventos T3 do Auger. O resultado apresentado é para dez mil iterações.	41
3.6	Distribuição do número de Grupos com localizações aleatórias geradas por simulação Monte Carlo com $\Delta s < 50$ km. O resultado é para dez mil iterações.	42
3.7	Gráfico da distância entre Grupos e eventos T3 do Auger em função do intervalo de tempo entre eles numa relação unívoca.	44
3.8	Esquema das categorias dos Δt 's segundo o tempo de integração.	44
3.9	Ampliação da Figura 6 entre ± 5 ms. As linhas vermelhas delimitam as regiões indicadas na Figura 3.8.	45
3.10	Histograma da distância entre os Grupos e os tanques individuais que entraram na detecção dos eventos relacionados a esses Grupos.	46
3.11	Exemplo dos tipos de detecções. Traço típico de partículas/fótons energéticos (a), e registro da radiação VHF produzida por relâmpagos (b).	47
3.12	Histograma das distâncias entre os Grupos e os tanques que detectaram os eventos T3 do Auger para os dois tipos de registros: a) Emissões VHF dos relâmpagos; b) Traços característicos de partículas.	48
3.13	Distribuição das distâncias entre um tanque imaginário localizado no centro do Observatório Pierre Auger e os 64.378 Grupos.	50
3.14	Superposição dos histogramas das distâncias dos tanques com traço de partículas (em vermelho), tanques com emissões VHF (em pretos) e distâncias dos Grupos ao tanque virtual no centro do Observatório (em azul).	51
3.15	Localização dos tanques (pontos vermelhos) que detectaram o evento 4614926 e do Grupo coincidente (ponto azul).	54

3.16 Traços dos cinco tanques que registraram partículas. *a)* Evento 4602275,
b) evento 4614926, *c)* evento 4614941, *d)* evento 694850 e *e)* evento
11253883. 55

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Características dos cinco eventos que possuem um tanque com diferença espacial entre 0-4 <i>km</i> a menos de 4 <i>km</i> de distância.	52
3.2 Características dos cinco traços de partículas dos cinco eventos.	56

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Produção de partículas e fótons energéticos	1
1.1.1 Características do AEFR	3
1.1.2 Fótons energéticos	6
1.1.3 Mecanismo de retroalimentação	7
1.2 Medições experimentais de elétrons e fótons energéticos	8
1.2.1 Observações em solo	9
1.2.2 Observações de satélites - Flashes de Raios Gama Terrestres (FGTs)	11
1.2.2.1 Modelos de iniciação de FGTs	15
1.3 Este trabalho	19
2 INSTRUMENTAÇÃO E DADOS	21
2.1 Observatório Pierre Auger	21
2.1.1 Calibração dos detectores de superfície	23
2.1.2 Critérios de disparo	24
2.2 Lightning Imaging Sensor - LIS	27
2.2.1 Dados LIS	29
2.2.2 Exemplo do registro de dados	31
3 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS DADOS	35
3.1 Análise preliminar	37
3.2 Testes estatísticos	39
3.3 O parâmetro temporal	43
3.4 O parâmetro espacial	45
3.5 Análise estatístico espacial	49
3.6 Os cinco tanques	53
4 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

Atualmente está bem estabelecido que os relâmpagos, as nuvens de tempestade e as descargas elétricas produzidas em laboratório são capazes de gerar partículas e fótons energéticos mediante os campos elétricos que possuem. As partículas energéticas ao interagir com as moléculas do ar produzem elétrons de baixa energia que o ionizam, produzindo uma mudança na condutividade do meio que pode estar ligada à produção do próprio relâmpago. A produção desses elétrons, e também de pósitrons, é detectada no solo conjuntamente com variações do campo elétrico atmosférico na presença de nuvens de tempestade. Um outro exemplo dessas emissões são os impressionantes Flashes de raios Gama Terrestres (FGTs) que podem ser observados por satélites, sendo eles a radiação mais energética produzida em nosso planeta, detectada até o momento.

Tradicionalmente o estudo dos fenômenos relacionados com a eletricidade atmosférica, i.e., eletrificação das nuvens, iniciação e mecanismos de propagação do relâmpago, etc., têm sido estudados do ponto de vista da eletrodinâmica clássica. Entretanto nos últimos anos foram introduzidos conceitos relacionados com física de partículas para descrever as interações atômicas que experimentam os novos fenômenos descobertos. Esses fenômenos não têm relação apenas com a eletricidade atmosférica, mas também com chuviros de raios cósmicos, física espacial, assim como segurança na aviação. O conjunto dessa, relativamente, nova área de pesquisa é denominada Física Atmosférica de Alta Energia (DWYER, 2012).

1.1 Produção de partículas e fótons energéticos

A idéia de que os elétrons livres podem ser acelerados pelos campos elétricos dentro de uma nuvem de tempestade ou na atmosfera ao seu redor e ganhar energia suficiente para emitir radiação foi sugerida pela primeira vez por C. T. R. Wilson em 1924. Um elétron viajando no ar, em condições normais, perde energia constantemente por colisões, e possui um livre caminho médio de apenas um cm , aproximadamente, mas quando a taxa de ganho de energia, devido à presença de campos elétricos, supera a taxa de perda de energia, devido às colisões, o elétron é acelerado até ganhar energias relativísticas (WILSON, 1924).

Os elétrons acelerados por campos elétricos atmosféricos que superam as forças de atrito são capazes de continuar com o processo de produção de elétrons. Além disso, a população dos mesmos pode ainda aumentar devido a colisões com moléculas da atmosfera, e assim iniciar uma avalanche de elétrons com crescimento exponencial.

Esse processo é chamado *Avalanche de Elétrons Fugitivos Relativísticos* - AEFR (GUREVICH et al., 1992). A Figura 1.1 mostra um esquema do processo AEFR na atmosfera.

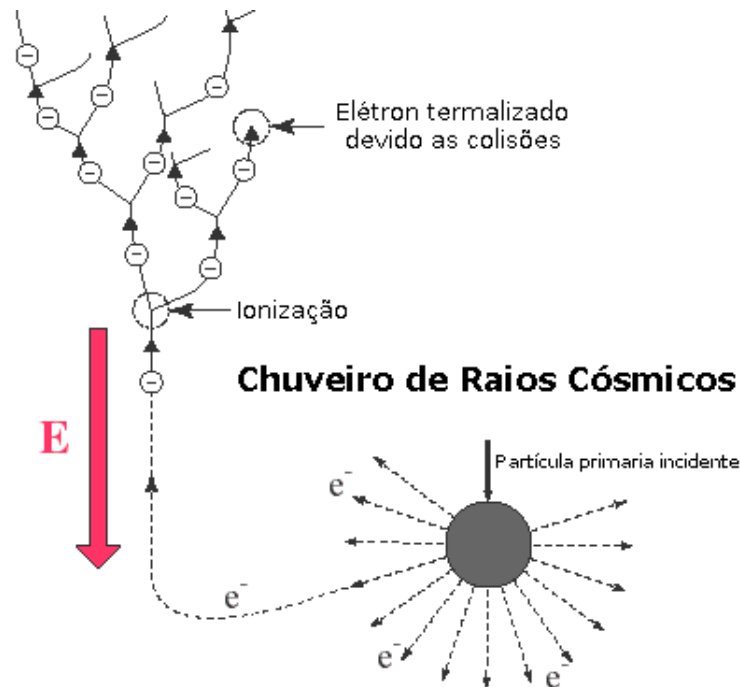


Figura 1.1 - Esquema da *Avalanche de Elétrons Fugitivos Relativísticos* (AEFR).
 Fonte: Adaptado de *Stanford University. Very Low Frequency Group (VLF Group)* (1999).

A magnitude do campo elétrico calculado por Gurevich et al. (1992) para acelerar, e assim iniciar a AEFR foi de 200 - 400 kV/m . Posteriormente, Dwyer (Dwyer 2003) explorou em detalhe os valores do campo elétrico necessário para a produção de AEFR. Suas simulações mostram que devido à dispersão elástica, o valor do limiar mínimo do campo elétrico é $E = 2,18 \times 10^5 [V/m] \times n$, onde n é a densidade do ar ao nível do mar. Valor que é 30% maior do que o aceito até então como limiar mínimo para a produção de AEFR. Ambos valores, tanto os calculados por Gurevich et al. quanto o calculado por Dwyer são consistentes com os valores máximos de campo elétrico registrados dentro da nuvem, 110 - 400 kV/m (RAKOV; UMAN, 2003). Esse campo é muito menor do que o campo elétrico necessário para gerar a quebra da rigidez dielétrica do ar, cujos valores variam, por exemplo, entre 3000 kV/m , para o caso do ar seco ao nível do mar, e 1600 kV/m , para uma altura de 6 km (RAKOV; UMAN, 2003).

1.1.1 Características do AEFR

Estudos posteriores ao trabalho de Gurevich et al. (1992) mostraram características importantes do processo AEFR. O primeiro deles, que com sucesso conseguiu calcular o espectro de energia para os elétrons fugitivos além da taxa da produção das avalanches, foi Lehtinen et al. (1999). O modelo de Lehtinen et al. (1999) é uma simulação Monte Carlo em três dimensões que leva em conta a perda de energia dos elétrons por ionização e por excitação atômica. Ele inclui também a dispersão Møller (colisão elétron-elétron) e difusão angular quando os elétrons são dispersados ao interagir com os núcleos atômicos.

De acordo com o modelo de Lehtinen et al. (1999), o modelo do Dwyer (Dwyer, 2003; Coleman; Dwyer, 2006) encontrou formulações empíricas para o comprimento da avalanche, λ , e o tempo de desenvolvimento da avalanche, τ . O modelo do Dwyer e Coleman e Dwyer, que é basicamente uma melhoria do modelo de Dwyer (2003), é composto por simulações Monte Carlo que consideram interações adicionais ao modelo do Lehtinen et al. (1999). Por exemplo, é incluído o processo Bremsstrahlung para a produção de fótons e os subsequentes processos que implicam as interações deles.

A Figura 1.2 mostra os resultados da simulação para o comprimento da avalanche (λ), representados por diamantes. A linha sólida é o ajuste empírico, e a linha pontilhada é o valor mínimo de campo elétrico E_{th} capaz de produzir a avalanche de elétrons.

As formulações empíricas encontradas por Coleman e Dwyer (2006) para λ e τ para campos elétricos $E > 300 \text{ kV/m}$ são:

$$\lambda(z) = \frac{(7300 \pm 60)kV}{E - \frac{nz}{n_0}(276 \pm 4)kV/m} \quad (1.1)$$

$$\tau(z) = \frac{(27,3 \pm 0,1)kV\mu/m}{E - \frac{nz}{n_0}(277 \pm 2)kV/m} \quad (1.2)$$

onde $E (> 300kV/m)$ é o campo elétrico, n é a densidade atmosférica, z é a altitude e o índice 0 denota o valor a nível do mar.

Uma outra maneira mais simples de enxergar a Equação 1.1 é:

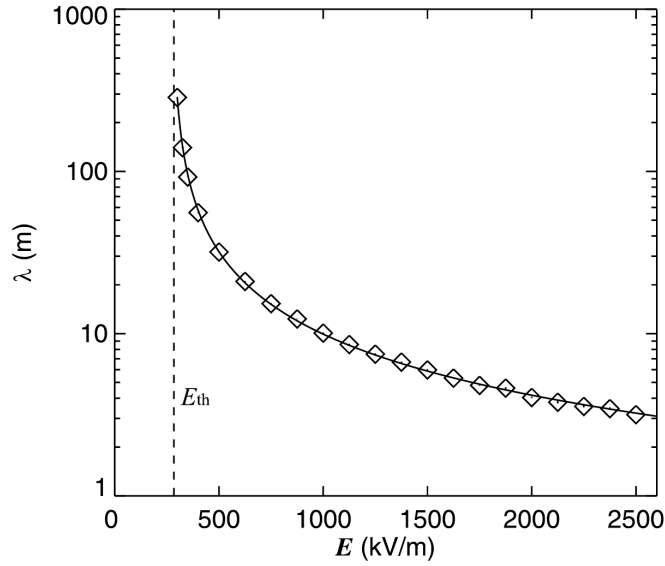


Figura 1.2 - Cálculo do comprimento da avalanche λ como variação do campo elétrico E .
 Fonte: Dwyer (2003).

$$\lambda \approx \frac{7,3 \text{ MeV}}{eE - F_d} \quad (1.3)$$

onde $F_d = 0,276 \text{ [MeV/m]} \times n$ é aproximadamente igual à taxa média de perda de energia experimentada pelo elétron com energia ionizante mínima se movendo na direção e sentido da avalanche (DWYER, 2012). Tanto a Figura 1.2 quanto as Equações 1.1 e 1.3 mostram que conforme o campo elétrico E cresce o comprimento da avalanche λ decresce, de modo que F_d torna-se desprezível para E com valores grandes.

Um outro parâmetro importante estudado por Coleman e Dwyer (2006) é a velocidade média de propagação da avalanche, calculado em $v \cong 2,65 \times 10^8 \text{ m/s}$ (0,89c).

O espectro de energia, ou densidade de elétrons por unidade de campo elétrico, f_r , também pode ser obtido por simulações Monte Carlo. Dwyer e Babich (2011) encontraram o espectro mostrado na Figura 1.3. Os diamantes são o resultado dos cálculos com o modelo, enquanto que a linha sólida é o resultado da predição analítica feita no mesmo trabalho.

Um resumo do modelo analítico que é descrito pela seguinte expressão pode ser encontrado em Dwyer (2012):

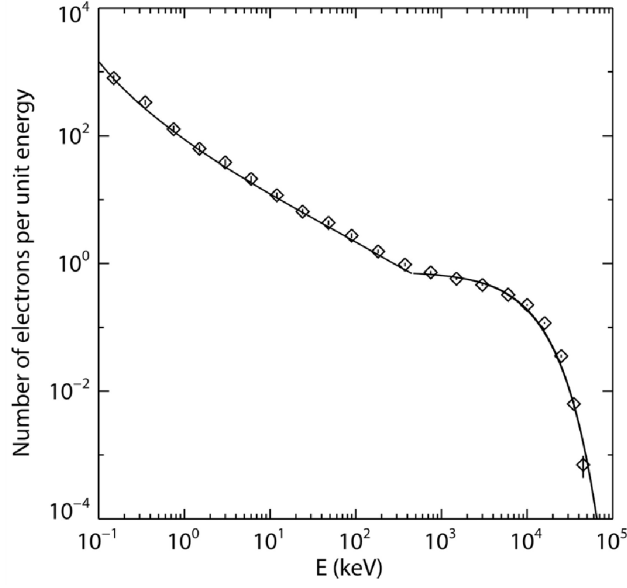


Figura 1.3 - Espectro de energia produzido por AEFr calculado com simulação Monte Carlo (diamantes) e por um modelo analítico (linha sólida).
 Fonte: Dwyer e Babich (2011).

$$f_r = \frac{F_{AEFR}}{7,3MeV} e^{-E'/7,3MeV} \quad (1.4)$$

onde E' é a energia cinética média adquirida por um elétron fugitivo que é deslocado uma distância z em um campo constante $E' = z(eE - F_d)$, e o termo entre parênteses é o denominador da Equação 1.3. O termo F_{AEFR} é o número total de elétrons fugitivos em função da distância desde o início da avalanche e é dado por:

$$F_{AEFR} = F_0 e^{\int_0^L dz/\lambda} \quad (1.5)$$

onde F_0 é o fluxo das partículas externas que funcionam como sementes no processo AEFr, por exemplo, raios cósmicos secundários, e L denota o comprimento do campo elétrico no qual o processo AEFr é desenvolvido.

A Equação 1.4 é válida para elétrons fugitivos acima dos poucos keV até várias dezenas de MeV e fornece uma energia média de $7,3 MeV$ (Dwyer, 2012). A Figura 1.4 mostra a energia média dos elétrons fugitivos como função do campo elétrico no nível do mar calculado por simulações Monte Carlo (Coleman; Dwyer,

2006; BABICH, 2004) e a partir da Equação de Boltzman (ROUSSEL-DUPRÉ et al., 2008). Todas elas concordam que a energia média dos elétrons fugitivos, para uma ampla faixa de valores de campo elétrico, é aproximadamente de 7 MeV .

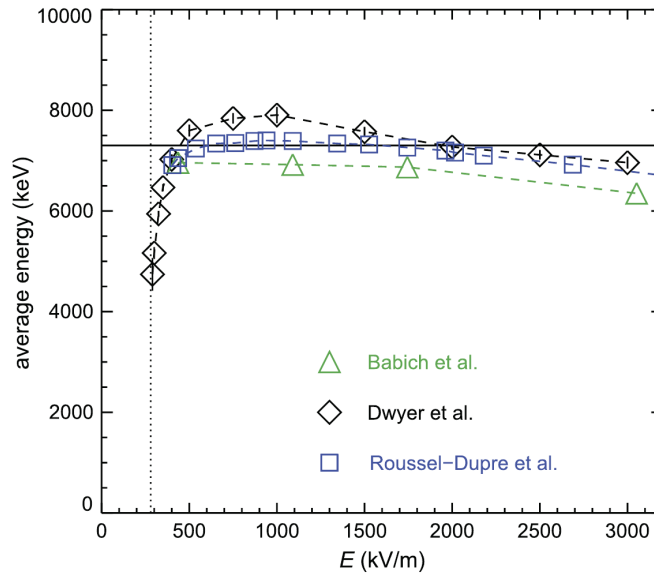


Figura 1.4 - Energia média de elétrons fugitivos em função do campo elétrico a nível do mar. A linha vertical representa o E_{th} . A linha horizontal é a energia média esperada pela Equação 1.4, 7.3 MeV .

Fonte: Dwyer (2012).

1.1.2 Fótons energéticos

Os elétrons, produto da AEFr, são capazes de produzir fótons de diversas maneiras, mas a mais comum e importante, na atmosfera, é por radiação Bremsstrahlung. A radiação Bremsstrahlung é uma radiação eletromagnética (fóton) produzida pela desaceleração de uma partícula carregada. Depois do fóton ser emitido por radiação Bremsstrahlung ele pode interagir com os núcleos atômicos presentes na atmosfera. Os três modos principais de interação são: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares (elétron-pósitron) (CARLSON, 2009).

O efeito fotoelétrico acontece quando um fóton é absorvido por um átomo, arrancando um elétron como resultado. Esse processo é importante para baixas energias. A partir dos $\sim 30\text{ keV}$ até vários MeV o processo dominante é a dispersão Compton, que é a colisão elástica entre um fóton e um elétron. Como resultado dessa colisão, onde tanto o momento linear quanto a energia cinética são conservados, parte da

energia do fóton é transferida para o elétron, que é liberado do átomo, e o fóton não absorvido passa a ter um comprimento de onda maior. Para fótons com energias maiores que alguns MeV a criação de pares torna-se o processo dominante. A criação de pares é o processo pelo qual um fóton é absorvido pelo núcleo atômico resultando na geração de um par elétron-pósitron. Tanto o elétron quanto o pósitron possuem uma energia de repouso de $0,511 MeV$, portanto a energia mínima que o fóton deve possuir para este processo é de $1,022 MeV$.

Estritamente falando, a nomenclatura dos fótons tem a ver com a origem deles. Fótons produzidos por elétrons (por excitação ou por colisão) são chamados de raios-X, e fótons produzidos por processos nucleares (transição/passagem de um núcleo atômico excitado para um de menor energia e na desintegração de isótopos radioativos) são denominados raios γ . Na literatura também pode ser encontrada uma diferença entre raios X e γ em função de sua energia: fótons com energias de $10-120 keV$ são consideradas como raios-X e as emissões a partir de $120 keV$ como raios γ (FEYNMAN et al., 1964). Também, por razões históricas, fótons produzidos por elétrons com energias a partir dos $20 keV$ são chamados de raios γ (FISHMAN et al., 1994). Para evitar possíveis confusões, neste trabalho será adotada a mesma nomenclatura que em Dwyer (2012), chamando as radiações eletromagnéticas de fótons energéticos, a menos que o fenômeno possua nome próprio, como FGTs, por exemplo.

1.1.3 Mecanismo de retroalimentação

Dwyer (2003) propõe um mecanismo que pode explicar de maneira natural a produção dos fluxos de elétrons e raios gama, como por exemplo os FGTs. Ele propõe um mecanismo de retroalimentação positiva ao processo AEFr. O mecanismo de retroalimentação positiva estabelece que uma vez iniciado o processo AEFr, a partir de elétrons fugitivos relativísticos, eles criam fótons energéticos por Bremsstrahlung, que por sua vez produzem um par elétron-pósitron. Esse pósitron viaja em direção da origem do campo elétrico e, na sua viagem, produz um novo fóton que, por espalhamento Compton, libera um elétron, que vira uma nova semente para uma nova avalanche. Desse jeito o número de avalanches pode crescer exponencialmente da mesma maneira que cresce o número de elétrons.

A Figura 1.5 mostra a evolução dos mecanismos, desde os elétrons fugitivos propostos por Wilson (1925) até o mecanismo de retroalimentação proposto por Dwyer (2003). O aumento no número de elétrons é explicado pela consideração de novos processos incorporados em cada mecanismo. Wilson (1925) apenas considerava um elétron

viajando dentro de um campo elétrico intenso. Gurevich et al. (1992) considera o elétron fugitivo de Wilson interagindo com as moléculas do ar, principalmente por dispersão Moller, criando em média até 105 novos elétrons por metro atravessado. Finalmente, Dwyer (2003) incorpora o mecanismo de retroalimentação, atingindo um número muito maior de elétrons produzidos pelas avalanches. Desse jeito, a avalanche torna-se auto-sustentável e não precisa mais de sementes externas.

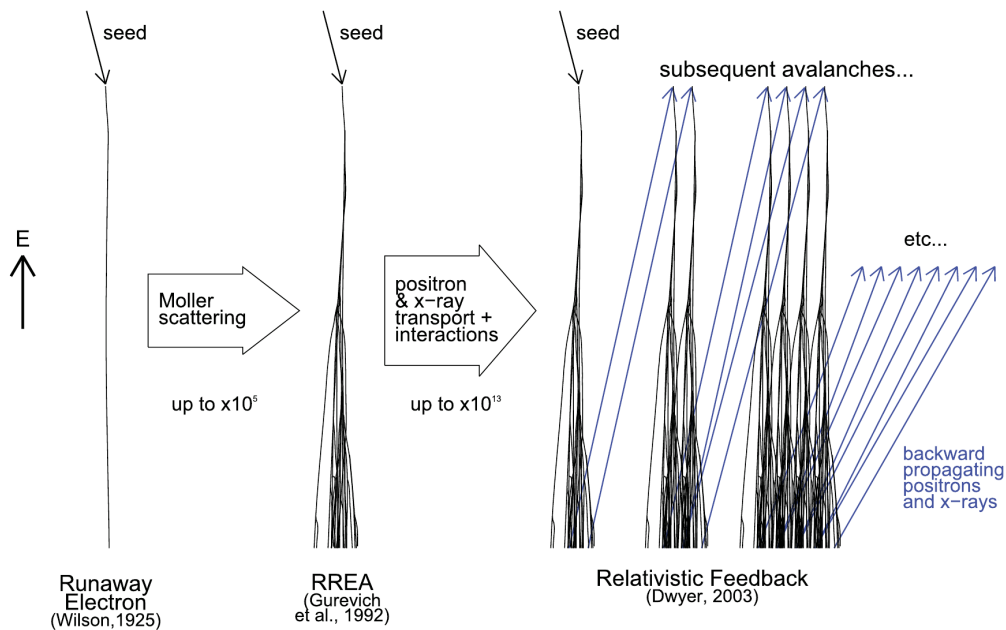


Figura 1.5 - Evolução dos mecanismos de aceleração e produção de partículas relativísticas.

Fonte: Dwyer (2012).

1.2 Medições experimentais de elétrons e fótons energéticos

As primeiras observações bem sucedidas do efeito do campo elétrico das nuvens de tempestade na produção de fótons energéticos foi reportada por McCarthy e Parks (1985). Eles montaram um espectrômetro de raios-X que era um cintilador de NaI(Tl) acoplado a um fotomultiplicador, abordo de um avião F-106. McCarty e Parks estabeleceram que radiação ionizante com energias maiores a 110 keV são produzidas por até dezenas de segundos dentro das nuvens de tempestade.

A Figura 1.6 mostra a taxa de contagem para os três eventos registrados por McCarthy e Parks (1985). O primeiro pico (1) aconteceu antes de observar um relâm-

pago próximo ao avião. A queda no segundo pico (2) coincide com a ocorrência de um relâmpago que atingiu o avião. O último incremento, chamado de corcunda (3) pelos autores, não teve associação com nenhum relâmpago. Esses aumentos foram explicados como produzidos por elétrons energéticos que geraram raios-X por radiação Bremsstrahlung, processo consistente com o de elétrons fugitivos relativísticos proposto por [Wilson \(1924\)](#).

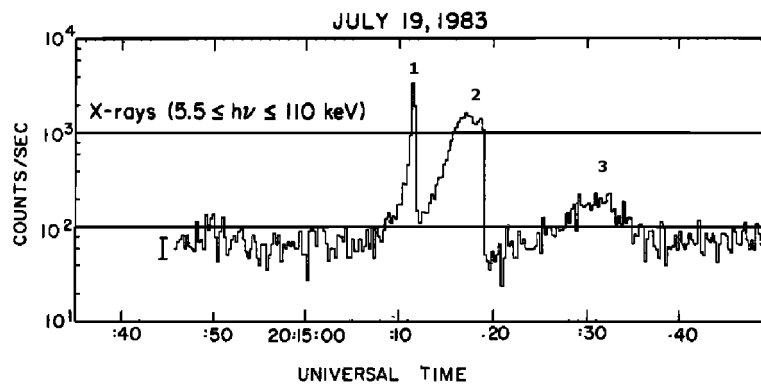


Figura 1.6 - Taxa de contagem como função do tempo.
 Fonte: [McCarthy e Parks \(1985\)](#).

1.2.1 Observações em solo

Observações em solo como as de [Alexeenko et al. \(1987\)](#) foram as primeiras a detectar aumentos na contagem de raios cósmicos secundários acompanhados de perturbações do campo elétrico atmosférico. Eles mostraram que variações da ordem de 1% podiam ser explicadas apenas pelo aumento na intensidade do campo elétrico atmosférico.

Mais recentemente, [Brunetti et al. \(2000\)](#) mediram aumentos na taxa de contagem de até 20% na detecção de fótons de origem atmosférico em escalas temporais de minutos (<5 min). Eles conseguiram distinguir os aumentos detectados nas suas observações, que estavam entre os 3 e 10 *MeV* dos que são produzidas pelo Radônio, presente na água de chuva, com energia típica abaixo de 3 *MeV*. [Brunetti et al. \(2000\)](#) interpretaram os aumentos que observaram como gerados pelo processo AEFER.

O primeiro trabalho a incluir simulações Monte Carlo para estimar o espectro dos

elétrons na fonte, simulando as interações dos elétrons e fótons na atmosfera, foi [Torii et al. \(2002\)](#). Eles reportaram aumentos na taxa de contagem de fótons, com duração menor que um minuto, cujo espectro era consistente com o espectro da radiação Bremsstrahlung produzida por elétrons com energia entre 5-10 *MeV*. [Tsuchiya et al. \(2009\)](#) também conseguiram observar aumentos na contagem de elétrons e fótons em dois detectores diferentes, a duração dos aumentos foi em torno aos 90 segundos. Usando simulações Monte Carlo, eles conseguiram estimar o espectro dos fótons e a altitude da fonte, que estava entre 60 e 120 metros. O espectro de energia atingia os 10 *MeV*, sendo coincidente com radiação Bremsstrahlung.

Entre 2008 e 2011 [Chilingarian et al. \(2012\)](#) registraram 243 aumentos súbitos no fluxo de partículas detectadas no Monte Aragat, na Armênia. Eles chamam de Aumento Terrestre no Solo (Terrestrial Ground Enhancement em inglês). Os eventos registrados por [Chilingarian et al. \(2012\)](#) mostram que os TGEs com alta amplitude porcentual são muito raros, menores que um evento por ano, mas os de baixa amplitude são muito mais comuns, Figura 1.7. Essa amplitude porcentual é um aumento relativo acima dos raios cósmicos secundários de fundo. O espectro calculado por [Chilingarian et al. \(2012\)](#) para esses eventos raros atinge os 100 *MeV* para fótons, e 40 *MeV* para elétrons.

A duração dos TGEs registrados por [Chilingarian et al. \(2012\)](#) é menor que 10 minutos, tempo que é coincidente com a geração da região de carga positiva na base da nuvem. Segundo eles, a geração dessa região de cargas desempenha um papel importante na iniciação das avalanches de elétrons e fótons energéticos, argumento que é apoiado pelas observações feitas no Japão ([TORII et al., 2002](#); [TSUCHIYA et al., 2009](#)), que foram realizadas durante o inverno, quando os centros de carga são baixos.

Até 2001, o modelo dos elétrons fugitivos relativísticos estava fundamentado por varias observações feitas por satélites (para um resumo completo veja-se [Dwyer \(2012\)](#)). A primeira observação que teve como possível fonte de campo elétrico o relâmpago foi feita por [Moore et al. \(2001\)](#). Continuando com os testes de pára-raios no South Baldy Peak, nos Estados Unidos, eles instalaram detectores de radiação-X conjuntamente com detectores de campo elétrico. Conseguiram observar dois eventos que aconteceram entre um e dois milissegundos antes da primeira descarga de retorno, o que sugeriu que os flashes detectados poderiam estar ligados aos step-leaders de relâmpagos negativos.

Posteriormente [Dwyer et al. \(2004\)](#) conseguiu fazer observações de fótons ligados a

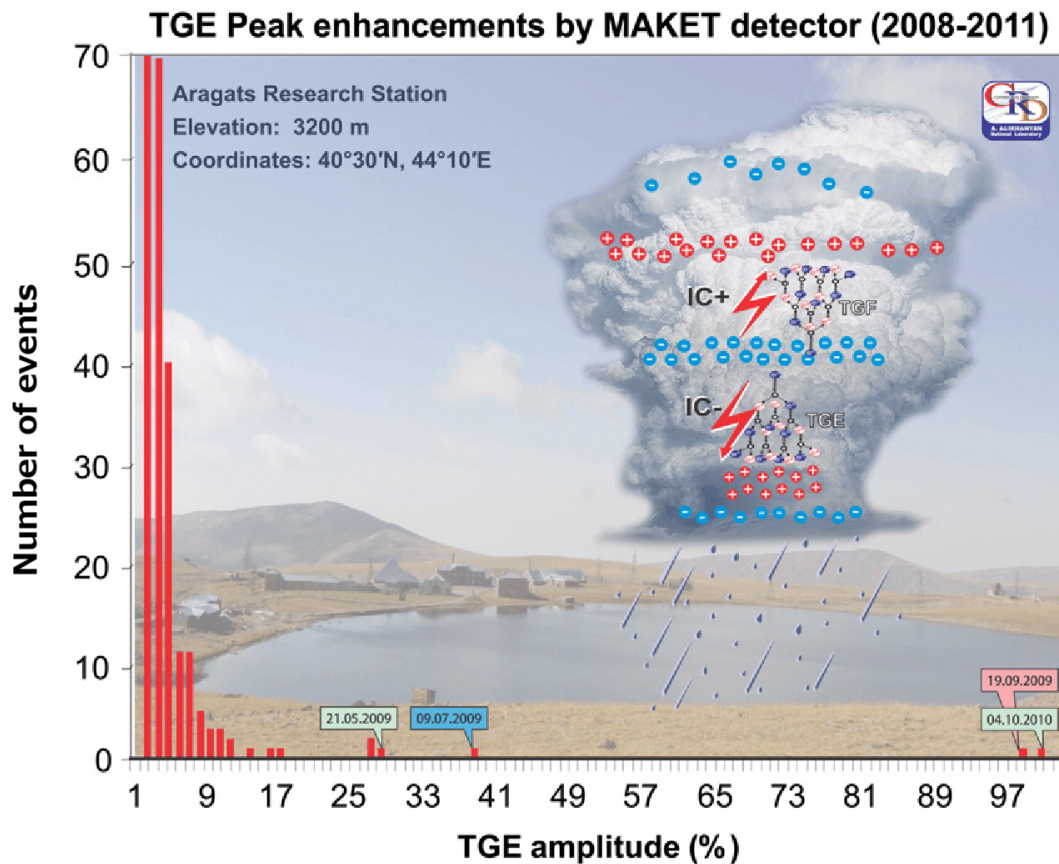


Figura 1.7 - Histograma de amplitudes para os TGE's detectados pelo detector MAKET no Monte Aragats, Armênia. Os eventos com maior aumento são mostrados com datas.
Fonte: Chilingarian et al. (2012).

relâmpagos trigados na Flórida, nos Estados Unidos. Seguindo com as observações de emissão de radiação X em associação a relâmpagos trigados, Dwyer et al. (2004) conseguiram detectar um caso com emissão de raios γ que depositou um total de 370 MeV em 370 μs durante um relâmpago com pico de corrente de 11 kA (Figura 1.8). Devido as características da observação, Dwyer et al. (2004) descartaram qualquer outra possível fonte que não seja o próprio relâmpago.

1.2.2 Observações de satélites - Flashes de Raios Gama Terrestres (FGTs)

A primeira observação de fótons energéticos com origem terrestre foi realizada pelo Observatório de Raios-Gama Compton (CGRO por suas siglas em inglês). No primeiro mês de funcionamento (O CGRO foi lançado em Abril de 1991), um dos

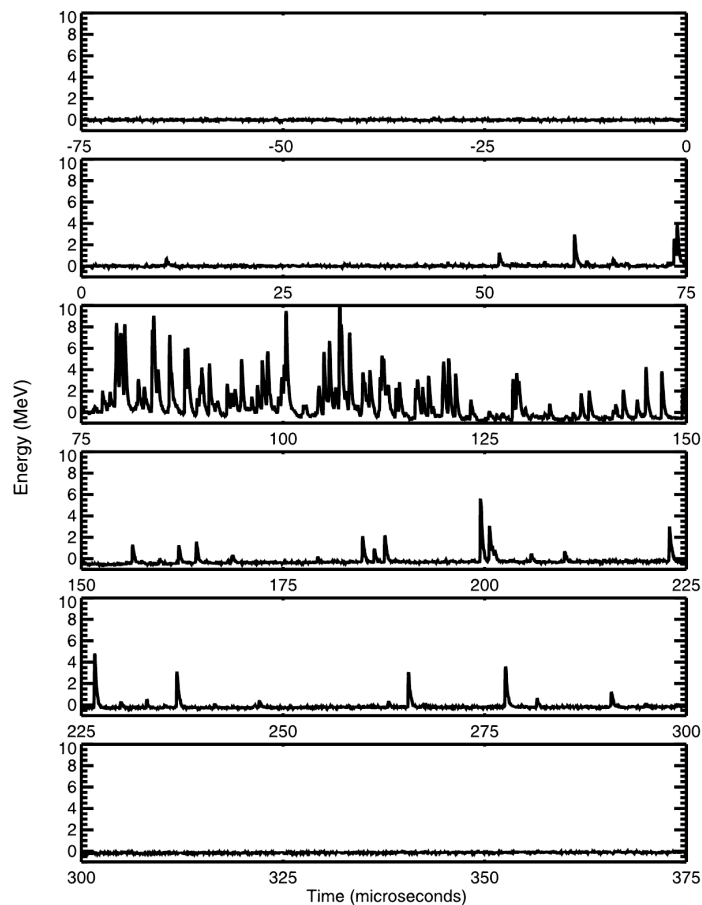


Figura 1.8 - Energia depositada no detector. Cada painel é uma janela temporal de $75 \mu s$, com um total de $450 \mu s$.
 Fonte: [Dwyer et al. \(2004\)](#).

detectores a bordo do CGRO detectou um pulso de fótons muito energético, de duração breve e com origem na Terra. Análises posteriores de um conjunto desses eventos (12 casos num período de 2 anos) que foram denominados Flashes de Raios Gama Terrestres (FGT) mostraram que a energia deles ficava em torno de 1 MeV , com duração entre $\sim 0,1$ a 2 ms ([FISHMAN et al., 1994](#)). Durante as observações, verificou-se que a posição do satélite coincidia com nuvens de tempestade, razão pela qual a primeira interpretação de [Fishman et al. \(1994\)](#) foi a de que essas emissões eram resultado de Eventos Luminosos Transientes (ELT), que ocorrem em toda a atmosfera acima das nuvens de tempestade até a base da ionosfera noturna, em torno de 100 km de altitude, sinalizando o acoplamento eletrodinâmico das camadas atmosféricas, consequência da atividade elétrica das nuvens de tempestade na Troposfera ([SÃO SABBAS et al., 2010](#)). Medições posteriores, no entanto, mostraram

que os FGTs não estão relacionados com os ELTs.

As observações realizadas pelo CGRO reativaram o interesse no estudo da aceleração de partículas na atmosfera terrestre na comunidade científica, resultando num crescimento da literatura, experimental e teórica, referente a esse tópico desde meados dos anos 1990.

O Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI), lançado em Fevereiro de 2002, foi o segundo satélite astrofísico a fazer medidas de FGTs. Usando detectores de germânio, esse satélite conseguiu registrar entre 10 - 20 FGTs num período de 6 meses (SMITH et al., 2005). O espectro obtido mostrou que os fótons atingiram até 20 MeV , sugerindo que os elétrons que os produziram, por processo Bremsstrahlung, tinham energia entre 20 - 40 MeV .

A localização geográfica do satélite ao registrar os FGTs é mostrada por cruces na Figura 1.9. No painel superior, a escala de cores representa a sensibilidade do satélite aos FGTs multiplicada pelo tempo que o satélite permaneceu no local, assumindo ainda uma distribuição homogênea de FGTs no mundo. A mancha preta sobre a América do Sul refere-se à ausência de medidas devido à Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). As bordas estão associadas aos limites em latitude geográfica que o satélite consegue enxergar, que fica em torno dos 50 graus. O painel inferior mostra, além das posições do satélite, a frequência de relâmpagos por quilômetro quadrado por ano obtida a partir de dados do Lightning Imaging Sensor (LIS), detector de relâmpagos a bordo do satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), e do Optical Transient Detector (OTD), detector de relâmpagos a bordo do satélite Microlab-1. É possível perceber uma boa coincidência geográfica entre a densidade de relâmpagos e os FGTs, especialmente na região sobre o centro de África, onde há uma alta densidade de relâmpagos. Esses resultados vieram a reforçar a idéia de que os FGTs estão ligados as nuvens de tempestade e levaram ainda a expansão do espectro de energia observado para os FGTs até $\sim 20 MeV$ (SMITH et al., 2005).

Em Julho de 2008 foi lançado o satélite Fermi Gamma-Ray Space Telescope (FGST), pertencente a NASA, também capaz de detectar FGTs. Um dos instrumentos a bordo do FGST é o Gamma-ray Burst Monitor (GBM), composto de 12 cintiladores de Iodeto de Sódio (NaI), mais dois cintiladores de Germanato de Bismuto (BGO), sensíveis a faixas de energia entre $\sim 8 keV - 1 MeV$, e $\sim 200 keV - \sim 40 MeV$, respectivamente. No primeiro ano foram medidos 12 FGTs com energia média de $\sim 30 MeV$ e um único caso com 38 MeV (BRIGGS et al., 2010). As posições do

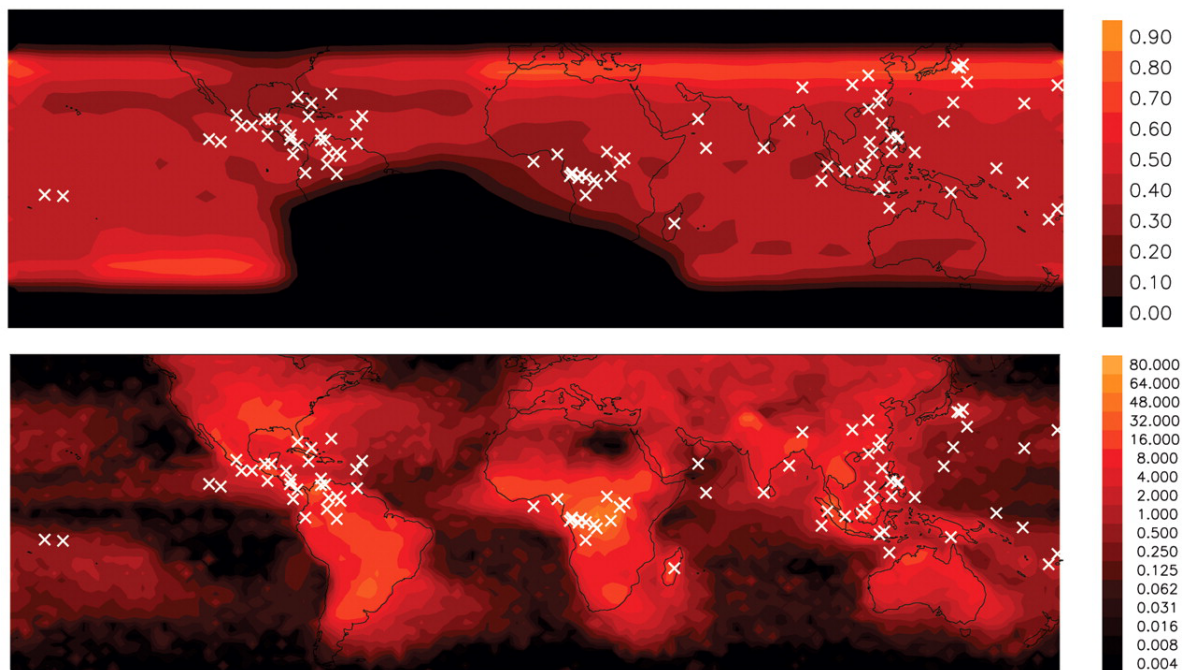


Figura 1.9 - Localização geográfica do RHESSI, marcada com cruces, durante cada um dos FGT registrados. No painel superior, a distribuição esperada de FGTs caso fossem distribuídos homogeneamente no mundo, com a escala de cores representando a fração de máxima exposição temporal do satélite multiplicada pela sensibilidade do satélite aos FGTs. O painel inferior mostra a frequência de relâmpagos por quilômetro quadrado por ano com dados do LIS/OTD. Fonte: [Smith et al. \(2005\)](#).

satélite durante a detecção dos FGTs coincidiram com as regiões reportadas por [Smith et al. \(2005\)](#) para o RHESSI. A razão para o BGO ter registrado energias em torno dos 30 MeV , maiores que as obtidas pelo RHESSI, está no limiar de ativação: diferentemente do RHESSI, o BGO possui um programa que aciona a coleta de dados só para os eventos mais energéticos.

Finalmente, completando a lista dos satélites que detectam FGTs, têm-se o Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero (AGILE), financiado pela Agencia Espacial Italiana, lançado em Abril de 2007. O AGILE é uma composição de três instrumentos independentes: 1) o Gamma-Ray Imaging Detector (GRID), 2) o Super-AGILE e 3) o Mini-Calorímetro. O Mini-Calorímetro faz parte do GRID fisicamente, mas durante a coleta de dados, ele funciona de forma independente.

Devido a faixa de energia que o Mini-Calorímetro possui, de ~ 0.3 a 100 MeV , ele tem um programa que fornece um limiar de ativação dinâmico, que faz com que ele seja

um ótimo instrumento para detectar FGTs (TAVANI et al., 2009). Uma análise dos dados registrados pelo Mini-Calorímetro durante o período Junho de 2008 - Março de 2009 mostrou um total de 34 eventos com uma média em torno de quatro eventos por mês. O espectro de energia para esses eventos atingiu até 43 MeV (MARISALDI et al., 2010). A distribuição geográfica dos eventos apresentou concordância com a distribuição reportada por Smith et al. (2005), mostrando uma aglomeração sobre regiões equatoriais e tropicais. Os resultados obtidos consolidaram a relação temporal dos FGTs com relâmpagos e nuvens de tempestade.

Até as observações realizadas pelo AGILE, o espectro de energia, bem como o mecanismo de geração de FGTs, vinha sendo modelado como resultado do processo AEFR. Entretanto as medições reportadas pelo time do AGILE mostraram, surpreendentemente, que o espectro de energia dos FGTs chega até muito mais do que 43 MeV . De uma amostra de 130 FGTs, registrados entre Junho de 2008 e Janeiro de 2010, 14 deles apresentaram energias superiores a 40 MeV , e entre eles havia um caso com energia de 100 MeV (TAVANI et al., 2011). Esse resultado, bem como os eventos raros reportados por Chilingarian et al. (2012), não é explicado pelas teorias desenvolvidas para os casos anteriores. A Figura 1.10 mostra o espectro de energia para os 130 FGTs registrados, onde a linha sólida é um ajuste em lei de potências dividido em dois segmentos para descrever os diferentes fluxos considerados, e a linha pontilhada é o espectro de energia modelado baseado em observações anteriores ao AGILE (TAVANI et al., 2011). As medidas do AGILE e do grupo de Chilingarian trouxeram, portanto, a necessidade de reavaliar as teorias que estavam sendo estabelecidas.

1.2.2.1 Modelos de iniciação de FGTs

Desde sua descoberta, a produção dos FGTs sempre foi associada às nuvens de tempestade e relâmpagos (FISHMAN et al., 1994). Os modelos que tentaram e que tentam descrever a produção dos FGTs sempre enfatizam as características do relâmpago.

Um relâmpago é um canal de plasma fracamente ionizado capaz de se desenvolver em duas direções opostas, como o explica a teoria bidirecional (KASEMIR, 1960). As extremidades desse canal possuem cargas opostas que mantêm uma carga líquida nula ao longo do canal.

O líder positivo, assim denominado por possuir carga positiva na sua ponta, formada por streamers positivos, atrai cargas negativas basicamente por efeito da força de Coulomb. Os elétrons livres na região em frente da cabeça positiva do líder são

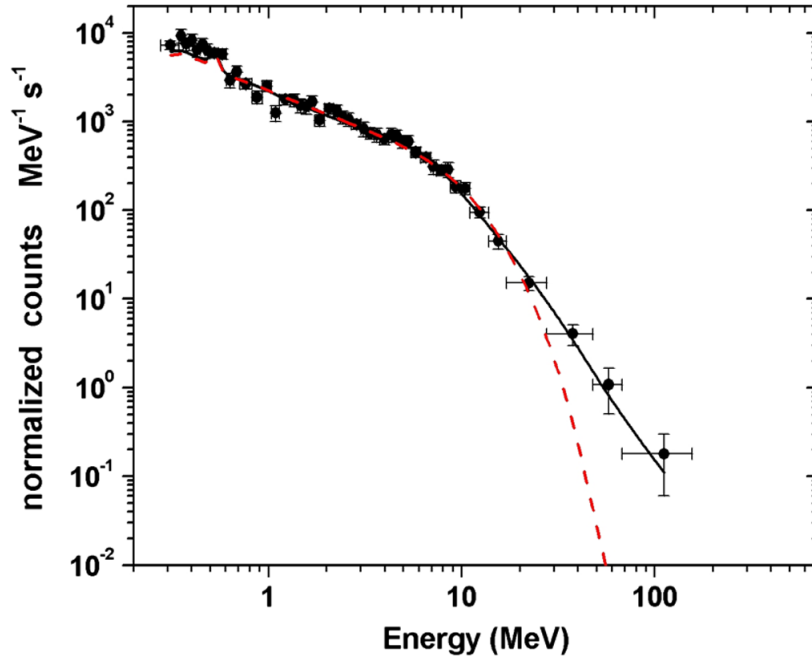


Figura 1.10 - Espectro de energia para o conjunto de 130 FGTs registrados pelo AGILE entre Junho de 2008 e Janeiro de 2010. A linha sólida mostra o ajuste em lei de potências dividido em dois segmentos, e a linha pontilhada é um modelo esperado do espectro de energia dos fótons.
 Fonte: [Tavani et al. \(2011\)](#).

atraídos para dentro do canal, mantendo, assim, um crescimento constante do canal com uma velocidade de $0,4 \times 10^6 - 2,4 \times 10^6 \text{ m/s}$ ([RAKOV; UMAN, 2003](#)). O líder negativo, caracterizado por possuir cargas negativas na cabeça, formada por streamers negativos, se propaga de maneira diferente. Quando a carga negativa acumulada na ponta do líder é suficiente para gerar outro líder bidirecional na frente dele (com a ponta positiva direcionada para o líder negativo), esse novo líder avança na direção do anterior, com intervalos de $50 \mu\text{s}$ entre cada passo. A velocidade média de propagação do líder negativo é de $2 \times 10^5 \text{ m/s}$ ([RAKOV; UMAN, 2003](#)).

A complicada propagação dos líderes tem a ver com a direção e sentido do campo elétrico e onde a ionização acontece com maior facilidade. Quando o líder, independentemente da polaridade, faz contato com uma região carregada da nuvem, um relâmpago chamado de intranuvem (IN) é produzido. Se esse contato se dá com a superfície, têm-se os chamados relâmpagos nuvem-solo (NS). Os relâmpagos NS podem transferir tanto carga positiva (NS+) quanto carga negativa (NS-) para o solo. Os relâmpagos IN são os mais comuns, compondo aproximadamente 90% do total de relâmpagos, os NS- formam $\sim 9\%$, e os NS+ formam $\sim 1\%$ do total ([RAKOV; UMAN,](#)

2003).

No caso dos relâmpagos NS, o líder que segue em direção ao solo cria em seu caminho um canal condutor, i.e. o canal do relâmpago, entre a nuvem e o solo. A diferença de potencial entre o solo e o centro de carga associado dentro da nuvem, positivo ou negativo, faz com que os elétrons fluam dentro desse canal. No caso de um relâmpago negativo a corrente elétrica flui da nuvem em direção ao solo e nos relâmpagos positivos esse sentido é do solo para o centro de carga. Essa rápida transferência de elétrons é chamada de *descarga de retorno*. O número das descargas de retorno pode variar muito. Em média, 81% dos relâmpagos NS+ e 20% dos NS- apresentam só uma descarga de retorno, ou seja, os NS- têm uma multiplicidade maior do que os NS+: 3,8 para NS- e 1,2 para NS+ (SABA et al., 2006; SABA et al., 2010).

O primeiro modelo proposto na tentativa de explicar o processo de produção dos FGTs foi do Lehtinen et al. (1996). Esse modelo era baseado na idéia da ruptura dielétrica do ar por campos Quasi-Eletrostáticos (QE) de relâmpagos, que foi proposto por Pasko et al. (1995) para explicar a iniciação dos Sprites. O modelo de Pasko et al. (1995) baseia-se no fato de que, a súbita remoção de cargas dentro da nuvem produzida por um relâmpago NS+, produz um desequilíbrio nas cargas dentro da nuvem. Esse desequilíbrio gera um campo elétrico em toda a região da atmosfera entre a nuvem e a ionosfera, que pode ser intenso o suficiente para promover a quebra da rigidez dielétrica do ar na mesosfera, iniciando um Sprite (SÃO SABBAS, 2003), conforme mostrado na Figura 1.11.

Como no início dos estudos nessa área de pesquisa acreditava-se que os FGTs eram gerados pelos Sprites, alguns autores tentaram ajustar o modelo baseado em campos QE para as observações feitas pelo BATSE, refinando-o. Mas os resultados do modelo apenas concordavam com as observações do BATSE se os relâmpagos NS que originavam o processo transferissem carga maior do que $250 C$ e se as emissões dos raios γ fossem produzidas entre 60 e 70 km (LEHTINEN et al., 1996). Lehtinen et al. (1999) assumiram que os centros de carga da nuvem estavam localizados a uma altura de 10 km, o que significa que o momento de carga era $2500 C \cdot km$.

Em 2005, porém, Cummer et al. (2005) mostraram que o momento de carga necessário para a iniciação dos FGTs era muito menor do que acreditava-se até então. Cummer et al. (2005) calcularam o momento de carga de 13 relâmpagos positivos relacionados com observações de FGTs registrados pelo RHESSI, achando uma média de $49 C \cdot km$, um valor aproximadamente 5 vezes menor do que o estimado por Lehtinen et al. (1996), invalidando esse modelo.

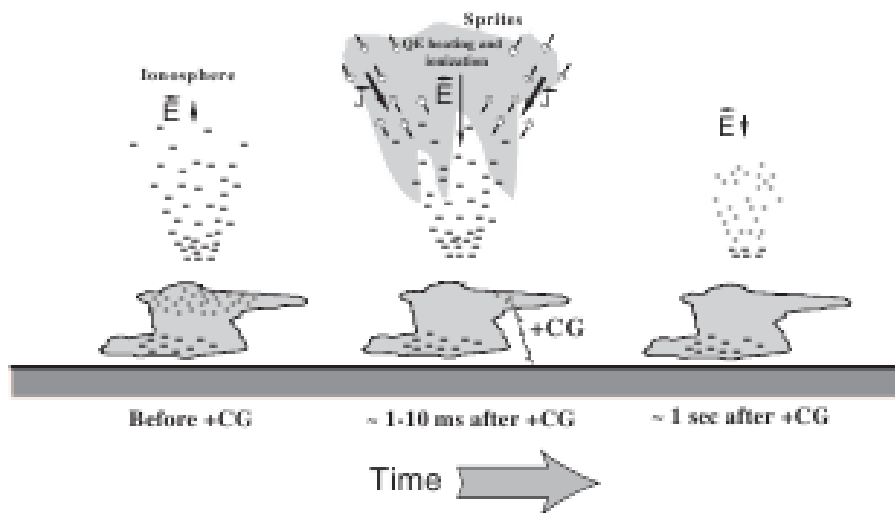


Figura 1.11 - Esquema do processo da quebra da rigidez dielétrica do ar pelo modelo Quasi-Eletrostáticos.
 Fonte: Pasko (2007).

Dessa forma, um novo modelo foi proposto, baseado no Pulso Eletromagnético (PEM) produzido pela descarga de retorno de um relâmpago (INAN; LEHTINEN, 2005). O PEM é produto do rápido movimento de um pulso de corrente vertical. Para que este modelo possa reproduzir as observações requere-se uma corrente muito alta ($>400 \text{ kA}$), bem como altíssimas velocidades da descarga de retorno, poucas vezes observadas ($v_{rs} > 0,99c$). Inan e Lehtinen (2005) estimaram uma produção global de 6-12 FGTs por dia para relâmpagos com altos valores de corrente, o que é muito menor do que os 50 FGTs por dia estimados por Smith et al. (2005).

No ano seguinte, observações feitas por Stanley et al. (2006) com dados do detector de relâmpagos Los Alamos Sferic Array (LASA), mostraram evidências para rejeitar o modelo PEM. Stanley et al. (2006) mediram perturbações do campo elétrico originadas por relâmpagos coincidentes com observações de FGTs registradas pelo RHESSI. Usando janelas temporais de $\pm 10 \text{ ms}$, tempo suficiente para as emissões procedentes de tempestades chegarem até o RHESSI, considerando uma área de cobertura do satélite de $\sim 1000 \text{ km}$, filtraram a localização de 8 relâmpagos, 6 deles detectados por mais de uma estação do LASA, o que permitiu determinar que os responsáveis por essas perturbações foram relâmpagos IN+. Também observaram que 2 FGTs aconteceram suficientemente perto das estações, permitindo estimar sua altitude através do atraso que se produziu quando as ondas eletromagnéticas dos

relâmpagos foram refletidas na ionosfera. As altitudes estimadas foram 11,5 e 14,5 *km*. Estes resultados contrariavam o modelo PEM, que tem por condição básica a ocorrência de um relâmpago NS.

Analisando observações em solo de Moore et al. (2001) e Dwyer et al. (2004), que mostravam emissões de raios γ e X associada com o desenvolvimento do canal de relâmpagos naturais e trigados, analisando observações de relâmpagos IN associados com FGTs (STANLEY et al., 2006), e a falta de consistência nos modelos anteriores (QE e PEM) para descrever as observações, Carlson et al. (2010) sugeriram um novo modelo para explicar a geração dos FGTs, o modelo do Pulso de Corrente do Relâmpago (PCR).

A idéia central do modelo PCR é que as pontas do líder de um relâmpago IN podem gerar campos elétricos suficientemente altos, capazes de acelerar e produzir elétrons com o mecanismo AEFR, e esses elétrons emitirem FGTs por radiação Bremsstrahlung. O modelo é composto por um conjunto de equações que descreve a evolução temporal das cargas e das correntes num meio resistivo ou condutivo. Esse sistema de equações é aplicado na descrição da evolução temporal do canal do relâmpago.

Embora a geometria do relâmpago, e.g. tortuosidade e bifurcações, não seja bem modelada por Carlson et al. (2010), ela é bem mais realista do que no caso dos modelos anteriores. Para relâmpagos com pico de corrente da ordem de 100 *kA*, comprimento do canal $\gtrsim 1$ *km*, que estejam dentro de um campo elétrico de $\gtrsim 100$ *kV/m*, as simulações prevêm emissões de fótons consistentes com observações de FGTs, com exceção dos FGTs com energias de 100 *MeV* observados pelo AGILE.

1.3 Este trabalho

A América do Sul é um lugar muito particular para o estudo da Física Atmosférica de Alta Energia devido à presença da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) e à alta densidade de relâmpagos que apresenta a região Sul do Brasil. Embora, observações de FGTs com equipamentos abordo de satélite não sejam possíveis, devido à intensa chuva de partículas energéticas na altitude dos satélites em função da AMAS, o que obriga aos satélites a desligar seus detectores, existem estudos sobre a detecção de partículas energéticas relacionadas com perturbações do campo elétrico atmosférico que já foram realizados na América do Sul.

Winkelmann (2010) e Mendonça et al. (2011), realizaram observações da variação

do fluxo de raios cósmicos secundários relacionados à presença de campos elétricos atmosféricos, com detectores em solo, mostrando um claro aumento nas contagens de partículas durante a passagem de nuvens de tempestade. Mendonça et al. (2011) verificaram que, em 70% dos casos analisados com aumento do fluxo de partículas, as mudanças do campo elétrico foram acompanhadas por chuva. Os 30% restantes eram, portanto, devido unicamente às mudanças no campo elétrico, descartando-se possíveis efeitos associados ao Radônio, presente na água da chuva, reforçando, assim, a idéia de que as partículas são produzidas pelo campo elétrico atmosférico.

Até agora a observação de elétrons e fótons energéticos pode ser dividida em três categorias: a) observações de solo de eventos com longa duração (até ~ 10 minutos) (ALEXEENKO et al., 1987; TORII et al., 2002; TSUCHIYA et al., 2009; CHILINGARIAN et al., 2012), e b) observações de eventos de curta duração (da ordem de μs) ligados a relâmpagos (MOORE et al., 2001; DWYER et al., 2004); e c) os FGTs, observados a partir de satélites ou aviões, com durações menores que milissegundos, também ligados a relâmpagos (FISHMAN et al., 1994; SMITH et al., 2005; BRIGGS et al., 2010; SMITH et al., 2011; MARISALDI et al., 2010; TAVANI et al., 2011).

Mas ainda há muitas questões em aberto, por exemplo as observações extremas do AGILE ou os eventos raros observados no Monte Aragats não são ainda bem compreendidos. É possível que modelos como do Pulso Eletromagnético ou do campo Quase-Eletrostático possam explicar essas observações.

O estudo da Física Atmosférica de Alta Energia está fortemente ligada com a eletrificação dentro da nuvem e o início e desenvolvimento do relâmpago, aspectos da física de nuvens que ainda não são bem compreendidos. A produção de FGTs acontece logo depois do início de relâmpagos intra nuvem (LU et al., 2010) e é sabido que eles precisam de intensos campos elétricos para sua produção, portanto conhecer em detalhe a iniciação dos FGTs poderia significar desvendar o mecanismo de iniciação e propagação do próprio relâmpago.

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar a emissão de partículas energéticas por nuvens de tempestade utilizando sensores de superfície. Foram usados dados coletados pelo Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger localizado na Argentina ($\sim 35^\circ 17' S$, $69^\circ 20' O$, 1377 m.s.n.m.) em conjunto com dados coletados pelo Lightning Imaging Sensor (LIS), instrumento óptico a bordo do satélite Tropical Rain Measuring Mission (TRMM), para um período de cinco anos. Com esses conjuntos de dados se procurou verificar se o Observatório Pierre Auger é capaz de observar fótons/partículas emitidas pelos relâmpagos.

2 INSTRUMENTAÇÃO E DADOS

2.1 Observatório Pierre Auger

O Observatório de Raios Cósmitos Pierre Auger está localizado em Malargue, na província de Mendoza da Argentina ($\sim 35^\circ 17' S$, $69^\circ 20' O$, 1377 m). É um observatório híbrido que combina duas técnicas de observação: a detecção da fluorescência do nitrogênio produzida na atmosfera devido à passagem das partículas de um chuveiro cósmico, e a medição da distribuição lateral das partículas que chegam até o solo.

O Observatório é composto por um arranjo de 1600 detectores de partículas em solo, separados por 1.5 km um do outro, numa grade triangular que cobre uma superfície de 3.000 km². Nas bordas do arranjo estão localizadas 4 estações com 6 telescópios de fluorescência cada um. A Figura 2.1 mostra o esquema da localização dos detectores de solo e os de fluorescência. O principal objetivo do Observatório é medir o fluxo, distribuição da direção de chegada e a composição dos raios cósmicos acima de 10¹⁸ eV com alta significância estatística (ABRAHAM et al., 2004).

Neste trabalho foram utilizados apenas dados dos detectores de superfície, por tanto a descrição instrumental se aterá apenas a eles. Cada detector que compõe o arranjo é um tanque de simetria cilíndrica, 3,6 m de diâmetro e 1,5 m de altura, preenchido com 1.200 litros de água. Possui três fotomultiplicadoras, de nove polegadas cada uma, instaladas na parte superior do tanque. Os tanques usam a emissão da luz Cherenkov para a detecção de partículas. Essa luz é produzida quando partículas carregadas atravessam um meio dielétrico com uma velocidade maior que a velocidade da luz no meio (no caso da água a máxima velocidade da luz é $\sim 0,75c$). Esses fótons de luz, que são radiação ultravioleta fraca, são produzidos num cone com abertura angular de

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta} \quad (2.1)$$

onde β é a velocidade, relativa à velocidade da luz, n é o índice de refração do meio, que na água tem um valor de 41° (WILEMAN, 2008).

Os tanques também são capazes de detectar fótons. Os fótons interagem com as moléculas d'água do tanque por dispersão Compton e produção de pares (e^- , e^+). Esses elétrons e pósitrons possuem velocidades relativísticas, portanto são capazes



Figura 2.1 - Localização dos detectores do Observatório Pierre Auger na Argentina. Os pontos pretos com linhas verdes mostram a localização dos detectores de fluorescência, chamados de “Loma Amarilla”, “Coihueco”, “Leones” e “Morados”. Os pontos vermelhos mostram os detectores de solo.
 Fonte: Pierre Auger Observatory (2008b)

de produzir luz Cherenkov.

Internamente, cada tanque é coberto com um forro branco sintético chamado de Tyvek®, que difunde e reflete a luz Cherenkov além de manter a pureza da água (WILEMAN, 2008). Na parte superior do tanque estão instaladas três fotomultiplicadoras, de 9 polegadas de diâmetro, encarregadas de coletar a luz Cherenkov. Cada fotomultiplicadora possui um conversor analógico-digital (Flash Analogue to Digital Converter - FADC), que tem uma amostragem de 40 MHz (25 ns por bin temporal).

Os fótons coletados pelas fotomultiplicadoras são transformados em pequenos pulsos de corrente (sinais elétricos analógicos). Esses sinais analógicos são digitalizados quando passam pelo conversor, logo depois são enviados a um dispositivo lógico (Programmable Logic Device - PLD) que implementa os critérios de disparo. Para inserir o tempo de modo sincronizado cada tanque possui um GPS comercial (WILEMAN, 2008). A seguir, a informação de cada detector é enviada por sinais de radio

até uma das 4 estações coletoras. Essas estações retransmitem a informação até a central de processamento de dados em Malargue, por sinais de microondas, onde são aplicados outros critérios de disparo para calcular a energia do raio cósmico primário e a direção de chegada. A Figura 2.2 mostra uma fotografia do tanque.

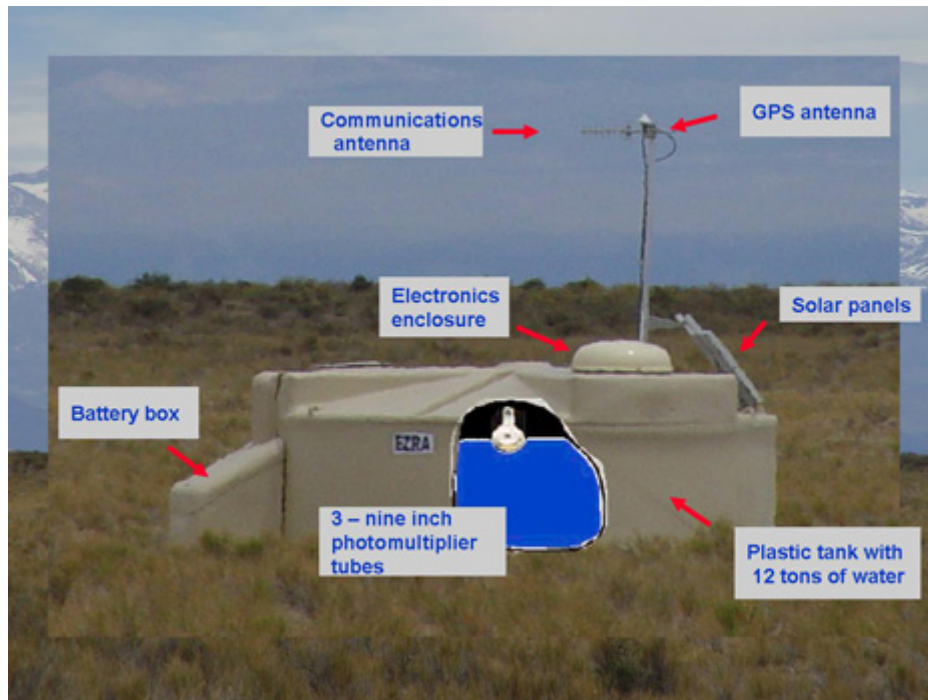


Figura 2.2 - Fotografia adaptada de um dos detectores de superfície do Observatório. Os principais componentes são etiquetados.
Fonte: Pierre Auger Observatory (2008a)

2.1.1 Calibração dos detectores de superfície

A nível do solo os chuviros de partículas são compostos principalmente por fótons e elétrons com energias médias abaixo dos 10 MeV , e múons com energias médias em torno de 1 GeV (AGLIETTA et al., 2005). A partir desses múons são construídos dois histogramas da energia depositada: um histograma composto por múons que vêm de todas direções, conhecidos também como múons atmosféricos, e um histograma composto apenas de múons verticais.

O histograma dos múons verticais é obtido a partir de um tanque projetado especificamente para a detecção de múons verticais, cujo pico, chamado de *muon vertical equivalente* (MVE), corresponde a uma energia depositada de $\sim 240 \text{ MeV}$ (AGLIETTA et al., 2005). Já o histograma dos múons atmosféricos é obtida em cada tanque,

e o pico fica localizado em 1,09 MVE (RIVERA, 2013).

A cada quatro horas é construído o histograma dos múons atmosféricos em cada tanque para conferir a posição dos picos de ambos histogramas. A Figura 2.3 mostra a comparação de ambos histogramas. Em preto, o histograma dos múons atmosféricos e em vermelho o histograma dos múons verticais

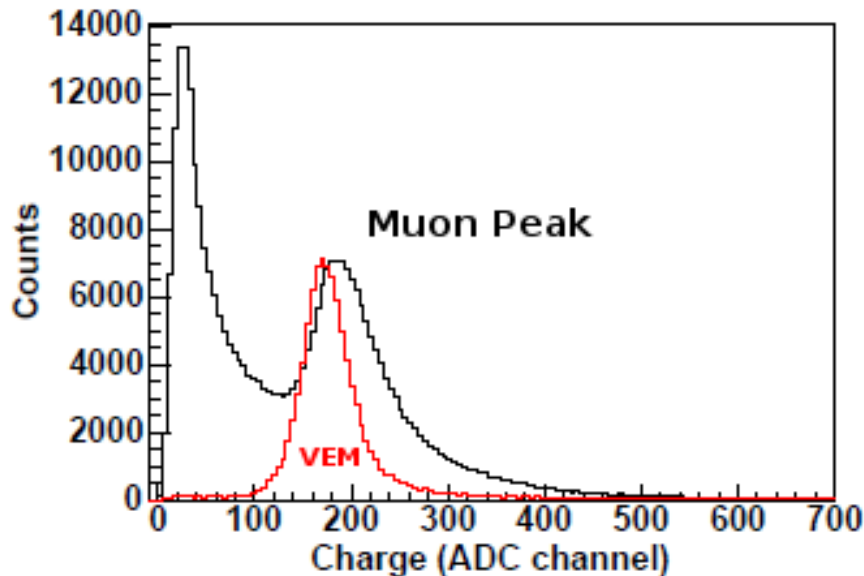


Figura 2.3 - Histograma de carga para muons verticais em vermelho e histograma de carga para muons de todas as direções em preto.

Fonte: Aglietta et al. (2005)

2.1.2 Critérios de disparo

O sistema de disparo está dividido em 5 níveis. Os dois níveis iniciais, T1 e T2, são implementados nos tanques em tempo real. O terceiro nível T3 é baseado no tempo e na posição dos tanques que satisfazem os dois primeiros níveis, e é implementado na Central de processamento, também em tempo real. Os dados são salvos apenas a partir do terceiro nível de disparo. O quarto e quinto nível, T4 e T5, são implementados nos dados salvos mas não em tempo real.

Por sua vez, os níveis iniciais T1 e T2 estão divididos em dois tipos, o TH e ToT. O tipo TH está orientado à detecção de grandes sinais não dispersos no tempo, típicos sinais de múons. Por outro lado, o tipo ToT está orientado a detecção de sinais

produzidos pela componente eletromagnética do chuvaire.

O TH-T1 é um simples limiar de ativação, precisa de apenas um bin (unidade temporal mínima de 25 ns, correspondente à máxima taxa de amostragem) acima de 1,75 MVE que seja registrado em coincidência nas 3 fotomultiplicadoras. O ToT-T1 chama-se de tempo sobre o limiar. Nesse caso é preciso que o sinal de 13 bins, com 2 fotomultiplicadoras em coincidência, mantenha-se acima de 0,2 MVE numa janela de 120 bins (3 μs). Uma vez que o disparo é ativado, são salvos 768 bins (19,2 μs), divididos em 256 bins antes do disparo e 512 bins após.

O nível de disparo T2 é um algoritmo que seleciona todos os disparos do tipo ToT-T1 e os TH-T1 acima de 3,2 MVE. Todos os disparos tipo T2 são enviados para a central de processamento com a correspondente identificação temporal e do tipo de disparo, além das informações da localização do tanque.

O critério T3 é aplicado na central de processamento em duas condições diferentes. A primeira condição é voltada para selecionar pelo menos três tanques com disparos ToT-T2 com configuração compacta: um dos de tanques disparados deve ter um vizinho disparado no primeiro anel e o outro no segundo anel. Esse tipo de disparo é chamado de *ToT2C1&3C2*. Como mostra a Figura 2.4, o termo "anel" refere-se ao conjunto de tanques que rodeiam qualquer tanque. A segunda condição utiliza pelo menos quatro tanques com qualquer tipo de disparo T2. O tanque central deve estar rodeado por três tanques vizinhos, cada um deles localizado nos anéis mais próximos ao tanque central. Esse tipo de disparo é chamado de *2C1&3C2&4C4*. A Figura 2.4 mostra o disparo *2C1&3C2&4C4*.

Finalmente é imposto um critério temporal: qualquer um dos tanques dos anéis deve estar contido num tempo igual o menor aos $(6+5Cn)\mu s$ do tanque central, onde Cn refere-se ao número do anel hexagonal. Uma vez que esses critérios são satisfeitos, a central de processamento solicita os registros (traços) dos tanques para serem salvos como eventos T3.

As taxas de amostragem são diferentes para cada critério de disparo. A Figura 2.5 mostra o esquema da variação das taxas de amostragem para cada um dos critérios. O critério TH-T1 possui uma frequência de ~ 100 Hz para cada um dos tanques. O TH-T2, que é o seguinte na hierarquia, reduz a frequência para ~ 20 Hz. Entretanto, o critério ToT-T1 possui uma taxa de amostragem de ~ 2 Hz, muito menor comparada com a TH do mesmo nível, mas quando ela passa para ToT-T2 a taxa de amostragem é mantida, ~ 2 Hz. No caso do T3 as taxas de amostragem caem ainda mais, o critério

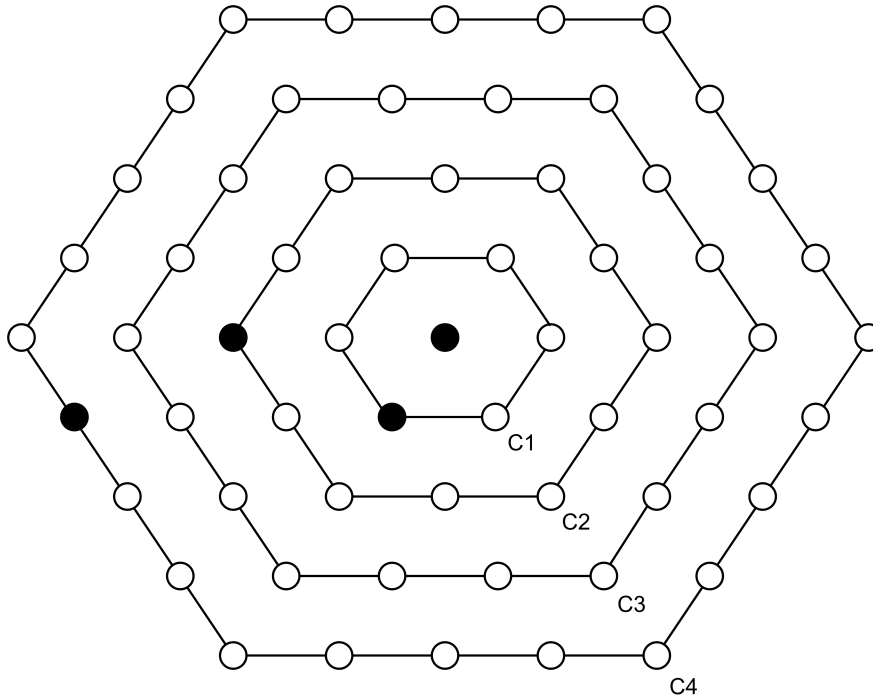


Figura 2.4 - Ilustração da condição mínima para o critério espacial $2C1\&3C2\&4C4$. Os pontos pretos representam aos tanques que foram disparados. O primeiro anel ilustra a condição $2C1$, onde um tanque além do central foi disparado. O segundo anel refere-se à condição $3C2$. No último anel mostra-se a posição do tanque mais afastado para cumprir a condição $4C4$.

$2C1\&3C2\&4C4$ é de ~ 0.01 Hz, e o $2C1\&3C2$ é de ~ 0.02 Hz.

O critério de disparo $T3$ é insuficiente para garantir que os eventos registrados até esse ponto pertençam a chuviros de partículas reais e não apenas a partículas que chegam aos tanques de forma individual e aleatória, mas espera-se que dentro do grande volume de dados obtidos pelo critério $T3$ existam eventos físicos reais. Para extrair os eventos reais que correspondem aos chuviros de partículas é implementado o critério $T4$. Esse critério também é o primeiro passo para selecionar aqueles eventos para os quais é possível reconstruir a direção de chegada do chuviro.

Do mesmo modo que no critério de disparo $T3$, o disparo $T4$ também possui dois tipos de condições. A primeira delas é o $3ToT$, que precisa de três tanques com disparos $ToT-T2$, um dos tanques deve ter os dois vizinhos localizados no primeiro anel. Exemplos dessa configuração são mostrados no painel superior da Figura 2.6. A segunda condição é a chamada $4C1$. Para essa condição são necessários quatro tanques com qualquer tipo de disparo $T2$. A configuração dos tanques para essa condição estabelece que um dos tanques tenha três vizinhos no primeiro anel. Exemplos

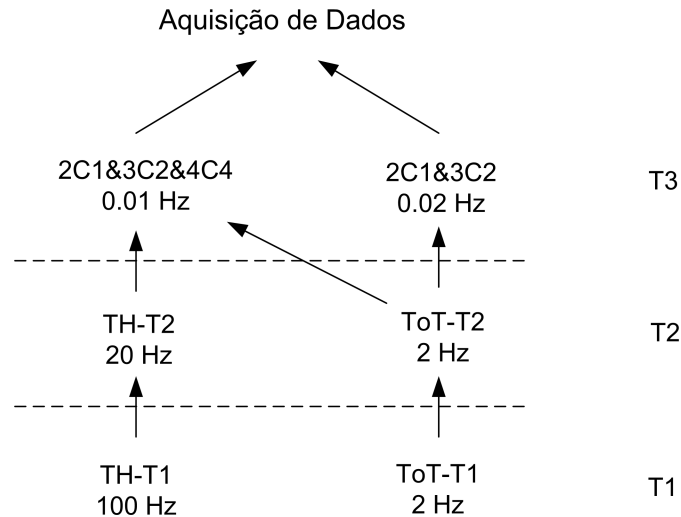


Figura 2.5 - Frequência de amostragem dos diferentes critérios separados hierarquicamente.

Fonte: Adaptado de Rivera (2013).

da condição $4C1$ são mostrados no painel inferior da Figura 2.6. Os instantes de detecção dos tanques que satisfazem as condições $3ToT$ ou $4C1$ devem ser compatíveis com a velocidade da luz para serem considerados como eventos T4 (ALLARD et al., 2005). A grande maioria (98%) dos evento T4 são selecionados com a condição $3ToT$, já que ele está voltado para detecção de chuveiros verticais, i.e., chuveiros com inclinações de até 60° (RIVERA, 2013).

O último critério de disparo é o T5. Esse critério rejeita os casos onde o evento foi registrado perto das margens do arranjo, por que nesses casos a reconstrução do chuveiro não é muito confiável. O disparo T5 procura eventos onde o tanque central esteja rodeado por outros 6 tanques no primeiro anel (Figura 2.7). É suficiente que os 6 tanques estejam funcionando, não é necessário que todos eles sejam disparados, na hora da chegada do chuveiro. Assim assegura-se uma boa e imparcial reconstrução do evento, por isso o T5 é chamado de disparo de qualidade.

2.2 Lightning Imaging Sensor - LIS

O outro conjunto de dados utilizado neste trabalho é de relâmpagos detectados pelo LIS. O LIS é um detector de relâmpagos com apontamento nadir a bordo do satélite TRMM. Tem como principal objetivo o estudo da distribuição, sazonalidade, taxa de ocorrência e a variabilidade, de um modo geral, dos relâmpagos produzidos na atmosfera do planeta.

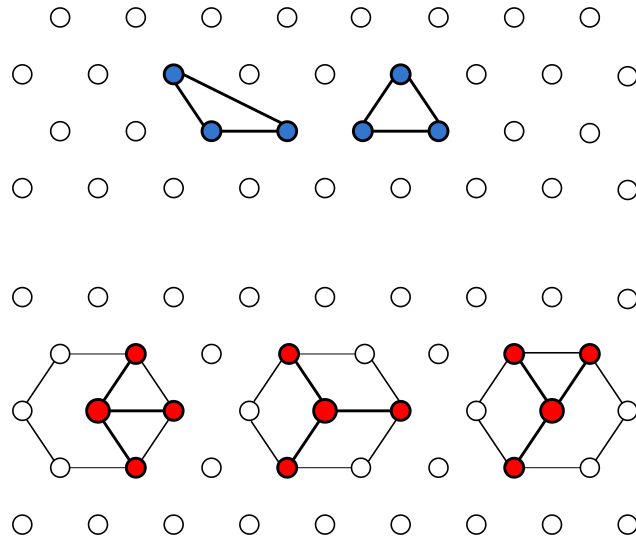


Figura 2.6 - Ilustração da geometria que deve se cumprir para o disparo T4. No painel superior, a configuração do disparo $3T_oT$ e no inferior, a configuração mínima do disparo $4C1$.

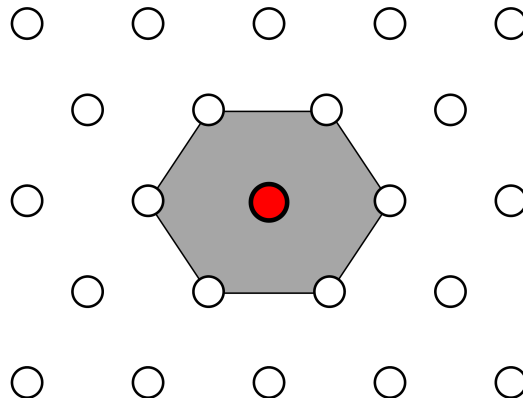


Figura 2.7 - Ilustração da geometria do disparo T5. O tanque pivô fica rodeado por outros 6 tanques funcionais.

O TRMM se desloca uma velocidade de 7 km/s, completando 16 órbitas por dia (CHRISTIAN et al., 1999), portanto coleta dados durante aproximadamente 92 segundos sobre os 3000 km^2 do Observatório Pierre Auger. Devido ao apontamento do LIS, ele não diferencia relâmpagos IN de NS. Possui um sensor do tipo CCD (do inglês, Charged Copled Device, Dispositivo Acoplado de Carga) com 128×128 pixels e uma taxa de amostragem um pouco superior a 500 quadros por segundo (CHRISTIAN et al., 1999). O campo de visada do LIS mudou ao longo de sua vida. Durante os primeiros anos da missão, de 1997 até 2001, o TRMM ficava a uma altitude de 350 km e uma inclinação de 35° , o que permitia ao LIS ter um campo de visada de $580 \times 580 \text{ km}$, cada pixel com $3,7 \times 3,7 \text{ km}$, e manter a mesma área de observação

por ~ 80 segundos. Nos anos posteriores (2001 até o presente) o TRMM foi levado a uma órbita superior ($402,5 \text{ km}$) para prolongar o tempo de vida da missão. Desse modo, o campo de visada aumentou para $668 \times 668 \text{ km}$, a resolução espacial foi para $4,3 \text{ km}$, e o tempo de observação do campo de visada aumentou para ~ 92 segundos (ALBRECHT et al., 2011).

O LIS foi projetado para detectar e localizar relâmpagos numa escala de $5\text{-}10 \text{ km}$, típica área iluminada por um relâmpago. Conta com uma resolução temporal de aproximadamente 2 ms , sendo também capaz de medir a energia radiante emitida pelos relâmpagos. A eficiência de detecção que o LIS consegue é de $\sim 93\%$ durante a noite e de $\sim 73\%$ ao meio dia (BOCCIPPIO et al., 2002).

A reflexão da luz solar nos topos das nuvens faz com que a radiação emitida por um relâmpago seja apenas uma tênue luz durante o dia. Para superar essa dificuldade o LIS usa quatro critérios de seleção de relâmpagos: (1) Emprega um filtro espacial que corresponde com a típica área iluminada por um relâmpago ($5\text{-}10 \text{ km}$); (2) Utiliza um filtro centrado na linha do oxigênio neutro, $777,4 \text{ nm}$, que é a linha de emissão mais intensa para os relâmpagos; (3) Usa um filtro temporal que compara a duração do pulso do relâmpago da ordem de $400 \mu\text{s}$ com o fundo iluminado que, na ordem de segundos, é quase constante. As limitações tecnológicas que o LIS possui fazem com que o tempo para essa comparação não seja menor que 2 ms ; (4) É aplicada uma correção sobre a variação do fundo (CHRISTIAN et al., 1992).

2.2.1 Dados LIS

Os dados coletados pelo LIS são agrupados, selecionados e disponibilizados, como dados científicos, em diferentes conjuntos. Esses conjuntos serão descritos a seguir em forma hierárquica.

Background

Background é uma imagem instantânea do fundo. Ele é estimado a partir de um algoritmo chamado de Processador de Eventos de Tempo Real. Os dados para o Background são contagens da amplitude de 12 bits para cada um dos pixels, a localização e o tempo no qual foi registrada a imagem.

Evento

O *Evento* é definido como o pixel individual, numa mesma imagem, que ultrapassa o Background da imagem. Eles são contabilizados de forma individual e são conside-

rados como a unidade básica para os dados do LIS. Os Eventos possuem informação do tempo, localização do pixel e a amplitude do sinal. O instante de ocorrência do Evento é atribuído no final do tempo de integração.

Grupo

O conjunto de Eventos vizinhos, ou em configuração diagonal, que são registrados na mesma imagem são chamados de *Grupo*. Um Grupo pode estar formado de apenas um ou vários Eventos. A definição de Grupo é a mais semelhante com a de uma descarga de retorno real, mas nem sempre um Grupo representa uma descarga de retorno.

Flash

A próxima agrupação de dados na escala hierárquica é o *Flash*. A definição de Flash leva em conta que um relâmpago real pode estar constituído de apenas uma descarga de retorno como também de um conjunto delas, todas pertencentes à mesma tempestade, com tempos e áreas que podem ser estimados. Assim, o conjunto de Grupos consecutivamente separados no tempo por não mais de 330 *ms* e com distância menor ou igual do que 5,5 *km* é definido como um Flash.

Vale a pena destacar que não existe um tempo máximo para o Flash ser formado, i.e., todos os Grupos que são produzidos dentro da área exigida e que não ultrapassem os 330 *ms* de diferença temporal entre um e outro são considerados como parte do mesmo Flash. O Flash pode ser formado de um Grupo com apenas um Evento, como também pode ser formado por vários Grupos que, por sua vez, sejam formados por vários Eventos.

Área

Na estrutura hierárquica do LIS, a *Área* está definida como a região na superfície da Terra onde acontecem relâmpagos uns próximos a outros. O critério para considerar uma região como Área exige que o conjunto de Flashes esteja separado por no máximo 16,5 *km* (três pixels aproximadamente), sendo desnecessário um critério temporal, uma vez que as tempestades normalmente duram bem mais do que a observação do LIS sobre uma determinada região.

Órbita

A Órbita é definida como uma passagem completa do satélite em volta de Terra. Ela inicia e termina na parte mais sul da trajetória. A orbita contém todas as informações supracitadas para um ciclo completo.

Viewtime

Como já mencionado, o LIS possui um tempo máximo de observação de aproximadamente 92 segundos sobre cada região de $668 \times 668 \text{ km}^2$ de área. Entretanto, isso nem sempre significa que os relâmpagos são produzidos durante todo esse tempo, O LIS pode não detectar nenhum relâmpago durante a sua passagem sobre a tempestade como detectar diversos, em diferentes intervalos (de 0 a ~ 92 segundos). O *Viewtime* fornece a quantidade de relâmpagos por tempo por localização. A localização do Viewtime é dividida numa grade de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ para cada ponto do campo de visada do LIS.

Dados de um segundo

Os *Dados de um segundo* proporcionam o estado do LIS, a cada segundo, dos parâmetros internos(estado do sistema LIS/TRMM, valores do limiar de ativação, etc.) quanto externos do instrumento(localização e orientação do TRMM).

2.2.2 Exemplo do registro de dados

A seguir é exemplificada a coleta de dados que o LIS realiza, mostrando o agrupamento dos pixels conforme eles são sensibilizados. O objetivo do exemplo é mostrar como os Eventos são agrupados em Grupos, os Grupos em Flashes, e os Flashes em Áreas.

O esquema mostrado na Figura 2.8 representa uma grade de 7×9 pixels do LIS no final do primeiro tempo de integração. Na Figura foram sensibilizados os pixels 1, 2, e 3. Esses pixels, chamados de eventos, passam a formar o Grupo *a*, que por sua vez é designado ao Flash *A*, e o Flash *A* é designado à Área α . O tempo desses Eventos é considerado como zero para este exemplo.

Após 100 ms, no final do tempo de integração, outros pixels são sensibilizados, também três eventos são formados pelos pixels 4, 5 e 6 (Figura 2.9). Esses eventos passam a pertencer ao Grupo *b*. O Grupo *b* ainda pertence ao Flash *A* que por sua vez pertence à Área α .

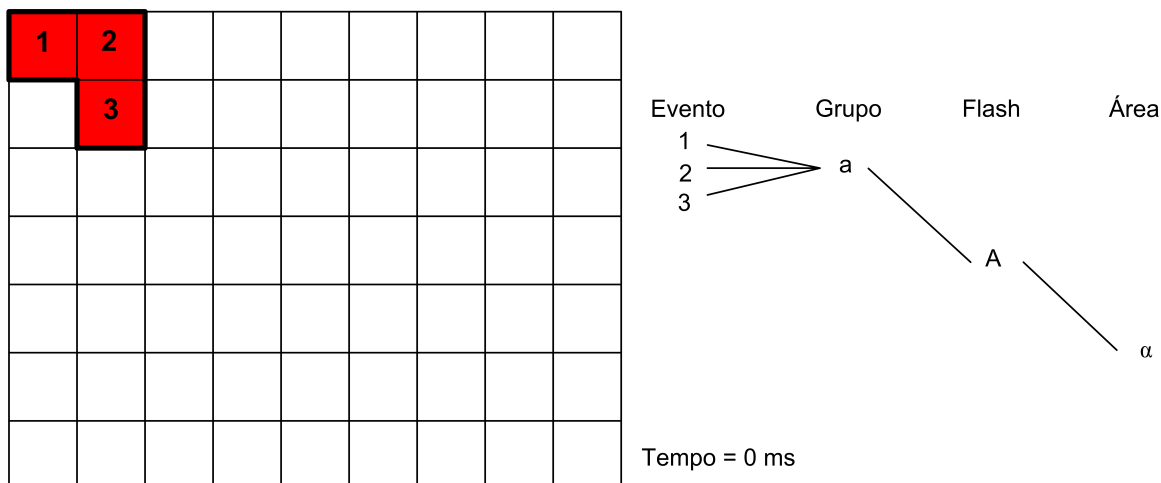


Figura 2.8 - Esquema exemplificador da coleta de dados do LIS. Para $t = 0 \text{ ms}$ acontecem 3 Eventos que são designados hierarquicamente ao Grupo a , Flash A e Área α .

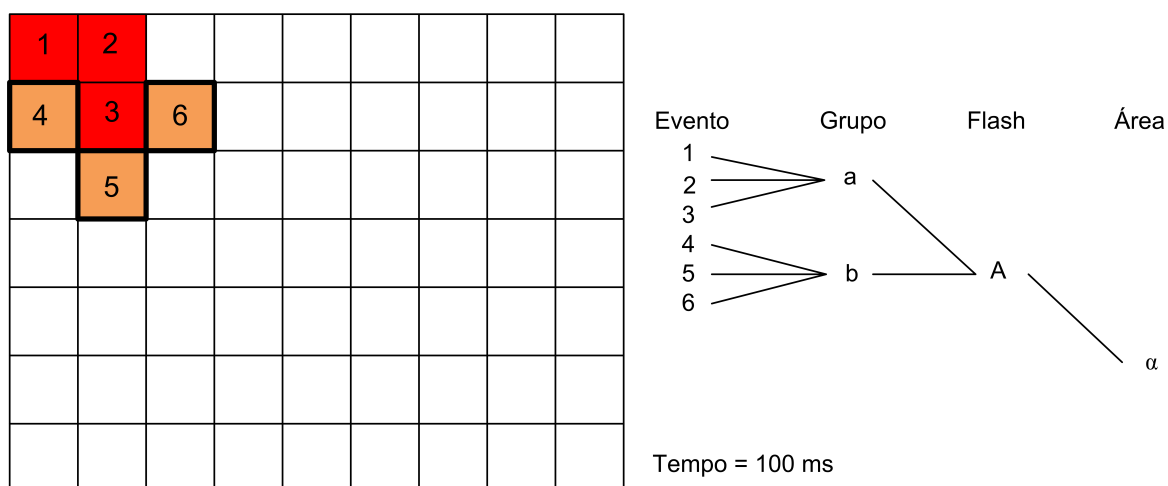


Figura 2.9 - Esquema do exemplo para $t = 100 \text{ ms}$. São detectados outros 3 Eventos que fazem parte de um novo Grupo, b . O Flash e a Área são as mesmas que no caso anterior.

A detecção seguinte acontece 350 ms depois dos primeiros Eventos terem acontecido (Figura 2.10). Dessa vez são detectados 4 Eventos. Os Eventos 7 e 8 aconteceram um do lado do outro, então eles são classificados como um novo Grupo, Grupo c . O Grupo c aconteceu 250 ms depois do Grupo anterior e a separação entre grupos é menor do que $5,5 \text{ km}$, portanto eles são contíguos aos Grupos a e b . Desse modo o Grupo c é designado ao Flash A e Área α . Os Eventos 9 e 10 são vizinhos um do outro, mas estão afastados o suficiente para serem considerados como um outro Flash, numa outra Área. Assim são criados um novo Grupo, d , novo Flash, B , nova

Área, β , respectivamente.

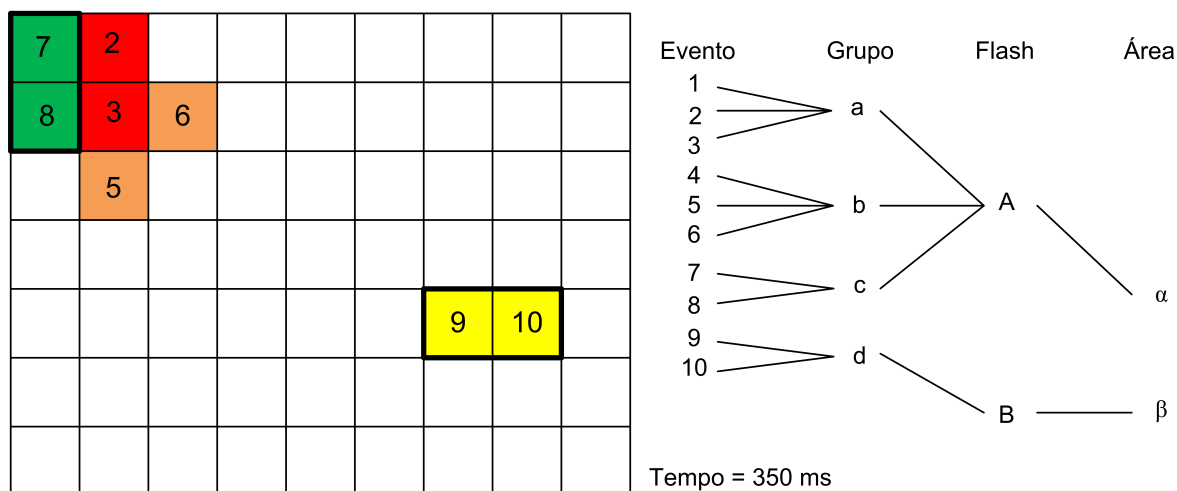


Figura 2.10 - Esquema do exemplo para $t = 350$ ms. São detectados 4 novos Eventos que são separados em 2 Grupos. As condições temporais e espaciais fazem com que o Grupo c seja designado ao Flash A , e o Grupo d seja designado a um novo Flash B que a sua vez pertence a Área β .

A Figura 2.11 mostra uma nova detecção 50 ms após o último Evento, e 400 ms desde o primeiro. Nesse exemplo foram detectados mais 2 Eventos, 11 e 12. Eles não são contíguos, então cada um deles é designado a um Grupo diferente, Grupo e e f respectivamente. Eles aconteceram apenas 50 ms depois do último Grupo, além de ambos serem vizinhos deste, portanto são designados ao Flash B e Área β .

A última detecção de nosso exemplo é registrada aos 700 ms. A Figura 2.12 mostra o esquema os dois últimos Eventos, 13 e 14. Eles aconteceram afastados o suficiente para serem considerados Grupos diferentes, g e h respectivamente. O Grupo g aconteceu na vizinhança do Flash A , mas num tempo que supera os 330 ms requeridos para fazer parte desse Flash, portanto é designado a um novo Flash, Flash C . Entretanto a condição para fazer parte da Área α é satisfeita, distância menor a $16,5$ km é sem nenhuma restrição temporal, portanto o Flash C forma parte da Área α . Já o caso do Grupo h é um pouco diferente. Ele aconteceu afastado do local dos Flashes anteriores, portanto é associado a um novo Flash, Flash D , e uma nova Área, Área γ .

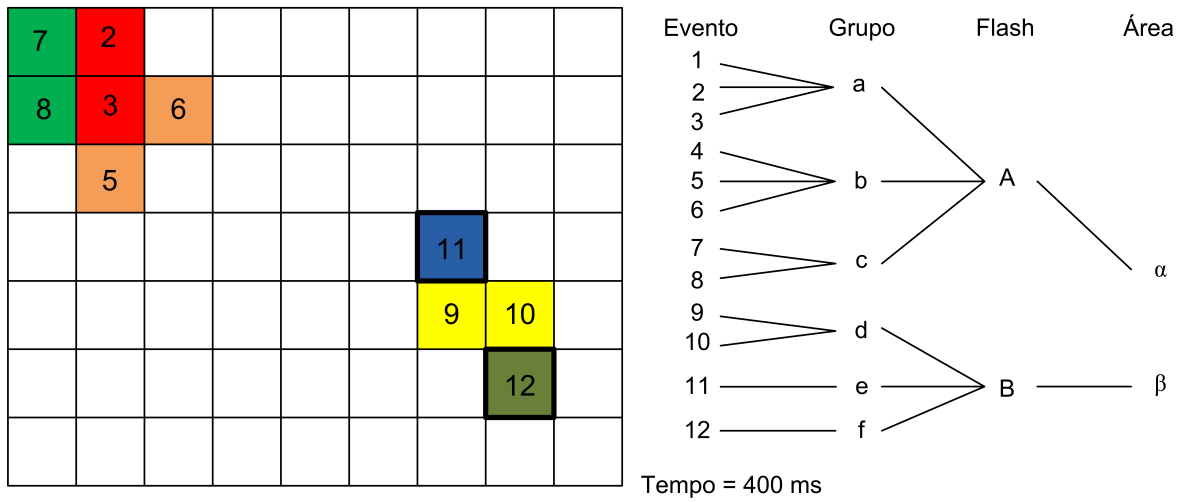


Figura 2.11 - Esquema para $t = 400$ ms. Dois novos Eventos são detectados e são designados a Grupos diferentes, mas pertencem ao mesmo Flash B e Área β .

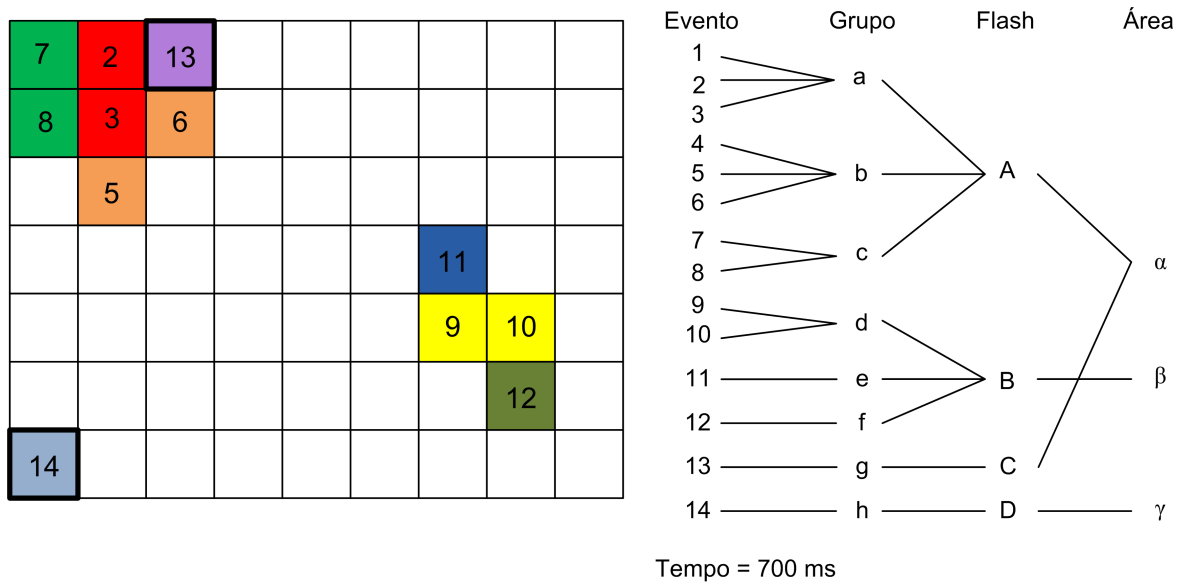


Figura 2.12 - Esquema para $t = 700$ ms. Foram registrados mais dois Eventos, 13 e 14. Pelas características espaço-temporais, o Evento 13 é designado ao Grupo g , Flash C e Área α . Porém, o Evento 14 é designado ao Grupo h , Flash D e Área γ .

3 METODOLOGIA E ANÁLISE DOS DADOS

Para a análise foram utilizados cinco anos de dados, de 03/01/2008 08:48:49 UT a 24/12/2012 22:51:30 UT. Tanto o LIS quanto o Auger possuem diversas categorias de dados. Neste trabalho foram usados os dados dos Grupos detectados pelo LIS, em função de terem a maior resolução temporal e serem o conjunto de dados mais próximo das descargas de retorno individuais dos relâmpagos. Em relação aos dados do Auger, foram utilizados os eventos T3, uma vez que T3 é o primeiro critério de disparo que salva os registros das partículas e/ou fótons que chegam até o nível dos tanques com energia maior ou igual a 48 MeV .

Os cinco anos de dados contabilizam um total de 11.455.273 registros de partículas/fótons pelo Auger. No caso do LIS foi necessário fazer uma seleção dos Grupos baseado na localização do Observatório, uma vez que as tempestades que produzem relâmpagos sobre Auger podem atingir tamanhos bem maiores que a área do Auger. Portanto, o primeiro passo do desenvolvimento metodológico foi escolher critérios espaciais adequados para selecionar os dados do LIS de modo a englobar apenas os relâmpagos com o potencial de terem gerado emissões energéticas detectáveis pelo Auger.

O critério espacial utilizado foi selecionar uma área de $2,5 \times 2,5$ graus a partir do centro geométrico aproximado do Auger, que é $-35,25^\circ \text{ S}$ e $-69,25^\circ \text{ O}$. Considerar uma área maior do que a área do Auger, garantiu que os relâmpagos que foram produzidos na vizinhança de Auger também sejam levados em conta. A Figura 3.1 mostra em amarelo a área ocupada pelos tanques do Auger, e a área de seleção dos dados do LIS delimitada pelo quadrado vermelho. Desse modo, os cinco anos de dados do LIS resultaram numa seleção de 64.378 Grupos, que compõem um total de 4.011 Flashes.

Para realizar a comparação entre os dados do LIS e do Auger é necessário entender como o tempo é atribuído em ambos conjuntos de dados. As imagens da câmera do LIS têm um tempo de integração de $1,8 \text{ ms}$ com incerteza de $250 \mu\text{s}$. Ou seja, os Eventos que compõem os Grupos podem ter sido registrados em qualquer momento do intervalo de $1,80 \pm 0,25 \text{ ms}$. A Figura 3.2 é um esquema do tempo de integração. A resolução espacial máxima desses dados é de aproximadamente 4 km .

Os dados individuais dos tanques do Auger são armazenados em intervalos de $18,9 \mu\text{s}$ com resolução de 8 ns . O Auger possui uma altíssima resolução temporal, portanto a maior incerteza se encontra nos dados do LIS. Como os fenômenos são de

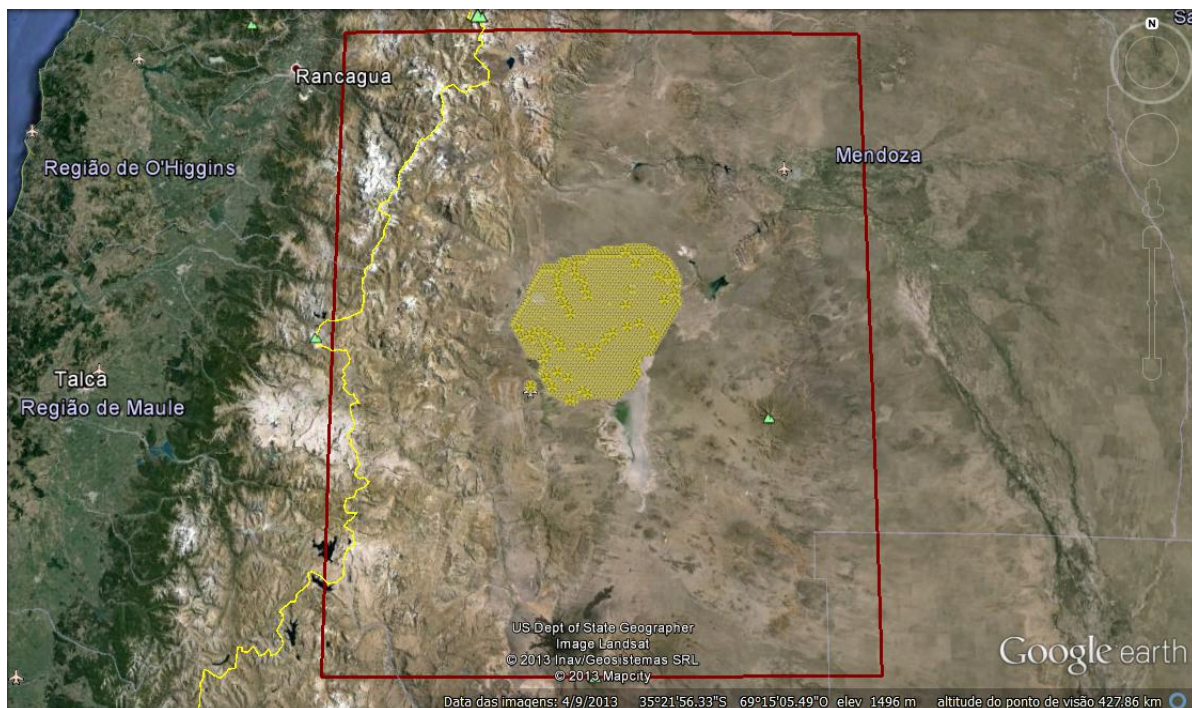


Figura 3.1 - Mapa da localização do Observatório Pierre Auger. A mancha amarela representa a localização dos tanques detectores de partículas e fótons. O quadrado vermelho delimita a área de localização dos Grupos detectados pelo LIS que foram selecionados.

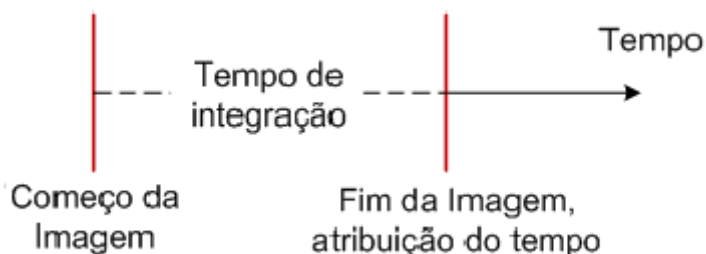


Figura 3.2 - Esquema do tempo de integração.

duraco extremamente curta é importante saber com a maior preciso possível em que momento os relâmpagos ocorridos so registrados.

O passo seguinte no desenvolvimento metodológico foi ento estimar o instante de deteco dos relâmpagos. Para isso foi necessário estimar o tempo de propagao dos fótons do relâmpago até o LIS. A altitude da orbita do TRMM   de aproximadamente 400 km, portanto um fóton viajando à velocidade da luz demora $\sim 1,33$ ms para percorrer essa distância. Assim, o tempo registrado pelo LIS possui um atraso de 1,33

ms. Então, os dados do LIS foram corrigidos para considerar o tempo de propagação. Além disso, foi considerado como referência o ponto central do tempo de integração, ou seja, $0,9 \text{ ms}$, e com isso foi criado o tempo de referência para grupo, dado por:

$$t_r = t_{LIS} - t_p - \frac{t_i}{2} \quad (3.1)$$

onde t_r é o tempo de referência, t_{LIS} é o tempo registrado pelo LIS, t_p é o tempo de propagação dos fótons ($1,3 \text{ ms}$) e t_i é o tempo de integração ($1,8 \text{ ms}$).

Efetuada a seleção dos Grupos com localização adequada e o cálculo dos seus respectivos tempos de referência, foi possível iniciar a análise conjunta dos dois conjuntos de dados em busca de coincidências temporais e espaciais que possibilitassem estabelecer algum tipo de relação causal entre os relâmpagos detectados pelo LIS, em forma de Grupos, e as partículas energéticas detectadas pelo Auger. A metodologia utilizada para essa análise foi desenvolvida passo a passo, com tentativas e erros, de acordo com os resultados obtidos. Uma vez que essa metodologia é uma das contribuições mais relevantes deste trabalho de mestrado ela será descrita em conjunto com os resultados específicos decorrentes da aplicação de cada passo do desenvolvimento metodológico da análise de dados.

3.1 Análise preliminar

Foi realizada uma análise preliminar dos Grupos que ocorreram com uma diferença temporal (Δt) de até $\pm 100 \text{ ms}$ dos eventos T3 de Auger:

$$\Delta t = t_A - t_r \quad (3.2)$$

onde Δt é a diferença temporal, t_A é o tempo dos eventos T3 e t_r é o tempo de referência dos Grupos, dado pela Equação 3.1.

Nos intervalos de $\pm 100 \text{ ms}$ centrados nos dados T3 do Auger foram encontrados 1109 Grupos em torno de 209 eventos T3. O número maior de Grupos do que de eventos T3 indica que em $\pm 100 \text{ ms}$ mais de um Grupo ocorreu em torno de um mesmo evento T3. Para esses Grupos também foi calculada a diferença espacial, Δs , entre a localização deles, s_G , e dos eventos T3 em torno dos quais ocorreram, s_A :

$$\Delta s = s_A - s_G \quad (3.3)$$

A Figura 3.3 mostra os Δt e Δs entre esses Grupos e os eventos T3 no intervalo preliminar de $\pm 100 \text{ ms}$

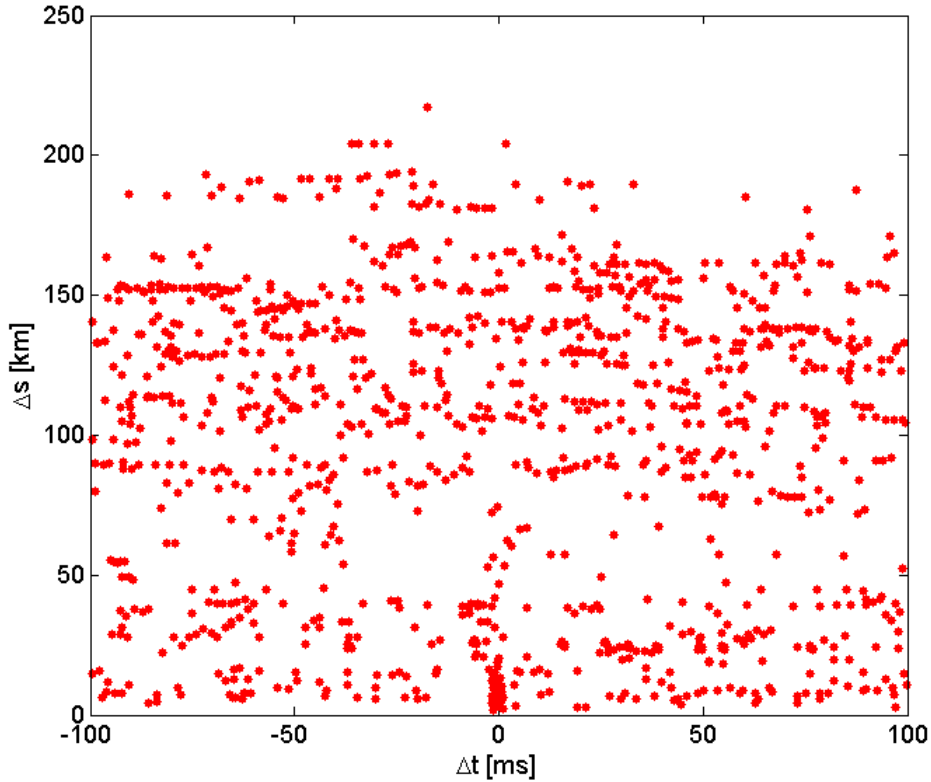


Figura 3.3 - Diferença espacial e temporal entre Grupos e eventos T3 do Auger num intervalo preliminar de $\pm 100 \text{ ms}$ centrado nos eventos T3 do Auger.

Usando uma regra de três simples, a porcentagem de Grupos $,x$, que ocorreram a $\pm 100 \text{ ms}$ dos eventos T3 foi calculada em 1,72%:

$$64378 - 100\%$$

$$1109 - x,$$

onde 64.378 é o total de Grupos, e 1.109 é o número que ocorreu no intervalo de $\pm 100 \text{ ms}$. A porcentagem de grupos que tem alguma possibilidade de ter algum vínculo físico com os eventos registrados pelo Auger é extremamente baixa frente ao alto

número de registros em ambas séries de dados. Para investigar a possibilidade da existência ou não de algum vínculo físico entre eles foram realizados testes estatísticos envolvendo os critérios temporal e espacial.

3.2 Testes estatísticos

Para verificar estatisticamente se as partículas detectadas pelo Auger poderiam ter sido produzidas pelos relâmpagos detectados pelo LIS, foi gerada uma série temporal aleatória com o mesmo número de instantes de ocorrência dos Grupos da série original e no mesmo intervalo de tempo, de 03 Janeiro de 2008 08:48:49 UT a 24 Dezembro de 2012 22:51:30 UT. Essa série de horários aleatórios de Grupos foi comparada com a série original de horários de eventos T3 de modo a verificar quantos Grupos aleatórios possuíam seu tempo de referencia em torno do eventos T3 utilizando o mesmo critério temporal de ± 100 ms. A série escolhida para ter seus valores substituídos por números aleatórios foi a dos Grupos. O procedimento poderia ter sido aplicado à série de eventos T3, mas os dados do LIS possuem algumas restrições que facilitam o processo.

O tempo de observação médio do LIS sobre o Auger é de 92 segundos, mas a duração da coleta de dados depende da ocorrência de relâmpagos durante esses 92 segundos. O fato de a duração da observação do LIS sobre o Auger variar com a passagem do satélite torna necessário considerar cada passagem do LIS sobre Auger de maneira individual. Durante os cinco anos de dados analisados o LIS teve 370 passagens com dados. Uma estatística da duração das observações é mostrada na Figura 3.4, na qual pode-se observar uma grande variabilidade.

O tempo de observação mais comum é de poucos segundos, o que significa que na maioria das vezes o LIS observa relâmpagos por um curto período durante sua passagem sobre o Auger. A segunda maior frequência fica em torno de 92 s que é o tempo máximo aproximado de observação que o LIS tem sobre uma área qualquer de 668×668 km, i.e. seu campo de visada. Isso significa que nesses casos o LIS observou relâmpagos durante toda a sua passagem.

Para manter os limites temporais e o mesmo número de Grupos por intervalo de observação foi criada e aplicada a seguinte metodologia:

- Foram calculados os limites temporais de todos os intervalos;
- Foi calculado o número de Grupos em cada intervalo;

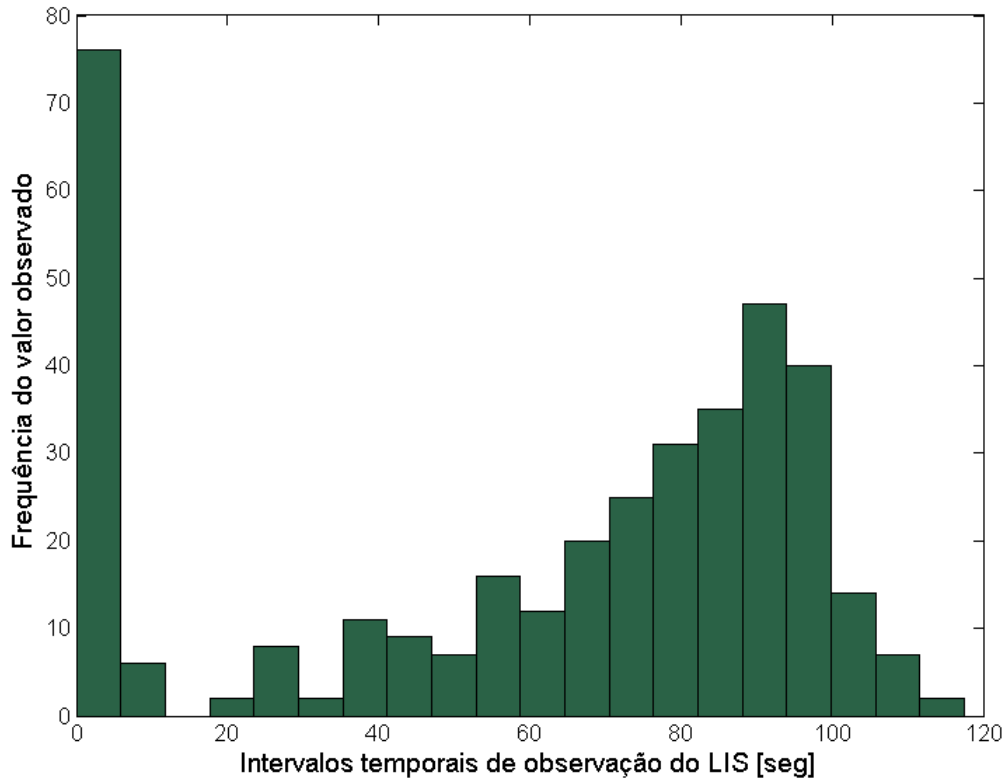


Figura 3.4 - Duração das observações do LIS que continham registro de pelo menos um Grupo durante sua passagem sobre o Auger durante os cinco anos de dados analisados, em intervalos de 10 segundos.

- O horário de ocorrência dos Grupos de cada intervalo foi substituído por outros horários que são gerados utilizando simulação Monte Carlo;
- Por razões de tempo computacional foram usados apenas os 209 eventos T3 de Auger para selecionar os Grupos com horários simulados que coincidem com o mesmo critério de $\Delta t \leq \pm 100 \text{ ms}$.
- Finalmente foi calculado o número total de Grupos que satisfaz essa condição. O processo foi repetido dez mil vezes com a finalidade de garantir que o horário de ocorrência simulado para os Grupos pudesse ter a maior variabilidade possível. O objetivo foi que os Grupos se distribuíssem o mais homoganeamente possível dentro do intervalo.

O método Monte Carlo pode ser definido como uma técnica que utiliza números aleatórios para levar a cabo uma simulação. A Figura 3.5 mostra um histograma com o resultado da simulação. O pico central da distribuição de número de Grupos

com $\Delta t \leq \pm 100 \text{ ms}$ está localizado em 210 aproximadamente. Os valores mínimo e máximo dessa distribuição são 149 e 277 respectivamente, indicando o número máximo de Grupos que pode satisfazer o critério temporal aleatoriamente. Uma vez que o número real de Grupos que satisfaz o critério é 1.109, este teste estatístico indica que apesar de esses Grupos comporem apenas 1,72% do total de Grupos observado pelo LIS, este é um número quatro vezes maior do que o que poderia ser obtido em função de uma relação puramente aleatória.

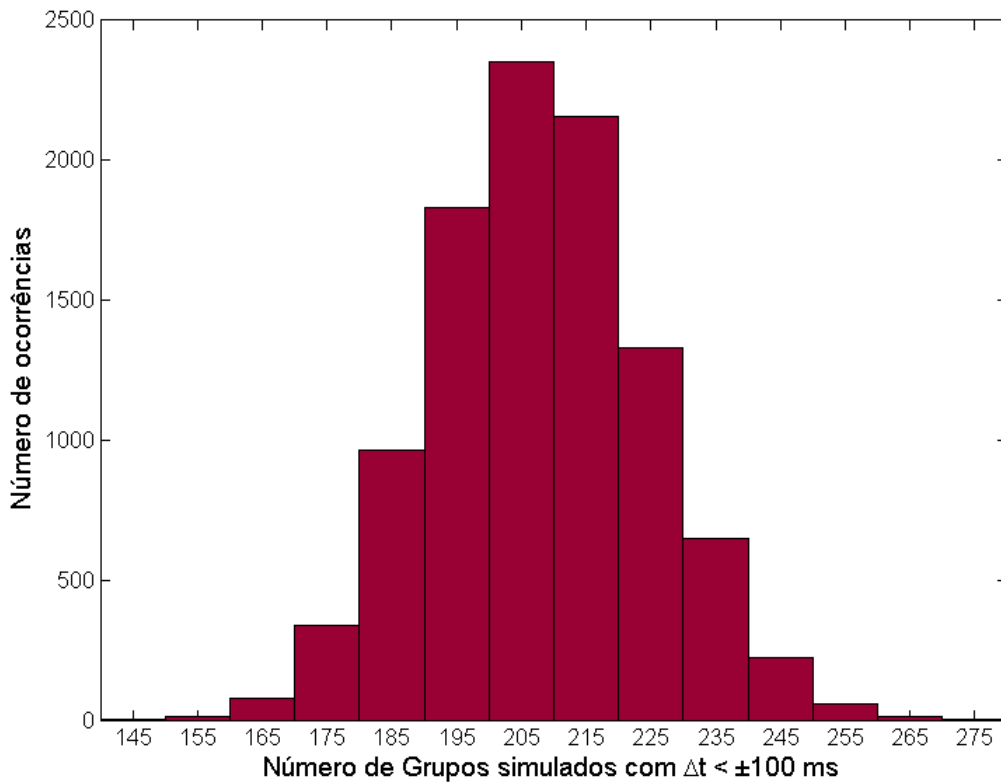


Figura 3.5 - Histograma do número de tempos de referência aleatórios de Grupos gerados com simulação Monte Carlo com $\Delta t \leq \pm 100 \text{ ms}$ dos eventos T3 do Auger. O resultado apresentado é para dez mil iterações.

Com a finalidade de conhecer o número de Grupos que poderia aleatoriamente satisfazer um critério espacial com significado físico foi implementado um teste complementar ao teste temporal. Nesse teste foram utilizados apenas os 1.109 Grupos que têm $\Delta t \leq \pm 100 \text{ ms}$ com os 209 eventos T3. A Figura 3.3 é separada em duas regiões, no eixo vertical, aproximadamente em $\Delta s = 50 \text{ km}$, separação que esta relacionada ao tipo de sinal que é detectado nos tanques do Observatório, que podem conter

a assinatura eletromagnética do relâmpago quando estão mais próximos deles. Dos 1.109 Grupos havia 336 com $\Delta s \leq 50 \text{ km}$.

Estabelecido o critério de $\Delta s \leq 50 \text{ km}$ para uma possível relação física causal entre os relâmpagos e as emissões energéticas registradas pelo Auger, foi aplicada, analogamente, a simulação Monte Carlo para gerar localizações aleatórias para os Grupos dentro de uma área de $2,5^\circ$ de lat lon centrada no centro do Observatório ($-35,25^\circ \text{ S}$, $-65,25^\circ \text{ O}$).

Foram realizadas dez mil iterações, cujo resultado é mostrado na Figura 3.6. O valor central da distribuição fica entre 60 e 70 km , o valor mais baixo é de 41 km e o mais alto é de 98 km . O número total de Grupos com $\Delta s \leq 50 \text{ km}$, na Figura 3.3, é de 336, ou seja 5,5 vezes maior do que o obtido com localizações aleatórias.

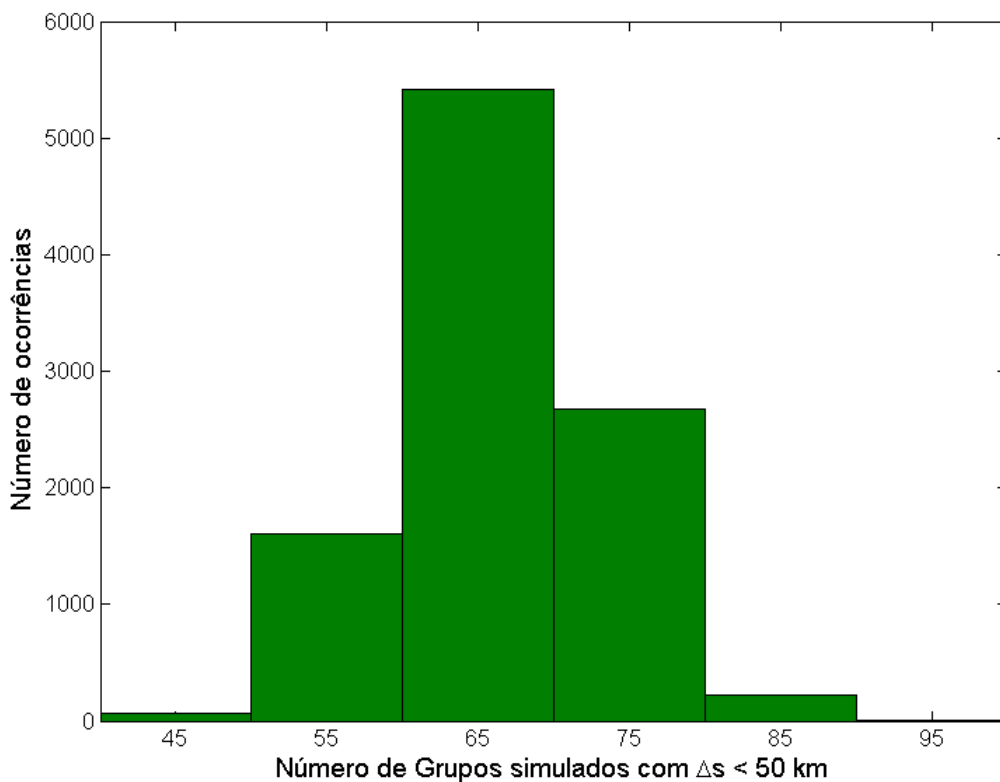


Figura 3.6 - Distribuição do número de Grupos com localizações aleatórias geradas por simulação Monte Carlo com $\Delta s < 50 \text{ km}$. O resultado é para dez mil iterações.

Os testes estatísticos mostram que a probabilidade dos 1,72% de Grupos com $\Delta t \leq$

± 100 ms não terem nenhuma relação física com os eventos T3 do Auger é muito baixa.

3.3 O parâmetro temporal

Uma vez mostrado que há uma probabilidade significativa de que a relação entre esses grupos e os eventos T3 não seja aleatória, foi dada continuidade à análise. A Figura 3.3 mostra só duas regiões espaciais distintas, uma com os eventos que ocorreram até 50 km e outra com as que ocorreram a maiores distâncias. Ambas apresentam estratificações em função da distância, com conjuntos de pontos que encontram-se aproximadamente à mesma distância, para cada Δt calculado. Esses pontos são Grupos que pertencem a um mesmo Flash, de modo análogo às diversas descargas de retorno que podem compor um único relâmpago. Isso se torna evidente ao se verificar que muitos Grupos estão relacionados a um mesmo evento T3, há 1.109 Grupos para 209 eventos T3.

Para eliminar as múltiplas coincidências de Grupos com um mesmo evento T3 os Grupos foram agrupados em Flashes utilizando-se os critérios do LIS, i.e. os Grupos que compõem um mesmo Flash possuem $\Delta t \leq 330$ ms e $\Delta s \leq 5,5$ km.

Para cada Flash coincidente com um dos eventos T3 foi considerado como tempo de referência do Flash o tempo de referência do Grupo com menor diferença temporal do evento. A localização do Flash também foi considerada como sendo localização desse Grupo. A partir dessa seleção foram utilizados apenas os dados de aqueles Grupos (tempo e localização). A Figura 3.7 mostra um gráfico da distância entre os Grupos e os 209 eventos do Auger em função do Δt entre eles, cada evento está associado a um único Grupo.

A diferença entre resoluções temporais resulta em uma grande limitação no momento de procurar uma possível relação entre os conjuntos de dados. É importante ressaltar que a resolução temporal nos dados do LIS está limitada pelo tempo de integração, que é muito grande comparado com a resolução dos dados do Auger. Isto é, podem caber em torno de 95 traços, um seguido do outro, durante o tempo de integração do LIS. Assim, é possível separar as diferenças temporais em três regiões, como mostrado na Figura 3.8. Se $-0,9 \pm 0,25$ ms $\leq \Delta t \leq 0,9 \pm 0,25$ ms, região limitada pelas barras vermelhas na Figura 3.8, não é possível saber o que aconteceu primeiro, se foi o Grupo ou se foram as partículas. Se $\Delta t < -0,9 \pm 0,25$ ms, região esquerda na Figura 3.8, o Grupo aconteceu depois do evento T3. Finalmente, se $\Delta t > 0,9 \pm 0,25$ ms, região direita na Figura 3.8, o Grupo aconteceu antes do evento T3.

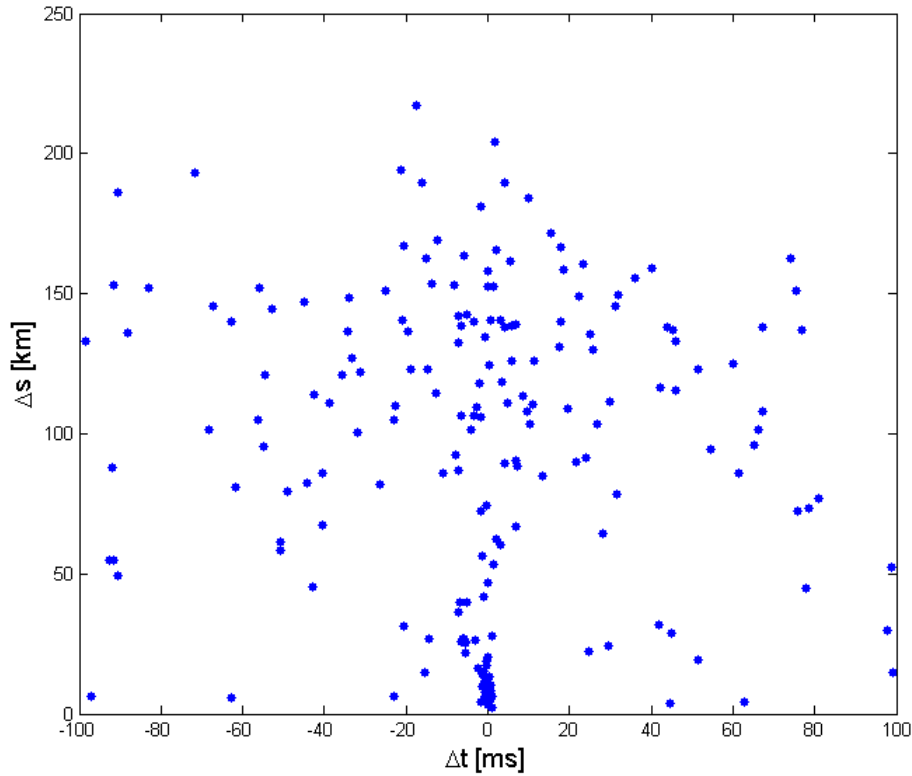


Figura 3.7 - Gráfico da distância entre Grupos e eventos T3 do Auger em função do intervalo de tempo entre eles numa relação unívoca.

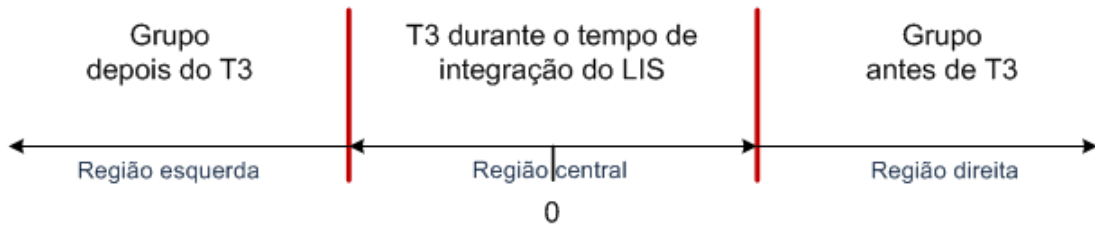


Figura 3.8 - Esquema das categorias dos Δt 's segundo o tempo de integração.

O raciocínio anterior serve para separar a distribuição de Δt 's da Figura 3.7 em três regiões temporais: região esquerda, central e direita. Uma ampliação, perto do zero, da Figura 3.7 pode ser vista na Figura 3.9, que mostra uma acumulação de Δt 's entre ± 5 ms e Δs 's menores que ~ 20 km. Analisando de acordo com as regiões da Figura 3.8, nota-se que a maioria das coincidências está dentro da região central.

Entretanto, para garantir que um dos Grupos, da região direita da Figura 3.9 por

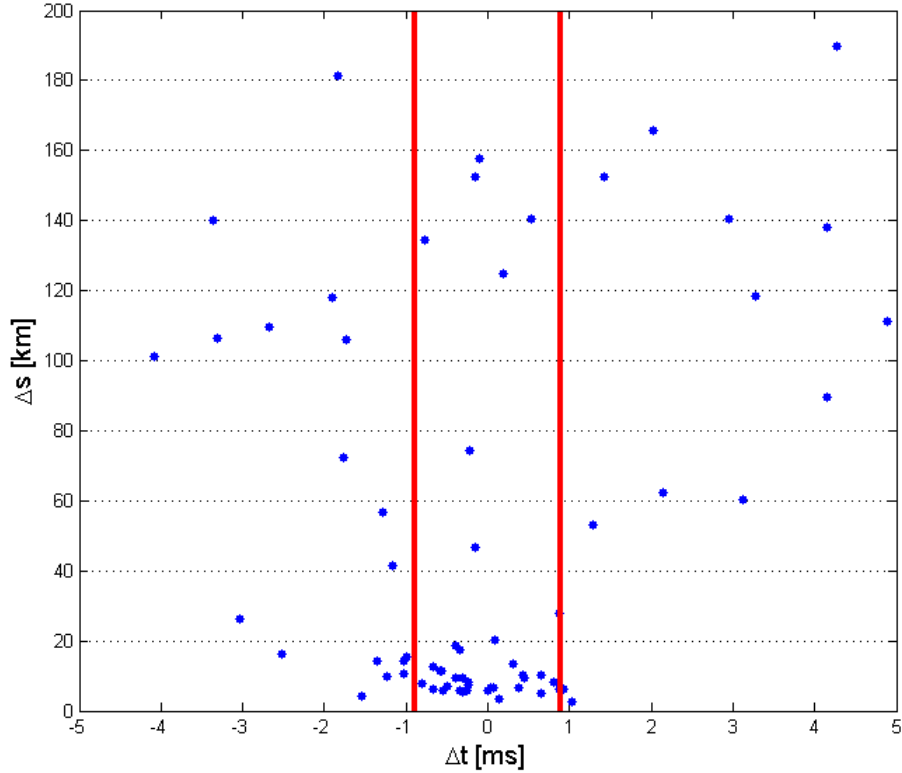


Figura 3.9 - Ampliação da Figura 6 entre ± 5 ms. As linhas vermelhas delimitam as regiões indicadas na Figura 3.8.

exemplo, tenha produzido partículas/fótons que foram observados pelos tanques do Auger, é necessário que os equipamentos possuam as mesmas escalas temporais, ou pelo menos parecidas, como no caso de [Dwyer et al. \(2004\)](#) ou [Moore et al. \(2001\)](#). Entretanto os traços registrados pelos tanques do Auger têm uma duração ~ 13 vezes menor do que a incerteza no tempo dos Grupos. Um outro fato de erro é que na Equação 3.1 foi feita apenas uma média para corrigir o tempo de integração. Portanto, em busca de uma relação física causal entre relâmpagos e partículas/fótons foi introduzido um critério espacial em cima dos resultados obtidos com o critério temporal.

3.4 O parâmetro espacial

Como foi descrito no Capítulo de Instrumentação, os eventos T3 do Auger foram detectados por mais de um tanque. A localização que foi utilizada como referência para esses eventos é o centróide dos tanques participantes da detecção do evento. Para realizar uma análise estatística investigando a natureza da relação entre os

Grupos e os eventos, a distância entre eles foi calculada usando esse centróide, mas para entender de um modo mais físico o que acontece é preciso conhecer a distância real entre os 209 Grupos e os 841 tanques que participaram da solução de detecção dos 209 eventos T3. A Figura 3.10 mostra a distribuição da distância entre os Grupos e os tanques. A Figura possui duas regiões distintas: a primeira entre 0 e 40 *km* e a segunda entre 40 e 220 *km*.

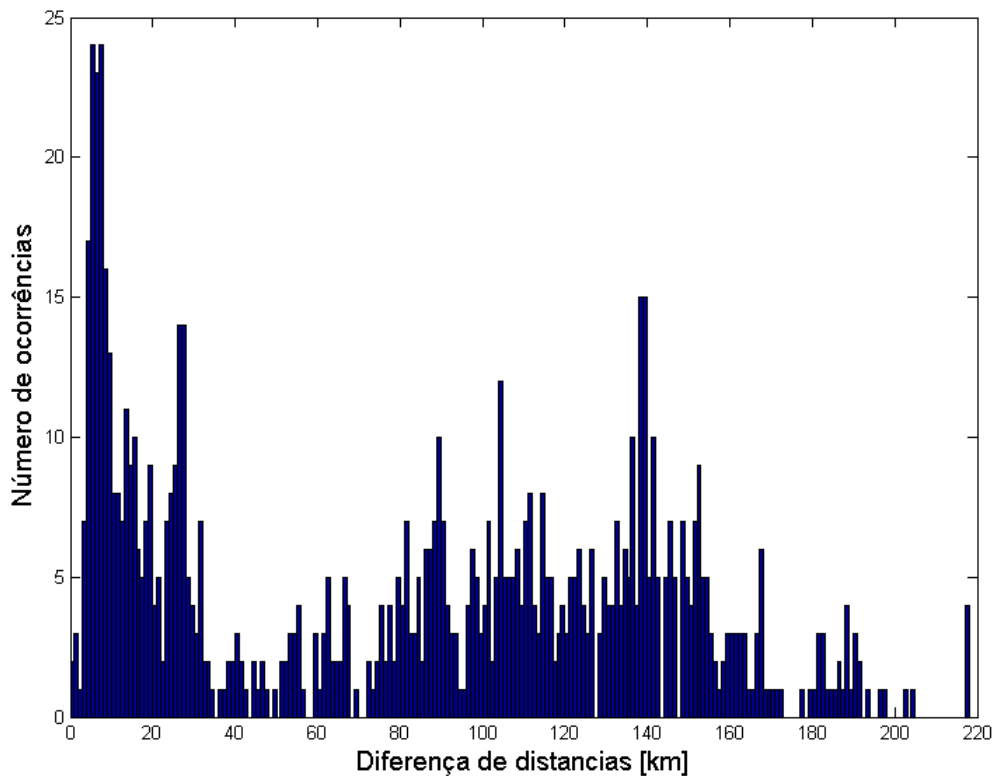


Figura 3.10 - Histograma da distância entre os Grupos e os tanques individuais que entraram na detecção dos eventos relacionados a esses Grupos.

Um exame visual da forma do sinal detectado em cada tanque revela que os eventos cujas distâncias $\Delta s < 40$ *km* apresentam, predominantemente, uma característica de emissões de Frequência Muito Alta, ou Very High Frequency-VHF, do inglês, e os eventos cujas distâncias $40 < \Delta s < 220$ *km* apresentam as características típicas dos traços de partículas/fótons de alta energia, objeto de detecção do Auger. As emissões VHF podem ser interpretadas como as emissões eletromagnéticas produzidas nessa faixa de frequência pelos relâmpagos durante o seu processo de propagação, que acontece em passos, tanto na região dentro da nuvem quanto ao ar livre, no caso

de relâmpagos nuvem-solo ou solo-nuvem. Por exemplo, essas emissões são utilizadas pelas redes de detecção de relâmpagos do tipo Lightning Mapping Array-LMA, para localizar cada passo dos relâmpagos nas 3 dimensões (lat., lon., alt.). O LMA registra seu desenvolvimento temporal, e opera na faixa de ~ 63 MHz (THOMAS et al., 2004), faixa semelhante a de operação do Auger. Uma vez que os tanques do Observatório Pierre Auger não possuem nenhum tipo de blindagem eletromagnética, as emissões VHF dos relâmpagos induzem um sinal na eletrônica dos mesmos, facilmente distinguíveis dos traços de partículas. Exemplos desses dois tipos de detecções são mostrados na Figura 3.11.

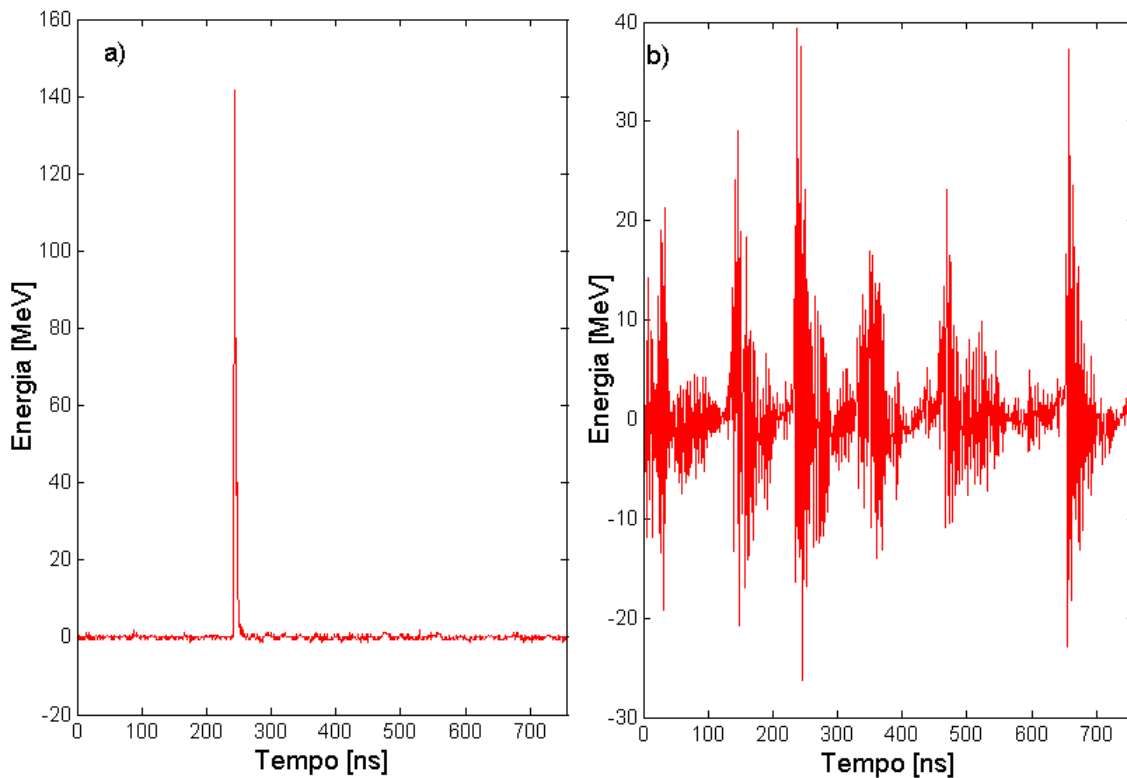


Figura 3.11 - Exemplo dos tipos de detecções. Traço típico de partículas/fótons energéticos (a), e registro da radiação VHF produzida por relâmpagos (b).

Para reconstruir um evento, a direção de chegada e a energia, o algoritmo de Auger precisa de pelo menos três tanques com traços de partículas (Figura 3.11.a). Traços como o apresentado na Figura 3.11.b são incapazes de fornecer informação útil para a reconstrução. Por essa razão as coincidências mostradas na Figura 3.7 devem ser separadas em cada tipo de traço.

Dos 841 tanques, 622 apresentaram traços produzidos por partículas e 219 apresentam registros de emissões VHF produzidas por relâmpagos. Os histogramas das distâncias para ambos tipos de registros são mostrados na Figura 3.12. Claramente os registros de emissões VHF produzidas por relâmpagos se concentram em pequenas distâncias, menores que 32 *km* (Figura 3.12.a). Já os traços produzidos por partículas/fótons têm uma distribuição mais homogênea em relação à distância, com poucos eventos com distâncias menores que 40 *km* (Figura 3.12.b).

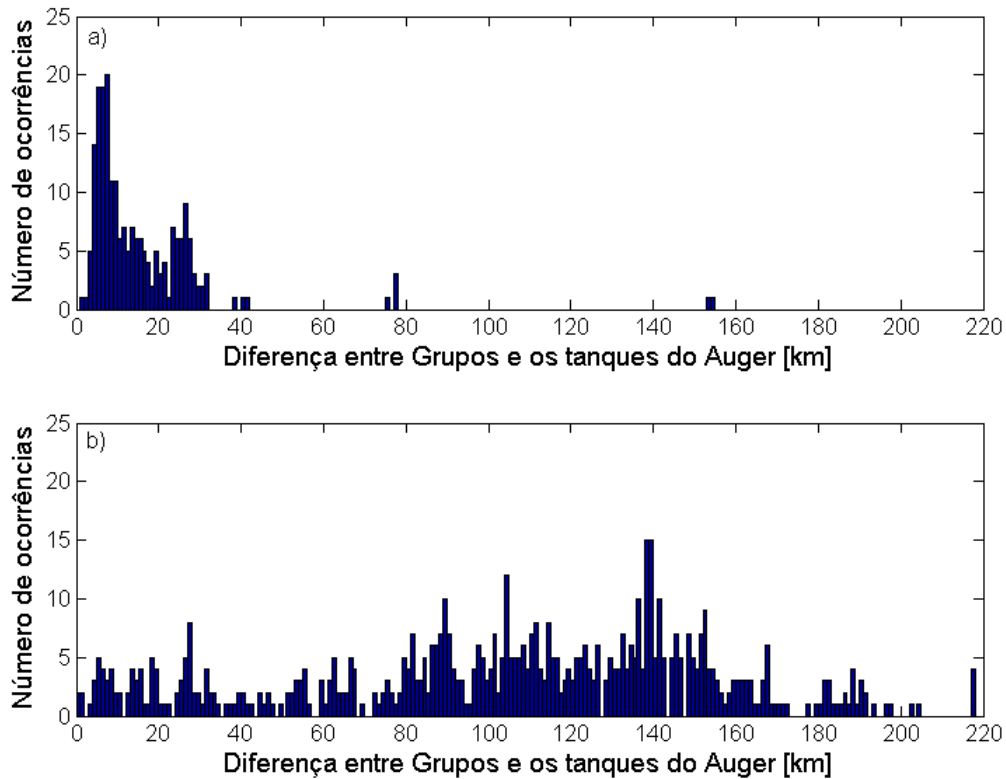


Figura 3.12 - Histograma das distâncias entre os Grupos e os tanques que detectaram os eventos T3 do Auger para os dois tipos de registros: *a)* Emissões VHF dos relâmpagos; *b)* Traços característicos de partículas.

A distinção na forma dos registros permitiu estudar a diferença espacial entre os Grupos e os tanques participantes do evento T3. Como resultado dessa distinção, foi possível determinar que 96% dos relâmpagos que produziram as emissões VHF registradas pelos 219 tanques ocorreram com $\Delta s < 32 \pm 4$ *km*. A Figura 3.12.a mostra dois picos acentuados, o primário entre 7 e 8 *km* e um secundário entre 26 e 27 *km*. Além disso, a radiação VHF dos relâmpagos pôde ser registrada por tanques

afastados até 32 *km* da sua localização.

Já a distribuição das distâncias para os tanques com sinal de partícula é muito diferente, além de se concentrar acima de 40 *km* ela apresenta 3 picos pouco acentuados em 89-90 *km*, 104-105 *km* e 139-140 *km* (Figura 3.12.b). Nesse caso, apenas o 13% dos 621 tanques, com sinal de partícula, aconteceram em baixo dos 32 *km*.

3.5 Análise estatístico espacial

A informação extraída da Figura 3.12.b é insuficiente para garantir que esses tanques tenham registrado partículas/fótons associados com os Grupos, pelo que foi necessário gerar uma distribuição pseudo-aleatória utilizando todos os Grupos, com a finalidade de ter um parâmetro comparativo. A primeira distribuição comparativa foi calculada com a diferença espacial entre cada um dos 64.378 Grupos e um tanque virtual localizado no centro do Observatório (-35.25° S e -69.25° O).

A Figura 3.13 apresenta a distribuição comparativa das coincidências usando o tanque virtual. Comparando as distribuições das distâncias reais (Figura 3.12.b) e das distâncias virtuais (Figura 3.13) percebemos que as duas distribuições mostram o maior pico entre 120 e 140 *km*, e que nos extremos se tem os mínimos. Entretanto, as diferenças com o tanque virtual, para distâncias menores que 32 *km* mostram uma queda no número de ocorrências, muito diferente das diferenças reais (Figura 3.12.b). Na Figura 3.12.b o número de ocorrências, com distâncias menores que 32 *km*, é quase constante. Além disso há cinco tanques com $\Delta s \leq 4$ *km* que não aparecem no histograma de distâncias calculadas utilizando-se o tanque virtual (Figura 3.13).

A razão pela qual a Figura 3.12.b mostra um excesso de coincidências para pequenas distâncias, em comparação com a Figura 3.13, é devido ao mecanismo de disparo de Auger. Quando um evento T3 é detectado, a Central de Dados também solicita aleatoriamente o traço de um tanque que esteja localizado dentro de 6 anéis hexagonais em torno dos tanques que detectaram o evento. Em outras palavras, o tanque escolhido aleatoriamente deve estar num raio máximo de aproximadamente 9 *km*. Assim, a probabilidade de obter um tanque com traço de partículas em torno de tanques com traço de emissões VHF de relâmpago é maior que obter um tanque disparado apenas por partículas, principalmente porque só esse tanque não poderia ativar o disparo de nível T3.

Com o objetivo de comparar as distribuições das distâncias foi realizada a superposi-

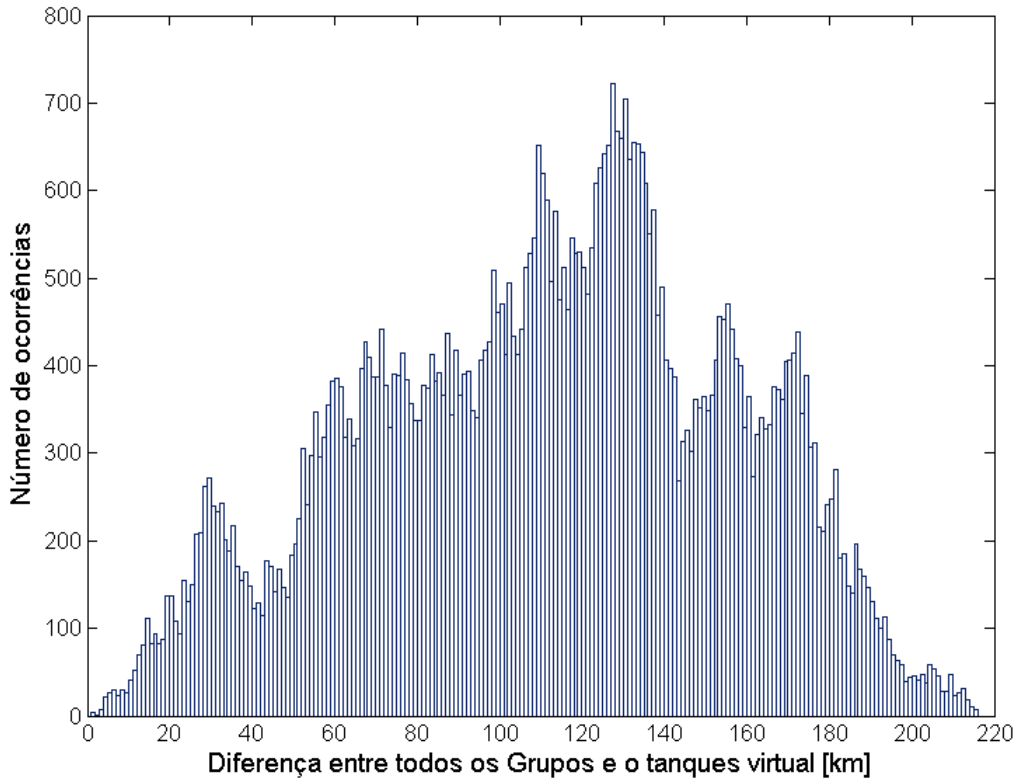


Figura 3.13 - Distribuição das distâncias entre um tanque imaginário localizado no centro do Observatório Pierre Auger e os 64.378 Grupos.

ção dos três histogramas: registros de emissões VHF dos relâmpagos (Figura 3.12.a), registros com traço de partículas (Figura 3.12.b) e distâncias dos Grupos ao tanque virtual (Figura 3.13). A Figura 3.14 mostra o resultado. O número de ocorrências das distribuições dos tanques de emissões VHF e do tanque virtual foram normalizadas à distribuição dos tanques de partículas para mostrar todos histogramas na mesma escala. Desse modo podemos obter, aproximadamente, a distribuição do tanque virtual (em azul) somando a distribuição dos tanques com traço de partículas (em vermelho) mais a distribuição dos tanques com registros de emissões VHF (em pretos). Entretanto, essa estimativa não consegue representar de maneira adequada os casos para $\Delta s \leq 20 \text{ km}$, e muito menos para os casos com $\Delta s \leq 4 \text{ km}$, casos que pertencem a tanques com traço de partículas (em vermelho). Curiosamente esses tanques ficam mais próximos aos Grupos que os outros tanques que fazem parte dos eventos T3, como é mostrado na Tabela 3.1.

A estimativa feita com o tanque virtual não conseguiu mostrar que os tanques entre 0-4 km podem ser obtidos por acaso. Esse resultado acompanhado do fato que os

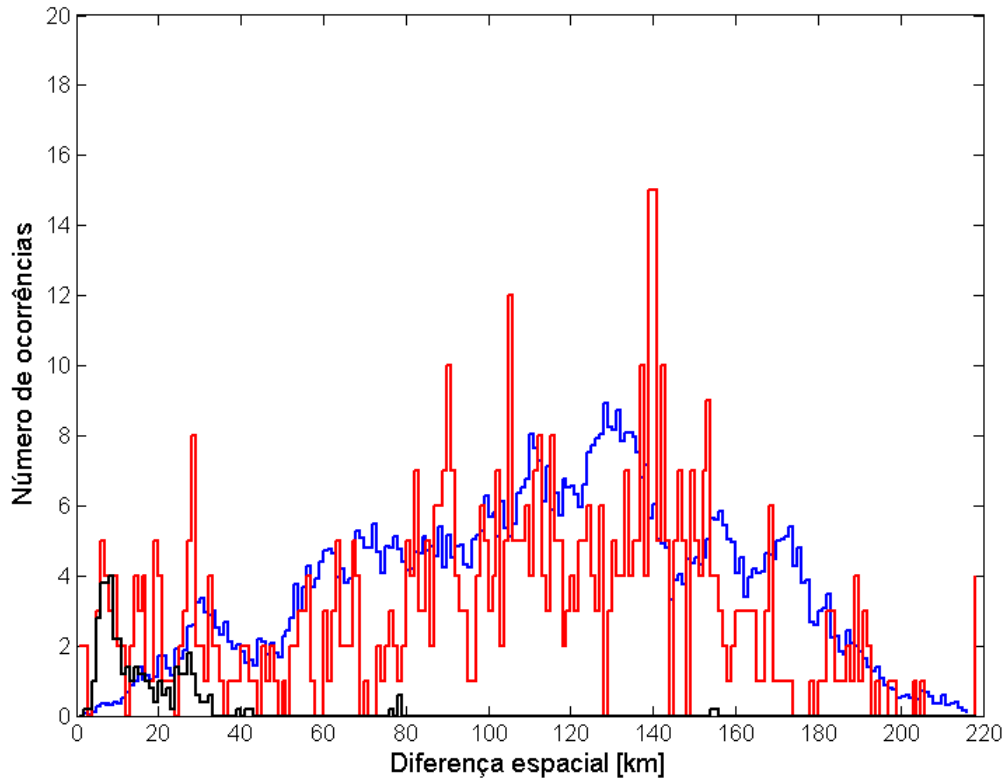


Figura 3.14 - Superposição dos histogramas das distâncias dos tanques com traço de partículas (em vermelho), tanques com emissões VHF (em pretos) e distâncias dos Grupos ao tanque virtual no centro do Observatório (em azul).

cinco tanques ficam muito próximos aos Grupos foi razão suficiente para analisá-los de maneira mais detalhada. A Tabela 3.1 mostra em detalhe as características espaciais e temporais dos eventos T3 aos quais esses cinco tanques pertencem. A primeira coluna mostra o Identificador do evento, a segunda coluna mostra o número de tanques participantes do evento, a coluna seguinte mostra a localização de cada tanque, a quarta coluna mostra o tipo de traço registrado para cada tanque, a quinta coluna mostra a localização do Grupo associado ao evento (um Grupo por evento), e as duas últimas colunas mostram as diferenças temporais e espaciais entre cada tanque e o Grupo respectivo. Em vermelho são mostrados os dados dos cinco tanques com diferença espacial entre 0-4 *km*.

Chilingarian et al. (2010) correlacionaram tempestades com aumentos na contagem de partículas encontrando que o máximo alcance de partículas emitidas pela tempestade atinge ~ 500 metros. A diferença do arranjo de Auger, os detectores no monte Aragats, na Armênia (onde Chilingarian et al. (2010) fizeram suas observa-

ID do Evento do Auger	Número de tanques no evento	Localização do tanque (lat, long)	Tipo de traço	Localização do Grupo (lat, long)	Δt [ms]	Δs [km]		
4602275	3	-35,28, -69,48	Emissões VHF	-35,35, -69,52	0,24±0,25	8,9±4		
		-35,35, -69,52	Partículas				0,26±0,25	0,5±4
		-35,23, -69,43	Partículas				0,26±0,25	15,5±4
4614926	3	-35,29, -69,25	Emissões VHF	-35,36, -69,25	0,32±0,25	7,0±4		
		-35,28, -69,25	Emissões VHF				0,31±0,25	8,3±4
		-35,35, -69,27	Partículas				0,34±0,25	1,9±4
4614941	7	-35,31, -69,21	Emissões VHF	-35,37, -69,18	0,69±0,25	6,1±4		
		-35,30, -69,22	Emissões VHF				0,69±0,25	7,6±4
		-35,30, -69,20	Emissões VHF				0,69±0,25	7,0±4
		-35,33, -69,22	Emissões VHF				0,68±0,25	5,3±4
		-35,29, -69,21	Emissões VHF				0,68±0,25	8,5±4
		-35,29, -69,20	Emissões VHF				0,68±0,25	8,2±4
		-35,36, -69,18	Partículas				0,71±0,25	0,5±4
6948540	9	-35,25, -69,18	Partículas	-35,28, -69,17	0,35±0,25	3,9±4		
		-35,22, -69,16	Emissões VHF				0,36±0,25	6,6±4
		-35,22, -69,17	Emissões VHF				0,35±0,25	6,6±4
		-35,21, -69,19	Emissões VHF				0,36±0,25	8,0±4
		-35,20, -69,18	Emissões VHF				0,36±0,25	9,2±4
		-35,21, -69,15	Emissões VHF				0,36±0,25	8,1±4
		-35,20, -69,16	Emissões VHF				0,36±0,25	9,2±4
		-35,22, -69,15	Emissões VHF				0,36±0,25	6,9±4
		-35,26, -69,24	Partículas				0,37±0,25	6,4±4
11253883	4	-35,11, -69,26	Emissões VHF	-35,07, -69,26	1,10±0,25	4,0±4		
		-35,12, -69,27	Emissões VHF				1,10±0,25	5,5±4
		-35,07, -69,27	Partículas				1,12±0,25	1,5±4
		-35,07, -69,32	Partículas				1,14±0,25	6,0±4

Tabela 3.1 - Características dos cinco eventos que possuem um tanque com diferença espacial entre 0-4 km a menos de 4 km de distância.

ções), registram contagens de partículas o tempo todo, pelo que ao passo de uma nuvem de tempestade, e seus efeitos nas contagens de partículas, podem ser sempre monitorados. Os cinco tanques com sinal de partículas, ressaltados em vermelho na Tabela 3.1, possuem diferenças espaciais dentro da incerteza de 4 km dada pela localização dos Grupos. Portanto, as curtas diferenças espaciais desses cinco tanques sugerem que existe a possibilidade de que os traços registrados por esses tanques possam estar dentro dos 500 metros que sugere Chilingarian et al. (2010), e assim ter sido gerados por partículas/fótons produzidos pela descarga de retorno ligada ao Grupo correspondente.

3.6 Os cinco tanques

Os cinco tanques com traço de partículas representam uma taxa de emissão/Grupo de $7,8 \times 10^{-5}$, taxa que é completamente compatível com a calculada por Fuschino et al. (2011) para FGTs. Usando dados do AGILE e do LIS/OTD, Fuschino et al. (2011) estimaram que a taxa de ocorrência de FGT para cada relâmpago que acontece no globo é de 8×10^{-5} . O resultado obtido neste trabalho, junto com raio máximo de emissão de ~ 500 m, estimado por Chilingarian et al. (2010), fazem dos cinco registros nos tanques os mais indicados para se considerar como emissões de partículas por relâmpagos, mas foi necessário calcular a diferença temporal de maneira indireta devido as incompatibilidades entre as escalas temporais de ambos equipamentos.

Usando a localização do Grupo como ponto referencial, é possível estimar o tempo que o sinal VHF produzido pelo relâmpago leva para atingir os tanques. De modo análogo pode-se calcular o tempo que as partículas/fótons levam para atingi-los e assim verificar o que aconteceu primeiro. A Figura 3.15 mostra a localização do Grupo (ponto azul) e a dos tanques (pontos vermelhos) para o evento T3 4614926. O vetor etiquetado com o tempo e a distância 1 indica o tanque com registro VHF mais próximo ao Grupo. O vetor etiquetado com o tempo e a distância 2 indica o tanque com traço de partículas.

Tendo a distância entre o Grupo e o tanque que detectou a emissão VHF (Tabela 3.1), e assumindo que a emissão eletromagnética produzida pelo relâmpago viaja à velocidade da luz, é possível calcular o tempo que ela leva para chegar até o tanque,

$$t_1 = \frac{d_1}{c} = \frac{7km}{3 \times 10^8} = 2,3 \times 10^{-5}s = 23 \pm 13\mu s.$$

Onde c é a velocidade da luz. A incerteza foi calculada a partir de $\Delta t = \Delta s/c$, sendo

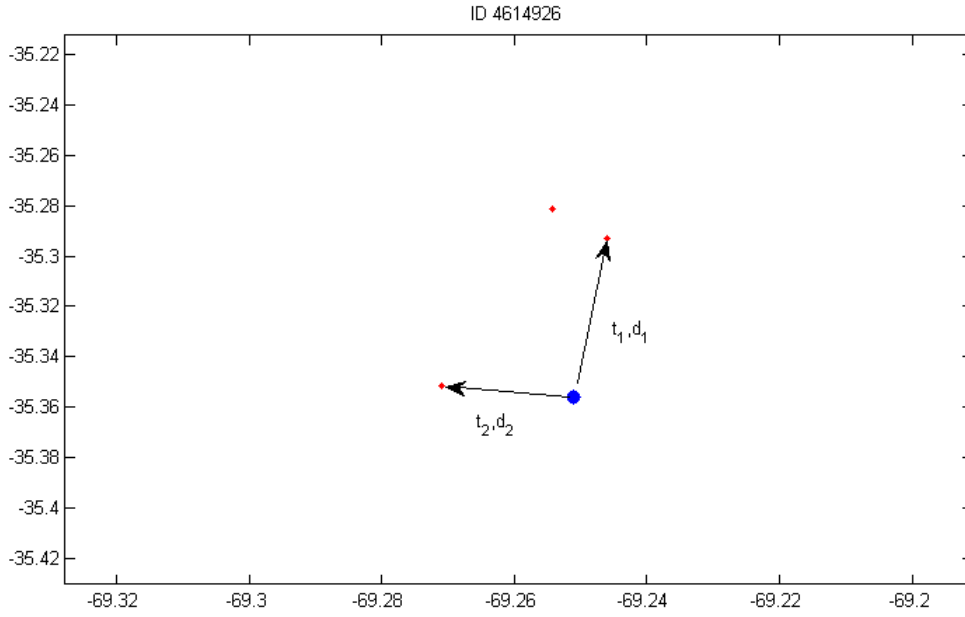


Figura 3.15 - Localização dos tanques (pontos vermelhos) que detectaram o evento 4614926 e do Grupo coincidente (ponto azul).

$\Delta s = 4 \text{ km}$.

Fazendo o mesmo cálculo para o tanque com registro de partículas/fótons, cuja distância é $1,9 \pm 4 \text{ km}$ do Grupo, encontramos que $t_2 = 6,3 \pm 13 \mu s$.

Para averiguar se a emissão de partículas aconteceu antes ou depois do Grupo é preciso corrigir os tempos dos traços pelos tempos t_1 e t_2 . Subtraindo t_1 e t_2 do instante de início do registro da emissão VHF, t_{01} , e do traço de partículas, t_{02} , respectivamente, obtém-se os tempos corrigidos.

$$t'_1 = t_{01} - t_1$$

$$t'_2 = t_{02} - t_2$$

Agora, ambos registros têm como referência a distância ao Grupo, assumindo-se que a propagação da emissão VHF e das partículas é realizada a velocidade constante. A diferença entre t'_1 e t'_2 mostra o intervalo de tempo decorrido entre o instante de ocorrência do registro de partículas e o Grupo:

$$\Delta t = t'_1 - t'_2 = 8 \pm 26 \mu s,$$

onde a incerteza resulta da soma das incertezas de ambos tempos corrigidos: $\Delta t'_1$ e

$\Delta t'_2$, ambos igual a $13 \mu s$.

Devido ao sinal positivo no tempo, concluimos que o a emissão das partículas aconteceu $\sim 10 \mu s$ antes de haver acontecido o Grupo.

A incerteza no intervalo de tempo entre a detecção da radiação VHF do Grupo e a emissão de partículas/fótons é maior do que a medida, portanto é impossível saber se o Grupo ou as(os) partículas/fótons aconteceram primeiro, exceto no último caso. O evento 11253883 é o único para o qual é possível afirmar que o Grupo aconteceu depois da emissão de partículas/fótons.

A duração do pulso e a energia total podem ser obtidas a partir do traço. A Figura 3.16.b mostra o traço de partículas registrado no evento 4614926, que teve uma duração de $0,32 \mu s$ e a energia total foi de $623 MeV$.

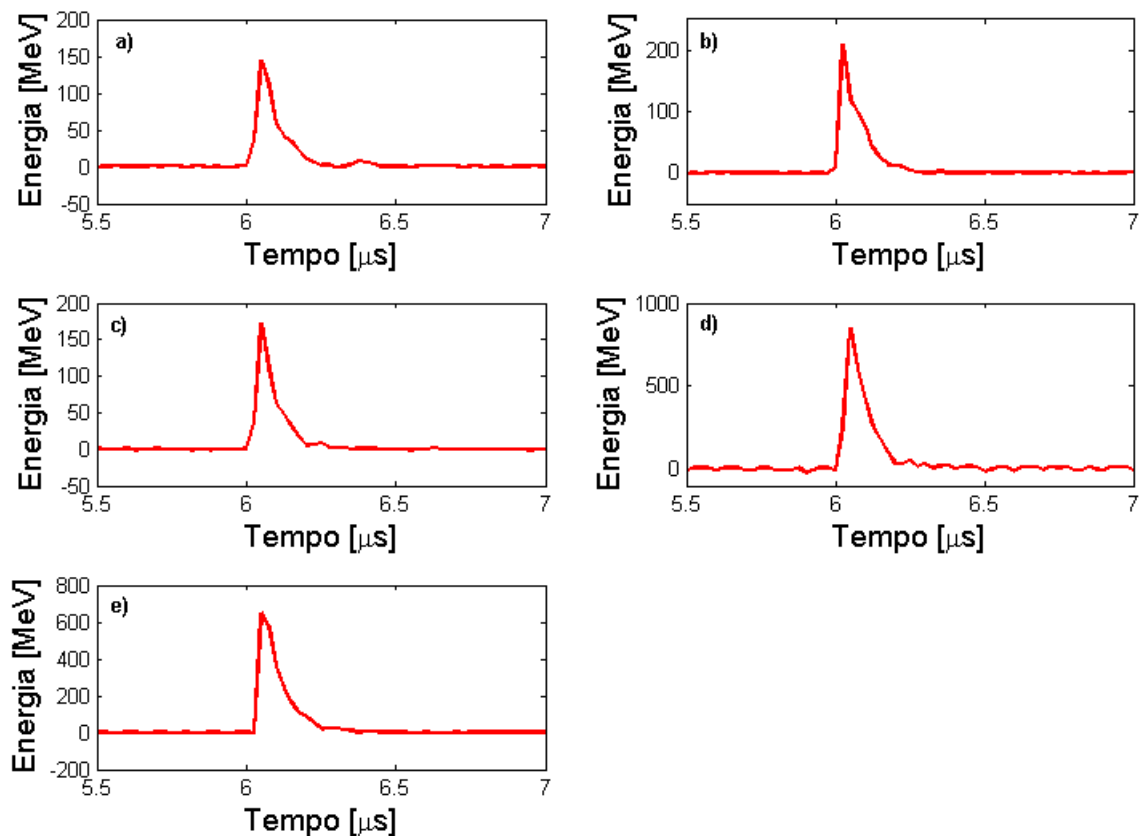


Figura 3.16 - Traços dos cinco tanques que registraram partículas. *a)* Evento 4602275, *b)* evento 4614926, *c)* evento 4614941, *d)* evento 694850 e *e)* evento 11253883.

A Tabela 3.2 resume as características dos tanques restantes além do já calculado:

Evento	Δt [μs]	Duração [μs]	Energia total integrada [MeV]
4602275	11 ± 26	0,30	489,4
4614926	8 ± 26	0,32	623
4614941	3 ± 26	0,27	499,5
6948540	-3 ± 26	0,50	2.915,2
11253883	-31 ± 26	0,35	2.493,2

Tabela 3.2 - Características dos cinco traços de partículas dos cinco eventos.

A duração mais breve reportada de um FGTs é de $50 \mu s$ (FISHMAN et al., 2011). Já os registros de partículas energéticas, como elétrons e nêutrons, mostram durações de ~ 10 min (CHILINGARIAN et al., 2010). As durações calculadas para os pulsos detectados pelos cinco tanques ficam em torno de centenas de nanossegundos. Se esses cinco registros foram em verdade emissões produto do relâmpago, independente de terem sido fótons ou partículas, uma vez que o Auger não consegue discriminar entre os dois, elas seriam as mais breves reportadas até agora.

4 CONCLUSÕES

O LIS e os tanques do Auger são detectores completamente independentes um do outro. O LIS é uma câmera concebida especificamente para a observação de relâmpagos a partir do espaço, e o Observatório Pierre Auger foi projetado para a detecção no solo de partículas secundárias, produto de raios cósmicos primários de alta energia, i.e. acima de 10^{18} eV. Esses dois equipamentos possuem características diferentes uma vez que foram projetados para detectar fenômenos diferentes.

Embora existam trabalhos que tenham utilizado dados do LIS para estudos de FGTs (SMITH et al., 2005; SMITH et al., 2010) e que mostrem que o Observatório Pierre Auger é afetado nas suas contagens durante a passagem de tempestades (BERTOU, 2011), este trabalho é o primeiro que reúne os dois conjuntos de dados para investigar a possível produção de partículas e/ou fótons energéticos produzidos por relâmpagos e/ou campos elétricos dentro da nuvem. Desse modo, uma das contribuições deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia própria para realizar esta análise.

A análise foi feita utilizando-se cinco anos de dados, de 03 de Janeiro de 2008 a 24 de Dezembro de 2012. Foram utilizados os dados dos Grupos do LIS, por ter a maior resolução temporal, $1,80 \pm 0,25$ ms, e os eventos T3 do Auger, por ser o primeiro critério de disparo que agrupa a detecção simultânea de pelo menos três tanques. Todos os dados do Auger têm uma duração de $19,2$ μ s, com resolução de 25 ns, e a localização utilizada para os eventos foi o centroide de todos os tanques envolvidos na sua detecção, que tem uma precisão de 100 m. Numa análise mais refinada foi utilizada a localização individual dos tanques, com precisão de uns poucos metros. Os Grupos do LIS têm uma precisão espacial de 4 km. No total foram analisados 11.455.273 eventos do Auger e 64.378 Grupos do LIS.

O primeiro passo do desenvolvimento metodológico foi corrigir o registro temporal do Grupos detectados pelo LIS da seguinte forma: (1) o tempo de viagem dos fótons da nuvem até a altitude do satélite TRMM, onde se encontra o LIS, foi estimado assumindo-se uma distância de 400 km entre eles e foi subtraído do tempo fornecido pelo LIS, uma vez que a atribuição do tempo pelo instrumento acontece no final do tempo de integração; (2) foi estabelecido um tempo de referência para os Grupos como sendo metade do tempo de integração do LIS, i.e. $0,90 \pm 0,25$ ms.

O passo seguinte para investigar a possibilidade de os eventos observados pelo Auger terem sido gerados pelos relâmpagos detectados pelo LIS foi realizar uma análise preliminar dos Grupos e eventos do Auger com uma diferença temporal máxima de

± 100 ms entre eles. Foram encontrados 209 eventos T3 e 1109 Grupos. Uma vez que o conjunto de Grupos consecutivamente separados no tempo por não mais de 330 ms e com distância menor ou igual do que 5,5 km é definido como um Flash do LIS, o número maior de Grupos do que de eventos T3 indicou que esses Grupos poderiam pertencer a um mesmo Flash.

Os 1109 Grupos coincidentes representam apenas o 1,72% dos mais de 64 mil Grupos, percentagem que parece baixa e pouco representativa considerando-se o número grande de dados de ambos os conjuntos. Em função disso, o grande passo seguinte do desenvolvimento da metodologia deste trabalho foi a experimentação com diversos testes estatísticos que revelassem a significância física da relação entre os conjuntos de dados. Como resultado foram definidos dois testes similares, um para o critério de associação temporal e outro para o de associação espacial. Foram gerados aleatoriamente, com simulação Monte Carlo, 64.378 tempos de referência, equivalentes a todos os Grupos analisados neste trabalho, de modo a investigar se o percentual de 1,72% com $\Delta t \leq \pm 100$ ms poderia ser resultado de uma associação puramente aleatória. Esse procedimento foi realizado 10 mil vezes.

O resultado mostrou que apenas 277 Grupos satisfazem o critério de $\Delta t \leq \pm 100$ ms de modo aleatório, uma quantidade 4 vezes menor do que foi encontrado com os dados reais. Em função disso, no teste espacial, que foi realizado da mesma forma, foram utilizados apenas os 1109 Grupos com $\Delta t \leq \pm 100$ ms dos eventos do Auger. O critério de associação espacial adotado foi de $\Delta s \leq 50$ km, e as localizações aleatórias dos Grupos foram geradas numa área de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude e longitude centrada no centro do Observatório. Apenas 98 Grupos satisfazem os dois critérios aleatoriamente, contra os 336 Grupos reais que os satisfazem.

Uma vez que a probabilidade de a associação espaço-temporal entre os eventos do Auger e os Grupos do LIS ser aleatória era muito baixa, a análise foi continuada e refinada de duas maneiras: (1) os Grupos foram agrupados em Flashes de acordo com os critérios do LIS, e foram adotados como tempo de referência e localização dos conjuntos de Grupos o tempo de referência e localização do Grupo com a menor diferença temporal ao respectivo evento T3; (2) a distância real entre a localização bidimensional do Grupo, i.e. latitude/longitude, do Grupo e a localização individual de cada tanque do Auger que participou da detecção dos eventos estudados foi calculada e analisada. Dessa forma o conjunto de dados passou a ser 209 Grupos para 209 eventos detectados por 841 tanques.

Em função da nova distribuição espacial encontrada com as distâncias físicas reais

entre Grupos e os tanques que detectaram os eventos, as características individuais dos traços foram examinadas e verificou-se que 24,5% dos traços com distância $\Delta s \leq 32 \pm 4 \text{ km}$ dos Grupos associados tinham características de emissões VHF de relâmpagos, e que 9,7% dos traços com distância $> 32 \pm 4 \text{ km}$ tinham característica de partículas/fótons energéticas.

Com o objetivo de poder saber que tipo de distribuição espera-se na hora de calcular diferenças espaciais entre Grupos e a localização de Auger, e assim ter um parâmetro comparativo, foi calculada a distância de cada Grupo até um tanque virtual localizado no centro do Observatório. A distribuição dessas distâncias e das distâncias dos traços com característica de partículas/fótons e emissões VHF foram normalizadas e comparadas. As distâncias dos eventos com características de partícula/fótons e de emissões VHF com $\Delta s \leq 20 \pm 4 \text{ km}$, um total de 52 eventos, 8,4%, não são “explicados” pela distribuição das distâncias dos Grupos ao tanque virtual.

Dentre esses eventos foram analisados de modo individual as características dos 5 tanques cuja distância $\Delta s \leq 4 \pm 4 \text{ km}$, em função de 4 km ser a incerteza na localização dos relâmpagos detectados pelo LIS e portanto estarem de acordo com as observações de [Chilingarian et al. \(2010\)](#), que sugerem que o raio máximo de emissão de partículas/fótons é de ~ 500 metros. Para verificar o que aconteceu primeiro, se o Grupo ou o registro das partículas/fótons pelo Auger, calculou-se o tempo que o sinal VHF produzido pelo relâmpago levaria para atingir os tanques caso fosse gerado na superfície do solo, no ponto de localização (lat/lon) do Grupo. Analogamente foi calculado o tempo de propagação das partículas/fótons até os tanques que as detectaram, caso tivessem sido geradas por esses relâmpagos.

A metodologia estabelecida envolveu a definição de critérios espaciais e temporais que selecionasse eventos energéticos detectados pelo Observatório Pierre Auger e relâmpagos detectados pelo LIS com o potencial de terem uma associação física causal um com o outro, ou os relâmpagos gerando, de alguma forma ainda não conhecida, as emissões energéticas, ou as mesmas iniciando, novamente de modo não conhecido, os relâmpagos. Envolveu também a escolha de testes estatísticos que verificassem a probabilidade de as associações encontradas em função dos critérios definidos serem aleatórias ou não. Finalmente, foi desenvolvida uma metodologia de análise individual dos eventos que satisfizeram todos os critérios e análises.

A cada etapa do desenvolvimento metodológico diversos resultados foram gerados, alguns deles já descritos em função de seu importante papel na definição da metodologia deste trabalho. Na análise das distâncias entre os Grupos e os 841 tanques

individuais que participaram da detecção de cada evento do Auger verificou-se que 622 deles, 73,9%, registraram traços produzidos por partículas/fótons e 219 deles, 26,1%, registraram emissões VHF produzidas pelos relâmpagos. A maioria das emissões VHF, 96%, foram registradas a distâncias $\Delta s \leq 32 \pm 4 \text{ km}$ de distância dos Grupos a elas associados. Sua distribuição apresentou dois picos acentuados, o primário em 7-8 *km* e o secundário em 26-27 *km*. Já a distribuição das distâncias dos traços de partículas/fótons era mais homogênea, apenas 13% dos tanques estavam localizados a uma distância $\Delta s \leq 32 \pm 4 \text{ km}$. Ela apresentou três picos suaves, em 89-90 *km*, em 104-105 *km*, e em 139-140 *km*.

Ao realizar-se a análise comparativa das distâncias entre os Grupos e um tanque virtual localizado no centro do Observatório observou-se que a distribuição das distâncias era semelhante à distribuição das distâncias dos tanques com traços de partículas/fótons, reproduzindo bem a soma desta com a distribuição das distâncias dos tanques com registros de emissões VHF exceto na região $\Delta s \leq 20 \pm 4 \text{ km}$. Portanto, há uma alta probabilidade de que a relação desses 52 eventos com os respectivos relâmpagos detectados pelo LIS não seja aleatória.

Os 5 casos que restaram para uma análise individual detalhada, após a aplicação do critério de 500 *m* para a distância máxima entre a fonte de emissões energéticas e o detector em solo, apresentaram uma taxa de emissão/Grupo de $7,8 \times 10^{-5}$. A duração dos eventos variou entre 0,27 μs e 0,50 μs e sua energia ficou entre 489,4 *MeV* e 2493,2 *MeV*. O Δt entre eles e os Grupos associados variou entre $-31 \pm 26 \mu\text{s}$ e $11 \pm 26 \mu\text{s}$. Em função da incerteza temporal, em apenas um dos casos pôde-se concluir com segurança que o Grupo antecedeu a emissão de partículas/fótons. Caso esses eventos tenham sido gerados por relâmpagos, seja eles partículas ou fótons, são os eventos de mais curta duração identificados até o momento.

Um parâmetro muito importante a ser calculado é a distância que podem viajar as partículas/fótons no ar até serem detectados pelos tanques de Auger. Esse parâmetro, que dependerá basicamente da energia que elas possam adquirir na nuvem ou relâmpago, é fundamental para restringir a distância máxima dos relâmpagos a serem considerados. Neste trabalho conseguiu-se estimar em $32 \pm 4 \text{ km}$ a distância máxima atingida pelas emissões VHF dos relâmpagos.

Uma análise mais cuidadoso de todos aqueles casos que não puderam ser explicados pelo cálculo feito com o tanque virtual, $\Delta s \leq 20 \pm 4 \text{ km}$, acompanhado de simulações computacionais fornecerá uma restrição mais precisa da distância que as partículas/fótons podem viajar antes de ser absorvidas pelo meio. Esse parâmetro,

conjuntamente com as diferenças temporais, poderão ajudar a estabelecer a relação causa-efeito entre os relâmpagos e partículas/fótons.

Finalmente, indicar que a comparação entre os resultados extremos, obtidos por [Tavani et al. \(2011\)](#) e [Chilingarian et al. \(2012\)](#), com os cinco casos encontrados neste trabalho foi impossível, devido à diferença na coleta de dados e reporte dos mesmos. No caso do [Tavani et al. \(2011\)](#) e [Chilingarian et al. \(2012\)](#), eles reportaram os espectros de energia, ou seja, a energia de cada fóton/partícula. Nosso caso, os valores reportados de energia correspondem à energia total depositada, energia total integrada, e mesmo considerando o intervalo de tempo menor (25 ns), não teríamos a energia individual de cada fóton/partícula. Por tanto, é fundamental realizar o cálculo do espectro de energia dos traços de Auger para assim poder realizar uma apropriada comparação entre resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAM, J.; AGLIETTA, M.; AGUIRRE, I.; ALBROW, M.; ALLARD, D.; ALLEKOTTE, I.; ALLISON, P.; MUÑIZ, J. A.; AMARAL, M. do; AMBROSIO, M.; ANCHORDOQUI, L.; ANDREWS, R.; ANGUIANO, M.; ANJOS, J. dos; ARAMO, C.; ARGIRO, S.; ARISAKA, K.; ARTEAGA, J.; ATULUGAMA, S.; AVE, M.; AVILA, G.; BAGGIO, R.; BAI, X.; BARBOSA, A.; BARBOSA, H.; BARNHILL, D.; BARROSO, S.; BAULEO, P.; BEATTY, J.; BEAU, T.; BECKER, K.-H.; BELLIDO, J.; BELLO, P.; BERGMANN, T.; BERMAN, E.; BERTOU, X.; BIERMANN, P.; BILLOIR, P.; BIRAL, R.; BLUEMER, H.; BOHACOVA, M.; BOLLMANN, E.; BONIFAZI, C.; BORATAV, M.; BOSELLI, A.; BRACK, J.; BRUNET, J.-M.; BUI-DUC, H.; CABRERA, V.; CAMIN, D.; CAPDEVIELLE, J.-N.; CARREÑO, A.; CARTIGLIA, N.; CARUSO, R.; CARVALHO, L. de; CASANOVA, S.; CASIMIRO, E.; CASTELLINA, A.; CASTRO, J.; CATTANEO, P.; CAZON, L.; CESTER, R.; CHÁVEZ, N.; CHEAM, D.; CHIAVASSA, A.; CHINELLATO, J.; CHIOSSO, M.; CHOU, A.; CHYE, J.; CILLIS, A.; CIVIT, B.; CLAES, D.; CLARK, P.; CLAY, R.; COHEN, F.; CORDERO, A.; CORDIER, A.; CORMIER, E.; COTZOMI, J.; COTTI, U.; COUTU, S.; COVAULT, C.; CREUSOT, A.; CRONIN, J.; CUAUTLE, M.; DAGORET-CAMPAGNE, S.; DANG-QUANG, T.; SILVA, P. D.; DARLING, J.; DARRIULAT, P.; DAUMILLER, K.; DAWSON, B.; BRUIJN, L. de; CAPOA, A. D.; OLIVEIRA, M. de; SOUZA, V. de; SELVA, A. D.; DELIGNY, O.; DIAZ, J.; DOBRIGKEIT, C.; D'Olivo, J.; DOROFEEV, A.; DOVA, M.; DYE, A.; DuVernois, M.; ENGEL, R.; EPELE, L.; ESCHSTRUTH, P.; ESCOBAR, C.; ETCHEGOYEN, A.; LUIS, P. F. S.; FAUTH, A.; FAZZINI, N.; FERNÁNDEZ, A.; FERRERO, A.; FICK, B.; FILEVICH, A.; FILIPCIC, A.; FONTE, R.; FULGIONE, W.; GÓMEZ, E.; GARCIA, B.; GARCIA, C.; GEENEN, H.; GEMMEKE, H.; GERMAIN-RENAUD, C.; GHIA, P.; GIBBS, K.; GILLER, M.; GITTO, J.; GLASS, H.; BERISSO, M. G.; VITALE, P. G.; GONZÁLEZ, J.; GONZÁLEZ, J.; GORA, D.; GOODWIN, A.; GOUFFON, P.; GRASSI, V.; GRILLO, A.; GRUNFELD, C.; GRYGAR, J.; GUARINO, F.; GUEDES, G.; GUERARD, C.; GUMBSHEIMER, R.; HARTON, J.; HASENBALG, F.; HECK, D.; HERNÁNDEZ, J.; HOFFER, D.; HOJVAT, C.; HOMOLA, P.; HORVAT, M.; HRABOVSKY, M.; INSOLIA, A.; JAMINION, S.; JERÓNIMO, Y.; JIANG, L.; KADUCAK, M.; KAMPERT, K.-H.; KEILHAUER, B.; KEMP, E.; KLAGES, H.; KLEIFGES, M.; KLEINFELLER, J.; KNAPP, J.; KOPMANN, A.; KUNKA, N.; KUTSCHERA, M.; LACHAUD, C.; LAPOLLA, M.; LETESSIER-SELVON, A.;

LHENRY-YVON, I.; LLOYD-EVANS, J.; LÓPEZ, R.; AGUERA, A. L.;
LUCANO, M.; LUNA, R.; MA, Y.; MANCENÍDO, M.; MANFREDI, P.;
MANHAES, L.; MANTSCH, P.; MARIAZZI, A.; MARKUS, M.; MARTIN, G.;
MARTINEAU, O.; MARTINEZ, J.; MARTINEZ, N.; MARTÍNEZ, O.; MATHES,
H.-J.; MATTHEWS, J.; MATTHEWS, J.; MATTHIAE, G.; MARQUES, E.;
MATUSSEK, P.; MAURIN, G.; MAURIZIO, D.; MAZUR, P.; McCauley, T.;
McEwen, M.; McNeil, R.; MEDINA, C.; MEDINA, M.; MEDINA-TANCO, G.;
MELO, D.; MELOCCHI, M.; MENICHETTI, E.; MENSNIKOV, A.; MEYER, F.;
MEYHANDAN, R.; MEZA, J.; MIELE, G.; MILLER, W.; MOHAMMED, M.;
MONNIER-RAGAIGNE, D.; MORELLO, C.; MORENO, E.; MOSTAFA, M.;
MUSSA, R.; NASSINI, H.; NAVARRA, G.; NELLEN, L.; NERLING, F.;
NEWMAN-HOLMES, C.; NICOTRA, D.; NIGRO, S.; NITZ, D.; NOGIMA, H.;
NOSEK, D.; NUÑEZ, M.; OHNUKI, T.; OLINTO, A.; OSTAPTCHENKO, S.;
PALATKA, M.; PARENTE, G.; PARIZOT, E.; PASAYE, E.; PASTRONE, N.;
PATEL, M.; PAUL, T.; PEDRAZA, I.; PEKALA, J.; PELAYO, R.; PEPE, I.;
PÉREZ-LORENZANA, A.; PERRONE, L.; PESHMAN, N.; PETRERA, S.;
PETRINCA, P.; PHAM-NGOC, D.; PHAM-TRUNG, P.; PIEROG, T.; PISANTI,
O.; PLAYEZ, N.; PONCE, E.; PORTER, T.; JUNIOR, L. P.; PRIVITERA, P.;
PROUZA, M.; PRYKE, C.; RAFERT, J.; RAIA, G.; RANCON, S.; RATTI, L.;
RAVIGNANI, D.; RE, V.; REIS, H.; REUCROFT, S.; REVENUE, B.; RICHTER,
M.; RIDKY, J.; RISI, A.; RISSE, M.; RIZI, V.; ROBERTS, M.; ROBLEDO, C.;
RODRIGUEZ, G.; RODRIQUEZ, J.; MARTINO, J. R.; ROMÁN, S.; ROSA, L.;
ROTH, M.; ROVERO, A.; SALAZAR, H.; SALINA, G.; SANCHEZ, F.;
SANTANDER, M.; SANTOS, L. dos; SATO, R.; SCHOVANEK, P.; SCHERINI,
V.; SCIUTTO, S.; SEQUEIROS-HADDAD, G.; SHELLARD, R.; SHIBUYA, E.;
SIGUAS, F.; SLATER, W.; GRANDE, N. S.-D.; SMITH, K.; SNOW, G.;
SOMMERS, P.; SONG, C.; SPINKA, H.; SUAREZ, F.; SUOMIJARVI, T.;
SUPANITSKY, D.; SWAIN, J.; SZADKOWSKI, Z.; TAMASHIRO, A.;
THORNTON, G.; THOUW, T.; TICONA, R.; TKACZYK, W.; PEIXOTO, C. T.;
TRIPATHI, A.; TRISTRAM, G.; TROMBLEY, M.; TSCHERNIAKHOVSKI, D.;
TUCKEY, P.; TUNNICLIFFE, V.; URBAN, M.; ESTRADA, C. U.; VALDÉS, J.;
VARGAS, A.; VARGAS, C.; VAZQUEZ, R.; VEBERIC, D.; VEIGA, A.;
VELARDE, A.; VERNOTTE, F.; VERZI, V.; VIDELA, M.; VIGORITO, C.;
VILLASEÑOR, L.; VLCEK, M.; VOYVODIC, L.; VO-VAN, T.;
WALDENMAIER, T.; WALKER, P.; WARNER, D.; WATSON, A.; WIEBUSCH,
C.; WIECZOREK, G.; WILCZYNSKA, B.; WILCZYNSKI, H.; WILD, N.;
YAMAMOTO, T.; ZAS, E.; ZAVRTANIK, D.; ZAVRTANIK, M.; ZEPEDA, A.;

ZHANG, C.; ZHU, Q. Properties and performance of the prototype instrument for the pierre auger observatory. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 523, n. 1-2, p. 50–95, maio 2004. ISSN 01689002.

Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004NIMPA.523...50A>>. 21

AGLIETTA, M.; ALLISON, P.; ANDRES, E.; ARNEODO, F.; BERTOU, X.; BONIFAZI, C.; BUSCA, N.; CREUSOT, A.; DELIGNY, O.; DORNIC, B.; GENOLINI, B.; GHIA, P.; GRUNFELD, C.; LHENRY-YVON, I.; MAZUR, P.; MORENO, E.; PEREZ, G.; SALAZAR, H.; SUOMIJARVI, T. Response of the pierre auger observatory water cherenkov detectors to muons. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 29., 2005, Pune.

Proceedings... Pune, 2005. p. 101–106. 23, 24

ALBRECHT, R. I.; GOODMAN, S. J.; PETERSEN, W. A.; BUECHLER, D. E.; BRUNING, E. C.; BLAKESLEE, R. J.; CHRISTIAN, H. J. The 13 years of TRMM lightning imaging sensor: From individual flash characteristics to decadal tendencies. In: XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY (ICAE 2011), 14., 2011, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2011. p. 1–4. 29

ALEXEENKO, V. V.; CHERNYAEV, A. B.; CHUDAKOV, A. E.; KHAERDINOV, N.; OZROKOV, S. K.; G., S. V. Short perturbations of cosmic ray intensity and electric field in atmosphere. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 20., 1987, Moscow. **Proceedings...** Moscow, 1987. p. 272–275. 9, 20

ALLARD, D.; ARMENGAUD, E.; ALLEKOTTE, I.; ALLISON, P.; AUBLIN, J.; AVE, M.; BAULEO, P.; BEATTY, J.; BEAU, T.; BERTOU, X.; BILLOIR, P.; BONIFAZI, C.; CHOU, A.; CHYE, J.; DAGORET-CAMPAGNE, S.; DOROFEEV, A.; GHIA, P.; GÓMEZ, M.; GORGI, A.; HAMILTON, J. C.; HARTON, J.; KNAPIK, R.; LACHAUD, C.; LHENRY-YVON, I.; LETESSIER-SELVON, A.; MATTHEWS, J.; MEDINA, C.; MEYHANDAN, R.; NAVARRA, G.; NITZ, D.; PARIZOT, E.; REVENU, B.; SZADKOWSKI, Z.; YAMAMOTO, T. f. t. P. A. C. The trigger system of the pierre auger surface detector: operation, efficiency and stability. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 29., 2005, Pune. **Proceedings...** Pune, 2005. p. 101–106. 27

BABICH, L. Collision operator for relativistic electrons in a cold gas of atomic particles. **Journal of Experimental and Theoretical Physics**,

Nauka/Interperiodica, v. 98, n. 4, p. 707–718, 2004. ISSN 1063-7761. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1134/1.1757671>>. 6

BERTOUI, X. Background radiation measurement with water cherenkov detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 639, n. 1, p. 73–76, maio 2011. ISSN 0168-9002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210020346>>. 57

BOCCIPPIO, D. J.; KOSHAK, W. J.; BLAKESLEE, R. J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. part i: Predicted diurnal variability. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 1318–1332, ago. 2002. 29

BRIGGS, M. S.; FISHMAN, G. J.; CONNAUGHTON, V.; BHAT, P. N.; PACIESAS, W. S.; PREECE, R. D.; WILSON-HODGE, C.; CHAPLIN, V. L.; KIPPEN, R. M.; KIENLIN, A. v.; MEEGAN, C. A.; BISSALDI, E.; DWYER, J. R.; SMITH, D. M.; HOLZWORTH, R. H.; GROVE, J. E.; CHEKHTMAN, A. First results on terrestrial gamma ray flashes from the fermi gamma-ray burst monitor. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 14 PP., jul. 2010. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JA015242.shtml>>. 13, 20

BRUNETTI, M.; STEFANO, C.; MENOTTI, G.; GIOVANNI, G. Gamma-ray bursts of atmospheric origin in the MeV energy range. **Geophysical Research Letters**, v. 27, 2000. 9

CARLSON, B. E. **Terrestrial Gamma-Ray production by lightning**. Tese (Doutorado) — Stanford University, 2009. 6

CARLSON, B. E.; LEHTINEN, N. G.; INAN, U. S. Terrestrial gamma ray flash production by active lightning leader channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 7 PP., out. 2010. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2010JA015647.shtml>>. 19

CHILINGARIAN, A.; DARYAN, A.; ARAKELYAN, K.; HOVHANNISYAN, A.; MAILYAN, B.; MELKUMYAN, L.; HOVSEPYAN, G.; CHILINGARYAN, S.; REYMERS, A.; VANYAN, L. Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. **Physical Review D**, v. 82, p. 043009, 2010. 51, 53, 56, 59

- CHILINGARIAN, A.; MAILYAN, B.; VANYAN, L. Recovering of the energy spectra of electrons and gamma rays coming from the thunderclouds. **Atmospheric Research**, v. 114-115, p. 1–16, 2012. 10, 11, 15, 20, 61
- CHRISTIAN, H.; BLAKESLEE, R.; GOODMAN, S.; MACH, D.; STEWART, M.; BUECHLER, D.; KOSHAK, W.; HALL, J.; BOECK, W.; DRISCOLL, K.; BOCIPPIO, D. The lightning imaging sensor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 11., 1999. **Proceedings...** [S.l.], 1999. p. 746–749. 28
- CHRISTIAN, H. J.; BLAKESLEE, R. J.; GOODMAN, S. J.; United States. National Aeronautics and Space Administration. Scientific and Technical Information Program. **Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System**. [Washington, DC]: National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Program, 1992. 29
- COLEMAN, L. M.; DWYER, J. R. Propagation speed of runaway electron avalanches. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 11, 2006. ISSN 1944-8007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2006GL025863>>. 3, 4, 6
- CUMMER, S. A.; ZHAI, Y.; HU, W.; SMITH, D. M.; LOPEZ, L. I.; STANLEY, M. A. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. 5 PP., abr. 2005. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005GL022778.shtml>>. 17
- DWYER, J. R. A fundamental limit on electric fields in air. **Geophysical Research Letters**, v. 30, p. 2055, 2003. 3, 4, 7, 8
- _____. The relativistic feedback discharge model of terrestrial gamma ray flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. A2, p. A02308, fev. 2012. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2012/2011JA017160.shtml>>. 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10
- DWYER, J. R.; BABICH, L. P. Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air. **Geophysical Research Letters**, v. 116, p. A09301, 2011. 4, 5
- DWYER, J. R.; RASSOUL, H. K.; AL-DAYEH, M.; CARAWAY, L.; WRIGHT, B.; CHREST, A.; UMAN, M. A.; RAKOV, V. A.; RAMBO, K. J.; JORDAN,

D. M.; JERAULD, J.; SMYTH, C. A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. 4 PP., mar. 2004. Disponível em: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2004/2003GL018771.shtml>. 10, 11, 12, 19, 20, 45

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. L. **The Feynman lectures on physics**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1964. 2 - 5 p. 7

FISHMAN, G. J.; BHAT, P. N.; MALLOZZI, R.; HORACK, J. M.; KOSHUT, T.; KOUVELIOTOU, C.; PENDLETON, G. N.; MEEGAN, C. A.; WILSON, R. B.; PACIESAS, W. S.; GOODMAN, S. J.; CHRISTIAN, H. J. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. **Science**, v. 264, n. 5163, p. 1313–1316, maio 1994. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/264/5163/1313>. 7, 12, 15, 20

FISHMAN, G. J.; BRIGGS, M. S.; CONNAUGHTON, V.; BHAT, P. N.; PACIESAS, W. S.; KIENLIN, A. v.; WILSON-HODGE, C.; KIPPEN, R. M.; PREECE, R.; MEEGAN, C. A.; GREINER, J. Temporal properties of the terrestrial gamma-ray flashes from the gamma-ray burst monitor on the fermi observatory. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. A7, p. A07304, jul. 2011. ISSN 0148-0227. Disponível em: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2011/2010JA016084.shtml>. 56

FUSCHINO, F.; MARISALDI, M.; LABANTI, C.; BARBIELLINI, G.; Del Monte, E.; BULGARELLI, A.; TRIFOGLIO, M.; GIANOTTI, F.; GALLI, M.; ARGAN, A.; TROIS, A.; TAVANI, M.; MORETTI, E.; GIULIANI, A.; LONGO, F.; COSTA, E.; CARAVEO, P.; CATTANEO, P. W.; CHEN, A.; D'Ammando, F.; De Paris, G.; Di Cocco, G.; Di Persio, G.; DONNARUMMA, I.; EVANGELISTA, Y.; FEROCI, M.; FERRARI, A.; FIORINI, M.; LAPSHOV, I.; LAZZAROTTO, F.; LIPARI, P.; MEREGHETTI, S.; MORSELLI, A.; PACCIANI, L.; PELLIZZONI, A.; PEROTTI, F.; PICOZZA, P.; PIANO, G.; PILIA, M.; PREST, M.; PUCELLA, G.; RAPISARDA, M.; RAPPOLDI, A.; RUBINI A.AND SABATINI, S.; SOFFITTA, P.; STRIANI, E.; VALLAZZA, E.; VERCELLONE, S.; VITTORINI, V.; ZAMBRA, A.; ZANELLO, D.; ANTONELLI, L. A.; COLAFRANCESCO, S.; CUTINI, S.; GIOMMI, P.; LUCARELLI, F.; PITTORI, C.; SANTOLAMAZZA, P.; VERRECCHIA, F.; SALOTTI, L. **Geophysical Research Letters**, v. 38, 2011. 53

GUREVICH, A.; MILIKH, G.; ROUSSEL-DUPRE, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. **Physics Letters A**, v. 165, n. 5-6, p. 463–468, jun. 1992. ISSN 0375-9601. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596019290348P>>. 2, 3, 8

INAN, U. S.; LEHTINEN, N. G. Production of terrestrial gamma-ray flashes by an electromagnetic pulse from a lightning return stroke. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. 5 PP., out. 2005. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005GL023702.shtml>>. 18

KASEMIR, H. W. A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 7, p. 1873–1878, 1960. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1960/JZ065i007p01873.shtml>>. 15

LEHTINEN, N. G.; BELL, T. F.; INAN, U. S. Monte carlo simulation of runaway MeV electron breakdown with application to red sprites and terrestrial gamma ray flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A11, p. 24699–24,712, nov. 1999. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1999/1999JA900335.shtml>>. 3, 17

LEHTINEN, N. G.; WALT, M.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; PASKO, V. P. γ -Ray emission produced by a relativistic beam of runaway electrons accelerated by quasi-electrostatic thundercloud fields. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 19, p. 2645–2648, 1996. ISSN 0094-8276. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/1996/96GL02573.shtml>>. 17

LU, G.; BLAKESLEE, R. J.; LI, J.; SMITH, D. M.; SHAO, X. M.; MCCAUL, E. W.; BUECHLER, D. E.; CHRISTIAN, H. J.; HALL, J. M.; CUMMER, S. A. Lightning mapping observation of a terrestrial gamma-ray flash. **Geophysical Research Letters**, v. 37, p. L11806, 2010. 20

MARISALDI, M.; FUSCHINO, F.; LABANTI, C.; GALLI, M.; LONGO, F.; MONTE, E. D.; BARBIELLINI, G.; TAVANI, M.; GIULIANI, A.; MORETTI, E.; VERCELLONE, S.; COSTA, E.; CUTINI, S.; DONNARUMMA, I.; EVANGELISTA, Y.; FEROCI, M.; LAPSHOV, I.; LAZZAROTTO, F.; LIPARI, P.; MEREGHETTI, S.; PACCIANI, L.; RAPISARDA, M.; SOFFITTA, P.; TRIFOGLIO, M.; ARGAN, A.; BOFFELLI, F.; BULGARELLI, A.; CARAVEO, P.; CATTANEO, P. W.; CHEN, A.; COCCO, V.; D'Ammando, F.; PARIS, G. D.;

COCCO, G. D.; PERSIO, G. D.; FERRARI, A.; FIORINI, M.; FROYSLAND, T.; GIANOTTI, F.; MORSELLI, A.; PELLIZZONI, A.; PEROTTI, F.; PICOZZA, P.; PIANO, G.; PILIA, M.; PREST, M.; PUCELLA, G.; RAPPOLDI, A.; RUBINI, A.; SABATINI, S.; STRIANI, E.; TROIS, A.; VALLAZZA, E.; VITTORINI, V.; ZAMBRA, A.; ZANELLO, D.; ANTONELLI, L. A.; COLAFRANCESCO, S.; GASPARRINI, D.; GIOMMI, P.; PITTORI, C.; PREGER, B.; SANTOLAMAZZA, P.; VERRECCHIA, F.; SALOTTI, L. Detection of terrestrial gamma ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 12 PP., mar. 2010. Disponível em:

<<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JA014502.shtml>>. 15, 20

McCarthy, M.; PARKS, G. K. Further observations of x-rays inside thunderstorms. **Geophysical Research Letters**, v. 12, n. 6, p. PP. 393–396, 1985. Disponível em:

<<http://www.agu.org/pubs/crossref/1985/GL012i006p00393.shtml>>. 8, 9

MENDONÇA, R. D.; RAULIN, J.-P.; BERTONI, F.; ECHER, E.; MAKHMUTOV, V.; FERNANDEZ, G. Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in argentina by CARPET cosmic ray detector. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 11-12, p. 1410–1416, jul. 2011. ISSN 1364-6826. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682610003020>>.

19, 20

MOORE, C. B.; EACK, K. B.; AULICH, G. D.; RISON, W. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 11, p. PP. 2141–2144, jun. 2001. Disponível em:

<<http://www.agu.org/pubs/crossref/2001/2001GL013140.shtml>>. 10, 19, 20, 45

PASKO, V. P. Red sprite discharges in the atmosphere at high altitude: the molecular physics and the similarity with laboratory discharges. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 16, n. 1, p. S13–S29, fev. 2007. ISSN 0963-0252, 1361-6595. Disponível em:

<<http://iopscience.iop.org/0963-0252/16/1/S02>>. 18

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; TARANENKO, Y. N.; BELL, T. F. Heating, ionization and upward discharges in the mesosphere, due to intense quasi-electrostatic thundercloud fields. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 4, p. 365–368, 1995. ISSN 0094-8276. Disponível em:

<<http://www.agu.org/pubs/crossref/1995/95GL00008.shtml>>. 17

PIERRE AUGER OBSERVATORY. **Surface detector description**. 2008. Disponível em: <http://www.kavlifoundation.org/sites/default/files/image/astrophysics/inside_surface_detector.jpg>. Acesso em: 07 novembro 2012. 23

_____. **Surface detectors full array**. 2008. Disponível em: <<http://www.auger.org.ar/survey/0zi/sd-array-full-1673-SD-20041116.jpg>>. Acesso em: 05 novembro 2012. 22

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. ISBN 9780521583275. 2, 16, 17

RIVERA, H. **Measurements of the energy spectrum of cosmic rays above 3×10^{17} eV using the infill array of the Pierre Auger Observatory**. Tese (Doutorado) — Universita degli Studi di Milano - Université Paris Diderot, 2013. 24, 27

ROUSSEL-DUPRÉ, R.; COLMAN, J.; SYMBALISTY, E.; SENTMAN, D.; PASKO, V. Physical processes related to discharges in planetary atmospheres. **Space Science Reviews**, Springer Netherlands, v. 137, n. 1-4, p. 51–82, 2008. ISSN 0038-6308. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11214-008-9385-5>>. 6

SÃO SABBAS, F. T. **Role of conductivity spatial structure in determining the locations of sprite initiation**. Tese (Doutorado) — University of Alaska Fairbanks, 2003. 17

SÃO SABBAS, F. T.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; BAILEY, M.; CUMMER, S.; AZAMBUJA, R. R.; SANTIAGO, J. P. C.; THOMAS, J. N.; PINTO, O.; SOLORZANO, N. N.; SCHUCH, N. J.; FREITAS, S. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. Observations of prolific transient luminous event production above a mesoscale convective system in argentina during the sprite2006 campaign in brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 20 PP., nov. 2010. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JA014857.shtml>>. 12

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; JR, O. P. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, p. 9 PP., fev. 2006. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JD006415.shtml>>. 17

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. 9 PP., dez. 2010. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2010JD014330.shtml>>. 17

SMITH, D. M.; DWYER, J. R.; HAZELTON, B. J.; GREFENSTETTE, B. W.; MARTINEZ-MCKINNEY, G. F. M.; ZHANG, Z. Y.; LOWELL, A. W.; KELLEY, N. A.; SPLITT, M. E.; LAZARUS, S. M.; ULRICH, W.; SCHAAL, M.; SALEH, Z. H.; CRAMER, E.; RASSOUL, H.; CUMMER, S. A.; LU, G.; SHAO, X.-M.; HO, C.; HAMLIN, T.; BLAKESLEE, R. J.; HECKMAN, S. A terrestrial gamma ray flash observed from an aircraft. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, p. D20124, 2011. 20

SMITH, D. M.; HAZELTON, B. J.; GREFENSTETTE, B. W.; DWYER, J. R.; HOLZWORTH, R. H.; LAY, E. H. Terrestrial gamma ray flashes correlated to storm phase and tropopause height. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. null, p. A00E49, ago. 2010. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JA014853.shtml>>. 57

SMITH, D. M.; LOPEZ, L. I.; LIN, R. P.; BARRINGTON-LEIGH, C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. **Science**, v. 307, n. 5712, p. 1085–1088, fev. 2005. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/307/5712/1085>>. 13, 14, 15, 18, 20, 57

STANFORD UNIVERSITY. VERY LOW FREQUENCY GROUP (VLF GROUP). **Runaway avalanche in the middle atmosphere**. 1999. Disponível em: <<http://nova.stanford.edu/~vlf/runaway/>>. Acesso em: 20 novembro 2012. 2

STANLEY, M. A.; SHAO, X.-M.; SMITH, D. M.; LOPEZ, L. I.; PONGRATZ, M. B.; HARLIN, J. D.; STOCK, M.; REGAN, A. A link between terrestrial gamma-ray flashes and intracloud lightning discharges. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. 5 PP., mar. 2006. Disponível em: <<http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005GL025537.shtml>>. 18, 19

TAVANI, M.; BARBIELLINI, G.; ARGAN, A.; BOFFELLI, F.; BULGARELLI, A.; CARAVEO, P.; CATTANEO, P. W.; CHEN, A. W.; COCCO, V.; COSTA, E.; D'Ammando, F.; MONTE, E. D.; PARIS, G. D.; COCCO, G. D.; PERSIO, G. D.; DONNARUMMA, I.; EVANGELISTA, Y.; FEROCI, M.; FERRARI, A.; FIORINI,

M.; FORNARI, F.; FUSCHINO, F.; FROYSLAND, T.; FRUTTI, M.; GALLI, M.; GIANOTTI, F.; GIULIANI, A.; LABANTI, C.; LAPSHOV, I.; LAZZAROTTO, F.; LIELLO, F.; LIPARI, P.; LONGO, F.; MATTAINI, E.; MARISALDI, M.; MASTROPIETRO, M.; MAURI, A.; MAURI, F.; MEREGHETTI, S.; MORELLI, E.; MORSELLI, A.; PACCIANI, L.; PELLIZZONI, A.; PEROTTI, F.; PIANO, G.; PICOZZA, P.; PONTONI, C.; PORROVECCHIO, G.; PREST, M.; PUCCELLA, G.; RAPISARDA, M.; RAPPOLDI, A.; ROSSI, E.; RUBINI, A.; SOFFITTA, P.; TRACI, A.; TRIFOGLIO, M.; TROIS, A.; VALLAZZA, E.; VERCELLONE, S.; VITTORINI, V.; ZAMBRA, A.; ZANELLO, D.; PITTORI, C.; PREGER, B.; SANTOLAMAZZA, P.; VERRECCHIA, F.; GIOMMI, P.; COLAFRANCESCO, S.; ANTONELLI, A.; CUTINI, S.; GASPARRINI, D.; STELLATO, S.; FANARI, G.; PRIMAVERA, R.; TAMBURELLI, F.; VIOLA, F.; GUARRERA, G.; SALOTTI, L.; D'Amico, F.; MARCHETTI, E.; CRISCONIO, M.; SABATINI, P.; ANNONI, G.; ALIA, S.; LONGONI, A.; SANQUERIN, R.; BATTILANA, M.; CONCARI, P.; DESSIMONE, E.; GROSSI, R.; PARISE, A.; MONZANI, F.; ARTINA, E.; PAVESI, R.; MARSEGUERRA, G.; NICOLINI, L.; SCANDELLI, L.; SOLI, L.; VETTORELLO, V.; ZARDETTO, E.; BONATI, A.; MALTECCA, L.; D'Alba, E.; PATAN, M.; BABINI, G.; ONORATI, F.; ACQUAROLI, L.; ANGELUCCI, M.; MORELLI, B.; AGOSTARA, C.; CERONE, M.; MICHETTI, A.; TEMPESTA, P.; D'Eramo, S.; ROCCA, F.; GIANNINI, F.; BORGHI, G.; GARAVELLI, B.; CONTE, M.; BALASINI, M.; FERRARIO, I.; VANOTTI, M.; COLLAVO, E.; GIACOMAZZO, M. The AGILE mission.

Astronomy and Astrophysics, v. 502, n. 3, p. 995–1013, ago. 2009. ISSN

0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <http://www.aanda.org/index.php?option=com_article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/aa/full_html/2009/30/aa10527-08/aa10527-08.html>.

<http://www.aanda.org/index.php?option=com_article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/aa/full_html/2009/30/aa10527-08/aa10527-08.html>.

15

TAVANI, M.; MARISALDI, M.; LABANTI, C.; FUSCHINO, F.; ARGAN, A.; TROIS, A.; GIOMMI, P.; COLAFRANCESCO, S.; PITTORI, C.; PALMA, F.; TRIFOGLIO, M.; GIANOTTI, F.; BULGARELLI, A.; VITTORINI, V.; VERRECCHIA, F.; SALOTTI, L.; BARBIELLINI, G.; CARAVEO, P.; CATTANEO, P. W.; CHEN, A.; CONTESSI, T.; COSTA, E.; D'Ammando, F.; MONTE, E. D.; PARIS, G. D.; COCCO, G. D.; PERSIO, G. D.; DONNARUMMA, I.; EVANGELISTA, Y.; FEROCI, M.; FERRARI, A.; GALLI, M.; GIULIANI, A.; GIUSTI, M.; LAPSHOV, I.; LAZZAROTTO, F.; LIPARI, P.; LONGO, F.; MEREGHETTI, S.; MORELLI, E.; MORETTI, E.; MORSELLI, A.; PACCIANI, L.; PELLIZZONI, A.; PEROTTI, F.; PIANO, G.; PICOZZA, P.;

PILIA, M.; PUCELLA, G.; PREST, M.; RAPISARDA, M.; RAPPOLDI, A.; ROSSI, E.; RUBINI, A.; SABATINI, S.; SCALISE, E.; SOFFITTA, P.; STRIANI, E.; VALLAZZA, E.; VERCELLONE, S.; ZAMBRA, A.; ZANELLO, D. Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators. **Physical Review Letters**, v. 106, n. 1, p. 018501, jan. 2011. Disponível em:

<<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.106.018501>>. 15, 16, 20, 61

THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P. R.; RISON, W.; HUNYADY, S. J.; WINN, W. P.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. Accuracy of the lightning mapping array.

Journal of Geophysical Research, v. 109, p. D14207, 2004. 47

TORII, T.; MINORU, T.; TERUO, H. Observation of gamma-ray dose increase associated with winter thunderstorm and lightning activity. **Journal of**

Geophysical Research, v. 107, 2002. 10, 20

TSUCHIYA, H.; ENOTO, T.; TORII, T.; NAKAZAWA, K.; YUASA, T.; TORII, S.; FUKUYAMA, T.; YAMAGUCHI, T.; KATO, H.; OKANO, M.; TAKITA, M.; K., M. Observation of an energetic radiation burst from mountain-top

thunderclouds. **Physical Review Letters**, v. 102, p. 255003, jun. 2009. 10, 20

WILEMAN, C. **The spread in the arrival times of particles in air-showers for photon and anisotropy searches above 10 EeV**. Tese (Ph.D.) —

University of Leeds, 2008. Disponível em:

<<http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.534470>>. 21, 22

WILSON, C. T. R. The electric field of a thundercloud and some of its effects.

Proceedings of the Physical Society of London, v. 37, n. 1, p. 32D–37D, jan. 1924. ISSN 1478-7814. Disponível em:

<<http://iopscience.iop.org/1478-7814/37/1/314>>. 1, 9

_____. The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds electric field of a thundercloud and some of its effects.

Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society,

v. 22, p. 534–538, 1925. 7

WINKELMANN, R. Efecto del campo eléctrico atmosférico sobre el conteo de partículas cargadas detectadas por un centellador en el laboratorio de física

cósmica de chacaltaya. **Revista Boliviana de Física**, v. 17, p. 13–20, 2010. 19