



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE RAIOS CÓSMICOS (MUONS E NÊUTRONS) ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL E WAVELETS

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

PROCESSO: CNPq N° 102618/2010-0

Alcimoni Nelci Comin – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT

Laboratório de Clima Espacial Previsão de Tempestades

Magnéticas

LCEPTM/CRS/INPE – MCT

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

CRS/INPE – MCT

E-mail: alcimoni.comin@gmail.com

Dr. Nivaor Rigozo - Orientador

Clima Espacial – CRS/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE – MCT

E-mail: nivaor.rigozo@crs.inpe.br

Santa Maria, Junho de 2010



**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
DO PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT
RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

PROJETO

**ESTUDO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE RAIOS CÓSMICOS
(MUONS E NÊUTRONS) ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL E
WAVELETS**

Processo: CNPq N° 102618/2010-0

Relatório elaborado por:

Alcimoni Nelci Comin - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT

E-mail: alcimoni.comin@gmail.com

Dr. Nivaor Rigozo – Orientador

Clima Espacial – CRS/INPE – MCT

E-mail: nivaor.rigozo@crs.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador

CRS/INPE – MCT

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br



Dados de Identificação

Título do projeto:

ESTUDO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE RAIOS CÓSMICOS (MUONS E NÊUTRONS) ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL E WAVELETS

Processo: CNPq N° 102618/2010-0

Bolsista:

Alcimoni Nelci Comin

Curso de Meteorologia – Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Nivaor Rigozo – Orientador

Clima Espacial – CRS/INPE – MCT

Co-orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

CRS/INPE – MCT

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas –
LCEPTM/CRS/INPE-MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM



RESUMO

O relatório apresenta das atividades de pesquisa, referente ao projeto “estudo das séries temporais de raios cósmicos (muons e nêutrons) através da análise espectral e wavelets” , vinculada ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT realizadas pelo Alcimoni Nelci Comin, no Laboratório de Clima Espacial do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCEPTM/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

O objetivo deste trabalho é o estudo de séries temporais de raios cósmicos secundários, observado em superfície através de detectores de muons e nêutrons. Deste modo, pretende-se estudar a interação dos fenômenos raios cósmicos Sol – Terra, usando as metodologias de análise espectral clássica, na procura de periodicidades nas séries temporais, para verificar a evolução temporal das periodicidades.

No estudo das séries temporais foi adotados os métodos de análise espectral clássica, a fim de se determinar as periodicidades embutidas nas séries temporais, a análise de wavelets, para determinar o comportamento dessas periodicidades e amplitudes encontradas em função do tempo, não foi desenvolvido neste projeto, devido para dar ênfase aos efeito climáticos nas medidas dos muons, uma vez que eles têm uma grande importância na sua calibração..

Os dados utilizados são do protótipo do Detector Multidirecional de Muons (MMDP), instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE – MCT), (29.4°S, 53.8°W, 480 m a.n.m.), em São Martinho da Serra, RS. E também dados históricos obtido do Banco de Dados Climatológico do CEPETEC-CLIMANALISE, esses dados são do somatório mensal de massas de ar frio e frentes frias que ingressaram no Brasil a fim de verificar se interferem nas medidas dos muons (uma vez que ele é medido em superfície).

Os dados de múons foram comparados com o somatório mensal de massas de ar frio e frentes frias através da regressão linear simples, relativo ao mesmo período, e observou-se que os mesmos estão fracamente correlacionados. Os coeficientes de relação são -0,41 e -0,34 respectivamente.



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – RAIOS CÓSMICOS (MUONS E NÊUTRONS).....	7
1.1 – Chuveiro atmosférico extenso e múons da radiação cósmica.....	9
1.2 – Nêutrons	13
CAPÍTULO 2 – DECRÉSCIMO DE RAIOS CÓSMICOS	Erro! Indicador não definido. 13
CAPÍTULO 3 – MASSAS DE AR	18
3.1 – Massas de ar frio.....	20
3.2 - Quantidade mensal de massas de ar frio e frentes frias.....	22
3.3 - Análise e comparação com os dados de múons.....	24
CAPÍTULO 4 – DADOS E METODOLOGIA	32
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	3836
CAPÍTULO 6-CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	39
ANEXO.....	44
A.1 – Correção do efeito de pressão.....	44
A.2 – Análise de época superposta – nêutrons e múons.....	45



ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Representação do GSM, sistema de coordenadas utilizado para definir a orientação de grandezas física no meio interplanetário como, por exemplo, o campo magnético interplanetário. FONTE: Dal Lago, 2003.....	7
Figura 1 -Esquema do desenvolvimento de um chuvaire atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre.....	11
Figura 2.1 - Variação mensal do número médio de manchas solares para o período entre 1960 e 2006. As polaridades do campo magnético global solar, “A>0” e “A<0”, são indicadas.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.2 Figura 2.2 – GCRs sendo espalhados devido sua interação com uma estrutura magnética interplanetária atingindo a Terra (adaptado de Augusto, 2006).....	15
Figura 2.3 – Clássico decréscimo de Forbush registrado por três monitores de nêutrons (DeepRiver, Mt. Wellington, Kerguelen) em meados de julho de 1982. FONTE: Cane, 2000.....	16
Figura 2.4 – Exemplo do efeito causado na contagem percentual de 3 detectores de RC devido a rotação da Terra. Este efeito pode “mascarar” um decréscimo causado por alguma estrutura interplanetária.....	17
Figura 3.1- frente fria observada desde o Paraguai até o Rio Grande do Sul.....	22
Tabela 3.2.1- Frentes frias que ingressaram na Região Sul do Brasil.....	23
Tabela 3.2.2- Frentes frias que ingressaram na Região Sul do Brasil.....	23
Tabela 3.2.3- Massas de ar frio que ingressaram no Brasil.....	23
Figura 3.3.1 - Contagens relativa a média da série horária de dados do detector vertical do MMDP.....	27
Figura 3.3.2– 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.....	27
Figura 3.3.3 - Contagens percentuais relativa ao valor médio da série diária de dados do detector vertical do MMDP.....	28
Figura 3.3.4 – 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.....	28
Figura 3.3.5- Quantidade mensal de frentes frias, massas de ar frio e contagens percentuais relativa ao valor médio mensal de dados do detector vertical do MMDP.....	29
Figura 3.3.6- relação entre a contagem mensal de múons e o número de frentes frias correspondente ao período outubro de 2001 a outubro de 2002.....	30
Figura 3.3.7- relação entre a contagem mensal de múons e o número de massas de ar frio correspondente ao período outubro de 2001 a outubro de 2002.....	30

Figura 4.1 – 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.....34

Figura 4.2 – No painel superior, exemplo de um aumento nos dados de contagem de RC oriundos do satélite IMP-8, enquanto, conforme visto nos painéis abaixo, ocorre decréscimos nos dados das outras 5 estações de superfície.....35

CAPÍTULO 1 – RAIOS CÓSMICOS (MÚONS E NÊUTRONS)

Antes de tudo é necessário frisar que neste relatório escolheu-se trabalhar com o sistemas de coordenadas *Geocentric Solar Magnetosphere* (GSM)

No GSM, a origem é fixada na Terra, a direção positiva do eixo “x” aponta para o Sol e a direção “z” é paralela ao eixo de dipolo do campo geomagnético (positivo ao norte magnético).

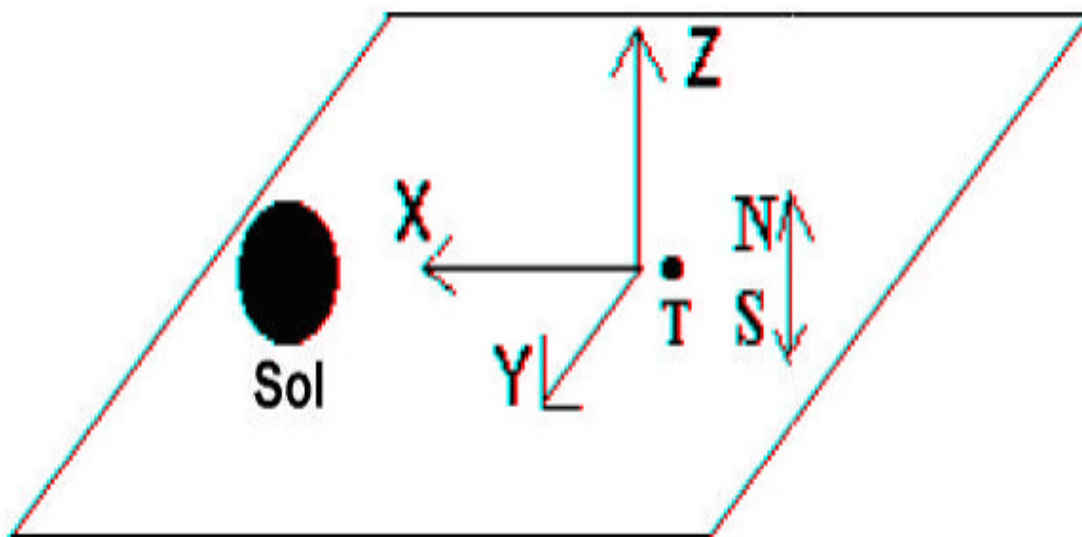


Figura 1.5 - Representação do GSM, sistema de coordenadas utilizado para definir a orientação de grandezas física no meio interplanetário como, por exemplo, o campo magnético interplanetário. FONTE: Dal Lago, 2003



O descobrimento de uma radiação extraterrestre em altas energias foi consequência de experimentos desenvolvidos entre o final do século XIX e início do XX para estudar a condutividade dos gases. Acreditava-se que um gás, na ausência de radiação, devia ser um sistema não condutor. Entretanto observou-se que mesmo num gás isolado de fontes de radiação havia sempre uma ionização residual de aproximadamente 10 pares iônicos por cm^3 que não podia ser explicada pela teoria.

Essa radiação foi investigada pela primeira vez em 1910 por Theodor Wulf, que a denominou de "raios de grandes altitudes" e assim conjecturou que eles viriam do espaço, e não da superfície ou profundezas da Terra. Em 1912, Victor Hess instalou alguns eletroscópios em um balão atmosférico conseguindo detectar pela primeira vez uma radiação descendente de grande poder de penetração, constatando desta forma a existência da agora denominada "radiação cósmica", ou dos "raios cósmicos". Esse fato abriu uma nova área de investigação associada à física moderna.

As pesquisas com raios cósmicos dividem-se, de uma forma geral, em dois grandes campos de atuação: o primeiro relacionado com as partículas elementares e as suas interações com a matéria; o segundo é referente aos seus aspectos geofísicos e astrofísicos. Apesar dos experimentos com as tecnologias atuais e com os recentes avanços teóricos na área, ainda existem várias questões em aberto quanto à natureza e origem dessa radiação.

Do ponto de vista de divulgação, felizmente alguns aspectos da física moderna são abordados em revistas e outros meios de informação, além de livros didáticos de nível universitário. É notório o exemplo do decaimento das partículas elementares denominadas de múons, produzidas a partir dos píons em grandes altitudes. Os fenômenos da radiação cósmica instigam um



particular interesse, pois estabelecem facilmente a conexão entre partículas elementares e relatividade. Essa conexão pode ser explorada em atividades experimentais para demonstração de efeitos relativísticos e conceitos relacionados ao modelo padrão.

A atividade é realizada através de um telescópio de múons (TM), isto é, um arranjo experimental composto de placas de cintiladores plásticos alinhados verticalmente e operando em regime de coincidência temporal de sinais. A taxa de contagem de partículas do TM varia segundo o arranjo geométrico e permite demonstrar a existência de um fluxo de múons descendentes. Esse fluxo não é possível ser explicado pela física clássica, mas somente pela teoria da relatividade. Os muons são partículas bastante penetrantes, com massa de aproximadamente 210 vezes a massa do elétron e o tempo de vida (em repouso), é de aproximadamente 2×10^{-6} s tendo, como produto do decaimento, pares elétron-positrons e neutrinos, (FORBUSH, 1993). Este tipo de partícula só consegue atingir a superfície terrestre devido a sua velocidade relativística, que pode chegar a aproximadamente 0,96c.

Os detectores de raios cósmicos mais utilizados atualmente para o estudo do clima espacial são os monitores de nêutrons e os telescópios 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 (3GeV) até aproximadamente 50 GeV. Telescópios de muons de superfície possuem respostas significantes desde aproximadamente 10 GeV até várias centenas de GeV, e telescópios de muons subterrâneos podem observar partículas com energias acima de 1000 GeV (DULDIG, 2000).

1.1-Chuveiro atmosférico extenso e múons da radiação cósmica

Múons são partículas elementares instáveis. Nesta seção descrevemos como essas partículas, que utilizamos no nosso experimento, são produzidas na



atmosfera terrestre. Quando um raio cósmico de alta energia (partícula primária cuja origem ainda é desconhecida pela ciência) colide com núcleos de moléculas na alta atmosfera terrestre, ele dá origem a uma seqüência de interações nucleares e eletromagnéticas, produzindo uma cascata de partículas que se deslocam com velocidades próximas à velocidade da luz (denominadas de partículas secundárias). Essa cascata é designada de Chuveiro Atmosférico Extenso (CAE) e pode ser descrita como um disco de partículas cujo raio varia à medida que este se propaga para o solo. O número N de partículas secundárias depende da energia E_0 do raio cósmico primário. No caso em que $E_0 > 10^{12}$ eV, o número N é suficientemente grande para permitir, a um dado nível de observação, a identificação inequívoca do CAE.

As pesquisas de CAE's podem fornecer informações das interações nucleares de alta energia (exemplos de aparatos que realizam este estudo: AGASA - *Akeno Giant Air-shower Array*, HiRes - *High Resolution Flys Eye*, FLASH - *Fluorescence from Air in Showers* e PAO - *Pierre Auger Observatory*), além de possibilitarem a determinação da natureza, da energia e da direção de chegada dos raios cósmicos primários. Este último aspecto tem uma grande importância na astrofísica de altas energias, pois os CAE's observáveis no solo decorrem de partículas primárias que carregam informações sobre a sua origem e o mecanismo de aceleração, constituindo a principal fonte de informação sobre processos astrofísicos de regiões muito afastadas da Terra.

Atualmente os CAE's são detectados com aparatos experimentais que cobrem áreas de até milhares de quilômetros quadrados. Um CAE é composto por aproximadamente 90% de elétrons, pósitrons e fótons, 9% de múons e apenas 1% de partículas hadrônicas (prótons energéticos e píons carregados). Como conseqüência da primeira interação são predominantemente produzidos mésons-p neutros e carregados e em menor quantidade partículas K-méson, prótons, nêutrons e suas antipartículas. Os píons carregados (p^+ e p^-) de energias mais altas são produzidos com pequenos ângulos de espalhamento e seguem ao longo da direção de colisão, interagindo e gerando novas

partículas, enquanto os de energia mais baixa sofrem uma maior deflexão e decaem em múons carregados (μ^+ e μ^-). Devido ao breve tempo de vida dos píons carregados ($\sim 10^{-8}$ s), é mais provável que eles decaiam antes de sofrer uma seguinte interação forte. O número de partículas de um CAE ao nível do mar pode alcançar dezenas de milhares de partículas e a componente muônica representar até 15% do total de partículas carregadas. A [Fig. 1](#) ilustra esses processos para as duas primeiras interações fortes do início do desenvolvimento de um CAE.

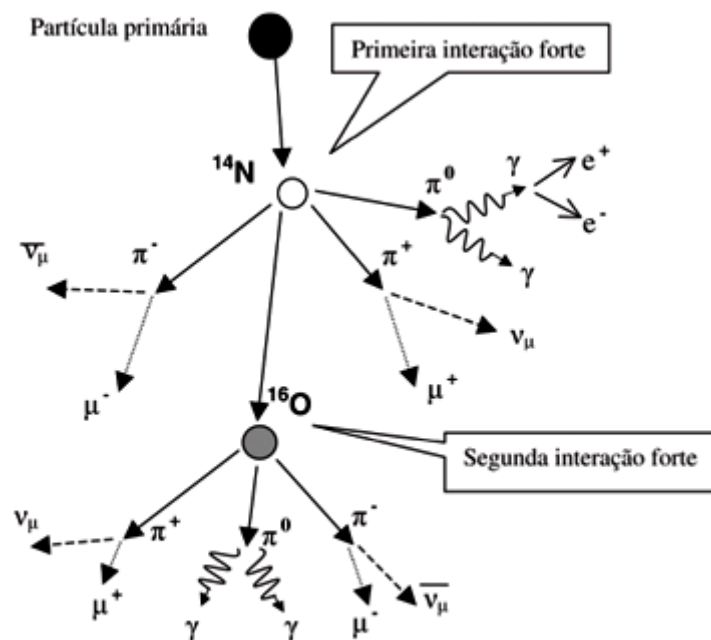


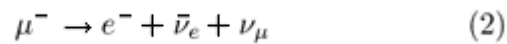
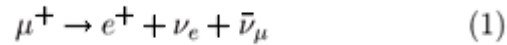
Figura 1 - Esquema de desenvolvimento de um chuveiro atmosférico extenso (CAE) na atmosfera terrestre.

Diversos experimentos mediram o fluxo de raios cósmicos secundários em diferentes altitudes e constataram que a intensidade vertical de múons (positivos e negativos) atinge seu máximo, de 220 partículas/(m² sr s), a uma altitude de aproximadamente 15 km. Na superfície terrestre o fluxo vertical de múons diminui para cerca de 90 partículas/(m² sr s). Isso pode ser explicado pelo fato de que na medida em que o CAE avança em direção à Terra a



densidade de partículas diminui devido ao aumento da área circular da frente do chuveiro e ao decaimento da fração de menor energia.

Os múons decaem espontaneamente, através da interação fraca, de acordo com os seguintes esquemas



onde usamos a notação e^+ para o pósitron, e^- para o elétron, ν_e e ν_μ para o neutrino eletrônico e muônico e $\bar{\nu}_e$ e $\bar{\nu}_\mu$ para o anti neutrino eletrônico e muônico, respectivamente.

A massa de repouso de um múon é bem conhecida e vale $105,658 \text{ MeV}/c^2$ e a sua vida média é $2,197 \mu\text{s}$. A energia média dos múons detectados no nível do mar é da ordem de $5,0 \text{ GeV}$, ao passo que a uma altitude de 15 km essa energia é da ordem de 6 GeV . O múon é a partícula elementar carregada mais abundante na superfície da Terra. Ele não interage fortemente (interação nuclear) e possui uma trajetória retilínea. Essas características (alto fluxo, trajetória retilínea, alta energia e longa vida média) fazem esta partícula ser ideal para a demonstração dos efeitos relativísticos demonstrados neste trabalho.

Os múons chegam à superfície da Terra com velocidades próximas a da luz, com um valor médio $v = 0,998c$ ou $v = 2,992 \times 10^8 \text{ (m/s)}$. O tempo que os múons levam para percorrer os 15 km de atmosfera é dado por

$$t = \frac{15000 \text{ m}}{2,992 \times 10^8 \text{ (m/s)}} \cong 50,54 \mu\text{s}.$$

O que equivale a um tempo $22,97$ vezes maior do que a vida média do múon (*i.e.*, $t = 22,97 \tau_\mu$).



Então o número N de múons que chegam ao nível do mar em relação ao número N_0 de múons produzidos na alta atmosfera é dado por

$$\frac{N}{N_0} = e^{(-22,97 \cdot \tau_\mu / \tau_\mu)} \cong 1,0 \times 10^{-10}$$

Esse resultado mostra que a previsão da física clássica é que praticamente todos os múons decaem antes de alcançarem o nível do mar.

1.2 Nêutrons

Um nêutron é um bárion neutro formado por dois quarks *down* e um quark *up*. É uma das partículas, junto com o próton, que formam os núcleos atômicos. Fora do núcleo atômico é instável e tem uma vida média de cerca de 15 minutos, emitindo um elétron e um antineutrino para se converter em um próton. Sua massa é muito similar à do próton. Foi descoberto pelo físico britânico James Chadwick em 1932, que por essa descoberta recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1934. O nêutron é necessário para a estabilidade de quase todos os núcleos atômicos (a única exceção é o hidrogênio), já que a força nuclear forte faz com que seja atraído por elétrons e prótons, mas não seja repelido por nenhum, como acontece com os prótons, que se atraem nuclearmente mas não se repelem eletrostaticamente.

CAPÍTULO 2 – DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS

A associação entre a intensidade de raios cósmicos (RC) e a atividade solar é conhecida desde a primeira metade do século 20. Uma relação bastante conhecida envolve o ciclo de 11 anos do número de manchas solares. A figura 2.1 mostra as médias na contagens de 27 dias de raios cósmicos de origem galáctica (GCR) medidas por monitores de nêutrons e a média mensal do número de manchas solares para o período compreendido entre 1960 e 2006

(<http://neutronm.bartol.udel.edu/>). Nota-se que a intensidade de GCR exibi uma variação de 11 anos que é anticorrelacionada com o ciclo de 11-anos da atividade solar. Embora os detalhes desta anticorrelação não tenha sido completamente entendido ainda, acredita-se que a intensidade de GCR é diminuída durante o máximo solar porque o intenso e turbulento campo magnético interplanetário reduz o fluxo de GCR no sistema solar (Okazaki, 2008)

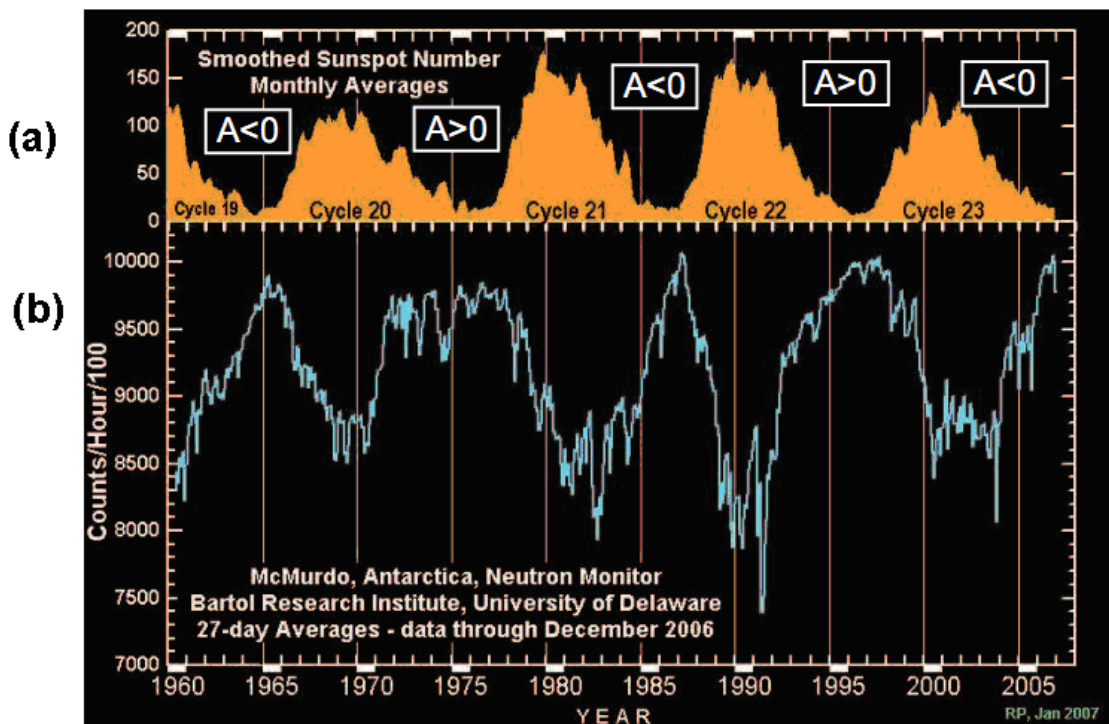


Figura 2.6 - Variação mensal do número médio de manchas solares para o período entre 1960 e 2006. As polaridades do campo magnético global solar, “A>0” e “A<0”, são indicadas.

Há outros tipos de variações na intensidade nos GCR*. Neste relatório dar-se-á atenção aos decréscimos de curto-prazo na contagem de GCR (medidos no espaço) e raios cósmicos secundários (medidos na superfície terrestre). Estes decréscimos, que ocorrem tipicamente em 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,

* Mais detalhes sobre os tipos de variação nos GCR podem ser encontrados em Mursula e Usoskin, 2003

usando monitores de nêutrons, mostrou estar no meio interplanetário a origem dos decréscimos.

Assim, durante a passagem de alguma estrutura pela Terra, é comum ser medido uma redução na contagem de partículas em estações de superfície de muons e nêutrons *.

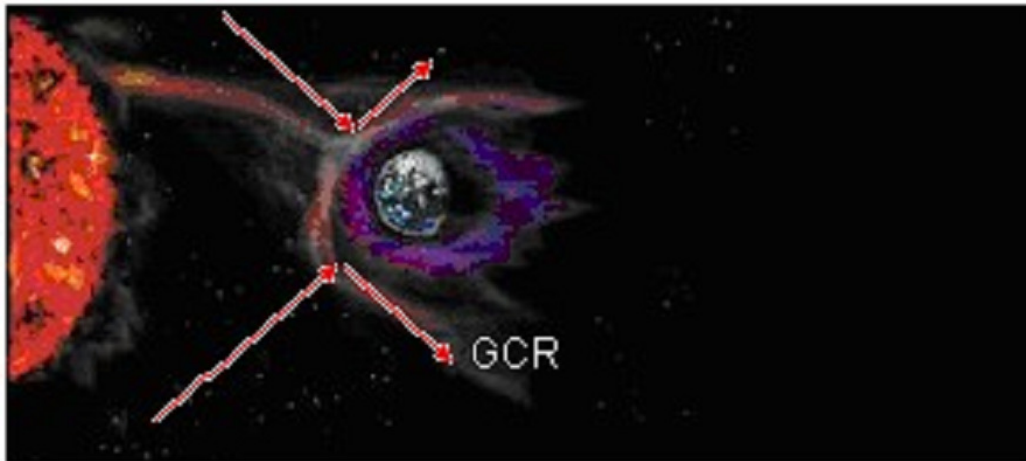


Figura 2.7 – GCRs sendo espalhados devido sua interação com uma estrutura magnética interplanetária atingindo a Terra (adaptado de Augusto, 2006).

Há dois tipos básicos de decréscimos, os recorrentes e os não-recorrentes. Decréscimos não-recorrentes são causados por distúrbios interplanetários transientes que estão relacionados à ICMES (tais como nuvens magnéticas e choques). Os perfis de 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 ICME recebe o nome de clássico decréscimo de Forbush. Decréscimos recorrentes têm uma fase de ataque mais gradual (ou seja, leva mais do que 1 dia para alcançar a depressão máxima) e geralmente estão associados a uma CIR, feixes corrotantes de alta velocidade do vento solar (Lockwood, 1971).

* Muons e nêutrons são alguns dos vários tipos de raios cósmicos secundários.

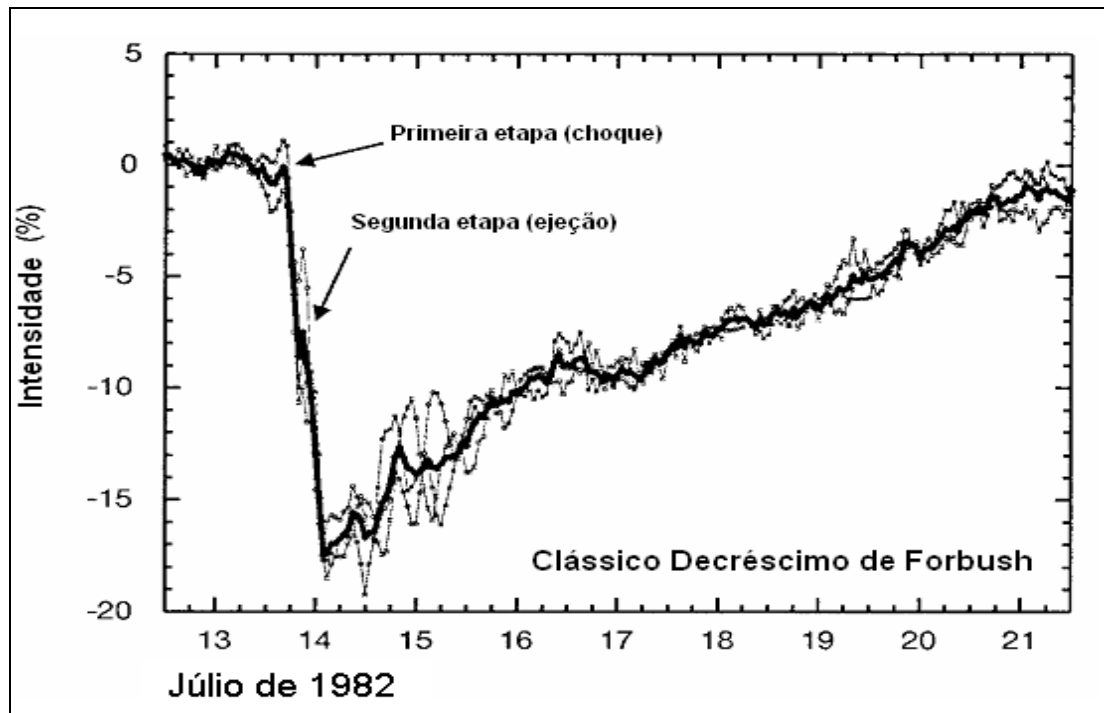


Figura 2.8 – Clássico decréscimo de Forbush registrado por três monitores de nêutrons (DeepRiver, Mt. Wellington, Kerguelen) em meados de julho de 1982. FONTE: Cane, 2000.

Historicamente, todos decréscimos a curto-prazo tem sido chamados de decréscimos de Forbush. Entretanto, alguns pesquisadores utilizam o nome mais seletivamente para aplica-lo somente aos não-recorrentes eventos. No presente trabalho analisar-se-á ambos tipos, sem preocupar-se com suas discriminações.

Conforme relatado por Cane, 1994, uma dificuldade em associar estruturas do vento solar (como CIR) com decréscimos em raios cósmicos usando dados de monitores de nêutrons (e outros detectores de raios cósmicos secundários) é que a rotação da Terra produz uma modulação diurna na contagem de RC que é superposta na variação resultante de estruturas do vento solar. Como conseqüência, torna-se complicado o reconhecimento de um decréscimo causado por alguma estrutura. Um exemplo da modulação nos RC devido a rotação da Terra é mostrado na figura 3.4. O período deste exemplo foi de 17 a 27 de junho de 2001, correspondentes aos dias do ano (do inglês *day of year - DOY*) compreendido entre 168 e 178. Nos painéis, do superior ao inferior,

estão as contagens percentuais registrada pelos seguintes detectores de raios cósmicos de superfície: monitor de nêutron de Clímax (onde a rigidez de corte geomagnética é acima de 3 Giga Volts), monitor de nêutron de Beijing (onde a rigidez é >10 GV) e detector vertical do então protótipo do telescópio multidirecional de muons de São Martinho da Serra, RS, Brasil (rigidez da ordem de 50 GV).

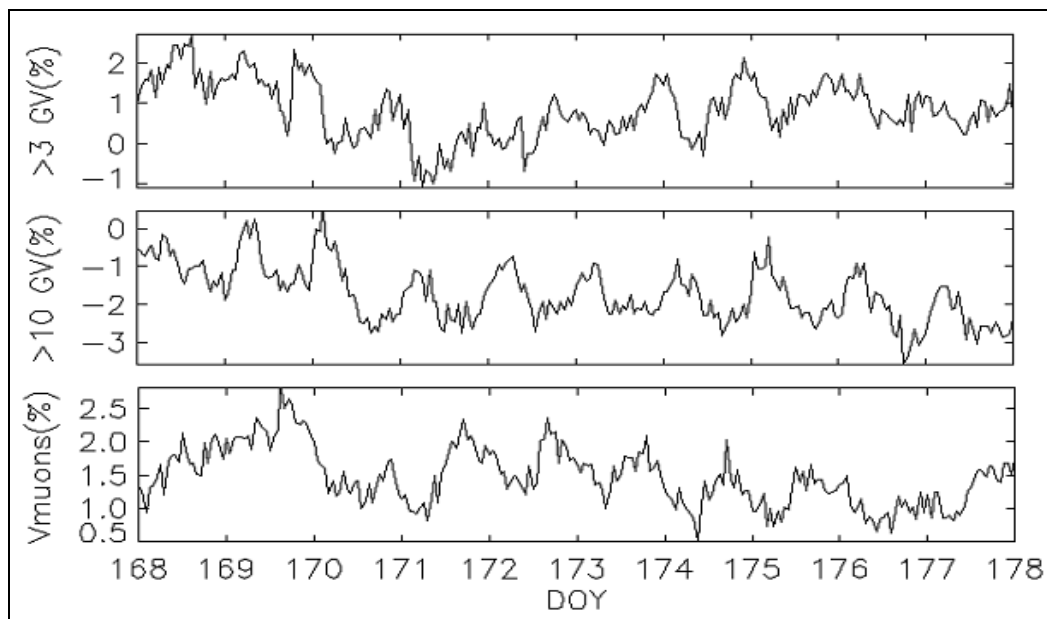


Figura 2.9 – Exemplo do efeito causado na contagem percentual de 3 detectores de RC devido a rotação da Terra. Este efeito pode “mascarar” um decréscimo causado por alguma estrutura interplanetária.

A intensidade dos raios cósmicos pode ser dada tanto em termos da taxa de contagens, quanto em porcentagem da taxa de contagem média para um período específico. No caso da análise da figura 3.4, a intensidade relativa é calculada em relação à média dos dados do ano, utilizando-se a seguinte expressão

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



CAPÍTULO 3- MASSAS DE AR

As massas de ar são porções individualizadas do ar atmosférico que trazem em suas características e propriedades, as condições gerais do tempo dos locais onde se formam. O deslocamento das massas é provocado pela diferença de pressão e temperatura entre as diversas áreas da superfície. Portanto, as massas de ar estão geralmente associadas a sistemas de baixa e alta pressão. As áreas de baixa pressão são receptoras de ventos e com grande instabilidade atmosférica caracterizada por grande nebulosidade e precipitação elevada. Já as áreas de alta pressão tendem a ter menores temperaturas e são dispersoras de ventos, portanto tem em sua característica não ter nebulosidade e possuir estabilidade atmosférica.

Esses fenômenos são muito freqüentes durante os meses de maio a setembro em toda a região sul e sudeste do Brasil (Parmenter 1976, Satyamurty et al. 1990, Seluchi e Nery 1992, Marengo et al. 1997, Vera e Vigliarolo 2000, Lupo et al. 2001, Satyamurty et al., 2002), onde produzem vários impactos na sociedade e também no setor produtivo do país.

Existem diversos trabalhos na literatura sobre casos de onda de frio no Brasil, sendo que a maior parte deles são estudos sobre os aspectos sinóticos de uma frente fria intensa associada a geadas no centro-sul do Brasil (Fortune e Kousky 1983, Marengo et al. 1997, Seluchi e Nery 1992, Dapozzo e Silva Dias 1994, Satyamurti et al. 2002). Existem outros trabalhos que analisaram a estrutura média da troposfera média e alta associada a penetrações intensas de ar frio no sul e sudeste do Brasil. Vera e Vigliarolo (2000) mostraram a estrutura e evolução das perturbações de escala sinótica associadas à ocorrência de geadas no sul do Brasil. Eles encontraram, como características principais, a presença de uma perturbação ciclônica ingressando o continente sul americano por latitudes subpolares e outra perturbação ciclônica em níveis



altos próxima à Cordilheira dos Andes, em latitudes subtropicais. Esta última perturbação é fator determinante para a ocorrência de ondas de frio em regiões tropicais.

Lupo et al. (2001) fez uma classificação sinótica de ondas de frio na América do Sul através da composição de casos. As ondas de frio foram classificadas em três tipos em função da relação dos campos meteorológicos de superfície e altitude. O padrão de onda de frio Tipo 3 mostrou o anticiclone pós-frontal com lento deslocamento para leste e atingindo a região sul e o sul da região sudeste do Brasil. Em 500 hPa observou-se a presença de uma fraca crista sobre o centro de América do Sul e uma fraca advecção de vortacidade anticiclônica, corrente abaixo dessa crista, que contribuiu para intensificação do anticiclone em superfície.

O local de formação da massa de ar é denominado região de origem, é neste local que a massa de ar irá adquirir suas características de temperatura, pressão e umidade. Portanto, uma massa de ar que se forma sobre uma superfície gelada, como a Antártida, apresenta características típicas dessa região, ou seja, temperatura baixa, alta pressão e pouca umidade. Ao se deslocarem, as massas de ar vão aos poucos, perdendo as suas características de temperatura, pressão e umidade originadas no momento de sua formação. Esse deslocamento ocorre sempre no sentido das altas pressões para as baixas pressões. A troposfera (local de movimentação das massas de ar) não é uma camada homogênea. Nela, encontram-se basicamente três tipos distintos de massas de ar que se diferenciam conforme a latitude sobre a qual elas se formaram, podendo ser classificadas em equatorial, tropical ou polar. As regiões subtropical e extratropical da América do Sul são afetadas pela passagem de massas de ar frio principalmente durante o inverno (Varejão-Silva, 2001). Quedas acentuadas de temperatura podem ser observadas após o estabelecimento deste sistema sobre determinada região (Fedorova, 1999). No Brasil, as regiões mais afetadas pela entrada de massas de ar frio são o Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Varejão-Silva,



2001). Os movimentos do ar (massas de ar e ventos) resultam da distribuição desigual da energia solar nas zonas de baixas, médias e altas latitudes. A diferença de temperatura do ar atmosférico exerce uma função muito importante na formação de áreas de baixa e alta pressão atmosférica e, conseqüentemente, no movimento das massas de ar e dos ventos, pois, como já foi exposto, os deslocamentos do ar acontecem de uma área de alta pressão para uma de baixa pressão. O ar aquecido nas zonas de baixas latitudes próximas ao equador se expande, torna-se leve e sobe (ascende), criando uma área de baixa pressão ou ciclônica. O ar mais frio e denso das áreas de médias e altas latitudes desce, fazendo surgir uma área de alta pressão. Uma vez que as massas apresentam uma certa tendência para igualar essas pressões, estabelece-se, assim, uma dinâmica atmosférica, ou seja, uma circulação geral de ar quente entre os trópicos e os pólos, passando pelas zonas de médias latitudes. As áreas frias ou de alta pressão, como as polares, e as subtropicais ou de latitudes médias são dispersoras de massas de ar e ventos, e recebem o nome de áreas anticiclônicas; as quentes ou de baixa pressão atmosférica (de baixa latitude), como as equatoriais, são receptoras de massas de ar e ventos e são chamadas de áreas ciclônicas.

As massas de ar são o veículo da transferência de calor na atmosfera através do globo. Quando uma massa de ar se desloca, a sua parte dianteira passa a ser conhecida por frente. A massa de ar em deslocamento vai-se modificando, porque encontra condições de superfície diferentes, e o seu movimento provoca variações de pressão. As massas de ar acabam por chocar umas com as outras, normalmente nas latitudes médias, produzindo a maioria dos fenômenos meteorológicos mais interessantes (Varejão-Silva, 2001).

3.1 Frentes frias

Uma massa de ar é considerada como fria, quando este ar se desloca sobre uma região mais quente. A camada atmosférica em contato direto com a superfície é aquecida por condução, o que provoca uma instabilidade. O



movimento convectivo do vento eleva o ar aquecido para os níveis mais elevados da atmosfera. Na América do Sul, as massas de ar frio são as que se deslocam da região subantártica e invadem o sul do continente pelo Chile, pela Argentina, pelo Uruguai e pelo Paraguai, atingindo o Brasil durante o período de outono a inverno. Às vezes, essas massas de ar frio chegam a atingir o Nordeste, bem como a Região Amazônica, onde provocam o fenômeno conhecido como friagem.

Quanto maior for o contraste entre as temperaturas do ar e da superfície adjacente, maior será convecção. O transporte vertical de calor, decorrente do ar que se eleva na atmosfera induz um aumento de temperatura da massa de ar como um todo. A distribuição vertical de temperatura vai sendo alterada, com tendência de um aquecimento progressivo. O processo de condensação favorece o aquecimento do ar (liberação de calor latente), enquanto a precipitação vai contribuir para uma redução da umidade do ar. As mudanças nas condições meteorológicas observadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil estão geralmente associadas à passagem, formação ou intensificação de frentes frias, sistemas meteorológicos típicos de latitudes médias e atuantes no litoral brasileiro em todas as épocas do ano (Kousky, 1979 e Satyamurty et al., 1998).

Na América do Sul, Satyamurty & Mattos (1989) identificaram a região centro-sul do continente, localizada entre os dois anticiclones subtropicais, do Pacífico e Atlântico Sul, como altamente frontogênica (favorável à formação e intensificação de frentes). O desenvolvimento da zona frontal é verificado em associação aos distúrbios baroclínicos provenientes do Pacífico, que atravessam os Andes em latitudes médias.

As frentes frias que percorrem o litoral da América do Sul são, tipicamente, configuradas na direção noroeste-sudeste e apresentam uma trajetória de sudoeste para nordeste. Para ilustrar isto, um exemplo de passagem frontal, observada entre os dias 9 e 10 de agosto de 1996, na região sul do Brasil, é

apresentada na Fig. 3.1. A linha que separa dois fluxos distintos, associados a massas de ar de diferentes características. Os campos de pressão ao nível do mar, de vento a 10 metros de altura, e de temperatura em 1000 hPa são de reanálises do National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research dos Estados Unidos da América do Norte (NCEP-NCAR).

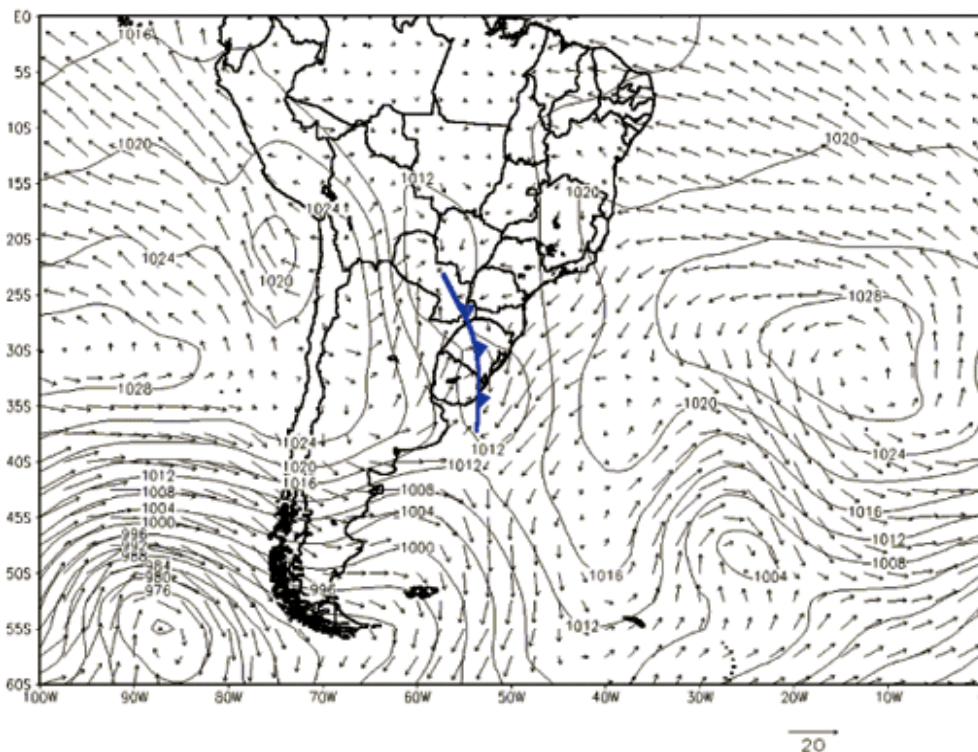


Figura 3.1- frente fria observada desde o Paraguai até o Rio Grande do Sul Fonte: Rev. Bras. Geof. vol.22 no.2 São Paulo May/Aug. 2004

3.2-Quantidade mensal de massas de ar frio e frentes frias

Os dados brutos da quantidade de massas de ar frio (somatório mensal) que ingressaram no Brasil no período de 1996 a 2010 e quantidade de frentes frias que ingressaram na região sul do Brasil no período de 1986 a 2010, foram obtidos do Banco de dados históricos do CEPTEC. Esses dados de massas de ar frio e frentes frias serão utilizados em outros trabalhos de mesma área e os



dados correspondente ao período de outubro de 2001 a outubro de 2002 serão utilizados neste trabalho.

Mês/ano	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
1	00	00	5	6	4	5	3	5	5	6
2	00	4	3	5	4	5	5	4	5	6
3	00	00	4	6	00	5	4	3	5	6
4	00	5	7	2	6	7	00	5	5	5
5	00	4	6	4	4	5	6	5	6	6
6	00	4	00	6	4	6	5	5	4	8
7	00	6	00	6	5	5	5	4	5	4
8	00	6	6	7	5	4	7	3	00	6
9	00	4	6	4	7	6	5	6	6	5
10	00	6	6	7	4	5	7	5	4	4
11	7	6	4	5	00	00	5	4	5	4
12	7	6	4	4	00	00	7	4	6	8

Tabela 3.2.1- Frentes frias que ingressaram na Região Sul do Brasil '00' significa dados indisponíveis (fonte CEPETEC- CLIMANALISE)

Mês/ano	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1	6	5	6	7	5	6	6	6	2	6	6	4	5	2	00
2	8	6	6	6	4	7	3	8	5	4	2	3	3	6	00
3	4	4	7	5	8	5	7	4	3	6	5	4	4	3	00
4	7	4	4	6	4	4	6	3	4	6	4	6	4	5	00
5	7	6	2	5	5	4	1	5	5	5	5	7	4	6	00
6	5	5	6	8	5	4	6	6	6	6	5	7	5	4	00
7	7	7	6	6	6	7	6	7	6	4	5	6	9	7	00
8	6	4	8	7	6	5	5	5	6	6	6	9	8	00	00
9	6	8	6	8	6	4	6	6	4	5	6	7	4	00	00
10	5	6	6	5	7	6	10	7	5	5	6	7	8	00	00
11	6	8	5	4	6	6	7	7	4	5	4	9	1	00	00
12	8	7	7	7	9	5	6	9	4	5	3	7	4	00	00

Tabela 3.2.2- Frentes frias que ingressaram na Região Sul do Brasil '00' significa dados indisponíveis (fonte CEPETEC- CLIMANALISE)

Mês/ano	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1	00	00	00	00	00	00	00	00	2	6	3	5	4	3	3
2	00	00	2	00	00	00	1	00	5	4	3	2	4	6	4
3	00	00	4	00	00	00	00	4	3	5	5	5	6	6	00
4	4	6	4	6	00	4	4	3	4	5	6	5	5	7	00
5	5	3	4	6	7	4	5	6	4	5	5	6	4	6	00
6	5	4	4	8	4	4	6	6	2	7	5	6	6	5	00
7	7	5	5	6	2	4	6	7	5	4	5	5	7	7	00



8	5	00	9	4	4	0	5	5	5	5	6	8	7	6	00
9	6	00	5	6	2	2	5	6	5	3	6	4	4	6	00
10	00	00	00	6	2	3	6	5	5	7	4	7	7	8	00
11	00	00	00	5	7	6	4	7	4	6	6	5	5	6	00
12	00	00	00	00	2	00	00	5	6	7	2	9	5	2	00

Tabela 3.2.3- Massas de ar frio que ingressaram no Brasil '00' significa dados indisponíveis (fonte CEPTEC- CLIMANALISE)

3.3 Análise e comparação com os dados de múons

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.

No presente projeto, 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.

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, neste projeto, 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 =freqüência angular, e a_2 = fase da função. O ponto inicial do método é a definição da chamada função condicional F, dada por:

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

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, freqüência 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 predições e/ou reconstrução de séries temporais como se essa série toda pertencesse a um segmento de uma função senoidal.

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:



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

O resultado das contagens percentuais relativa versus o tempo é apresentado na Figura 3.3.1. No gráfico da Figura 3.3.1 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 3.3.2.

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 3.3.3. 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 3.3.4.

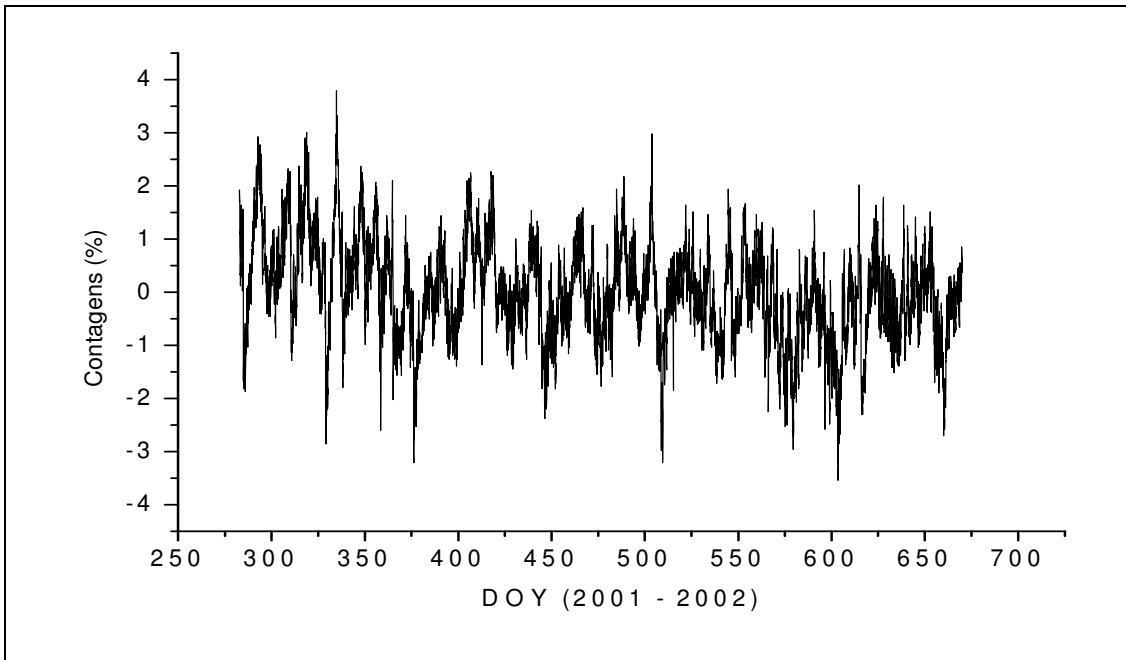


Figura 3.3.1 - Contagens relativa a média da série horária de dados do detector vertical do MMDP para o período de 10/10/2001 (DOY=283) a 31/10/2002 (DOY=669).

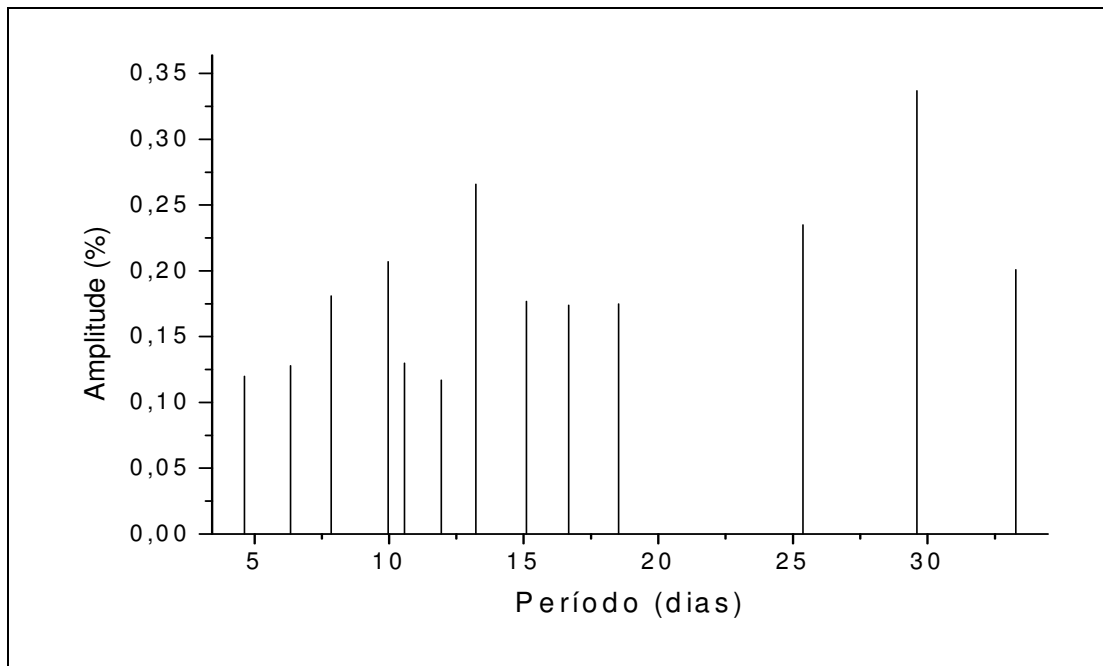


Figura 3.3.2– Gráfico de barras dos valores de amplitude *versus* período obtido através do ARIST a partir da série temporal de contagens percentual horária do detector vertical do MMDP relativo ao período 10/10/2001 – 31/10/2002.

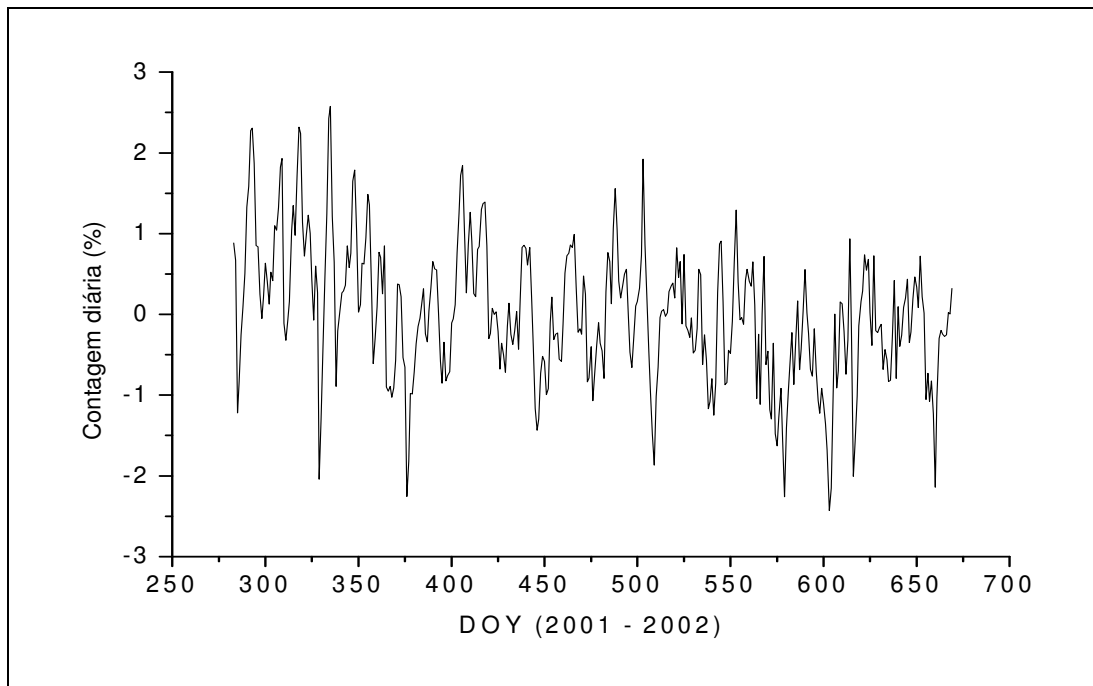


Figura 3.3.3 - Contagens percentuais relativa ao valor médio da série diária de dados do detector vertical do MMDP para o período de 10/10/2001 (DOY=283) a 31/10/2002 (DOY=669).

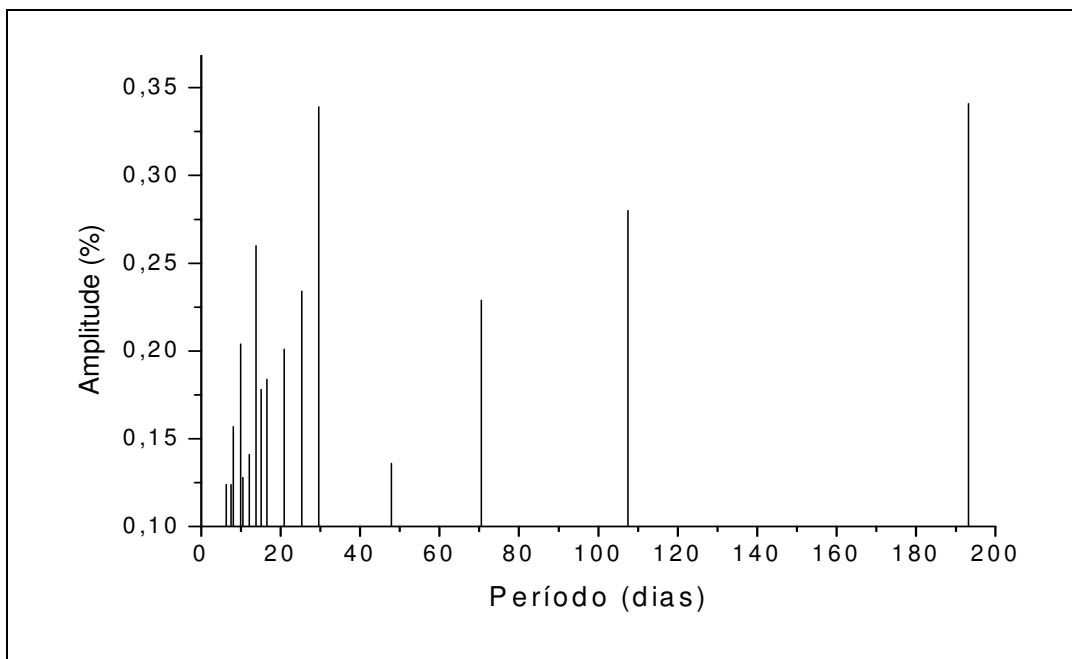


Figura 3.3.4 – Gráfico de barras dos valores de amplitude *versus* período obtido através do ARIST a partir da série temporal de contagens percentual diária do detector vertical do MMDP relativo ao período 10/10/2001 – 31/10/2002.

Na figura 3.3.5 mostra o somatório mensal de massas de ar frio, frentes frias e a contagem percentual do número médio mensal de múons para o período outubro de 2001 a outubro de 2002. Observa-se que há dados faltantes de massas de ar frio no período de dezembro a janeiro. Nesses dados foi feito a regressão linear simples. Na figura 3.3.6 obteve-se o coeficiente de relação entre os dados de múons e o número de frentes frias $-0,33948$ e na figura 3.3.7 o coeficiente de correlação entre os múons e a massas de ar frio foi de $-0,41367$. Isso mostra que os números de múons estão moderadamente correlacionados com os fenômenos de frentes frias e massas de ar frio.

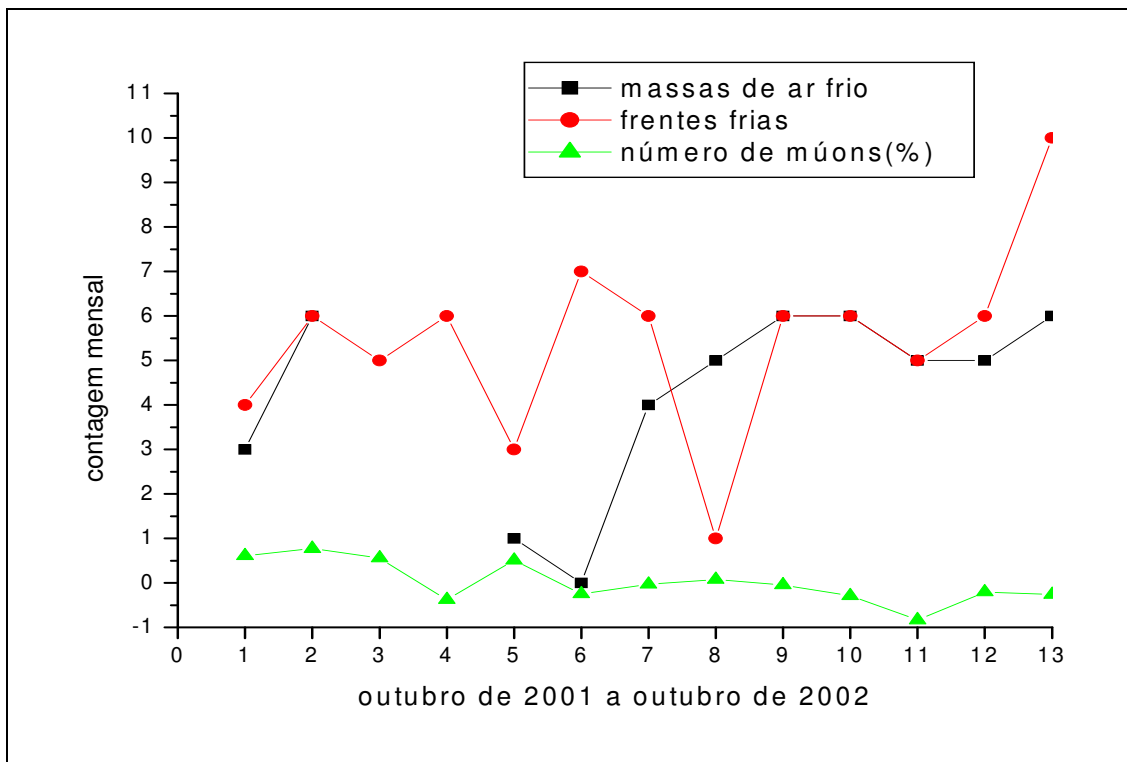


Figura 3.3.5- Quantidade mensal de frentes frias, massas de ar frio e contagens percentuais relativa ao valor médio mensal de dados do detector vertical do MMDP para o período de 10/10/2001 (DOY=283) a 31/10/2002 (DOY=669).

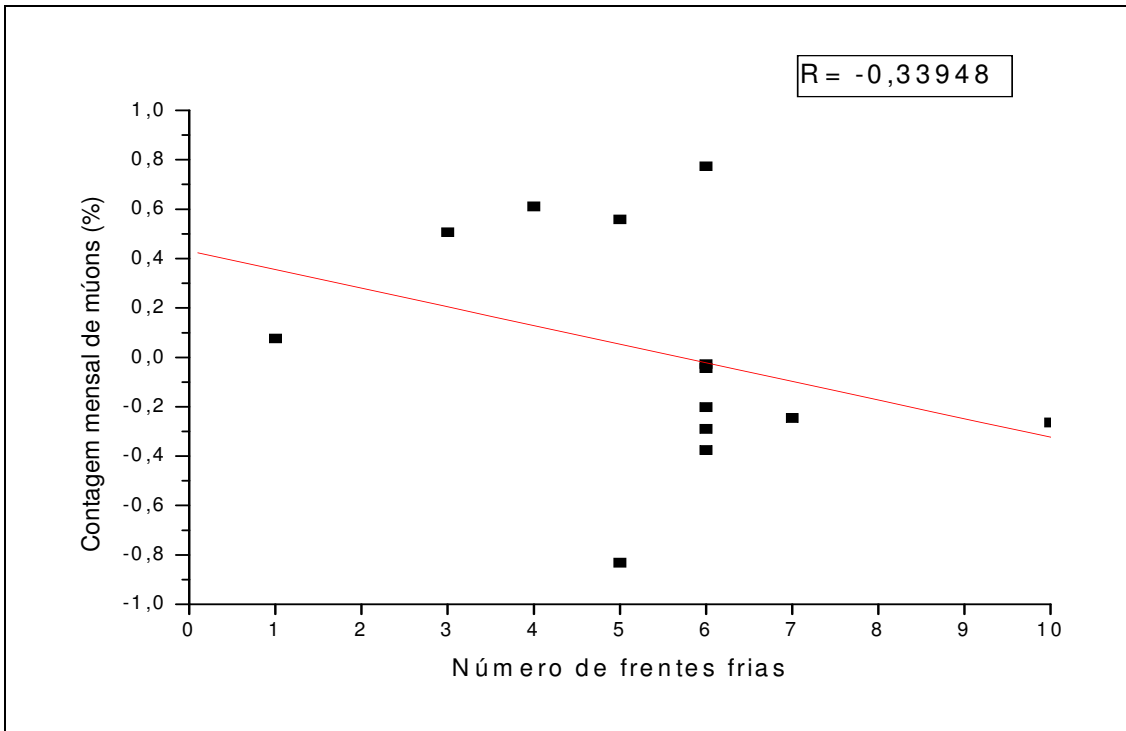


Figura 3.3.6- relação entre a contagem mensal de múons e o número de frentes frias correspondente ao período outubro de 2001 a outubro de 2002

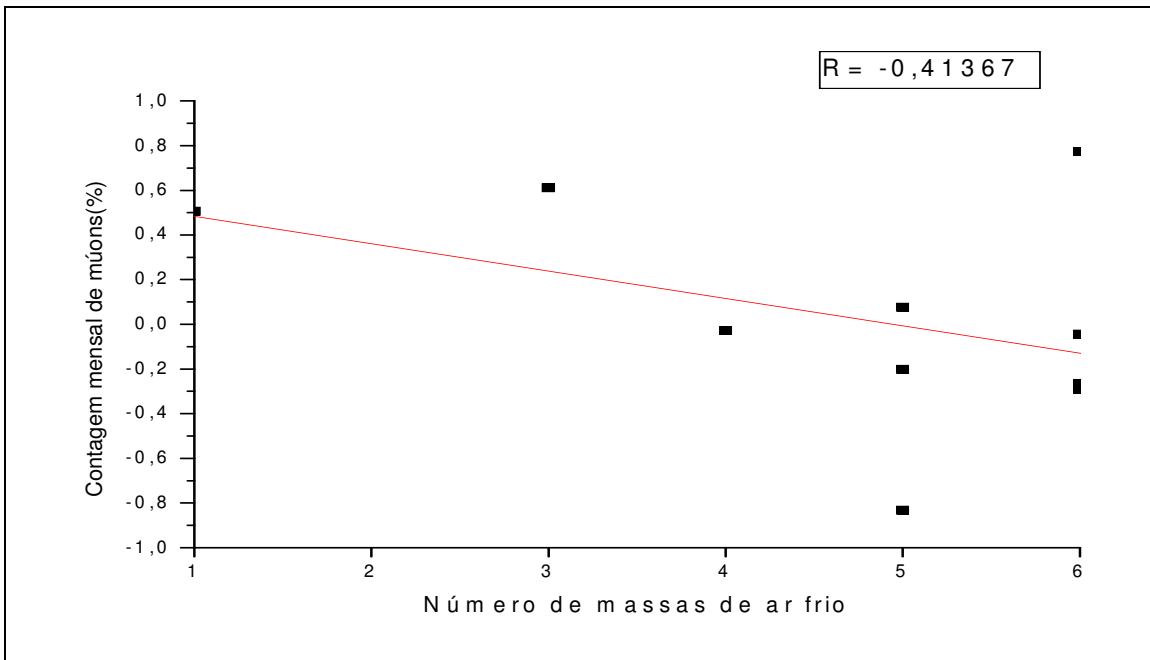


Figura 3.3.7- relação entre a contagem mensal de múons e o número de massas de ar frio correspondente ao período outubro de 2001 a outubro de 2002



Esses ciclos poderão estar associados com variabilidade de baixa frequência que é definida normalmente com períodos maiores que 10 dias. Os períodos de variações intrasazonais situam-se na banda 10-100 dias. O sinal intrasazonal exhibe considerável complexidade em ambos aspectos, espacial e temporal, e dois fenômenos persistentes aparecem nesta banda:

- i) anomalias temporalmente recorrentes e geograficamente fixas, como bloqueios e vários padrões regionais de teleconexão;
- ii) ondas com extensivos, mas bem definidos, picos espectrais em frequência, progressivas ou estacionárias no espaço.

A identificação dos fenômenos atmosféricos associados aos ciclos da variabilidade natural é importante para a formulação de modelos numéricos que descrevam o clima regional.

A mais conhecida oscilação na banda intrasazonal é a *Oscilação de Madden e Julian* (OMJ). A oscilação de 40-50 dias foi assim denominada por Madden e Julian (1971). Este tipo de oscilação consiste de células de circulação de grande escala, orientadas no plano equatorial, que se move para leste, do Oceano Índico para o Pacífico Central. Segundo Madden e Julian (1994), o limite de 40-50 dias para a oscilação é apenas uma aproximação para os períodos em que os processos físicos ocorrem. Esta oscilação é freqüentemente referida como oscilação de 30-60 dias.

Os fenômenos tipicamente das escalas intrasazonais de frequências mais altas (de 15 a 25 dias) também parecem influenciar de modo significativo as condições atmosféricas em latitudes subtropicais nas quais se encontram localizadas as regiões Sul e Sudeste do Brasil. As principais oscilações estão associadas a sistemas atmosféricos que atuam sobre a América do Sul dos quais se destacam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e os Sistemas Frontais (SF).

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 3.3.2 e 3.3.4



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.

CAPÍTULO 4 – DADOS E METODOLOGIA

4.1 – DETECTORES DE RAIOS CÓSMICOS

Analisaram-se dados de contagem de partículas com energia acima de 60 Mega elétrons-volts do detector G do instrumento MED (Médium Energy Detector) à bordo do satélite IMP-8. Também estudaram-se dados provenientes de 4 monitores de nêutrons com diferentes rigidezes de corte geomagnética, a saber, Thule – Greenland (onde a rigidez de corte é maior do que 0.5 Giga volts, sigla GV), Clímax – Colorado – EUA (> 3 GV), Beijing – China (> 10 GV) e Haleakala – Hawaii (> 13 GV). Outra fonte de dados de raios cósmicos foi o então protótipo do telescópio multidirecional de muons (TMM), o qual iniciou a operação em março de 2001. Esse instrumento tinha 4 m² de área de detecção e foi instalado no Observatório Espacial do Sul (SSO/CRS/INPE - MCT), (29.4° sul, 53.8° oeste, 480 m acima do nível do mar), em São Matinho da Serra, RS. Escolheu-se o detector de partículas na direção vertical, pois possui maior incidência de partículas, observando melhor do que os detectores de outras direções os efeitos globais causados por alguma estrutura interplanetária, além de ter maior área de detecção e menores incertezas nas medidas (Da Silva, M. R. et al., 2004).

A figura 4.1 mostra um exemplo de decréscimo não-recorrente (decréscimo de Forbush – dF ocorrido no período compreendido entre 9 e 19 de outubro de 2001 (equivalentes aos dias do ano 282 e 292) registrados nos detectores de raios cósmicos antes mencionados. Note-se o súbito ataque, rápido



decréscimo e fase de gradual recuperação. As variações percentuais ($\Delta\%$) neste evento são:

$$\Delta\% \text{ IMP-8} = 3$$

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

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

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

$$\Delta\% \text{ Haleakala} = 6.33$$

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

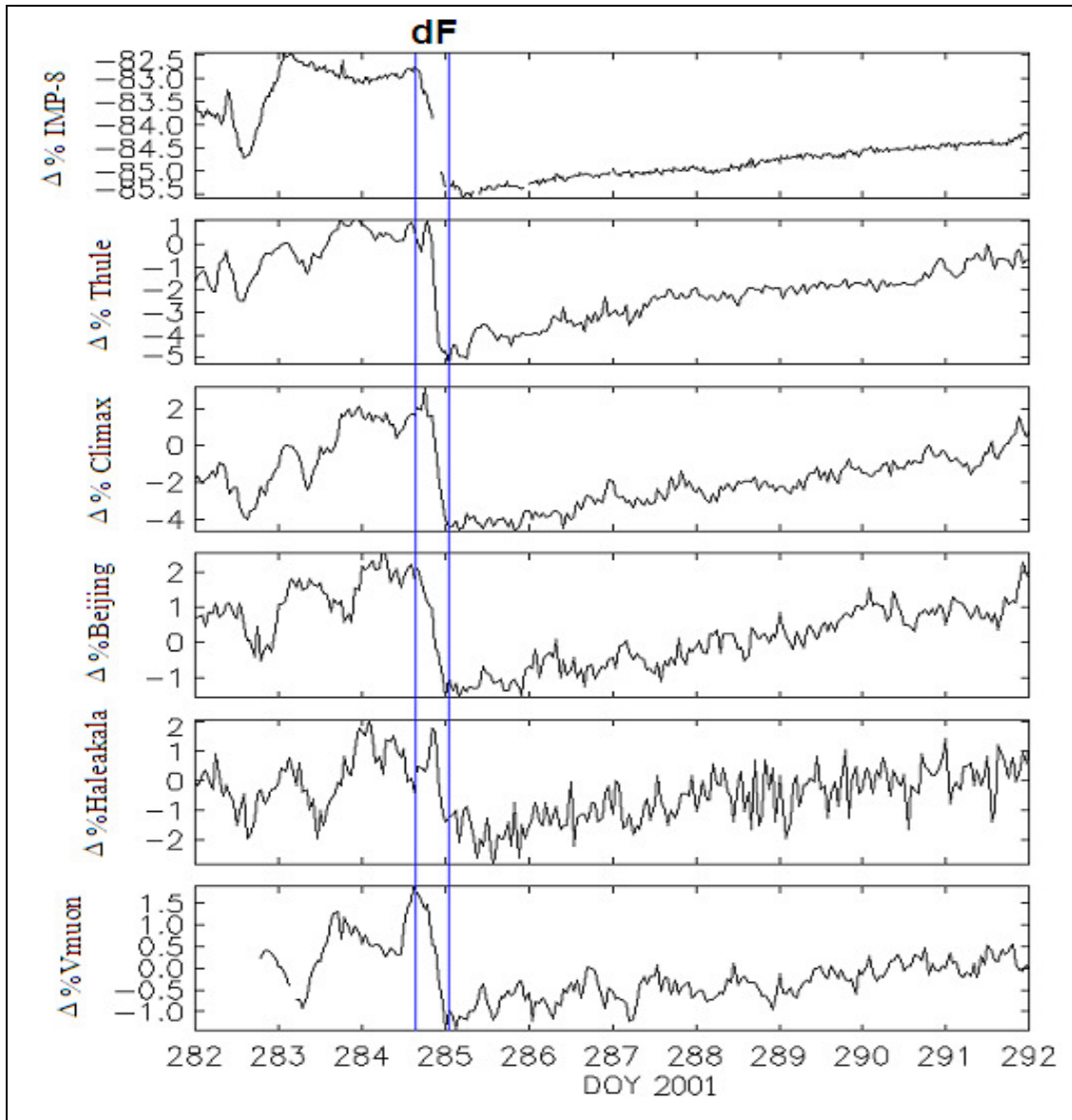


Figura 4.1 – Clássico decréscimo de Forbush (dF). Os painéis mostram as variações percentuais na contagem de raios cósmicos nos 6 detectores mencionados no texto ocorrido no período de 9 a 19 de outubro de 2001

Estudos realizados por Cane et al (1993) mostraram que a taxa integral de íons com alta energia ($> 60 \text{ MeV/u.m.a.}^*$) medidos pelo detector G do instrumento MED à bordo do IMP-8 podem prover informações sobre sutis variações na intensidade em decréscimos que não são evidentes em dados de monitores de nêutrons devido as variações diurnas.

* Unidade de massa atômica.

Um exemplo de grande acréscimo nos dados de contagem de partículas do satélite IMP-8 é ilustrado na figura 4.2. 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*.

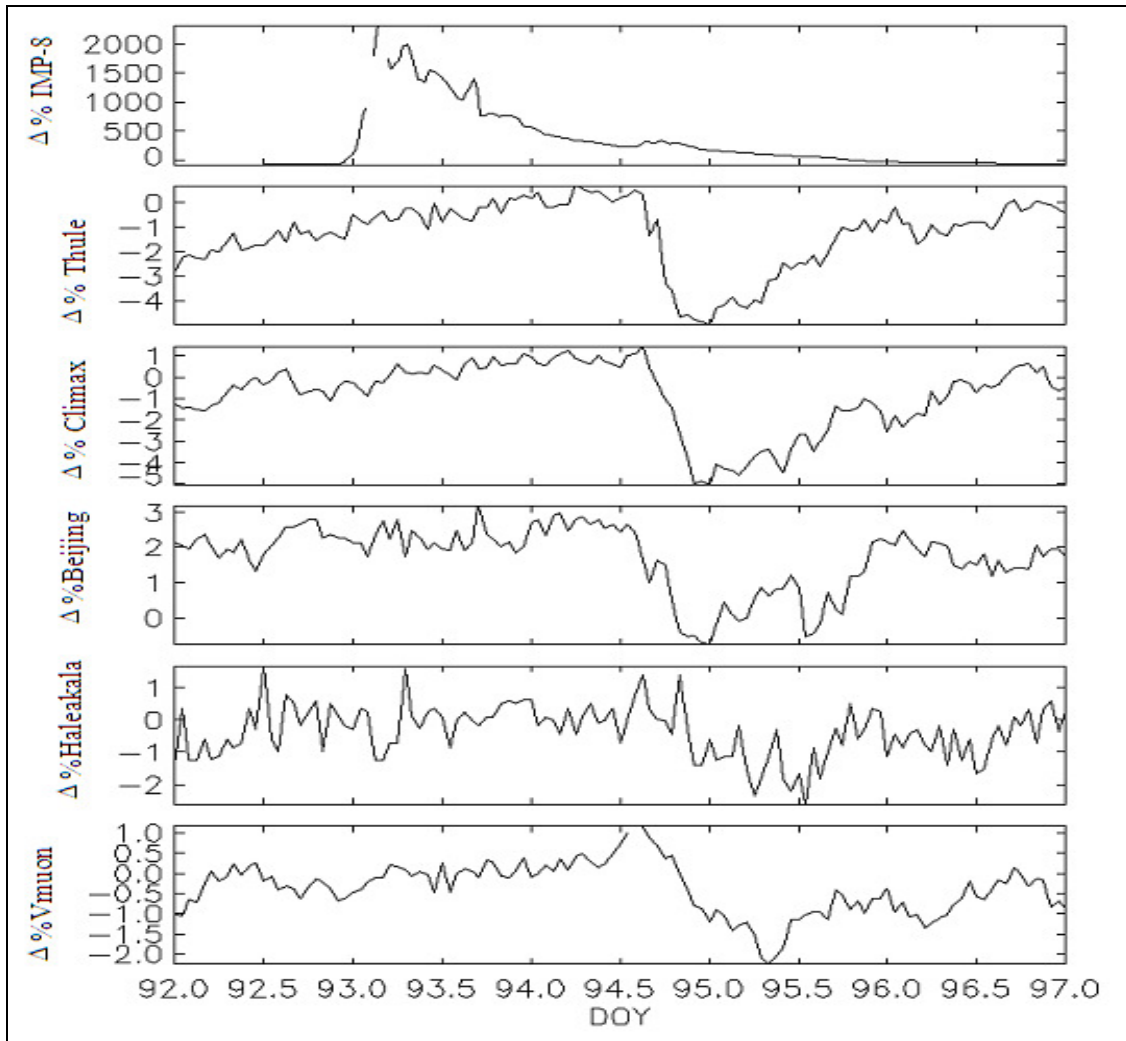


Figura 4.2 – No painel superior, exemplo de um aumento nos dados de contagem de RC oriundos do satélite IMP-8, enquanto, conforme visto nos painéis abaixo, ocorre decréscimos nos dados das outras 5 estações de superfície.

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



CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

Verificou-se que o fluxo de raios cósmicos é principalmente modulado pelos choques frontais rápidos em associação com a passagem de um choque frontal rápido, a intensidade do campo magnético interplanetário decai rapidamente e a flutuação em seus valores tornam-se maiores. Conseqüentemente, raios cósmicos são impedidos de difundirem-se através da onda de choque. Assim, um decréscimo na intensidade de raios cósmicos é formado atrás da onda de choque (Wada, M. e Murakami, K., 1988).

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. Encontraram-se diversos valores de periodicidades distribuídas entre 2 dias a 33 dias.

Em busca de novos valores de periodicidades embutidas nos dados do detector vertical do MMDP, obteve-se, a partir da série horária, uma série com valores mensais de contagem do mesmo período. Os dados de múons foram comparados com o somatório mensal de massas de ar frio e frentes frias através da regressão linear, relativo ao mesmo período, e observou-se que os mesmos estão fracamente correlacionados. Os coeficientes de relação são -0,41367 e -0,33948 respectivamente. Os dados de múons também poderão estar associados com a variabilidade intrasazonal que está associado a sistemas atmosféricos que atuam sobre a América do Sul dos quais se destacam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e os Sistemas Frontais (SF).

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 *. Porém, num ambiente tão rarefeito como o meio interplanetário, tanto faz haver 5 ou 200 partículas/cm³, pois essa densidade continua sendo muito baixa para provocar algum efeito no fluxo de RC.

Por outro lado, a velocidade média das partículas numa estrutura interplanetária é tal que a força magnética gerada por elas é suficiente para modificar a trajetória de alguns raios cósmicos galácticos de baixa energia. Sendo assim, confirma-se novamente que a velocidade das partículas no meio interplanetário é um parâmetro importante na modulação do fluxo de raios cósmicos.

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 q seu efeito na contagem dos detectores é insignificante.

* Afinal, se no caminho do fluxo de RC for colocado, digamos, uma parede de chumbo de espessura suficientemente grande, o fluxo será espalhado.



CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

Este Projeto “Estudo das séries temporais de raios cósmicos (muons e nêutrons) através da análise espectral e wavelets”, foi desenvolvido no Laboratório de Clima Espacial do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCEPTM/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

No qual foi aplicado 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 dados foram 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. Encontraram-se diversos valores de periodicidades distribuídas entre 2 dias a 33 dias.

Esses dados foram comparados, através de uma regressão linear simples, com o somatório mensal de frentes frias e massas de ar frio relativo ao mesmo período e observou-se que os mesmos estão fracamente correlacionados. Isso ficou evidente, mas também poderá estar associado com outros eventos climáticos como a variabilidade intrasazonal.

De modo geral, no presente trabalho foi possível obter conhecimentos de diversos fenômenos envolvendo as relações Sol-Terra tais como atividades solar, tempestades geomagnéticas, raios cósmicos e massas de ar.

O aluno obteve apreciável experiência com manipulação de dados por meio de algoritmos desenvolvidos durante o período de vigência do projeto, interpretação dos gráficos gerados e eventos científicos.



REFERÊNCIAS

Augusto, C. R. A. 2006. **Observação do excesso e deficit de muons no nível do mar em associação com eventos solares transientes**, Tese de Doutorado em Física, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ.

Burlaga, L. F. 1995. **Interplanetary magnetohydrodynamics**. New York: Oxford University Press, 250 p.

Cane, H. V., Richardson, I. G. and T. T. von Rosenvinge, 1994, **Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study**, Journal of Geophysical Research, 99, A11, 21.429-21.441.

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

Da Silva, M. R., Contreira, D. B., Monteiro, S., Trivedi, N. B., Munakata, K., Kuwabara, T., Schuch, N. J., 2004, **Cosmic ray muon observation at Southern Space Observatory – SSO (29.S, 53.W)**, Astrophysics Space Science. 290, 389–397, 2004.

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.

Dal Lago, Alisson. **Estudo De Estruturas Geoféticas No Meio Interplanetário e de suas Causas Solares**. 213 p. INPE-10298-TDI/917. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, SP, 2003.



DAPOZZO, J.; SILVA DIAS, M.A F. Um estudo de caso de penetração do ar polar em latitudes baixas: julho de 1998. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 1994, Belo Horizonte. **Anais**: 1994. p. 601-606.

Echer, E., et al. 2003a. **Número de manchas solares, índice da atividade do Sol**. Rev. Bras. Ens. Fís., v. 25, n° 2.

Echer, E., W. D. Gonzalez, L. E. A. Vieira, A. Dal Lago, F. L. Guarnieri, A. L. C. Gonzalez and N. J. Schuch, 2003b. **Interplanetary Shock Parameters during Solar Activity Maximum (2000) and Minimum (1995-1996)**, Brazilian Journal of Physics, 33, 1, 115-122.

Echer, E. **Estudo de Características e Geofetividade de Estruturas Magnéticas Interplanetárias Simples e Compostas**. 245 p. INPE-12514-TDI/999. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, SP, 2005.

Echer, E., Alves, M. V. e Gonzalez, W. D. 2006. **Ondas de choque não colisionais no espaço interplanetário**. Rev. Bras. Ens. Fís., v. 28, n° 1, p. 51 – 65.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Clúa de Gonzalez, A. L. C. **Interplanetary origin of geomagnetic storms**. Space Science Reviews, v. 88, n. 3, p. 529 – 562.

Hoyte, D. V. e Schatten, K. H. 1997. **The role of the Sun in Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge.

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

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



LUPO, A. R.; NOCERA, J. J.; BOSART, L. F. South American cold surges: types, composites, and cases studies. **Mon. Wea Rev**, v. 129, n. 5, p. 1021-1041, 2001. [[Links](#)]

FORTUNE, M.; KOUSKY, V. Two severe freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. **Mon. Wea. Rev**, v. 111, n. 1, p. 181-196, 1983.

FEDOROVA, N. Meteorologia Sinótica. Pelotas: **UFPel: Ed. Universitária**, 1999.

KOUSKY VE. 1979. Frontal Influences on Northeast Brasil. **Monthly Weather Review**, 107: 1140-1153.

MARENGO, J.; CORNEJO, A.; Satyamurty, P.; Nobre, C. **Cold surges in tropical and extratropical South America: The Strong Event in June 1994.** **Mon. Wea Rev**, v. 125, n. 11, p. 2759-2786, 1997.

Moschetti, M. 2006. **Galileu e as cartas sobre as manchas solares: a experiência telescópica contra a inalterabilidade celeste.** Cadernos de Ciências Humanas – Especiaria., v. 9, n. 16, p. 313 – 340.

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

Odenwald, S. F. e Grenn, J. L. 2008. **Tempestade Solar no Horizonte Interplanetário.** Scientific American Brasil, edição de setembro, p. 36 - 43.

Okazaki, Y. **Three dimensional anisotropy and density gradient f galactic cosmic rays measured by global moun detector network.** Tese de doutorado em Geofísica. Tohoku University, Japão, 2008.

PARMENTER, F. C. A Southern Hemisphere cold front passage at the equator. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 57, p. 1435-144, 1976.



Rathod, J., et al. 2008. **Relationship between Interplanetary (IP) Parameters and Geomagnetic Indices during IP Shock Events of 2005**. J. Astrophys. Astr., v. 29, p. 293 – 302.

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.

SATYAMURTY P & MATTOS LF. 1989. Climatological Lower Tropospheric Frontogeneis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. Monthly Weather Review, 117: 1355-1364. [[Links](#)]

SATYAMURTY P, MATTOS LF, NOBRE CA & SILVA DIAS PL. 1998. Tropics - South America. In : Meteorology of the Southern Hemisphere, Ed. Kauly, D. J. and Vincent, D. G., **Meteorological Monograph**. American Meteorological Society, Boston, 119-139. [[Links](#)]

SATYAMURTY, P.; FONSECA, J. F. B.; BOTINO, M.J.; SELUCHI, M.E.; LOURENÇO, M.C.M.; GONÇALVES, L.G. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and inst NWP guidance. **Meteorol. Appl**, v. 9, n. 1, p. 113-128, 2002. [[Links](#)]

SELUCHI, M.E.; NERY, J. T. Condiciones meteorológicas asociadas a la ocurrencia de heladas en la región de Maringá. **Revista Brasileira de Meteorología**, v. 7, n. 1, p. 523-534, 1992. [[Links](#)]

SENTELHAS, D.C.; FAZUOLI, L.C.; PEZZOPANE, J.R.M. Temperatura letal de diferentes espécies e derivados de híbrido interespecífico de café. In.:



CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFECIRAS, 1995. **Anais:** p. 21.

Sheeley, N. R., R. A. Howard, M. J. Koomen, D. J. Michels, R. Schween, K. –H. Mulhauser and H. Rosenbauer, 1985, **Coronal mass ejections and interplanetary shocks**, Journal of Geophysical Research, 90, 163.

Van Helden, A. 1996. **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.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Brasília, DF: Ed. Pax, **INMET**, 2001.

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P.K. A Diagnostic Study of Cold – Air Outbreaks over South America. **Mon. Wea. Rev**, v. 128, n. 1, p. 3 – 24, 2000. [[Links](#)]

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P.K.; BERBERY, E.H. Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. **Mon. Wea. Rev**, v. 130, n. 3, p. 684-699, 2002.

Wada, M., and K. Murakami, 1988, **Cosmic rays in the interplanetary space**. In: *Cosmic Ray Astrophysics*, edited by M. Oda, J. Nishimura and K. Sakurai, pp. 299-334. TERRAPUB, Tokyo,



ANEXO A – ROTINAS

A.1 – CORREÇÃO DO EFEITO DE PRESSÃO

Rotina para corrigir os efeitos de pressão atmosférica na contagem do detector vertical do TDM e conversão dos dados em contagem percentual.

```
pro correcao
;Acesso aos dados da direção vertical do TMM_protótipo
result=read_ascii('D:\Clima\dados\Muons\2001\muon_2001_final.txt')
prot1=result.(0)

; Fatores de Escala
USscl = 1000 & LSscl = 1000 & WSscl = 400
Vscl = 100 & Nscl = 40 & Sscl = 40
Escl = 40 & Wscl = 40 & NEscl = 10
NWscl = 10 & SEscl = 10 & SWscl = 10

tmuon=prot1(0,*)
V=prot1(12,*)
Pr=prot1(21,*)
Rt=prot1(22,*)

; Constantes para a correção do efeito de pressão
u0 = 5.827605 & y1 = -3954.210 & y2 = -10724.26
c1 = 99.47206 & c2 = 4.355120 & c3 = -112.7058
d1 = 0.037349 & t1 = 27.59161 & t2 = 0.806170 & t3 = 19.29672 & t4 = 15.24889
t_geta = 3090000.0 & p_geta = 1510000.0
t_sf = 200.0 & p_sf = 80.0
psia_hpa = 68.9476 & pres_ave = 950.0

; Betas = coeficientes barometricos
BetaUS = -0.175 & BetaLS = -0.217 & BetaWT = -0.201
BetaV = -0.216 & BetaN = -0.231 & BetaS = -0.206
BetaE = -0.208 & BetaW = -0.238 & BetaNE = -0.271
BetaNW = -0.305 & BetaSE = -0.280 & BetaSW = -0.303

; Calculo da pressão(hPa)
x = 1 / (((RT + t_geta) * t_sf) / 3600000000)
u = x - u0
u2 = u * u
u3 = u2 * u
xtemp = y1 * u + y2 * u2
ta = 1 / (((PR + p_geta) * p_sf) / 3600000000)
c = c1 + c2 * u + c3 * u2
d = d1
t0 = t1 + t2 * u + t3 * u2 + t4 * u3
xpress = 1.0 - (t0 ^ 2) / (ta ^ 2)
xpres = c * xpress * (1.0 - d * xpress) * psia_hpa

; Correção do efeito da pressão e calculo das contagens relativas
Vcor = 100.0 * alog(V) - (BetaV * (xpres - pres_ave))
Vcorr = exp((Vcor) / Vscl); (contagens/hora)

Vmedia=mean(Vcorr./NaN)
Vper=((Vcorr-Vmedia)/Vmedia)*100 ; eis o vetorcoluna com a contagem percentual de muons
; corrigido para o efeito de pressão atmosférica.
```



A.2 – ANÁLISE DE ÉPOCA SUPERPOSTA – NEUTRONS E MUONS

Rotina que gera dados com a análise de época superposta para os dados provenientes de monitores de nêutrons e detector de muons.



Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT
Relatório Final de Atividades

```

:
:
: ANÁLISE DE ÉPOCA SUPERPOSTA
:
:
: Procedimento (quase) sucinto do algoritmo:
:
: - Num arquivo de dados, selecionar as linhas correspondentes à 'm' horas antes e '2m' horas depois do j-ésimo choque
: (há o datas de choque, convertidos em dia fracionário);
: - Essa 'matrizcoluna' de dados (com 3m=n elementos) corresponderá à j-ésima coluna do array 'final', ou seja,
: ao final(j,*);
: - Como os dados possuem resolução horária, o array 'final' será uma matriz de ordem c x n ;
: - Então, para obter os dados superpostos basta calcular o valor médio de cada linha da matriz final, gerando-se
: com essas médias o array 'super'.
:
:
: Esta rotina obtém como saída os dados correspondentes a época superposta de dados em contagem percentual mais
: e menos o desvio padrão referentes aos dados do monitor de nêutron de Climax, mas serve para os dados dos outros
: 3 monitores e o protótipo do TMM analisados neste trabalho.

pro super_climax
result=read_ascii ('D:\Clima\dados\Neutrons 2001\CLIMAX_adap.txt')
arquivo=result.(0)
tempo=arquivo(0,*)
dados=arquivo(1,*)
super_media=mean(dados,./NaN)
read_n,prompt='Número de linhas do arquivo: '
n=n/3

result2=read_ascii ('D:\Clima\dados\datas_neutrons.txt') ;arquivo com as datas dos eventos (convertidos em dia
; fracionário) com deréscimos observados pelo monitor de neut. Climax no ano de 2001

arqdata=result2.(0)
data=arqdata(*,*)
tamanho=size(data)
tam=tamanho(3)
ult=tam - 1

final=findgen(tam,n) ;criação de uma matriz de floating-point-numbers com a dimensão da matriz "final"
; que conterá os dados referentes à 24 h antes e 48 h após os eventos de choques
trinta=1.0/48.0
for j=0,ult do begin
tc = data(j) ;exato momento do choque registrado no ACE
tc1 = tc - trinta ; os dados dos neutrons possuem resolução de 1 hora, por isso 1/48 corresponde a 30min
tc2 = tc + trinta ;tc1 e tc2 são intervalos de tempo para, no comando 'where', ser achado a linha do 'tempo'
; mais próximo do tc
linha = where (tempo gt tc1 and tempo lt tc2) ; linha mais próxima do choque
linhac = linha[0] ; se, por acaso, o intervalo englobar duas linhas de tempo, selecionar apenas o 1º, ou seja,
; o elemento linha[0][pois é necessário um valor escalar ]
linhai = linhac - m ;linha correspondente a m horas antes da linha do choque
linhaf= linhac + 2*m ;linha correspondente a m horas depois da linhac
interv=dados[linhai:linhaf] ; matrizlinha contendo os elementos q vão desde linhai até linhaf no array dados
intervalo=transpose(interv) ;transposta

for i=0,n-1 do begin
final(j,i)=intervalo(i) ;substituição de cada elemento da matriz 'final' pelos valores de interesse
endfor
endfor

media=findgen(1,n) ;matrizcoluna cujo cada linha corresponde ao valor médio de cada linha da matriz final
desvio=findgen(1,n) ;matrizcoluna cujo cada linha corresponde ao desvio padrão dos valores de cada linha da matriz final.
for li=0,n-1 do begin
desvio(li)=STDDEV(final(*,li),./NaN)
media(li)=mean(final(*,li),./NaN)
endfor

desvioper=(desvio/media)*100
super_per=(media - super_media)/super_media*100 ; variação percentual dos dados de 'super' em relação a média anual
zero=tempo(m-1)
stempo=transpose(tempo[0:n-1] - zero)

uniao=[stempo,super_per,super_per + desvioper, super_per - desvioper]
openv,5,'D:\Clima\programs\super\super_climax.txt' ;impressão dos dados num arquivo para depois gerar
printf,5,uniao ;o gráfico com a análise de época superposta d todos
close,5 ;as 6 fontes de dados.
end
```