

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**PERIODICIDADES NO FLUXO DE MUONS E
ANÁLISE DE CHOQUES INTERPLANETÁRIOS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Lucas Ramos Vieira

Santa Maria, RS, Brasil

2010

PERIODICIDADES NO FLUXO DE MUONS E ANÁLISE DE CHOQUES INTERPLANETÁRIOS

por

Lucas Ramos Vieira

Monografia apresentada ao Curso de Física, Área de Concentração em Geofísica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Física.**

Orientador: Ph.D. Nelson Jorge Schuch.

Santa Maria, RS, Brasil

2010

© 2010

Todos os direitos autorais reservados a Lucas Ramos Vieira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Av. Roraima, 1000, Bairro Camobi, Campus da UFSM, Casa do Estudante.

Apto.: 4510. Santa Maria, RS, CEP: 97105-900.

Fone (055) 96495727; End. Eletr: lucasfisico@gmail.com.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Departamento de Física**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Monografia de Graduação

**PERIODICIDADES NO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS E ANÁLISE DE
CHOQUES INTERPLANETÁRIOS**

elaborada por
Lucas Ramos Vieira

como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Nelson Jorge Schuch, Ph.D. (CRS/INPE-MCT)
(Presidente/Orientador)

Nivaor Rodolfo Rigozo, Dr. (CRS/INPE-MCT)

Marcelo Barcellos da Rosa, Dr. rer. nat. (CT/UFSM)

Santa Maria, 08 de janeiro de 2010.

“Tristes tempos os nossos em que é mais fácil desintegrar um átomo do que um preconceito”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Neuza Ramos Vieira e Mario de Moura Vieira pelo carinho, apoio e incentivo aos estudos.

Ao meu mentor, Ph.D. Nelson Jorge Schuch, pela minha inserção no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais e por compartilhar sua experiência científica através de discussões e conselhos.

Aos Dr. Alisson Dal Lago, Dr. Ezequiel Echer e, em especial, ao Dr. Nivaor Rodolfo Rigozo pelos ensinamentos durante o projeto e por atenderem, prontamente, a todas as minhas dúvidas.

À minha namorada, Carolina Pietczak, pela revisão desta monografia, paciência e valiosas ajudas nos momentos mais “turbulentos”.

Aos amigos mestrando Carlos Roberto Braga e Dr. Marlos Rockenbach da Silva por suas sugestões e correções.

A Universidade Federal de Santa Maria pelo eficiente programa de Assistência Estudantil.

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários e servidores do CRS/INPE – MCT e do LACESM/CT – UFSM, especialmente a Prof^a Dr. Damaris Kirsh Pinheiro, pelo apoio técnico, administrativo e financeiro e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa.

E, finalmente, sou grato a classe trabalhadora brasileira, cujos impostos mantêm todos os programas e institutos públicos deste país.

RESUMO

Monografia de Graduação
Curso de Física Bacharelado
Universidade Federal de Santa Maria

PERIODICIDADES NO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS E ANÁLISE DE CHOQUES INTERPLANETÁRIOS

AUTOR: LUCAS RAMOS VIEIRA

ORIENTADOR: PH.D. NELSON JORGE SCHUCH

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 08 de janeiro de 2010.

Muons e nêutrons que atingem a superfície terrestre com alta energia fazem parte de um conjunto de partículas chamado raios cósmicos secundários. Para estudar o fluxo destas partículas construíram-se monitores de nêutrons e muons. O estudo das periodicidades no fluxo de nêutrons já produziu interessantes resultados como, por exemplo, sua anticorrelação com o número de manchas solares. No ano de 2001 foi instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, o protótipo do Detector Multidirecional de Muons (MMDP). Neste estudo procurou-se pelas periodicidades embutidas nas séries temporais dos dados horários do detector vertical do MMDP através do *software* ARIST para verificar quais os fenômenos responsáveis por variações no fluxo de muons. Ejeções coronal de massa frequentemente propagam-se mais rapidamente do que a velocidade do vento solar, gerando à sua frente ondas de choques interplanetário. Um significativo número dos choques são geofetivos, ou seja, resultam em tempestades geomagnéticas moderadas e intensas. Outro efeito observado são os decréscimos no fluxo de raios cósmicos secundários, ou decréscimos de Forbush (DF), registrados por detectores de superfície. Investigaram-se as correlações entre os parâmetros de choque e as magnitudes dos respectivos decréscimos percentuais no fluxo de muons e nêutrons em seis detectores em dados de 2001. Constatou-se que as variações de velocidade, temperatura e campo magnético do meio interplanetário ocasionados por uma onda de choque estão associadas a decréscimos de raios cósmicos. A variação na densidade no meio interplanetário não possui qualquer relação com os DF.

Palavras-chave: raios cósmicos, análise espectral, atividade solar e choques interplanetários.

ABSTRACT

Monograph
Physics Bachelor Course
Universidade Federal de Santa Maria

PERIODICITIES IN THE COSMIC RAYS FLUX AND INTERPLANETARY SHOCKS ANALYSIS

AUTHOR: LUCAS RAMOS VIEIRA
ADVISOR: PH.D. NELSON JORGE SCHUCH
Local and Date: Santa Maria, January 8th, 2010.

Muons and neutrons that reach the Earth surface with high energy constitute a particles' group called secondary cosmic rays. In order to study the flux of this particles data from muons and neutrons stations are used. The study of the periodicities in the neutron flux have obtained interesting results as, for instance, its anticorrelation with the sunspots number. In the year 2001 was installed at the Southern Space Observatory, in São Martinho da Serra, RS, the Multidirectional Muon Detector's prototype (MMDP). In this Monograph it was looked for the periodicities embedded in the time series of the vertical detector MMDP's data through the ARIST software in order to verify what kind of phenomena are responsible for the muon flux variations. Coronal mass ejections often propagate with speeds exceeding the solar wind speed driving interplanetary shocks. A significant number of the shocks are geoeffective, that is, cause moderate and intense geomagnetic storms. Another effect observed are the decreases in the cosmic rays flux, or the Forbush decreases (DF), recorded by surface detectors. The correlations between shock parameters and the intensity of the respective DF in the muons and neutrons flux observed by six detectors in 2001 data were investigated. It was verify that the speed, temperature, and magnetic field variations of the interplanetary medium caused by a shock wave were associated with cosmic rays decreases. The observed interplanetary medium density variations were not related with the DF.

Keywords: cosmic rays, spectral analysis, solar activity and interplanetary shocks.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. RAIOS CÓSMICOS	12
2.1. DESCOBERTA.....	12
2.2. CLASSIFICAÇÃO	12
2.3. CHUVEIRO CÓSMICO	15
2.3. RIGIDEZ DE CORTE GEOMAGNÉTICA	18
3. PERIODICIDADES NO FLUXO DE MUONS	21
3.1. ATIVIDADE SOLAR	21
3.1.1. <i>As manchas solares</i>	21
3.1.2. <i>Ciclo de 11 anos e Eventos Solares</i>	24
3.2. VARIAÇÕES NO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS	25
3.3. VARIAÇÕES NOS DADOS DO DETECTOR VERTICAL DO MMDP.....	28
3.3.1. <i>Método - Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais</i>	28
3.3.2. <i>Periodicidades nos dados do MMDP</i>	29
4. ESTRUTURAS MAGNÉTICAS INTERPLANETÁRIAS.....	33
4.1. TIPOS DE ESTRUTURAS MAGNÉTICAS INTERPLANETÁRIAS	33
4.2. CHOQUES INTERPLANETÁRIOS.....	34
4.3. DECRÉSCIMOS DE FORBUSH	36
5. ASSOCIAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE CHOQUES INTERPLANETÁRIOS E DECRÉSCIMOS DE RC	39
5.1. DADOS DE RC.....	39
5.2. DADOS DE PLASMA DO MEIO INTERPLANETÁRIO	39
5.3. AVALIAÇÃO DOS DECRÉSCIMOS DE FORBUSH E CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CHOQUE	40
5.4. COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	45
6. CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESPECTRO DE ENERGIA DO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS MOSTRANDO QUE QUANTO MAIS ENERGÉTICA FOR UMA PARTÍCULA MAIS RARA É SUA DETECÇÃO NA SUPERFÍCIE DA TERRA. FONTE: MODIFICADO DE MURSULA & USOSKIN, 2003.	13
FIGURA 2 – ESPECTROS DE ENERGIA MOSTRANDO A COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUXOS DE RCS (LINHA PONTILHADA) E RCG (LINHA CONTÍNUA). FONTE: MODIFICADO DE MURSULA & USOSKIN, 2003.....	14
FIGURA 3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM CHUVEIRO CÓSMICO GERADO NA ATMOSFERA TERRESTRE.....	15
FONTE: MODIFICADO DE FORBUSH, 1993.....	15
FIGURA 4 - FOTO DO MMDP INSTALADO NO OES/CRS/INPE – MCT MOSTRANDO EM AZUL AS 8 CAIXAS DE SISTEMAS DETECTORES EM DUAS CAMADAS.	17
FIGURA 5 – ESQUEMA FORA DE ESCALA DAS 4 COMBINAÇÕES VERTICAIS (SETAS PRETAS) E DAS 8 DIREÇÕES DE DETECÇÃO (SETAS COLORIDAS) DO MMDP.....	17
FIGURA 6 – MOVIMENTO DE PARTÍCULAS CARREGADAS NO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.	20
FONTE: ALONSO & FINN, 1972.	20
FIGURA 7 – MAPA DA RIGIDEZ DE CORTE MAGNÉTICA DA TERRA.	20
FONTE: WWW.SEUTEST.COM/RIGIDITYCUTOFFMAP.JPG	20
FIGURA 8 - GRUPO DE MANCHAS SOLARES NA SUPERFÍCIE DO SOL REGISTRADOS POR GALILEU NO SÉCULO XVII.22	22
FONTE: MOSCHETTI, 2006.....	22
FIGURA 9 - A) DÍNAMO SOLAR. CAMPO INICIAL POLOIDAL EVOLUINDO PARA UM CAMPO TOROIDAL DEVIDO À ROTAÇÃO DIFERENCIAL SOLAR. B) POLARIDADE DAS MANCHAS SOLARES NOS DIFERENTES HEMISFÉRIOS. .23	23
FONTE: HOYT & SCHATTEN, 1997.	23
FIGURA 10 - FOTO AMPLIADA DE UMA MANCHA SOLAR MOSTRANDO A UMBRA (REGIÃO CENTRAL ESCURA) RODEADA PELA PENUMBRA. FONTE:	
HTTP://WWW.GEOCITIES.COM/CAPECANAVERAL/HALL/1018/OBSERVACOES2.HTML	23
FIGURA 11 - GRÁFICO DO NÚMERO MÉDIO MENSAL DE MANCHAS SOLARES NOS ÚLTIMOS 100 ANOS, CUJO CICLO DE 11 ANOS É EVIDENTE. FONTE: HTTP://ASTRO.IF.UFRGS.BR/ESOL/EXPLORSOL.HTM	24
FIGURA 12 - A) A REGIÃO BRANCA MAIS BRILHANTE NESTA IMAGEM FOI CAUSADA POR UMA EXPLOÇÃO SOLAR. .25	25
B) IMAGEM DE UMA CME FOTOGRAFADA POR UM CORONÓGRAFO.	25
FONTE: HTTP://SOHOWWW.NASCOM.NASA.GOV/GALLERY/	25
FIGURA 13 - GRÁFICO MOSTRANDO A ANTICORRELAÇÃO MANTIDA ENTRE A INTENSIDADE MENSAL MÉDIA DE RAIOS CÓSMICOS MEDIDO PELO MONITOR DE NÊUTRONS DE CLÍMAX E O NÚMERO DE MANCHAS SOLARES NO PERÍODO DE 1950 A 1995.....	26
FONTE: MODIFICADO DE HTTP://WWW.NGDC.NOAA.GOV/STP/SOLAR/COSMIC_RAYS/IMAGE/CR_SSN.GIF	26
FIGURA 14 - CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO NA FORMA DE UMA ESPIRAL. FONTE:	
HTTP://WWW.GSFC.NASA.GOV/	27
FIGURA 15 – DIAGRAMA INDICANDO A ESTRUTURA ONDULATÓRIA DO IMF DANDO ORIGEM A CONFIGURAÇÃO “SAIA DE BAILARINA”. FONTE: HTTP://WSO.STANFORD.EDU/GIFS/HCS.HTML	27
FIGURA 16 - CONTAGENS RELATIVA A MÉDIA DA SÉRIE HORÁRIA DE DADOS DO DETECTOR VERTICAL DO MMDP PARA O PERÍODO DE 10/10/2001 (DOY=283) A 31/10/2002 (DOY=669).	30
FIGURA 17 –GRÁFICO DE BARRAS DOS VALORES DE AMPLITUDE <i>VERSUS</i> PERÍODO OBTIDO ATRAVÉS DO ARIST A PARTIR DA SÉRIE TEMPORAL DE CONTAGENS PERCENTUAL HORÁRIA DO DETECTOR VERTICAL DO MMDP RELATIVO AO PERÍODO 10/10/2001 – 31/10/2002.	30
FIGURA 18 - CONTAGENS PERCENTUAIS RELATIVA AO VALOR MÉDIO DA SÉRIE DIÁRIA DE DADOS DO DETECTOR VERTICAL DO MMDP PARA O PERÍODO DE 10/10/2001 (DOY=283) A 31/10/2002 (DOY=669).	31
FIGURA 19 – GRÁFICO DE BARRAS DOS VALORES DE AMPLITUDE <i>VERSUS</i> PERÍODO OBTIDO ATRAVÉS DO ARIST A PARTIR DA SÉRIE TEMPORAL DE CONTAGENS PERCENTUAL DIÁRIA DO DETECTOR VERTICAL DO MMDP RELATIVO AO PERÍODO 10/10/2001 – 31/10/2002.	31
FIGURA 20 – DINÂMICA TEMPORAL DOS PERFIS DE PARÂMETROS DE PLASMA DO VENTO SOLAR, Tp, Np, B E Vp ATRAVÉS DE CHOQUES FRONTAIS E REVERSOS DOS TIPOS LENTOS E RÁPIDOS, NO SISTEMA DE REFERÊNCIA DA ESPAÇONAVE.	35
FIGURA 21 - COMPOSIÇÃO ENTRE A OBSERVAÇÃO DE UMA NUVEM MAGNÉTICA OBSERVADA EM 18-20 DE OUTUBRO DE 1995 PRÓXIMO DA TERRA E UMA ILUSTRAÇÃO DO CENÁRIO SOLAR-INTERPLANETÁRIO RELACIONADO.	36
FONTE: DAL LAGO, 2003.	36
FIGURA 22 - RCG SENDO ESPALHADOS DEVIDO SUA INTERAÇÃO COM UMA ESTRUTURA MAGNÉTICA INTERPLANETÁRIA ATINGINDO A TERRA.....	37
FONTE: MODIFICADO DE AUGUSTO, 2006.....	37

FIGURA 23 - CLÁSSICO DECRÉSCIMO DE FORBUSH REGISTRADO POR TRÊS MONITORES DE NÊUTRONS (DEEPRIVER, MT. WELLINGTON, KERGUELEN) EM MEADOS DE JULHO DE 1982. FONTE: CANE, 2000.....	37
FIGURA 24 - OS PERFIS DE INTENSIDADE DE RAIOS CÓSMICOS OBSERVADOS EM UM MONITOR DE NÊUTRON ENQUANTO A TERRA É ATINGIDA PELO CHOQUE E SUA CORRESPONDENTE CME OU “EJECTA” (CAMINHO A) E ENQUANTO A TERRA É ATINGIDA APENAS PELO CHOQUE (CAMINHO B).....	38
FONTE: CANE, 2000.	38
FIGURA 25 - ESQUEMA FORA DE ESCALA MOSTRANDO A ÓRBITA DO SATÉLITE ACE SOBRE O PONTO L1.....	40
FIGURA 26 – VARIAÇÃO TEMPORAL DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO EVENTO OCORRIDO NO DIA 11 DE OUTUBRO DE 2001 DEMONSTRANDO A ASSINATURA DE UMA ONDA DE CHOQUE (MARCADA PELA LINHA AZUL) NOS DADOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO E O CONSEQÜENTE DECRÉSCIMO DE FORBUSH, VISUALIZADO NO PAINEL INFERIOR.....	41
FIGURA 27 – CLÁSSICO DECRÉSCIMO DE FORBUSH (DF). OS PAINÉIS MOSTRAM AS VARIAÇÕES PERCENTUAIS NA CONTAGEM DE RAIOS CÓSMICOS NOS 6 DETECTORES MENCIONADOS NO TEXTO OCORRIDO NO PERÍODO DE 9 A 19 DE OUTUBRO DE 2001.	42
FIGURA 28 - NO PAINEL SUPERIOR, EXEMPLO DE UM AUMENTO NOS DADOS DE CONTAGEM DE RC ORIUNDOS DO SATÉLITE IMP-8, ENQUANTO, CONFORME VISTO NOS OUTROS PAINÉIS, OCORRE DECRÉSCIMOS NOS DADOS DAS 5 ESTAÇÕES DE SUPERFÍCIE NO EVENTO QUE OCORREU NO DIA 2 DE ABRIL DE 2001.....	43
FIGURA 29 - EXEMPLO DE UM CHOQUE FRONTAL OBSERVADO EM 11 DE OUTUBRO DE 2001. A LINHA CONTÍNUA INDICA O CHOQUE (C) E AS LINHAS TRACEJADAS DELIMITAM AS JANELAS TEMPORAIS PRÉ-CHOQUE (U) E PÓS-CHOQUE (D).....	44
FIGURA 30 - VARIAÇÕES PERCENTUAIS MEDIDOS PELO DETECTOR DE RC À BORDO DO SATÉLITE IMP-8 VERSUS VARIAÇÕES NA VELOCIDADE DE PRÓTONS DURANTE CHOQUES FRONTAIS RÁPIDOS.....	46
FIGURA 31 - EXEMPLO DE DECRÉSCIMO DE RAIOS CÓSMICOS VERSUS O PARÂMETRO DE DENSIDADE. ESTA FIGURA NÃO MOSTRA QUALQUER ASSOCIAÇÃO ENTRE ESTAS GRANDEZAS, CONTRASTANDO COM O QUE É APRESENTADO NA FIGURA 21.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RIGIDEZES MAGNÉTICA E RAIOS DE GIRO DE UM PRÓTON COM DIFERENTES ENERGIAS.	19
TABELA 2 - COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIAÇÕES NAS CONTAGEM PERCENTUAIS NOS RAIOS CÓSMICOS EM DIFERENTES DETECTORES E VARIAÇÕES MÉDIAS DOS PARÂMETROS DE CHOQUES FRONTAIS RÁPIDOS (OS DETECTORES DE RC APARECEM EM ORDEM CRESCENTE DE RIGIDEZ DE CORTE).	45

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\Delta|B|$ – Variação do módulo do Campo Magnético Interplanetário
 ΔN_p – Variação de Densidade de prótons no meio interplanetário
 ΔT_p – Variação de Temperatura de prótons no meio interplanetário
 ΔV_p – Variação de Velocidade de prótons no meio interplanetário

ACE – *Advanced Composition Explorer*

ARIST – Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais

AU – Unidade Astronômica

CIR – Região de Interação Co – Rotante

CME – Ejeção Coronal de Massa

DF – Decréscimos de Forbush

DOY – Dia do Ano

eV – Elétron - Volt

HCS – Lâmina de Corrente Heliosférica

IMF – Campo Magnético Interplanetário

MMDP – Protótipo do Detector Multidirecional de Muons

PC – Parâmetros de Choque

RC – Raios Cósmicos

RCG – Raios Cósmicos Galácticos

RCS – Raios Cósmicos Solares

1. INTRODUÇÃO

Raios cósmicos são partículas, tais como prótons, elétrons e núcleos atômicos, vindos do espaço que constantemente bombardeiam a atmosfera terrestre.

Desde sua descoberta, no início do século XX, os raios cósmicos (RC) tem despertado a curiosidade e o fascínio dos pesquisadores de todo o mundo. O espectro de energia dessas partículas varia de 10^8 elétron-volts (eV) até valores maiores do que 10^{20} eV.

O interesse pelo estudo dessas partículas de alta energia surgiu basicamente por duas razões:

- Por alcançarem grandes energias, os RC provocam processos e reações em nível atômico até então desconhecidos. Tais processos levaram ao descobrimento de uma série de novas partículas.

- Os raios cósmicos carregam informações tanto sobre processos astrofísicos distantes, quanto sobre a heliosfera, meio interplanetário, magnetosfera e atmosfera terrestre, que antes de sua descoberta eram somente acessíveis a especulação.

Nesse sentido os propósitos do presente trabalho são: 1) Encontrar as periodicidades e amplitudes embutidas em séries temporais de dados de muons*, utilizando o método por regressão iterativa; 2) Discutir a natureza das periodicidades e comparar com os resultados apresentado na Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial de Marlos Rockenbach da Silva (Da Silva, 2005); 3) Encontrar qual ou quais parâmetros de choque interplanetário são responsáveis pelos decréscimos de Forbush observados em seis estações (5 na superfície e 1 no espaço) de detecção de raios cósmicos com diferentes rigidezes de corte.

No Capítulo 2 faz-se uma breve revisão teórica sobre a descoberta, classificação e outros conceitos pertinentes ao estudo dos raios cósmicos para o desenvolvimento desta Monografia.

O Capítulo 3 inicia com a descrição da natureza do ciclo de manchas solares e sua influência na atividade solar, que é responsável por vários fenômenos capazes de modular o fluxo de RC. São apresentadas as típicas periodicidades encontradas no fluxo dessas partículas. O Capítulo encerra-se com uma tentativa de interpretação da natureza dos fenômenos que dão origem as periodicidades encontradas nos dados de fluxo de muons obtidas pelo método de análise espectral por regressão iterativa.

* Muon é um tipo de Raio Cósmico Secundário. Mais detalhes encontram-se no Capítulo 2.

No Capítulo 4 são descritos os tipos de estruturas magnéticas interplanetárias presentes no vento solar, focando-se nas ondas de choques interplanetários. Posteriormente é apresentada a influência das ondas de choque na intensidade dos decréscimos de Forbush.

No Capítulo 5 são apresentadas as seis estações de detecção de raios cósmicos de onde foram obtidos os dados para análise dos decréscimos de Forbush e o satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), que disponibiliza dados de plasma do meio interplanetário, permitindo o cálculo dos parâmetros de choque. A partir das análises desses dados foram calculados os coeficientes de correlação entre eles para verificar quais parâmetros de choque são associados com os decréscimos de Forbush.

As considerações finais e conclusões desta Monografia são descritas e apresentadas no Capítulo 6.

2. RAIOS CÓSMICOS

2.1. Descoberta

No início do século XX um fenômeno bastante intrigante para os cientistas era o fato de que um eletroscópio carregado, mesmo que bem isolado com espessas placas de chumbo, gradualmente se descarregava, indicando que alguma radiação bastante penetrante seria capaz de atravessar os obstáculos de chumbo. A primeira interpretação para explicar tal fenômeno foi atribuída a raios que eram emanados da crosta terrestre devido a substâncias radioativas. Testou-se essa hipótese lançando um eletroscópio à bordo de um balão a altitude de 5 Km. Notou-se que o eletroscópio se descarregava mais rapidamente nessa altitude e que a taxa de ionização da atmosfera aumentava (Mursula & Usoskin, 2003).

Mostrou-se que a misteriosa radiação não era originada no Sol pois as taxas de ionização da atmosfera numa mesma altitude eram similares tanto de dia quanto a noite. Na época os raios gama eram conhecidos como a radiação de maior poder de penetração. Assim, um nome que os cientistas da época consideraram adequado para a radiação de origem extra-solar foi o de “Raios Cósmicos”.

Pesquisas no final da década de 1920 comprovaram que os RC não consistiam apenas de radiação eletromagnética, como erroneamente sugere o nome, mas são compostos em sua grande maioria por átomos ionizados como, por exemplo, prótons, núcleos de Hélio (partículas alfa) ou núcleos de elementos mais pesados. Essas partículas ionizantes são produzidas por diferentes fontes, tais como: o Sol, outras estrelas, supernovas e suas remanescentes, estrelas de nêutrons e buracos negros (Mursula & Usoskin, 2003).

2.2. Classificação

Aquelas partículas que estão no espaço e não alcançaram a Terra denominam-se raios cósmicos primários para distingui-los dos raios cósmicos secundários, os quais são gerados pela colisão dos raios cósmicos primários com os constituintes atmosféricos, geralmente uma molécula de nitrogênio ou oxigênio (Wada & Murakami, 1988).

É comum separar os raios cósmicos primários em três categorias:

- **Raios C3smicos Gal3cticos (RCG)** originam-se fora do sistema solar. Cerca de 90% dos RCG s3o pr3otons, 7 – 10 % s3o n3ucleos de He e em torno de 1% s3o elementos mais pesados. Comp3oem os RC mais energ3eticos, com a energia das part3iculas estendendo-se de 10^9 eletrons-Volt (ou 1 GeV) at3e 10^{21} eV, ou seja, dezenas de Joules.

- **Raios C3smicos Solares (RCS)** s3o gerados e acelerados principalmente a partir de fen3omenos solares transientes, tais como explos3oes solares, eje3oes coronal de massa e choques no meio interplanet3ario*. Os RCS podem alcan3ar energias de alguns GeV. A composi33o dos RCS 3e similar a dos RCG.

- **Raios C3smicos An3omalos (RCA)** originam-se do espa3o interestelar al3em da heliopausa. Uma das caracter3sticas principais que tornam os RCA diferente dos RCG e RCS 3e sua composi33o, contendo, por exemplo, mais h3elio do que pr3otons e muito mais oxig3enio do que carbono (Mursula & Usoskin, 2003).

Ao introduzir o assunto sobre raios c3smicos prim3arios, 3e comum apresentar o espectro de energia do fluxo destas part3iculas, que 3e demonstrado na Figura 1, onde as energias dos RC prim3arios variam de 10^8 eV a 10^{21} eV e, conforme aumenta a energia da part3icula menos frequ3ente 3e sua incid3encia na superf3cie da Terra.

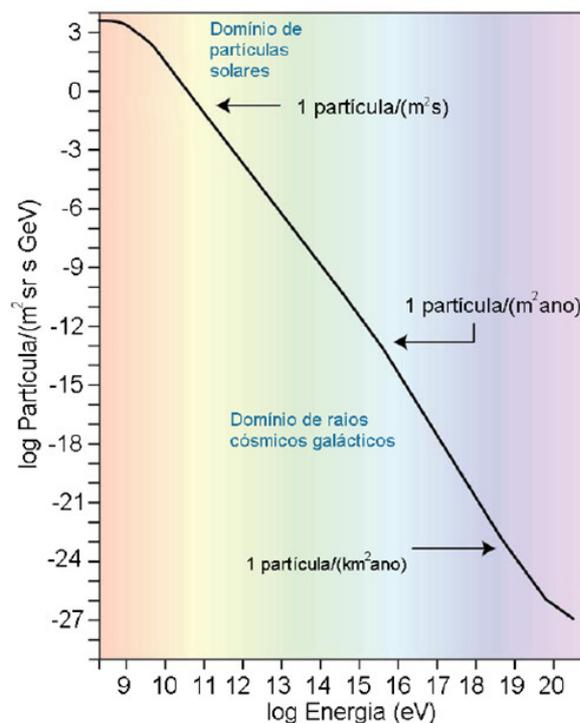


Figura 1 – Espectro de energia do fluxo de raios c3smicos mostrando que quanto mais energ3etica for uma part3icula mais rara 3e sua detec33o na superf3cie da Terra. Fonte: Modificado de Mursula & Usoskin, 2003.

* Os fen3omenos solares transientes ser3o discutidos nos Cap3itulos 3 e 4.

A importância relativa dos fluxos de RCG e RCS para diferentes energias dos raios cósmicos é mostrada na Figura 2. Em altas energias (acima de alguns GeV), os RCG correspondem à parte dominante do fluxo dos raios cósmicos (com maior incidência), mostrando uma anticorrelação com a atividade solar. Em baixas energias (inferior a algumas centenas de MeV), os CRS dominam o fluxo global de raios cósmicos. Na faixa de energia entre algumas centenas de MeV e alguns GeV, tanto os GCR quanto os SCR podem dominar o espectro de energia.

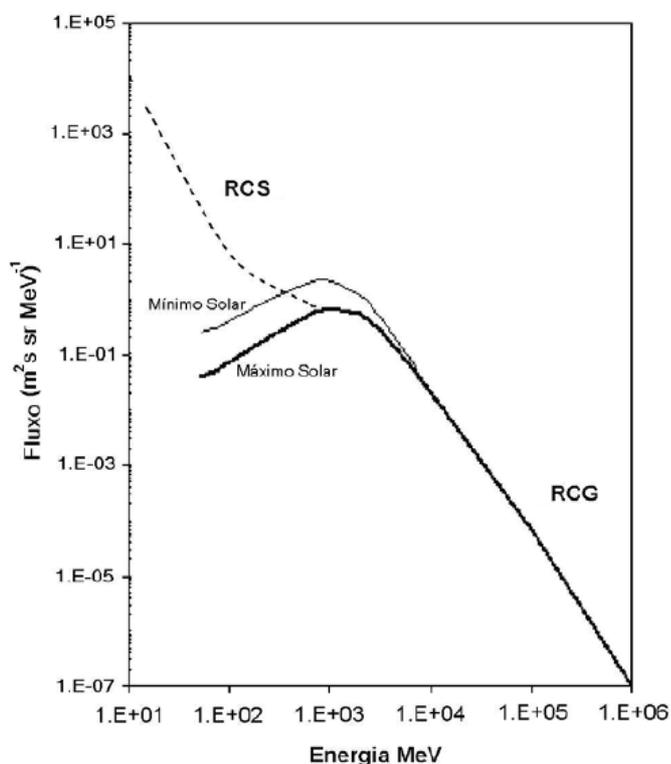


Figura 2 – Espectros de energia mostrando a comparação entre os fluxos de RCS (linha pontilhada) e RCG (linha contínua). Fonte: modificado de Mursula & Usoskin, 2003.

Uma das questões que permaneceu sem resposta por muitas décadas era a natureza do fenômeno que seria capaz de acelerar as partículas no espaço intergaláctico a velocidades próximas a velocidade da luz, alcançando energias várias ordens de grandeza superior ao mais potente acelerador de partículas já construído. Este enigma vem sendo solucionado pelos cientistas da colaboração internacional do Observatório Pierre Auger, localizado nos pampas argentinos. As pesquisas oriundas da colaboração internacional indicam as galáxias com núcleo ativo como fortes candidatas a fontes de raios cósmicos de ultra alta energia (The Pierre Auger Collaboration, 2007).

2.3. Chuveiro Cósmico

Quando partículas de raios cósmicos primários atingem o topo da atmosfera terrestre, através das colisões, reações nucleares fazem com que um conjunto de várias partículas secundárias seja gerado, dando início a um processo conhecido por “Chuveiro Cósmico”. Como as partículas primárias possuem energias relativísticas, a maioria das partículas secundárias propaga-se aproximadamente na mesma direção em que a componente primária se deslocava antes da colisão e o número de partículas secundárias cresce com o aumento da energia da partícula primária (Da Silva, 2005).

Um esquema das partículas geradas no chuveiro cósmico é apresentado na Figura 3, onde nota-se a quebra do primário em três tipos diferentes de RC secundários: a componente de baixa energia (composta basicamente por radiação eletromagnética), a componente de energia intermediária (formada principalmente de nêutrons e prótons) e a componente de alta energia.

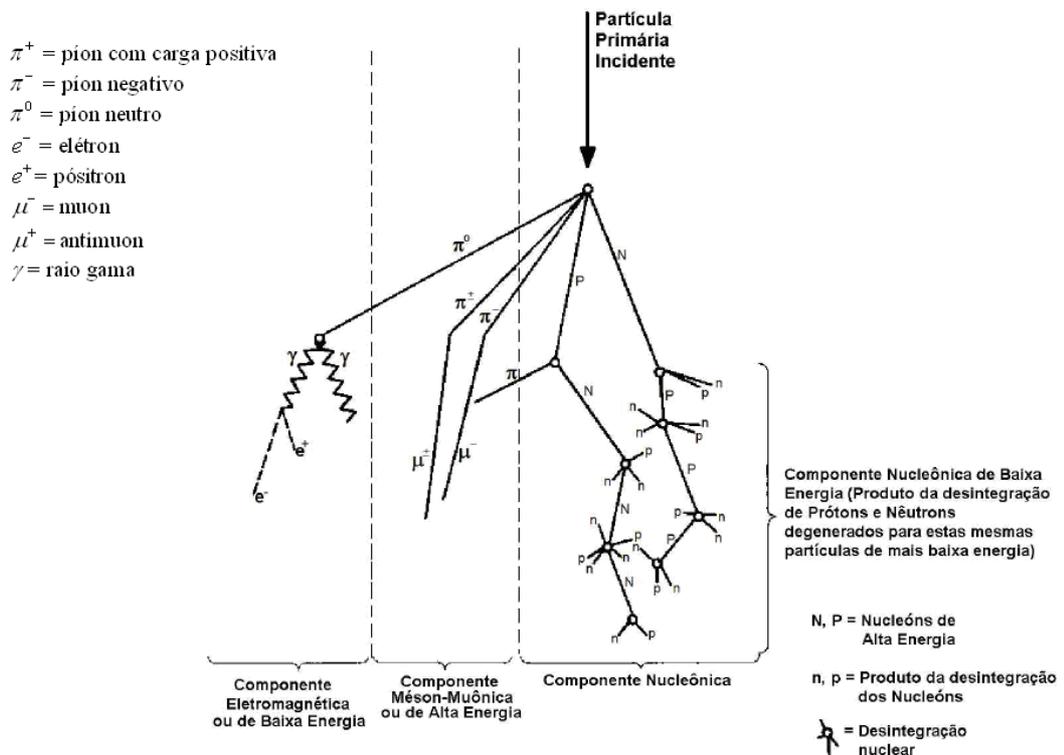


Figura 3 - Diagrama esquemático de um chuveiro cósmico gerado na atmosfera terrestre. Fonte: Modificado de Forbush, 1993.

Os RC primários, com energia menor do que 1 GeV, não produzem partículas secundárias capazes de alcançar a superfície terrestre, em nível do mar, devido a perdas por ionização e eventuais absorções na atmosfera (Duldig, 1994).

De todas as partículas secundárias destacam-se para fins de estudos científicos os nêutrons e os muons, pois estão entre as que atingem a superfície terrestre em maior quantidade e frequência. Os muons são partículas elementares e podem ser vistos como o “primo pesado” do elétron, pois tem carga negativa e possuem cerca de 200 vezes a massa do elétron (Alves & Luiz, 1998).

Os detectores de RC secundários mais utilizados atualmente para estudos de Geofísica Espacial são os monitores de nêutrons e os detectores de muons. As observações de muons são complementares aos estudos de nêutrons. Os monitores de nêutrons detectam partículas desde a mais baixa energia acessível a estações de solo (~ 1 GeV) até aproximadamente 50 GeV. Detectores de muons de superfície possuem respostas significantes desde aproximadamente 10 GeV até várias centenas de GeV, e detectores de muons subterrâneos podem observar partículas com energias acima de 1000 GeV (Duldig, 2000).

No Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8°W, 480 m a.n.m.), no Município de São Martinho da Serra, RS, foi instalado no ano de 2001 o protótipo de um detector multidirecional de muons (*Multidirectional Muon Detector Prototype - MMDP*). O detector MMDP era formado por duas camadas de 4 detectores, como mostra a Figura 4. As camadas eram sustentadas por uma estrutura metálica e intermediadas por uma camada de chumbo de alta pureza de 5cm de espessura, usada para absorver os componentes de mais baixa energia dos Raios Cósmicos Secundários. Cada um dos 8 detectores eram compostos por uma caixa metálica onde no topo localizava-se uma fotomultiplicadora.

Na porção inferior da caixa metálica estava localizado um plástico cintilante cujos átomos são excitados quando ocorrem a passagem de partículas de alta energia, de modo que o pulso elétrico gerado é detectado e amplificado pela fotomultiplicadora. Somente são contados como muons aquelas partículas que passam tanto por algum detector da camada superior como por algum detector da camada inferior, de forma a produzir pulsos elétricos nos dois circuitos correspondentes. Se uma partícula passar apenas em uma das camadas ela não será contada pela falta de correlação entre pulsos. A partir da configuração dos 8 detectores é possível obter 16 coincidências diferentes de pares de combinação (correlações). Como algumas coincidências são repetidas, como, por exemplo, as 4 combinações verticais, resultam num total 9 direções de detecção.

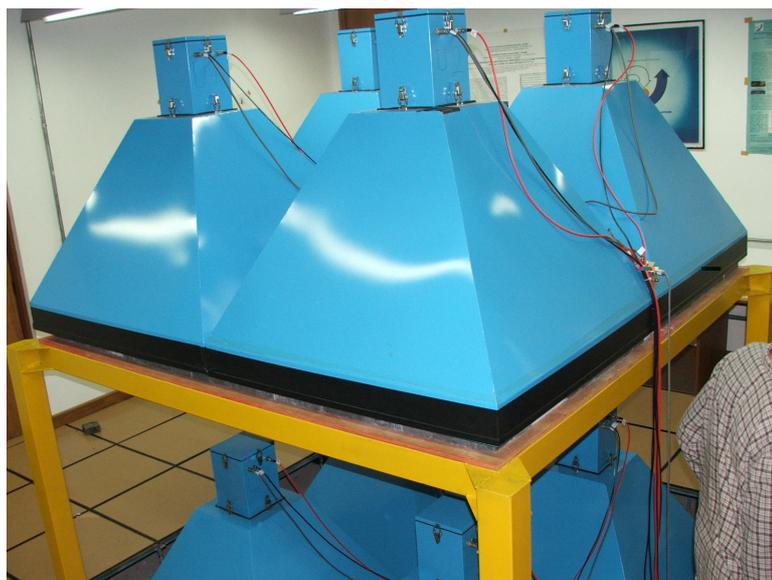


Figura 4 - Foto do MMDP instalado no OES/CRS/INPE – MCT mostrando em azul as 8 caixas de sistemas detectores em duas camadas.

As trajetórias dos muons podem ser consideradas como na Figura 5, que mostra um esquema, fora de escala, cujos vértices do cubo representam as 8 caixas detectoras mostrando as 8 direções de detecção (setas coloridas) e as 4 combinações de verticais (setas pretas). Percebe-se que a direção vertical é a que possui o maior número de correlações e contagens.

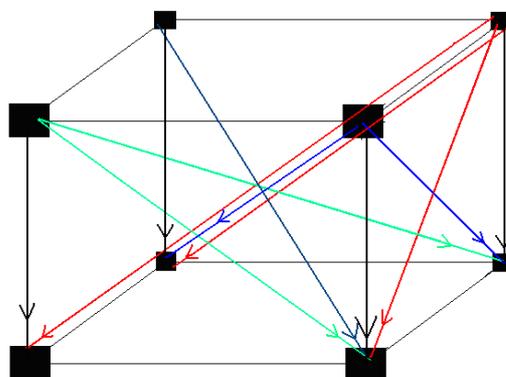


Figura 5 – Esquema fora de escala das 4 combinações verticais (setas pretas) e das 8 direções de detecção (setas coloridas) do MMDP.

Os dados gerados pelo MMDP possuíam a contagem das 9 direções mais dados de pressão e temperatura da sala. A resolução temporal desses dados eram de 1 hora, com imprecisão de 0.16% nos dados da direção vertical. Maiores informações sobre o MMDP podem ser encontradas em Da Silva et al, 2004. O MMDP funcionou até 2005, quando houve sua expansão para um conjunto de 58 detectores (27 na camada superior e 27 na inferior) com as mesmas configurações que o protótipo, porém permitindo obter contagens em 13 direções diferentes.

2.3. Rigidez de Corte Geomagnética

A trajetória de um raio cósmico é afetada pelos diversos campos magnéticos encontrados pelo caminho, gerados por estrelas e por planetas. Embora seja útil para comparação com outros ramos da Astronomia ou Física de radiações, energia não é a unidade de referência mais apropriada em estudos de propagação de uma partícula carregada na presença de um campo magnético.

Seja a energia total E de uma partícula relativística dada pela relação (2.3-1)

$$E = m_0 c^2 \gamma, \quad (2.3-1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, m_0 a massa de repouso da partícula e $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ é o fator adimensional de correção relativística. O momentum p da partícula é $p = m_0 v \gamma$. Nota-se que conforme a velocidade v da partícula tende para a velocidade da luz, c , a energia total tende ao produto pc . A rigidez magnética P ou momento normalizado por unidade de carga de uma partícula é a medida de sua resistência a uma força magnética que a deflete de uma trajetória retilínea (Jursa, 1965), e é definida pela equação (2.3-2):

$$\begin{aligned} P &= pc / q \\ P &= m_0 v c \gamma / q \end{aligned} \quad (2.3-2)$$

em que q é a carga da partícula. Se pc é dada em unidades de elétron-Volt, a unidade de P passa a ser o Volt. Considerando-se as equações (2.3-1) e (2.3-2), pode-se escrever a rigidez como

$$P = \frac{E v}{c q}. \quad (2.3-3)$$

Seja a força magnética \vec{F} dada por

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}, \quad (2.3-4)$$

onde \vec{B} é vetor campo magnético externo, o raio de giro r de uma partícula que move-se perpendicularmente a \vec{B} é descrito pela relação:

$$r = \frac{mv}{Bq}$$

ou

$$r = \frac{P}{Bq} . \quad (2.3-5)$$

Rearranjando as equações (2.3-2) e (2.3-5), obtém-se

$$r = \frac{P}{50B} , \quad (2.3-6)$$

onde r é dado em termos de unidade astronômica* (AU), B em nanoTesla (nT) e P em GV.

Escolhendo valores arbitrários de energia para um próton ($q = 1 \text{ eV}$) submetido a um campo magnético de módulo 5 nT e utilizando as equações acima se produz a Tabela 1.

Tabela 1 – Rigidezes magnética e raio de giro de um próton com diferentes energias.

Energia (GeV)	Velocidade	Rigidez (GV)	Raio de Giro (AU)
1	0.35 c	0.35	0.001
2	0.88 c	1.76	0.007
3	0.95 c	2.85	0.011
5	0.98 c	4.90	0.020
10	0.996 c	9.96	0.040
100	0.99996 c	99.996	0.40

Através da Tabela 1 percebe-se que a rigidez magnética e a energia de prótons possuem quase o mesmo valor numérico para energias acima de 2 GeV e que quanto maior a rigidez de uma partícula, maior será seu raio de giro quando submetida a um campo magnético externo (modificado Duldig, 1994).

Devido à configuração dipolar do campo geomagnético, a incidência na superfície terrestre dos raios cósmicos secundários é maior nos pólos do que no equador, pois a trajetória dessas partículas tende a se alinhar com as linhas do campo geomagnético, como mostrado na Figura 6.

* 1 unidade astronômica (sigla em inglês AU) é distância média entre a Terra e o Sol e vale em torno de 150 milhões de quilômetros.

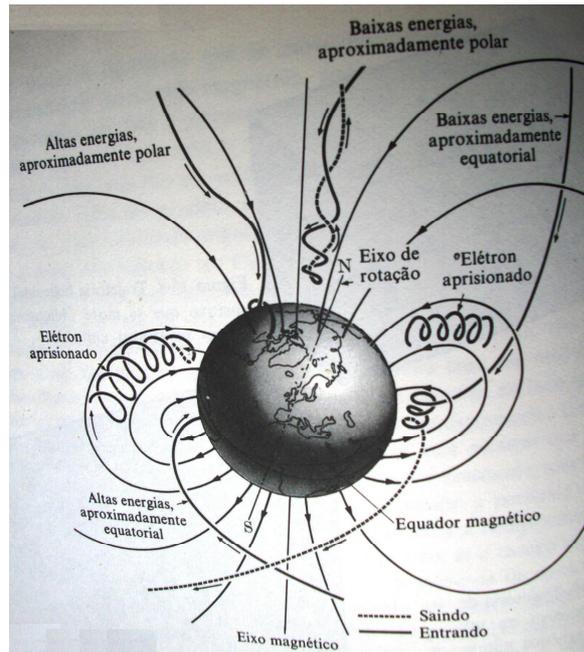


Figura 6 – Movimento de partículas carregadas no campo magnético terrestre.
Fonte: Alonso & Finn, 1972.

Para se avaliar a incidência de raios cósmicos secundários de acordo com a região da Terra deve-se consultar a rigidez de corte geomagnética do local (que é dada em Volts). Defini-se rigidez de corte geomagnética de determinado local como a mínima rigidez magnética que um RC primário deve possuir de modo que suas partículas secundárias atinjam a superfície. Assim, numa região equatorial, cuja rigidez de corte é cerca de 15 GeV, partículas secundárias somente alcançarão a superfície se a primária possuir energia de no mínimo 15 GeV. Um mapa das rigidezes de corte da Terra em função da latitude e longitude é mostrado na Figura 7.

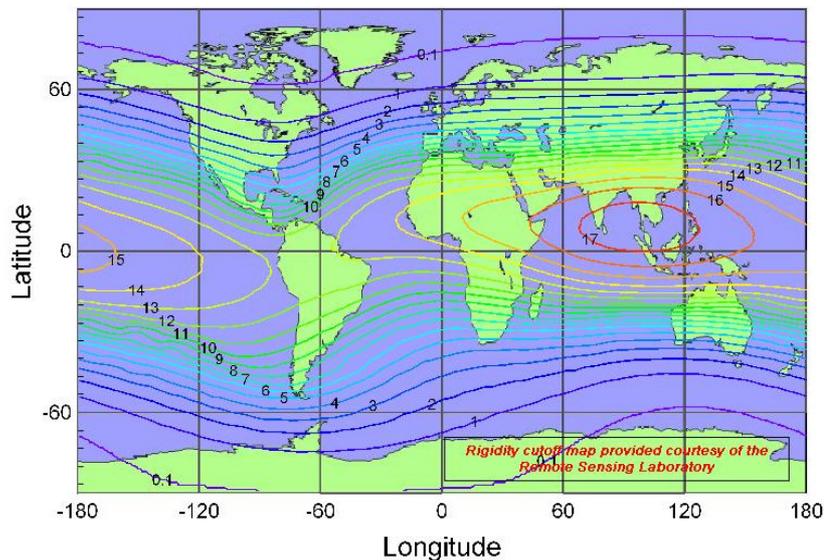


Figura 7 – Mapa da rigidez de corte magnética da Terra.
Fonte: www.seutest.com/RigidityCutoffMap.jpg.

3. PERIODICIDADES NO FLUXO DE MUONS

3.1. Atividade Solar

As primeiras evidências acerca da atividade solar estão relacionadas com a variação do número de manchas solares na superfície do Sol. Astrônomos determinaram que o número de manchas observado na superfície solar apresentava um comportamento variável e periódico, com um período de aproximadamente 11 anos.

3.1.1. As manchas solares

Embora as manchas solares sejam conhecidas desde vários séculos antes de Cristo (Kilvelson & Russel, 1995), existem poucos registros históricos de suas observações a olho nu, pois apenas manchas extremamente grandes podem ser vistas sem o auxílio de um telescópio e devido ao fato de que a ocorrência de manchas com tal magnitude é raríssima. Os povos do ocidente na Idade Média interpretaram (erroneamente) as manchas como a passagem de Mercúrio ou Vênus sobre o disco solar (Van Helden, 1996). Por isso, as primeiras observações não obtiveram grandes repercussões, visto que a passagem dos referidos planetas diante do Sol não implicava em nenhum acontecimento extraordinário.

Concluir que as manchas ocorriam de fato na superfície solar só seria possível com o auxílio de algum instrumento ótico. Foi em julho de 1610 quando o astrônomo italiano Galileu Galilei apontando sua luneta em direção ao Sol verificou a presença das referidas manchas na superfície solar. Um grupo de manchas solares observados pelo astrônomo italiano é mostrado na Figura 8.

As principais conclusões obtidas por Galileu foram:

- as manchas estão contíguas ao Sol ou separadas dele por uma distância imperceptível;
- não são estrelas nem nada permanente, mas alteram-se continuamente, sendo umas mais duradouras e outras menos;
- sua figura é bastante irregular; elas unem-se e se separam ao acaso (se observadas isoladamente);

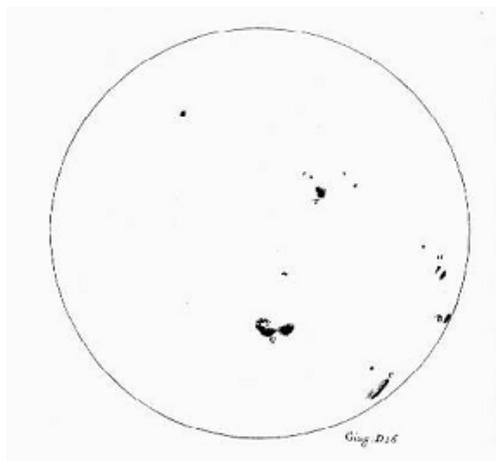


Figura 8 - Grupo de manchas solares na superfície do Sol registrados por Galileu no século XVII.
Fonte: Moschetti, 2006.

- apresentam um único movimento universal e uniforme em linhas paralelas (isto é, vistas em conjunto, percebe-se um movimento regular e contínuo);
- as manchas se concentram em uma faixa entre 28° ou 29° ao norte e ao sul do equador solar;
- as manchas não deviam ser escuras, apenas pareciam menos claras que o Sol, e isto seria devido ao contraste com o corpo intensamente luminoso do astro (Moschetti, 2006).

Posteriormente realizou-se a importante descoberta de que o Sol apresenta rotação diferenciada, de modo que o período de rotação da região equatorial é cerca de 25 dias, enquanto que, conforme se afasta do equador, o período de rotação gradualmente aumenta até alcançar um valor de até 34 dias nas regiões polares*.

A rotação diferencial intensifica o campo magnético na superfície solar pelo acúmulo de linhas de campo fazendo com que fluxo magnético comece a emergir para fora da fotosfera[†]. Ocorre a expulsão de matéria da fotosfera na direção das linhas de campo magnético, mecanismo conhecido como dínamo solar, conforme é demonstrado na Figura 9a. As regiões em que os laços magnéticos saem e retornam à fotosfera possuem polaridades magnéticas opostas e nelas surgem as manchas solares, como é mostrado na Figura 9b (Hoyt & Schatten, 1997).

* Fonte: http://www.ufcg.edu.br/prt_ufcg/assessoria_imprensa/mostra_noticia.php?codigo=3698

[†] Fotosfera é a camada visível do Sol. As outras camadas são a cromosfera e a coroa solar.

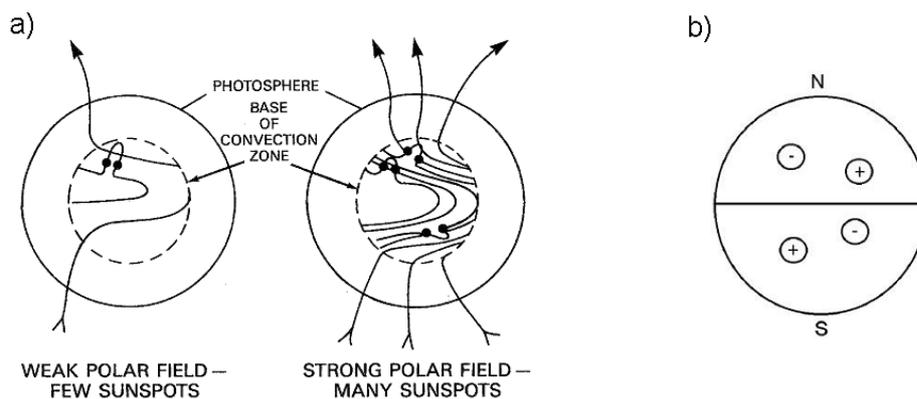


Figura 9 - a) Dínamo Solar. Campo inicial poloidal evoluindo para um campo toroidal devido à rotação diferencial solar. b) Polaridade das manchas solares nos diferentes hemisférios. Fonte: Hoyt & Schatten, 1997.

Atualmente sabe-se que as manchas solares são regiões em torno de 2000 K mais frias do que a fotosfera solar circunvizinha. Elas emitem menos radiação do que a fotosfera em geral porque possuem intensos campos magnéticos (cerca de 1000 vezes mais intensos do que a superfície clara) que parcialmente bloqueiam a radiação transmitida para cima pelas células de convecção na região sub-fotosférica (Kilvelson & Russel, 1995). Ampliando-se a imagem de uma mancha, nota-se uma região central escura, denominada umbra, rodeada por uma zona com filamentos radiais claros e escuros, a penumbra, conforme mostrado na imagem da Figura 10.

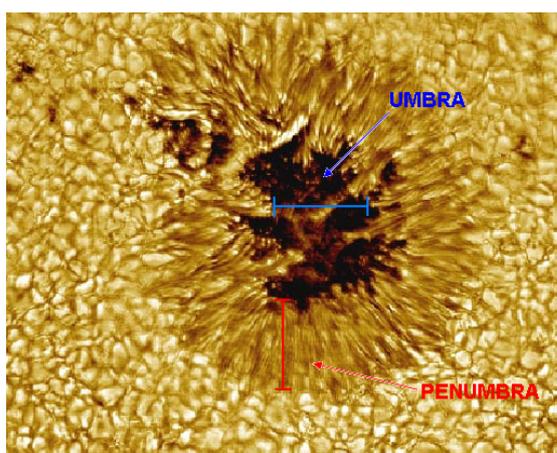


Figura 10 - Foto ampliada de uma mancha solar mostrando a umbra (região central escura) rodeada pela penumbra. FONTE: <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hall/1018/observacoes2.html>.

3.1.2. Ciclo de 11 anos e Eventos Solares

Passados 17 anos de cuidadosas observações do Sol, o alemão farmacêutico e astrônomo amador Samuel Heinrich Schwabe descobriu na década de 1840 o ciclo de 11 anos no número de manchas solares, como é mostrado no exemplo da Figura 11.

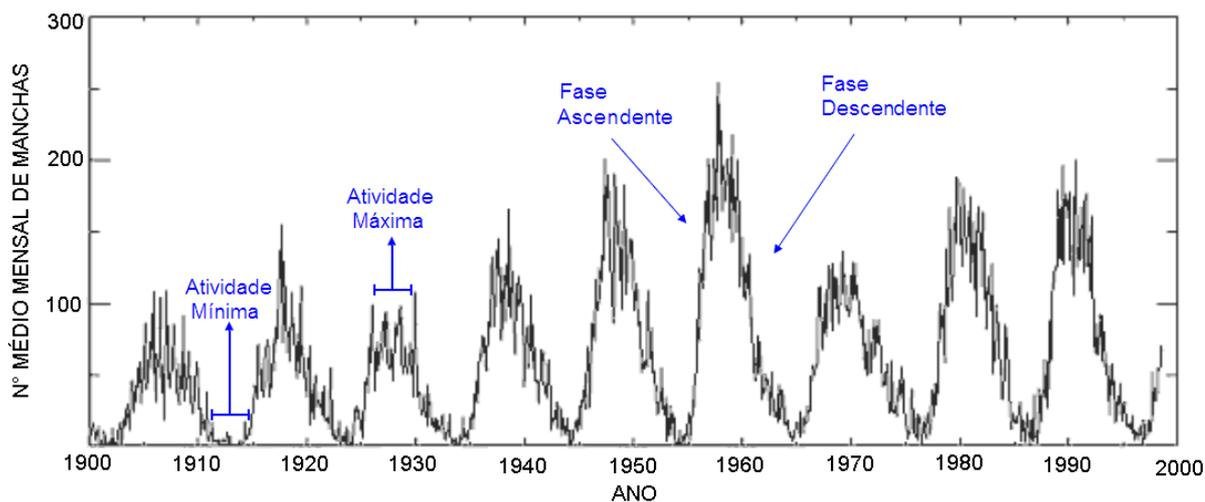


Figura 11 - Gráfico do número médio mensal de manchas solares nos últimos 100 anos, cujo ciclo de 11 anos é evidente. FONTE: <http://astro.if.ufrgs.br/esol/explorsol.htm>.

Não existe ainda uma compreensão física completa sobre a origem do ciclo solar. Modernas teorias atribuem ao modelo de dínamo solar o mecanismo responsável pelas características periódicas das manchas, embora esse modelo não explique, por exemplo, a variação da amplitude nas épocas de máximo e mínimo.

Uma clara assimetria nos ciclos solares é mostrada na Figura 11. A fase ascendente, que estende-se do mínimo ao máximo, é mais curta - média de 4 anos - do que a fase descendente, do máximo para o mínimo - duração de 5 a 6 anos.

O número de manchas solares é o índice mais antigo da atividade solar, servindo como uma medida da atividade magnética geral do Sol (Echer, 2003). Deste modo, o período de atividade solar máxima ocorre concomitantemente ao período com maior número de manchas solares.

No período de atividade solar máxima é mais frequente a ocorrência de diversos eventos solares, tais como explosões solares (*flares*), ejeções de massa da coroa solar (sigla em inglês *Coronal Mass Ejections* - CME) e eventos de prótons-solares. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada evento:

- **Flares:** explosões de partículas energéticas e de raios X intensos resultantes de variações abruptas do campo magnético em escala relativamente pequena (comparadas à superfície solar). Um flare ocorrido no dia 29 de outubro de 2003 é mostrado na Figura 12a;

- **CME:** bolhas magnéticas gigantes, com milhões de quilômetros de extensão ao serem lançadas*, que arremessam violentamente nuvens de plasma de milhões de toneladas para o meio interplanetário, com velocidades entre 400 e 1000 km/s. A Figura 12b mostra uma CME fotografada por um coronógrafo no dia 27 de fevereiro de 2000;

- **Eventos de prótons-solares:** liberação de grande quantidade de prótons de alta energia (da ordem de milhões de elétrons-volts) que ocasionalmente acompanham os *flares* e as CME. Prótons suficientemente energéticos, com energias acima de um bilhão de elétrons-volts, interagem com os núcleos de átomos de nitrogênio e de oxigênio da atmosfera, gerando nêutrons e criando anomalias com abundância de nitratos. Uma “chuva” de nêutrons atinge a superfície terrestre produzindo o que é conhecido como evento ao nível do solo (*Ground Level Enhancement - GLE*) (Odenwald & Grenn 2008).

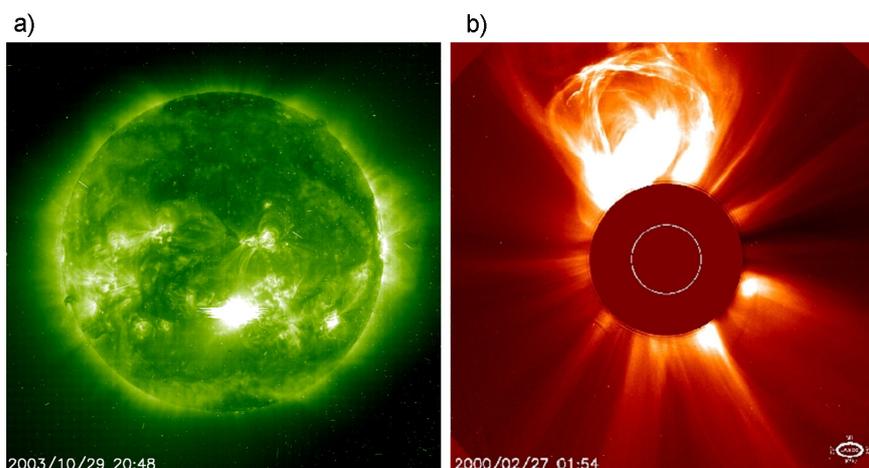


Figura 12 - a) A região branca mais brilhante nesta imagem foi causada por uma explosão solar.

b) Imagem de uma CME fotografada por um coronógrafo.

Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/>.

3.2. Variações no Fluxo de Raios Cósmicos

O estudo das variações periódicas no fluxo de RC tem se mostrado uma importante ferramenta para se avaliar quais os fenômenos responsáveis pela modulação desse fluxo. É bem conhecida, por exemplo, a anticorrelação mantida entre o ciclo de manchas solares de 11

* Conforme propagam-se no meio interplanetário, as CME “inflam” de modo que ao atingir a Terra já possuem dezenas de milhões de quilômetros de extensão.

anos e dados de RC secundários observados por monitores de nêutrons, como é apresentado na Figura 13.

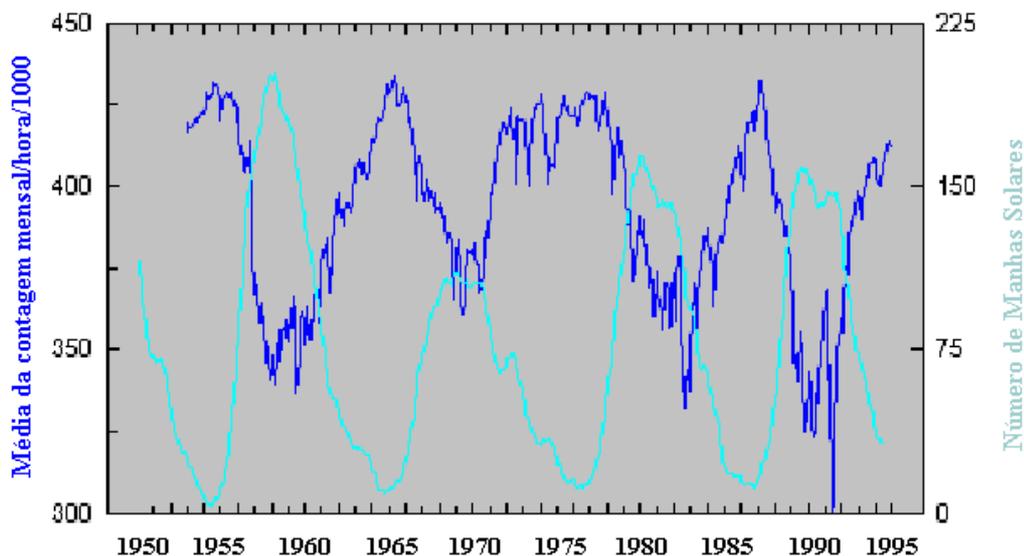


Figura 13 - Gráfico mostrando a anticorrelação mantida entre a intensidade mensal média de raios cósmicos medido pelo monitor de nêutrons de Clímax e o número de manchas solares no período de 1950 a 1995.

Fonte: modificado de http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/image/cr_ssn.gif.

Para melhor entender essa anticorrelação, é necessário definir antes o campo magnético interplanetário.

O campo magnético solar é dito estar “congelado” no plasma solar e é arrastado pelo vento solar. Devido a rotação diferenciada do Sol, as linhas do campo magnético solar vão se torcendo conforme o vento solar se afasta do Sol, formando uma estrutura espiral em latitudes equatoriais. Tal estrutura é conhecida como campo magnético interplanetário (“*Interplanetary Magnetic Field*” - IMF), com intensidade de aproximadamente 5nT nas circunvizinhanças da Terra. Um esquema do IMF é mostrado na Figura 14. Em adição, uma lâmina de corrente neutra (lâmina de corrente heliosférica, HCS - *heliospheric current sheet*) resulta deste fluxo, mantendo uma separação entre os hemisférios Norte e Sul de polaridades opostas do IMF. O ângulo entre o eixo de dipolo magnético e o eixo de rotação solar causa uma ondulação na HCS, formando uma configuração chamada de “saia de bailarina”, como é mostrado na Figura 15. Para aumentar um pouco mais a complexidade desta estrutura, existe o ciclo de manchas solares de 11anos, ciclo de atividade solar, no qual a HCS é relativamente plana no mínimo solar, mas no máximo solar produz ondulações que se estendem a heliolatitudes acima de 70°. Outro fato importante é que a polaridade do IMF reverte em cada máximo solar, originando uma periodicidade para o fenômeno de 22 anos (Duldig, 1994).

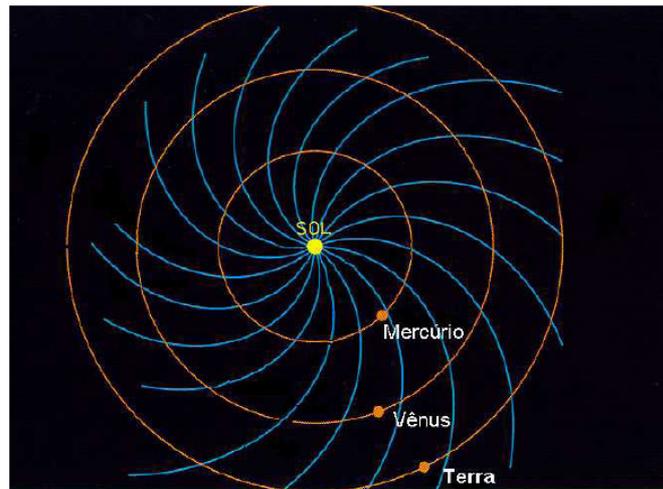


Figura 14 - Campo magnético interplanetário na forma de uma espiral. Fonte: <http://www.gsfc.nasa.gov/>.

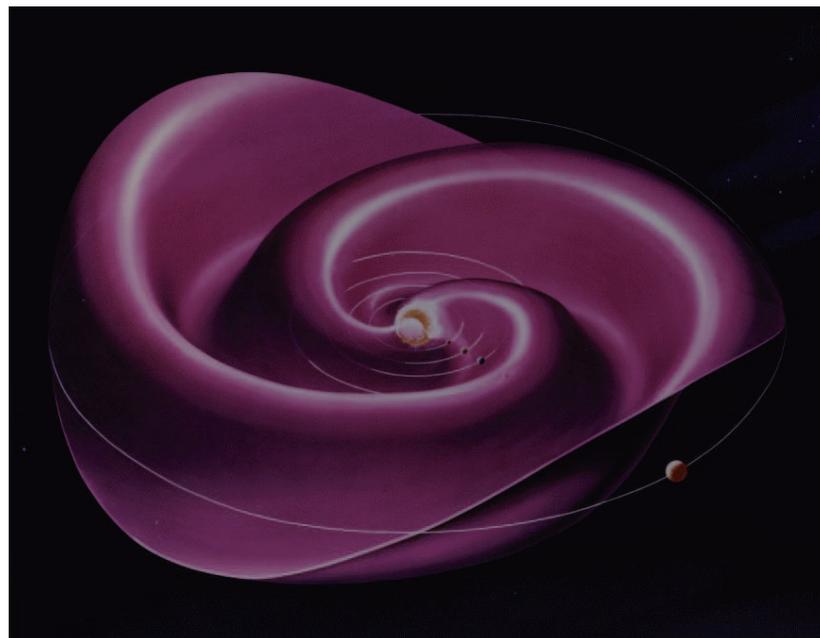


Figura 15 – Diagrama indicando a estrutura ondulatória do IMF dando origem a configuração “saia de bailarina”. Fonte: <http://wso.stanford.edu/gifs/HCS.html>.

A anticorrelação do fluxo de raios cósmicos galácticos com a atividade solar é devido ao fato do vento solar e o IMF agirem como uma barreira mais eficiente para o transporte de raios cósmicos na heliosfera interna em épocas de máxima atividade solar. Pode-se verificar uma variação de 22 anos na intensidade dos raios cósmicos pela diferença no formato do fluxo máximo destas partículas durante mínimos solares com diferentes polaridades. Esta variação de 22 anos possui explicações bastante vagas sem haver ainda um entendimento definitivo.

Efeitos do campo magnético solar são responsáveis pela variação em torno de 27 dias no fluxo de RC. Nesse período de quase 1 mês o Sol completa uma rotação nas regiões equatoriais causando mudanças na posição da lâmina nêutra de corrente heliosférica.

Além de fatores extraterrestres, existem variações no fluxo de RC de natureza terrestre. Variações sazonais e diurnas ocorrem devido a diferenças nas condições atmosféricas (temperatura, densidade, etc.) entre estações de inverno e verão e os turnos de dia e noite, respectivamente, (Mursula & Usoskin, 2003).

3.3. Variações nos dados do detector vertical do MMDP

Da Silva, 2005, efetuou uma procura de periodicidades embutidas nas séries temporais do detector vertical do MMDP, utilizando análises espectrais por ondeletas de Morlet e multi-taper. O período de análise foi de 26/10/2001 a 11/10/2002, período em que os dados de muons não apresentavam falhas. Foram encontrados periodicidades distribuídas entre 3 dias e 44 dias, destacando-se períodos de 12, 25 e 34 dias. Abaixo do nível de confiança, obtiveram-se periodicidades de 8 horas, 12 horas e 24 horas.

Na presente Monografia, utilizou-se o método de análise por regressão iterativa de séries temporais (“*Time Series Iterative Regression Analysis*” - ARIST) para verificar as periodicidades embutidas nas mesmas séries temporais de muons estudadas por Da Silva, 2005.

A seguir é feita uma breve descrição do ARIST e de suas vantagens com relação a outros métodos de análise espectral.

3.3.1. Método - Análise por Regressão Iterativa de Séries Temporais

O método de análise por regressão iterativa de séries temporais - ARIST, descrito na sua forma geral por Wolberg, 1967, aperfeiçoado e modificado em linguagem C por Rigozo et al., 2005, pode ser aplicado ao ajuste de qualquer função (derivável em relação aos parâmetros e variáveis) a dados experimentais, sem necessidade de linearização prévia. Ele é aplicado, nesta Monografia, à procura de periodicidades em séries temporais, com o uso, para cada período considerado, de uma única função senoidal com três parâmetros desconhecidos, a_0 = amplitude, a_1 =frequência angular, e a_2 = fase da função. O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional F, dada por:

$$F = Y - a_0 \sin(a_1 t + a_2) \quad (3.3.1-1)$$

onde Y é o sinal medido, t é o tempo e a_0 , a_1 , a_2 são os três parâmetros desconhecidos, que podem ser procurados por iterações através da minimização do quadrado desta função F. O número máximo de iterações computacionais utilizado na determinação dos três parâmetros mencionados foi de 200 (Rigozo & Nordemann, 1998).

As principais vantagens do ARIST apontadas por Rigozo et al, 2005, é de fornecer, com maior confiabilidade do que muitos outros métodos, os valores de amplitude, frequência e fase com seus respectivos desvios-padrão, permitindo uma seleção das amplitudes mais importantes que apresentam maiores valores na relação amplitude/desvio. Tem a potencialidade de informar longas tendências com períodos que são maiores do que o intervalo de tempo da série. Tais tendências permitem efetuar previsões e/ou reconstrução de séries temporais como se essa série toda pertencesse a um segmento de uma função senoidal.

3.3.2. Periodicidades nos dados do MMDP

Aplicou-se o método ARIST na série temporal dos dados horários do detector vertical do MMDP para o período de outubro de 2001 a outubro de 2002. Os valores das intensidades dos raios cósmicos podem ser dados tanto em termos das contagens brutas, quanto em porcentagem da contagem média relativa a um período específico. Como o ARIST exige que os dados sejam centrados com relação ao zero, efetuou-se a contagem percentual calculada em relação à média dos dados referente ao período 10/2001 a 10/2002, utilizando-se a expressão:

$$Contagens(\%) = \left[\frac{Contagens(partículas/hora) - Média do período}{Média do período} \right] \times 100. \quad (3.3.2-1)$$

O resultado das contagens percentuais relativa versus o tempo é apresentado na Figura 16. No gráfico da Figura 16 o eixo horizontal corresponde ao dia do ano (DOY, do inglês “Day of year”) contado a partir do dia 1º de janeiro de 2001. Assim, o início da série, que data de 10/10/2001, equivale ao DOY 283 e o último dia, 31/10/2002, equivale ao DOY 669.

Encontraram-se diversos valores de periodicidades distribuídas entre 2 dias a 33 dias. Consideraram-se apenas os valores de períodos e amplitudes com confiabilidade maior que 95%, pois, conforme verifica-se no estudo de distribuição normal ou gaussiana, quantidades que apresentam valores maiores que o dobro de seu desvio padrão ($>2\sigma$), possuem

confiabilidade maior que 95%. Assim, obteve-se o gráfico de barras de amplitude *versus* período, apresentado na Figura 17.

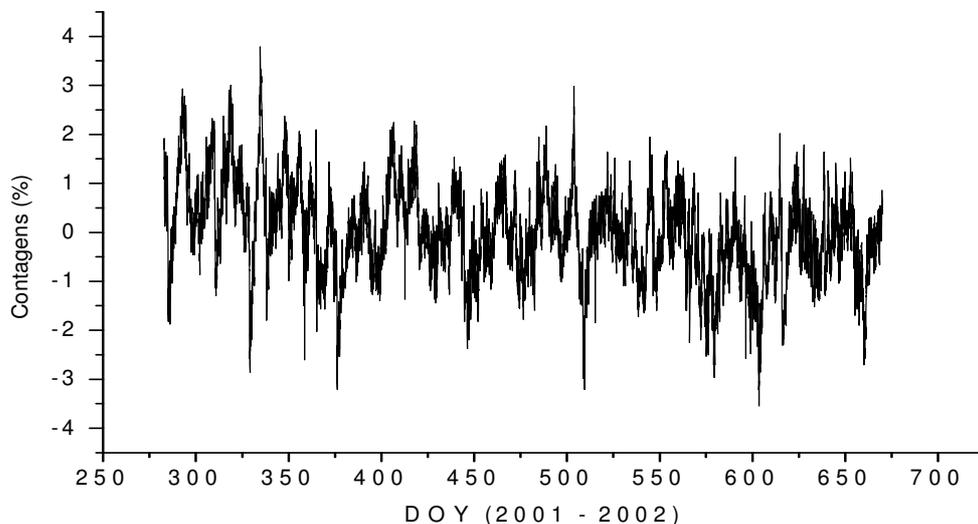


Figura 16 - Contagens relativa a média da série horária de dados do detector vertical do MMDP para o período de 10/10/2001 (DOY=283) a 31/10/2002 (DOY=669).

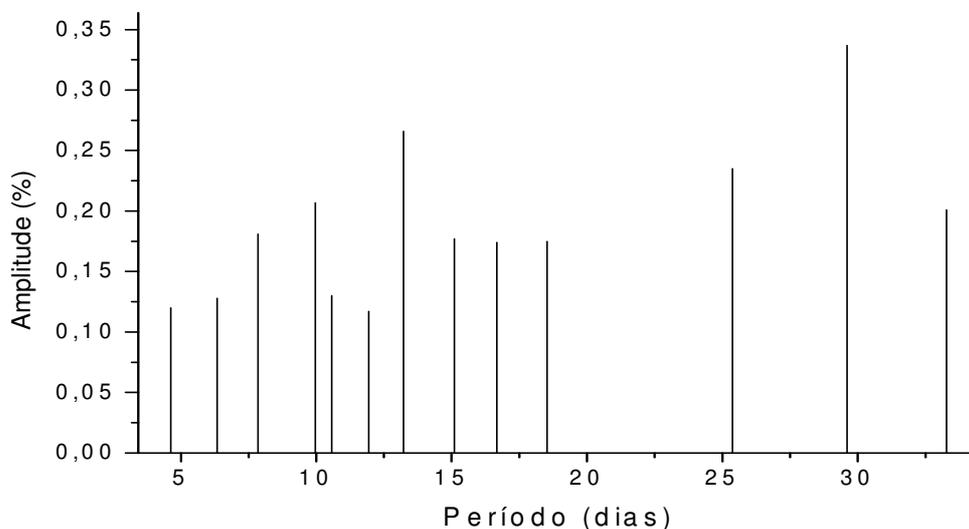


Figura 17 –Gráfico de barras dos valores de amplitude *versus* período obtido através do ARIST a partir da série temporal de contagens percentual horária do detector vertical do MMDP relativo ao período 10/10/2001 – 31/10/2002.

Em busca de novos valores de periodicidades embutidas nos dados do detector vertical do MMDP em questão, obteve-se, a partir da série horária, uma série com valores diários de contagem do mesmo período. O resultado das contagens percentuais relativa ao valor médio dessa série diária é apresentado no gráfico da Figura 18. No caso das séries diárias,

encontraram-se valores de periodicidades entre 6 dias e 193 dias. O resultado dos períodos e amplitudes com confiabilidade maior do que 95% são expostos no gráfico da Figura 19.

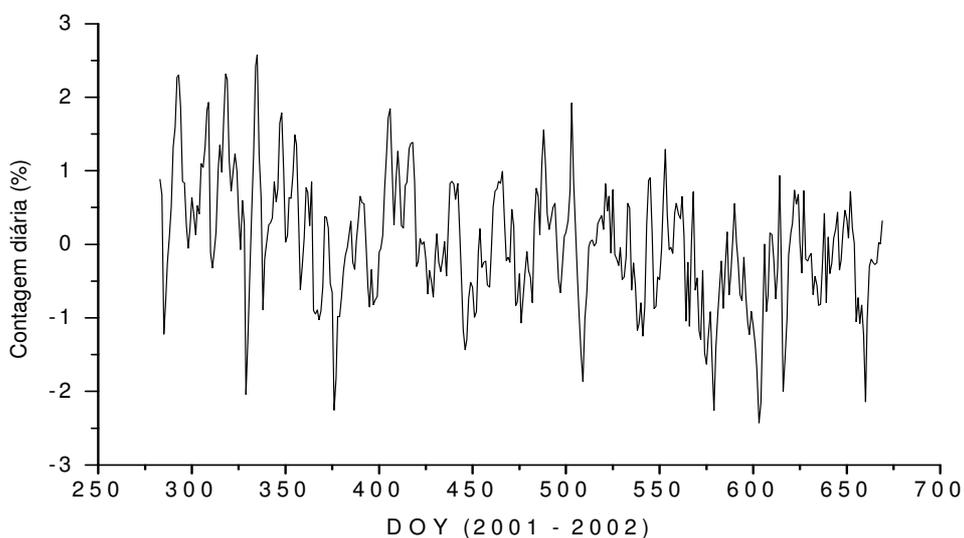


Figura 18 - Contagens percentuais relativa ao valor médio da série diária de dados do detector vertical do MMDP para o período de 10/10/2001 (DOY=283) a 31/10/2002 (DOY=669).

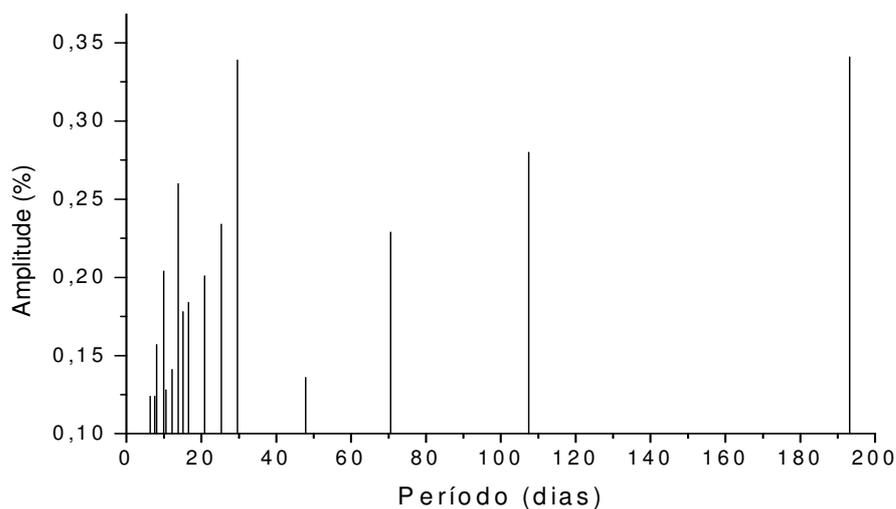


Figura 19 – Gráfico de barras dos valores de amplitude *versus* período obtido através do ARIST a partir da série temporal de contagens percentual diária do detector vertical do MMDP relativo ao período 10/10/2001 – 31/10/2002.

É evidente, como se observa nos resultados da Figura 19, o surgimento de periodicidades maiores que os apresentados na Figura 17. Esses valores de 47 a 193 dias podem estar relacionados com variações sazonais.

Períodos entre 25 e 33 dias com altas amplitudes, associadas claramente com a rotação diferenciada do Sol, que é justamente de 25 e 34 dias, são apresentados nos resultados dos gráficos de ambas as Figuras 17 e 19.

Os períodos em torno de 13.5 dias podem estar associados com a posição da Terra acima ou abaixo da lâmina de corrente heliosférica, implicando em diferentes regimes dos raios cósmicos no hemisfério Sul e Norte do campo magnético interplanetário (Duldig, 1994).

Pode-se perceber que o método ARIST obteve periodicidades com valores próximos aqueles obtidos por Da Silva, 2005, além de apresentar novos períodos, como os de 9, 107 e 193 dias.

Como este estudo ainda encontra-se em fase preliminar, pretende-se ampliar o período e as direções* das séries analisadas, por meio dos dados do MMD expandido, que opera desde 2005. Será pesquisado com maior detalhe os fenômenos responsáveis pelas variações dos RC, principalmente aquelas entre 2 e 9 dias, que ainda são desconhecidos.

* Lembrando-se que nesta Monografia foi analisada apenas a série correspondente a direção vertical do MMDP.

4. ESTRUTURAS MAGNÉTICAS INTERPLANETÁRIAS

4.1. Tipos de Estruturas Magnéticas Interplanetárias

As estruturas magnéticas interplanetárias mais comuns presentes no vento solar são as CME e as regiões de interação co-rotantes (cujas siglas em inglês são *Corotating Interaction Region* - CIR). As CIR originam-se basicamente da interação dos feixes de plasma rápido e lento oriundos do Sol. Os feixes de plasma rápidos originam-se nos buracos coronais estendendo-se a altas latitudes, visto que nestas regiões o campo magnético solar possui uma configuração de linhas de campo abertas e não oferece resistência ao fluxo de partículas, enquanto que os feixes de plasma lentos originam-se nas regiões solares de mais baixa latitude, onde as linhas do campo magnético solar são fechadas, oferecendo resistência ao fluxo de partículas e, assim, diminuindo sua velocidade.

Uma região de interação desenvolve-se quando uma superfície de interface de fluxo separa o vento lento à frente do vento rápido. Com o aumento da distância heliocêntrica radial, o vento rápido colide com o vento lento criando uma região de compressão e, conseqüentemente, com o vento solar rápido, desenvolve-se uma região de rarefação na parte de trás da estrutura. A compressão eleva a velocidade da superfície de interface para um valor intermediário, entre as velocidades dos feixes lento e rápido. Se a configuração de interação de feixes de vento solar for estável sobre várias rotações solares, a região é chamada região de interação co-rotante.

Outra estrutura interplanetária de interesse são as chamadas “nuvens magnéticas”. Uma nuvem magnética é uma CME com particulares características. A região compreendida por esta estrutura possui pouca flutuação e intenso módulo de campo magnético (geralmente entre 10 – 25 nT) com baixa temperatura de prótons e beta de plasma (tipicamente em torno de 0.1). Além disso, a componente z do campo magnético interplanetário tem rotação do norte para o sul (ou vice-versa).

É possível que duas ou mais estruturas interplanetárias interajam uma com a outra, gerando uma estrutura interplanetária complexa com características distintas das estruturas que a deram origem. A maioria dos registros de estruturas complexas envolve um choque frontal rápido seguido por uma nuvem magnética ou uma CIR acompanhada de uma nuvem magnética (Gonzalez, 1999).

4.2. Choques Interplanetários

Estruturas do vento solar ejetadas pelo Sol, tais como remanescentes de CME e regiões de interação co-rotantes, frequentemente propagam-se com velocidade excedente a velocidade do meio, ou seja, a velocidade do vento solar, e, assim, produzem choques interplanetários à sua frente (modificado de Sheley et al, 1985 e Echer, 2005).

As assinaturas do choque nos dados do meio interplanetário são vistos como abruptos aumentos em parâmetros de plasma e campo magnético do vento solar. Segundo a variação desses parâmetros, os choques são classificados como frontais e reversos, os quais, por sua vez, podem ser rápidos ou lentos. Dessa maneira, verificam-se quatro tipos de choques no meio interplanetário.

Um choque (reverso ou frontal) é dito rápido quando sua velocidade relativa ao vento solar é maior do que a velocidade de onda magnetossônica rápida. Por outro lado, um choque é lento quando sua velocidade relativa ao vento solar é maior do que a velocidade de onda magnetossônica lenta (Echer, 2003).

A dinâmica temporal do comportamento dos perfis típicos ocasionados por choques reversos e frontais nos dados de parâmetros de plasma tais como temperatura (T_p), densidade (N_p) e velocidade de prótons do vento solar (V_p) e intensidade do campo magnético interplanetário ($|B|$) são mostrados na Figura 20. Como se percebe nessa Figura 20, choques frontais lentos apresentam saltos positivos (ou seja, os valores médios dos parâmetros crescem através dos choques) em V_p , T_p e N_p , mas possuem saltos negativos em $|B|$. A maioria dos choques encontrados no meio interplanetário é do tipo frontal rápido, os quais mostram saltos positivos em todos os parâmetros de plasma. Choques reversos apresentam saltos positivos em V_p porque o vento solar está arrastando o choque. Tanto para choques reversos lentos quanto para choques do tipo rápido N_p e T_p têm saltos negativos. Para choques reversos lentos, $|B|$ apresenta salto positivo, anticorrelacionado a queda na densidade de prótons (Echer, 2006).

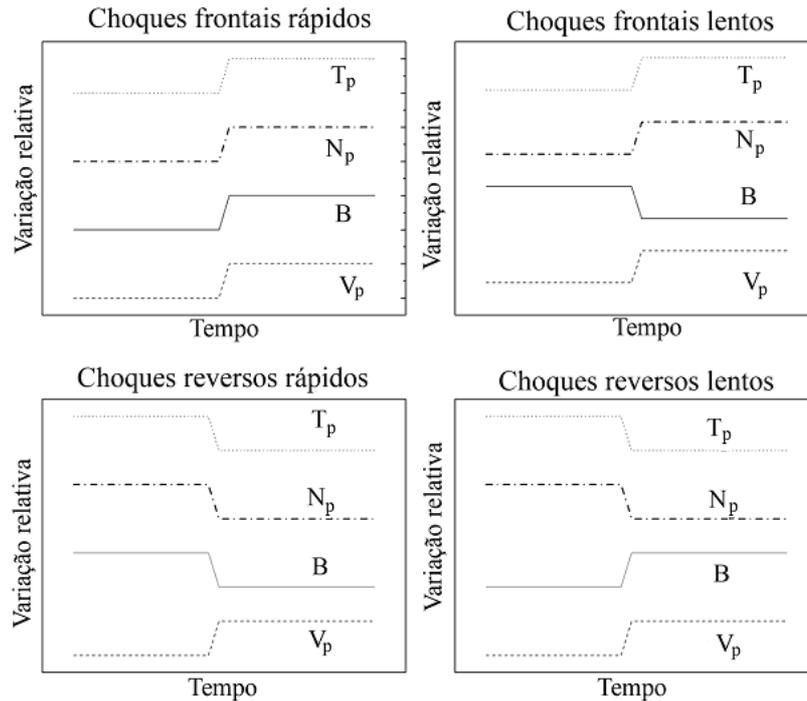


Figura 20 – Dinâmica temporal dos perfis de parâmetros de plasma do vento solar, T_p , N_p , $|B|$ e V_p através de choques frontais e reversos dos tipos lentos e rápidos, no sistema de referência da espaçonave.

Uma comparação entre uma observação da evolução dos parâmetros físicos de uma nuvem magnética em 18-20 de outubro de 1995 e uma ilustração da estrutura solar-interplanetária envolvida é representada na Figura 21. Neste caso a estrutura é representada por uma nuvem magnética oriunda de uma CME. Essa nuvem magnética possuía velocidade suficientemente grande para produzir um choque a sua frente. O choque é representado na Figura 21 pela seta superior, tanto nos gráficos quanto na ilustração. A seta logo abaixo mostra a região de compressão ou bainha, formada logo após o choque. Devido a forte flutuação nos valores do campo, supõe-se que haja forte turbulência nessa região. A seta seguinte indica a nuvem magnética, que apresenta um campo magnético com poucas flutuações e mais intenso que as demais regiões. A rotação da componente z do campo magnético (B_z) é de sul para norte (mostrada pela quarta seta). Devido à grande intensidade de B_z , houve uma queda no índice Dst graças a intensificação da corrente de anel (indicado pela última seta na parte inferior da Figura 21), gerando-se assim uma tempestade geomagnética intensa.

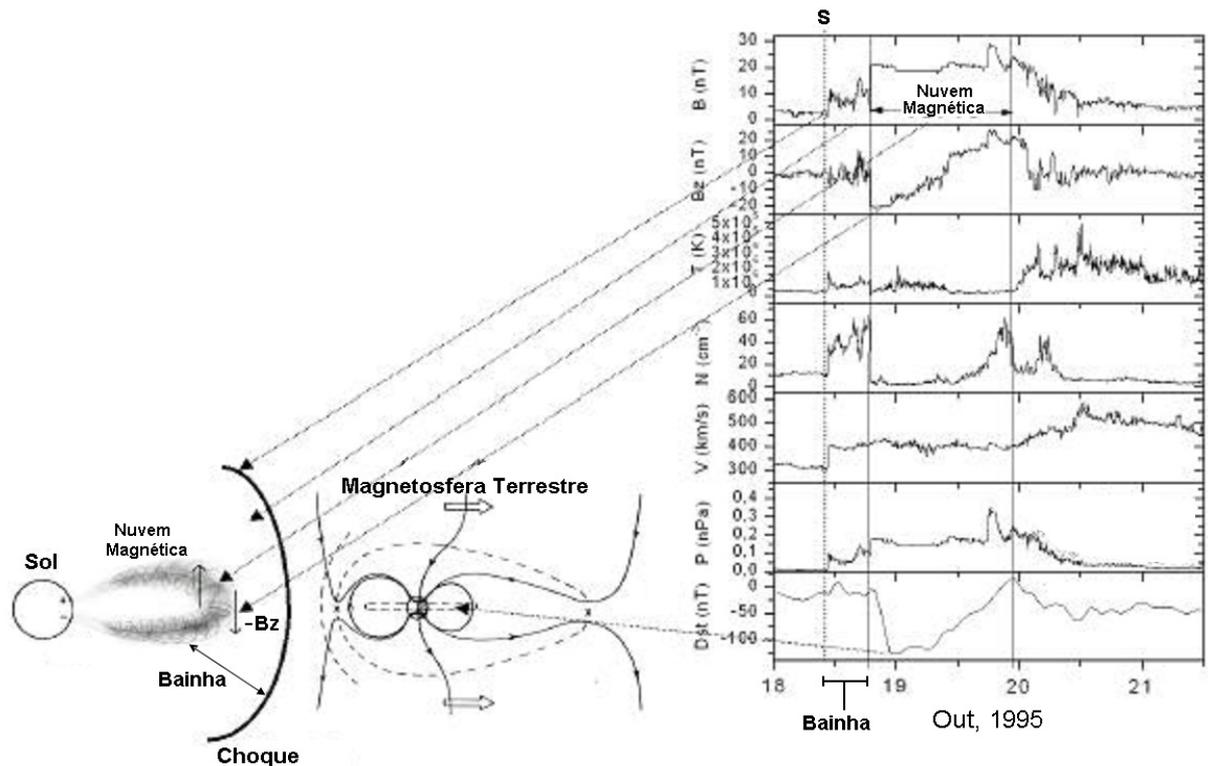


Figura 21 - Composição entre a observação de uma nuvem magnética observada em 18-20 de outubro de 1995 próximo da Terra e uma ilustração do cenário solar-interplanetário relacionado.
 Fonte: Dal Lago, 2003.

4.3. Decréscimos de Forbush

Além das variações periódicas no fluxo de RC visto no Capítulo 3, existem variações esporádicas associadas a eventos transientes ocorridos no vento solar. Súbitos decréscimos na contagem de dados de superfície de RC secundários que duram até cerca de uma semana foram primeiros observados por Scott E. Forbush em 1937 usando câmeras de ionização. Porém, foi apenas no início dos anos 1950 que John A. Simpson, usando monitores de nêutrons, mostrou estar no meio interplanetário a origem dos decréscimos.

A Terra quando atingida por uma estrutura interplanetária do vento solar como, por exemplo, uma CME, é ilustrada na Figura 22. As setas vermelhas indicam o desvio causado na trajetória dos RCG pela sua interação com a estrutura interplanetária. Assim, durante a passagem de alguma estrutura pela Terra, é comum ser medido uma redução na contagem de partículas em monitores de superfície de muons e nêutrons.

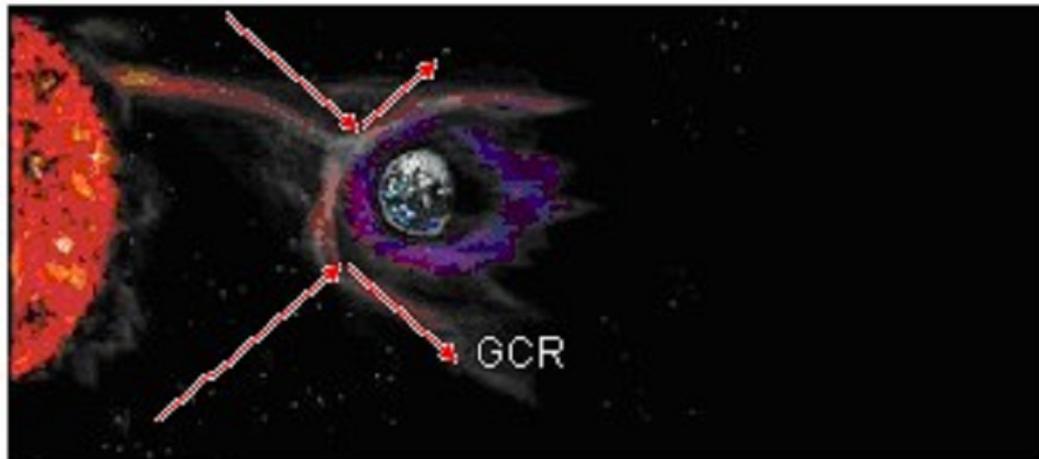


Figura 22 - RCG sendo espalhados devido sua interação com uma estrutura magnética interplanetária atingindo a Terra.

Fonte: modificado de Augusto, 2006.

Os perfis desses decréscimos não recorrentes apresentam uma fase de “súbito ataque” ocasionado pelo choque, alcançando a máxima depressão em cerca de 1 dia e uma fase de recuperação mais gradual. O caso em que a Terra é atingida pelo choque e sua correspondente CME recebe o nome de clássico decréscimo de Forbush, conforme é demonstrado no diagrama da Figura 23.

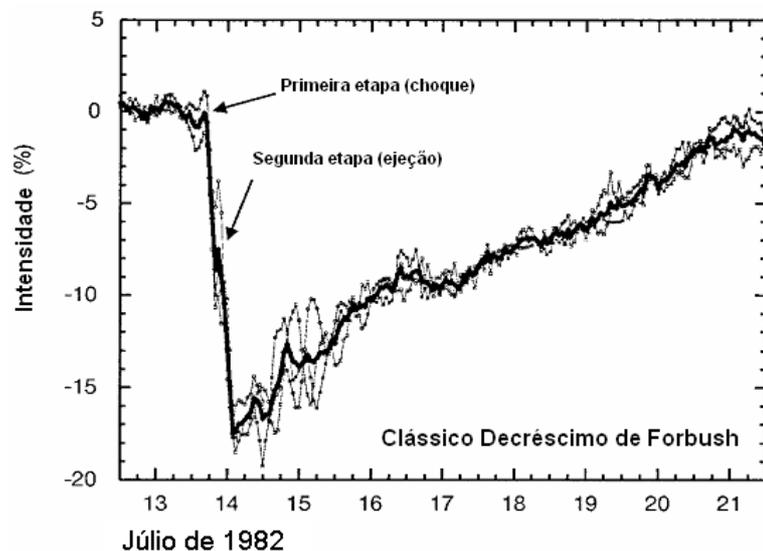


Figura 23 - Clássico decréscimo de Forbush registrado por três monitores de nêutrons (DeepRiver, Mt. Wellington, Kerguelen) em meados de julho de 1982. Fonte: Cane, 2000.

É usual que a Terra seja atingida apenas pelo choque interplanetário, pois o choque possui uma extensão espacial maior do que a estrutura interplanetária que lhe deu origem*. Se o choque e sua correspondente estrutura (uma CME, por exemplo) passam pela Terra, o perfil da intensidade de raios cósmicos observado num monitor de neutros é semelhante aquele do

* Seria como, por exemplo, uma CME que atinge a Terra de “raspão”

caminho A do diagrama da Figura 24. O caminho B representa a Terra sendo atingida apenas pelo choque e o respectivo perfil da intensidade de nêutrons. As posições T1 e T2 representam o início e o fim da CME (denotado por “*ejecta*” na Figura 24). “Ej” marca o início da CME no perfil de RC do caminho A. Em ambos os perfis, os diagramas mostram o momento em que é medido o choque, designado por “S”.

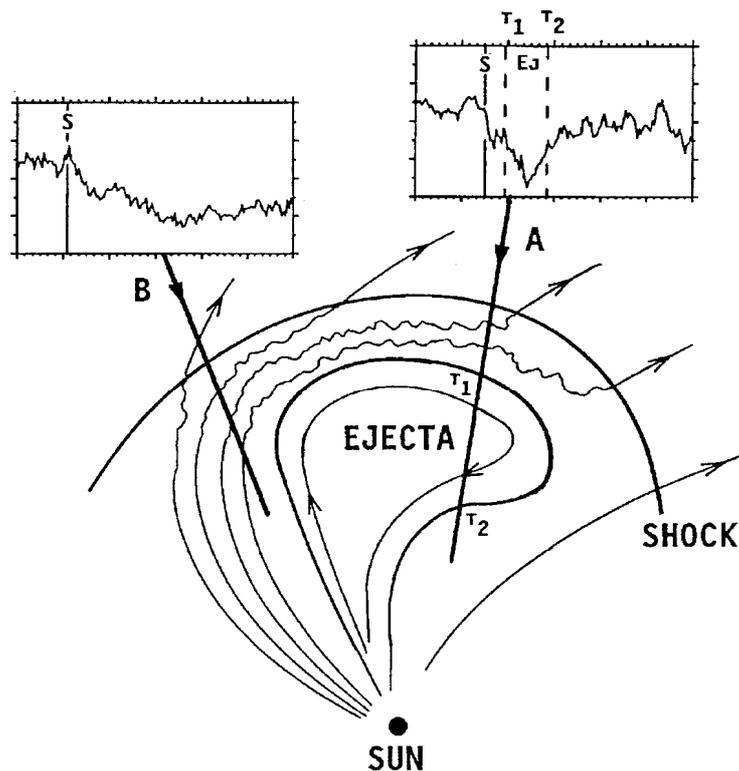


Figura 24 - Os perfis de intensidade de raios cósmicos observados em um monitor de nêutron enquanto a Terra é atingida pelo choque e sua correspondente CME ou “*ejecta*” (caminho A) e enquanto a Terra é atingida apenas pelo choque (caminho B).

Fonte: Cane, 2000.

5. ASSOCIAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE CHOQUES INTERPLANETÁRIOS E DECRÉSCIMOS DE RC

No presente Capítulo 5 são apresentadas as fontes de dados de raios cósmicos e de plasma do meio interplanetário. É exposto o método utilizado para o cálculo dos parâmetros de choque (PC). Para se inferir qual parâmetro de choque é responsável pelos decréscimos de Forbush (DF), são avaliados os valores dos coeficientes de correlação entre os PC e as variações percentuais dos DF.

5.1. Dados de RC

Foram utilizados dados relativos ao ano 2001, num período de máximo solar, de seis estações de RC com diferentes rigidezes de corte. Análises foram efetuadas com dados de contagens de partículas com energia acima de 60 MeV do detector G do instrumento MED (*Medium Energy Detector*) à bordo do satélite IMP-8. Dados provenientes de 4 monitores de nêutrons, a saber, Thule – Groelândia (onde a rigidez de corte é maior do que 0.5 GV), Clímax – Colorado – EUA (> 3 GV), Beijing – China (> 10 GV) e Haleakala – Hawaii (> 13 GV). Os dados das 5 estações de RC mencionados são gratuitamente disponibilizados na internet. A sexta fonte de dados de raios cósmicos foi o protótipo do detector multidirecional de muons – MMDP do Observatório Espacial do Sul, o qual iniciou a operação em 6 março de 2001.

A transmissão dos dados do satélite IMP-8 foi interrompido no dia 25 de outubro de 2001. Portanto, não existem dados para os períodos de 1º de janeiro à 6 de março do MMDP e a partir de 25 de outubro de 2001 do IMP-8.

5.2. Dados de plasma do Meio interplanetário

A NASA lançou o satélite *Advanced Composition Explorer* - ACE em 25 de agosto de 1997. Este satélite orbita o ponto langrangeano L1 o qual é o local marcado pelo equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra e situa-se em torno de 1.5 milhões Km da Terra (distância 100 vezes menor que 1 AU), como mostrado no desenho da Figura 25. Logo, o ACE está

sempre voltado para o Sol, sendo atingido antes que a Terra pelas estruturas magnéticas interplanetárias provenientes do Sol.

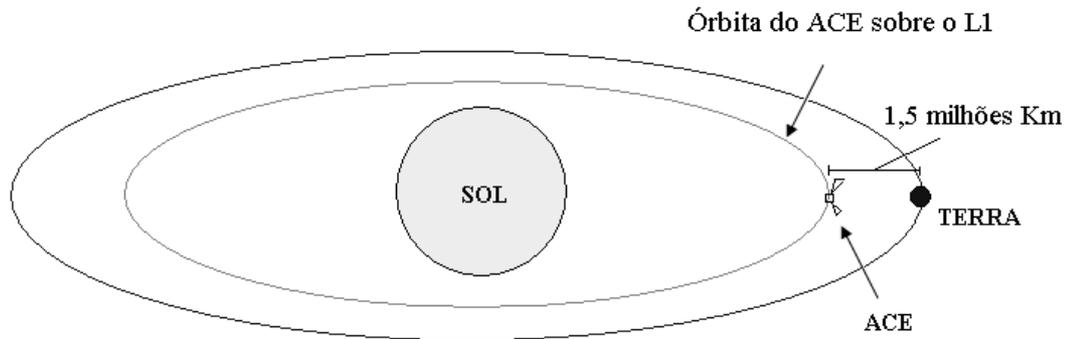


Figura 25 - Esquema fora de escala mostrando a órbita do satélite ACE sobre o ponto L1.

Entre outros fatores, o satélite envia informações dos parâmetros físicos do vento solar. Tais dados são oriundos dos instrumentos MAG (*Magnetometer*) e SWEPAM (*Solar Wind Electron*), ambos a bordo do ACE. Os dados são encontrados no site da missão*, estando no formato ASCII, com resolução temporal de 64 s e prontos para serem analisados.

5.3. Avaliação dos decréscimos de Forbush e cálculo dos Parâmetros de Choque

Conforme foi mencionado, uma onda de choque interplanetário pode ocasionar um decréscimo de Forbush. A assinatura de uma onda de choque em dados de plasma do meio interplanetário de módulo do campo magnético ($|B|$), velocidade (V_p), densidade (N_p) e temperatura de prótons (T_p), além do correspondente decréscimo de Forbush causado na contagem percentual do detector vertical do MMDP ($V_{\mu on}(\%)$), é apresentado na Figura 26. Este evento ocorreu no dia 11 de outubro de 2001, equivalente ao dia do ano 284 (sigla em inglês DOY). A variação percentual do $V_{\mu on}(\%)$ foi cerca de 2.5%.

Ao se verificar a Figura 26 surgem as seguintes questões: a variação em que tipo de dados de plasma será responsável pelo decréscimo de Forbush? Supondo-se que na região do choque o valor de $|B|$ atingisse 50 nT ao invés de 28 nT, a variação percentual de $V_{\mu on}$ continuaria sendo 2,5%, ou mudaria? E para os outros dados de temperatura, velocidade ou densidade, qual seriam os efeitos causados pelas variações deles nos dados de RC?

* Dados disponíveis em http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_MAG-SWEPAM.html.

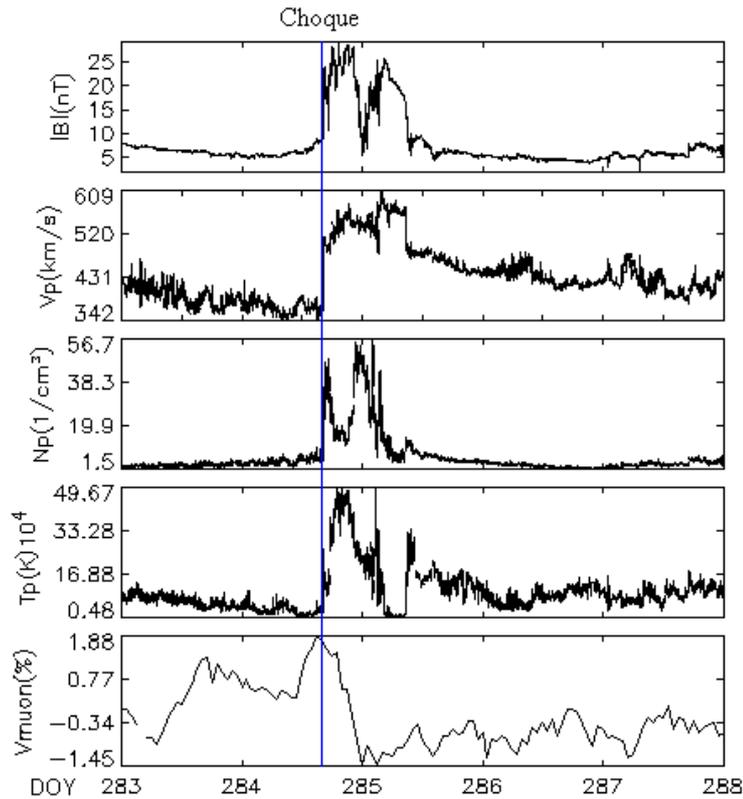


Figura 26 – Variação temporal dos parâmetros físicos do evento ocorrido no dia 11 de outubro de 2001 demonstrando a assinatura de uma onda de choque (marcada pela linha azul) nos dados do meio interplanetário e o conseqüente decréscimo de Forbush, visualizado no painel inferior.

Uma maneira de responder essas questões seria avaliar os coeficientes de correlação entre a variação nos dados de plasma na passagem do choque, denominados parâmetros de choque* (PC), e as variações percentuais dos decréscimos de Forbush, de vários eventos.

As datas dos eventos de decréscimos de RC foram procuradas nas datas dos choques interplanetários frontais encontradas na lista “ACE Lists of Disturbances and Transients”[†] ocorridos em 2001, pois os decréscimos de RC estão associados à ocorrência desses choques. Os choques reversos não foram analisados pois além de pouco frequentes, ocorrem geralmente junto com um choque frontal, sendo difícil distinguir qual deles seria responsável pelos decréscimos de Forbush.

O decréscimo de Forbush do dia 11 de outubro de 2001 ocorrido nas seis estações de RC antes mencionadas é mostrado na Figura 27.

* Logo, simbolizam-se os parâmetros de choque por ΔN_p , ΔV_p , ΔT_p e $\Delta |B|_p$.

[†] A lista é disponível em http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACElists/obs_list.html.

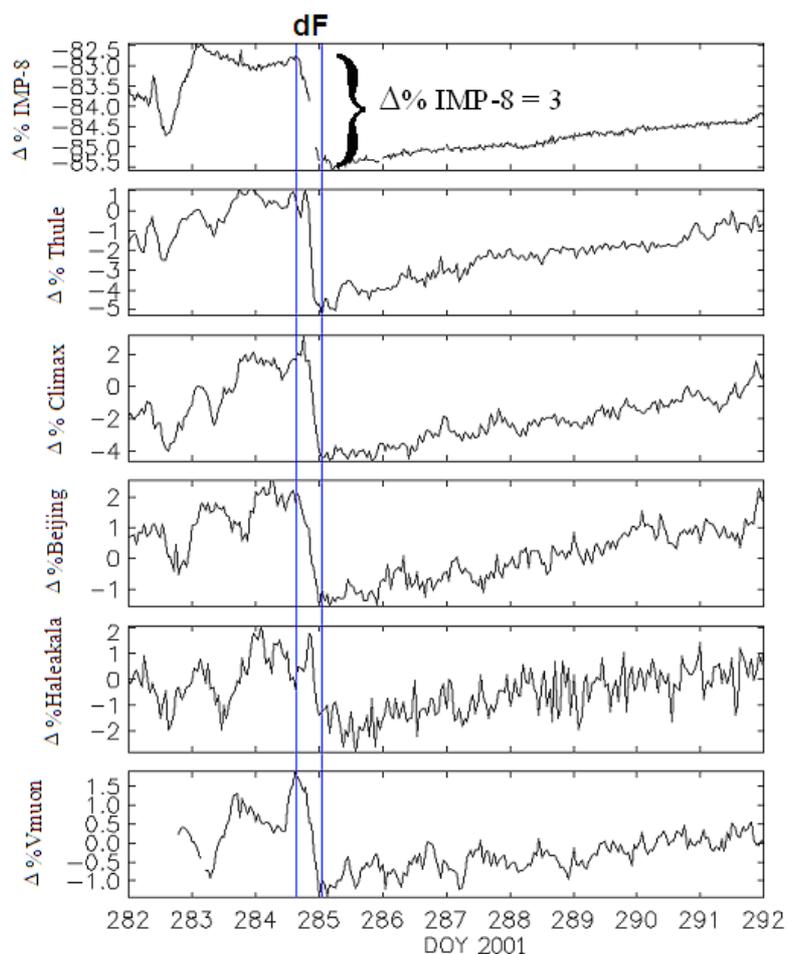


Figura 27 – Clássico decréscimo de Forbush (dF). Os painéis mostram as variações percentuais na contagem de raios cósmicos nos 6 detectores mencionados no texto ocorrido no período de 9 a 19 de outubro de 2001.

As variações percentuais ($\Delta\%$) nos decréscimos de Forbush foram avaliadas interativamente através do gráfico de cada evento para cada um dos seis detectores mencionados. Os valores das $\Delta\%$ eram obtidos considerando a diferença entre o maior e menor valor alcançado durante um DF, como mostrado no painel superior da Figura 27. Todos os valores de $\Delta\%$ desta Figura 27 são listados a seguir.

$$\Delta\% \text{ IMP-8} = 3.0$$

$$\Delta\% \text{ Thule} = 4.1$$

$$\Delta\% \text{ Climax} = 7.8$$

$$\Delta\% \text{ Beijing} = 4.8$$

$$\Delta\% \text{ Haleakala} = 6.3$$

$$\Delta\% \text{ Vmuon} = 2.5$$

Foram identificados 40 eventos de decréscimos de Forbush nos 4 monitores de nêutrons, 31 no detector vertical do MMDP e 14 eventos no detector do satélite IMP-8. O fato do satélite IMP-8 estar no espaço é responsável por seu detector de RC ser mais sensível a partículas liberadas pelo Sol (aceleradas por *flares* e/ou CMEs) do que estações de RC na superfície terrestre. Como consequência, frequentemente esse satélite registra enormes aumentos na contagem de partículas ao invés de decréscimos. Justificando-se assim a observação de apenas 15 decréscimos de Forbush identificados em 2001.

Um exemplo de grande acréscimo nos dados de contagem de partículas do satélite IMP-8 é ilustrado na Figura 28. Este evento provavelmente está associado com o segundo maior *flare* já registrado que ocorreu no dia 2 de abril de 2001 (DOY 92). A classe de emissão dos raios -X nesse evento foi X20*.

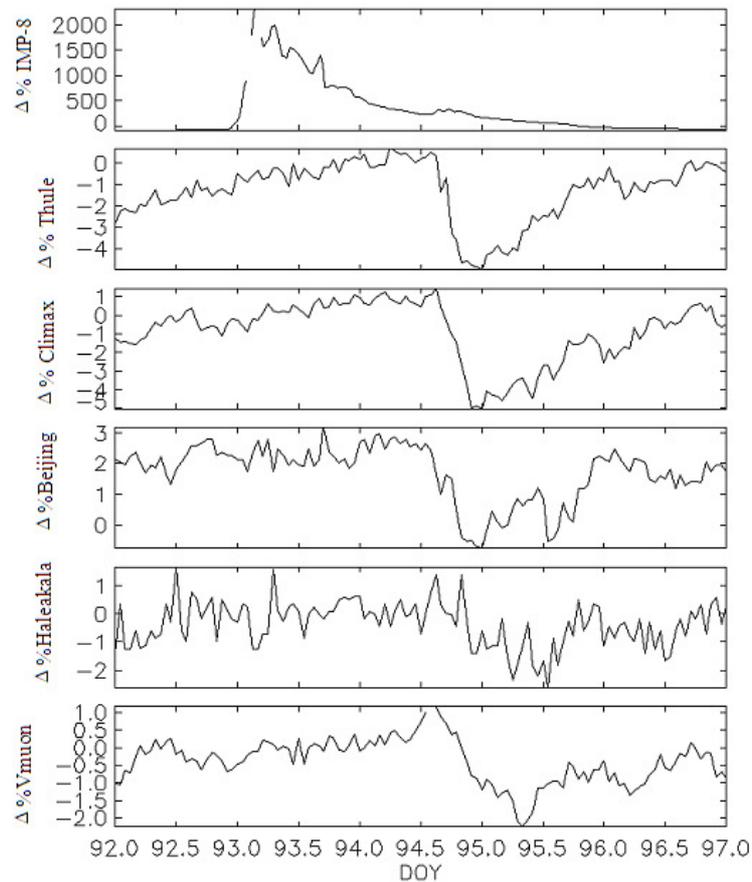


Figura 28 - No painel superior, exemplo de um aumento nos dados de contagem de RC oriundos do satélite IMP-8, enquanto, conforme visto nos outros painéis, ocorre decréscimos nos dados das 5 estações de superfície no evento que ocorreu no dia 2 de abril de 2001.

Em cada evento de choque frontal onde reconheceu-se um DF em pelo menos uma das seis estações de RC, calcularam-se os parâmetros de choque, adotando-se o mesmo método

* Fonte: <http://spaceweather.com/solarflares/topflares.html>

empregado por Echer et al, 2003. Definiram-se três “janelas” temporais, cada uma de 10 minutos. As fronteiras das janelas temporais são limitadas pelas linhas pontilhadas no exemplo ilustrado na Figura 29, que corresponde aquele mesmo evento do dia 11 de outubro de 2001, porém com um intervalo temporal de horas ao invés de vários dias. Este choque frontal ocorreu as 16 horas e 20 minutos. A janela de tempo central corresponde à região do próprio choque (simbolizado na Figura 29 por C). As janelas laterais correspondem ao lado *upstream* (U) ou pré-choque e ao lado *downstream* (D) ou pós-choque. Valores médios foram calculados para os intervalos limitados pelas regiões *upstream* e *downstream*, e a diferença entre estas médias é quantificada como um parâmetro através do choque ou, simplesmente, parâmetro de choque.

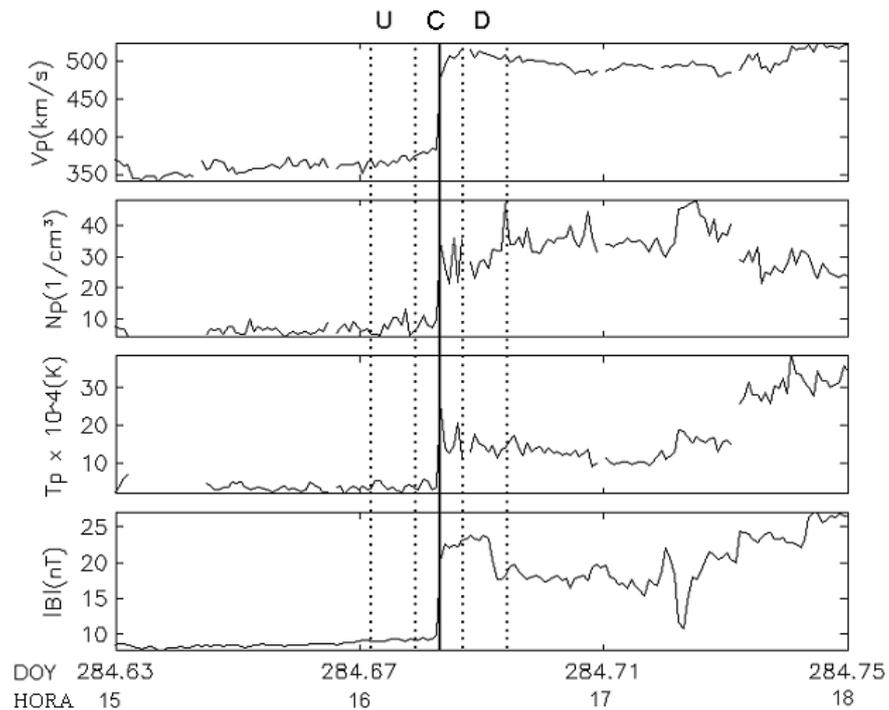


Figura 29 - Exemplo de um choque frontal observado em 11 de outubro de 2001. A linha contínua indica o choque (C) e as linhas tracejadas delimitam as janelas temporais pré-choque (U) e pós-choque (D).

Os parâmetros de choque do exemplo ilustrado na Figura 29 são:

$$\Delta N_p = (21,58 \pm 4,64) \text{ cm}^{-1}$$

$$\Delta V_p = (138,40 \pm 6,73) \text{ Km/s}$$

$$\Delta |B| = (12,82 \pm 2,45) \text{ nT}$$

$$\Delta T_p = (1,05 \times 10^5 \pm 2,14 \times 10^4) \text{ K.}$$

5.4. Coeficientes de Correlação

Conforme relatado na Seção 4.2 , é comum choques frontais rápidos ocorrerem com maior frequência. Durante o ano de 2001, um total de 9 choques frontais lentos e 52 choques frontais rápidos foram identificados. Mas durante o períodos de cada um dos 9 choques frontais lentos não percebeu-se nenhuma diminuição súbita nos dados de RC (característica essencial do decréscimo de Forbush). Assim, foram obtidos os coeficientes de correlação apenas entre os parâmetros de choques frontais rápidos e as variações percentuais durante os decréscimos de Forbush identificados. Como foram analisados 4 parâmetros de choque e 6 estações de RC, obtiveram-se 24 coeficientes de correlação, mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação entre variações nas contagem percentuais nos raios cósmicos em diferentes detectores e variações médias dos parâmetros de choques frontais rápidos (Os detectores de RC aparecem em ordem crescente de rigidez de corte).

	$\Delta B $	ΔT_p	ΔN_p	ΔV_p
$\Delta \% \text{ IMP 8}$	0.65	0.70	0.10	0.85
$\Delta \% \text{ Thule}$	0.60	0.62	0.06	0.75
$\Delta \% \text{ Climax}$	0.55	0.56	-0.02	0.72
$\Delta \% \text{ Beijing}$	0.60	0.55	-0.03	0.69
$\Delta \% \text{ Hale}$	0.47	0.59	-0.06	0.64
$\Delta \% \text{ Vmuon}$	0.35	0.41	-0.16	0.48

De acordo com Swinscow, 1997, ao avaliar-se de modo geral a intensidade de associação, em valores absolutos do coeficiente de correlação, 0 – 0.19 é classificado como uma inexistência de correlação, 0.2 – 0.39 como fraca, 0.40 – 0.59 como moderada, 0.6 – 0.79 como forte e 0.8 – 1 como muito forte.

Baseando-se nos coeficientes de correlação mostrados na Tabela 2 notam-se que as variações na velocidade, temperatura e módulo do campo magnético estão associados com decréscimos de raios cósmicos. De acordo com Wada & Murakami, 1988, o movimento dos RC é diretamente influenciado pelo campo magnético do vento solar, mas a velocidade é mais importante na modulação do fluxo de RC porque este campo magnético propaga-se “congelado” no vento solar.

Na verdade a correlação com a temperatura de prótons ocorre porque T aumenta simultaneamente com $|B|$ e V, logo há uma correlação não-causal entre ΔT_p e decréscimos de RC.

O fato da variação do módulo do campo magnético estar diretamente relacionada com os DF explica o porquê desses decréscimos não ocorrerem durante os choques frontais lentos. Como está apresentado na Figura 20, $|B|$ diminui através de um choque frontal lento.

Os coeficientes de correlação parecem serem bem associados com a rigidez de corte do local para ΔV_p . Na coluna deste parâmetro há uma clara tendência para os coeficientes de correlação terem menores valores quanto maior for a rigidez de corte.

As variações percentuais observadas pelo detector do IMP-8 versus as variações nas velocidades de prótons através de choques frontais rápidos é apresentada na Figura 30. Este gráfico possui o maior coeficiente de correlação analisado.

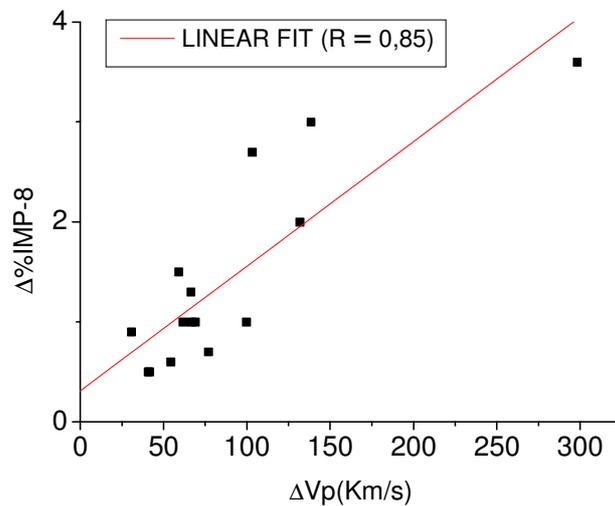


Figura 30 - Variações percentuais durante os DF medidos pelo detector de RC à bordo do satélite IMP-8 versus variações na velocidade de prótons durante choques frontais rápidos.

É possível observar na Tabela 2 que o parâmetro de densidade não possui qualquer correlação com os DF. A Figura 31 mostra um exemplo dessa falta de correlação nos resultados apresentados no gráfico dos decréscimos registrados pelo monitor de nêutrons de Thule e a variação da densidade ΔN_p . Claramente percebe-se que os pontos deste gráfico são bastante espalhados, sem qualquer relação entre decréscimos de Forbush e ΔN_p .

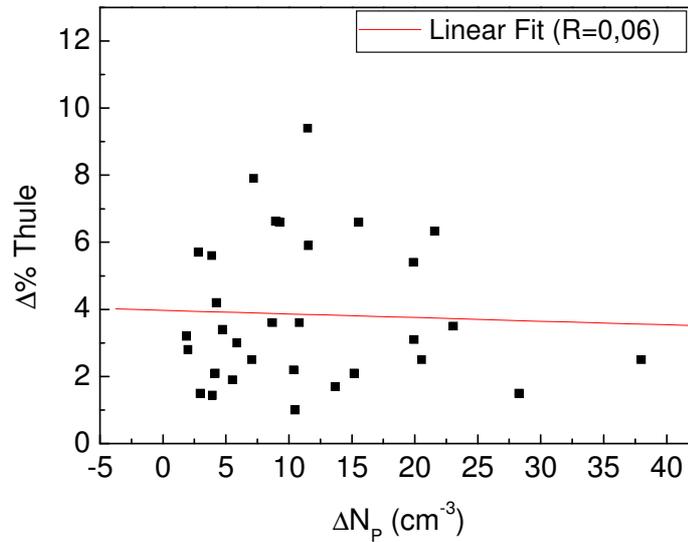


Figura 31 - Exemplo de variações percentuais durante um DF medido pelo monitor de nêutrons de Thule versus o parâmetro de densidade durante choques frontais. Esta figura não mostra qualquer associação entre estas grandezas, contrastando com o que é apresentado na Figura 21.

É sabido que o poder de penetração dos RC é altíssimo. Mas ainda assim deve haver alguma ligação entre a densidade do meio e a dispersão de raios cósmicos. Afinal, se no caminho do fluxo de RC for colocado, digamos, uma obstáculo de chumbo de espessura suficientemente grande, o fluxo será espalhado. Porém, num ambiente tão rarefeito como o meio interplanetário, pouca diferença ocorrerá havendo 5 ou 200 partículas/cm³, pois essa densidade continua sendo muito baixa para provocar algum efeito no fluxo de RC.

Portanto, deve existir alguma correlação entre a densidade do meio e o fluxo de RC's, mas no caso do meio interplanetário a densidade é tão baixa que seu efeito na contagem dos detectores é insignificante.

6. CONCLUSÕES

Nesta Monografia de conclusão de Curso de Física – Bacharelado na UFSM foram apresentados conceitos básicos relacionados ao fluxo de raios cósmicos e choques interplanetários.

Como Metodologia se utilizou o método de análise espectral por regressão iterativa ARIST de modo a se obter as periodicidades embutidas nas séries temporais horária e diária dos dados do detector vertical do MMDP. As periodicidades com maior amplitude variam de 4 a 193 dias. Sugere-se que a natureza de algumas periodicidades esteja associada a: (i) variações sazonais, de modo que diferentes estações ocasionam modulações no fluxo de muons pelas diferentes condições atmosféricas no inverno e verão; (ii) períodos de 25 a 34 dias das rotações diferenciadas do Sol; (iii) variações de 13,5 dias relativas a mudança de posição de Terra frente a lâmina de corrente heliosférica.

Foram encontradas periodicidades embutidas na série temporal do detector vertical do MMDP através do ARIST próximas àquelas encontradas na literatura especializada com a mesma série temporal submetida a análises espectrais por ondeletas de Morlet e Multi-Taper.

As análises da correlação entre decréscimos de raios cósmicos em 6 estações (localizadas em locais com diferentes rigidezes de corte) e parâmetros de choques frontais rápidos para vários eventos ocorridos no ano de 2001 foram apresentadas.

Verificou-se que a modulação no fluxo de raios cósmicos causado por choques frontais lentos é insignificante porque o módulo do campo magnético decai através deste tipo de choque. Observou-se a presença de uma clara relação entre $\Delta|B|$, ΔV_p , ΔT_p e variações percentuais dos decréscimos de Forbush. Os coeficientes de correlação estão bem associados a rigidez de corte geomagnética para ΔV_p . Para esse parâmetro existe uma clara tendência dos coeficientes de correlação possuírem maiores valores quanto menor for a rigidez de corte geomagnética da estação de RC. Por outro lado, os parâmetros de densidade não apresentam qualquer associação com decréscimos de raios cósmicos, possivelmente pelo fato da densidade no meio interplanetário ser muito baixa mesmo dentro da região compreendida por uma estrutura interplanetária.

Como trabalho futuro pretende-se dar continuidade ao Projeto de Pesquisa, sugerindo-se: procurar com maiores detalhes a natureza dos fenômenos envolvidos nas periodicidades no fluxo de muons; ampliar o período de análise das séries temporais incluindo os dados do detector multidirecional de muons – MMD expandido visando obter diferentes periodicidades

e, se possível, com maior exatidão; investigar a existência ou não de periodicidades diferentes embutidas nas séries temporais de muons de outras direções além da vertical.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, M.; Finn, E. J. **Física: um curso universitário**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972, v. 2, 565 p.

Alves, G. A.; Luiz, M. A. Detecção e Medição da Vida Média dos Múons ao Nível do Mar. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 2, 1998.

Augusto, C. R. A. **Observação do excesso e déficit de muons no nível do mar em associação com eventos solares transientes**. 2006. 73f. Tese (Doutorado em Física) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2006.

Cane, H. V. Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases, **Space Science Reviews**, v. 93, p. 55-77, 2000.

Da Silva, M. R. **Variação da intensidade dos raios cósmicos em resposta a diferentes estruturas magnéticas do meio interplanetário**. 146f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Da Silva, M. R. et al. Cosmic Ray Muon Observation at Southern Space Observatory - SSO (29°S, 53°W). **Astrophysics and Space Science**, v. 290, p. 389–397, 2004.

Dal Lago, Alisson. **Estudo de estruturas geofetivas no meio interplanetário e de suas causas solares**. 213f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

Duldig, M. L. Cosmic Ray Transient Variations Observed from the Earth. **Proceedings ASA**, 11 (2), 110-125, 1994.

Duldig, M. L. Muon Observations. **Space Science Reviews**. 93, p. 207 – 226, 2000.

Echer, E. **Estudo de Características e Geofetividade de Estruturas Magnéticas Interplanetárias Simples e Compostas**. 2005. 243f. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

Echer, E.; Alves, M. V.; Gonzalez, W. D. Ondas de choque não colisionais no espaço interplanetário. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 51 – 65, 2006.

Echer, E. et al. Interplanetary Shock Parameters during Solar Activity Maximum (2000) and Minimum (1995-1996), **Brazilian Journal of Physics**, v. 33, n. 1, p. 115-122, 2003.

Forbush, S. E. **Cosmic rays, the sun and geomagnetism**. In: .The works of Scot E. Forbush.[S.l.]:James A. Van Allen, Editor, 1993. 64, 66.

Hoyt, D. V.; Schatten, K. H. **The role of the Sun in Climate Change**. New York: Oxford University Press, 1997, 298 p.

Jursa, A.S. **Handbook of geophysics and the space environment**. Washington: Air Force Geophysics Laboratory, 1965.

Kivelson, M. G., Russel, C. T. **Introduction to space physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, 588 p.

Lockwood, J. A. Forbush decreases in the cosmic radiation, **Space Science Reviews**, v. 12, p. 658-715, 1971.

Moschetti, M. Galileu e as cartas sobre as manchas solares: a experiência telescópica contra a inalterabilidade celeste. **Cadernos de Ciências Humanas – Especiaría**, v. 9, n. 16, p. 313 – 340.

Mursula, K.; Usoskin, I. Heliosphere Physics and Cosmic Rays: Lectures Notes. **American Geophysics Union**, Washington, DC, 2003.

Odenwald, S. F.; Grenn, J. L. Tempestade Solar no Horizonte Interplanetário. **Revista Scientific American Brasil**, p. 36 – 43, set. 2008.

Okazaki, Y. **Three dimensional anisotropy and density gradient of galactic cosmic rays measured by global moun detector network**. Tese (Doutorado em Geofísica) - Tohoku University, Japão, 2008.

Rigozo, N. R. et al. Comparative Study Between Four Classical Spectral Analysis Methods. **Applied Mathematics and Computation**, v. 168, n. 1, p. 411-430, 2005.

Rigozo, N. R.; Nordemann, D. J. R. Análise por regressão iterativa de periodicidades em séries temporais de registros geofísicos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 16, n. 2/3, p. 149-158, 1998.

Sheeley, N. R. et al. Coronal mass ejections and interplanetary shocks. **Journal of Geophysical Research**, 90 (A1), 163 - 175, 1985.

Swinscow, T. D. V. **Statistics at Square One**, 9th ed. Southampton: BMJ Publishing Group, 1997.

The Pierre Auger Collaboration. Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects. **Science**, v. 318, n. 5852, p. 938 - 943, 2007. [DOI: 10.1126/science.1151124](https://doi.org/10.1126/science.1151124)

Van Helden, A. Galileo and Scheiner on sunspots: a case study in the visual language of astronomy. In: **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 140, p. 358-396, 1996.

Wada, M.; Murakami, K., Cosmic rays in the interplanetary space. In: **Cosmic Ray Astrophysics**, editado por Oda, M.; Nishimura, J.; Sakurai, K. p. 299-334. Tóquio: Terrapub, 1988.

Wolberg, J. R. **Prediction analysis**. Princeton: Van Nostrand, 291p. 1967.