



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.12.19.20-TDI

INFLUÊNCIA DAS VARIABILIDADES SOLAR, GEOMAGNÉTICA E ATMOSFÉRICA NA MODULAÇÃO DA INTENSIDADE DE RAIOS CÓSMICOS

Rafael Rodrigues Souza de Mendonça

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Ezequiel
Echer, e Jean Pierre Raulin, aprovada em 27 de maio de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39M3KLP>>

INPE
São José dos Campos
2011

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:**

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

Membros:

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

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.12.19.20-TDI

INFLUÊNCIA DAS VARIABILIDADES SOLAR, GEOMAGNÉTICA E ATMOSFÉRICA NA MODULAÇÃO DA INTENSIDADE DE RAIOS CÓSMICOS

Rafael Rodrigues Souza de Mendonça

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Ezequiel
Echer, e Jean Pierre Raulin, aprovada em 27 de maio de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39M3KLP>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Mendonça, Rafael Rodrigues Souza de.

M523i Influência das variabilidades solar, geomagnética e atmosférica na modulação da intensidade de raios cósmicos / Rafael Rodrigues Souza de Mendonça. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxvi+94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.12.19.20-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Ezequiel Echer, e Jean Pierre Raulin.

1. Raios cósmicos. 2. Atividade solar. 3. Atividade geomagnética. 4. Fenômenos atmosféricos. I. Título.

CDU 524.1

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

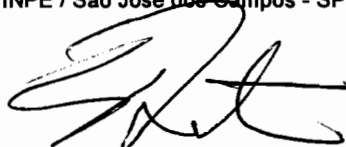
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



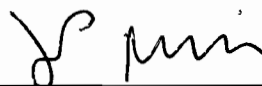
Vice-Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Ezequiel Echer



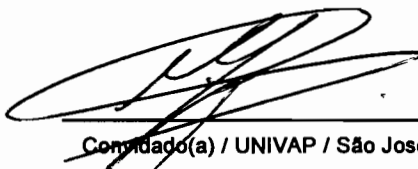
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Jean-Pierre Raulin



Orientador(a) / MACKENZIE / São Paulo - SP

Dr. Marlos Rockenbach da Silva



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

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): Rafael Rodrigues Souza de Mendonça

São José dos Campos, 27 de maio de 2011

"Toda a nossa ciência, comparada com a realidade,
é primitiva e infantil - e, no entanto,
é a coisa mais preciosa que temos."
(Albert Einstein)

A meus pais

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, pela criação de tudo aquilo que conhecemos e pela possibilidade de estudarmos tudo aquilo que não conhecemos.

Aos meus orientadores Dr. Jean-Pierre Raulin e Dr. Ezequiel Echer pela cooperação durante a realização do meu mestrado.

A meus pais e familiares pelo apoio nas horas difíceis e pela compreensão durante todo o período em que passei ocupado me dedicando aos estudos.

Ao Professor Pierre Kaufmann, diretor do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), a todos aqueles ligados ao CRAAM pela ajuda, incentivo e acolhimento, que sem dúvida foram de grande importância.

Ao Dr. Vladimir S. Makhmutov e outros pesquisadores do LPI – Instituto de Física Lebedev de Moscou pelo fornecimento de material de estudo, pela ajuda nos momentos de dúvida, e pelo apoio técnico com respeito aos instrumentos de pesquisa utilizados neste trabalho.

Aos meus colegas de curso, em especial ao Carlos Roberto Braga, pelas diversas discussões que proporcionaram um melhor desenvolvimento da dissertação e pelo apoio nas horas fáceis e difíceis.

Ao Dr. Fernando Celso Perin Bertoni pela sua colaboração na revisão e melhoramento deste trabalho.

Aos Doutores Polinaya Muralikrishna, Severino L.G. Dutra e Yuri Stozkhov, que gentilmente fizeram parte da minha banca examinadora, contribuindo com valiosas sugestões para este trabalho

Aos técnicos e engenheiros do CASLEO (Complexo Astronômico El Leoncito), pelo apoio técnico na obtenção dos dados dos instrumentos de pesquisa necessários para a realização da minha Iniciação Científica e deste trabalho.

À FAPESP (Fundação de Apoio e Pesquisa do Estado de São Paulo) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior), pelo importantíssimo apoio financeiro.

Ao MACKPESQUISA e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro na compra e manutenção dos instrumentos utilizados para o desenvolvimento dos estudos abordados nesta dissertação.

RESUMO

Os raios cósmicos são influenciados por fenômenos solares, geomagnéticos e atmosféricos. Nesta dissertação são apresentados estudos realizados com dados coletados entre 2006 e 2011 pelo detector CARPET instalado nos Andes Argentinos. Foram estudadas as variações da contagem de raios cósmicos relacionadas à ocorrência de chuva, às mudanças de temperatura, de pressão e de campo elétrico atmosférico e a fenômenos solares e geomagnéticos. O estudo do efeito da temperatura na intensidade de raios cósmicos, e também a sua remoção, foi realizado através de 4 métodos: três experimentais e um baseado na teoria do decaimento de píons. O método da integral foi o que apresentou uma melhor remoção do efeito da temperatura na intensidade de raios cósmicos evidenciando a variação de contagem destas partículas relacionadas aos ciclos solares de 11 e 22 anos. As variações de 11 e 22 anos da intensidade de raios cósmicos foram analisadas através da comparação com o número de manchas solares, o fluxo na faixa do rádio e da intensidade de raios cósmicos observada pelo monitor de nêutrons de Moscou. A contagem de raios cósmicos registrada pelo CARPET apresentou uma boa correlação com o número de manchas solares e com a contagem registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou. A análise dos aumentos de curta duração na intensidade de raios cósmicos, registradas nos dois sinais de menor energia e ocorridas em períodos chuvosos mostrou que as mudanças no campo elétrico atmosférico apresentam uma grande influência nestes aumentos.

INFLUENCE OF SOLAR, GEOMAGNETIC AND ATMOSPHERIC ACTIVITIES IN COSMIC RAY INTENSITY MODULATION

ABSTRACT

Cosmic ray is influenced by solar, geomagnetic and atmospheric phenomena. In this Thesis are presented studies with the cosmic ray data regarded by the CARPET detector, which is installed in the Argentinean Andes, between 2006 and 2008. The variations in the cosmic ray count rate related to rain, temperature, atmospheric pressure and atmospheric electric field change, as well as solar and geomagnetic phenomena have been studied. The study and removal of the temperature effect on cosmic ray intensity was studied using four different methods: three empirical and the other based on pion decay. The integral method presented the best removal of the temperature effect, enhancing the 11 and 22-year solar cycle related variations. The 11-year and 22-year cosmic ray intensity variations were analyzed by comparing with the sunspot number and the Moscow neutron monitor count rate. The cosmic ray intensity regarded by CARPET presented a good correlation with both. The analysis of the short period increases of the cosmic ray count regarded by the lower energy channels of the CARPET during rainy periods indicated a strong influence of the atmospheric electric field in these increases.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Espectro de Energia dos Raios Cósmicos Galácticos.....	7
Figura 2.2 – Relação entre o número de manchas solares (linha pontilhada) e a ocorrência de eventos de raios cósmicos solares (linha contínua).....	9
Figura 2.3 – Fluxo integral de partículas em dois eventos de RCS.....	9
Figura 2.4 – Espectro de energia dos Raios Cósmicos Primários e do Vento Solar obtidos através de dados satélite ACE (Advanced Composition Explorer)	11
Figura 2.5 – Variação da intensidade de raios cósmicos em relação à latitude geomagnética observada em diferentes experimentos.....	12
Figura 2.6 – Linhas de isometria da Rigidez Geomagnética em todo o planeta Terra.	14
Figura 2.7 – Cones de Störmer para partículas carregadas com carga positiva (a) e negativa (b) de mesma rigidez magnética. Em ambos os casos, as direções AP são proibidas e as direções BP são permitidas. Para partículas positivas o cone aponta para leste, já para negativas o cone aponta para oeste.	15
Figura 2.8 – Esquema do Chuveiro de Raios Cósmicos produzido por uma partícula primária, ao entrar na atmosfera terrestre. Sendo: “n” os nêutrons, “p” os prótons, “e ⁻ ” os elétrons, “e ⁺ ” os pósitrons, “π” os píons, “μ” os múons e “γ” os fótons.....	16
Figura 2.9 – Curva de Pfozter, que mostra a variação da intensidade de raios cósmicos na atmosfera terrestre.....	18
Figura 2.10 – Variação do fluxo dos múons negativos e positivos (pontos verdes), dos pósitrons (sinal de “+”), dos elétrons (sinal de “-”) e dos prótons (losango azul) com a altitude calculada através de experimentos com balões.....	18
Figura 2.11 – Espectro de energia das partículas secundárias calculado através do modelo PARMA.	19
Figura 2.12 – Espalhamento das partículas de cada componente do chuveiro de raios cósmicos.....	20

Figura 3.1 – O detector de raios cósmicos CARPET.	22
Figura 3.2 – Detalhe de um bloco com 10 contadores do CARPET.	22
Figura 3.3 – Espectro de energia nas condições do local onde o CARPET está instalado. As duas primeiras linhas verticais indicam respectivamente o valor de menor energia de e^- e p^+ detectados nos sinais UP e LOW. E as duas últimas linhas verticais indicam respectivamente o valor da energia de corte dos e^- e p^+ do sinal TELESCOPE.	23
Figura 3.4 – Correlações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de pressão (ΔP).	26
Figura 3.5 – No gráfico superior: contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do detector CARPET no mês de Março de 2010. A curva vermelha representa a pressão atmosférica registrada no mesmo período e no gráfico inferior é mostrada a contagem corrigida pela pressão.	27
Figura 3.6 – Médias diárias da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE, da temperatura medida na superfície e da pressão atmosférica registradas entre Abril de 2006 e Janeiro de 2011. As curvas pontilhadas de cor vermelha, verde e azul representam respectivamente a média corrida de 30 dias da contagem de raios cósmicos, da temperatura e da pressão atmosférica.	28
Figura 3.7 – Anticorrelações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada, entre Abril de 2006 e Agosto de 2010, em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de temperatura registrada na superfície ($\Delta T(h_0)$).	31
Figura 3.8 – Correlações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de temperatura ($\Delta T(h_g)$) registrada na altitude de 16,5 km acima do nível do mar.	32
Figura 3.9 – Em preto, média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE observada entre Abril de 2006 e Agosto de 2010. Em vermelho, média mensal dos dados corrigidos através da temperatura	

observada na superfície (1º método) e em azul, média mensal dos dados corrigidos através da temperatura observada em 16,5 km de altitude (2º método).	33
Figura 3.10 – Em preto é mostrada a média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TESLECOPE observada entre Abril de 2006 e Agosto de 2010 e em verde é mostrada a média mensal dos dados corrigidos através do 3º método.	34
Figura 3.11 – Em preto é representada a média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TESLECOPE entre Abril de 2006 e Agosto de 2010 e em rosa é representada a média mensal dos dados corrigidos através do 4º método.	37
Figura 3.12 – Média corrida de 13 meses das médias mensais da contagem de raios cósmicos sem correção por temperatura (preto), corrigida pela temperatura na superfície (vermelho), pela temperatura na altura de maior produção de partículas secundárias (azul), pela temperatura na superfície e na de maior produção de partículas (verde), e pela integral das temperaturas observadas ao longo da atmosfera (rosa). Os pontos com forma de losângulo representam a média corrida das médias mensais da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou. Os dados exibidos entre Abril de 2006 e Julho de 2010.	38
Figura 3.13 – O monitor de Campo Elétrico EFM-100.	39
Figura 3.14 – Acima: intensificação do campo elétrico atmosférico no sentido voltado para o chão. Abaixo: representação gráfica dos dados do EFM-100 coletados esta situação.	40
Figura 3.15 – Acima: troca de sentido do campo elétrico atmosférico. Abaixo: representação gráfica dos dados do EFM-100 coletados durante esta situação.	41
Figura 3.16 – Concentração das linhas de campo elétrico atmosférico na região pontiaguda gerada devido ao monitor de campo estar acima do nível do solo.	42

Figura 3.17 – Esquema da instalação ideal do monitor de campo elétrico atmosférico, sem regiões de ponta e concentração de linhas de campo.	43
Figura 3.18 – Comparação entre os dados dos dois monitores de campo elétrico. Em vermelho dados do EFM mais antigo e com atenuador e em azul dados do EFM mais novo e sem atenuador.....	44
Figura 4.1 – A: Linha Espirais vistas por um observador no plano da elíptica do campo magnético solar ao longo do meio interplanetário. Concepção artística da visão em três dimensões da lâmina de corrente.....	49
Figura 4.2 – Variação da velocidade angular de rotação do Sol (em nHz e em dias) calculada através dos dados obtidos pelo sistema GONG (Global Oscillation Network Group).	50
Figura 4.3 – Intensidade do campo magnético solar (medida em Gauss) em função da latitude entre os anos de 1975 e Março de 2011.....	50
Figura 4.4 – Média mensal do número de machas solares observadas entre os anos de 1850 e 2011.....	52
Figura 4.5 – Variação da irradiância diária (curva laranja) e anual (curva vermelha), fluxo em rádio (curva roxa), do número de manchas (curva azul) e do Solar Flare Index – índice de explosões solares (curva verde).....	52
Figura 4.6 – De cima a baixo, média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre setembro e dezembro de 2008 e janeiro de 2009.....	53
Figura 4.7 – De cima a baixo, média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre março e julho de 2009.....	54
Figura 4.8 – Contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE (em preto) entre os dias 18 e 23 de fevereiro de 2010 e o valor do campo elétrico atmosférico (em vermelho) observado pelo EFM-100, no mesmo período. Os dados são mostrados em horário universal (UT).....	56
Figura 4.9 – Aumento da contagem de diversos monitores de nêutrons ocorrida no dia 13 de Dezembro de 2006.	57
Figura 4.10 – No quadro inferior: Variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos sinais UP (linha azul), LOW (linha verde) e	

TELESCOPE (linha preta) entre os dias 06 e 11 de Dezembro de 2006. No quadro superior: Fluxo de raios-X (linha vermelha) e de prótons (linha preta) com energia superior a 100 MeV emitido pelo Sol. Os dados sobre a contagem de raios cósmicos são corrigidos pela pressão e pela temperatura. 58

Figura 4.11 – De cima para baixo: variação relativa da média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do CARPET corrigida pelos efeitos da temperatura e pressão atmosférica; variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou; índices Dst em preto e Kp em vermelho; componente sul do campo magnético interplanetário (Bz) em preto e velocidade do vento solar em vermelho, e por último, densidade de prótons e temperatura do vento solar em preto e em vermelho, respectivamente. Dados entre 03 e 14 de Abril de 2010..... 61

Figura 4.12 – De cima para baixo: variação relativa da média horária da contagem de partículas cósmicas registrada pelo sinal TELESCOPE; variação relativa da contagem de raios cósmicos observada pelo monitor de nêutrons de Moscou; índices Dst em preto e Kp em vermelho; componente sul do campo magnético interplanetário (Bz) em preto e velocidade do vento solar em vermelho, e por último, densidade de prótons em preto e temperatura do vento solar em vermelho. Dados mostrados entre 01 e 11 de Setembro de 2008..... 62

Figura 4.13 – Média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou em preto e, em vermelho, média mensal do número de manchas solares observado pelo SWPC-SWO (Space Weather Prediction Center - Space Weather Operations). 64

Figura 4.14 – No quadro superior é mostrada a média corrida de 12 meses da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre 2006 e 2011. No quadro inferior é mostrada em preto a média mensal do número de manchas solares observado pelo SWPC-SWO e em vermelho o fluxo solar na faixa do rádio (10,7 cm de comprimento de onda)..... 66

- Figura 4.15 – Correlação entre a média corrida de 1 ano do número médio mensal de manchas solares e da variação relativa da contagem de raios cósmicos no período de diminuição da atividade solar (em vermelho) e de aumento (em azul). 66
- Figura 4.16 – Média mensal da contagem de partículas registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou (curva preta) entre 1958 e 2011, e a média corrida de 12 meses da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do CARPET (curva vermelha) desde seu início de funcionamento até Janeiro de 2011..... 67
- Figura 4.17 – Média horária da contagem de raios cósmicos registrada no sinal UP e medida de chuva em milímetros registrados no mês de Outubro de 2008. 69
- Figura 4.18 – Variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos sinais UP (azul), LOW (verde) e TELESCOPE (preto) entre às 18 UT do dia 21/01/2006 e às 06 UT do dia 22/01/2006. Os histogramas de cor cinza no quadro inferior representam o índice de chuvas registrado a cada meia hora. 69
- Figura 4.19 – Exemplo de um evento simples (apenas um pico) relacionado à ocorrência de chuva. A área de cor cinza representa a grandeza denominada de A_c . No gráfico são mostrados os dados observados entre 24/01 as 16:00 UT e 25/01 as 04:00 UT do ano de 2007. 71
- Figura 4.20 – Tendências encontradas entre a integral da contagem de raios cósmicos entre o início e o pico do evento (A_c) e o acúmulo de chuvas ocorrido no mesmo período..... 72
- Figura 4.21 – Contagem registrada pelos sinais UP, LOW e TELESCOPE do CARPET entre o dia 11/08/2008 às 16:00 UT e o dia 12/08/2008 às 12:00 UT, período em que não foi registrada a ocorrência de chuva, apenas variações do campo elétrico atmosférico (curva vermelha no quadro inferior). 73
- Figura 4.22 – Variação da contagem registrada nos três sinais do CARPET durante um período de ocorrência de chuva (histograma cinza) e de variações no

	campo elétrico atmosférico (curva em vermelho). Dados mostrados entre os dias 10/03/2008 às 00 UT e 11/03/2008 às 12 UT.....	74
Figura 4.23 –	As linhas curvas vermelhas representam os valores de campo elétrico atmosférico registrados no mesmo período. O quadro “A” apresenta os dados observados entre o dia 14/01/2010 às 18:00 UT e o dia 15/01/2010 às 01 UT, o Quadro “B” apresenta os dados observados no dia 25/01/2010 entre 12 e 22 UT.	74
Figura 4.2 –	Esquema do circuito elétrico global. As setas indicam a direção da corrente elétrica.....	77
Figura 4.25 –	Variação da contagem registrada nos três sinais do CARPET durante um período de ocorrência de chuva (histograma cinza) e de rápidas e intensas variações no campo elétrico atmosférico (curva em vermelho). Dados mostrados entre os dias 10/03/2010 às 17 UT e 24/01/2010 às 02 UT....	79
Figura 4.26 –	No quadro superior: Intensidade relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET entre 16 e 22 UT do dia 20/12/2010. No quadro inferior, intensidade de chuva e valor do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período.....	81
Figura 4.27 –	No quadro superior: Intensidade relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET entre 12 e 21 UT do dia 22/11/2010. No quadro inferior, intensidade de chuva e valor do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período.....	82
Figura 4.28 –	De cima para baixo é mostrada a média corrida de 15 minutos da contagem e raios cósmicos registrada pelo sinal UP entre 19 e 23 UT do dia 11/08/2010, a média de 1 minuto do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período e o gráfico correlacionando estes dois parâmetros ponto a ponto.....	83
Figura 4.29 –	Correlação, entre a variação do campo elétrico atmosférico e o aumento na intensidade de raios cósmicos, obtida através dos dados referentes ao evento mostrado na Figura 4.28.....	84
Figura 4.30 –	Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 25/03/2009.....	85

Figura 4.31 – Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 25/03/2009.	86
Figura 4.32 – Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 13/10/2010.	86

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Coeficientes λ encontrados para cada altura estudada no 4º método.	35
Tabela 4.1 – Variações na intensidade de raios cósmicos de origem terrestre.	45
Tabela 4.2 – Variações na intensidade de raios cósmicos de origem extraterrestre.	46
Tabela 4.3 – Decréscimos na contagem de raios cósmicos registrados próximos a inícios súbitos de tempestades geomagnéticas.....	62
Tabela 4.4 – Aumentos da contagem de raios cósmicos ocorridos próximos a inícios súbitos de tempestades geomagnéticas	63
Tabela 4.3 – Distribuição das chuvas, mudanças no campo elétrico atmosférico e variações na contagem de raios cósmicos entre Fevereiro de 2008 e Janeiro de 2011.	80

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 RAIOS CÓSMICOS	3
2.1 Raios Cósmicos Primários (RC-I).....	5
2.1.1 Raios Cósmicos Galácticos (RCG).....	6
2.1.2 Raios Cósmicos Solares (RCS)	7
2.1.3 Raios Cósmicos Anômalos (RCA).....	10
2.2 Rigidez Geomagnética: interação dos RC com o campo geomagnético	11
2.3 Raios Cósmicos Secundários: Chuveiro de Raios Cósmicos	15
3 INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS DADOS	21
3.1 O detector de raios cósmicos CARPET	21
3.1.1 Estudo e Correção do Efeito Barométrico	24
3.1.2 Estudo e Correção do Efeito da Temperatura.....	28
3.2 O monitor de campo elétrico EFM-100.....	39
4 ESTUDO DAS VARIAÇÕES DA INTENSIDADE DE RAIOS CÓSMICOS NA SUPERFÍCIE TERRESTRE	45
4.1 Variações relacionadas a fenômenos solares e do meio interplanetário.....	47
4.1.1 O Sol.....	47
4.1.2 Variação diurna dos raios cósmicos	53
4.1.3 Aumentos relacionados com as explosões solares.....	56
4.1.4 Variações durante tempestades geomagnéticas relacionadas a fenômenos transientes solares	59
4.1.5 Variações relacionadas aos ciclos de 11 e 22 anos da atividade e do campo magnético solar	63
4.2 Variações relacionadas à ocorrência de chuva e as mudanças no campo elétrico atmosférico.....	68
4.2.1 O campo elétrico atmosférico.....	75
4.2.2 Influências do campo elétrico atmosférico nas variações de curta duração da contagem de raios cósmicos.....	78
5 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Os raios cósmicos são partículas carregadas, na sua maioria prótons, de altas energias, cuja principal origem ainda não é conhecida. Acredita-se que as partículas cósmicas podem influenciar diversos fenômenos atmosféricos, afetando inclusive os processos climáticos de nosso planeta (BAZILEVSKAYA et al, 2000). Há também indícios de que mudanças no fluxo de partículas cósmicas incidentes em nosso planeta possam influenciar o ciclo de vida e extinção de algumas espécies (MEDVEDEV; MELOTT, 2007).

Sabe-se que os fenômenos solares, interplanetários, geomagnéticos e atmosféricos podem afetar a intensidade de raios cósmicos observada por detectores na superfície terrestre (STOZHKOV et al, 2001). Assim, é de essencial importância para o entendimento das influências dos raios cósmicos no meio ambiente terrestre o pleno conhecimento das suas variações de intensidade relacionadas a estes fenômenos.

Esta dissertação tem como objetivo principal o estudo da modulação da intensidade de raios cósmicos registrada pelo detector CARPET ($R_c = 12$ GV, $69,3^\circ$ O $31,8^\circ$ S) em diferentes escalas de tempo, associadas à atividade solar e aos fenômenos geomagnéticos e atmosféricos.

Primeiramente, no Capítulo 2, são abordados os aspectos gerais dos raios cósmicos. São apresentados um breve histórico sobre seu descobrimento, a classificação de acordo com a sua origem, a interação das partículas cósmicas com o campo geomagnético e as principais características do chuva de partículas que eles formam durante o impacto com a atmosfera terrestre. Em seguida, no Capítulo 3, são apresentados os principais instrumentos utilizados para a realização deste trabalho: o detector de raios cósmicos CARPET e o monitor de campo elétrico atmosférico EFM-100. Também é tratada neste capítulo, a correção pela pressão atmosférica e o estudo sobre a melhor metodologia para a redução do efeito da temperatura atmosférica na intensidade de raios cósmicos registrada pelo CARPET.

No Capítulo 4, são analisadas as diferentes variações da intensidade de raios cósmicos observadas pelo CARPET: as variações periódicas de longa duração relacionadas aos ciclos do número de manchas solares e inversão de polaridade do campo magnético solar; a variação periódica relacionada à trajetória das partículas cósmicas no meio interplanetário e ao movimento de rotação da Terra; as variações transientes associadas às tempestades geomagnéticas relacionadas a fenômenos solares; e as variações transientes de curta duração, relacionadas à ocorrência de chuva e a variações no campo elétrico atmosférico.

Por último, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e as conclusões resultantes das diferentes análises e estudos realizados nesta Dissertação de Mestrado.

2 RAIOS CÓSMICOS

Os raios cósmicos são partículas carregadas, geralmente prótons ou partículas alfa, de altas energias ($> 1 \text{ MeV}$) que chegam à Terra constantemente, vindos de todas as direções com fluxo de aproximadamente 10^{18} partículas por metro quadrado por segundo. O fluxo de raios cósmicos visto sem qualquer tipo de influência é constante e isotrópico; no entanto, devido às interações destas partículas com campos magnéticos, fenômenos e processos ocorridos no exterior e interior da heliosfera, na magnetosfera e atmosfera terrestre, ele apresenta variações temporais e espaciais (OTAOLA; VALDÉS-GALICIA, 1992).

Os estudos envolvendo os raios cósmicos começaram nas últimas décadas do século XIX, logo após o início das pesquisas envolvendo os decaimentos radioativos. Naquela época, descobriu-se que eletroscópios carregados eletricamente deixados a céu aberto descarregavam-se gradualmente, independentemente do tipo de gás utilizado em seu interior e de seu isolamento em relação ao meio externo. Após a comprovação do fato de que este descarregamento não estava relacionado à efeitos instrumentais, chegou-se à conclusão de que ele era, então, relacionado a alguma radiação proveniente de uma fonte externa. Assim, iniciou-se uma busca por uma fonte natural de radiação com um significativo poder de penetração capaz de passar pelo isolamento do eletroscópio e descarregá-lo.

Uma das primeiras hipóteses apresentadas apontava uma radiação proveniente do Sol como causadora deste fenômeno, mas que foi logo descartada ao se verificar que a descarga ocorria tanto de noite quanto de dia. Posteriormente, após a descoberta da emissão de radiação pelo solo, previu-se que esta radiação era a causadora dos descarregamentos e que, com isso, a taxa de descarregamento seria inversamente proporcional à distância, a partir do solo até o ponto onde o eletroscópio se encontrasse. No entanto, experimentos com balões mostraram que para altitudes menores que 1,5 km, a variação da taxa de descarga não era significativa, enquanto que para alturas maiores, ocorria um aumento desta taxa, e não a diminuição conforme era esperada. Desta forma, chegou-se à conclusão de que a radiação geradora da descarga deveria ser

proveniente do espaço ou de algum fenômeno que liberasse radiação na atmosfera (OTAOLA; VALDÉS-GALICIA, 1992).

A partir de 1920, iniciaram-se os experimentos com o intuito de verificar o poder de penetração desta radiação responsável pela descarga dos eletroscópios. Para isso, realizaram-se experiências onde foram submersas estruturas contendo um eletroscópio carregado e completamente isolado em lagos profundos localizados em grandes altitudes. Como a descarga ainda continuava a existir em grandes profundidades, observou-se que esta radiação deveria ter um grande poder de penetração.

Como era conhecido que a atmosfera terrestre não era capaz de produzir radiações com grande capacidade de penetração, a hipótese de a radiação causadora da descarga ser de origem extraterrestre se fortaleceu, porém, a hipótese da fonte ser a atmosfera não deixou de ser considerada. Só em 1925, o físico austríaco Victor F. Hess (1883 – 1964), através de seus estudos, concluiu que o descarregamento dos eletroscópios era devido a uma radiação, até então desconhecida, proveniente do espaço dando-lhe o nome de “Radiação Cósmica”, o que lhe rendeu um Prêmio Nobel anos mais tarde, em 1936.

Acreditava-se que esta radiação cósmica era composta por ondas eletromagnéticas. Isso ocorreu principalmente pelo fato de nas observações do físico americano Robert A. Millikan (1868 – 1953), ela não apresentar variações significativas com a mudança de latitude no globo terrestre, não havendo assim, uma interação desta radiação com o campo geomagnético, indicando que ela não podia ser composta por partículas carregadas. No entanto, em 1930, através de um experimento envolvendo cerca de 80 instituições e 69 postos de observação, o físico Arthur H. Compton (1892 – 1962) mostrou a existência do efeito latitudinal da radiação cósmica, o que comprovava sua interação com o campo magnético da Terra e, assim, que os raios cósmicos na verdade eram partículas carregadas.

Com isto, em meados de 1930, as pesquisas envolvendo os raios cósmicos chegaram à maturidade, havendo um grande interesse por parte dos pesquisadores por este tema. Tanto que o número de trabalhos científicos sobre este assunto que no início do século XX não passava de 10, chegou à casa dos 200 por ano entre 1933 e 1936. E até os dias

de hoje, os fenômenos envolvendo raios cósmicos continuam sendo estudados (OTAOLA; VALDÉS-GALICIA, 1992).

Os estudos envolvendo os raios cósmicos levaram a comprovações de teorias da eletrodinâmica quântica e ao descobrimento de algumas partículas elementares e de fenômenos relacionados à atividade geomagnética da Terra e sua relação com a atividade solar. Atualmente os estudos sobre os raios cósmicos se concentram na busca de sua fonte aceleradora, na forma como eles se propagam pelo universo, na nossa galáxia e no meio interplanetário, na forma com a qual interagem com o campo geomagnético e na análise da sua influência em alguns fenômenos ligados aos processos atmosféricos de nosso planeta.

Para fins didáticos os raios cósmicos costumam ser classificados em primários e secundários (DORMAN, 2004).

2.1 Raios Cósmicos Primários (RC-I)

São classificados como RC-I todos os raios cósmicos que não tiveram interação com a atmosfera terrestre, ou seja, todos aqueles que se encontram fora do Planeta Terra.

De acordo com a sua origem e a sua energia os RC-I podem ser separados em três tipos principais: Raios Cósmicos Galácticos (RCG), Raios Cósmicos Solares (RCS) e Raios Cósmicos Anômalos (RCA). Além destes também há os: Raios Cósmicos Extragalácticos, que possuem uma energia extremamente elevada ($> 10^{21}$ eV), porém um fluxo extremamente baixo, sendo, provavelmente, originados em rádio-galáxias ou em quasares; e os Raios Cósmicos Planetários ou Magnetosféricos, que são gerados pela aceleração de partículas carregadas em magnetosferas planetárias e possuem energia diferente conforme o planeta (magnetosfera) em que se localizam, por exemplo, em Júpiter e Saturno possuem energia superior a 10 MeV, enquanto na Terra essa energia diminui para 30 keV (DORMAN, 2004).

2.1.1 Raios C3smicos Gal3cticos (RCG)

Os Raios C3smicos Gal3cticos s3o compostos na sua grande maioria de pr3tons (~90%), mas tamb3m s3o encontradas part3culas alfa (~6-9%) e, numa escala extremamente pequena, n3cleos de 3tomos mais pesados. A principal caracter3stica do fluxo de raios c3smicos gal3cticos 3 sua isotropia, ou seja, o fato deles possu3rem propriedades independentes da dire33o e sentidos considerados.

Acredita-se que os RCG s3o formados pela acelera33o de 3tomos que durante sua viagem pelo universo sofreram uma perda de el3trons. Isso explicaria o fato os RCG serem compostos praticamente por n3cleos at3micos.

A origem dos RCG ainda 3 desconhecida, por3m existem algumas teorias que tentam prever como e onde estas part3culas seriam aceleradas. Uma das primeiras teorias foi sugerida pelo f3sico italiano Enrico Fermi (1901 – 1954) e diz que as part3culas seriam aceleradas em est3gios atrav3s de intera33es com o campo magn3tico do meio em que est3o se propagando, semelhantemente ao processo ocorrido em um acelerador de part3culas. Atualmente, a teoria mais aceita considera que as part3culas c3smicas s3o aceleradas em explos3es ocorridas em supernovas ou em estrelas de n3utrons.

Apesar de algumas das caracter3sticas dos raios c3smicos gal3cticos serem desconhecidas, seu espectro de energia 3 conhecido, como mostra a Figura 2.1, sendo que grande parte das informa33es sobre os RCG s3o obtidas atrav3s de estudos deste espectro.

Na Figura 2.1, pode-se observar que o fluxo de raios c3smicos gal3cticos apresenta um m3ximo na faixa de energia entre 10^8 eV e 10^9 eV e decai para energias no intervalo entre 10^{10} eV e 10^{20} eV. Por3m, na faixa em torno de 10^{15} eV, existe uma diferen3a entre os dados medidos (em vermelho) e a curva (em verde) obtida atrav3s de um ajuste de dados. Acredita-se que esta discrep3ncia, tamb3m denominada de “joelho” do espectro, esteja ligada 3 forma de acelera33o dos raios c3smicos gal3cticos. As part3culas com energias superiores ao “joelho” seriam aceleradas de forma diferente das part3culas com energias abaixo dele.

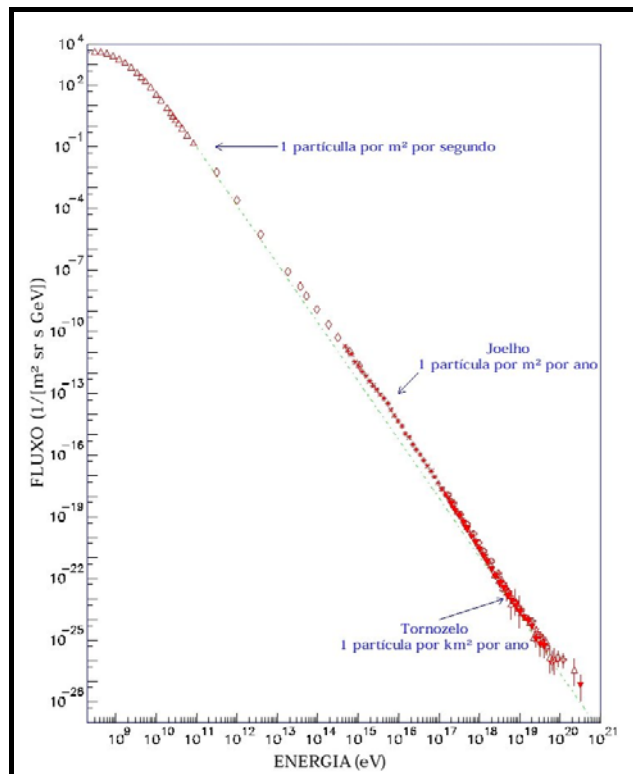


Figura 2.1 – Espectro de Energia dos Raios Cósmicos Galácticos.

Fonte: Modificado de <http://astroparticle.uchicago.edu> (2010).

A teoria da aceleração dos raios cósmicos oriundos de supernovas e estrelas de nêutrons, mostra que uma destas estruturas só é capaz de fornecer energia necessária para a aceleração das partículas com energias abaixo de 10^{15} eV. Mas, os sistemas binários, como Cygnus X-3, seriam capazes de acelerar partículas com energias superiores a este valor. Assim, no espectro da Figura 2.1, o fluxo de partículas de menor energia localizado à esquerda do “joelho” seria produzido pelas supernovas ou estrelas de nêutrons, enquanto que o fluxo de partículas com maior energia, à direita do “joelho”, seria correspondente às partículas aceleradas em sistemas binários. Acredita-se que as partículas com energias extremamente altas localizadas à direita da região denominada de “tornozelo” no espectro de energia representado na Figura 2.1, tenham uma origem extragaláctica (MURSULA; USOSKIN, 2003).

2.1.2 Raios Cósmicos Solares (RCS)

Os Raios Cósmicos Solares são partículas de alta energia provenientes do Sol. Eles são compostos principalmente por prótons, partículas alfa, elétrons e, em uma proporção

muito pequena, por núcleos de átomos mais pesados que o hélio. Nem toda partícula expelida pelo Sol é denominada de RCS, somente aquelas com grandes energias recebem esta denominação.

As primeiras detecções de Raios Cósmicos Solares foram realizadas em meados do século XX, quando foram observados os primeiros aumentos de curta duração na intensidade dos raios cósmicos relacionados à atividade solar. Neste mesmo período se iniciou a medição de forma rotineira da intensidade de raios cósmicos na superfície terrestre.

Acredita-se que as explosões solares sejam as principais fontes dos Raios Cósmicos Solares. Há a possibilidade que aceleração destas partículas ocorra no processo de reconexão de campos magnéticos na atmosfera solar. Além desta possibilidade, existem três teorias principais que descrevem o processo de aceleração de partículas carregadas durante uma explosão solar: (I) Aceleração de Fermi, onde uma partícula pode ganhar ou perder energia num curto período de tempo através de interações com o campo magnético do plasma em que se desloca; (II) Aceleração por choque, onde as partículas são aceleradas através de interações com a onda de choque entre o plasma solar e o meio interplanetário; (III) Aceleração Coerente, onde a aceleração se dá através da interação com o campo elétrico solar (MIROSHNICHENKO, 2001).

Desde a segunda metade do século XX, também foi observado que, para energias não muito altas (na faixa dos MeV), as ejeções de massa ocorridas no Sol ao transitar no meio interplanetário (ICME – Interplanetary Coronal Mass Ejection) também podem ser fontes de raios cósmicos solares. A aceleração de partículas nas ICMEs ocorreria através da interação entre as partículas carregadas e a onda de choque produzida entre ela e o meio interplanetário (MIROSHNICHENKO, 2001).

Ao contrário dos raios cósmicos galácticos, os RCS não são detectados constantemente, ou seja, ocorrem de forma transiente e não possuem isotropia espacial, uma vez que são provenientes de eventos esporádicos ocorridos em uma fonte localizada no espaço (no caso, o Sol). Sua ocorrência está relacionada com a atividade solar, como indica a Figura 2.2, onde é possível se observar que o maior número de emissão de partículas de

altas energias pelo Sol ocorre próximo ao período que antecede e precede a máxima atividade solar (alto número de manchas solares).

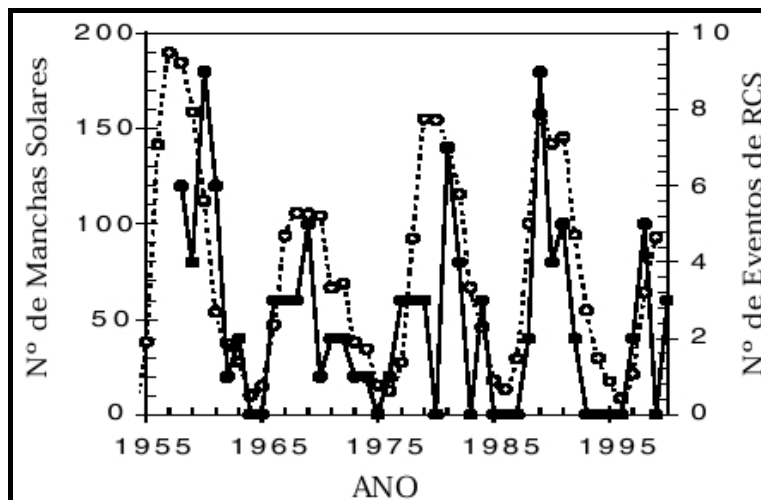


Figura 2.2 – Relação entre o número de manchas solares (linha pontilhada) e a ocorrência de eventos de raios cósmicos solares (linha contínua).
Fonte: Modificado de Stozhkov et al (2001).

Na Figura 2.2, é mostrado o número de manchas solares (linha pontilhada) observadas entre 1955 e 2001 e o número de eventos com registro de raios cósmicos solares no mesmo período (linha contínua). Durante este período foram medidos 105 eventos, que ocorreram principalmente durante o aumento e a redução do número de manchas solares.

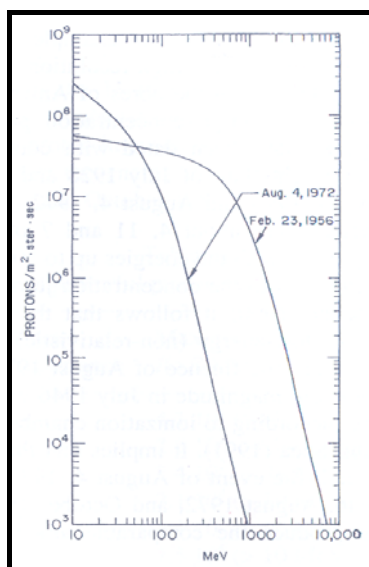


Figura 2.3 – Fluxo integral de partículas em dois eventos de RCS.
Fonte: Miroshnichenko (2001).

O espectro de energia dos raios cósmicos solares, assim como sua composição, apresenta alterações entre uma ocorrência e outra. Por exemplo, na Figura 2.3 é mostrada a diferença no espectro de energia de dois eventos: um ocorrido em 23 de fevereiro de 1956, que apresentou um fluxo maior e mais energético que o outro evento ocorrido em 4 de agosto de 1972.

Como se pode observar na Figura 2.4, os RCS são menos energéticos que os raios cósmicos galácticos, mas em contrapartida, apresentam um fluxo maior.

2.1.3 Raios Cósmicos Anômalos (RCA)

Os raios cósmicos anômalos são formados através da interação entre o gás interestelar neutro, o vento solar e a onda de choque existente na região da heliopausa. O gás interestelar neutro, ao entrar na heliosfera, não é repelido pelo campo magnético solar. Os átomos deste gás com um alto potencial de ionização, como hélio, oxigênio e neônio, ao se aproximarem do Sol (região entre 1 a 3 AU) são ionizados, liberando elétrons na colisão com prótons presentes no vento solar ou pelo processo de foto-ionização devido à radiação ultravioleta solar (MURSULA; USOSKIN 2003).

Estes átomos ionizados são carregados pelo campo magnético interplanetário fluindo no mesmo sentido do vento solar. Ao se aproximarem da heliopausa, estas partículas passam a interagir com a onda de choque formada pela interação do meio interplanetário com o meio interestelar, ganhando energia neste processo. Elas ficam aprisionadas nesta região até possuírem uma energia suficiente para escapar e difundir-se na heliosfera. Este processo de aceleração dos raios cósmicos anômalos não é muito conhecido, mas sabe-se que ele não é capaz de fornecer tanta energia como o processo de aceleração dos raios cósmicos galácticos, por exemplo.

A diferença entre a variação do fluxo de raios cósmicos anômalos em função da energia comparada com outros tipos de raios cósmicos primários e com o vento solar pode ser observada na Figura 2.4. Nesta figura é clara a diferença de energia entre os RCA e os RCG, assim como o menor fluxo de raios cósmicos anômalos em relação aos raios cósmicos solares em uma mesma faixa de energia.

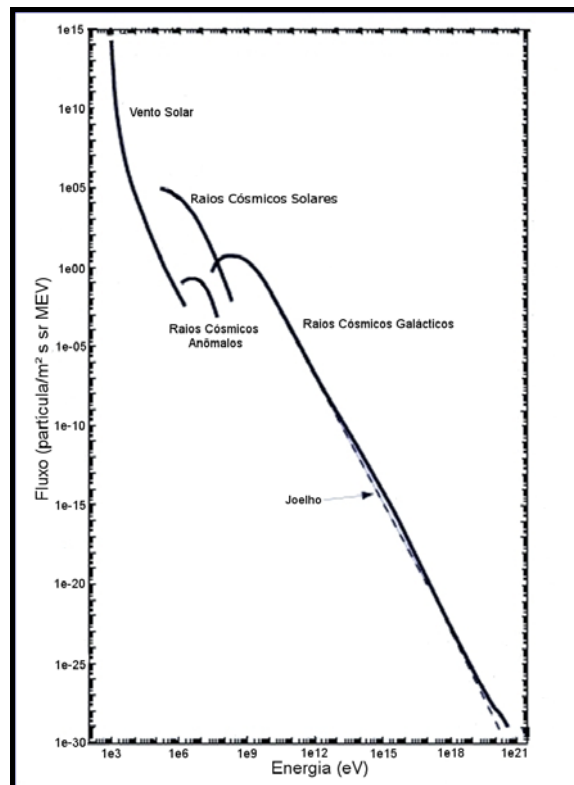


Figura 2.4 – Espectro de energia dos Raios Cósmicos Primários e do Vento Solar obtidos através de dados satélite ACE (Advanced Composition Explorer).
 Fonte: Modificado de www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_SIS (2011).

2.2 Rigidez Geomagnética: interação dos RC com o campo geomagnético

Os raios cósmicos, por serem partículas carregadas, ao se aproximarem da Terra, interagem com o campo geomagnético. De forma simplista, este campo pode ser descrito como um escudo que dificulta a entrada das partículas cósmicas na atmosfera terrestre. Assim, onde a componente do campo magnético responsável pelo desvio dos raios cósmicos for menor, será medida uma maior intensidade de raios cósmicos secundários do que em outros pontos onde ela apresentar um valor maior.

A Figura 2.5 mostra a variação da intensidade de raios cósmicos secundários medida por monitores de nêutrons ao longo de um mesmo meridiano correlacionada à posição dada em relação aos pólos norte e sul magnéticos da Terra (latitude geomagnética). Nesta figura é possível se observar que a intensidade de raios cósmicos é mínima no equador magnético, enquanto que nos pólos ela apresenta seu maior valor. A maior intensidade nas regiões polares ocorre pelo fato de o campo magnético terrestre não

apresentar influência sobre as partículas que incidem verticalmente sobre essas regiões (ZIEGLER, 1998).

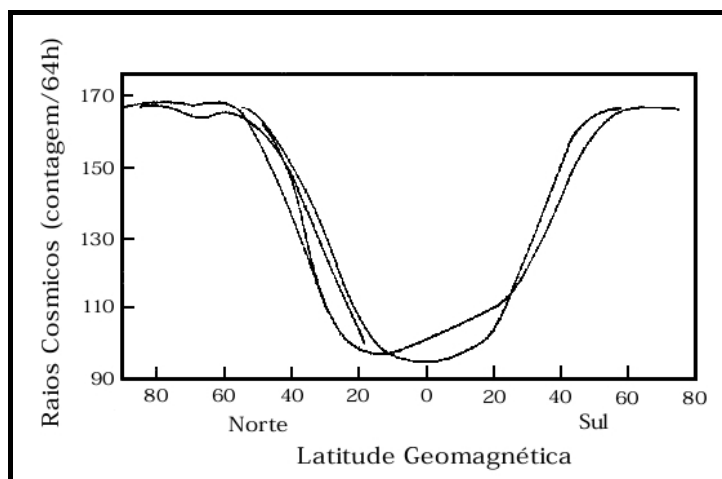


Figura 2.5 – Variação da intensidade de raios cósmicos em relação à latitude geomagnética observada em diferentes experimentos.
 Fonte: Modificado de Ziegler (1996).

A grandeza física que descreve a capacidade que uma partícula carregada tem de ficar aprisionada, ou não, em torno de uma linha de campo é denominada rigidez magnética. Quanto maior a componente perpendicular do momento de uma partícula ao campo magnético, maior a resistência que esta possui de ser defletida por um campo magnético.

Assim, a rigidez magnética de uma partícula de alta energia é mostrada na Equação 2.1. Nesta equação é possível se notar que o produto entre o momento da partícula e a velocidade da luz possui dimensão de energia, que dividido pela carga da partícula resulta em dimensão de potencial elétrico. Mais precisamente a rigidez costuma ser apresentada em volts e é numericamente igual à menor energia que uma partícula deve ter para não ser aprisionada por um campo magnético (ROSSI, 1964).

$$R = \frac{p_{\perp} \cdot c}{Z \cdot e} \quad (2.1)$$

sendo: R a rigidez magnética, p_{\perp} a componente do momento linear da partícula perpendicular ao campo magnético do meio em que ela se encontra, c a velocidade da luz, Z o número atômico da partícula, e a carga do elétron.

Para se calcular a rigidez magnética de corte de um dado local em nosso planeta, que representa o menor valor de rigidez que uma partícula deve possuir para incidir neste local, costuma-se considerar, além da relação com o campo geomagnético, os processos ocorridos pela passagem desta partícula na atmosfera. Desta forma a rigidez geomagnética é definida como a menor energia que um próton primário (RCP) incidindo em um dado local na atmosfera terrestre através de uma trajetória, geralmente vertical, deve possuir para que os raios cósmicos secundários provenientes de sua interação com a atmosfera possam ser observados em determinada altitude, geralmente no nível do mar (ZIEGLER, 1996).

Por exemplo, se a rigidez geomagnética for de 1 GV numa certa região, os raios cósmicos primários que incidem verticalmente sobre esta região devem possuir uma energia mínima de 1 GeV para que um detector de raios cósmicos instalado no nível do mar apresente uma resposta significativa. Caso a partícula incidente não possua uma trajetória vertical, sua energia deverá ser maior do que se estivesse na direção vertical para que ocorra a detecção no nível do mar.

A rigidez geomagnética também pode ser descrita somente em relação à latitude geográfica, sendo chamada de Efeito Latitudinal. No entanto, a determinação da variação da rigidez geomagnética com a latitude só pode ser realizada de maneira simplificada, uma vez que o campo magnético da Terra não possui uma simetria longitudinal.

A Figura 2.6 mostra a variação das linhas de isometria da rigidez geomagnética em diferentes pontos do planeta Terra, expondo as suas linhas de isometria, ou seja, as linhas sobre os locais onde a rigidez geomagnética é a mesma. Nesta figura pode-se observar que a região de maior rigidez geomagnética encontra-se sobre o Oceano Índico próximo ao continente asiático, estendendo-se pelo sul da Índia e o sudeste da Ásia.

Para fins práticos, algumas vezes, costuma-se descrever a rigidez geomagnética incluindo-se a altitude de um dado local, ou seja, costuma-se apresentar os valores da rigidez magnética em relação à detecção ser realizada na altura onde o detector se encontra e não em relação ao nível do mar.

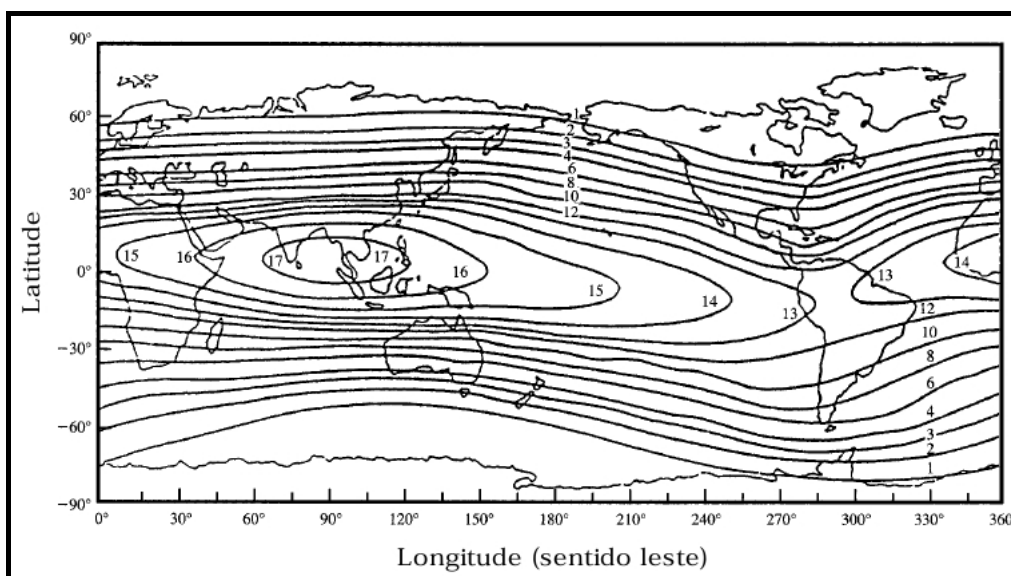


Figura 2.6 – Linhas de isometria da Rigidez Geomagnética em todo o planeta Terra.
 Fonte: Modificado de Ziegler (1998).

Caso uma partícula cósmica tenha energia suficiente para não ser refletida pelo campo geomagnético, a determinação de sua trajetória após sua interação com o campo é relativamente complexa.

Para se estudar a trajetória de uma partícula deste o topo da atmosfera até um detector localizado na superfície terrestre, sob a influência do campo geomagnético, costuma-se estudar a trajetória de uma partícula equivalente, porém com carga oposta, e liberada junto ao detector. As trajetórias descritas por esta partícula são idênticas a trajetória descrita pela partícula equivalente, porém com sentido oposto. Caso esta partícula consiga ultrapassar a fronteira do campo geomagnético, diz-se que a trajetória da partícula equivalente é permitida, ou seja, ela consegue chegar ao detector por esta trajetória. Caso a partícula liberada próximo ao detector regresse à superfície, se diz que a trajetória de sua partícula equivalente é proibida (LIN et al, 1995).

Conforme os estudos de Störmer para cada ponto da superfície da Terra e para cada grupo de partículas positivas de uma mesma energia há um cone (o chamado cone de Störmer) de direções proibidas, cujo eixo aponta para leste. Este estudo também prevê um cone similar, porém com eixo apontando para oeste, no caso de partículas com carga negativa, conforme mostra a Figura 2.7. Esta assimetria ficou conhecida como efeito leste-oeste.

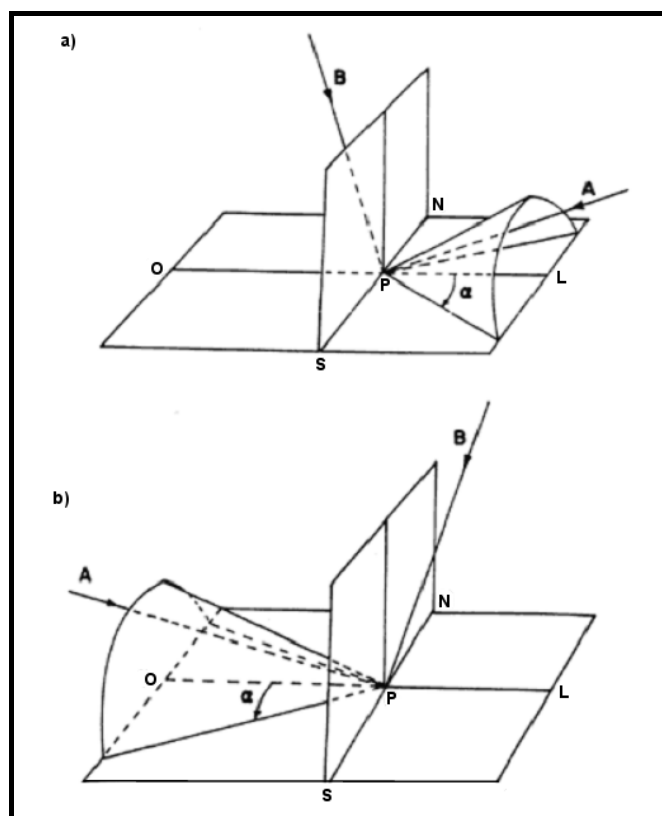


Figura 2.7 – Cones de Störmer para partículas carregadas com carga positiva (a) e negativa (b) de mesma rigidez magnética. Em ambos os casos, as direções AP são proibidas e as direções BP são permitidas. Para partículas positivas o cone aponta para leste, já para negativas o cone aponta para oeste.
 Fonte: Modificado de Otaola & Valdés-Galicia (1992).

Quando os estudos de Störmer foram realizados, ainda não se conhecia completamente a natureza dos raios cósmicos primários que incidiam sobre a Terra. Sabia-se que eles se tratavam de partículas carregadas, mas não se sabia se sua carga era positiva ou negativa. Com os estudos de Störmer, teve início uma série de experimentos para comprovar a existência do efeito leste-oeste. Ao concluir-se que os raios cósmicos chegam preferencialmente de direções à oeste do ponto de observação, se estabeleceu definitivamente a natureza corpuscular e que a maioria dos raios cósmicos possui carga positiva.

2.3 Raios Cósmicos Secundários: Chuveiro de Raios Cósmicos

Após a interação com o campo magnético terrestre, os raios cósmicos primários de altas energias que seguirem em direção à Terra têm uma grande probabilidade de colidir com o núcleo de algum átomo que esteja presente na atmosfera. Esta colisão gera uma cadeia

de processos, que recebe o nome de Chuveiro de Raios C3smicos, onde s3o geradas diversas part3culas que s3o chamadas de Raios C3smicos Secund3rios (RC-II). As part3culas produzidas neste chuvaireio podem ser divididas em tr3s grupos: a componente nucle3nica, a componente eletromagn3tica e a componente m3son-mu3nica, conforme mostra o esquema na Figura 2.8.

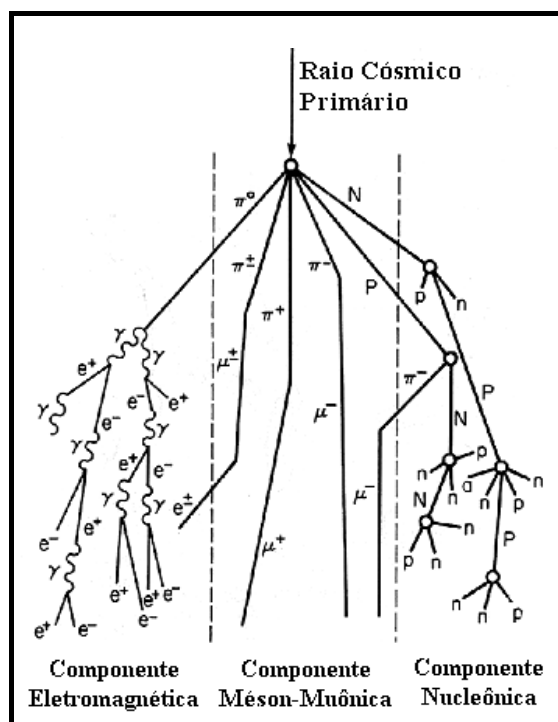


Figura 2.8 – Esquema do Chuveiro de Raios C3smicos produzido por uma part3cula prim3ria, ao entrar na atmosfera terrestre. Sendo: “n” os n3utrons, “p” os pr3tons, “e⁻” os el3trons, “e⁺” os p3sitr3s, “π” os p3ions, “μ” os m3sons e “γ” os f3tons.
Fonte: Modificado de Otaola & Vald3s-Galicia (1992).

Na colis3o entre uma part3cula prim3ria e um 3tomo presente na atmosfera podem ser gerados p3ions (negativos, positivos e neutros), pr3tons ou n3utrons. Os nucleons formados nesta colis3o inicial podem colidir com outros 3tomos da atmosfera e gerar mais pr3tons e n3utrons que podem seguir o mesmo processo formando outros nucleons. Este processo gera uma cadeia de desintegra33es nucleares onde s3o formados pr3tons e n3utrons que s3o os constituintes da componente nucle3nica.

Os p3ions gerados a partir da colis3o da part3cula prim3ria com os constituintes atmosf3ricos e, em casos raros, pela colis3o de pr3tons da componente nucle3nica pertencentes 3 componente m3son-mu3nica, que tamb3m 3 composta por neutrinos (ν)

e múons (μ) formados pelo decaimento dos píons (π) negativos ou positivos, conforme mostra a Equação 2.2.

$$\begin{cases} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \nu \end{cases} \quad (2.2)$$

Apesar dos múons possuírem um tempo de meia vida em repouso pequeno (aproximadamente 2×10^{-6} segundos), eles são detectados a grandes distâncias do local onde se deu a colisão inicial devido a sua velocidade muito próxima a da luz. No entanto, aqueles que não possuem uma velocidade tão alta decaem em elétrons (e^-) ou pósitrons (e^+), liberando neutrinos (ν) e antineutrinos ($\bar{\nu}$) neste processo, como mostra a Equação 2.3.

$$\begin{cases} \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \\ \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \end{cases} \quad (2.3)$$

Esses elétrons gerados por decaimentos de múons, juntamente com elétrons, pósitrons e fótons provenientes do decaimento de píons neutros e de outros processos de menor importância que ocorrem no chuveiro de raios cósmicos (ionização, produção de pares e cascatas fóton-elétron) formam a componente eletromagnética. Os pósitrons tendem a desaparecer, devido à sua aniquilação com elétrons dos átomos da atmosfera terrestre e, assim como as outras partículas desta componente, não são facilmente encontrados em baixas altitudes (OTAOLA; VALDÉS-GALICIA, 1992).

A dependência da intensidade de raios cósmicos secundários com a altura já é conhecida desde as primeiras décadas do século XX, época onde foi medida a curva de Pfozter, ilustrada na Figura 2.9. Esta figura mostra que a intensidade de partículas secundárias apresenta um valor máximo numa distância de aproximadamente 15-16 km acima do nível do mar e decresce de forma gradativa para altitudes menores e de forma abrupta para altitudes maiores.

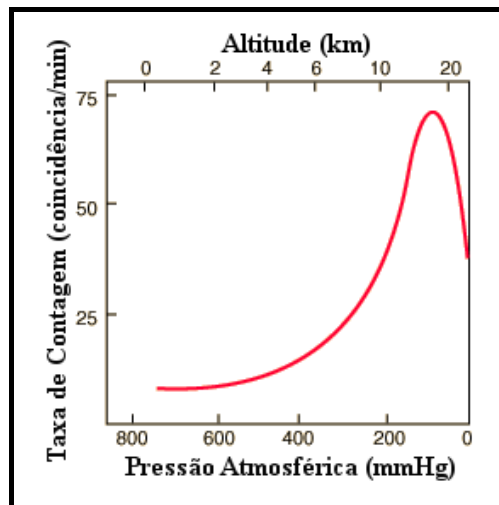


Figura 2.9 – Curva de Pfozter, que mostra a variação da intensidade de raios cósmicos na atmosfera terrestre.

Fonte: Modificado de Ziegler (1996).

Apesar da intensidade total das partículas secundárias decair para altitudes menores que 15 km, as três componentes do chuveiro de raios cósmicos têm comportamentos distintos, como mostra a Figura 2.10. Assim, é possível observar-se que para altitudes menores (maior pressão), há um maior fluxo de múons. Os resultados mostrados nesta figura foram obtidos utilizando-se, a simulação GEANT4 baseada no código PLANETOCOSMICS (DESORGHER et al., 2003).

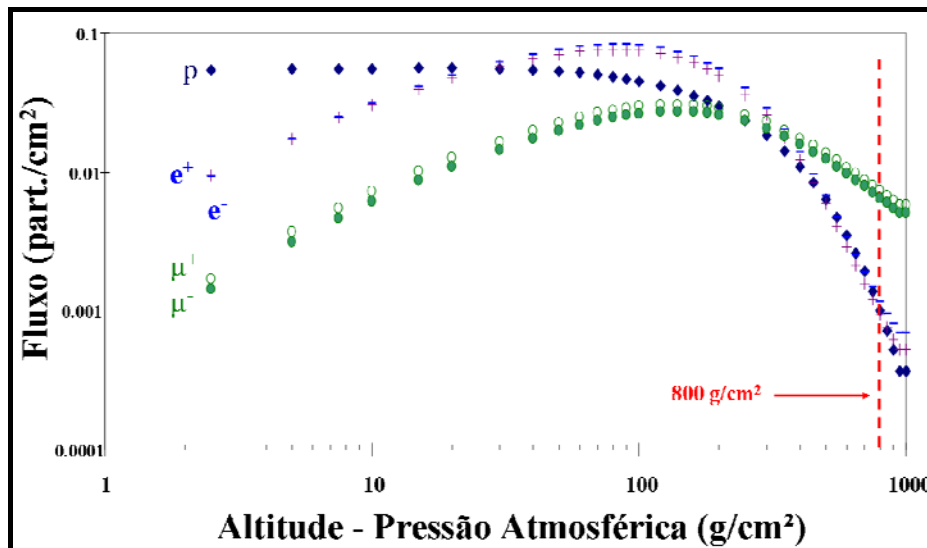


Figura 2.10 – Variação do fluxo dos múons negativos e positivos (pontos verdes), dos pósitrons (sinal de “+”), dos elétrons (sinal de “-”) e dos prótons (losango azul) com a altitude calculada através de experimentos com balões

Para uma mesma altura a quantidade dos diferentes tipos de partículas secundárias é bem distinta, variando conforme a energia. Na Figura 2.11, é mostrado o espectro de energia das partículas secundárias em baixas altitudes em uma região com rigidez magnética de 1 GV, calculado através do modelo PARMA, *PHITS-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere*, (SATO et al, 2008). Existe uma predominância de múons em altas energias, enquanto para baixas energias, os fótons e os nêutrons são as partículas que apresentam o maior fluxo. Os píons, que não aparecem neste espectro, apresentam um tempo de vida muito pequeno, decaindo para múons ou elétrons em distâncias próximas de onde ocorreu a colisão em que foram gerados.

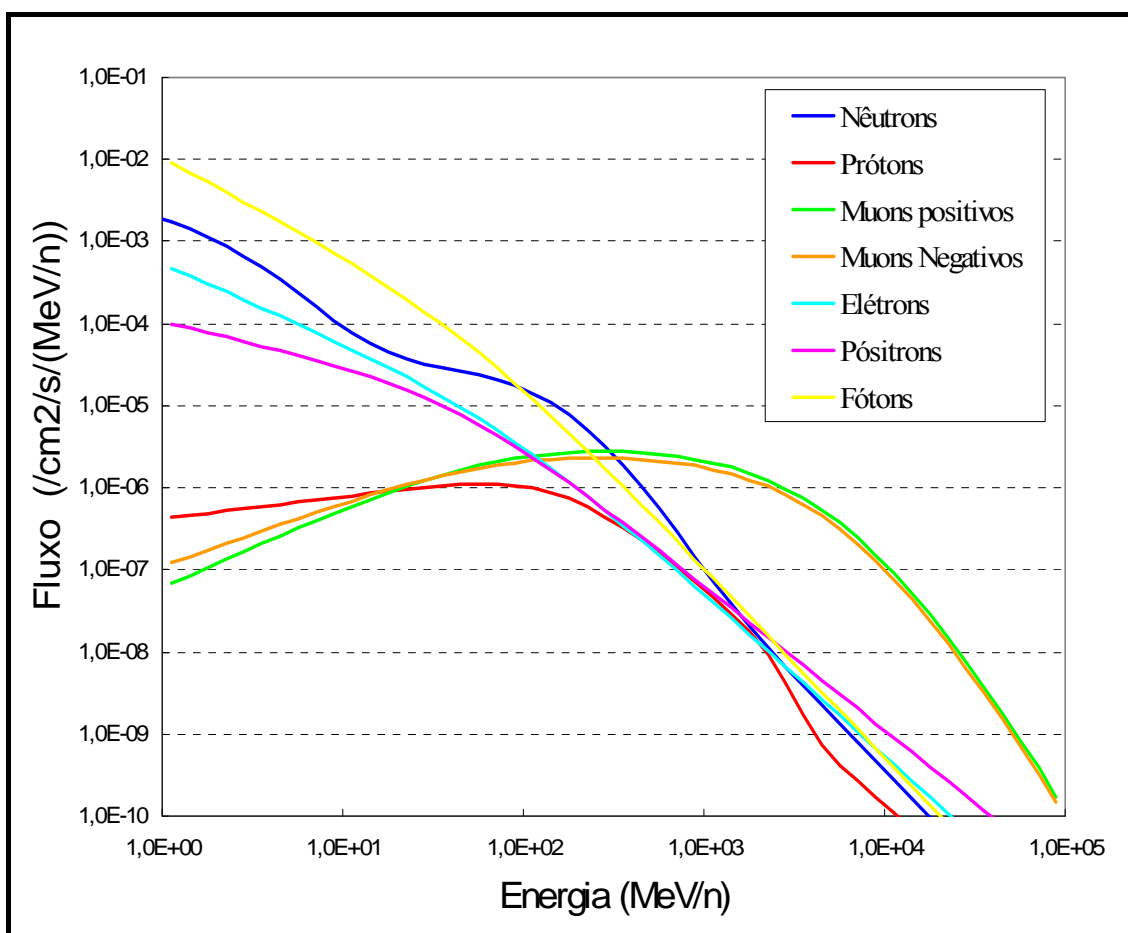


Figura 2.11 – Espectro de energia das partículas secundárias calculado através do modelo PARMA.

Devido à grande energia das partículas primárias, as partículas secundárias geradas no chuveiro de raios cósmicos não apresentam um grande desvio em relação à trajetória da partícula primária incidente. No entanto, como é mostrado no esquema da Figura 2.12, o

cone de espalhamento é diferente para as partículas de cada componente do chuvaire. Enquanto as partículas da componente nucleônica não sofrem um grande espalhamento, a componente méson-muônica é a que apresenta um maior espalhamento (ZIEGLER, 1996).

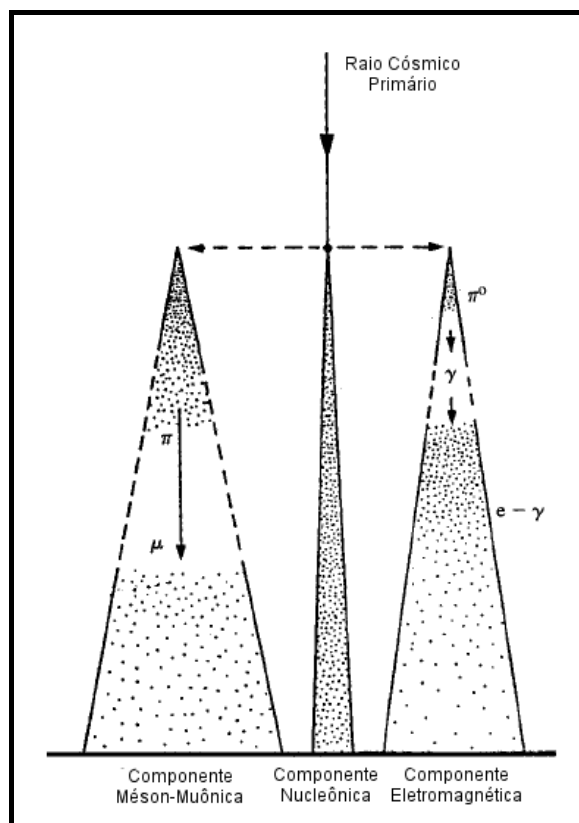


Figura 2.12 – Espalhamento das partículas de cada componente do chuvaire de raios cósmicos. Fonte: Modificado de Ziegler (1996).

Os raios cósmicos secundários, principalmente os menos energéticos, apresentam interações com diversos processos ocorridos na atmosfera terrestre. O estudo destas interações é de grande importância para o entendimento de fenômenos ocorridos na atmosfera e para o estudo das variações temporais dos raios cósmicos primários, através das medições realizadas em detectores localizados na superfície terrestre.

3 INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS DADOS

Para a realização dos estudos apresentados neste trabalho foi utilizada principalmente a intensidade de raios cósmicos observada pelo detector CARPET. Além dos dados sobre fenômenos e processos solares, geomagnéticos e atmosféricos, foram utilizados dados fornecidos por uma estação meteorológica e pelo monitor de campo elétrico atmosférico EFM-100, ambos instalados próximo ao detector CARPET.

3.1 O detector de raios cósmicos CARPET

O detector CARPET foi instalado em Abril de 2006 no Complexo Astronômico El Leoncito (CASLEO), através de uma colaboração entre o Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM), o Instituto de Física P. N. Lebedev (LPI) da Rússia e o próprio CASLEO.

O CASLEO se encontra na província de San Juan na Argentina ($69^{\circ}18'O$ $31^{\circ}47'S$) a 2552 metros acima do nível do mar (pressão atmosférica típica de 800 g/cm^2). Nele estão instalados, além dos instrumentos utilizados neste trabalho, o telescópio argentino Jorge Sahade, o telescópio Helen Sawyer da Universidade de Toronto, o astrógrafo para o hemisfério sul do Instituto de Astrofísica de Analucía da Espanha, as antenas de VLF da rede SAVNET, o Telescópio Solar em ondas Submilimétricas (SST), a câmera de observação solar na faixa do infravermelho ($10 \mu\text{m}$) e um espectrógrafo heliográfico administrados pelo CRAAM. O CASLEO se encontra na região de abrangência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul e apresenta uma rigidez geomagnética de corte de $\sim 12 \text{ GV}$. Conforme pode ser observado na Figura 2.10, na altitude do CASLEO (pressão média de $\sim 800 \text{ g/cm}^2$), há um maior fluxo de múons do que de elétrons, pósitrons e prótons.

Como mostra a Figura 3.1, o detector CARPET consiste em 240 detectores do tipo contadores Geiger-Muller separados em 24 blocos. Ele possui uma área aproximada de 2 m^2 e desde o início de seu funcionamento, vem registrando a contagem de raios cósmicos com um tempo de resolução de 500 ms de forma contínua.

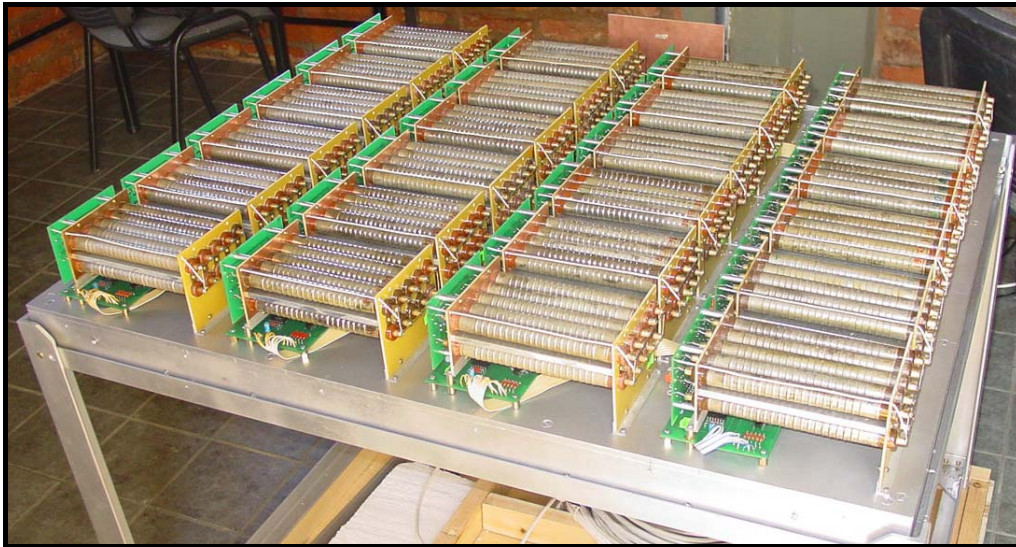


Figura 3.1 – O detector de raios cósmicos CARPET.

Em cada bloco do CARPET, conforme é mostrado na Figura 3.2, há 5 detectores com forma cilíndrica, de 1,9 cm de diâmetro e 9,8 cm de comprimento que se localizam acima de uma placa de alumínio de 0,7 cm, e 5 detectores semelhantes que se localizam abaixo desta placa.



Figura 3.2 – Detalhe de um bloco com 10 contadores do CARPET.

Devido a esta configuração o CARPET fornece três sinais de dados, que são denominados de UP, LOW e TELESCOPE. O sinal UP corresponde à somatória da contagem observada em todos os detectores que se encontram acima da placa de alumínio, enquanto o sinal LOW corresponde à somatória da contagem dos detectores abaixo da placa. O sinal TELESCOPE corresponde à somatória das contagens de partículas que foram detectadas em coincidência.

Os canais UP e LOW são capazes de detectar elétrons (e^-) com energias maiores que 0,2 MeV, prótons (p^+) com energia superior a 5 MeV e raios- γ com energia acima de 0,02 MeV vindos de qualquer direção. A eficiência na detecção de raios gama é extremamente baixa ($< 1\%$). O canal TELESCOPE não é sensível à radiação gama e possui a capacidade de detectar e^- com energia acima de 5 MeV, p^+ com energia acima de 30 MeV e múons com energias superiores a 20 MeV.

Através do espectro de energia simulado das partículas cósmicas secundárias, mostrado na Figura 3.3, é possível se observar que os sinais dos canais UP e LOW do CARPET são mais influenciados pelas partículas da componente eletromagnética, principalmente pelos elétrons, enquanto o sinal do canal TELESCOPE é mais influenciado pelos múons. Este espectro foi calculado pela simulação GEANT4, baseado no código PLANETOCOSMICS (DESORGHER et al., 2003) utilizando-se as condições de pressão atmosférica e rigidez geomagnética do local onde o CARPET está instalado.

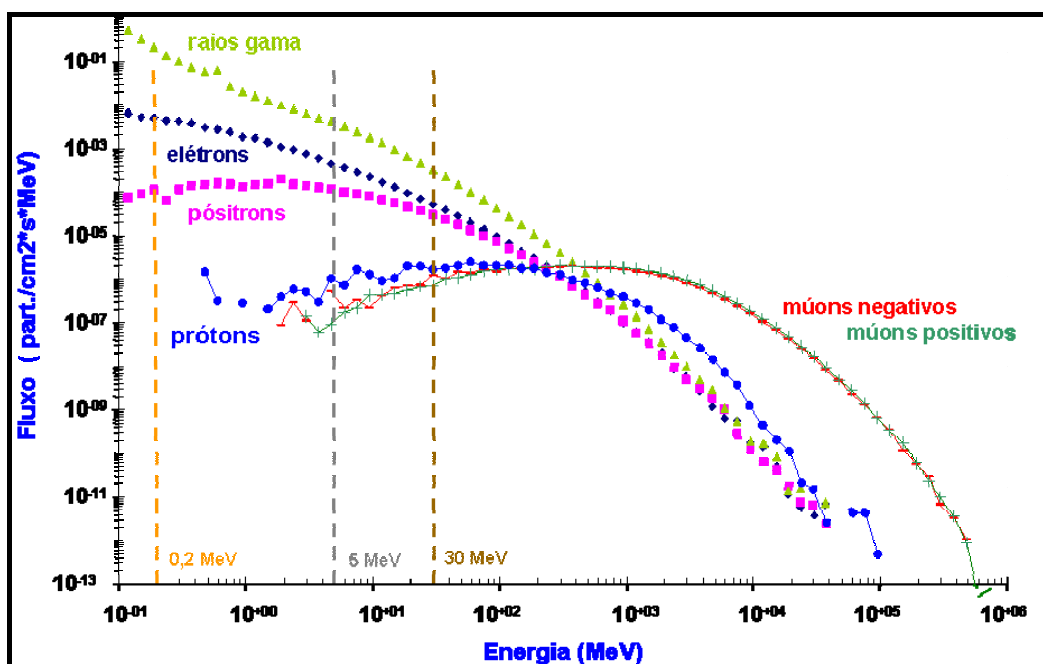


Figura 3.3 – Espectro de energia nas condições do local onde o CARPET está instalado. As duas primeiras linhas verticais indicam respectivamente o valor de menor energia de e^- e p^+ detectados nos sinais UP e LOW. E as duas últimas linhas verticais indicam respectivamente o valor da energia de corte dos e^- e p^+ do sinal TELESCOPE.

3.1.1 Estudo e Correção do Efeito Barométrico

A variação da intensidade de raios cósmicos com a altura, notada logo no início dos estudos envolvendo os raios cósmicos no início do século XX, está relacionada com a quantidade de matéria que a partícula cósmica secundária atravessa ao mover-se na atmosfera. Quanto mais alto estiver localizado o detector, menor será a pressão atmosférica sobre ele, o que reduz a probabilidade de colisão das partículas cósmicas secundárias com partículas da atmosfera, fazendo com que este detector registre uma maior intensidade de partículas que outro detector localizado em uma altitude inferior. De forma simples, quanto maior a pressão atmosférica, maior a absorção de partículas cósmicas secundárias pela atmosfera, o que implica em uma menor intensidade de partículas cósmicas na superfície.

Como a pressão atmosférica para um dado local não é constante, variando ao longo do tempo, há uma variação na contagem de raios cósmicos relacionada com esta variação temporal da pressão atmosférica. Quando a pressão diminui, a contagem tende a aumentar. E no caso contrário, quando a pressão aumenta, a contagem tende a diminuir. No entanto, existem estudos que indicam que a relação entre a pressão atmosférica e a intensidade de raios cósmicos ocorre de forma mais complexa, onde há inclusive um efeito positivo da pressão, ou seja, uma maior pressão pode gerar uma maior intensidade de partículas cósmicas (DORMAN, 2004).

Considerando-se apenas o efeito de absorção, sabe-se que a variação da intensidade de raios cósmicos relacionada às mudanças de pressão atmosférica depende da própria intensidade de raios cósmicos I , da pressão atmosférica P e de um coeficiente de absorção μ constante, conforme mostra a Equação 3.1.

$$dI = -\mu \cdot I \cdot dP \quad . \quad (3.1)$$

Assim, a intensidade I para uma dada pressão atmosférica P será proporcional à intensidade I_n observada sob uma pressão P_n conforme mostra a Equação 3.2.

$$I = I_n \cdot e^{-\mu \cdot (P - P_n)} \quad (3.2)$$

No entanto, para pequenas variações de pressão, a variação da intensidade relativa da contagem de raios cósmicos (ΔI_R) devido à variação de pressão atmosférica (ΔP) pode ser descrita através de uma relação linear empírica, mostrada na Equação 3.3.

$$\Delta I_R = \frac{I - I_0}{I_0} = \beta \cdot (P - P_0) + \alpha$$

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \beta \cdot \Delta P + \alpha \quad (3.3)$$

sendo, I a intensidade de raios cósmicos observada, P a pressão atmosférica registrada no mesmo instante, I_0 a intensidade média de raios cósmicos em um dado período, P_0 a pressão média calculada neste mesmo período e β o coeficiente barométrico. O coeficiente α numa situação ideal tende a zero.

Devido ao efeito de maior absorção das partículas cósmicas para uma pressão mais alta, o coeficiente barométrico (β) é negativo e seu valor depende principalmente da natureza da componente secundária observada. Ressalta-se que esta aproximação mostrada na Equação 3.3 não é adequada para estudos envolvendo a componente nucleônica, ou seja, para os monitores de nêutrons (FAMOSO et al., 2005).

O cálculo do coeficiente barométrico, mostrado na Equação 3.3, deve ser feito periodicamente, para se averiguar possíveis mudanças na relação entre a pressão atmosférica e a intensidade de raios cósmicos.

Nesta dissertação realizou-se o estudo do efeito barométrico para cada sinal do CARPET, através da contagem de raios cósmicos observada durante o mês de julho de 2009, período com baixa atividade solar e geomagnética. Foram obtidas as retas de correlação entre a variação relativa da intensidade de raios cósmicos e as variações de pressão para este período, utilizando-se I_0 e P_0 respectivamente como a contagem e a pressão atmosférica médias, calculadas entre os anos de 2006 e 2010.

A Figura 3.4 mostra a correlação entre a variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) e a variação de pressão atmosférica (ΔP) para cada um dos três sinais e os coeficientes de correlação (R) entre esses dois parâmetros.

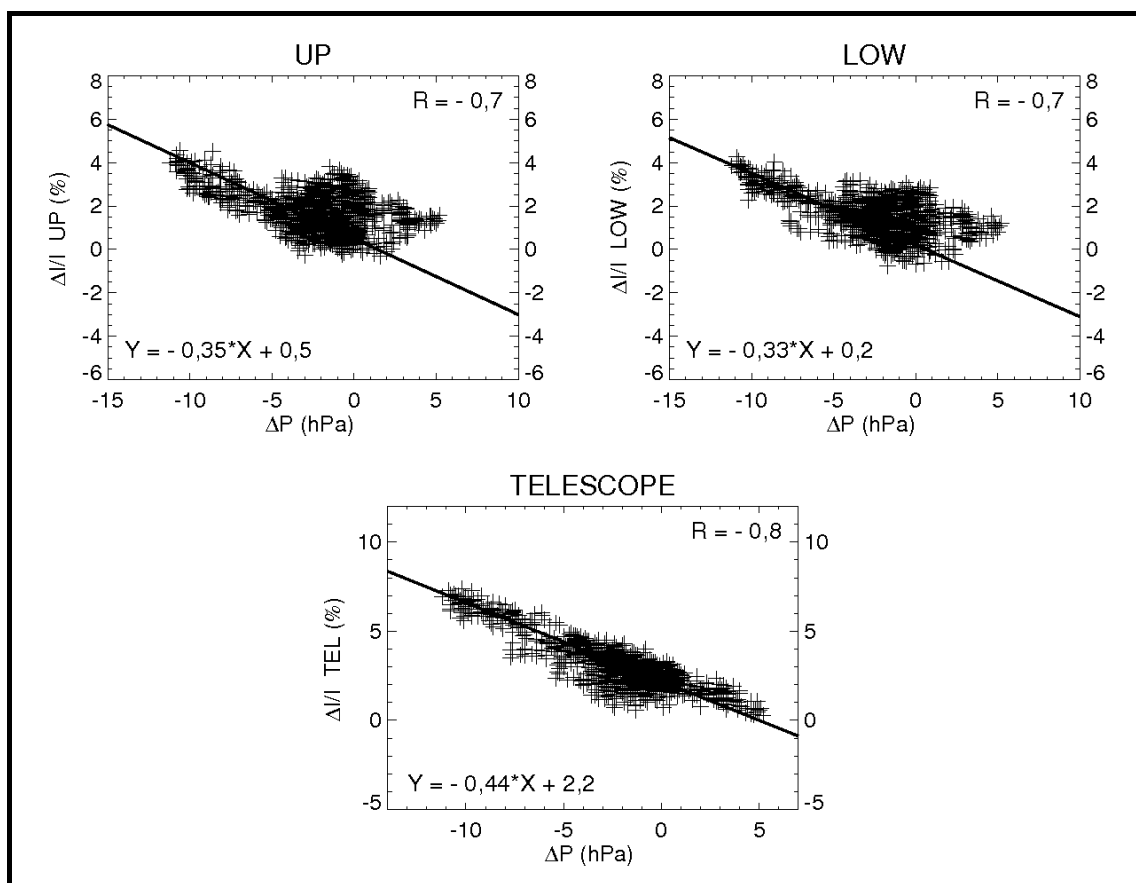


Figura 3.4 – Correlações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de pressão (ΔP).

Através das retas de correlação mostradas na Figura 3.4, foram encontrados os seguintes valores de coeficiente barométrico: $\beta = -0,35$ %/hPa para o sinal UP, $\beta = -0,33$ %/hPa para o sinal LOW e $\beta = -0,44$ %/hPa para o sinal TELESCOPE. Estes valores são condizentes com os obtidos num estudo realizado em 2006, o que mostra que não houve mudanças na influência da pressão atmosférica entre os anos de 2006 e de 2009.

Considera-se que a intensidade de raios cósmicos observada pelo CARPET seja composta por duas componentes: uma influenciada pela pressão atmosférica e outra não. Sendo a componente relacionada ao efeito barométrico dada pela Equação 3.3,

vemos que a intensidade de raios c3smicos para um dado sinal do CARPET corrigida pela press3o, ou seja, sem o efeito barom3trico, ser3 dada pela Equa3o 3.4.

$$I_C = I_M - \beta \cdot (P - P_0) \cdot I_0 \quad (3.4)$$

sendo, I_C a intensidade corrigida pela press3o, I_M a intensidade observada, P a press3o atmosf3rica registrada no mesmo instante que I_M foi medido, β o coeficiente barom3trico, P_0 e I_0 os valores de press3o atmosf3rica e de intensidade m3dios utilizados no calculo de β .

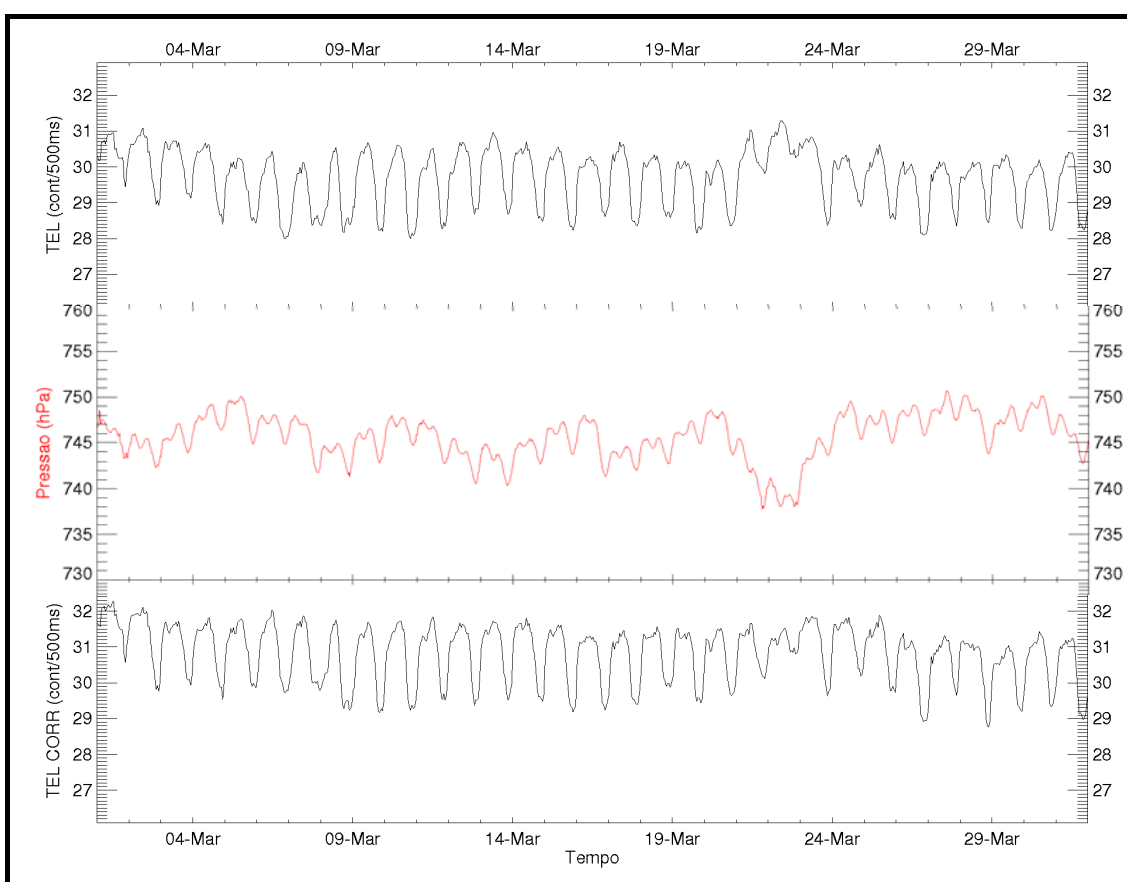


Figura 3.5 – No gr3fico superior: contagem de raios c3smicos registrada pelo sinal TELESOCPE do detector CARPET no m3s de Mar3o de 2010. A curva vermelha representa a press3o atmosf3rica registrada no mesmo per3odo e no gr3fico inferior 3 mostrada a contagem corrigida pela press3o.

Desta forma, os dados registrados pelos tr3s sinais s3o corrigidos, eliminando-se o efeito da varia3o da press3o atmosf3rica, possibilitando um melhor estudo das varia3es relacionadas com outros fen3menos. A Figura 3.5 mostra um exemplo da diferen3a

entre os dados não corrigidos (quadro superior) e os dados corrigidos (quadro inferior). Assim, é possível se observar uma clara diferença entre os dados corrigidos e não corrigidos no período entre 20 e 24 de Março de 2010, onde a pressão atmosférica apresenta grande variação.

3.1.2 Estudo e Correção do Efeito da Temperatura

Observando-se a contagem de raios cósmicos registrada pelo CARPET em longos períodos de tempo, é possível notar uma variação sazonal. Há uma menor contagem nos meses de verão do que nos meses de inverno. Conforme é mostrado na Figura 3.6, as variações de temperatura apresentam uma anticorrelação com esta variação sazonal.

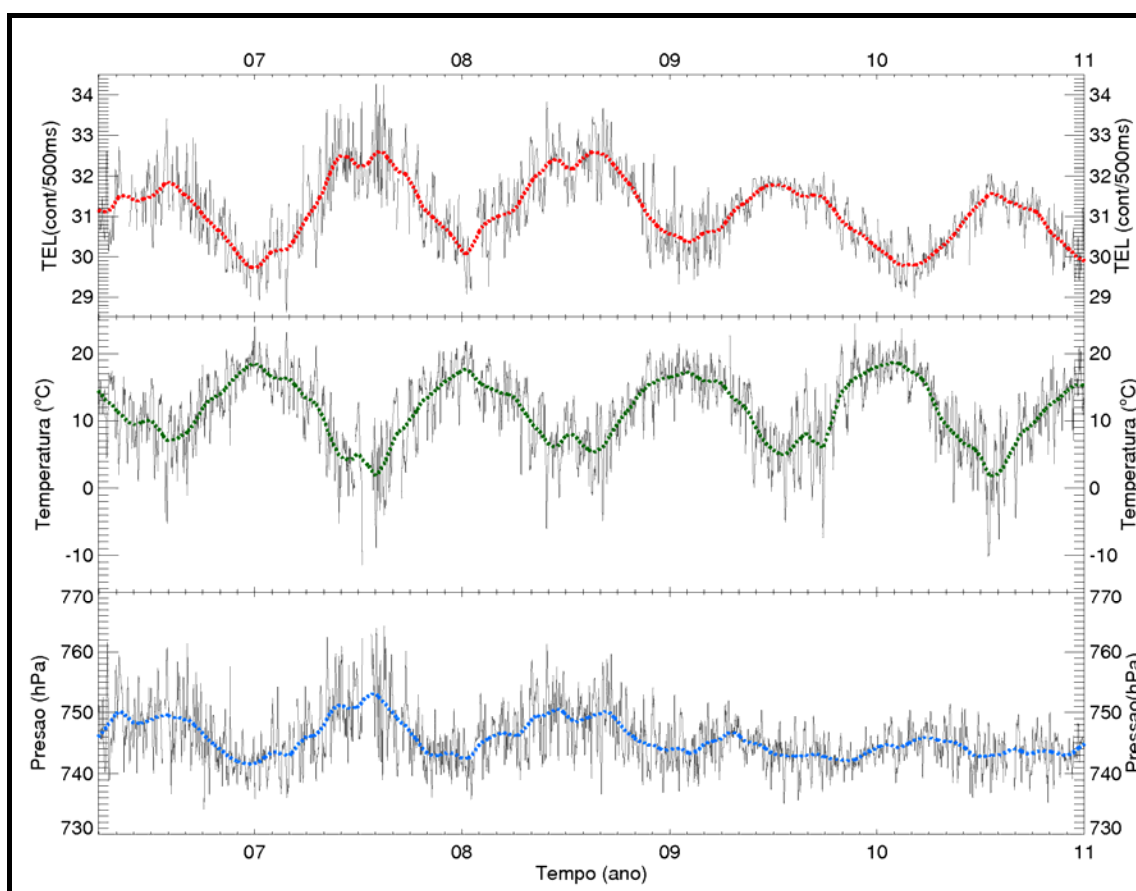


Figura 3.6 – Médias diárias da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE, da temperatura medida na superfície e da pressão atmosférica registradas entre Abril de 2006 e Janeiro de 2011. As curvas pontilhadas de cor vermelha, verde e azul representam respectivamente a média corrida de 30 dias da contagem de raios cósmicos, da temperatura e da pressão atmosférica.

A anticorrelação entre as mudanças de temperatura na superfície e a intensidade de raios cósmicos, em longos períodos, pode ser explicada de maneira simples pelo processo de

expansão da atmosfera no verão. A expansão causa um aumento do caminho percorrido pelas partículas cósmicas secundárias, possibilitando um maior número de decaimentos dos múons, o que provoca uma queda na quantidade de partículas incidentes na superfície (DORMAN, 2004).

No entanto, a relação das mudanças de temperatura com as variações na intensidade de raios cósmicos é mais complexa. Além deste efeito de anticorrelação devido à expansão da atmosfera, há um efeito de correlação em altitudes superiores, devido à influência da temperatura no decaimento de píons carregados (DORMAN, 2004; SAGISAKA, 1986).

Na literatura, costuma-se descrever o efeito da temperatura (ET) de quatro maneiras distintas: em relação à variação de temperatura na superfície (Eq. 3.5), em relação à variação de temperatura na altura média onde ocorre a máxima produção de raios cósmicos (Eq. 3.6), em relação a ambas (Eq. 3.7) e em relação à integral do desvio de temperatura para uma dada altura ao longo de toda a atmosfera (Eq. 3.8). Sendo a primeira, a mais simples e a mais comumente usada na eliminação do efeito da temperatura e a última baseada no modelo teórico do decaimento de píons (DORMAN, 2004).

$$ET \equiv \alpha.\Delta T(h_0) \quad (3.5)$$

$$ET \equiv \phi.\Delta T(h_g) \quad (3.6)$$

$$ET \equiv \Omega.\Delta T(h_0) + \phi.\Delta T(h_g) \quad (3.7)$$

$$ET \equiv \int_{h_f}^{h_0} \lambda(h').\Delta T(h')dh' \quad (3.8)$$

onde $\Delta T(h_0)$ é o desvio da temperatura observado na superfície, $\Delta T(h_g)$ é o desvio da temperatura observado na altitude média em que ocorre a máxima produção de raios cósmicos (~16,5 km), $\Delta T(h')$ é o desvio da temperatura numa dada altura h' , $\lambda(h')$ é o coeficiente para esta altura, h_f é a altura onde acaba a atmosfera terrestre (pressão igual a zero) e h_0 é a altura onde o detector se encontra.

Além destes métodos já apresentados, também é possível analisar a variação sazonal da contagem de raios cósmicos com a variação da altura onde é medida a pressão atmosférica em que ocorre a máxima produção de partículas secundárias (~100 mmHg). Essa altura máxima varia entre ~16 e ~17 km ao longo do ano.

Nesta dissertação foram estudados e analisados os quatro métodos de descrever o efeito da temperatura, dados pelas Equações 3.5 até 3.8. Para cada um dos quatro métodos foram obtidas as retas de correlação entre a variação relativa da intensidade de raios cósmicos e a variação de temperatura. Também foi feita a correção dos dados, ou seja, a remoção do efeito da temperatura, a fim de se analisar o aspecto dos dados corrigidos por cada um destes métodos.

Foram utilizadas as médias diárias da contagem de raios cósmicos corrigida pela pressão e registrada por cada um dos três sinais do CARPET entre abril de 2006 e agosto de 2010. Também foram utilizadas as médias diárias da temperatura da superfície registrada por uma estação meteorológica e as médias diárias das temperaturas atmosféricas em diferentes altitudes observadas, acima da região onde o CARPET está instalado (entre 60°-80° O e 20°-40° S), observadas pelo instrumento SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) abordo do satélite TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics) da NASA (<http://saber.gats-inc.com/>, acessado em 01/04/2011).

Para o primeiro método, foram obtidas as correlações mostradas na Figura 3.7. Como esperado, há uma anticorrelação entre a variação de temperatura na superfície e a variação relativa da intensidade de raios cósmicos, o que resulta num valor negativo para os coeficientes de regressão.

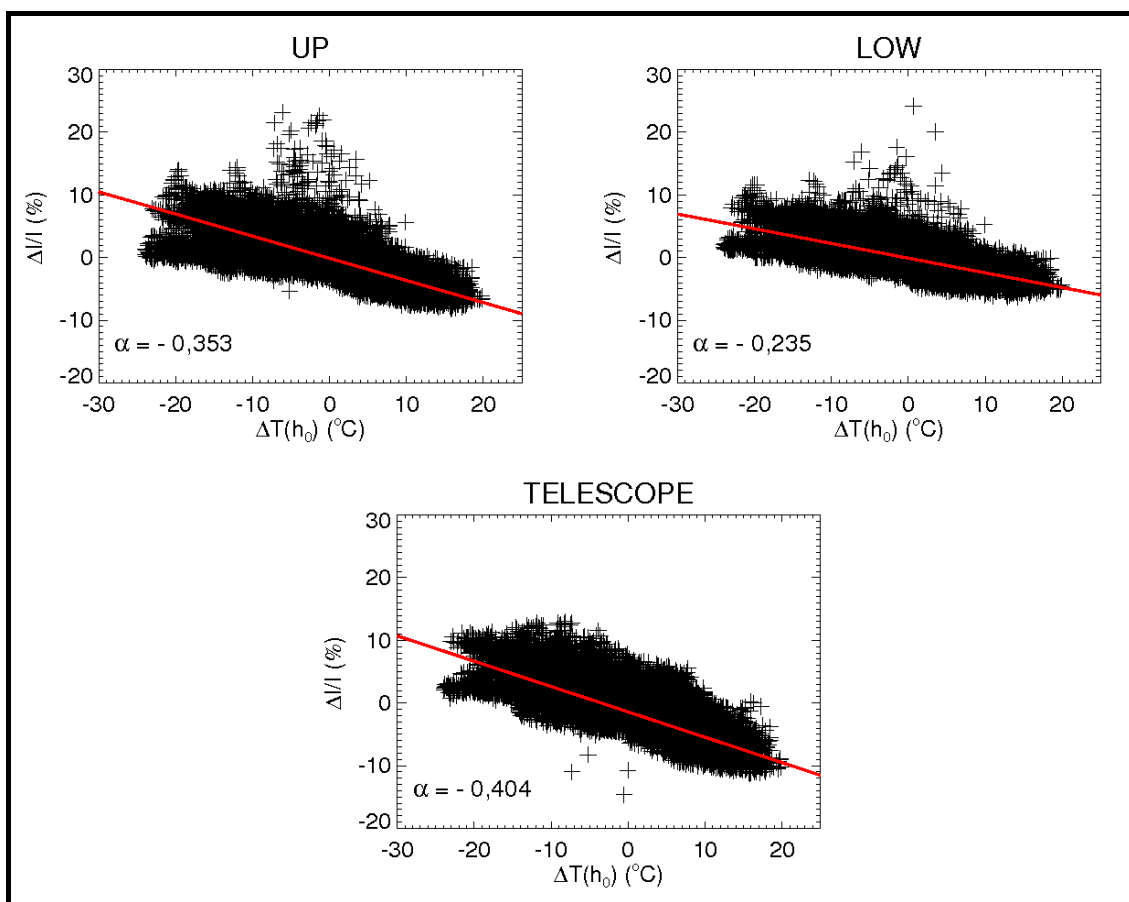


Figura 3.7 – Anticorrelações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada, entre Abril de 2006 e Agosto de 2010, em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de temperatura registrada na superfície ($\Delta T(h_0)$).

Diferentemente, como mostra a Figura 3.8, para o segundo método, utilizando-se dados da temperatura na altitude média onde ocorre a máxima produção de raios cósmicos (16,5 km), os coeficientes são positivos. Este coeficiente positivo também foi observado em estudos semelhantes realizados por Tanskanen (1965) e Wang & Lee (1967) utilizando-se telescópios de múons instalados em Oulu na Finlândia e em Hong Kong, respectivamente.

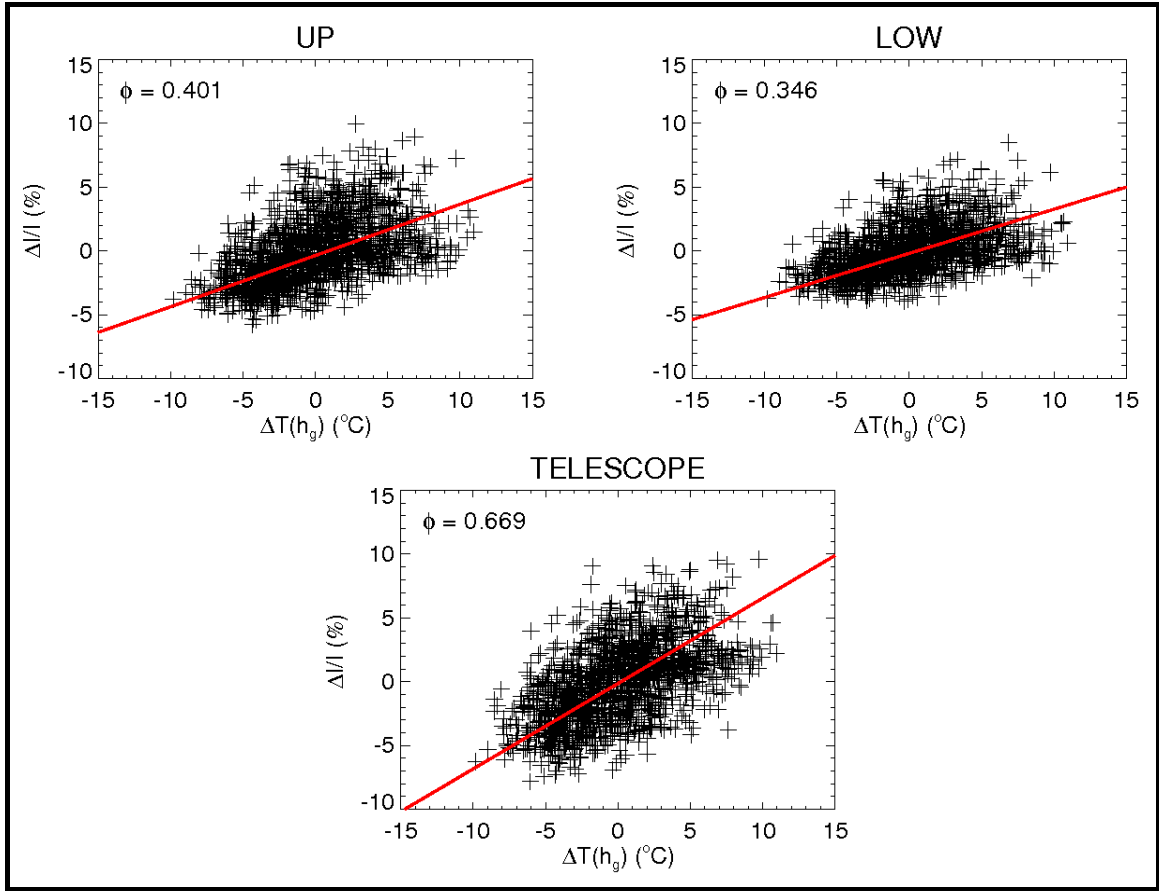


Figura 3.8 – Correlações obtidas através da análise da variação relativa da contagem de raios cósmicos ($\Delta I/I$) observada em cada um dos três sinais do CARPET e a variação de temperatura ($\Delta T(h_g)$) registrada na altitude de 16,5 km acima do nível do mar.

De forma semelhante ao método pelo qual é feita a correção pela pressão atmosférica, a correção pela temperatura é realizada considerando que a intensidade de raios cósmicos seja composta por duas partes, uma influenciada pelo efeito da temperatura e outra não. Desta forma, para os diferentes métodos, os dados corrigidos pela temperatura são dados pela Equação 3.9:

$$I_C = I_M - ET \quad (3.9)$$

onde I_C é a intensidade corrigida, I_M é a intensidade medida pelo detector e ET é o efeito da temperatura que é descrito por uma das 4 equações que representam os diferentes métodos estudados (Eq. 3.5 a 3.8).

Como é mostrado na Figura 3.9, a curva (em azul) que representa os dados corrigidos pelo segundo método não se diferencia muito da curva (em preto) que representa os

dados não corrigidos. Enquanto que a curva (em vermelho) que representa os dados corrigidos pelo primeiro método apresenta uma maior redução da variação sazonal.

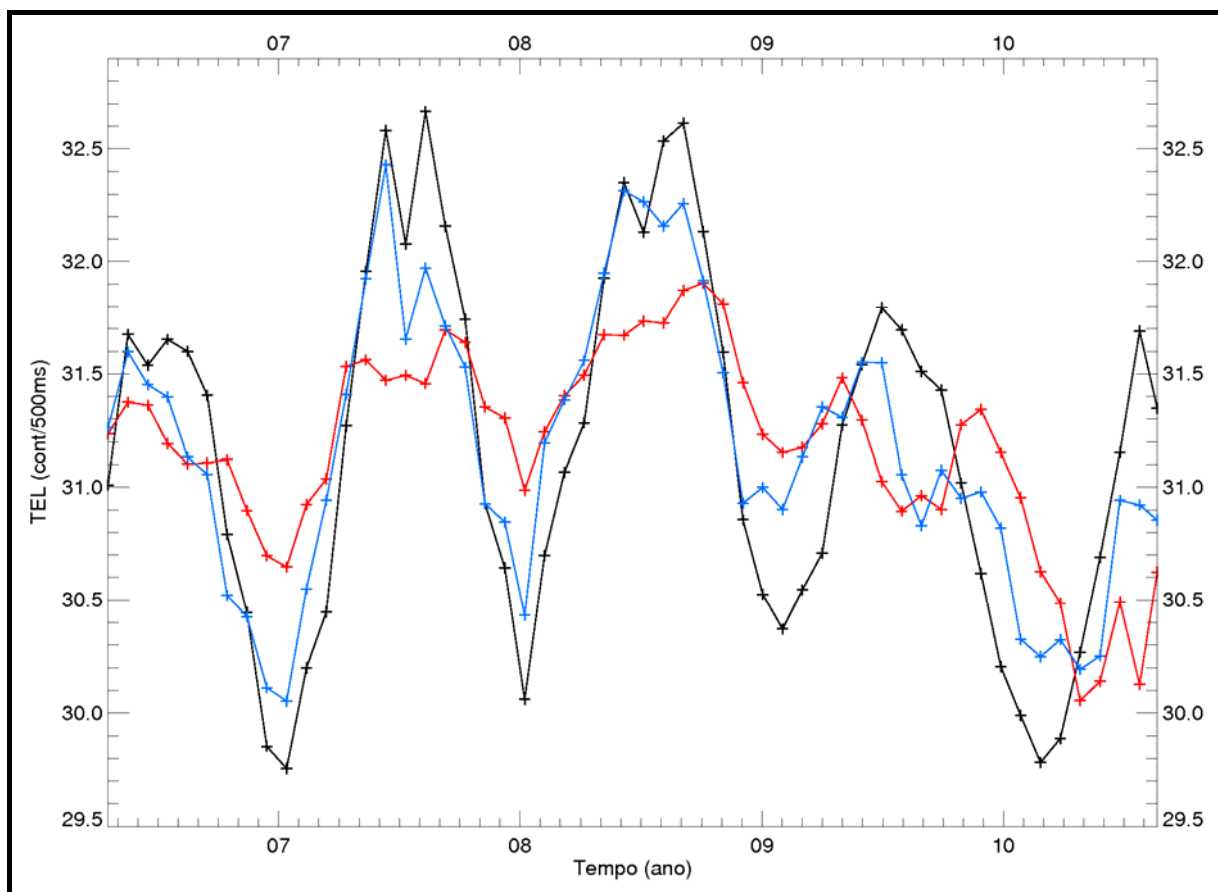


Figura 3.9 – Em preto, média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TESLECOPE observada entre Abril de 2006 e Agosto de 2010. Em vermelho, média mensal dos dados corrigidos através da temperatura observada na superfície (1º método) e em azul, média mensal dos dados corrigidos através da temperatura observada em 16,5 km de altitude (2º método).

No terceiro método foram utilizados os dados de temperatura atmosférica para 2,5 km (superfície) e 16,5 km de altitude. Através dos dados já corrigidos pelo segundo método foi realizada uma nova correlação entre a variação relativa da contagem de raios cósmicos e a temperatura na superfície que tem como resultado o coeficiente Ω . A Figura 3.10 mostra a diferença entre os dados sem correção alguma e os dados corrigidos por este método. Nela é possível se observar que a variação sazonal é reduzida, principalmente entre o meio de 2007 e o início de 2010.

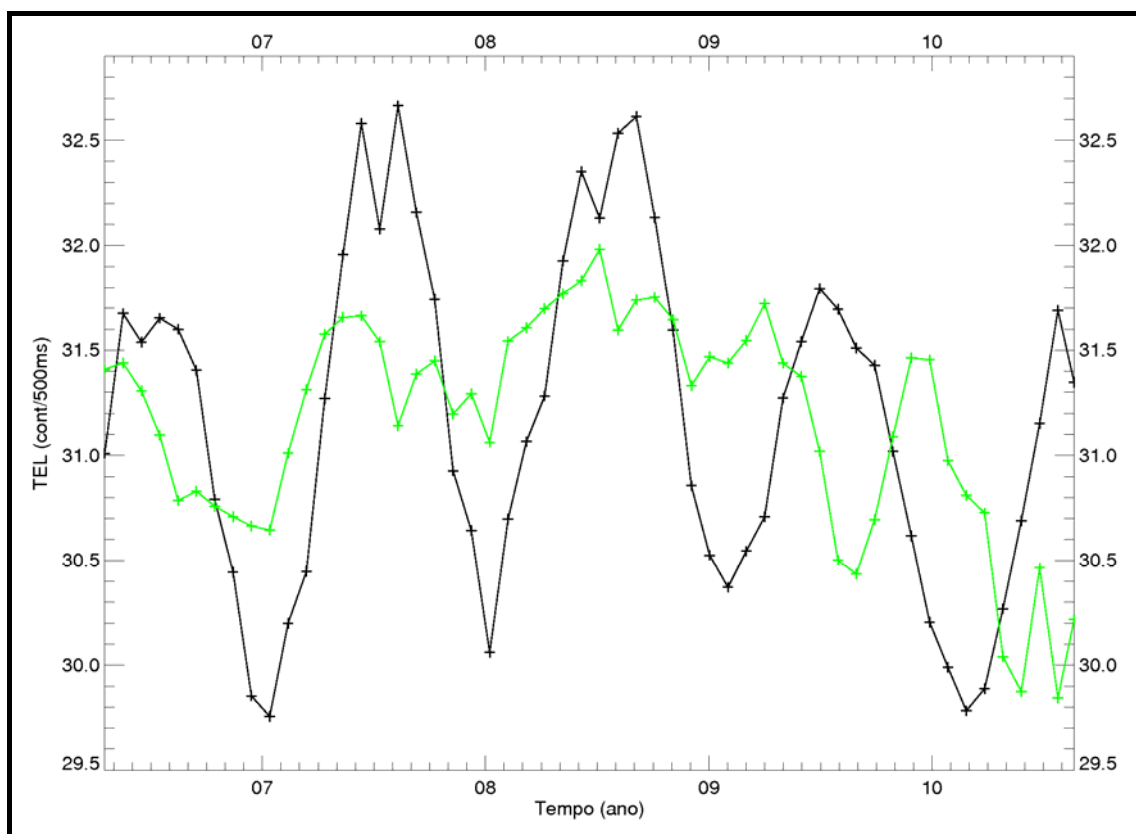


Figura 3.10 – Em preto é mostrada a média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TESLECOPE observada entre Abril de 2006 e Agosto de 2010 e em verde é mostrada a média mensal dos dados corrigidos através do 3º método.

Para o estudo do quarto método utilizou-se como a altitude inicial (h_0) 2,5 km, que é a altitude do local onde o CARPET se encontra instalado. Utilizando-se os dados do satélite SABER, obteve-se, entre 14 km e 111 km de altitude, a temperatura atmosférica média a cada 0,5 km. Desta forma há uma lacuna nos dados, pois não é possível se medir as variações de temperatura entre 2,5 e 14 km de altitude.

Esta análise, como mostra a Equação 3.8 é feita de cima para baixo, ou seja, são analisadas as relações entre as temperaturas de altitudes superiores para depois se analisar as temperaturas de altitudes inferiores. Por exemplo, primeiro é analisada a relação entre as variações de temperatura observadas na altitude de 111 km e a contagem de raios cósmicos, obtendo-se um coeficiente de regressão λ para esta altitude. Este coeficiente é utilizado para se corrigir os dados, que depois serão utilizados para análise em 110,5 km de altitude. Desta forma, cada coeficiente λ é obtido através da correlação entre a temperatura observada numa altura e a contagem de raios

cósmicos corrigida pelas temperaturas de altitudes superiores. A Tabela 3.1 mostra, para cada um dos três sinais do CARPET, os coeficientes de regressão obtidos nas altitudes estudadas.

Tabela 3.1 – Coeficientes λ encontrados para cada altura estudada no 4º método.

Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)	Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)
111.0	3,12E-02	2,16E-02	3,81E-02	62.0	-1,22E-04	-1,68E-03	-2,80E-03
110.5	-1,70E-03	-1,26E-03	-1,71E-03	61.5	-2,00E-05	-2,37E-03	1,33E-03
110.0	-3,39E-03	-2,40E-03	-5,15E-03	61.0	-1,06E-05	-5,21E-04	-2,05E-03
109.5	-4,44E-03	-2,53E-03	-6,63E-03	60.5	-3,00E-05	-4,47E-03	-6,91E-03
109.0	-1,34E-03	-2,85E-03	-1,84E-03	60.0	4,96E-05	3,61E-06	-4,05E-03
108.5	-4,17E-03	-3,21E-03	-3,40E-03	59.5	-2,30E-03	-3,43E-03	-1,41E-03
108.0	-9,58E-04	-6,94E-06	-2,78E-03	59.0	1,30E-04	-2,73E-03	-6,79E-03
107.5	-1,24E-03	-1,32E-03	-1,49E-03	58.5	-2,76E-03	-2,46E-03	-1,25E-02
107.0	-1,12E-03	-5,11E-04	-1,24E-03	58.0	4,20E-04	-2,41E-06	-6,23E-03
106.5	1,35E-03	1,65E-03	6,08E-04	57.5	-1,05E-02	-1,33E-03	-1,16E-02
106.0	-5,85E-04	-1,09E-03	3,17E-04	57.0	-7,21E-03	-2,58E-03	-1,49E-02
105.5	1,05E-04	-2,15E-06	1,23E-03	56.5	-4,87E-04	5,00E-05	-2,46E-03
105.0	1,91E-03	3,53E-03	2,46E-04	56.0	-1,66E-03	-1,38E-03	-4,68E-03
104.5	1,85E-03	2,20E-04	1,22E-03	55.5	-2,92E-03	-1,21E-03	-3,14E-03
104.0	9,00E-05	4,18E-04	9,79E-04	55.0	-2,76E-03	-7,01E-03	-1,43E-04
103.5	4,34E-03	2,09E-03	2,41E-05	54.5	2,70E-03	-1,29E-03	9,86E-05
103.0	1,84E-03	1,36E-03	1,08E-03	54.0	5,69E-04	4,60E-06	-4,08E-04
102.5	1,52E-03	9,93E-04	8,84E-04	53.5	-3,24E-03	-6,26E-03	-2,57E-03
102.0	2,90E-03	6,32E-03	3,58E-04	53.0	6,68E-03	7,17E-04	1,00E-04
101.5	2,80E-03	9,77E-04	-6,03E-05	52.5	-2,65E-03	-6,25E-04	-7,49E-04
101.0	4,57E-03	2,20E-05	2,61E-03	52.0	-2,06E-03	-4,34E-04	-6,49E-03
100.5	3,09E-03	5,44E-03	2,91E-03	51.5	5,62E-03	-4,71E-05	2,06E-03
100.0	2,18E-03	4,52E-04	-3,12E-03	51.0	8,09E-05	-2,45E-03	-1,17E-02
99.5	1,65E-03	1,49E-04	4,83E-05	50.5	-1,62E-02	-1,26E-03	-1,90E-02
99.0	2,58E-03	2,86E-03	3,09E-04	50.0	-1,26E-02	-3,05E-03	-8,55E-03
98.5	2,03E-03	6,78E-04	-3,06E-04	49.5	-5,56E-03	-1,69E-03	-4,81E-03
98.0	3,31E-03	2,15E-03	2,66E-03	49.0	-1,27E-02	-3,75E-03	-1,73E-02
97.5	2,83E-05	1,55E-04	-2,96E-03	48.5	-1,16E-02	-9,32E-05	-1,79E-03
97.0	8,48E-04	2,23E-03	2,80E-03	48.0	-1,01E-02	-4,95E-03	-4,96E-03
96.5	5,11E-03	4,80E-03	1,74E-03	47.5	-2,52E-03	-2,86E-05	-1,50E-03
96.0	1,00E-05	3,35E-05	-3,65E-03	47.0	-2,07E-03	-1,32E-03	-5,08E-03
95.5	1,24E-02	3,89E-03	5,40E-03	46.5	-1,40E-03	-8,27E-03	-3,83E-03
95.0	5,63E-03	5,12E-03	9,51E-04	46.0	-5,86E-03	-3,80E-03	-1,58E-02
94.5	5,87E-03	3,58E-03	2,68E-03	45.5	-5,29E-04	-1,39E-05	-1,13E-04
94.0	6,20E-03	3,73E-03	1,57E-03	45.0	-1,37E-02	-6,87E-03	-7,32E-03
93.5	5,66E-03	7,39E-03	2,30E-03	44.5	-1,07E-03	-5,58E-03	-2,28E-03
93.0	4,08E-03	3,99E-04	-2,42E-05	44.0	-7,74E-03	-9,10E-06	-1,04E-03
92.5	6,34E-03	2,88E-03	7,99E-03	43.5	-3,24E-03	-2,06E-03	-1,40E-02
92.0	9,48E-03	4,36E-03	5,35E-03	43.0	-1,12E-02	-4,32E-03	-1,07E-03
91.5	3,92E-03	2,16E-03	6,47E-04	42.5	-1,38E-03	-5,36E-03	-2,07E-03

(Continua)

Tabela 3.1 – Continuação

Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)	Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)
91.0	7,54E-03	9,36E-03	1,23E-02	42.0	1,33E-03	2,20E-03	-1,04E-03
90.5	7,90E-03	5,36E-03	4,51E-03	41.5	-3,55E-03	-3,98E-03	-1,52E-03
90.0	5,40E-03	8,96E-03	7,69E-03	41.0	4,37E-07	-3,58E-04	-1,29E-03
89.5	1,15E-02	5,98E-03	3,50E-03	40.5	-5,52E-05	-2,34E-03	-1,21E-03
89.0	6,20E-03	5,52E-03	9,63E-03	40.0	2,66E-07	1,84E-05	-7,53E-04
88.5	6,52E-03	7,87E-03	1,06E-02	39.5	-4,82E-03	-1,50E-03	-3,64E-03
88.0	7,10E-03	2,05E-03	9,63E-03	39.0	4,89E-05	-1,69E-03	4,84E-07
87.5	1,11E-02	8,88E-03	9,32E-03	38.5	1,79E-05	-4,52E-04	1,88E-03
87.0	1,35E-02	3,11E-03	9,07E-03	38.0	-3,89E-03	-3,57E-04	-1,81E-03
86.5	6,95E-03	4,08E-03	4,81E-03	37.5	-9,75E-03	-8,25E-04	-5,20E-05
86.0	1,50E-02	1,19E-02	2,18E-02	37.0	-1,64E-05	-4,81E-03	3,51E-05
85.5	9,62E-03	7,97E-03	8,40E-03	36.5	2,50E-05	-2,19E-06	-1,21E-04
85.0	6,72E-03	3,34E-03	1,34E-02	36.0	-5,55E-03	-3,18E-03	-4,83E-03
84.5	8,27E-03	8,85E-03	8,09E-03	35.5	-9,75E-03	-6,90E-03	-1,22E-02
84.0	5,31E-03	2,27E-03	6,42E-03	35.0	-9,91E-04	-3,22E-03	-4,10E-03
83.5	8,53E-03	2,41E-03	1,21E-02	34.5	-5,75E-04	-2,00E-03	-1,22E-02
83.0	1,19E-02	8,16E-03	3,60E-03	34.0	-7,59E-03	-3,05E-03	-1,28E-02
82.5	7,48E-03	7,52E-03	4,24E-03	33.5	-1,40E-02	-3,96E-03	-9,09E-03
82.0	4,67E-03	2,04E-03	1,00E-02	33.0	-6,88E-03	-6,48E-03	-5,28E-03
81.5	4,93E-03	9,11E-03	4,84E-03	32.5	-5,04E-03	-3,34E-03	-8,01E-03
81.0	6,06E-03	8,41E-03	3,57E-03	32.0	-1,19E-02	-7,85E-03	-2,08E-02
80.5	1,52E-02	4,70E-03	8,37E-03	31.5	-8,40E-03	-5,72E-03	-1,47E-02
80.0	7,83E-03	6,10E-03	8,30E-03	31.0	-7,10E-03	-2,14E-03	-2,66E-03
79.5	7,30E-03	6,68E-03	4,26E-03	30.5	-3,99E-03	-3,79E-03	-1,37E-02
79.0	5,56E-03	2,86E-03	6,02E-03	30.0	-1,80E-02	-6,91E-03	-1,66E-02
78.5	4,06E-03	4,71E-03	5,27E-03	29.5	-2,06E-02	-1,25E-02	-7,45E-03
78.0	4,65E-03	3,84E-03	3,04E-03	29.0	-1,02E-02	-8,84E-03	-7,56E-03
77.5	7,66E-03	1,95E-03	1,18E-02	28.5	-7,68E-03	-3,35E-03	-7,02E-03
77.0	3,45E-04	1,68E-03	-6,38E-03	28.0	-1,19E-02	-3,97E-03	-8,59E-03
76.5	5,05E-03	3,80E-03	7,09E-03	27.5	-3,36E-03	-2,52E-03	-5,39E-03
76.0	6,25E-03	3,05E-03	2,25E-03	27.0	-1,16E-02	-1,32E-03	-8,67E-03
75.5	6,41E-03	4,84E-03	8,12E-03	26.5	-7,63E-03	-1,31E-02	-1,50E-02
75.0	3,27E-03	2,37E-03	2,48E-03	26.0	-1,64E-02	-5,51E-03	-1,57E-02
74.5	1,78E-03	1,56E-03	-2,13E-03	25.5	-2,17E-02	-9,30E-03	-1,73E-02
74.0	1,52E-03	3,80E-03	3,08E-03	25.0	-1,52E-02	-1,16E-02	-2,93E-02
73.5	5,81E-05	4,99E-04	1,96E-03	24.5	-3,22E-03	-8,23E-03	-1,85E-02
73.0	2,96E-03	5,07E-03	-6,34E-05	24.0	-2,24E-02	-1,76E-02	-2,09E-02
72.5	7,09E-03	8,49E-03	2,50E-03	23.5	-2,51E-04	-7,56E-03	-7,79E-03
72.0	5,32E-03	2,80E-03	5,10E-03	23.0	-1,42E-02	-1,24E-02	-1,47E-02
71.5	4,45E-03	7,03E-03	7,19E-03	22.5	-4,13E-03	-1,38E-02	7,92E-06
71.0	8,64E-03	9,39E-03	7,14E-03	22.0	-8,91E-03	-1,29E-02	-1,67E-03
70.5	9,21E-03	3,52E-03	2,40E-03	21.5	-1,09E-02	-1,06E-03	-1,98E-04
70.0	-2,61E-05	5,81E-03	4,35E-05	21.0	-5,03E-03	-7,31E-03	2,14E-03
69.5	4,26E-03	2,42E-03	-4,35E-05	20.5	2,41E-02	6,93E-03	2,56E-02
69.0	2,68E-03	4,81E-03	8,66E-05	20.0	1,08E-02	6,78E-04	5,05E-03

(Continua)

Tabela 3.1 – Conclusão

Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)	Alt (km)	UP (%)	LOW (%)	TEL (%)
68.5	1,87E-03	1,77E-03	-6,15E-05	19.5	9,72E-03	1,03E-03	2,89E-03
68.0	4,48E-05	-6,54E-05	-1,71E-03	19.0	6,29E-03	6,40E-03	2,40E-02
67.5	2,99E-03	1,73E-03	-5,06E-05	18.5	2,04E-02	1,09E-02	1,33E-02
67.0	5,08E-04	-8,28E-05	-3,70E-03	18.0	1,20E-02	4,97E-03	1,64E-02
66.5	1,93E-05	4,96E-04	-7,03E-04	17.5	6,99E-03	6,30E-03	1,46E-02
66.0	5,43E-03	1,04E-02	4,84E-03	17.0	5,11E-03	7,50E-03	1,38E-03
65.5	8,92E-03	1,71E-03	-8,76E-04	16.5	5,77E-03	1,88E-03	1,73E-02
65.0	6,15E-03	8,27E-05	8,23E-04	16.0	1,78E-02	1,57E-02	2,92E-02
64.5	1,60E-03	2,64E-03	-3,85E-05	15.5	1,44E-02	2,92E-03	1,70E-02
64.0	2,39E-03	4,82E-04	-8,20E-04	15.0	-1,46E-03	-1,17E-03	1,30E-02
63.5	1,33E-03	-3,36E-04	-4,24E-04	14.5	-7,23E-03	-1,72E-03	-2,58E-03
63.0	-6,18E-05	-4,86E-03	-3,51E-03	14.0	4,10E-02	2,03E-02	8,06E-02
62.5	3,23E-04	1,43E-03	-3,84E-03	2.5	-7,80E-02	-8,15E-02	-9,64E-02

Como é mostrado na Figura 3.11, a curva (em rosa) que representa os dados corrigidos pelo quarto método, praticamente não apresenta uma variação sazonal. Quando comparado com os outros três métodos, este é o que apresenta uma melhor remoção da variação sazonal da intensidade de raios cósmicos.

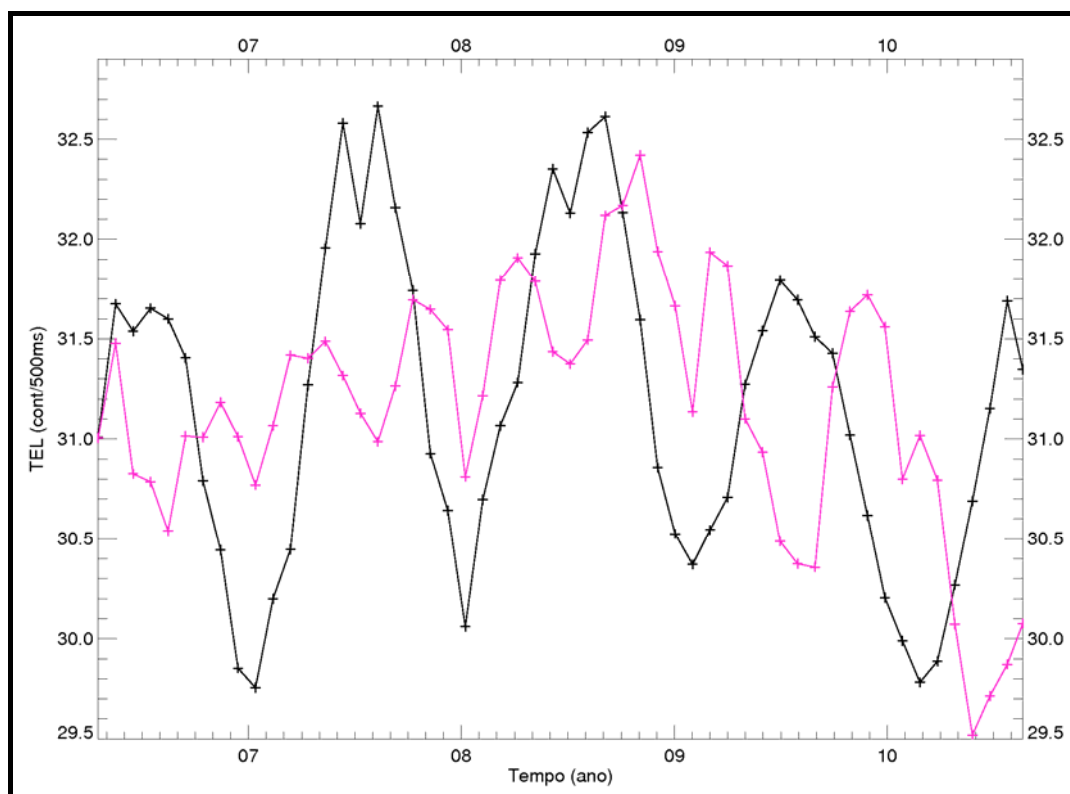


Figura 3.11 – Em preto é representada a média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TESLECOPE entre Abril de 2006 e Agosto de 2010 e em rosa é representada a média mensal dos dados corrigidos através do 4º método.

A correção pela temperatura através do 4º método é a que apresenta um resultado mais próximo à variação da contagem de raios cósmicos relacionada ao ciclo de 22 anos da inversão do campo magnético solar, que será discutida na seção 4.1.5. Devido a esta relação é esperada, entre o final de 2008 e o início de 2009, uma máxima contagem de raios cósmicos apresentada na forma de um pico. Como mostra a Figura 3.12, diferentemente dos dados não corrigidos e dos corrigidos através dos outros métodos, os dados corrigidos pelo 4º método apresentam claramente um máximo de intensidade em forma de pico, ocorrido próximo a Outubro de 2008. Conforme é possível se observar, este máximo também ocorre na contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou, indicados pelos pontos em forma de losangulos na figura. Desta forma acreditamos que o efeito da temperatura na intensidade de raios cósmicos é melhor descrito pela Equação 3.8.

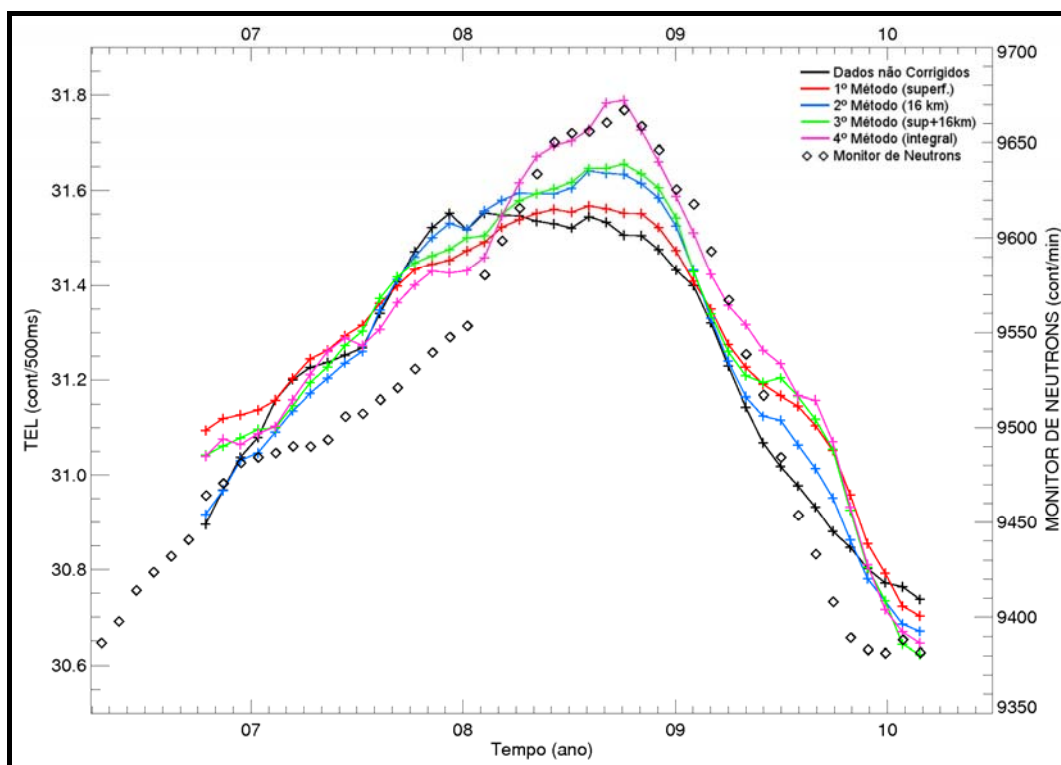


Figura 3.12 – Média corrida de 13 meses das médias mensais da contagem de raios cósmicos sem correção por temperatura (preto), corrigida pela temperatura na superfície (vermelho), pela temperatura na altura de maior produção de partículas secundárias (azul), pela temperatura na superfície e na de maior produção de partículas (verde), e pela integral das temperaturas observadas ao longo da atmosfera (rosa). Os pontos com forma de losangulo representam a média corrida das médias mensais da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou. Os dados exibidos entre Abril de 2006 e Julho de 2010.

3.2 O monitor de campo elétrico EFM-100

O EFM-100 (*Electric Field Monitor*), que é mostrado na Figura 3.13, é um monitor de campo elétrico que registra, a cada 0,5 segundo, o valor e o sentido do campo elétrico atmosférico. O monitor foi produzido pela Boltek, empresa especializada no desenvolvimento de instrumentos de monitoração da atividade elétrica na atmosfera, e adquirido pelo CASLEO em contrapartida de sua participação no projeto (www.boltek.com, acessado em 04/04/2011).



Figura 3.13 – O monitor de Campo Elétrico EFM-100.

Este instrumento pode ser dividido em duas partes principais: o estator e o rotor. O estator é composto por seis discos de metal além dos sistemas eletrônicos, e o rotor consiste em uma chapa de metal dentada aterrada e giratória que se encontra acima do estator. O estator é capaz de medir o valor de campo elétrico através da corrente induzida pela variação deste campo. Uma vez que o campo elétrico atmosférico em condições normais (de tempo bom) não varia de forma significativa ao longo do tempo, o estator por si só não é capaz de medir este campo. O rotor ao girar, cria uma rápida variação com frequência constante no campo elétrico atmosférico, possibilitando que este seja medido pelo estator.

O EFM-100 é capaz de observar de maneira contínua o campo elétrico atmosférico em períodos de tempo bom e de variações devido à presença de nuvens carregadas. O sentido do campo elétrico de tempo bom (apontando em direção ao chão) é indicado pelo EFM-100 por valores positivos. Como mostra o exemplo na Figura 3.14, quando há uma intensificação do campo elétrico atmosférico na direção da superfície, o EFM-100 apresenta um aumento no valor de campo elétrico, sem alteração de sinal.

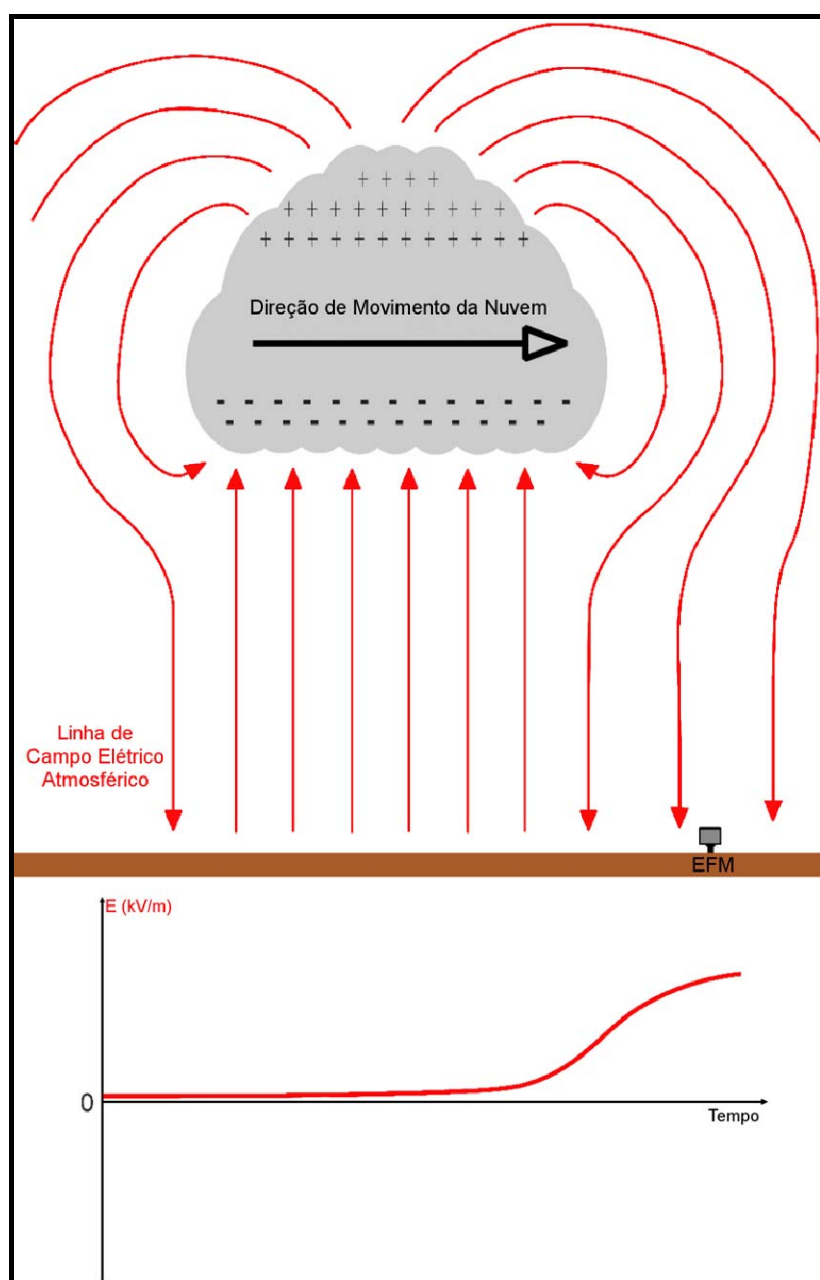


Figura 3.14 – Acima: intensificação do campo elétrico atmosférico no sentido voltado para o chão. Abaixo: representação gráfica dos dados do EFM-100 coletados esta situação.

Já, como mostra o exemplo na Figura 3.15, quando o campo elétrico atmosférico troca de sentido, apontando na direção do céu, o valor de campo medido pelo EFM-100 é negativo.

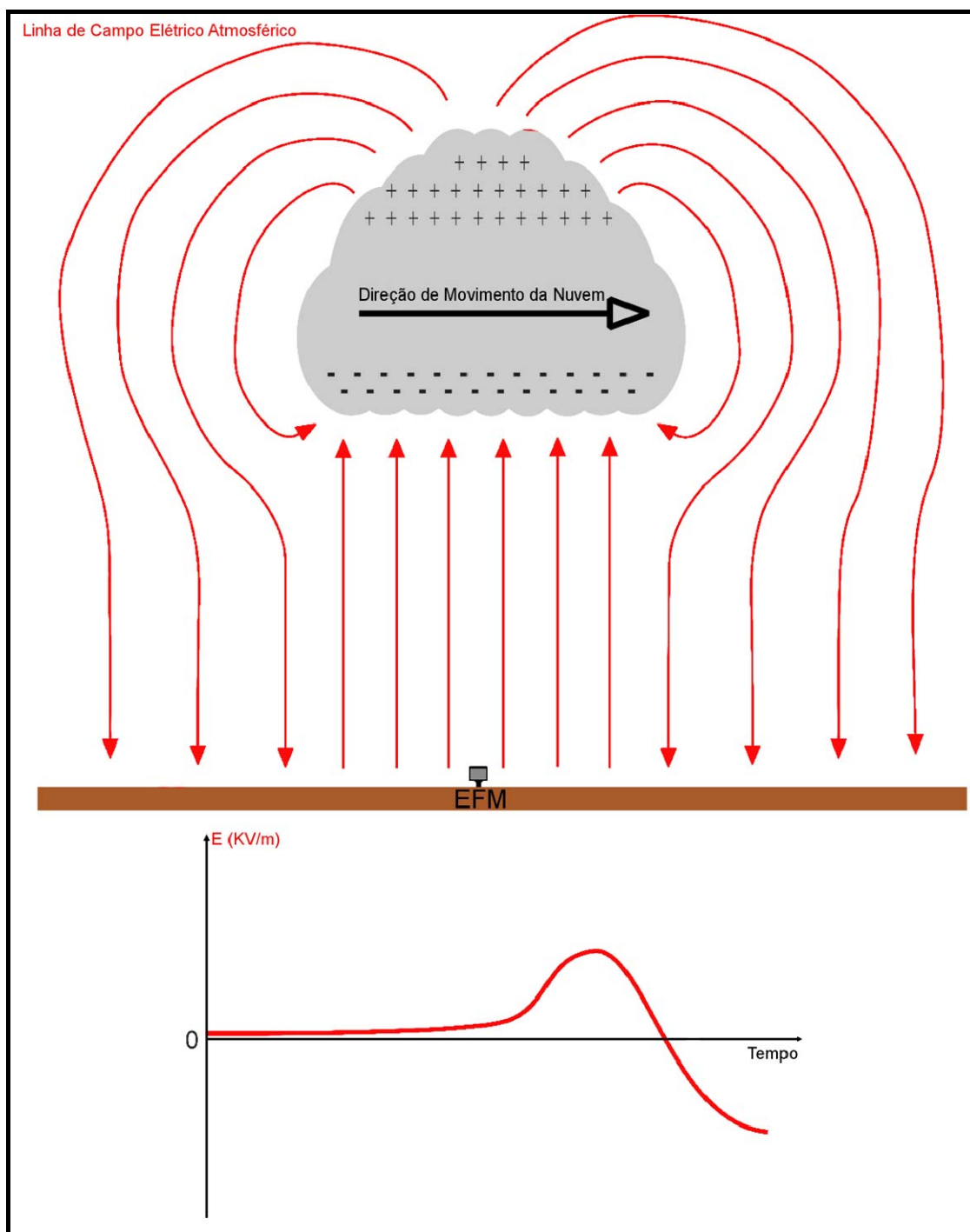


Figura 3.15 – Acima: troca de sentido do campo elétrico atmosférico. Abaixo: representação gráfica dos dados do EFM-100 coletados durante esta situação.

Entre Janeiro e Fevereiro de 2008 foi instalado e posto em operação um EFM-100 próximo ao CARPET. Ele foi colocado sobre um suporte, ficando acima do solo para que, entre outros, a movimentação de animais não danifique o instrumento ou altere as medidas de campo elétrico. No entanto, como mostra o esquema na Figura 3.16, esta configuração gera uma intensificação do módulo do campo elétrico medido pelo instrumento, devido à maior concentração de linhas de campo nas regiões pontiagudas.

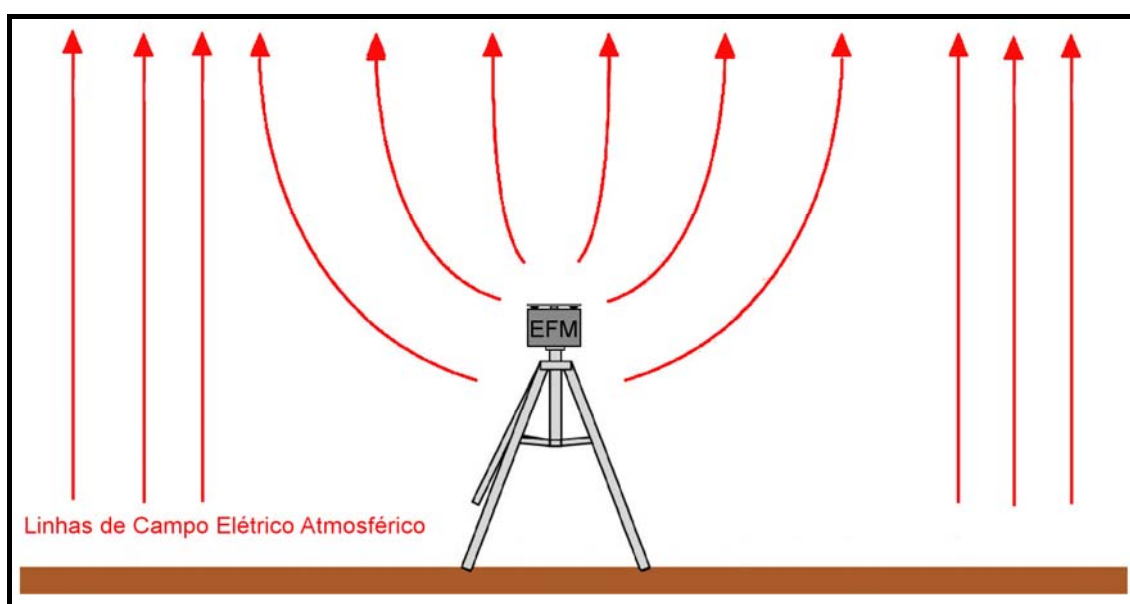


Figura 3.16 – Concentração das linhas de campo elétrico atmosférico na região pontiaguda gerada devido ao monitor de campo estar acima do nível do solo.

Desta forma, o valor de campo elétrico de tempo bom medido é maior do que o esperado. Como o instrumento só é capaz de medir campos com valor de módulo inferior a 20 kV/m, podem ocorrer saturações no valor de campo medido durante alguns períodos com a presença de nuvens eletricamente carregadas sobre o instrumento.

Para se eliminar esta intensificação do campo, passou-se a utilizar um atenuador que reduz o valor do campo medido, aproximando-o do valor que seria observado caso o EFM-100 estivesse na altura do solo. Desta forma, também foram eliminadas as saturações.

Entre Dezembro de 2009 e Janeiro de 2010, um novo EFM-100 foi utilizado para se analisar a intercalibração dos valores de campo elétrico atmosférico medido pelos dois EFM-100. Quando colocado no mesmo local que o antigo, na mesma altura e com a

mesma atenuação, ele apresenta o mesmo valor medido. Quando colocado, sem nenhum atenuador, o mais próximo possível da situação ideal que é mostrada no esquema da Figura 3.17, ele apresenta valores de tempo bom entre 0,1 e 0,3 kV/m.

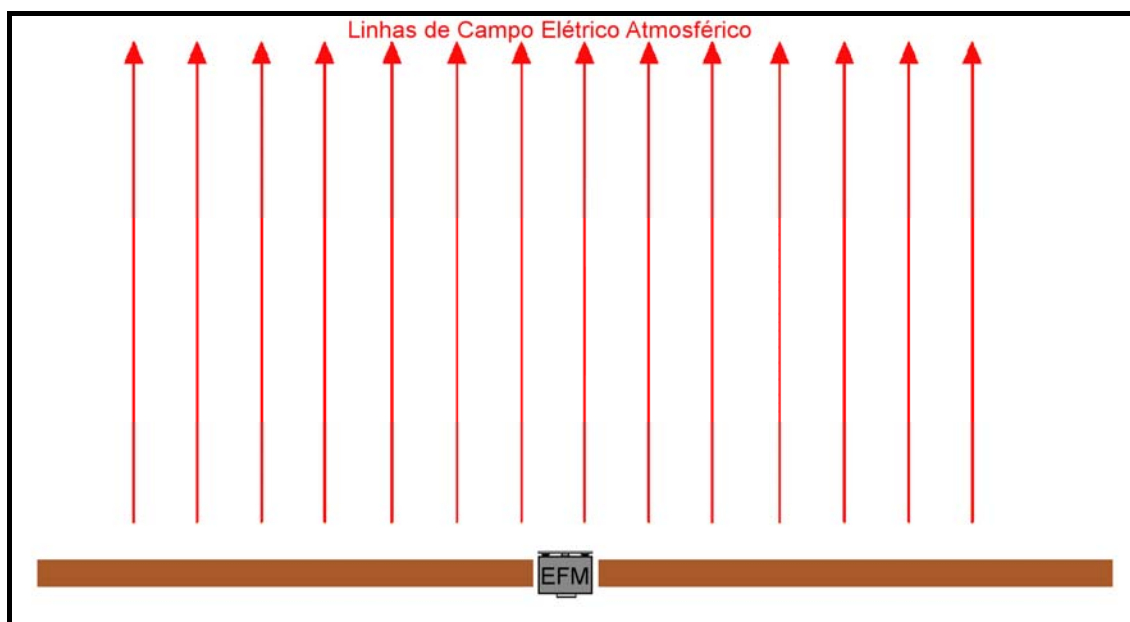


Figura 3.17 – Esquema da instalação ideal do monitor de campo elétrico atmosférico, sem regiões de ponta e concentração de linhas de campo.

Atualmente este novo monitor de campo elétrico se encontra instalado sem atenuador em uma altura de aproximadamente 105 cm acima do nível do solo, e é utilizado para estudos de variações de pequenas amplitudes, apresentando saturações em períodos com presença de nuvens eletricamente carregadas. Como mostra a Figura 3.18, os dois monitores apresentam variações de campo elétrico semelhantes num mesmo período de tempo. A diferença no valor numérico é devida à presença do atenuador no monitor mais antigo.

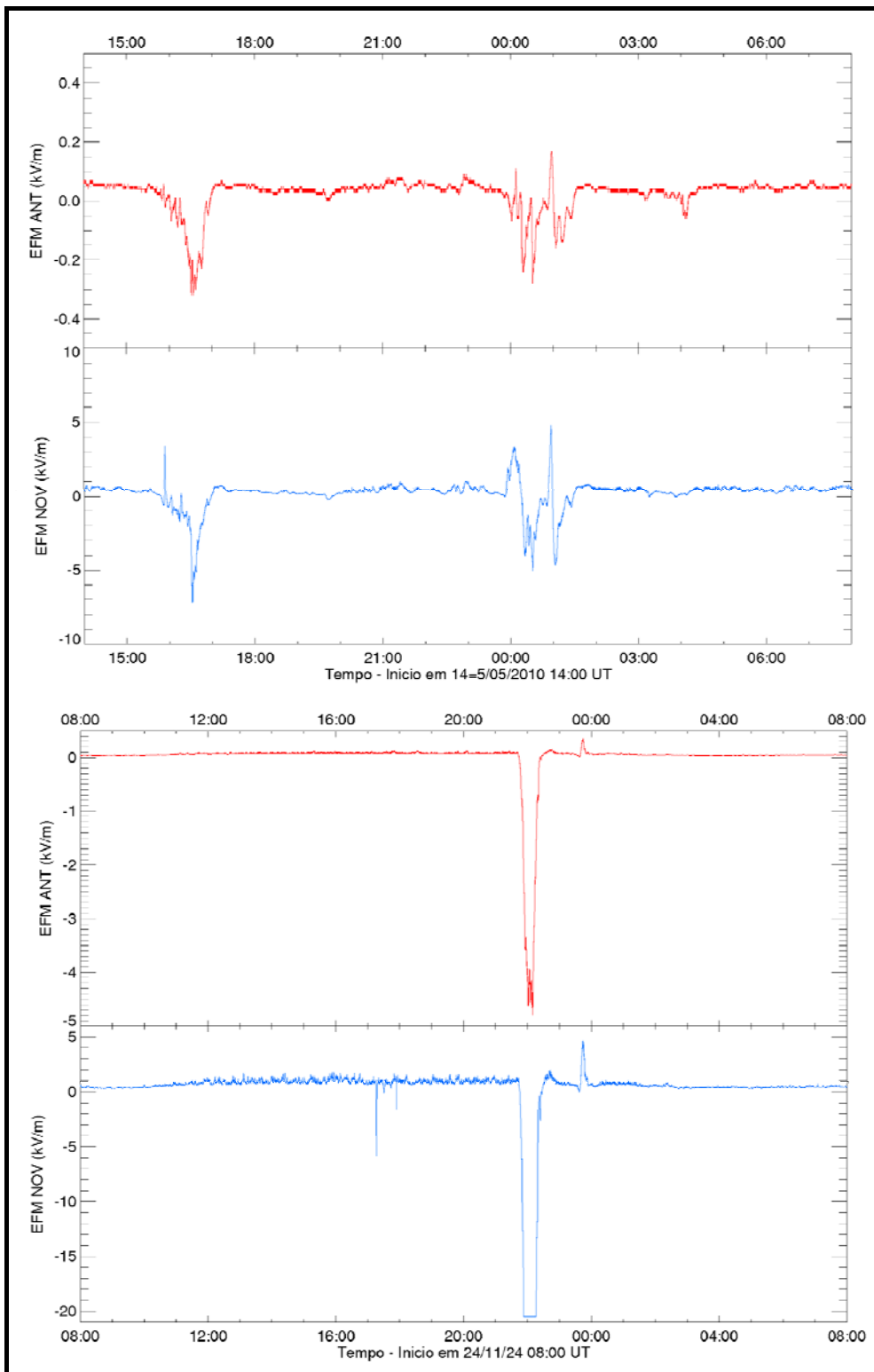


Figura 3.18 – Comparação entre os dados dos dois monitores de campo elétrico. Em vermelho dados do EFM mais antigo e com atenuador e em azul dados do EFM mais novo e sem atenuador.

4 ESTUDO DAS VARIAÇÕES DA INTENSIDADE DE RAIOS CÓSMICOS NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

A intensidade de raios cósmicos observada na superfície terrestre apresenta diversas variações esporádicas e periódicas relacionadas com fenômenos solares, geomagnéticos e atmosféricos. As influências extraterrestres apresentam um aspecto semelhante na contagem de raios cósmicos medida por detectores distintos, uma vez que elas afetam o fluxo de raios cósmicos primários. Esta influência é refletida na intensidade de partículas cósmicas secundárias. As influências de origem terrestre, por afetarem principalmente o fluxo de partículas secundárias, apresentam aspectos diferentes entre um detector e outro. Por exemplo, no caso de um fenômeno terrestre apresentar uma maior influência na componente eletromagnética do que na nucleônica, sua observação através da contagem de raios cósmicos será mais visível em detectores de múons do que em monitores de nêutrons.

As variações extraterrestres são principalmente relacionadas com fenômenos solares, havendo também a influência de fenômenos ocorridos fora da heliosfera e até mesmo fora de nossa galáxia.

A Tabela 4.1 mostra as principais variações da contagem de raios cósmicos relacionadas a fenômenos terrestres, além das variações relacionadas com as mudanças de pressão e de temperatura, discutidas nas seções 3.1.1 e 3.1.2 respectivamente.

Tabela 4.1– Variações na intensidade de raios cósmicos de origem terrestre.

Tipo	Amplitude	Natureza
Periódica Diurna	< 1%	Diferença na estrutura da atmosfera durante o dia e a noite.
Periódica Diurna	Pequena	Assimetria da magnetosfera, que resulta numa variação diária da rigidez de corte.
Esporádica Aumento	Até 10%	Diminuição da rigidez de corte local resultante de distúrbios na magnetosfera.

Fonte: Modificado de Mursula & Usoskin (2003).

Em detectores semelhantes ao CARPET (com um ou mais canais sensíveis a radiação gama), há também uma variação durante a ocorrência de chuva, que é relacionada ao aumento da radiação natural ambiente nestes períodos.

A Tabela 4.2 mostra as principais variações relacionadas aos fenômenos extraterrestres, que assim como as variações de origem terrestre, podem ser periódicas ou transientes.

Tabela 4.2 – Variações na intensidade de raios cósmicos de origem extraterrestre.

Tipo	Amplitude	Natureza
Periódica 11 e 22 anos	Até 30%	Variações de mesma periodicidade da atividade e do campo magnético solar
Periódica 27 dias	< 2%	Assimetria longitudinal no campo magnético interplanetário ou estrutura do vento solar
Periódica Diurna	poucos %	Convecção e difusão das partículas ao longo das linhas de campo magnético interplanetário
Esporádica Aumentos	1-300%	Produção de raios cósmicos durante explosões solares
Esporádica Decréscimos	Até 30%	Blindagem dos raios cósmicos galácticos por uma onda de choque
Esporádica Aumento	< 2%	Aceleração de partículas por uma onda de choque no meio interplanetário
Esporádica Decréscimos	poucos %	Blindagem dos raios cósmicos galácticos por uma ICME.

Fonte: Modificado de Mursula & Usoskin (2003).

Estudos recentes também mostram que intensificações do campo elétrico atmosférico, devido à presença de nuvens de tempestade eletricamente carregadas, podem causar variações transientes de curta duração na contagem de raios cósmicos (LIDVANSK, 2003; DORMAN, 2004; DE MENDONÇA, 2009).

4.1 Variações relacionadas a fenômenos solares e do meio interplanetário

Para a realização desta dissertação, foram observadas e analisadas as mudanças na contagem de raios cósmicos registradas pelo detector CARPET relacionadas: à produção de raios cósmicos em explosões solares, a períodos de tempestades geomagnéticas associadas a fenômenos de origem solar, e aos ciclos de 11 e 22 anos da atividade e do campo magnético solar. Também foi estudada a variação diurna relacionada ao movimento das partículas cósmicas na heliosfera.

Para um melhor entendimento das variações da contagem de raios cósmicos relacionadas a fenômenos solares, se faz necessária uma revisão geral sobre o Sol, seu ciclo de atividade e os fenômenos a ele relacionados.

4.1.1 O Sol

O Sol é uma estrela, de 4,55 bilhões de anos de vida, com raio de $6,96 \times 10^8$ m e uma massa de 2×10^{30} kg, formada principalmente por hidrogênio (92 %), uma pequena parcela de hélio (8 %) e traços de outros elementos. Sua energia é gerada no processo de fusão de núcleos de hidrogênio formando núcleos de hélio, que ocorre em seu interior.

Ele costuma ser dividido em duas principais regiões: Atmosfera, que corresponde às camadas solares que podem ser observadas de forma direta; e o Interior, que abrange as regiões solares que são estudadas através de modelos de estrutura estelar e de medidas de heliosismologia.

No interior solar estão localizados o núcleo, a camada radiativa e a camada convectiva. O núcleo solar corresponde a 10% de sua massa total, possui uma temperatura da ordem de 15 milhões de Kelvin, sendo a região onde ocorrem as reações de fusão nuclear que transformam quatro núcleos de hidrogênio em um núcleo de hélio liberando energia neste processo. Depois que esta radiação é liberada no núcleo, inicia-se uma longa jornada rumo à superfície do Sol, cuja duração pode variar de 100 mil a 1 milhão de anos. Da borda do núcleo até aproximadamente 75 % do raio solar, esta radiação flui sendo absorvida e re-emitida pelos íons da camada radiativa. Na camada convectiva, devido à baixa temperatura (aproximadamente 10 mil K) formam-se íons de hidrogênio,

carbono, nitrogênio, oxigênio e ferro, que são potentes absorvedores da radiação proveniente do núcleo, impedindo o livre fluxo da radiação como ocorria na camada radiativa. Assim, a energia passa a ser transportada em direção à superfície pelo processo de convecção. Entre a camada radiativa e a convectiva existe uma região de transição denominada de Tacoclina, onde há uma grande mudança da velocidade de escoamento do plasma solar que pode ser responsável pela geração do campo magnético desta estrela (PRIEST, 1995).

A atmosfera solar é composta por três regiões: Fotosfera, Cromosfera e Coroa, que são identificadas segundo as faixas de radiações que emitem. A fotosfera, que tem aproximadamente 300 km de espessura, e fica localizada logo acima da camada convectiva, é a região onde ocorre o máximo de emissão de radiação na faixa do visível, sendo a camada do Sol visível a olho nu. Logo acima da fotosfera se encontra a cromosfera, que é uma região avermelhada que pode ser observada a olho nu durante eclipses solares, e tem maior emissão de radiação na faixa do ultravioleta e em altas frequências de rádio. Por fim, acima da cromosfera se encontra a coroa solar que é a camada mais extensa e externa do Sol, possuindo uma temperatura mais alta e uma densidade mais baixa que as outras camadas da atmosfera solar. Há entre a cromosfera e a coroa solar uma região de transição bastante fina onde ocorrem extremas mudanças de temperatura e densidade no plasma solar que ainda não são bem entendidas. Devido às altas temperaturas das regiões solares mais externas, há sobre o plasma solar uma pressão para fora do Sol capaz de vencer a força gravitacional, produzindo uma expansão da atmosfera. Este plasma que flui para fora do Sol a uma velocidade que pode variar entre 400 e 800 km/s possui uma densidade em torno de 10^7 partículas/m³, recebendo o nome de Vento Solar (PRIEST, 1995).

Assim como a Terra, o Sol possui um campo magnético que seria produzido pela movimentação de partículas eletricamente carregadas em seu interior. Este campo pode ser aproximado a um campo de dipolo magnético, onde no plano equatorial as linhas são bastante estendidas, se conectando apenas no infinito. Isto gera uma lâmina de corrente no plano equatorial solar. O campo magnético solar se estende por toda a heliosfera, sendo arrastado pelo vento solar e, devido à rotação do Sol, suas linhas são

curvadas, apresentando a forma de uma espiral quando observado em duas dimensões, como mostra a Figura 4.1-A. A lâmina de corrente, devido ao fato do eixo magnético solar estar inclinado com relação ao eixo de rotação, apresenta a aparência de uma saia de bailarina rodopiando quando é vista em três dimensões, como é mostrado na Figura 4.1-B.

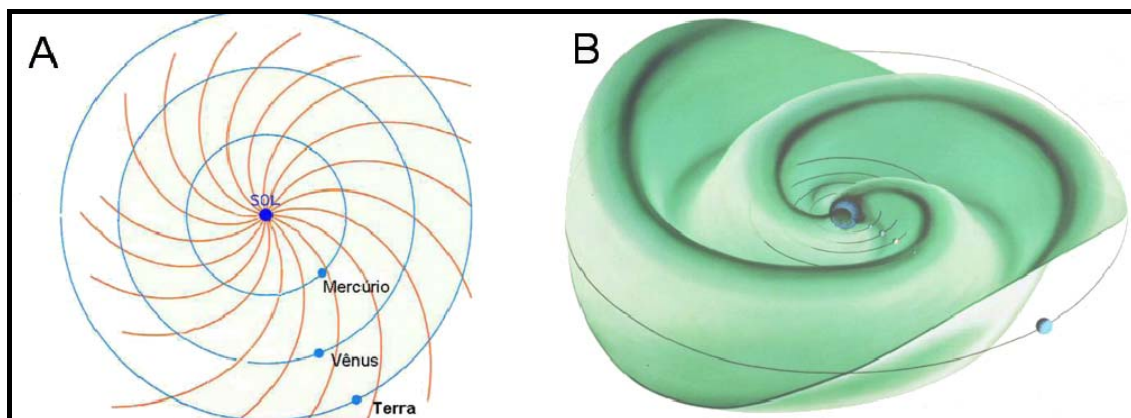


Figura 4.1 – A: Linha Espirais vistas por um observador no plano da elíptica do campo magnético solar ao longo do meio interplanetário. Concepção artística da visão em três dimensões da lâmina de corrente.

Fonte: Modificado de http://wind.gsfc.nasa.gov/mfi/lepedu/lepedu_hp.html (2011).

Uma das principais características do Sol consiste na rotação diferencial da sua atmosfera, conforme mostra a Figura 4.2, onde as regiões próximas ao equador solar apresentam uma maior velocidade de rotação do que as regiões polares.

Acredita-se que esta rotação diferencial do Sol seja responsável pela mudança de polaridade no campo magnético solar que ocorre a cada 11 anos, conforme é exposto na Figura 4.3, onde é representado o campo magnético solar em diferentes latitudes entre 1975 e Março de 2011. Nesta figura é fácil se observar a mudança de polaridade do campo magnético solar nas regiões de alta latitude (90N e 90S) ao longo dos anos. Espera-se que com o início do novo ciclo solar (ciclo 24) haja uma inversão da polaridade medida nos últimos anos, fazendo com que o pólo norte solar passe a apresentar um campo magnético positivo e o pólo sul um campo magnético negativo.

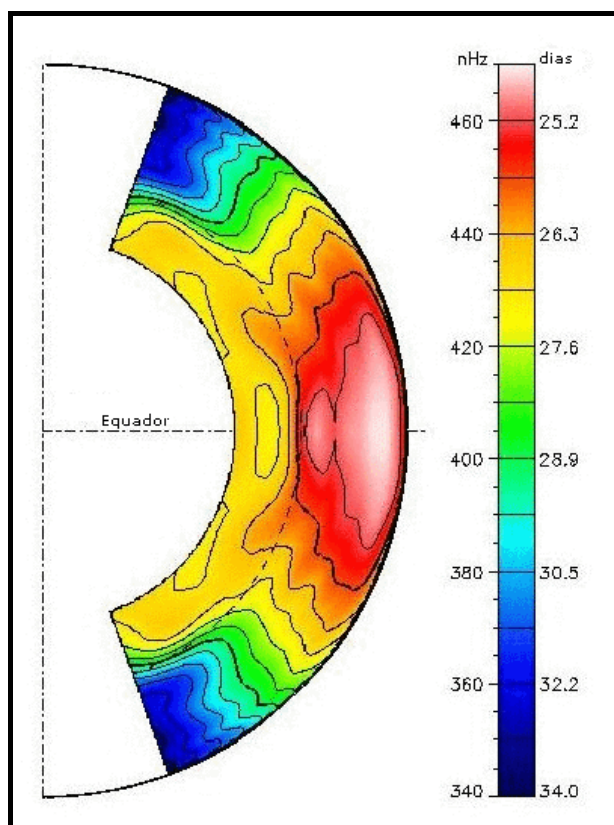


Figura 4.2 – Variação da velocidade angular de rotação do Sol (em nHz e em dias) calculada através dos dados obtidos pelo sistema GONG (Global Oscillation Network Group).
 Fonte: Modificado de <http://www.nso.edu> (2009).

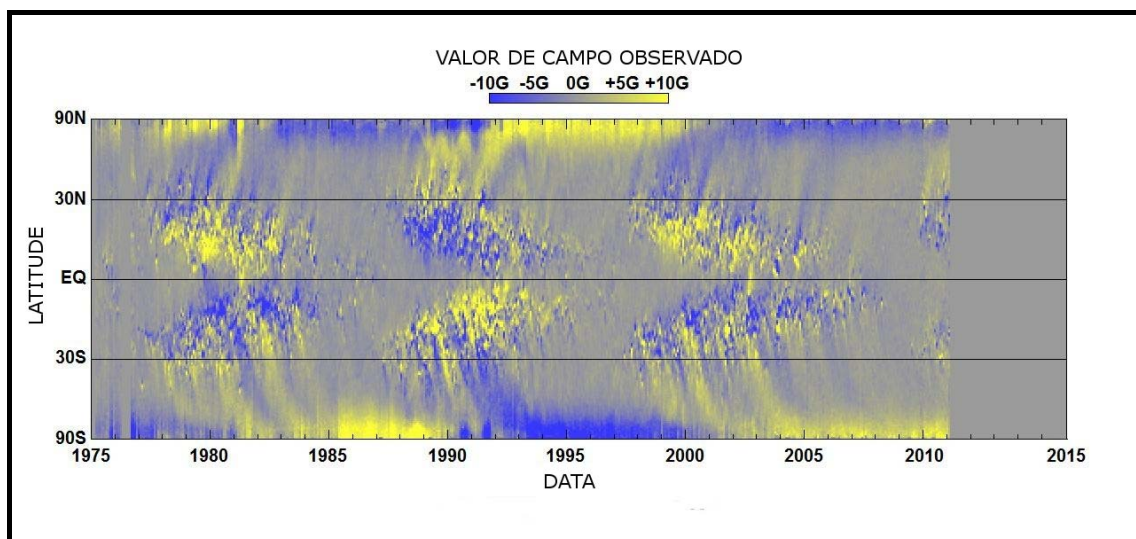


Figura 4.3 – Intensidade do campo magnético solar (medida em Gauss) em função da latitude entre os anos de 1975 e Março de 2011.
 Fonte: Modificado de <http://solarscience.msfc.nasa.gov> (2011).

Ao longo da transição de polaridade surgem, na superfície da estrela, manchas solares com diferentes polaridades magnéticas. Arcos magnéticos, que se estendem na coroa

solar, ligam duas manchas solares com polaridades opostas. Na faixa do visível, as manchas aparecem como regiões escuras devido a uma temperatura menor do que as regiões do disco próximo. Esta diferença de temperatura ocorre pelo fato do campo magnético nas manchas ser intenso o suficiente para impedir o movimento de ascensão da matéria na camada convectiva na região abaixo das manchas solares.

A variação de 11 anos do número de manchas solares, mostrada na Figura 4.4, é bem conhecida e há uma diferença no número máximo de manchas solares entre um ciclo e outro. Há também uma variação no tempo de duração dos períodos de menor número de manchas. Além do número de manchas, há outras grandezas que apresentam uma variação com um período de 11 anos. O fluxo de radiação eletromagnética em 10,7 cm de comprimento de onda e a irradiância solar são exemplos de grandezas que também acompanham o ciclo solar, como mostra a Figura 4.5.

Dois ou mais arcos magnéticos podem interagir, desencadeando um processo de reconexão magnética. Neste processo, a configuração magnética final é de menor energia do que a inicial, transformando assim o excesso de energia magnética em calor e em energia cinética para as partículas do plasma ambiente. Acredita-se que este seja o cenário mais provável de acontecer durante uma explosão solar, que pode liberar até 10^{25} J. As explosões solares podem ser visualizadas como um intenso aumento do brilho localizado sobre a região onde se deu a explosão, que pode durar de alguns minutos a várias horas. Durante uma explosão solar há emissão de radiação ao longo de todo o espectro eletromagnético e, em alguns casos, partículas aceleradas até altas energias se propagam no meio interplanetário. Devido às explosões solares estarem associadas a presença de arcos magnéticos, sua maior ocorrência se dá durante o máximo de atividade solar. Como é mostrado na Figura 4.5, a relação entre as explosões solares e o ciclo solar pode ser medida através do *Solar Flare Index* (Índice de Explosão Solar), que foi desenvolvido pelo Observatório Kandilli da Universidade Bogazici da Turquia e leva em consideração, principalmente, o tempo de duração de uma explosão e sua intensidade (http://www.koeri.boun.edu.tr/astronomy/fi_nedir.htm), acessado em 31/08/2010).

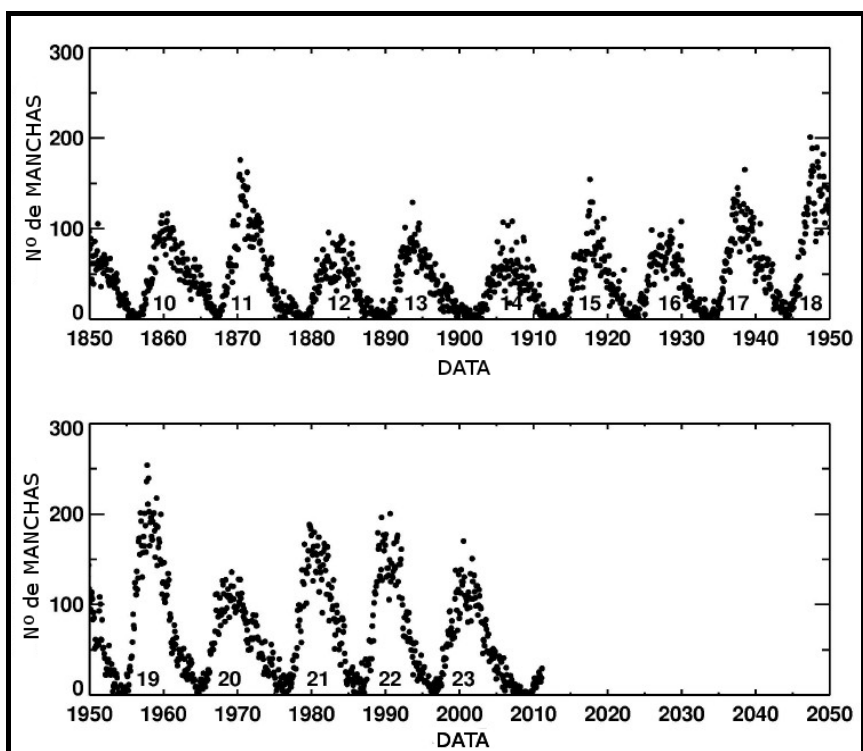


Figura 4.4 – Média mensal do número de manchas solares observadas entre os anos de 1850 e 2011.
 Fonte: Modificado de <http://solarscience.msfc.nasa.gov> (2011).

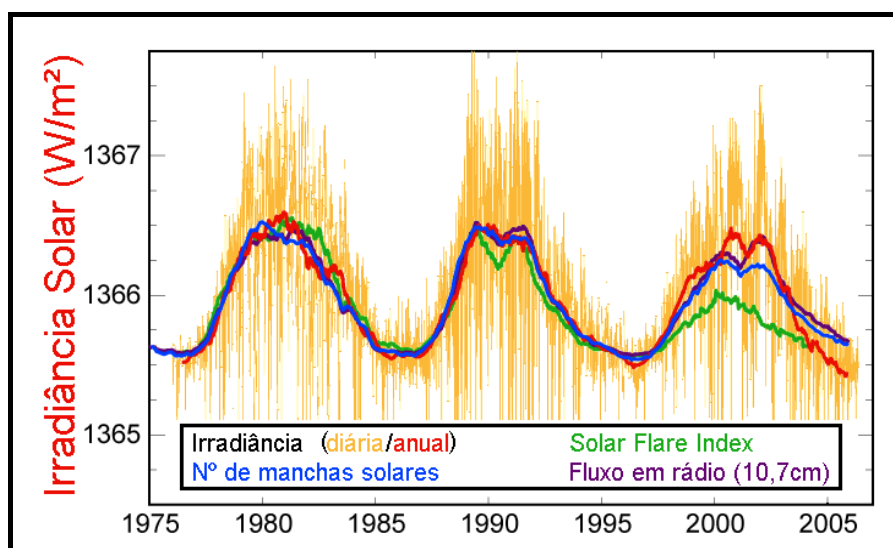


Figura 4.5 – Variação da irradiância diária (curva laranja) e anual (curva vermelha), fluxo em rádio (curva roxa), do número de manchas (curva azul) e do Solar Flare Index – índice de explosões solares (curva verde).
 Fonte: Modificado de <http://www.globalwarmingart.com> (2006).

Outro fenômeno relacionado ao ciclo de 11 anos de atividade solar são as Ejeções de Massa Coronal (CME – *Coronal Mass Ejection*), que consistem em nuvens de plasmas envoltos por um campo magnético, que são lançados pelo Sol. As CMEs também

apresentam um ciclo de ocorrência de 11 anos, sendo mais frequentes durante o período de maior número de manchas solares. Geralmente em cada ejeção são expelidos em torno de 10^{23} kg de matéria, com uma velocidade média de 400 km/s. As CMEs são bem maiores que o planeta Terra e são observadas através de coronógrafos. Quando uma dessas ejeções segue em direção a Terra, passando pela mesma, pode ocorrer uma interação do seu campo magnético com o campo geomagnético, sendo responsável por distúrbios na configuração da magnetosfera terrestre, causando tempestades geomagnéticas.

4.1.2 Variação diurna dos raios cósmicos

Desde 2006 é observada uma clara variação com periodicidade de 24 horas na contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET. Como mostram as Figura 4.6 e 4.7, esta variação pode ser claramente observada entre os meses 10/11 de um dado ano e os meses 04/05 do ano seguinte.

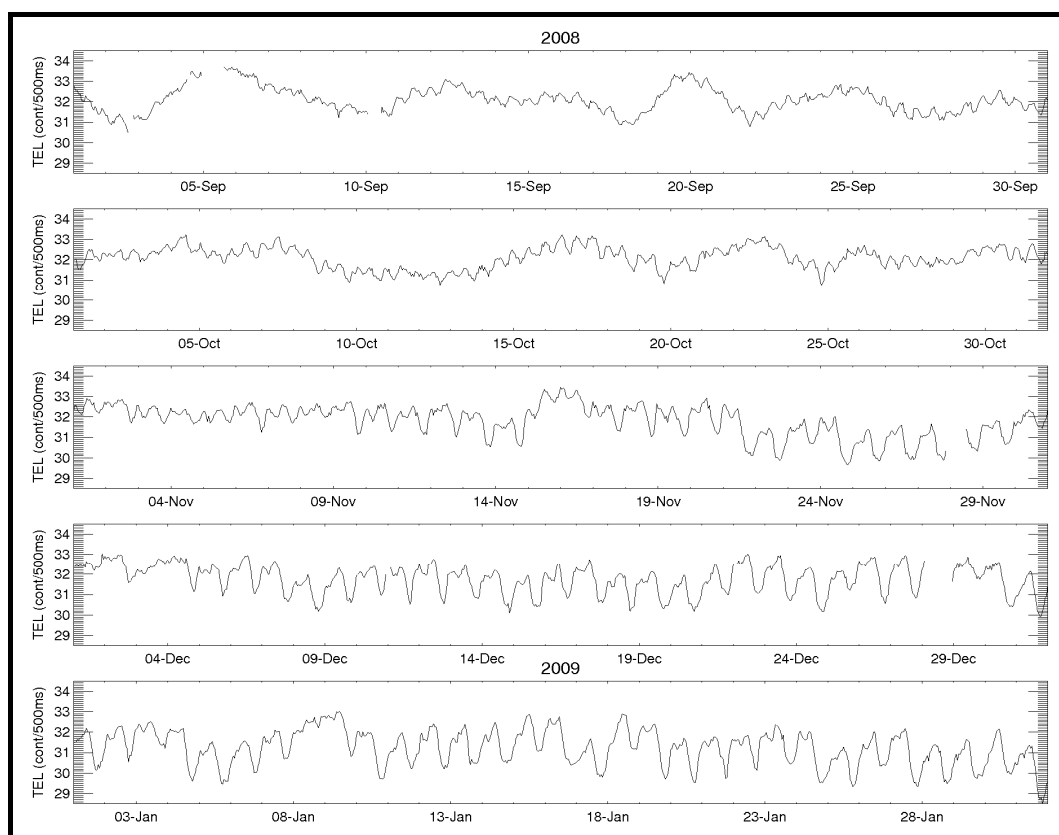


Figura 4.6 – De cima a baixo, média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre setembro e dezembro de 2008 e janeiro de 2009.

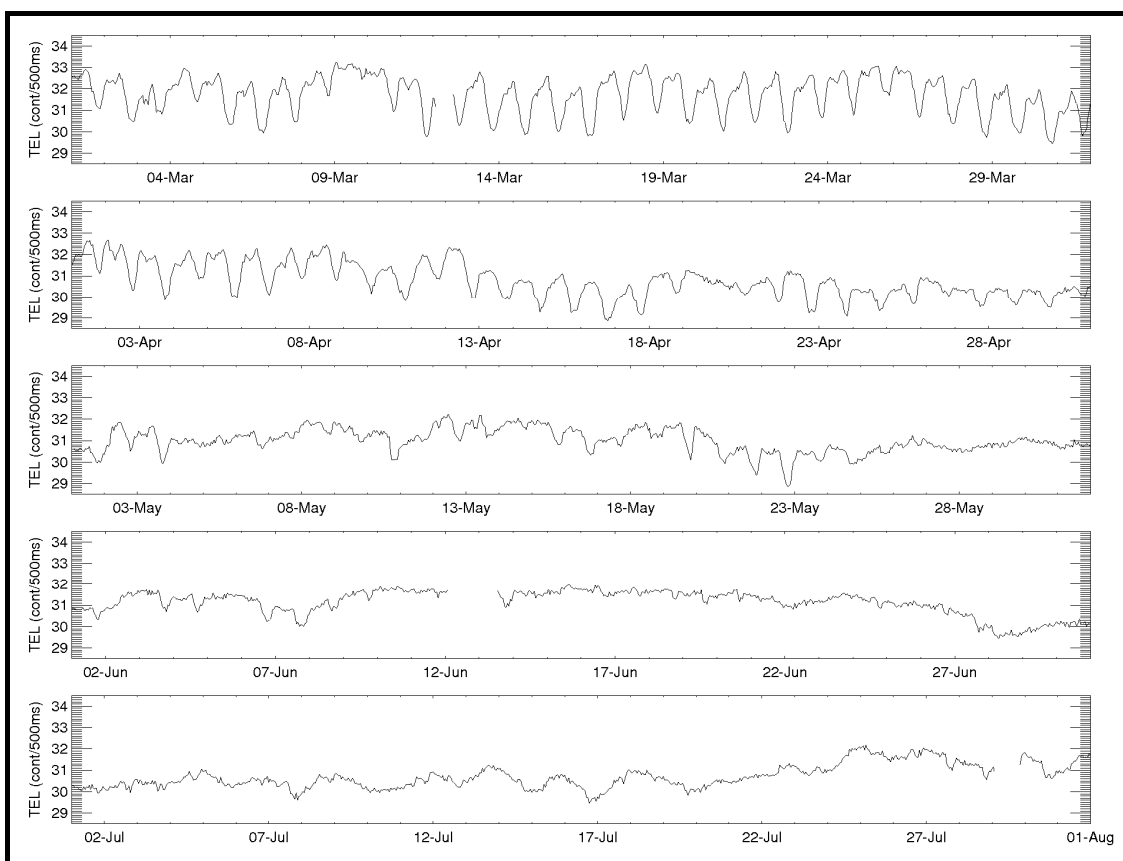


Figura 4.7 – De cima a baixo, média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre março e julho de 2009.

A variação diurna tipicamente observada em outros detectores apresenta seu valor máximo entre 12 e 21 horas locais (LT) e é bem explicada pelo modelo de convecção e difusão paralela das partículas cósmicas primárias no meio interplanetário. Porém, a variação diária vista nos dados do CARPET apresenta seu valor máximo entre 6 e 12 LT, já se corrigindo o efeito do campo geomagnético na trajetória das partículas.

Além desta componente paralela, a difusão das partículas cósmicas no meio interplanetário apresenta outras duas componentes, uma perpendicular ao campo magnético no plano da eclíptica e outra transversal ao campo magnético do meio interplanetário e ao plano da eclíptica, que são costumeiramente desprezadas nos estudos envolvendo a variação diurna. Assim, é possível que esta diferença de fase entre a variação diurna registrada no CARPET em relação à variação típica esperada, seja explicada por uma maior atuação destas duas componentes da difusão.

Estudos indicam de que a amplitude e a fase da variação diurna estejam relacionadas com o ciclo de atividade solar. Há observações de que, em períodos próximos ao mínimo solar, há um avanço de algumas horas da fase da variação diurna da contagem de raios cósmicos registrada por monitores de nêutrons (MISHRA; MISHRA, 2003; TIWARI et al, 2011). Como os dados do CARPET, até o presente momento, foram coletados em um longo período de mínimo solar, é possível que essa diferença de fase, entre a variação diurna por ele observada e a variação típica esperada, esteja relacionada com a baixa atividade solar.

Coincidentemente, ou não, a variação diurna da contagem de raios cósmicos registrada pelos três canais do CARPET apresenta uma diferença de fase de ~12 horas em relação à variação diurna do campo elétrico atmosférico, fazendo com que estas duas aparentem estar anticorrelacionadas, como é mostrado na Figura 4.8. A variação diurna do campo elétrico atmosférico, também denominada de “Curva de Carnegie”, ocorre globalmente, apresentando máximo valor às ~18 UT em qualquer lugar do planeta (GSC, 1986; ISRAEL, 1973).

Na Figura 4.8, é possível se observar que um pouco antes do meio dia há um rápido aumento na intensidade do campo elétrico atmosférico de tempo bom, que é seguido por uma rápida queda na contagem de raios cósmicos. Próximo a passagem de cada dia, há uma diminuição do valor do campo elétrico atmosférico acompanhado de um aumento da contagem de raios cósmicos. Assim, é possível que o campo elétrico atmosférico possa ser o responsável por esta atípica variação diurna nos dados do CARPET. Ou, como a variação global do campo elétrico atmosférico não tem origem conhecida, há também a possibilidade de que estes dois fenômenos sejam produzidos pela mesma causa. No entanto, a variação do campo elétrico atmosférico ocorre numa escala global, e até o momento não é possível se dizer o mesmo para a variação diurna observada pelo CARPET.

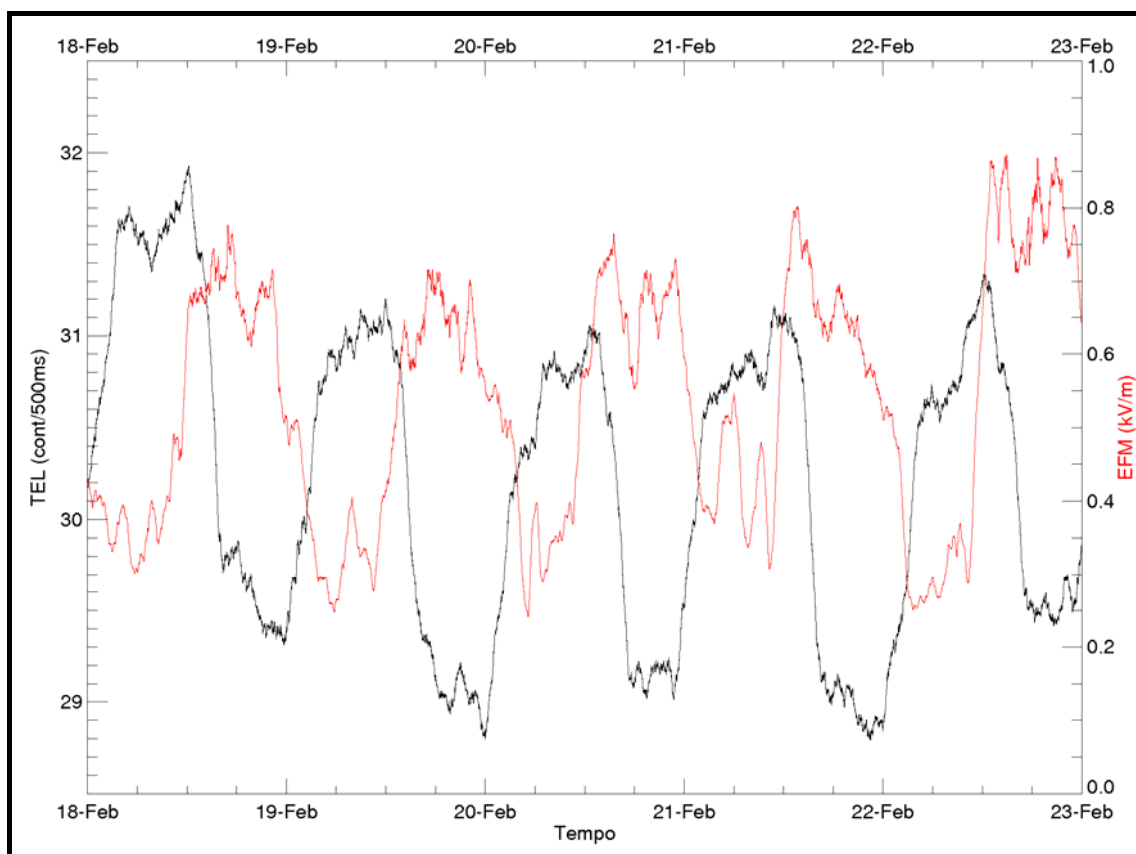


Figura 4.8 – Contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE (em preto) entre os dias 18 e 23 de fevereiro de 2010 e o valor do campo elétrico atmosférico (em vermelho) observado pelo EFM-100, no mesmo período. Os dados são mostrados em horário universal (UT).

4.1.3 Aumentos relacionados com as explosões solares

Como já dito anteriormente, acredita-se que os raios cósmicos solares sejam gerados durante explosões solares. Assim, o efeito das explosões solares na intensidade de raios cósmicos é observado através de um aumento transiente na contagem registrada por detectores dispostos no espaço ou na superfície terrestre.

Quando estes aumentos são observados por detectores de partículas de altas energias dispostos no espaço, são chamados de SPE (*Solar Protons Events*). Quando as partículas primárias observadas durante um SPE têm energia suficiente, haverá um aumento na contagem de raios cósmicos secundários em detectores dispostos na superfície. Isto denomina um evento GLE (*Ground Level Enhancement*), que é mais comumente observado durante grandes explosões solares.

O aspecto de um GLE é bastante diferente entre um detector e outro devido às diferenças entre suas características, como a energia de corte e a sua localização em relação à direção de movimento do fluxo das partículas cósmicas solares. Os aumentos na contagem de raios cósmicos, relacionados a uma explosão solar, podem ser registrados por detectores localizados no lado noturno da Terra, mostrando que a trajetória das partículas cósmicas liberadas durante uma explosão solar não é retilínea, sendo bem mais complexa (SANDSTRÖM, 1965).

Em 2006, foram observados dois SPE pelo satélite GOES-12, em 6 e 13 de dezembro. Esse último, como mostra a Figura 4.9, foi observado por vários monitores de nêutrons, diferentemente do evento do dia 6.

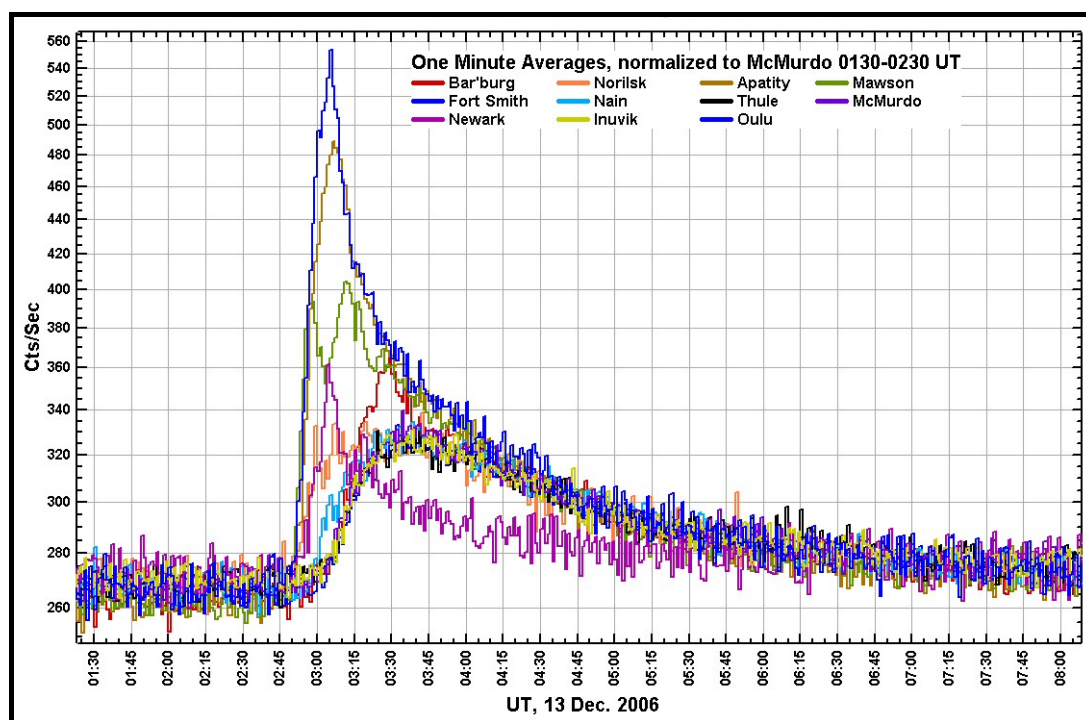


Figura 4.9 – Aumento da contagem de diversos monitores de nêutrons ocorrida no dia 13 de Dezembro de 2006.

Fonte: <http://neutronm.bartol.udel.edu/> (2010).

No período em que ocorreu o evento do dia 13 de dezembro de 2006 o CARPET não estava em funcionamento devido a uma manutenção de rotina. No entanto, para o dia 6 de dezembro de 2006, como é possível se observar na Figura 4.10, há um pequeno aumento principalmente nos sinais UP e LOW, durante um período de mínima

contagem da variação diurna, ocorrido juntamente com o incremento no número de partículas solares de altas energias ($E > 100$ MeV) observado pelo satélite GOES-12.

O evento SPE do dia 06 de dezembro de 2006 está relacionado a uma grande explosão solar ocorrida às 18:29 UT, identificada na Figura 4.10 por um significativo aumento no fluxo de raios-X. A linha tracejada indica a hora em que se deu o início do aumento na intensidade de prótons com energia superior a 100 MeV, que ocorreu juntamente com um aumento na contagem registrada principalmente pelos sinais UP e LOW (~3 % e ~2 %, respectivamente) do que pelo sinal TELESCOPE (~1%). Tanto neste dia (06/12/2006), como nos dias anterior e posterior a ele não foram observadas variações atípicas de pressão, temperatura e umidade, assim como não foram observadas variações no campo elétrico atmosférico e a ocorrência de chuvas.

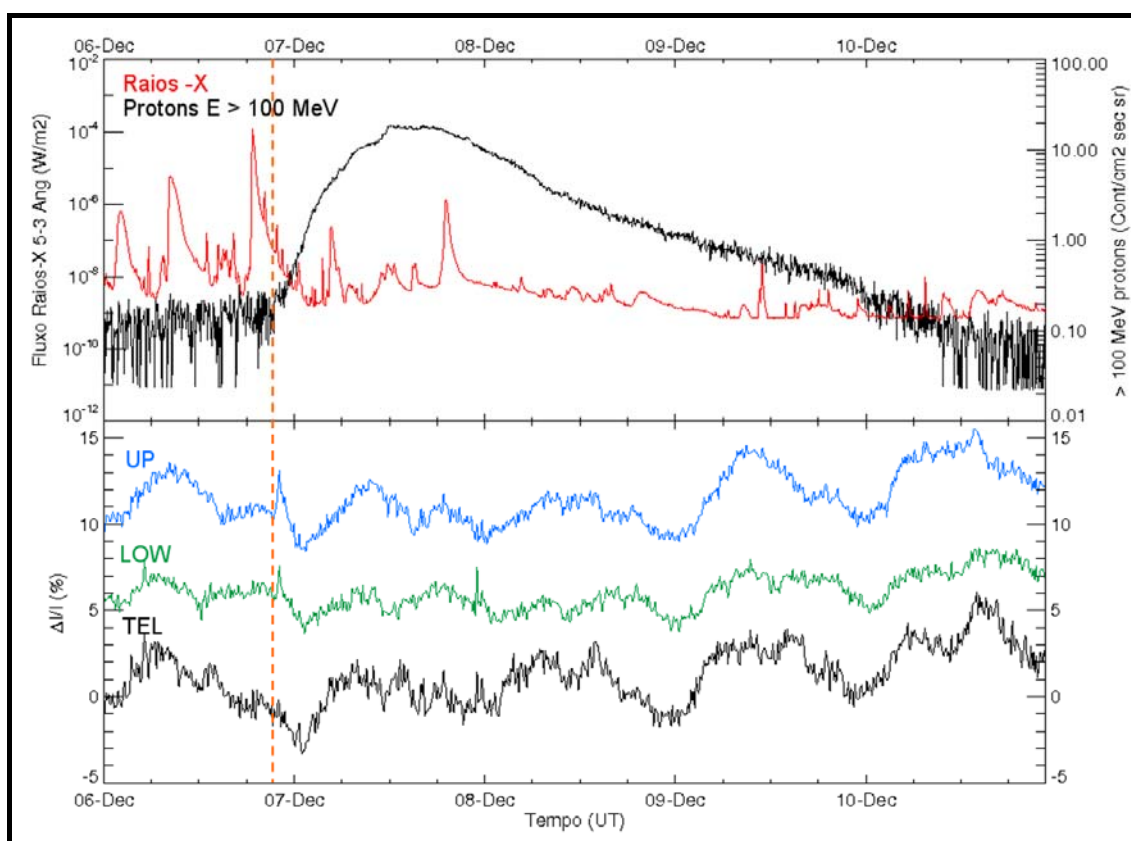


Figura 4.10 – No quadro inferior: Variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos sinais UP (linha azul), LOW (linha verde) e TELESCOPE (linha preta) entre os dias 06 e 11 de Dezembro de 2006. No quadro superior: Fluxo de raios-X (linha vermelha) e de prótons (linha preta) com energia superior a 100 MeV emitido pelo Sol. Os dados sobre a contagem de raios cósmicos são corrigidos pela pressão e pela temperatura.

Há estudos que mostram evidências de que mesmo explosões solares de baixa intensidade, onde não foram observados eventos SPE, podem produzir aumentos na contagem em detectores dispostos na superfície terrestre, (NAVIA et al, 2005). Desta forma, é possível que os pequenos aumentos da contagem registrados nos dois sinais de menor energia estejam relacionados ao aumento na contagem de partículas primárias de altas energias registrado pelo GOES-12.

No entanto, o evento do dia 06 de dezembro de 2006 não foi observado pelos monitores de nêutrons investigados neste trabalho. Isto provavelmente é devido a localização dos detectores em relação à trajetória das partículas cósmicas primárias geradas pela explosão.

4.1.4 Variações durante tempestades geomagnéticas relacionadas a fenômenos transientes solares

A principal variação da intensidade de raios cósmicos relacionada a tempestades geomagnéticas causadas por fenômenos solares é denominada Evento Forbush ou Decréscimo de Forbush, que tem sido estudada desde 1937. Estes eventos consistem em uma queda rápida, de horas a dias, do fluxo de raios cósmicos seguida por uma fase de recuperação mais longa (FORBUSH, 1994). Um evento Forbush pode ser acompanhado de uma tempestade geomagnética causada pela passagem de uma ICME sobre a Terra, o que reduz a incidência de partículas primárias em nosso planeta.

Na maioria dos eventos Forbush, juntamente com a queda na contagem de raios cósmicos, há uma perturbação no campo magnético terrestre, porém existem eventos em que estas perturbações não são observadas. Por outro lado, nem toda perturbação no campo geomagnético esta relacionada a um evento Forbush. Uma variação dos índices relacionados à atividade geomagnética, como o índice Dst, pode ser acompanhada por: (I) um decréscimo de Forbush; (II) uma diminuição gradual na contagem destas partículas, o que não denomina um evento Forbush; e (III) por nenhuma variação na intensidade de raios cósmicos (KUDELA; BRENKUS, 2004; ROSSI, 1964).

Os Eventos Forbush podem ser gerados pela passagem de uma onda de choque no meio interplanetário, ou pela passagem da estrutura causadora desta onda de choque sobre a

Terra, sendo na maioria dos casos uma composição destes dois efeitos (CANE, 1996; CANE, 2000).

Há também a possibilidade de que alguma estrutura interplanetária associada a uma onda de choque possa causar um aumento na intensidade de partículas de energias na faixa dos MeV. Acredita-se que partículas carregadas do meio interplanetário são aceleradas através de sua interação com uma onda de choque existente no meio interplanetário, produzindo desta forma raios cósmicos solares (MIROSHNICHENKO, 2001).

As nuvens magnéticas oriundas do Sol, ao se propagarem no meio interplanetário, também podem gerar uma blindagem contra os raios cósmicos, produzindo uma queda na contagem de partículas cósmicas na superfície terrestre. Diferentemente dos Eventos Forbush, a queda na contagem devido à passagem de uma nuvem magnética ocorre de forma gradual (MURSULA; USOSKIN, 2003).

Entre abril de 2006 e dezembro de 2010 foram observados 12 decréscimos na contagem de raios cósmicos observada pelo detector CARPET que foram associados a tempestades geomagnéticas moderadas ou fracas. As diminuições na contagem de raios cósmicos observadas variaram entre -2 a -7 % em relação ao valor médio anterior ao início do evento. Todos os 12 eventos tiveram início em períodos próximos aos que foram registrados inícios súbitos de tempestades geomagnéticas (*Storm Sudden Commencements* - SSC) pelo Helmholtz Centre Potsdam e ocorreram juntamente com variações nos índices Kp e Dst e na velocidade, densidade de prótons e temperatura do vento solar medidos pelo satélite ACE. Além disso, para todos os eventos, no mesmo período foram observadas variações entre -0,5 e -3,5 % na contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou. Estes 12 decréscimos observados na contagem do sinal TELESCOPE do CARPET são mostrados na Tabela 4.3 juntamente com o tempo em que foi registrado o SSC e a variação observada no monitor de nêutrons de Moscou.

A Figura 4.11 mostra um exemplo deste tipo de evento. Nela é possível se observar que logo após o SSC, registrado no dia 4 de Abril às 08:26 UT, há uma diminuição na

contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE e pelo monitor de nêutrons de Moscou. A queda na contagem registrada pelo CARPET é mais intensa que a registrada pelo monitor de nêutrons, porém mais lenta.

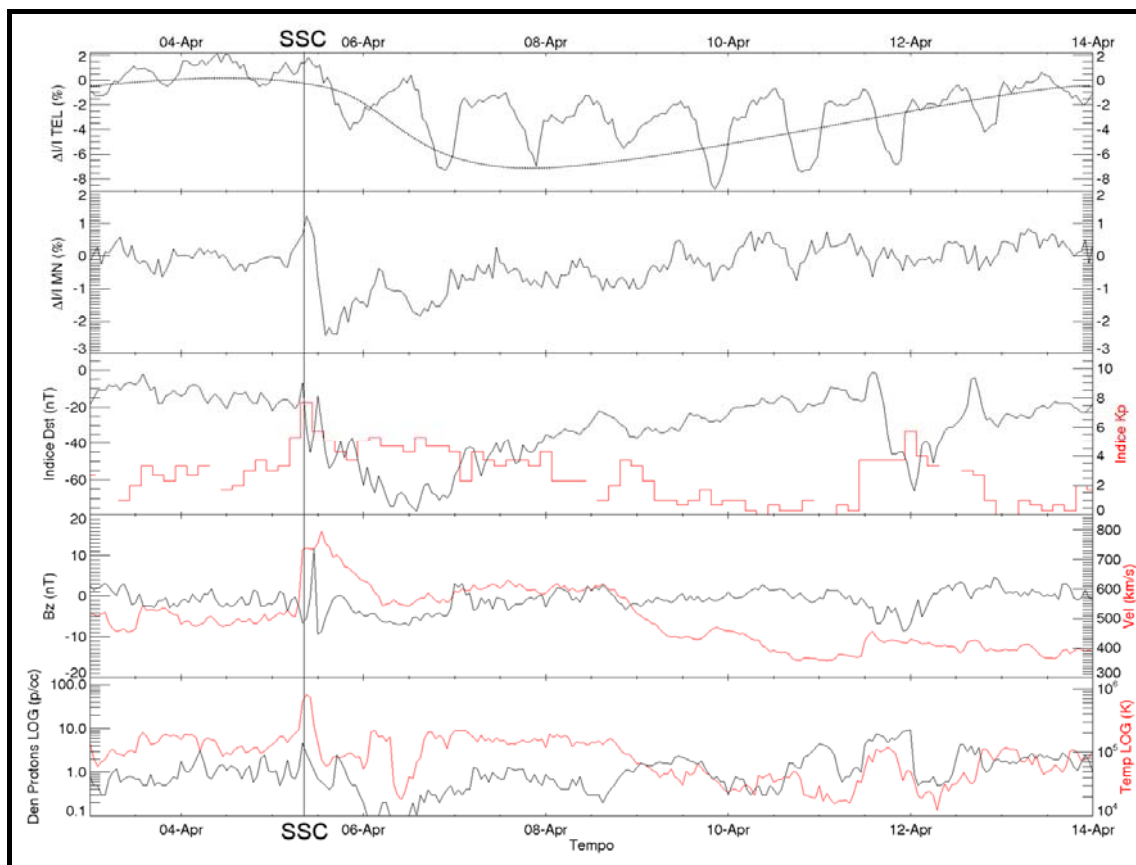


Figura 4.11 – De cima para baixo: variação relativa da média horária da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do CARPET corrigida pelos efeitos da temperatura e pressão atmosférica; variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou; índices Dst em preto e Kp em vermelho; componente sul do campo magnético interplanetário (Bz) em preto e velocidade do vento solar em vermelho, e por último, densidade de prótons e temperatura do vento solar em preto e em vermelho, respectivamente. Dados entre 03 e 14 de Abril de 2010.

Também foram encontrados 6 eventos, mostrados na Tabela 4.4, onde foi observado um aumento (3-8 %) na intensidade de raios cósmicos durante períodos de tempestades geomagnéticas. Estes aumentos foram observados em períodos próximos ao SSC, a queda no índice Dst, ao aumento do índice Kp, e as variações de parâmetros do vento solar. A Figura 4.12 mostra um exemplo deste tipo de evento. Apesar de haver um aumento na contagem registrada pelo CARPET, observa-se uma queda na contagem registrada pelo monitor de nêutrons.

Tabela 4.3 – Decréscimos na contagem de raios cósmicos registrados próximos a inícios súbitos de tempestades geomagnéticas

Data registro SSC (UT)	Decréscimo NM Moscou (%)	Decréscimo CARPET (%)
2006/04/20 11:12	1,5	4,6
2006/07/27 13:53	1,0	3,0
2007/04/09 04:42	1,6	7,6
2007/05/21 23:20	1,7	6,1
2007/06/21 09:31	0,6	4,4
2007/10/25 11:35	0,5	6,2
2007/11/19 18:11	2,0	4,6
2008/08/08 23:44	2,5	6,2
2008/11/24 23:51	3,0	4,6
2009/05/28 05:19	1,0	1,6
2010/04/05 08:26	3,5	4,8
2010/05/02 09:08	1,0	3,0

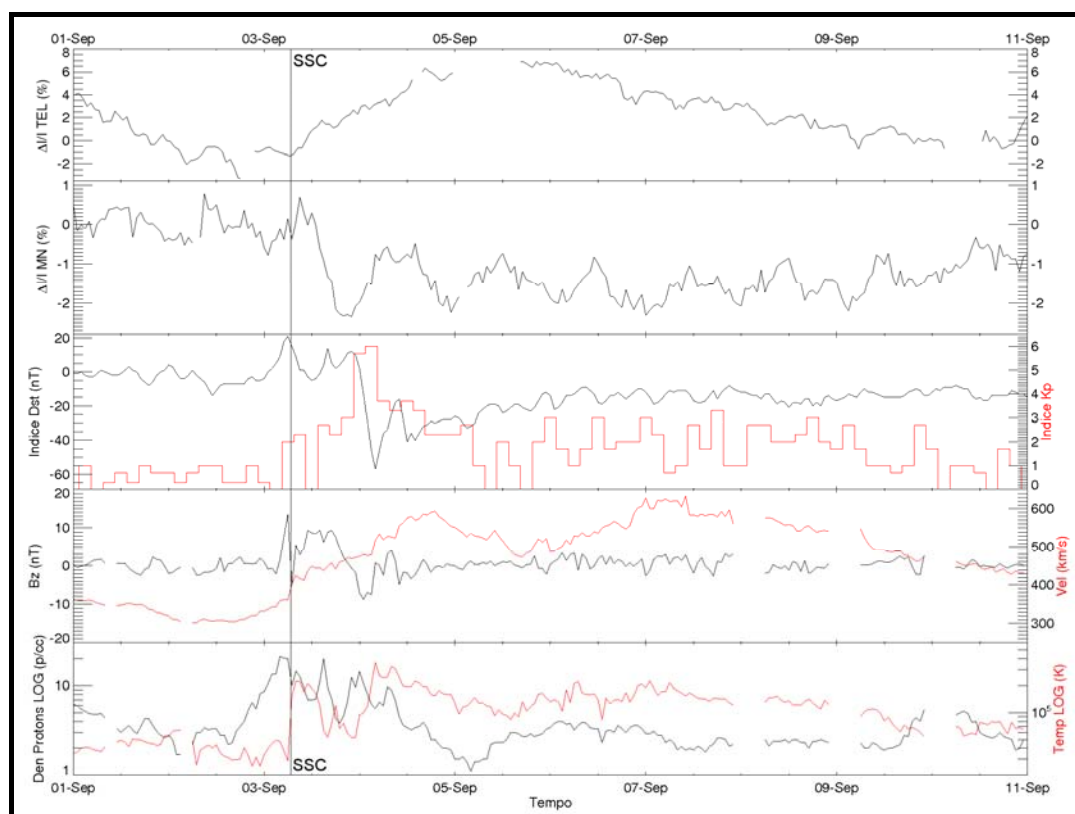


Figura 4.12 – De cima para baixo: variação relativa da média horária da contagem de partículas cósmicas registrada pelo sinal TELESCOPE; variação relativa da contagem de raios cósmicos observada pelo monitor de nêutrons de Moscou; índices Dst em preto e Kp em vermelho; componente sul do campo magnético interplanetário (Bz) em preto e velocidade do vento solar em vermelho, e por último, densidade de prótons em preto e temperatura do vento solar em vermelho. Dados mostrados entre 01 e 11 de Setembro de 2008.

Tabela 4.4 – Aumentos da contagem de raios cósmicos ocorridos próximos a inícios súbitos de tempestades geomagnéticas

Data registro SSC (UT)	Aumento CARPET (%)
2006/09/04 00:20	7,9
2007/05/07 08:26	7,7
2007/05/22 05:55	5,0
2007/08/06 14:09	6,5
2008/07/12 00:38	3,0
2008/09/03 06:40	7,5

É necessário um estudo mais aprofundado destes eventos, analisando-se, entre outros fatores, as estruturas interplanetárias e ondas de choque observadas durante estes aumentos de raios cósmicos registrados pelo CARPET.

4.1.5 Variações relacionadas aos ciclos de 11 e 22 anos da atividade e do campo magnético solar

A influência do ciclo de 11 anos da atividade solar pode ser observada através da anticorrelação entre a intensidade de raios cósmicos e parâmetros relacionados ao ciclo solar, como o número de manchas e o fluxo em ondas de rádio com 10,7 cm de comprimento de onda (F10.7). Além desta variação de 11 anos, o ciclo de atividade solar também pode afetar a amplitude da variação diurna da contagem de raios cósmicos (SANDSTRÖM, 1965).

A Figura 4.13 mostra a variação da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou e a média mensal do número de manchas solares entre Janeiro de 1958 e Janeiro de 2011. Nesta figura nota-se que quando há um maior número de manchas solares (máxima atividade) há uma menor intensidade de raios cósmicos, enquanto que nos períodos de baixa atividade há uma maior intensidade de raios cósmicos.

A anticorrelação entre a atividade solar e a intensidade de raios cósmicos ocorre porque durante o período de máxima atividade, os campos magnéticos solar e interplanetário são mais complexos, incluindo regiões ativas magnéticas, estruturas de grandes escalas espaciais, CME's, nuvens magnéticas, etc... Desta forma, é dificultada a entrada de raios

cósmicos galácticos na heliosfera, resultando em uma diminuição na intensidade total de partículas cósmicas registrada na Terra. Por outro lado, em um período de mínima atividade solar há uma maior entrada de raios cósmicos galácticos por causa do campo magnético solar ser mais simétrico (STOZHKOV et al, 2001).

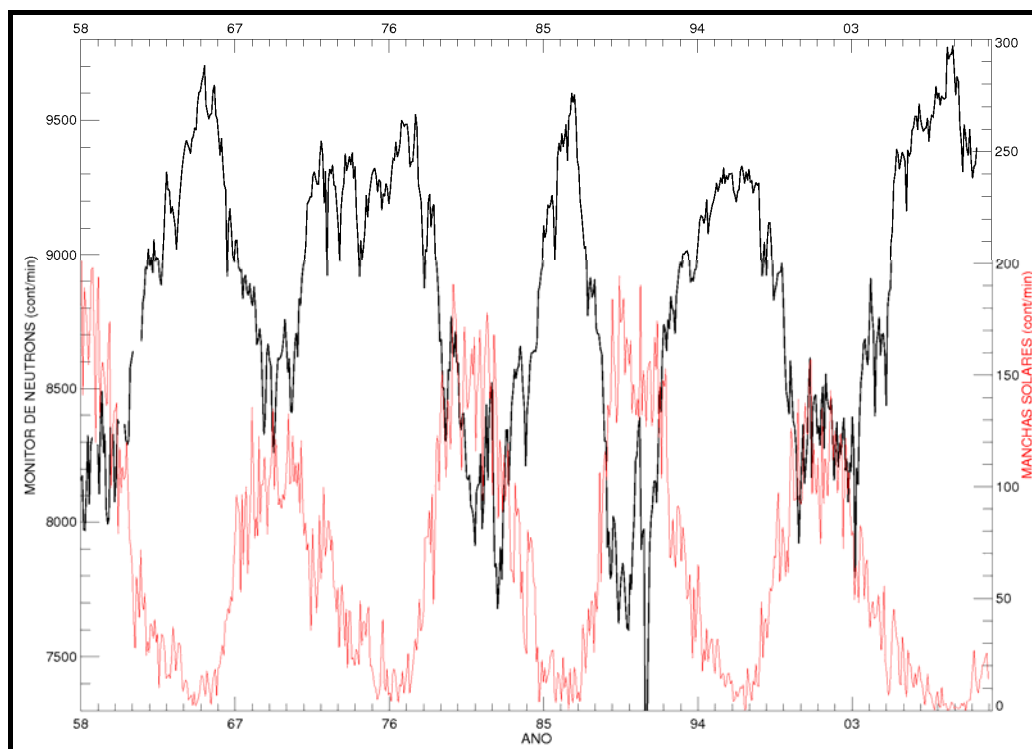


Figura 4.13 – Média mensal da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou em preto e, em vermelho, média mensal do número de manchas solares observado pelo SWPC-SWO (Space Weather Prediction Center - Space Weather Operations).

As partículas de maior energia são menos afetadas pelo campo magnético do meio interplanetário, e logo apresentam uma variação menor com a atividade solar que as partículas de menor energia, que são fortemente afetadas. Assim, detectores em regiões de maior rigidez magnética e com maior energia de corte, apresentam uma variação menor em sua contagem (OTAOLA; VALDÉS-GALICIA, 1992).

Na Figura 4.13 também é possível se notar que os períodos de máxima intensidade de partículas cósmicas são diferentes, havendo uma alternância entre variações em forma de picos e platôs. Este fato ainda não é totalmente explicado pelos modelos de transporte de raios cósmicos ao longo da heliosfera, mas acredita-se que a deriva das partículas nas linhas do campo magnético esteja relacionada a esta diferença. Quando o

pólo magnético solar norte é de polaridade positiva as partículas cósmicas entram na heliosfera pelas regiões polares e saem pelo equador. Quando há inversão das polaridades magnéticas nos pólos solares, a situação se inverte, e as partículas cósmicas entram pelo equador e saem pelos pólos. Neste último caso, como as partículas cósmicas entram na heliosfera pela lâmina de corrente, há uma maior difusão das partículas cósmicas, o que acarretaria a forma de pico durante o mínimo de atividade solar (SINGH; BADRUDDIN, 2006).

Desde o início do funcionamento do CARPET, o Sol encerrou um longo período de mínima atividade. Devido a este fato, e mesmo com apenas 5 anos de observação, já é possível notar uma variação na contagem de raios cósmicos relacionada ao ciclo de 11 anos do Sol. Como mostra a Figura 4.14, há um lento aumento na contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE até Outubro de 2008, seguido de uma rápida diminuição após esta data. Portanto, a máxima contagem de partículas ocorre entre Julho e Outubro de 2008, período em que o número de manchas e o fluxo F10.7 apresentam os seus valores mínimos.

A Figura 4.15 mostra a correlação entre a média mensal do número de manchas solares e a variação da contagem de raios cósmicos relativa ao valor máximo medido em 2008. Nesta figura é possível se observar duas tendências, uma em vermelho, que representa o período em que a atividade solar diminuiu (04/2006 – 06/2008) e outra em azul que representa o período de ascendência da atividade solar (01/2009 – 06/2010). Nesta figura, é possível se observar que o coeficiente angular durante a diminuição da atividade solar é aproximadamente $-0,073 \pm 0,003$ %/mancha, sendo menor que o coeficiente angular do período referente ao aumento da atividade solar, que é aproximadamente $-0,112 \pm 0,007$ %/mancha. A mesma característica é também observada ao analisarmos a contagem de raios cósmicos e o fluxo solar na faixa de rádio. Este fato mostra que a intensidade de raios cósmicos, no período estudado, respondeu de forma mais efetiva ao aumento da atividade solar do que a sua diminuição.

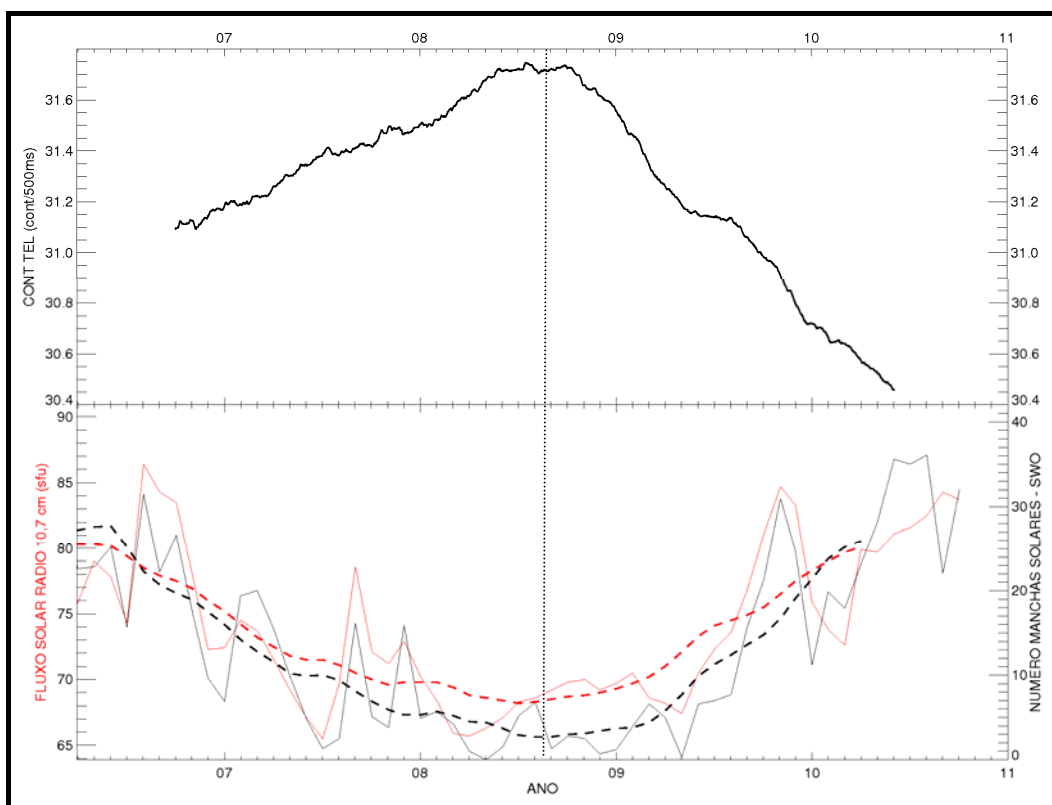


Figura 4.14 – No quadro superior é mostrada a média corrida de 12 meses da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE entre 2006 e 2011. No quadro inferior é mostrada em preto a média mensal do número de manchas solares observado pelo SWPC-SWO e em vermelho o fluxo solar na faixa do rádio (10,7 cm de comprimento de onda).

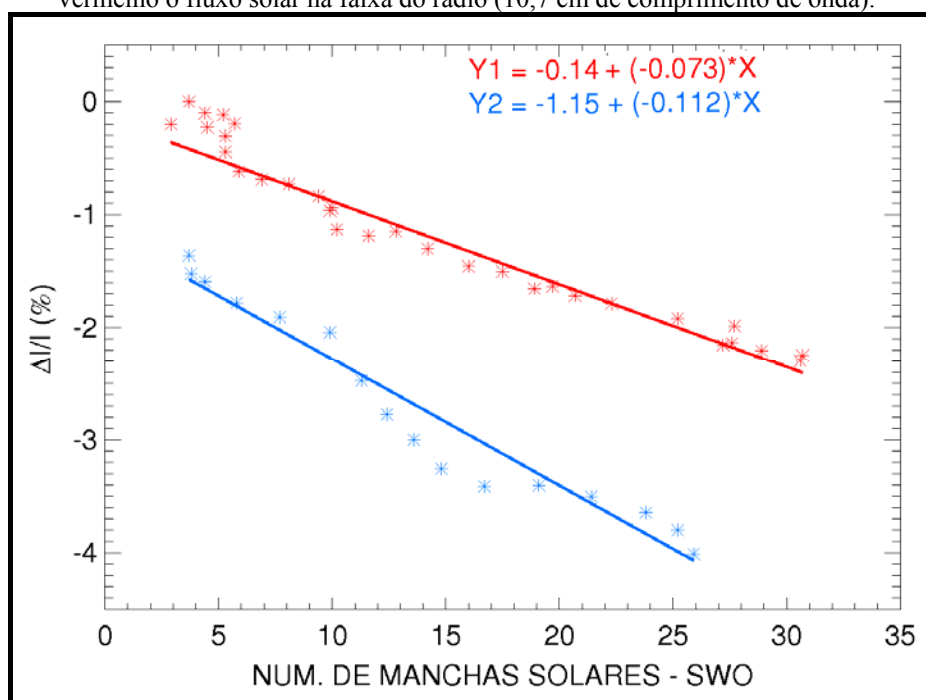


Figura 4.15 – Correlação entre a média corrida de 1 ano do número médio mensal de manchas solares e da variação relativa da contagem de raios cósmicos no período de diminuição da atividade solar (em vermelho) e de aumento (em azul).

Finalmente a Figura 4.16 mostra que a variação de longa escala na contagem registrada pelo CARPET está bem relacionada com a variação observada nos dados registrados pelo monitor de nêutrons de Moscou. Nesta figura é possível se observar que a variação registrada pelo CARPET até o presente momento (entre Abril de 2006 e Janeiro de 2011) é bastante similar a registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou.

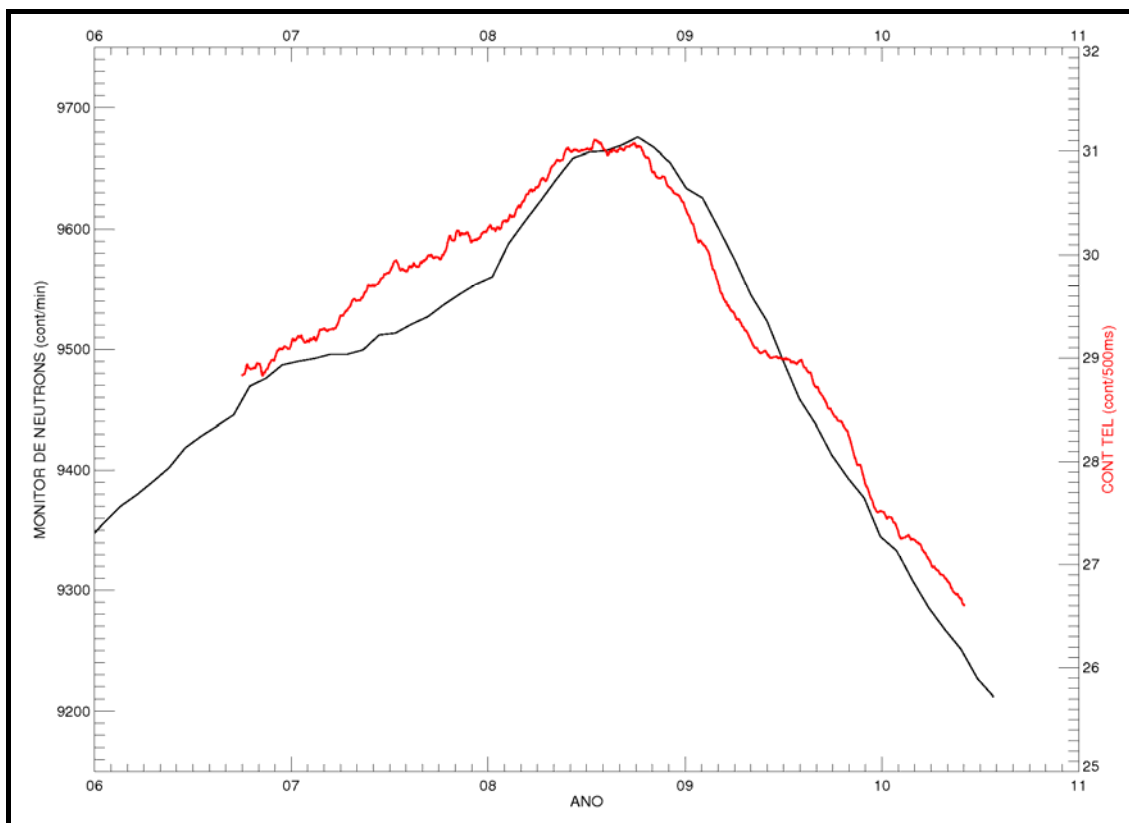


Figura 4.16 – Média mensal da contagem de partículas registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou (curva preta) entre 1958 e 2011, e a média corrida de 12 meses da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do CARPET (curva vermelha) desde seu início de funcionamento até Janeiro de 2011.

A variação de longa duração da contagem de raios cósmicos registrada pelo sinal TELESCOPE do CARPET está bem relacionada com a atividade solar e com a variação da contagem de raios cósmicos registrada pelo monitor de nêutrons de Moscou observada no mesmo período. Esta variação, que apresentou uma maior intensidade em meados de 2008 e que representa a modulação de raios cósmicos primários com energias superiores a 12 GeV, fornece informações para os estudos ligados a teoria de transporte de partículas cósmicas na heliosfera.

4.2 Variações relacionadas à ocorrência de chuva e as mudanças no campo elétrico atmosférico

Sabe-se que durante períodos de precipitação chuva ou de neve há um aumento de raios gamas na superfície terrestre. Este aumento ocorre devido à maior concentração de radionuclídeos no solo trazidos de alturas superiores da atmosfera pelas gotas de chuva ou flocos de neve durante a precipitação (KATASE et al, 1982). Como os dois canais de menor energia do CARPET são sensíveis à radiação gama, pode ocorrer um aumento na contagem de partículas registrada nestes sinais em períodos de chuva. Estes aumentos de contagem nos sinais UP e LOW, se associados somente ao aumento da radiação gama ambiente, não representaram mudanças na intensidade das partículas cósmicas secundárias que incidiram sobre o CARPET.

Como mostra a Figura 4.17, estes aumentos são bastante significativos, sendo facilmente identificáveis quando comparados com outras variações de curta duração relacionadas com outros fenômenos. As variações de contagem registrada pelo sinal UP no dia 25 de outubro de 2008 não seguem o padrão das variações ocorridas nos outros dias deste mês, e notam-se dois aumentos significativos que foram bem associados a períodos de chuva.

A Figura 4.18 mostra, com maiores detalhes, o comportamento da contagem registrada pelos três sinais do CARPET durante períodos chuvosos. Observamos variações da contagem somente nos canais de menor energia. A contagem registrada pelo sinal TELESCOPE, que não é sensível a radiação gama, permaneceu praticamente inalterada.

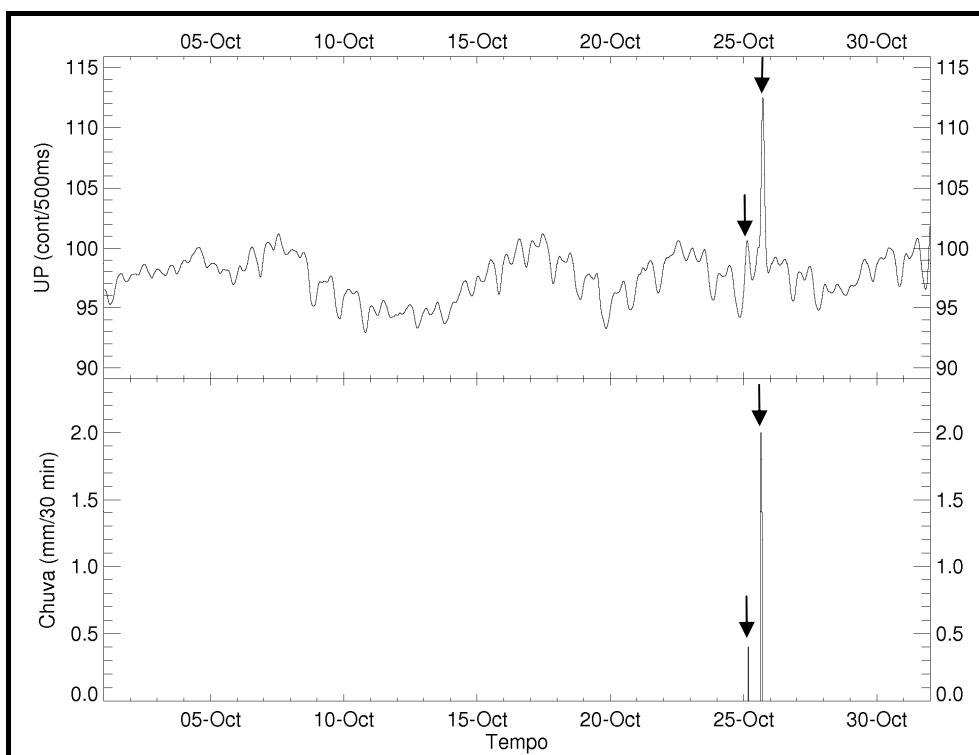


Figura 4.17 – Média horária da contagem de raios cósmicos registrada no sinal UP e medida de chuva em milímetros registrados no mês de Outubro de 2008.

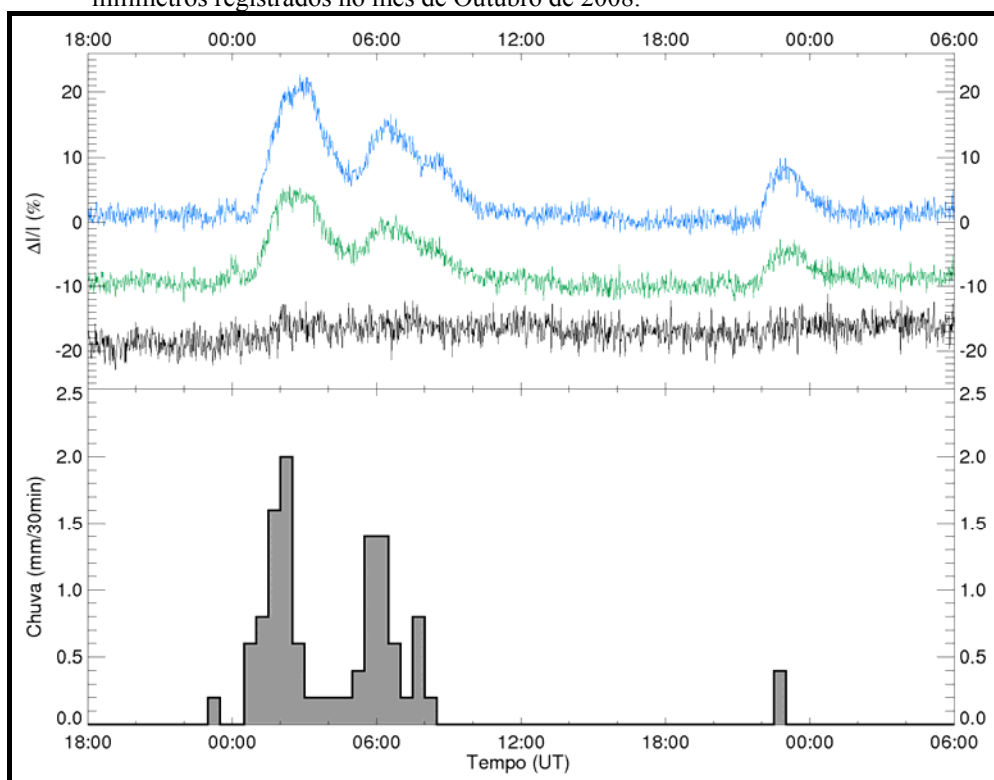


Figura 4.18 – Variação relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos sinais UP (azul), LOW (verde) e TELESCOPE (preto) entre às 18 UT do dia 21/01/2006 e às 06 UT do dia 22/01/2006. Os histogramas de cor cinza no quadro inferior representam o índice de chuvas registrado a cada meia hora.

Um estudo com todos os eventos onde foram observados aumentos na intensidade de raios cósmicos nos sinais UP e LOW durante períodos de chuva mostrou que a grande maioria deles ocorreu em períodos de baixa atividade geomagnética. Apenas 4,3 % dos eventos foram registrados em períodos com índice Kp superior a 5 e 82 % foram observados em períodos sem tempestades geomagnéticas ($Dst > -30$ nT). Desta forma, é improvável que haja uma relação entre estes aumentos na contagem de raios cósmicos e a atividade geomagnética (DE MENDONÇA et al, 2010).

Similarmente, verificamos o comportamento da pressão e temperatura atmosféricas durante os aumentos registrados pelo CARPET em períodos chuvosos. Constatou-se que durante 84 % destes eventos não foram observadas variações de pressão maior que 4 hPa. Em 88 % dos casos, também não houve variações de temperatura maior do que 5 °C. Portanto, é possível se afirmar que não há significativas influências destes dois parâmetros nos eventos estudados.

Foram selecionados 68 eventos do tipo simples, como o mostrado na Figura 4.19, descartando-se eventos complexos onde diferentes aumentos da contagem de raios cósmicos se subrepõem, como o ilustrado na Figura 4.18 entre 0 e 10 UT. Para cada um destes eventos simples foram calculados a A_C (área abaixo da curva entre o início e o pico do aumento de contagem de raios cósmicos) e o acúmulo de chuva registrado durante o evento. O resultado desta análise é mostrado na Figura 4.20, onde notam-se duas tendências, havendo a possibilidade de uma terceira. Assim, a relação entre os aumentos de contagem nos sinais UP e LOW do CARPET não apresenta uma simples relação com a quantidade de chuva, possibilitando a influência de outros processos nestes aumentos.

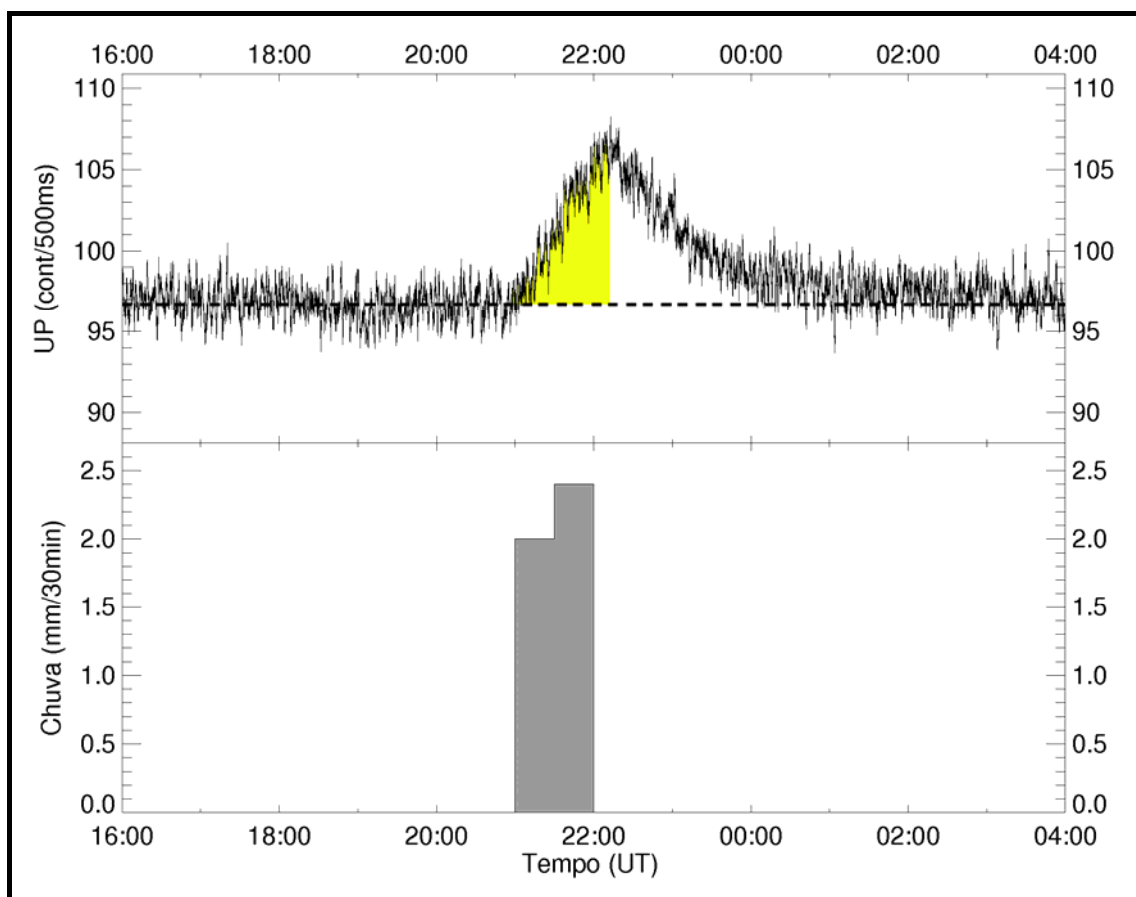


Figura 4.19 – Exemplo de um evento simples (apenas um pico) relacionado à ocorrência de chuva. A área de cor cinza representa a grandeza denominada de A_c . No gráfico são mostrados os dados observados entre 24/01 as 16:00 UT e 25/01 as 04:00 UT do ano de 2007.

Katase et al. (1982) mostraram que existe uma proporcionalidade entre a quantidade de água precipitada e o aumento da radiação gama, cujo fator de proporção varia de evento para evento e depende principalmente da concentração de radionuclídeos na água precipitada. Segundo Mercier et al. (2009), a concentração de radionuclídeos na água precipitada é uma função não trivial da distribuição e da concentração destas partículas na massa de ar acima do local onde a chuva foi registrada e na massa de ar onde a nuvem se formou.

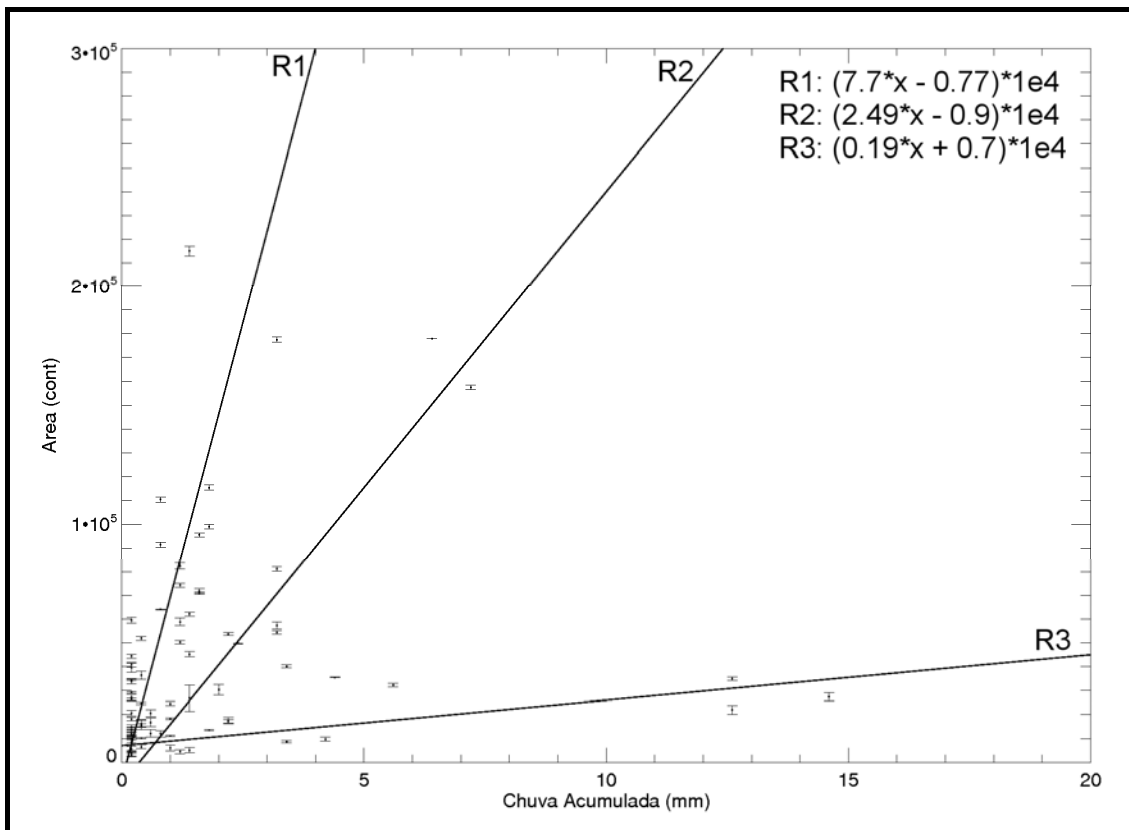


Figura 4.20 – Tendências encontradas entre a integral da contagem de raios cósmicos entre o início e o pico do evento (A_c) e o acúmulo de chuvas ocorrido no mesmo período.

A existência de outros processos atuantes nas variações da contagem detectada pelo CARPET, é ressaltada pelo fato de cerca de 30 % do total dos eventos registrados entre abril de 2006 e janeiro de 2008, terem ocorridos sem a presença de chuva. Assim, há a possibilidade de o fenômeno causador dos aumentos no sinal de raios cósmicos na ausência de chuva, ter também influenciado a contagem de raios cósmicos durante períodos com chuva.

Após a instalação do monitor de campo elétrico atmosférico EFM-100 em 2008, verificamos que os aumentos detectados com o CARPET em períodos sem chuva estão na mesma proporção de antes de 2008 (~30% do total de eventos) e são associados com variações no campo elétrico atmosférico, como o evento mostrado na Figura 4.21. Assim, os eventos ocorridos sem chuva, antes de 2008, foram provavelmente causados por variações no campo elétrico atmosférico.

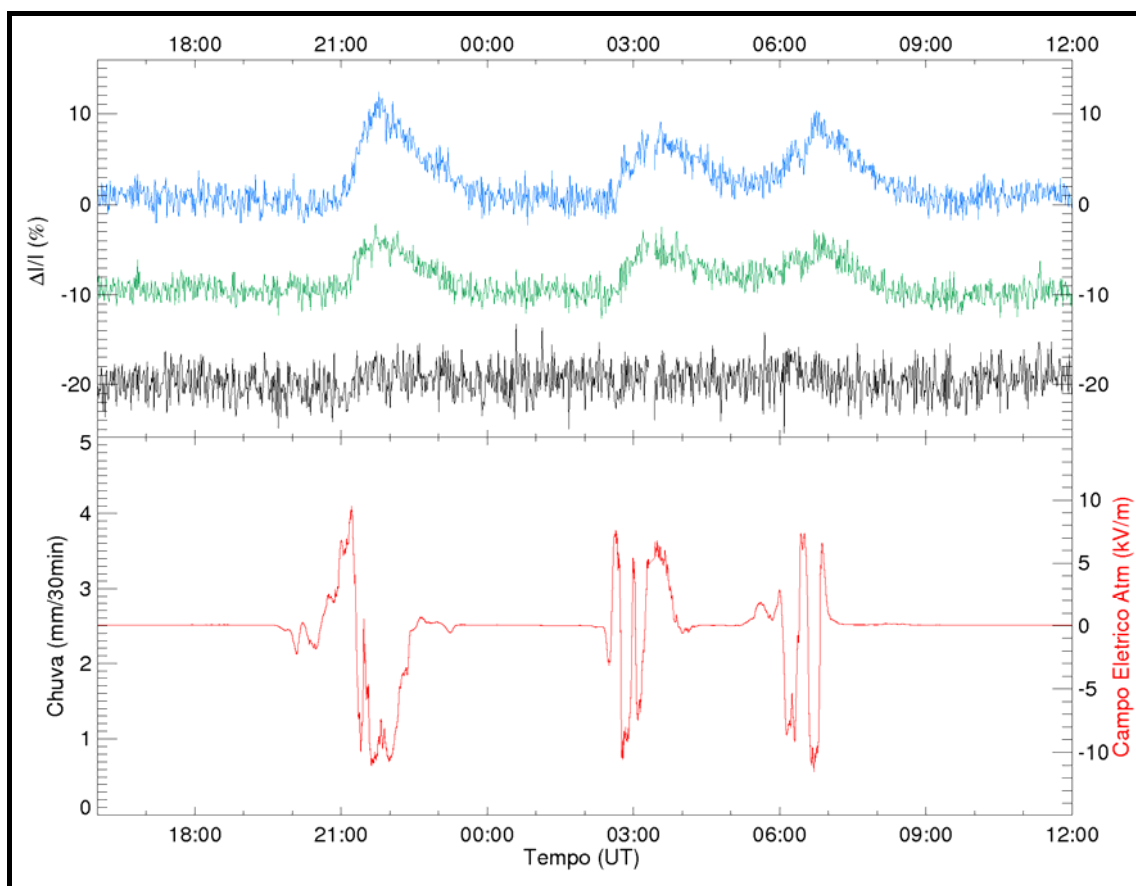


Figura 4.21 – Contagem registrada pelos sinais UP, LOW e TELESCOPE do CARPET entre o dia 11/08/2008 às 16:00 UT e o dia 12/08/2008 às 12:00 UT, período em que não foi registrada a ocorrência de chuva, apenas variações do campo elétrico atmosférico (curva vermelha no quadro inferior).

Desde o início das medidas do campo elétrico atmosférico até o presente momento, todos os aumentos de contagem de partículas registradas pelos sinais UP e LOW ocorreram juntamente com variações do campo elétrico atmosférico, independentemente da ocorrência de chuva. As Figuras 4.21 e 4.22 mostram respectivamente exemplos de eventos observados sem e com a ocorrência de chuva.

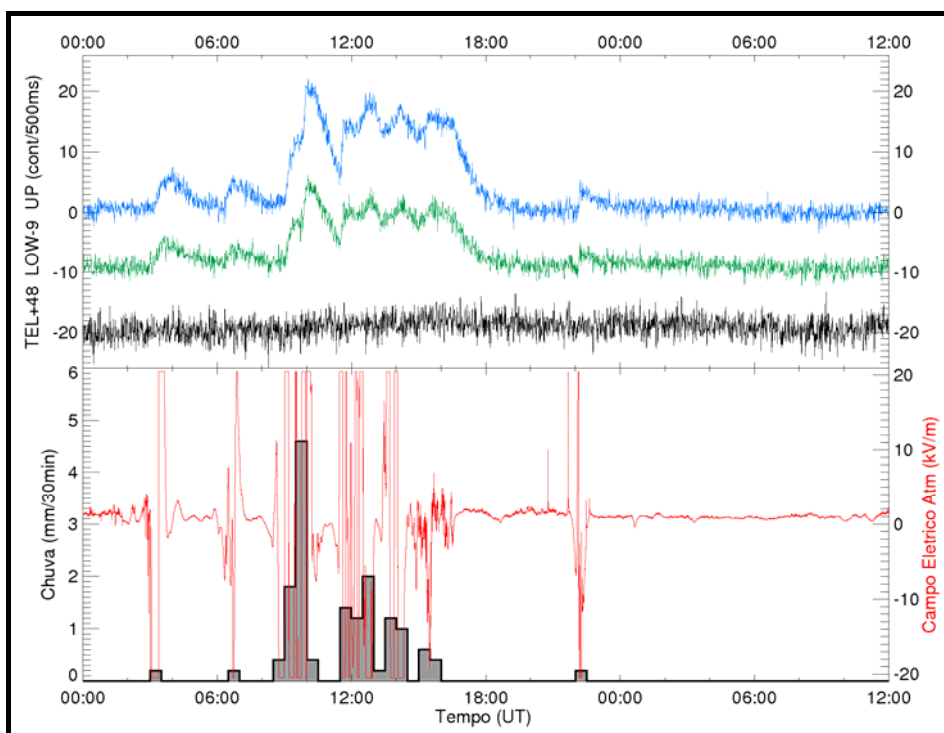


Figura 4.22 – Variação da contagem registrada nos três sinais do CARPET durante um período de ocorrência de chuva (histograma cinza) e de variações no campo elétrico atmosférico (curva em vermelho). Dados mostrados entre os dias 10/03/2008 às 00 UT e 11/03/2008 às 12 UT.

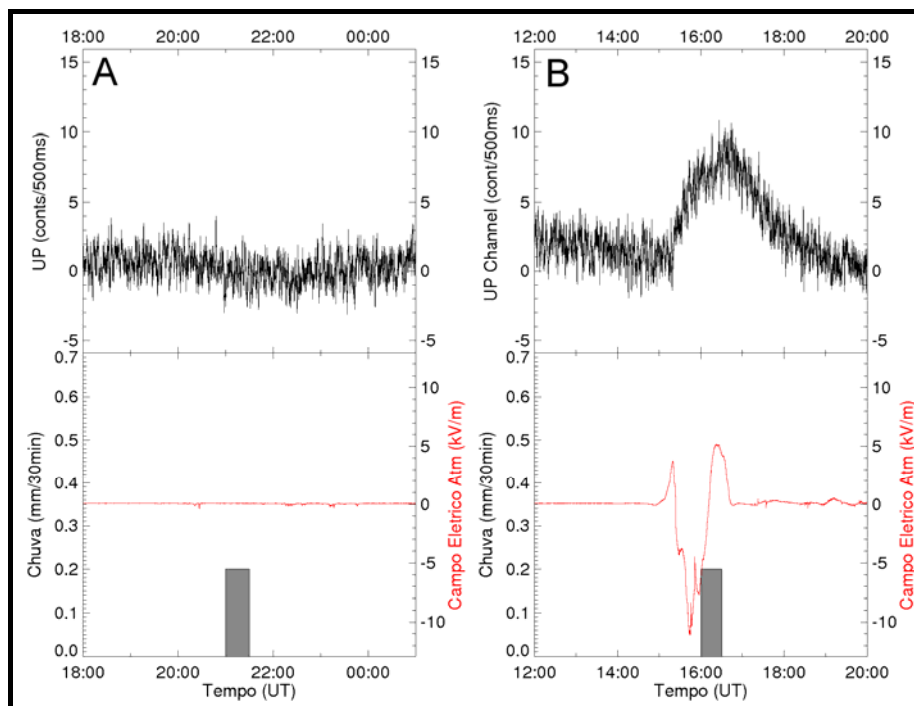


Figura 4.23 – As linhas curvas vermelhas representam os valores de campo elétrico atmosférico registrados no mesmo período. O quadro “A” apresenta os dados observados entre o dia 14/01/2010 às 18:00 UT e o dia 15/01/2010 às 01 UT, o Quadro “B” apresenta os dados observados no dia 25/01/2010 entre 12 e 22 UT.

Outro fato que evidencia a maior influência do campo elétrico atmosférico nos aumentos de curta duração da intensidade de raios cósmicos aparece ao se analisar os eventos observados em períodos de pequenas precipitações de água ($\leq 0,4$ mm). Como mostra a Figura 4.23-A, durante um período onde foi registrada uma chuva de 0,2 mm, sem variação no campo elétrico atmosférico, não houve variação da intensidade de raios cósmicos registrada pelo sinal UP. Já em um período diferente em que a mesma quantidade de chuva foi registrada juntamente com uma variação no campo elétrico atmosférico, há um aumento na contagem de partículas no sinal UP, como mostra a Figura 4.23-B.

Os resultados discutidos no parágrafo anterior estão de acordo com estudos de outros autores, e mostram que a relação entre a quantidade de água precipitada e o aumento da radiação gama ambiente não ocorre de forma simples. Durante todos os eventos de aumento de intensidade de raios cósmicos registrado pelo CARPET: (I) a eficiência na detecção de raios gama pelo canais UP e LOW é muito baixa ($\sim 1\%$); (II) 30 % dos eventos foram observados sem ocorrência de chuva; (III) 100 % dos eventos foram detectados junto com variações do campo elétrico atmosférico; concluímos que é mais provável que esses aumentos sejam relacionados às mudanças no campo elétrico atmosférico do que com a precipitação de água.

4.2.1 O campo elétrico atmosférico

Estudos envolvendo o campo elétrico atmosférico tiveram seu início no século XIX, onde se acreditava que a superfície terrestre tinha uma carga elétrica e, com isso, havia um campo eletrostático radial à Terra. Como a atmosfera era considerada livre de cargas elétricas, este campo eletrostático seria inversamente proporcional ao quadrado da distância. No entanto, através de observações experimentais, constatou-se que este campo elétrico variava exponencialmente com a distância, indicando a existência de uma distribuição de cargas elétricas na atmosfera. Desta forma, no início do século XX, o campo elétrico atmosférico era descrito como um campo existente entre a superfície da Terra (carregada negativamente) e uma distribuição de cargas positivas na atmosfera, sendo impossível para um observador no espaço medir este campo elétrico.

Com a descoberta da ionosfera, viu-se que o campo elétrico atmosférico pode ser aproximado ao campo elétrico de um capacitor esférico, onde o eletrodo positivo seria a camada ionizada da atmosfera e o negativo seria a superfície terrestre. No entanto, devido à condutividade do ar, há uma corrente de cargas positivas em direção a superfície que contribui para o descarregamento deste capacitor. Caso não houvesse um processo de recarga, o capacitor superfície-atmosfera seria descarregado, extinguindo o campo elétrico atmosférico, em aproximadamente 30 minutos. Entretanto, como o campo elétrico atmosférico é sempre observado, é necessária a existência de algum fenômeno responsável para sua manutenção (ISRAEL, 1973).

Ao contrário do que se pensava no final do século XIX e início do século XX, a superfície terrestre como um todo possui uma carga elétrica nula. Ela é condutora, havendo concentração de cargas em determinados locais devido ao espelhamento provocado pela presença de cargas na atmosfera. E juntamente com a baixa atmosfera e a ionosfera, ela forma o circuito elétrico global que é o responsável pela manutenção do campo elétrico atmosférico.

Conforme mostra o esquema na Figura 4.24, o circuito elétrico global é constituído pelas correntes horizontais existentes na ionosfera e na superfície terrestre, pela corrente vertical de sentido descendente entre estes dois meios e pelas correntes verticais com sentido ascendente existentes entre a superfície terrestre e a base de uma nuvem eletricamente carregada e entre o topo desta nuvem e a ionosfera. Juntas, estas duas correntes ascendentes são responsáveis pelo carregamento do capacitor atmosférico e a consequente manutenção do campo elétrico atmosférico. A resistência elétrica no sentido superfície-ionosfera é bem menor que a resistência existente no sentido contrário. No entanto, uma nuvem eletricamente carregada produz uma diferença de potencial suficientemente grande para vencer esta alta resistência, produzindo uma corrente no sentido superfície ionosfera causando o carregamento do capacitor atmosférico e, como consequência, a manutenção do campo elétrico atmosférico. Sendo assim, o fenômeno causador desta grande diferença de potencial existente no interior das nuvens é de vital importância para a existência do circuito elétrico global (RYCROFT et al, 2000).

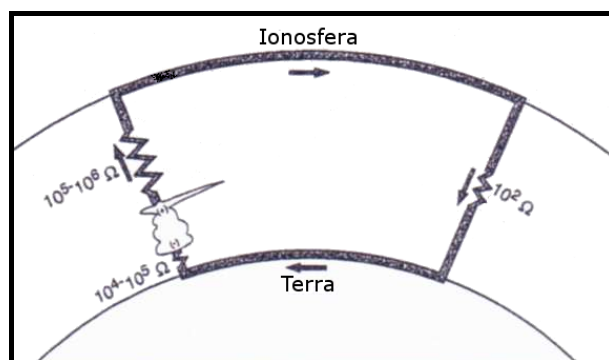


Figura 4.24 – Esquema do circuito elétrico global. As setas indicam a direção da corrente elétrica.
 Fonte: Modificado de Rycroft et al (2000).

Portanto, numa escala global, o descarregamento do capacitor atmosférico ocorrido nas regiões de tempo bom é neutralizado pelo carregamento ocorrido nas regiões com nuvens de tempestade eletricamente carregadas. Há um maior descarregamento nos oceanos e nas regiões continentais de altas latitudes, e um maior carregamento nas regiões continentais de baixas latitudes, onde são mais frequentes as tempestades elétricas (ISRAEL, 1973; GSC, 1986; RYCROFT et al, 2000).

No entanto o circuito elétrico global é mais complexo do que o modelo esquematizado na Figura 4.24, uma vez que existem nuvens eletricamente carregadas, cuja base é negativa, e nuvens com distribuição de cargas não dipolar como é o caso mostrado na Figura 4.24. Também, é preciso se considerar a distribuição espacial e temporal das nuvens eletricamente carregadas em nosso planeta assim como dos fenômenos elétricos atmosféricos, como os *sprites* e os diferentes tipos de relâmpagos. Há também a influência no circuito elétrico global de outros fenômenos externos a ele, como variações locais na condutividade da baixa atmosfera, fenômenos ionosféricos e variações no fluxo de raios cósmicos (RYCROFT et al, 2000).

Costuma-se classificar o campo elétrico atmosférico em dois tipos: (I) o campo elétrico de tempo bom, que é aquele observado em períodos de céu aberto, ou seja, sem a presença de nuvens eletricamente carregadas; e (II) o campo elétrico de períodos perturbados ou de tempestade, que é observado durante o intervalo de tempo em que uma nuvem carregada se encontra próxima ao observador. O campo elétrico de tempo bom possui um valor médio de ~ 100 V/m, variando conforme a latitude, o relevo e outras características do local onde o sensor está instalado. Já o campo elétrico

registrado em períodos de tempestades, varia de nuvem para nuvem, dependendo principalmente da distribuição de cargas em seu interior e da ocorrência ou não de relâmpagos durante a passagem da nuvem acima do monitor (ISRAEL, 1973). Enquanto o campo elétrico durante períodos de tempestade apresenta variações de curta duração, o campo elétrico de tempo bom, ao contrário do que se possa parecer, também apresenta variações quando observado em longos períodos de tempo.

A principal variação do campo elétrico atmosférico de tempo bom consiste numa variação global diurna de sua intensidade, também conhecida como “Variação de Carnegie”, ou “Curva de Carnegie”, nome devido ao instituto de pesquisa que primeiro observou esta variação. Seu máximo ocorre globalmente as ~18 UT enquanto seu valor mínimo é registrado por volta das ~09 UT. Esta variação é observada com maior facilidade em monitores dispostos nos oceanos, pois os efeitos locais, mais comuns nos continentes, podem atrapalhar a sua visualização (ISRAEL, 1973; GSC, 1986).

Também há indícios de variações globais do campo elétrico atmosférico com um período anual, cujo mínimo ocorreria entre junho e julho e o máximo em janeiro. E de variações globais com períodos de 27 dias e de 11 anos relacionados, respectivamente, à rotação e à atividade solar (ISRAEL, 1973).

4.2.2 Influências do campo elétrico atmosférico nas variações de curta duração da contagem de raios cósmicos

Acredita-se que o campo elétrico das nuvens de tempestades possa acelerar as partículas cósmicas secundárias, dando-lhes mais energia, fazendo com que estas sejam observadas em altitudes mais baixas, ou possibilitando que, ao colidirem com partículas da atmosfera, gerem novas partículas secundárias com energia suficiente para serem detectadas em menores altitudes (DORMAN, 2004; LIDVANSKY, 2003).

Além dos aumentos de curta duração na contagem de raios cósmicos registrados pelos sinais UP e LOW, também são observadas variações na contagem registrada pelo sinal TELESCOPE em alguns períodos de rápidas e intensas variações no campo elétrico atmosférico que podem estar associadas à ocorrência de relâmpagos. A Figura 4.25 mostra um exemplo deste tipo de evento, onde é possível se observar uma variação da

contagem nos três canais do CARPET ocorrida durante um período de chuva e variação do campo elétrico atmosférico.

A Tabela 4.3 mostra a relação entre a ocorrência de chuva, as variações no campo elétrico atmosférico e os aumentos na intensidade de raios cósmicos registrado nos três sinais do CARPET. Nela é possível se observar que a grande maioria dos eventos é observada juntamente com os dois fenômenos (ocorrência de chuva e variação do campo elétrico atmosférico), sendo alguns eventos observados com variações nos três sinais. Também é possível se notar que existe uma significativa parcela de eventos que estão relacionados somente à variações de campo elétrico e que há um pequeno número de casos onde foi observada precipitação de chuva sem variação de campo elétrico e sem resposta de algum dos sinais do CARPET.

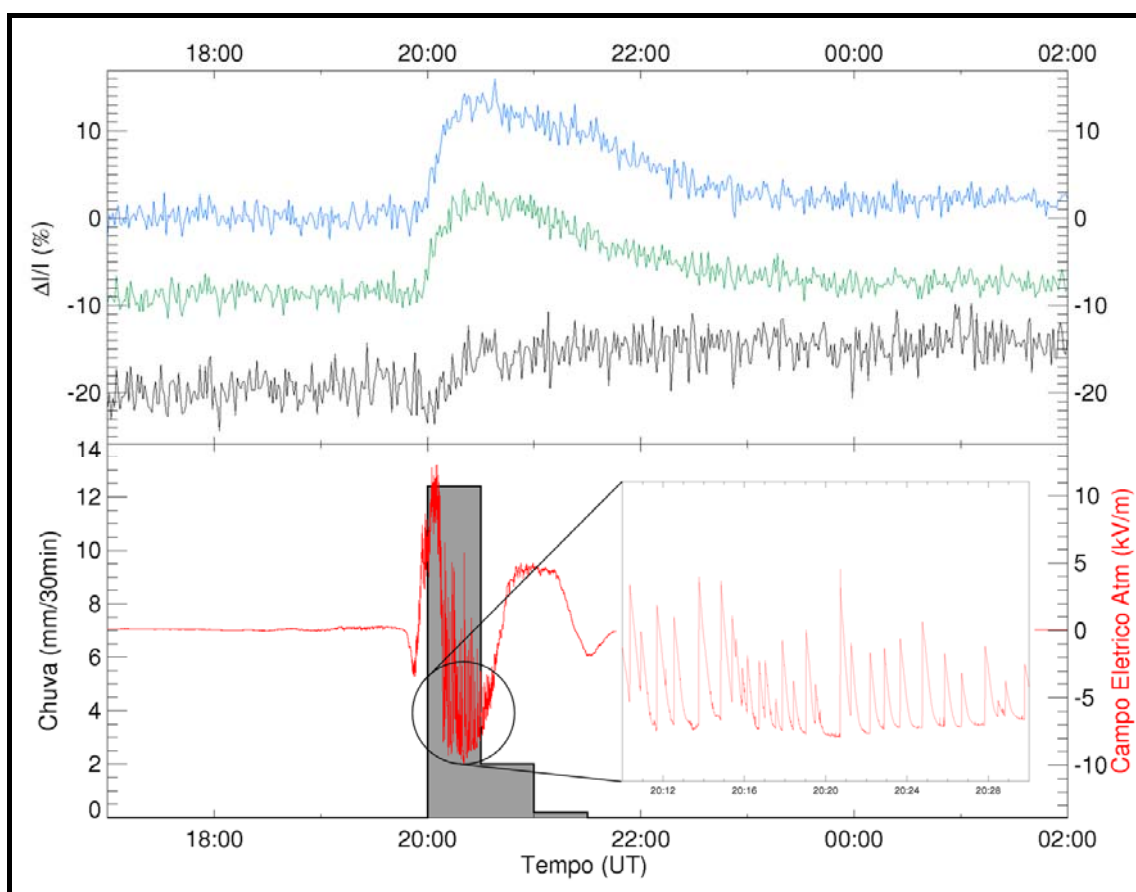


Figura 4.25 – Variação da contagem registrada nos três sinais do CARPET durante um período de ocorrência de chuva (histograma cinza) e de rápidas e intensas variações no campo elétrico atmosférico (curva em vermelho). Dados mostrados entre os dias 10/03/2010 às 17 UT e 24/01/2010 às 02 UT.

Tabela 4.3 – Distribuição das chuvas, mudanças no campo elétrico atmosférico e variações na contagem de raios cósmicos entre Fevereiro de 2008 e Janeiro de 2011.

Porcentagem Observada	Mudanças no Campo Elétrico	Ocorrência de Chuva	Sinais UP e LOW	Sinal TELESCOPE
6,1	X	X	X	X
52,3	X	X	X	
28,0	X		X	
13,6		X		

Devido à melhor resposta, em relação ao sinal LOW, escolheu-se analisar a influência do campo elétrico na intensidade de raios cósmicos registrada pelo sinal UP. Foi realizada uma análise dos 40 eventos observados sem saturação, e onde as possíveis influências das chuvas foram desconsideradas.

Os eventos analisados apresentam uma intensificação de contagem no sinal UP de 5 a 25 % e possuem uma duração típica entre 30 e 240 minutos. Estes eventos foram separados em dois grupos distintos de eventos: (I) um grupo contendo os eventos com aumentos relacionados a pequenas variações de campo elétrico atmosférico, sendo o valor máximo do módulo do campo inferior a 1 kV/m; e (II) outro grupo contendo os eventos com grandes aumentos de campo elétrico atmosférico, em que o valor máximo do módulo do campo elétrico atmosférico registrado durante o evento é maior que 1 kV/m. Dos 40 eventos estudados, 12 pertencem ao grupo I e o restante pertence ao grupo II.

Nesta dissertação foram estudados somente os eventos do grupo II. Neste estudo foi possível se observar que, para a grande maioria dos eventos (95,2%), a variação do campo elétrico atmosférico se inicia antes do aumento da contagem de raios cósmicos. Para mais da metade destes eventos, a variação do campo elétrico começa antes do aumento na contagem de raios cósmicos, ela costuma se iniciar entre 5 e 25 minutos de antecedência.

Para 60 % dos eventos do grupo II, a variação do campo elétrico atmosférico se encerrou próximo (entre 5 minutos antes e 30 minutos depois) ao instante em que se foi registrado o valor máximo da contagem de partículas. Para os 40 % restantes, a maioria apresenta um valor negativo de campo elétrico quando a contagem de raios cósmicos é máxima. Este valor de campo varia entre -1,8 e -11,2 kV/m. No caso dos eventos em que o campo possui um valor positivo, seu valor varia entre 1,2 e 7,4 kV/m.

Alexeenko et al, 2002 mostraram eventos onde o aumento da contagem de raios cósmicos está relacionado a períodos em que o valor do campo elétrico atmosférico permaneceu predominantemente negativo, como é o caso do evento, observado pelo CARPET, mostrado na Figura 4.26. Um valor negativo indica um sentido ascendente que ocorre devido à presença de uma nuvem cuja base é carregada negativamente. Tal campo elétrico possibilitaria uma aceleração de partículas de carga negativa na direção contrária, ou seja, de cima para baixo.

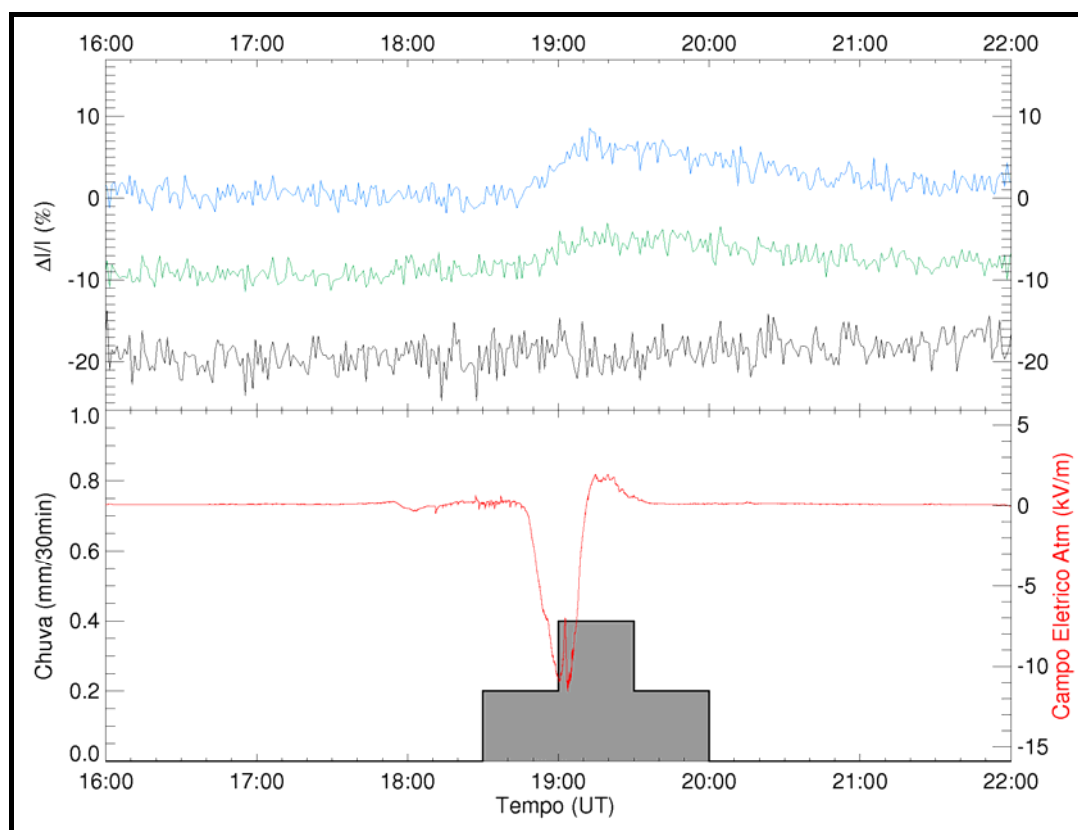


Figura 4.26 – No quadro superior: Intensidade relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET entre 16 e 22 UT do dia 20/12/2010. No quadro inferior, intensidade de chuva e valor do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período.

Muraki et al, 2003 observaram eventos nos quais os aumentos na contagem de raios cósmicos ocorreram durante períodos em que foi observada uma intensificação do campo elétrico atmosférico de tempo bom, como o evento detectado pelo CARPET, mostrado na Figura 4.27. Esta intensificação é associada à passagem de uma nuvem com a sua base positivamente carregada, e possibilitaria a aceleração de partículas positivas para baixo.

Por outro lado, a maior parte dos eventos de aumentos na intensidade de raios cósmicos observados pelo CARPET está relacionada com a ocorrência de variações positivas e negativas do campo elétrico atmosférico num mesmo evento, que indicam trocas no sentido do campo durante o período em que a contagem de raios cósmicos esta aumentando. Dois exemplos deste tipo de eventos são mostrados na Figuras 4.21 e 4.22.

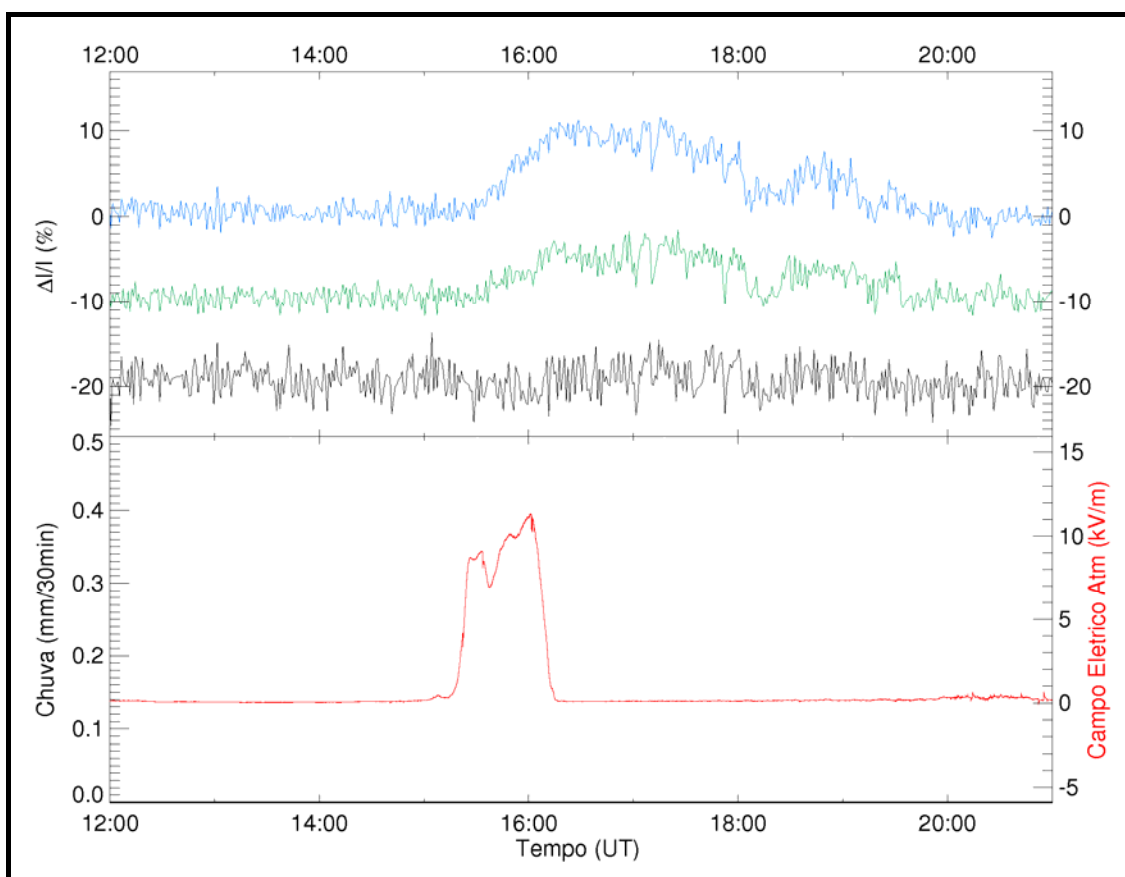


Figura 4.27 – No quadro superior: Intensidade relativa da contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET entre 12 e 21 UT do dia 22/11/2010. No quadro inferior, intensidade de chuva e valor do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período.

Ao se analisar os aumentos na contagem de raios cósmicos, é possível se observar uma relação com as variações do campo elétrico atmosférico. A Figura 4.28 mostra através de diferentes cores os períodos em que o campo elétrico atmosférico de um dado evento apresentou variações positivas (azul), variações negativas (vermelho) e em que não apresentou variações significativas (verde). Através do gráfico “contagem vs campo elétrico”, mostrado na mesma figura, pode-se observar que a contagem de raios cósmicos aumenta nos períodos de variações positivas e negativas.

Como mostra a Figura 4.29, analisando-se os períodos de variações positivas (trechos em azul) e negativas (trechos em vermelho), é possível se observar uma tendência linear entre cada um dos tipos de variação do campo elétrico ($\Delta E > 0$ e $\Delta E < 0$) e o aumento da contagem de raios cósmicos.

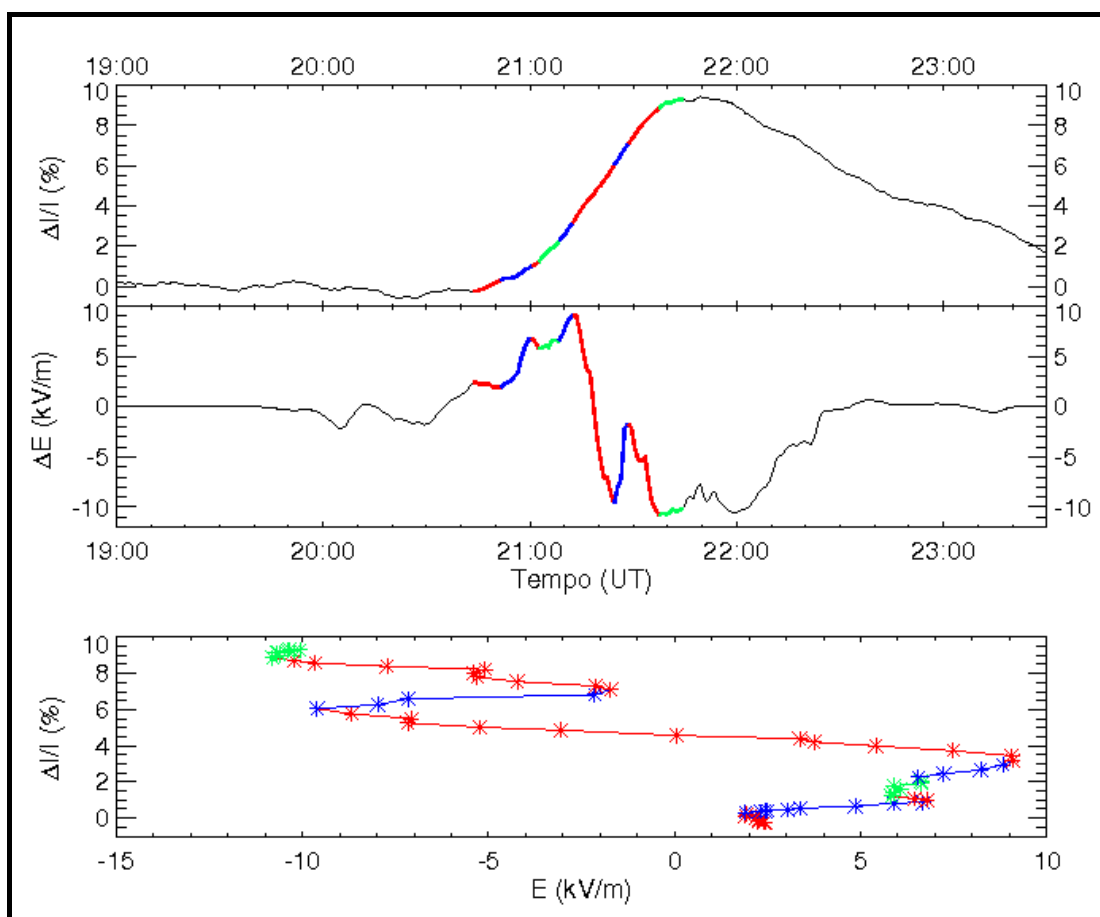


Figura 4.28 – De cima para baixo é mostrada a média corrida de 15 minutos da contagem e raios cósmicos registrada pelo sinal UP entre 19 e 23 UT do dia 11/08/2010, a média de 1 minuto do campo elétrico atmosférico registrado no mesmo período e o gráfico correlacionando estes dois parâmetros ponto a ponto.

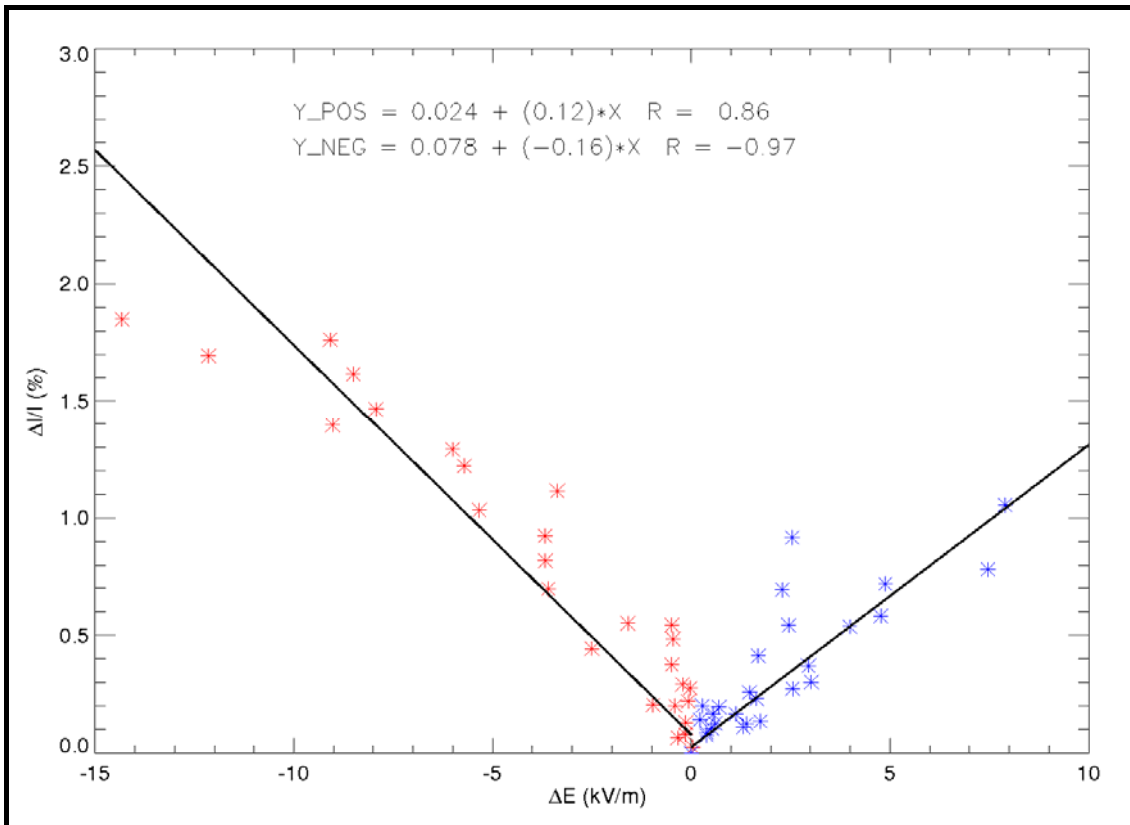


Figura 4.29 – Correlação, entre a variação do campo elétrico atmosférico e o aumento na intensidade de raios cósmicos, obtida através dos dados referentes ao evento mostrado na Figura 4.28.

Como os coeficientes de correlação são próximos a um, a correlação entre os parâmetros mostrados na Figura 4.29 é alta. A variação positiva do campo elétrico atmosférico ($\Delta E > 0$) indica uma tendência do campo, independente de seu estado inicial, migrar para um sentido apontando em direção ao chão. O fator que indica a relação desta variação com o aumento de contagem de raios cósmicos é chamado de C_P . A variação negativa ($\Delta E < 0$) indica uma tendência do campo, independente de seu estado inicial, para um sentido apontando para fora do chão. A sua relação com o aumento de raios cósmicos é chamada de C_N .

Em uma análise preliminar dos 28 eventos do grupo II, observou-se que em 5 eventos há uma dupla tendência no lado positivo ou no lado negativo da variável relacionada ao campo elétrico atmosférico, como o exemplo mostrado na Figura 4.30. Em cada um dos 23 eventos restantes foi observada uma única correlação para os dois tipos de variações do campo elétrico atmosférico.

Geralmente há diferenças nos valores de C_P (ou de C_N) entre um evento e outro. Para um mesmo evento, C_P e C_N apresentam valores semelhantes, como é o caso do evento mostrado na Figura 4.31. O que indicaria que uma variação no campo elétrico atmosférico com $\Delta E > 0$ possui a mesma influencia que uma variação com $\Delta E < 0$. Também são observados eventos onde C_P e C_N apresentam valores bem diferentes, como o mostrado na Figura 4.32, o que indicaria uma maior influência de um dos dois tipos de variação.

Nesta secção 4.2 mostramos que a variação do campo elétrico atmosférico é bem relacionada com os aumentos de contagem de raios cósmico observados pelo CARPET, tendo uma influência maior do que a precipitação de água. No entanto, o detalhe desta relação baseada na comparação e interpretação dos coeficientes C_P e C_N ainda não é claro, e deverá ser estudado de forma mais aprofundada.

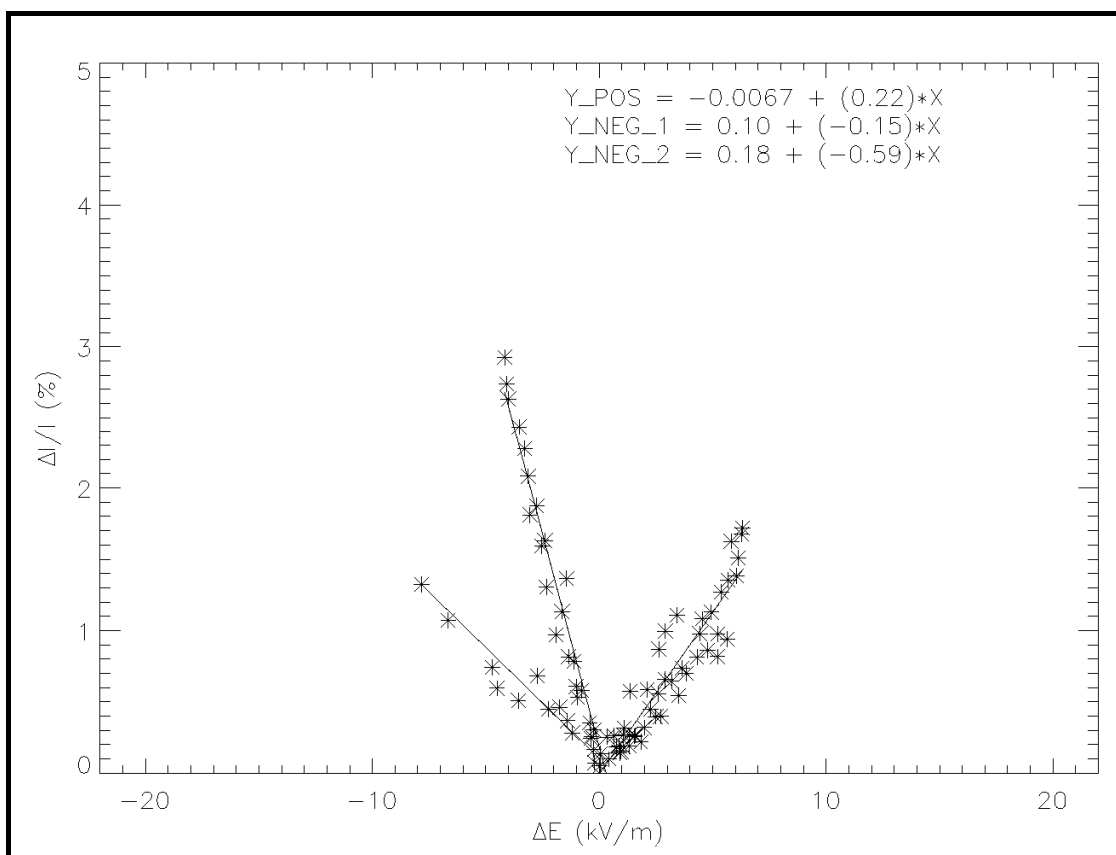


Figura 4.30 – Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 25/03/2009.

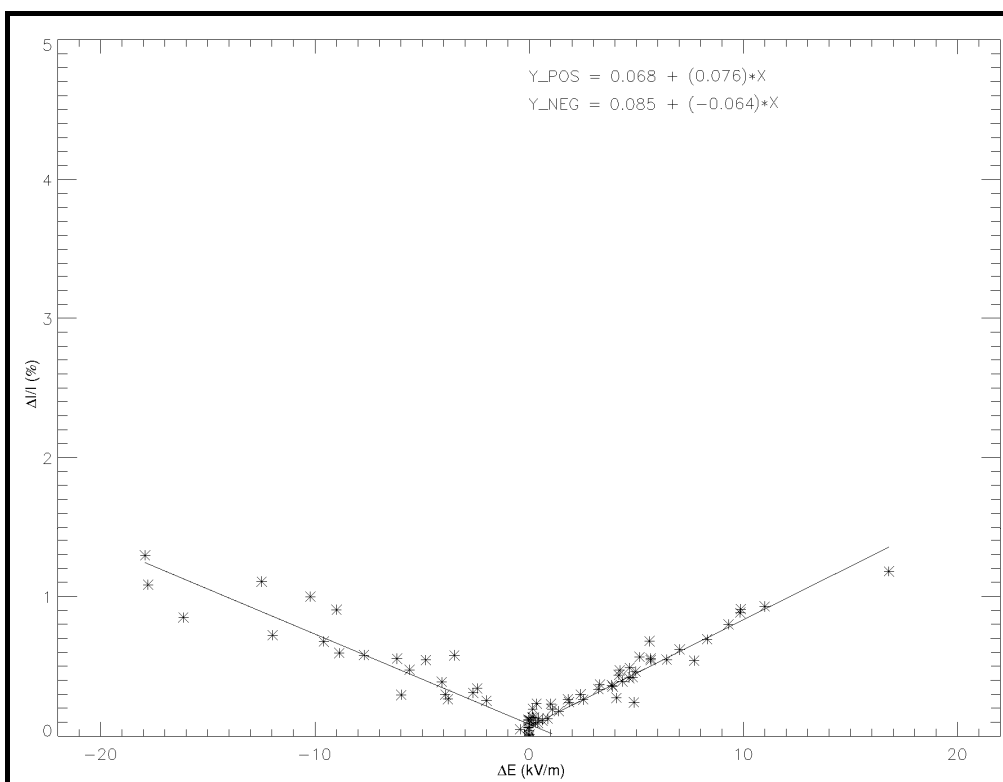


Figura 4.31 – Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 25/03/2009.

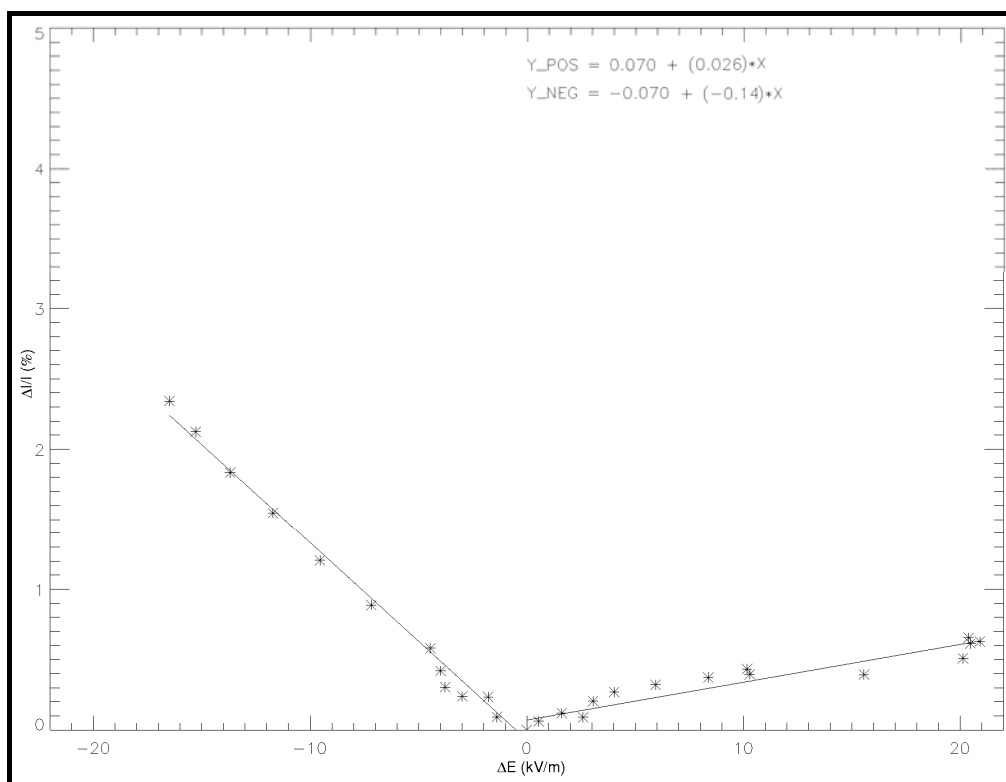


Figura 4.32 – Correlação entre o aumento na intensidade de raios cósmicos e a variação do campo elétrico para o evento registrado no dia 13/10/2010.

5 CONCLUSÕES

A intensidade de raios cósmicos observada por detectores instalados na superfície de nosso planeta apresenta diversas variações relacionadas a fenômenos atmosféricos, geomagnéticos e solares. Com o intuito de se estudar essas variações, está em operação nos Andes Argentinos, desde 2006, o detector de raios cósmicos CARPET, que tem se mostrado ideal para o estudos de variações transientes e periódicas de curta e longa duração relacionada a estes fenômenos.

No estudo sobre a relação entre a intensidade de raios cósmicos e a pressão atmosférica, observou-se uma clara anticorrelação entre a variação de pressão atmosférica e a variação relativa da intensidade de raios cósmicos. Através da análise dos dados do mês de julho de 2009, foram obtidos os coeficientes barométricos para cada um dos três sinais do CARPET ($\beta_{UP} = - 0,35 \text{ \%/hPa}$, $\beta_{LOW} = - 0,33 \text{ \%/hPa}$ e $\beta_{TEL} = - 0,44 \text{ \%/hPa}$). Estes coeficientes, por sua vez, são utilizados na correção dos dados possibilitando um melhor estudo das variações da intensidade de raios cósmicos não relacionadas a mudanças na pressão atmosférica.

Uma variação sazonal, cujo mínimo ocorre próximo a passagem do ano, é observada na contagem de raios cósmicos registrada pelos três sinais do CARPET. Analisando-se as mudanças de temperatura na atmosfera, notou-se que esta variação sazonal é relacionada ao efeito da temperatura na produção e decaimento de raios cósmicos secundários. Foram analisados quatro diferentes métodos de se descrever este efeito da temperatura na intensidade de raios cósmicos. O método que leva em consideração as variações de temperatura ao longo de toda atmosfera foi o que apresentou o melhor resultado, principalmente pelo fato dos dados corrigidos por este método apresentarem uma melhor relação com a variação da contagem de raios cósmicos associada ao ciclo de 22 anos de inversão de polaridade campo magnético solar. Desta forma, a correção dos dados do CARPET, a fim de se eliminar o efeito da temperatura, passou a ser feita por este método.

Desde o início de funcionamento do CARPET, ou seja, desde 2006, é possível se observar uma variação diurna na contagem de raios cósmicos registrada nos três sinais

do CARPET. Esta variação diurna observada nos dados do CARPET apresenta o seu tempo de máxima contagem em um horário atípico, quando comparada com a variação diurna comumente registrada por outros detectores, que é relacionada ao processo de convecção e difusão, no plano da elíptica, paralela à linha de campo magnético das partículas cósmicas no meio interplanetário. Enquanto esta variação diurna apresenta seu valor máximo entre 12 e 21 horas locais, a variação diurna observada nos dados do CARPET apresenta seu máximo entre 6 e 12 horas locais. Possíveis explicações desta diferença de fase podem ser dadas por: (I) uma maior influência das componentes da difusão das partículas cósmicas, que não são consideradas no modelo que apresenta valor máximo entre 12 e 21 horas locais; ou (II) uma influência relacionada ao período de mínima da atividade solar, no qual os dados desta dissertação foram coletados. Existe uma anticorrelação entre a variação diurna da contagem de raios cósmicos e a variação do campo elétrico atmosférico de mesma periodicidade, que assim como as outras possíveis influências na variação diurna da contagem de raios cósmicos deve ser estudada em maiores detalhes.

Foram observados 12 decréscimos (de -2 a 5 %) na contagem de raios cósmicos, entre abril de 2006 e dezembro de 2010, associados à passagem de distúrbios interplanetários com origem solar sobre a Terra. Estes decréscimos ocorreram juntamente com variações nos parâmetros do vento solar (velocidade, temperatura, densidade de prótons e campo magnético), e também podem ser observados nos dados fornecidos pelo monitor de nêutrons de Moscou. Também foram observados aumentos na contagem de raios cósmicos que ocorreram sob condições semelhantes às observadas nos decréscimos. Um estudo sobre as estruturas interplanetárias e geomagnéticas que poderiam causar estes aumentos é necessário para se verificar a relação destes aumentos com fenômenos geomagnéticos e do meio interplanetário.

Apesar de o CARPET não possuir muitos anos de funcionamento, já é possível se observar uma variação relacionada ao ciclo de 11 anos da atividade solar, ou seja, se determinar o intervalo de tempo em que ocorreu a máxima contagem de partículas cósmicas primárias (com energia superior a 12 GeV) relacionada à baixa atividade solar. Este período ocorre na forma de um pico, sendo este fato associado com o ciclo

de 22 anos de inversão de polaridade do campo magnético solar. Entre 2006 e meados de 2008, há um aumento na intensidade de raios cósmicos acompanhado por uma queda no número de manchas solares e após 2008, há uma diminuição da intensidade ocorrida juntamente com o aumento da atividade solar. O coeficiente de regressão linear entre o aumento da intensidade de raios cósmicos e o número de manchas solares é menor do que o coeficiente obtido quando são analisados os dados do período de diminuição da contagem de raios cósmicos. Assim, no período analisado, a intensidade de raios cósmicos registrada pelo CARPET respondeu de maneira mais efetiva ao aumento do número de manchas do que a sua diminuição.

Aumentos de curta duração na intensidade de raios cósmicos, ocorridos principalmente nos sinais de menor energia, são observados desde 2006. Cerca de 70 % destes eventos ocorrem em períodos de chuva ocorridas juntamente com variações no campo elétrico, os 30% dos eventos restantes são observados em períodos com variações somente no campo elétrico atmosférico, sem a presença de chuva. Uma análise dos eventos observados durante períodos chuvosos e com mudanças no campo elétrico atmosférico, indicam uma maior influência do campo elétrico atmosférico.

Desconsiderando-se a influência das chuvas, é possível se observar uma boa correlação entre as variações do campo elétrico e o aumento da contagem de partículas cósmicas do sinal UP. Em alguns eventos, onde foram registradas variações extremamente rápidas no campo elétrico atmosférico, são observadas variações no sinal TELESCOPE. Analisando-se os eventos, cujo valor máximo do campo elétrico atmosférico registrado é superior a 1 kV/m, foi possível se notar que, na maioria dos casos, o aumento de contagem se inicia depois da perturbação no campo elétrico e se encerra quando esta perturbação acaba. A grande maioria dos eventos observados ocorre com variações positiva e negativas no campo elétrico atmosférico. Porém, a exata dependência dos aumentos na contagem de raios cósmicos com ΔE , não é única e varia de evento para evento.

Para trabalhos futuros pretende-se dar continuidade aos estudos já realizados sobre a relação entre as variações da intensidade de raios cósmicos e as atividades geomagnética e solar.

Para isto serão estudadas: (I) as possíveis causas dos aumentos na contagem de raios cósmicos ocorridos durante tempestades geomagnéticas associadas a algum distúrbio no meio interplanetário; (II) a variação diurna da contagem de raios cósmicos e a fonte causadora da diferença de fase existente entre ela e a variação diurna explicada pelo modelo de convecção e difusão das partículas cósmicas no meio interplanetário; (III) o comportamento da intensidade de raios cósmicos durante este ciclo solar que se inicia; e (IV) caracterização e interpretação dos aumentos da contagem de raios cósmicos relacionados às variações do campo elétrico atmosférico, buscando-se entender se estas últimas são eficientes na aceleração de partículas cósmicas secundárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXEENKO, V.V.; KHAERDINOV, N.S.; LIDVANSKY, A.S.; PETKOV, V.B. Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration. **Physics Letters A**, v.301, p. 299–306, 2002.
- BAZILEVSKAYA, G.A.; KRAINEV, M. B.; MAKHMUTOV, V. S. Effects of cosmic rays on the Earth's environment. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p.1577-1586, 2000.
- CANE, Hillary V. Cosmic ray decreases: 1964-1994. **Journal of Geophysical Research**, Washington, USA. v. 101, n. A10, p. 561-572,1996.
- CANE, Hillary V. Coronal mass ejection and Forbush decreases. **Space Science Reviews**, Dordrecht, Holanda, v. 93, n.1-2, p. 55-77, jun. 2000.
- DE MENDONÇA, R.R.S.; RAULIN, J.P.; MAKHMUTOV, V.S.; STOZHKOVA, Y.I.; KVASHNIN, A.N.; MAKSUMOV, O.S.; MIZIN, S.V; FERNANDEZ, G. Observation of cosmic ray and electric field variations in the surface atmosphere. In: XXX RUSSIAN COSMIC RAY CONFERENCE, St Petersburg - Rússia. **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, v. 73. p. 404-406, 2009.
- DE MENDONÇA, R.R.S.; RAULIN, J.-P.; BERTONI, F.C.P.; ECHER, E.; MAKHMUTOV, V.S.; FERNANDEZ, G. Solar and atmospheric influences in the cosmic ray intensity. In: SCHOOL ON COSMIC RAYS AND ASTROPHYSICS,4., 2010, Santo André. **Proceedings...** Santo André: UFABC, 2010, (CRA School) 002.
- DESORGHER, L.; FLUECKIGER, E.O.; BUETIKOFER, R.; MOSER, M.R. Geant4 application for simulating the propagation of cosmic rays through the Earth's magnetosphere. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 28., 2003, Tsukuba - Japão. **Proceedings...** Tsukuba: Universal Academy Press Inc, 2003, p. 4277-4280.
- DORMAN, L.I. **Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground**. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- FAMOSO, B.; LA ROCCA, P.; RIGGI, F. An educational study of the barometric effect of cosmic rays with a Geiger counter. **Physics Education**, Londres, Reino Unido, v. 40, n. 5, 461-467, 2005.
- FORBUSH, S.E.; ALLEN, J.A. Van (Ed.). **Cosmic rays, the sun and geomagnetism: the works of Scott E. Forbush**. Washington: USA: American Geophysical Union, 1994.
- GEOPHYSICS STUDY COMITEE (GSC). **The Earth's electrical environment**. Washington, D.C: National Academy Press, 1986.

ISRAEL, H. **Atmospheric electricity volume II: fields, charges, currents**, Jerusalem: Keter Press, 1973.

KATASE, A.; NARAHARA, Y.; ISHIHARA, Y.; TANAKA, K.; MATSUYAMA, H. Variation of environmental gamma-rays measured with Ge(Li) spectrometer. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 19, n. 11, p. 918-927, 1982.

KUDELA, K.; BRENKUS, R. Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982-2002. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 1121-1126, 2004.

LIDVANSKY, A.S. The effect of the electric field of the atmosphere on cosmic rays. **Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics**, v. 29, pp. 925-937, 2003.

LIN, Z.; BIEBER, J.W.; EVENSON, P. Electron trajectories in a model magnetosphere: Simulation and observation under active conditions. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. A12, p. 543-549, 1995.

MEDVEDEV, M.V.; MELOTT, A.L. Do extragalactic cosmic rays induce cycles in fossil diversity? **The Astrophysical Journal**, v. 664, p. 879– 889, 2007.

MERCIER, J.-F.; TRACY, B.L.; D'AMOURS, R.; CHAGNON, F.; HOFFMAN, I.; KORPACH, E.P.; JOHNSON, S.; UNGAR, R.K. Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass. **Journal of Environmental Radioactivity**, v.100, p. 527-533, 2009.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo method. **Journal of the American Statistical Association**, v.44, pp. 335-341, Sep. 1949.

MIROSHNICHENKO, L.I. **Solar cosmic rays**. Dordrecht, Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2001.

MISHRA, R.A.; MISHRA, R.K. Comparative study of diurnal and semidiurnal anisotropies in CR intensity for the period 1964-95. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 28., 2003, Tsukuba - Japão. **Proceedings...** Tsukuba: Universal Academy Press Inc, 2003, p. 4011-4019.

MURAKI, Y.; MIYAMOTO, Y.; TAKAMI, T.; AXFORD, W. I.; MATSUBARA, Y.; MASUDA, K. ; SAKO, T.; WATANABE, K.; SAKAKIBARA, S.; SHIBATA, S.; MUNAKATA, Y.; YASUE, S.; SAKAI, T.; MITSUI, K.; FLUECKIGER, E. O. Acceleration below thunder clouds at mount Norikura. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 28., 2003, Tsukuba - Japão. **Proceedings...** Tsukuba: Universal Academy Press Inc, 2003, p. 4177-4180.

MURSULA, K.; USOSKIN, I. **Heliospheric physics and cosmic rays**, .Washington DC: American Geophysics Union, 2003. Lecture Notes

NAVIA, C.E.; AUGUSTO, C.R.A.; ROBBA, M.B. Muons enhancements at sea level from solar flares of small scale. In: INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, 29., 2005, Pune -India. **Proceedings...** Pune, 2005, v. 1, p. 181-184.

OTAOLA, J. A; VALDÉS-GALICIA, J. F. **Los rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas**. Cidade do México: Fondo de Cultura Económica, 1992.

PRIEST, E.R. The Sun and its magnetohydrodynamics. In: KIVELSON, M.G., RUSSEL C.T. **Introduction to Space Physics** . Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.

RYCROFT, M.J.; ISRAELSSON, S.; PRICE, C. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 62, p. 1563-1576, 2000.

ROSSI, B. R. **Cosmic rays**. New York: Mcgraw-hill, 1964.

SAGISAKA, S. Atmospheric effects on cosmic-ray muon intensities at deep underground depths. **Il Nuovo Cimento**, v. 9C, n. 4, 1986

SANDSTRÖM, A. E. **Cosmic rays physics**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1965.

SATO, T.; YASUDA, H.; NIITA, K.; ENDO, A.; SIHVER, L. Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere. **Radiation Research**, v. 170(2), p. 244-259, 2008.

SINGH, Y.P.; BADRUDDIN Effects of the polarity states of the heliospheric magnetic field and particle drifts in cosmic radiation. **Solar Physics**, v. 234, p. 339-352, 2006.

STOZHKOVA, Y.I.; SVIRZEVSKII, N.S.; MAKHMUTOV, V.S. Cosmic ray measurements in the atmosphere. In: WORKSHOP ON ION-AEROSOL-CLOUD INTERACTIONS, 18/04-20/04, 2001, Geneva. **Proceedings ...** Geneva, Suíça: CERN, p. 41-62, 2001.

TANKANEN, P.J. On the variation of cosmic ray meson intensity at sea level in connection with atmospheric disturbances (Ph.D Thesis), **Sar. A.**, v. 6, n. 185, p. 1-196, 1965.

TIWARI, C.M.; SHARMA, D.; TIWARI, L.; SAXENA, A.K.; TIWARI, D.P. Study of anisotropic variation of cosmic rays intensity with solar activity. **Natural Science**, v.3, n. 2, p. 101-103, 2011.

WANG, C.P.; LEE, A.H. Cosmic-ray muons and the atmospheric coefficients near geomagnetic equator. **Journal of Geophysical Research**. v. 72, n. 23, p. 6107-6109,1967.

ZIEGLER, J. F. Terrestrial cosmic rays. **IBM Journal of R & D**, New York, USA. v. 40, n. 1, p. 19-39, jan. 1996.

ZIEGLER, J. F. Terrestrial cosmic rays intensities. **IBM Journal of R & D**, New York, USA. v. 42, n. 1, p. 117-140, jan.1998.