

INPE-5470-TDI/501

ESTUDO DA ATIVIDADE MAGNETOSFÉRICA ATRAVÉS DOS  
ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS AE, ap E Dst.

MARCELO MAGALHÃES FARES SABA

Dissertação de mestrado em Ciência Espacial/Geofísica  
Espacial realizada sob a orientação dos Drs. Walter  
Demetrio Gonzalez Alarcón e Alícia Luisa Clúa de  
Gonzalez Alarcón, aprovada em novembro de 1992.

INPE  
São José dos Campos  
Novembro de 1992

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5470-TDI/501

ESTUDO DA ATIVIDADE MAGNETOSFÉRICA ATRAVÉS DOS  
ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS AE, ap E Dst.

MARCELO MAGALHÃES FARES SABA

Dissertação de mestrado em Ciência Espacial/Geofísica  
Espacial realizada sob a orientação dos Drs. Walter  
Demetrio Gonzalez Alarcón e Alícia Luisa Clúa de  
Gonzalez Alarcón, aprovada em novembro de 1992.

INPE  
São José dos Campos  
Novembro de 1992

550.38

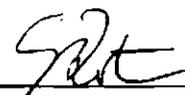
SABA, M.M.F.

Estudo da atividade magnetosférica através dos índices geomagnéticos AE, ap e Dst. / M.M.F. Saba. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 132p. -- (INPE-5470-TDI/501)

1. Atividade magnetosférica. 2. Índices geomagnéticos. 3. Correlações e médias. 4. Tempestades e subtempestades.  
I. Título.

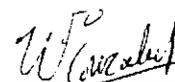
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Ciência Espacial

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



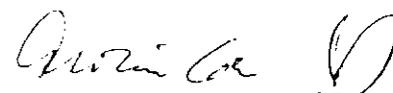
Presidente

Dr. Walter Demetrio Gonzalez Alarcon



Orientador

Dra. Alícia Luisa Clua de Gonzalez Alarcon



Orientadora

Dr. Polinaya Muralikrishna



Membro da Banca

Dr. Fernando Walter



Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Marcelo Magalhães Fares Saba

São José dos Campos, 18 de novembro de 1992

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido realizado sem a preciosa colaboração das pessoas que abaixo relaciono:

Ao Dr. Márcio Nogueira Barbosa, Diretor geral, ao Dr. José Humberto Sobral, Diretor de Ciências Espaciais e Atmosféricas, e ao Dr.Sc. Daniel Jean Roger Nordemann, Chefe da Divisão de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por todo o apoio dado.

Aos Drs. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon, Alícia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon pela orientação e todo o incentivo na realização desta pesquisa.

Ao Dr. Eurico Rodrigues de Paula, ao "World Data Center" e ao "Jet Propulsion Laboratory" pelos dados cedidos.

Aos Drs. Severino Luiz Guimarães Dutra, Polinaya Muralikrishna e Fernando Walter pela participação na Banca Examinadora e pelas sugestões ao presente trabalho.

Ao analista de sistemas José Carlos Lombardi e equipe, pela ajuda na compatibilização e reorganização dos dados.

Aos Drs. Osmar Pinto Júnior, Iara Regina Cardoso Almeida Pinto e Odim Mendes Júnior pelas discussões científicas e pelos incentivos ao longo deste trabalho.

Aos engenheiros Wanderli Kabata e Osvaldo Celso Pontieri pela vivência na área experimental.

À Srt. Marciana Leite Ribeiro pela paciente revisão deste trabalho.

À Secção de Desenho do Departamento de Produção Técnica pela rapidez e qualidade do serviço.

À minha família, pela educação e incentivo constantes ao longo de tantos anos.

À minha Família.

## RESUMO

É vastíssimo o uso dos índices geomagnéticos AE, Dst e Kp (e sua forma linear ap) em estudos de fenômenos associados à variabilidade do campo magnético terrestre. No entanto pouco se tem estudado sobre as relações entre estes mesmos índices. Neste trabalho diferentes médias e correlações são realizadas com estes índices para os anos 1974 (perto do mínimo solar) e 1979 (máximo solar). Com isso, obteve-se um entendimento melhor sobre o monitoramento da atividade magnetosférica, as relações entre os índices assim como seus usos e limitações. Realizou-se as correlações apx-Dst, AEx-Dst, apxAE e, pela primeira vez, a correlação múltipla apxAE-Dst para diferentes períodos e níveis de atividade geomagnética. O ano de 1974 e os períodos de tempestades geomagnéticas apresentam em geral correlações melhores. Também um estudo do valor mínimo de Dst e o valor máximo correspondente de ap durante tempestades e o aprimoramento de dois estudos (Davis e Parthasarathy, 1967; Akasofu, 1981) sobre o comportamento de AE durante a fase principal das principais tempestades, fazem possível um melhor entendimento da relação tempestade/subtempestade e da estimativa do valor de um índice a partir de outros.

A STUDY ON THE MAGNETOSPHERIC ACTIVITY USING THE AE, ap  
AND Dst GEOMAGNETIC INDICES

ABSTRACT

The usage of the geomagnetic indices AE, Dst and Kp (and its linear form ap) in studies of the earth's magnetic field variability is vast. However the relationship between them has been poorly studied. In this work different averages and correlations are done with these indices for the years 1974 (near solar minimum) and 1979 (solar maximum). A better understanding of the magnetospheric activity monitoring, the relationships between these indices as well as of their uses and limitations is achieved. The correlations apx-Dst, AEx-Dst, apxAE and, for the first time, a multiple correlation apxAEx-Dst are done for different time intervals and levels of geomagnetic activity. In general, better correlations are found for the year 1974 and for the periods of geomagnetic storms. Furthermore, a study on the value of the minimum Dst and the correspondent maximum ap for storms and on two previous studies on the behaviour of AE during the main phase of major magnetic storms (Davis and Parthasarathy, 1967; Akasofu, 1981) are done. These studies make possible a better understanding of the storm/substorm relations and the estimation of indices when one of them is missing.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1 - O campo geomagnético.....	1
1.2 - Variações seculares e transitórias.....	3
1.3 - Estudo da atividade geomagnética através de índices geomagnéticos.....	7
<u>CAPÍTULO 2 - A ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA.....</u>	<u>9</u>
2.1 - O vento solar e a magnetosfera.....	9
2.1.1 - Correntes magnetosféricas.....	11
2.1.1.1 - A corrente na magnetopausa e na cauda...	11
2.1.1.2 - A corrente de anel.....	11
2.1.2 - As correntes ionosféricas.....	12
2.1.3 - Variações no vento solar e as consequentes perturbações no campo geomagnético.....	14
2.2 - Tempestades e subtempestades geomagnéticas..	19
2.2.1 - As tempestades geomagnéticas.....	19
2.2.2 - As subtempestades geomagnéticas.....	24
2.2.3 - Fenômenos associados à ocorrência das tempestades e subtempestades geomagnéticas	24
<u>CAPÍTULO 3 - OS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS.....</u>	<u>27</u>
3.1 - Introdução.....	27
3.2 - O índice ap.....	28
3.3 - O índice AE.....	35
3.4 - O índice Dst.....	37
3.5 - Algumas dificuldades no uso dos índices.....	38

3.5.1 - Dificuldades com o índice ap.....	38
3.5.2 - Dificuldades com o índice AE.....	39
3.5.3 - Dificuldades com o índice Dst.....	40
3.6 - Importância do estudo estatístico dos índices	40
3.7 - Obtenção dos índices.....	41
<u>CAPÍTULO 4 - VARIACÃO TEMPORAL DOS ÍNDICES.....</u>	<u>45</u>
4.1 - Introdução.....	41
4.2 - Médias anuais.....	41
4.3 - Médias mensais.....	47
<u>CAPÍTULO 5 - RELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES PARA DIFEREN-</u> <u>TES ESCALAS TEMPORAIS.....</u>	<u>53</u>
5.1 - Introdução.....	53
5.2 - Correlações anuais.....	53
5.2.1 - Correlação anual entre AE e -Dst.....	58
5.2.2 - Correlação anual entre ap e -Dst.....	60
5.2.3 - Correlação anual entre ap e AE.....	61
5.3 - Correlações mensais.....	62
5.4 - Correlações nos períodos de atividade geomag- nética.....	68
<u>CAPÍTULO 6 - A CORRELAÇÃO MÚLTIPLA.....</u>	<u>71</u>
6.1 - Introdução.....	71
6.2 - Correlação múltipla anual.....	72
6.3 - Correlação múltipla para períodos de ativida- de magnética diferentes.....	74
6.4 - Correlação múltipla para médias mensais.....	76

<u>CAPÍTULO 7 - OUTROS ESTUDOS ENVOLVENDO RELAÇÕES ENTRE ÍNDICES.....</u>	79
7.1 - A relação entre a soma dos valores horários de AE durante a fase principal das tempestades e o valor pico de Dst atingido em cada uma delas.....	79
7.2 - A evolução do AE com o Dst durante as tempestades geomagnéticas.....	85
7.3 - Correlação entre o valor mínimo de Dst e o valor máximo de ap atingidos durante as tempestades geomagnéticas.....	90
<u>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES.....</u>	93
8.1 - Médias anuais.....	93
8.2 - Médias mensais.....	93
8.3 - Correlações anuais.....	94
8.4 - Correlações mensais.....	94
8.5 - Correlações nos períodos de atividade geomagnética.....	95
8.6 - Correlação múltipla.....	95
8.7 - Relação entre a soma dos valores horários de AE durante a fase principal das tempestades e o valor mínimo de Dst atingido em cada uma delas.....	96
8.8 - Evolução do AE com o Dst durante as tempestades geomagnéticas.....	96
8.9 - Correlação entre o valor mínimo de Dst e o valor máximo de ap atingidos durante as tempestades geomagnéticas.....	97
8.10 - Conclusões gerais.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
APÊNDICE - O MÉTODO DE OBTENÇÃO DO ÍNDICE Dst.....	105

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Componentes do vetor do campo geomagnético.....	2
1.2 - Variação secular nos observatórios de Melbourne e Toolangi.....	6
2.1 - Configuração geral da magnetosfera, mostrada em corte.....	10
2.2 - Correntes na magnetopausa e na camada neutra...	13
2.3 - Corrente de anel.....	13
2.4 - Correntes ionosféricas e de acoplamento com a magnetosfera.....	15
2.5 - Setores do campo magnético solar no plano da eclíptica.....	17
2.6 - Exemplo de um magnetograma.....	20
2.7 - Exemplo da variação da componente H do campo geomagnético durante uma tempestade magnética..	20
2.8 - Corrente de anel e o campo magnético produzido por ela.....	22
2.9 - Esquema do acoplamento sol-magnetosfera.....	23
3.1 - Estações geomagnéticas.....	31
3.2 - Relação de ap com Kp.....	34
3.3 - O índice AE, AL e AU.....	36
3.4 - Os índices Dst, ap e AE.....	43
4.1 - Amostra da variação de AE e de Dst para os anos 1974 e 1979.....	48
4.2 - Média mensal de Dst.....	49
4.3 - Média mensal de ap.....	50
4.4 - Média mensal de AE.....	51
5.1 - Defasagem temporal para as correlações anuais de 1974 (valores "tri-horários").....	55

5.2 - Defasagem temporal para as correlações anuais de 1979 (valores "tri-horários").....	55
5.3 - Correlação anual AE x -Dst para valores horários e "tri-horários".....	57
5.4 - Correlações anuais (valores "tri-horários")....	59
5.5 - Correlações mensais AE x -Dst (valores "tri-horários").....	63
5.6 - Correlações mensais ap x AE.....	64
5.7 - Correlações mensais ap x -Dst.....	65
5.8 - Correlação entre as médias mensais de -Dst e as correlações mensais ap x -Dst para 1974.....	67
5.9 - Correlação entre as médias mensais de -Dst e as correlações mensais ap x -Dst para 1979.....	67
5.10 - Correlações anuais e as correlações nas fases de tempestades magnéticas de 1979. ....	69
6.1 - As correlações anuais e a correlação múltipla..	73
6.2 - Correlações mensais e a correlação múltipla para junho e julho de 1974.....	75
7.1 - Correlação entre o valor mínimo de Dst atingido em cada tempestade e a soma dos valores horários de AE durante a fase principal e durante 10 horas precedendo o mínimo de Dst.....	81
7.2 - Correlação para 1979, entre a soma dos valores horários de AE durante diferentes intervalos e o valor mínimo de Dst atingido em cada uma delas.....	83
7.3 - Número de tempestades para diferentes durações da fase principal.....	84
7.4 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 13 de outubro de 1974.....	87
7.5 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 4 de abril de 1974.....	87
7.6 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 13 de julho de 1982.....	88

7.7 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 8 de março de 1970.....	88
7.8 - Ajuste linear dos valores mínimos de Dst com os valores máximos de ap atingidos em 46 tempestades de 1979.....	91

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Características do campo geomagnético.....	4
1.2 - Observações da declinação magnética.....	5
3.1 - Limites das classes dos índices K no Observatório de Niemegek.....	29
3.2 - Coordenadas geomagnéticas das estações (em graus).....	32
3.3 - Conversão de Kp para ap.....	33
4.1 - Médias anuais dos índices.....	45
5.1 - Correlação $ap \times -Dst$ em função da intensidade da corrente de anel.....	61
6.1 - Correlação múltipla para médias mensais de 1974	77
6.2 - Correlação múltipla para médias mensais de 1979	77
7.1 - Data, valor mínimo de Dst e duração da fase principal das tempestades.....	80
7.2 - Exemplos de ajuste do mínimo de Dst em função da somatória de AE em 10 horas.....	85
7.3 - Exemplo de ajuste de $Dst_{\min.}$ em função de $ap_{\max}$	92
8.1 - Os principais resultados quantitativos deste trabalho.....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

- AE - Índice geomagnético que monitora o eletrojato auroral, dado em nanotesla.
- AL - Limite inferior das medidas dos magnetômetros que compõem o índice AE.
- ap - Forma linear do índice geomagnético planetário  $K_p$ , expresso em nanotesla.
- AU - Limite superior das medidas dos magnetômetros que compõem o índice AE.
- $B_z$  - Componente sul-norte do campo magnético interplanetário.
- Dst - Índice da atividade geomagnética devida principalmente à corrente de anel, dada em nanotesla.
- H - Componente horizontal do campo geomagnético.
- $K_p$  - Índice geomagnético planetário, quase-logarítmico e "tri-horário", expresso em nanotesla.
- L - Variação magnética de períodos calmos governada pela Lua.
- $R, r$  - Coeficiente de correlação percentual.
- $R_T$  - Raio terrestre.
- $S_q$  - Variação magnética de períodos calmos governada pelo Sol.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - O CAMPO GEOMAGNÉTICO

Há vários séculos os homens conheceram a existência do magnetismo terrestre e com o uso de bússolas a possibilidade de navegar por mares desconhecidos.

Já nos começos do século XV era sabido na Europa que os desvios da agulha da bússola em relação ao norte geográfico não eram imprecisões do aparelho mas sim consequência da declinação magnética cujos valores eram anotados nos mapas. Já o primeiro documento descrevendo a inclinação da agulha em relação ao plano horizontal (inclinação) data de 1544.

As variações espaciais da declinação e da inclinação magnética em cada ponto do globo terrestre, revelam a existência de um campo magnético terrestre. Convencionou-se então uma notação para as componentes do campo magnético, que tomam por referência três eixos: o norte geográfico, o leste e a vertical para baixo (Figura 1.1).

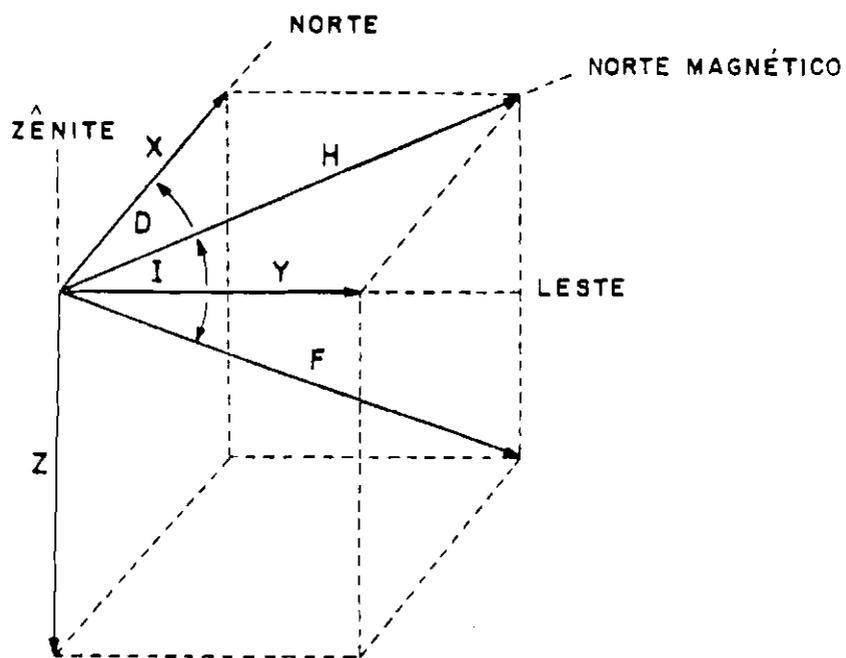


Fig. 1.1 - Componentes do vetor do campo geomagnético

- F é o campo total, H é a componente horizontal, D é a declinação, e I é a inclinação.

Os campo magnético que medimos na superfície da Terra é a soma de vários campos, cada qual com origem e variações temporais diversas. A principal contribuição provém do interior da Terra, do centro, onde circulam metais líquidos, do manto sólido e da crosta terrestre. Também contribuem, porém com menor intensidade, as correntes formadas no plasma que, acima da atmosfera, circunda a Terra.

### 1.2 - VARIAÇÕES SECULARES E TRANSITÓRIAS

Na Tabela 1.1 mostramos uma lista dos campos constituintes do campo total medido na superfície. As diferentes variações temporais de cada um podem ser classificadas em dois tipos: seculares e transitórias. As primeiras são de longa duração, milhares de anos, enquanto que as outras são rápidas, dias, horas.

Em 1634, Henry Gellibrand, foi o primeiro a descobrir a variação temporal secular da declinação magnética. As observações em Londres através das quais Gellibrand obteve suas conclusões são mostradas na Tabela 1.2.

**TABELA 1.1 - CARACTERÍSTICAS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO**

Campo constituinte	Localização da fonte	Intensidade (máxima)	Variação temporal	Medido por	Uso
Campo principal	Núcleo externo	50.000 nT (70.000 nT)	Secular, 1000 anos reversões, 10 <sup>6</sup> anos	Aviões, navios, satélites	Controla todos os outros campos Usado em navegação
Campo local	Crosta	Em média 100 nT (10 <sup>3</sup> nT)	nenhuma	Pesquisas locais	Usado para estudos em geofísica
Tempestade magnética	Magnetosfera	150 nT (500 nT)	4 a 10 horas. Recuperação de 2 a 3 dias	Magnetogramas	Monitora a atividade solar
Subtempestade magnética	Ionosfera e magnetosfera	200 nT (2000 nT)	Períodos de 1 a 3 horas	Magnetogramas	Monitora a atividade solar
Variação diurna	Ionosfera	50 nT (200 nT no equador)	Períodos de 24, 12, 8 horas	Magnetogramas	Indica as marés do vento ionosférico
Pulsações	Magnetosfera	Alguns nT	Quase-periódico 1 a 300 s	Magnetogramas de indução	Indica ressonâncias na magnetosfera
Campos induzidos	Crosta, manto superior e oceanos	Aproximadamente a metade dos 4 campos acima	A mesma que a dos 4 campos acima	Magnetogramas	Indica a distribuição de condutividade na crosta e no manto

FONTE: Modificada de Parkinson (1983), p. 6.

TABELA 1.2 - OBSERVAÇÕES DA DECLINAÇÃO MAGNÉTICA  
(LONDRES)

Data	Observador	Declinação
16 de outubro de 1580	William Borough	11,3 °E
13 de junho de 1622	Edmund Gunter	6,0 °E
16 de junho de 1634	Henry Gellibrand	4,1 °E

FONTE: Merril (1983), p. 6.

Na figura 1.2 observamos um gráfico da variação secular do campo geomagnético.

Em 1722 observações cuidadosas da agulha de uma bússola feitas através de um microscópio, levaram Graham, em Londres, a descobrir as variações transitórias. Estas são muito mais rápidas que as seculares e mais tarde foram atribuídas a perturbações externas à Terra, tema de nosso interesse neste trabalho (Merril, 1983). As variações transitórias podem ser regulares ou irregulares. As regulares aparecem diariamente e estão ligadas a sistemas de correntes ionosféricas; são as variações de tempo calmo. As irregulares são devidas à injeção de energia na magnetosfera e à intensificação de correntes magnetosféricas gerando fortes perturbações no campo geomagnético.

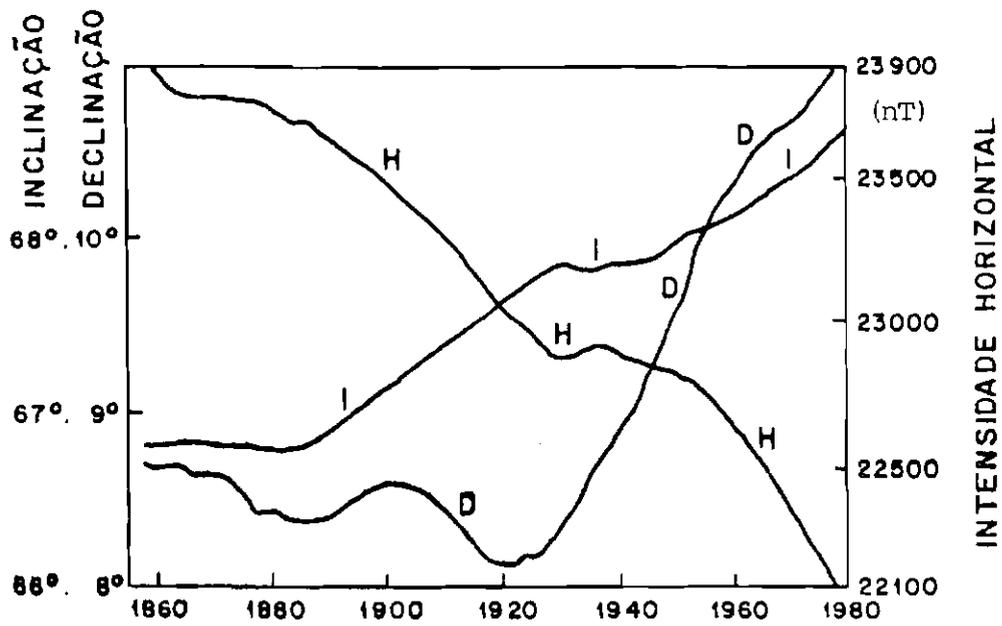


Fig. 1.2 - Variação secular nos observatórios de Melbourne e Toolangi.

FONTE: Parkinson (1983), p. 90.

Estas perturbações causam fortes influências nas telecomunicações, na dinâmica de satélites, em redes de transmissão de energia, sendo portanto muito estudadas.

### 1.3 - ESTUDO DA ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA ATRAVÉS DE ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

O objetivo deste trabalho é estudar as perturbações magnéticas através dos índices geomagnéticos que as monitoram. Realizou-se um estudo integrado dos índices para baixas (Dst), médias (ap) e altas (AE) latitudes através de médias, correlações e gráficos. Entre esses métodos está a realização pioneira de uma correlação múltipla entre os índices AE, ap e Dst que permite a estimativa de algum destes índices, tendo-se em mãos os outros dois.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica da atividade geomagnética e das correntes elétricas na magnetosfera, da atividade solar e das tempestades e subtempestades geomagnéticas.

No Capítulo 3 é feita uma descrição dos índices geomagnéticos ap, AE e Dst, suas vantagens e desvantagens e o uso dos mesmos em tratamentos estatísticos.

No Capítulo 4 apresenta-se a variação temporal destes mesmos índices para os anos de estudo 1974 (perto do mínimo solar) e 1979 (máximo solar).

No Capítulo 5 são apresentadas relações entre os índices para diferentes escalas temporais.

No Capítulo 6 apresenta-se a relação entre os três índices conjuntamente.

No Capítulo 7 são desenvolvidas considerações acerca de outros estudos envolvendo relações entre índices. Finalmente, no Capítulo 8 são apresentadas as principais conclusões do trabalho.

## CAPÍTULO 2

### A ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA

#### 2.1 - O VENTO SOLAR E A MAGNETOSFERA

A Terra está imersa na atmosfera solar em expansão, que supersonicamente transporta consigo íons  $H^+$ ,  $He^{2+}$ , e alguns elementos mais pesados. Este vento solar interage com o campo magnético terrestre configurando uma região chamada magnetosfera na forma encontrada na Figura 2.1.

O campo magnético terrestre se estende, na direção do sol, até uma distância média de 10 raios terrestres ( $10 R_T$ ), onde termina abruptamente em uma fina camada chamada magnetopausa. Esta constitui portanto o limite externo da magnetosfera, além da qual a velocidade do vento solar é supersônica. Na magnetopausa o vento solar será então comprimido, defletido e aquecido o que diminuirá a velocidade do vento solar dando origem a uma onda de choque a aproximadamente  $14 R_T$ . A região entre a onda de choque e a magnetopausa é uma região de turbulência chamada bainha magnetosférica.

Pelo congelamento do plasma às linhas de campo, o vento solar arrasta consigo as linhas do campo geomagnético com origem em altas latitudes. Essas linhas formam então, no lado noturno, uma longa cauda.

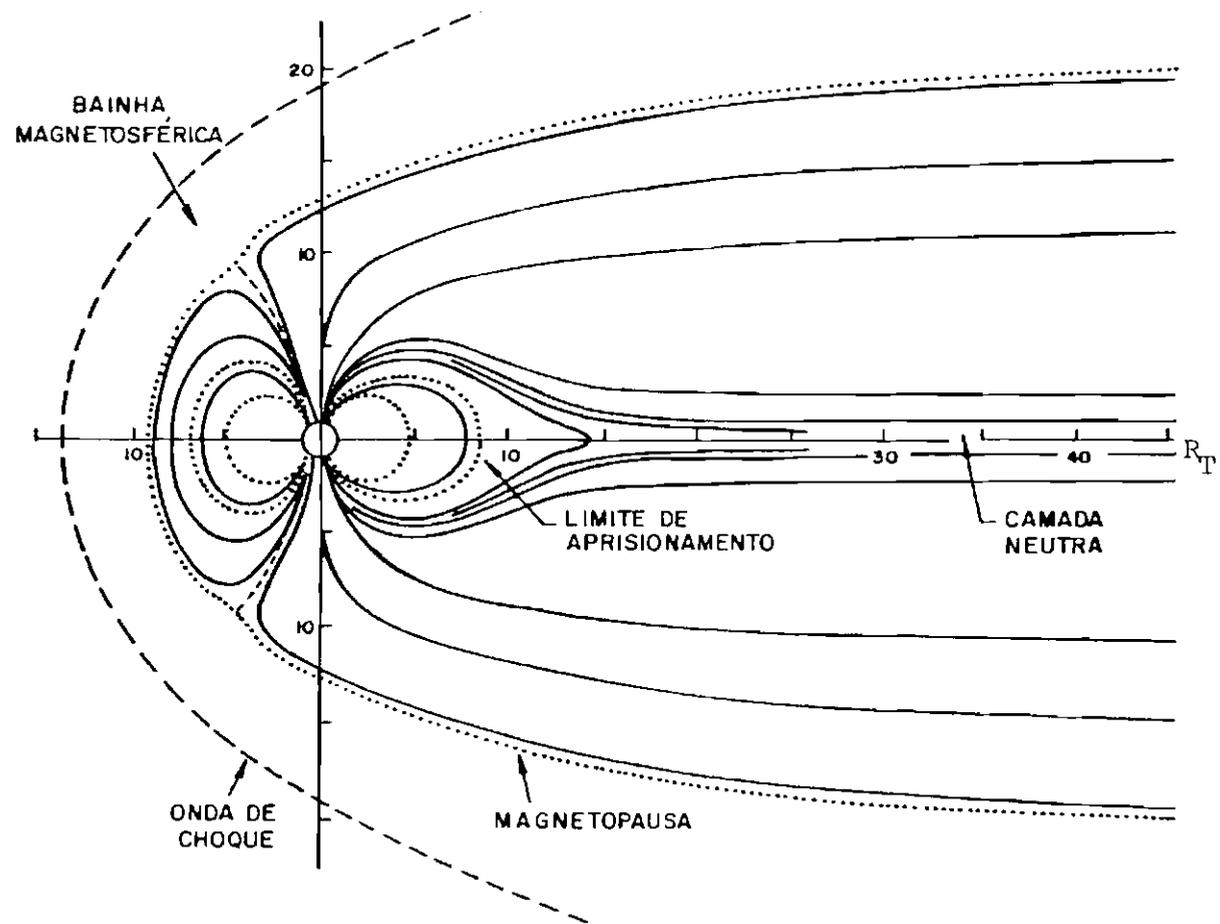


Fig. 2.1 - Configuração geral da magnetosfera, mostrada em corte.  
 FONTE: Modificada de Jursa (1985), p. 4-6.

As linhas provenientes do polo norte e do polo sul se estendem por dezenas de raios terrestres sem se fecharem, o que dá origem a uma camada neutra no plano equatorial através da qual temos uma abrupta reversão do campo magnético.

#### 2.1.1 - CORRENTES MAGNETOSFÉRICAS

##### 2.1.1.1 - A CORRENTE NA MAGNETOPAUSA E NA CAUDA

Na magnetosfera, regiões de descontinuidade no campo magnético implicam na existência de correntes na superfície das mesmas. Assim, teremos na parte frontal da magnetopausa uma lâmina de corrente no sentido amanhecer - entardecer, chamada de corrente de Chapman-Ferraro e na camada neutra, um outro fluxo de corrente, também no sentido amanhecer - entardecer. Estas correntes influenciam pouco o campo geomagnético na superfície terrestre (Jursa, 1985) (Figura 2.2).

##### 2.1.1.2 - A CORRENTE DE ANEL

A passagem do vento solar pela magnetosfera gera um campo elétrico de convecção que com o campo geomagnético causam uma deriva das partículas que populam a cauda da magnetosfera em direção à Terra. Aprisionadas pelas linhas fechadas do campo sofrerão então outras derivas. Dentre as mais importantes estão a deriva de curvatura e de gradiente do campo magnético que transportarão os íons e os elétrons em direções opostas, originando uma corrente no sentido oposto ao sentido de rotação da Terra. Esta

corrente é chamada de corrente de anel e tem a forma aproximada de um pneu situado no plano equatorial a uma distância de aproximadamente  $5 R_T$  acima do equador. Ela é a principal responsável pelas variações transitórias irregulares em baixas latitudes, (Figura 2.3).

### 2.1.2 - AS CORRENTES IONOSFÉRICAS

Na ionosfera, em regiões de alta latitude, com a precipitação de elétrons provenientes de regiões mais externas temos fenômenos aurorais normalmente acompanhados de intensos campos elétricos que movem as cargas de maneira a produzir correntes ionosféricas. Essas correntes são chamadas de eletrojatos aurorais. As mais intensas tem o sentido amanhecer - entardecer e são responsáveis pelas variações transitórias irregulares em altas latitudes. Elas podem ser tão intensas que o campo magnético na superfície da Terra pode sofrer variações de 1000 nT ou mais, ainda que variações típicas estão na ordem de 200 a 500 nT (Merril, 1983) (Figura 2.4).

Associadas aos eletrojatos aurorais temos ainda as correntes alinhadas ao campo geomagnético, que fluem através da magnetosfera e se fecham na ionosfera auroral. Elas interligam a corrente de anel aos eletrojatos aurorais e perturbam o campo geomagnético apenas localmente (Figura 2.4).

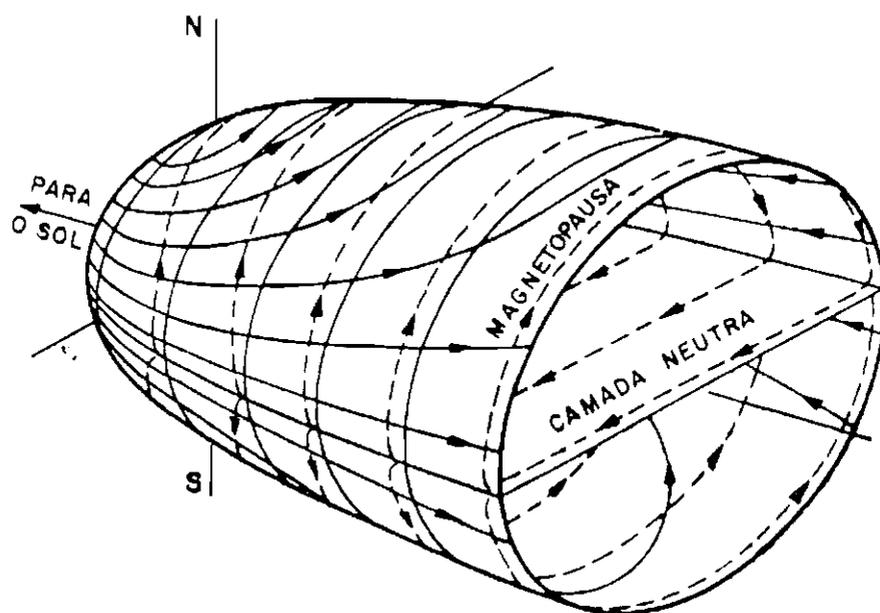


Fig. 2.2 - Correntes na magnetopausa e na camada neutra.  
 FONTE: Jursa (1985), p. 4-7.

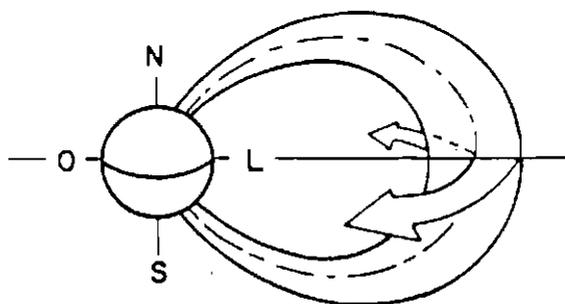


Fig. 2.3 - Corrente de anel.  
 FONTE: Papagiannis (1983),  
 p. 167.

Também na ionosfera a maré lunar e a radiação solar são os principais responsáveis por movimentos de ar em larga escala na ionosfera. Na presença do campo magnético terrestre, induzem um campo elétrico perpendicular à velocidade do ar e ao campo magnético, gerando correntes nas camadas ionosféricas (Figura 2.4). Essas são responsáveis por variações magnéticas típicas de períodos magneticamente calmos, ou seja, variações transitórias regulares, e são de dois tipos: a primeira, governada pela ação do sol (S), em tempo calmo (q), é chamada de Sq e a outra menos intensa, governada pela Lua é chamada de L.

Na região do equador magnético as correntes Sq são especialmente intensificadas formando o eletrojato equatorial. Este se encontra a uma altitude de aproximadamente 100 km e distribui-se numa faixa de 600 km de largura centrada no equador geomagnético do lado do Sol. O eletrojato equatorial é responsável por variações diurnas do campo geomagnético horizontal numa faixa de aproximadamente  $5^{\circ}$  de latitude ao redor do equador magnético (Figura 2.4).

### 2.1.3 - VARIAÇÕES NO VENTO SOLAR E AS CONSEQUENTES PERTURBAÇÕES NO CAMPO GEOMAGNÉTICO

Perturbações de origem solar ou no próprio meio interplanetário acarretam variações no vento solar e no campo magnético a ele associado. Essas por sua vez ao atingirem a magnetosfera gerarão perturbações nas correntes magnetosféricas e ionosféricas, alterando o campo geomagnético.

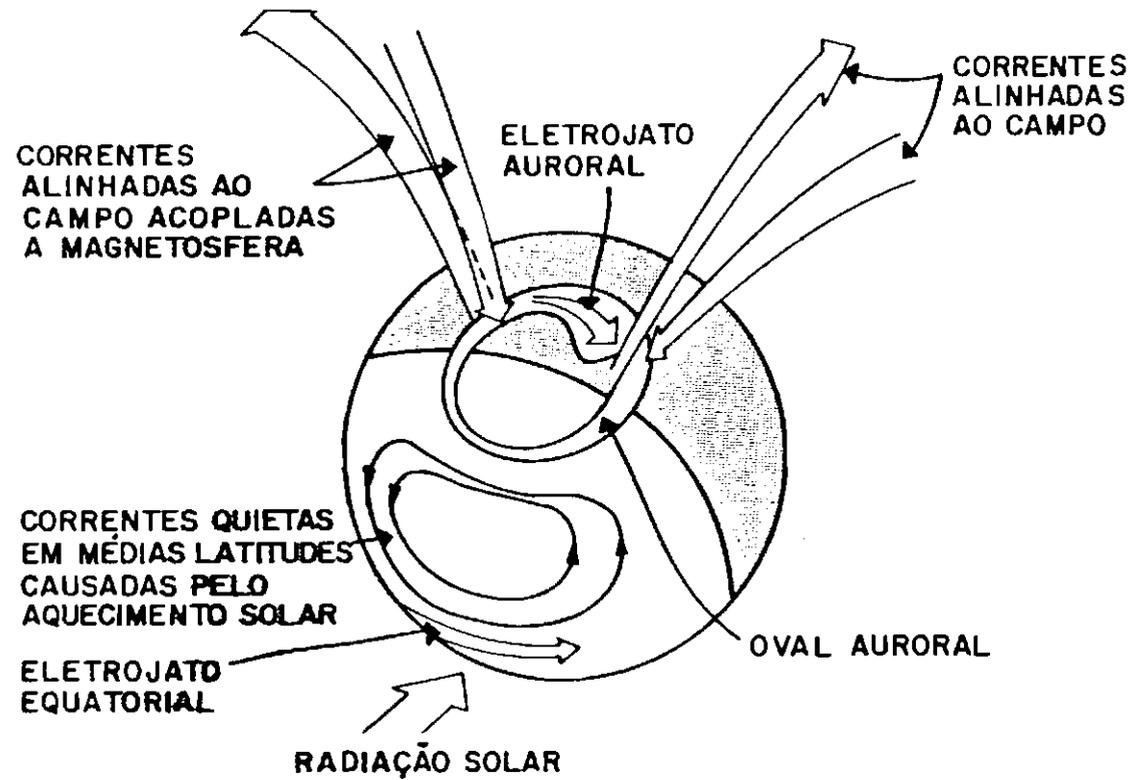


Fig. 2.4 - Correntes ionosféricas e de acoplamento com a magnetosfera.  
 FONTE: NAS (1978), p. 39.

Portanto, para se entender melhor as variações transitórias do campo geomagnético, faz-se necessária uma breve discussão da atividade solar e suas consequências.

O campo magnético solar tem na fotosfera uma intensidade entre  $10^{-4}$  e 1 T. Associado a esse campo apresentam-se outros bem mais intensos devido a estruturas finas como as manchas solares, as explosões solares, os buracos coronais, etc.. Na região equatorial o campo magnético interplanetário "entra" no sol normalmente em dois setores e "emerge" do sol em dois outros setores, que com a rotação solar apresenta-se no plano da eclíptica com a forma espiralada (Figura 2.5).

Com o congelamento das linhas de campo ao plasma, o campo magnético sol é arrastado com o vento solar ao longo do sistema solar. Temos então o campo magnético do meio interplanetário, cuja intensidade próximo à Terra é da ordem de 5 nT. Perturbações no campo magnético interplanetário podem ser causadas por fenômenos solares como buracos coronais, explosões solares e ejeções de massa, e assim propiciar alterações no campo magnético terrestre.

As explosões solares e as ejeções de massa coronal são formas de atividade solar de pequena duração mas cujas frequências seguem o ciclo de atividade solar. Este por sua vez é definido pelo número de manchas solares observadas na superfície solar. O ciclo solar apresenta em média uma duração de 11 anos.

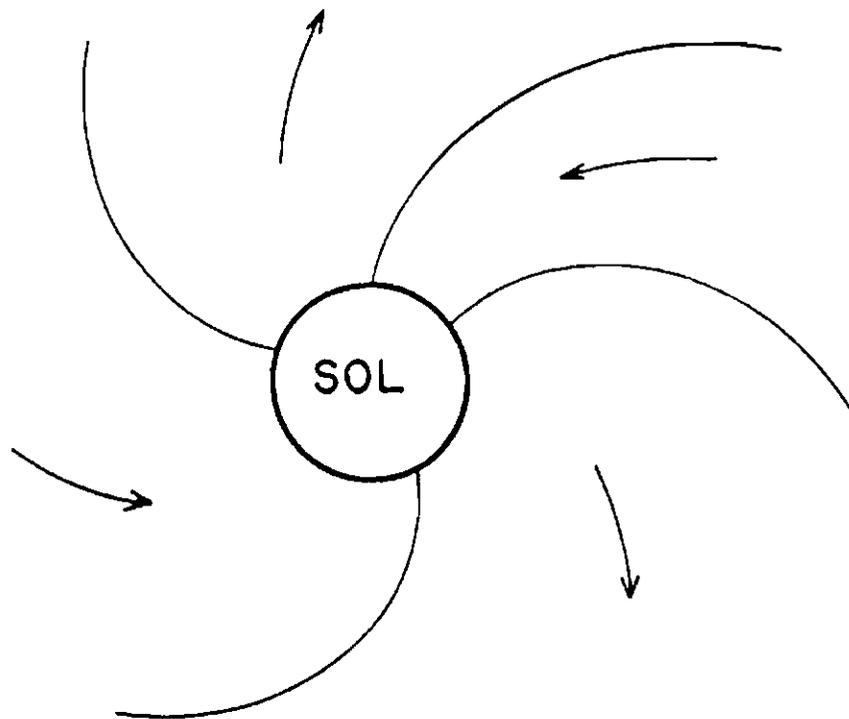


Fig. 2.5 - Setores do campo magnético solar no plano da eclíptica.

FONTE: Merril (1983), p. 334.

Embora a relação entre a atividade solar e a atividade geomagnética não seja simples, podemos observar que a atividade geomagnética se intensifica com a intensificação da atividade solar (Sugiura, 1980). Nos períodos de máxima atividade solar, é frequente a ocorrência de explosões solares e de ejeção de massa coronal que poderão por sua vez produzir perturbações intensas no campo geomagnético. Já nos períodos de mínima atividade solar, predominam os buracos coronais, regiões do Sol onde o campo magnético solar é predominantemente radial permitindo assim a propagação direta do plasma solar.

O tempo de vida destes buracos coronais tem tipicamente a duração de várias rotações solares (aproximadamente 27 dias). Esta duração é portanto bem maior que as das explosões solares (minutos) e das ejeções de massa coronal e desaparecimento de filamentos (horas).

Podemos observar também outra periodicidade de interesse na atividade geomagnética: a periodicidade semianual ou sazonal.

Uma entre as possíveis explicações para este fenômeno foi dada por Russell e Mc Pherron, (1973). O eixo de rotação da Terra, que está na direção média do eixo magnético, perfaz um ângulo de  $23,5^{\circ}$  com a direção Sol-Terra. Relativamente ao eixo magnético terrestre, o campo magnético interplanetário apresentará suas maiores componentes verticais nos meses de Outubro e Abril. Com o aumento das componentes verticais do campo interplanetário, temos uma maior

ocorrência de componentes na direção sul, contrárias ao campo geomagnético no lado diurno na magnetopausa. Com isso aumentam-se as chances de haver reconexão, fenômeno pelo qual as linhas de campo geomagnético mudam sua configuração de "fechada" para "aberta" sendo cortadas e reconectadas com as linhas do campo interplanetário. Com a abertura da magnetosfera, é maior a penetração de partículas e energia, e portanto, maior a atividade geomagnética.

## 2.2 - TEMPESTADES E SUBTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

As variações do campo magnético terrestre são registradas a muito tempo em instrumentos de superfície chamados magnetômetros. Em observatórios magnéticos localizados em diversas regiões do planeta, as três componentes H, D, e Z do campo são continuamente registradas em função do tempo. Estes registros são chamados de magnetogramas (Figura 2.6). Com o registro destas componentes do campo geomagnético pode-se observar as variações irregulares ocorrendo em diferentes latitudes do globo.

### 2.2.1 - AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Perturbações típicas na componente horizontal em baixas e médias latitudes com duração de horas e até dias foram chamadas de tempestades magnéticas. Estas se caracterizam por uma forte diminuição na intensidade da componente H. Na Figura 2.7 vemos uma tempestade magnética típica e as suas fases.

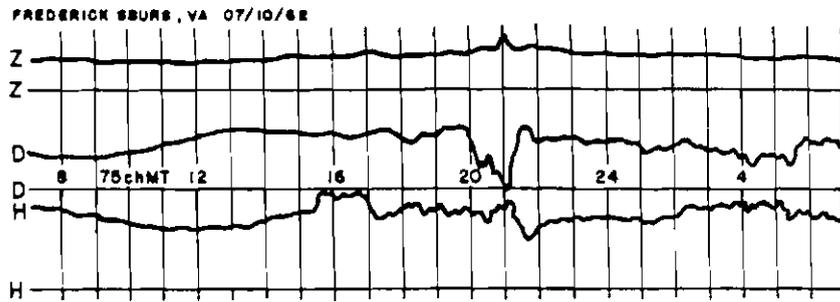


Fig. 2.6 - Exemplo de um magnetograma.

FONTE: Alldredge (1964), p. 49.

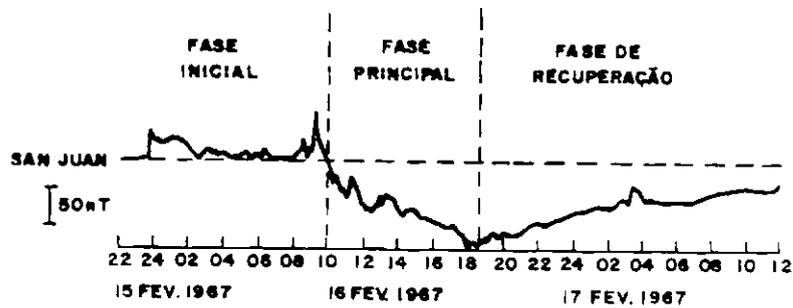


Fig. 2.7 - Exemplo da variação da componente H do campo geomagnético durante uma tempestade magnética.

FONTE: Modificada de Nishida (1978), p. 150.

A fase inicial se caracteriza por valores positivos de  $\Delta H$  que podem estar precedidos ou não por uma rápida intensificação do mesmo, fenômeno conhecido pelo nome de "começo súbito". Este é consequência de uma rápida compressão das linhas do campo geomagnético por ondas de choque no vento solar. A fase inicial nem sempre é observada em uma tempestade.

A fase principal corresponde ao citado decréscimo da componente H do campo geomagnético, devido à intensificação da corrente de anel que produz uma componente sul na superfície da Terra (Papagiannis, 1978) (Figura 2.8). Na fase de recuperação o campo volta ao seu estado não perturbado. A corrente de anel é dissipada por processos de troca de carga e perda de carga na atmosfera.

Vários processos tem sido identificados como responsáveis pela ocorrência de tempestades magnéticas: choques, ondas Alfvén etc.. No entanto, um fator sempre observado é a existência da componente sul do campo magnético interplanetário ( $-B_z$ ), que possibilita a abertura do campo geomagnético através da reconexão magnética entre os dois, ocorrendo a penetração de partículas na magnetosfera. Estas dirigem-se em sua maioria à cauda onde novas reconexões magnéticas propiciam uma aceleração das mesmas em direção à Terra. Parte delas se precipitarão nas regiões aurorais intensificando os eletrojetos aurorais e parte se incorporarão à corrente de anel. As correntes aurorais e a corrente de anel serão então os principais processos de dissipação de energia das partícula penetrantes (figura 2.9).

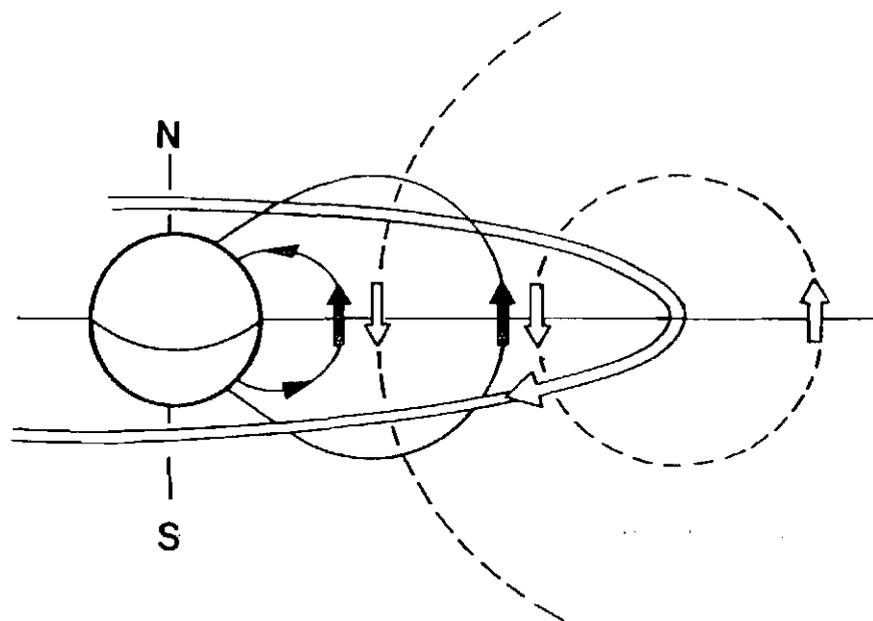


Fig. 2.8 - Corrente de anel e o campo magnético produzido por ela.  
FONTE: Papagiannis (1983), p. 167.

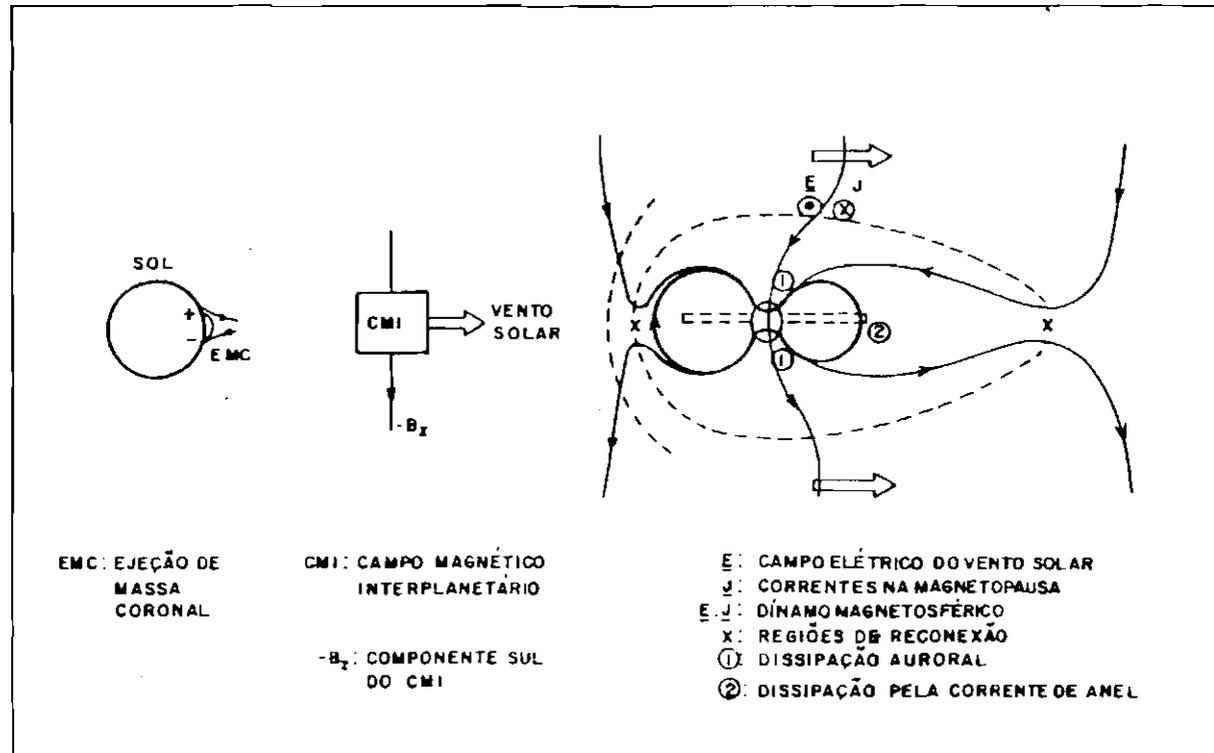


Fig. 2.9 - Esquema do acoplamento sol-magnetosfera.  
 FONTE: Gonzalez et al. (1992), p. 12.

### 2.2.2 - AS SUBTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Nas tempestades, observam-se a redução nos valores de H ao redor da Terra nas latitudes baixas e médias. No entanto, é possível observar-se também perturbações locais, de duração menor e mais intensas, em altas latitudes. Estas são chamadas de subtempestades e são causadas pela intensificação dos eletrojatos aurorais e das correntes alinhadas ao campo geomagnético.

### 2.2.3 - FENÔMENOS ASSOCIADOS À OCORRÊNCIA DAS TEMPESTADES E SUBTEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

O estudo das tempestades e subtempestades, desde as causas até as suas consequências tem sido de grande importância já que a intensificação das correntes elétricas e o aumento na densidade de partículas populando a magnetosfera, podem produzir anomalias e problemas (Hirman e Heckman, 1988) tais como:

- 1) aumento no arrasto de satélites; desvio em orbitas;
- 2) alterações nos sistemas eletrônicos dos satélites;
- 3) interferências nas comunicações via satélite;
- 4) bloqueios nas comunicações e transmissões de rádio;

- 5) tensões elétricas anômalas induzidas em sistemas de potência, em redes elétricas e dutos metálicos longos.

Para um melhor estudo destes fenômenos e monitoração dos mesmos são utilizados índices geomagnéticos que possam acompanhar a evolução dos mesmos.

### CAPÍTULO 3

#### OS ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

##### 3.1 - INTRODUÇÃO

"Basicamente, a finalidade de um índice está em fornecer informações de maneira sumária e contínua a respeito de fenômenos mais ou menos complexos que variam com o tempo. Será formado a partir de um conjunto de valores discretos que caracterizam o fenômeno em questão para um intervalo de tempo constante.

Um dado índice pode ser utilizado para duas finalidades: para estudar o próprio fenômeno, ou como referência para o estudo de um fenômeno associado. E, ainda, se pudermos estar certos de que a série de índices é homogênea no tempo e representa significativamente um fenômeno, esta se torna uma ferramenta para estudos estatísticos de variação temporal do fenômeno ou da sua relação com outro fenômeno" (Mayaud, 1980, p. 2).

Os índices geomagnéticos fornecem informações sobre o nível de atividade geomagnética e são de grande importância nos estudos das relações Sol-Terra não somente nas áreas de geomagnetismo e física magnetosférica mas também em climatologia, telecomunicações, etc.

Abordamos neste trabalho os três índices mais usados na literatura: Kp e a sua forma linear ap, Dst e AE. Enquanto que os dois últimos monitoram efeitos isolados, a corrente de anel e o eletrojato auroral respectivamente, o primeiro por outro lado estima a entrada global de energia na magnetosfera e é por isso é chamado de índice planetário (Menvielle e Berthelier, 1991).

### 3.2 - O ÍNDICE ap

A origem do índice ap remonta à década de 30, quando Bartels e colaboradores introduziram o índice K.

Procurando monitorar as variações transientes irregulares escolheu-se como um adequado intervalo de amostragem o período de 3 horas. Assim, para cada intervalo de 3 horas as diferenças entre o maior e o menor valor em cada uma das componentes H, D e Z são registradas. Toma-se então a maior das três como base para a elaboração do índice K, eliminando-se antes as variações regulares Sq e L.

A escala usada para gerar K a partir da máxima perturbação no intervalo de 3 horas foi baseada nos dados do observatório de Niemegk ( $52^{\circ}\text{N}$ ,  $12^{\circ}\text{E}$ ) como mostramos na Tabela 3.1. Para cada observatório uma apropriada tabela de conversão é usada levando em consideração a latitude da mesma (Menvielle e Berthelier, 1991).

TABELA 3.1 - LIMITES DAS CLASSES DOS ÍNDICES K NO OBSERVATÓRIO DE NIEMEGK

FAIXA (nT)	VALORES
0-5	0
5-10	1
10-20	2
20-40	3
40-70	4
70-120	5
120-200	6
200-330	7
330-500	8
500+	9

FONTE: Menvielle e Berthelien (1991), p. 421.

O uso do índice K em estudos estatísticos deve levar em conta a pronunciada variação diurna. Esta variação diurna apresenta uma variação sazonal que também deve ser considerada.

Desenvolveu-se então um índice padronizado,  $K_s$ , livre das variações locais ou sazonais, a partir do qual  $K_p$  e  $a_p$  são calculados.

Tomando-se como referência uma distribuição de frequência dos índices K para as estações verão, inverno (hemisfério norte), e equinócios, 9328 valores de K escolhidos entre os anos 1943 e 1948 são usados para a confecção de tabelas de conversão  $K \rightarrow K_s$  para cada observatório. Valores de  $K_s$  são distribuídos em 28 níveis entre  $0_0$ ,  $0_+$ ,  $1_-$ ,  $1_0$ , ... até  $9_0$ , ou, se expressados em termos de  $3K_s$ , entre 0, 1, 2, ... até 27. Para cada intervalo "tri-horário"  $3K_p$  é definido como uma média aritmética de  $3K_s$ , gerando então o índice  $K_p$ . Esta média utiliza 11 valores de  $3K_s$ , provenientes de 13 estações, já que as estações Toolangi e Amberley e as estações Rude-Skov e Lovö estão associadas fornecendo um único valor cada par. As estações são mostradas na Figura 3.1, e as suas respectivas coordenadas geomagnéticas na Tabela 3.2.

Os valores de  $a_p$  são então obtidos pela conversão do valor de  $K_p$ , através de uma tabela de conversão (Tabela 3.3)(Figura 3.2), que transforma a escala quase-logarítmica de  $K_p$  em uma escala linear para  $a_p$ , possibilitando assim manipulações aritméticas com este.

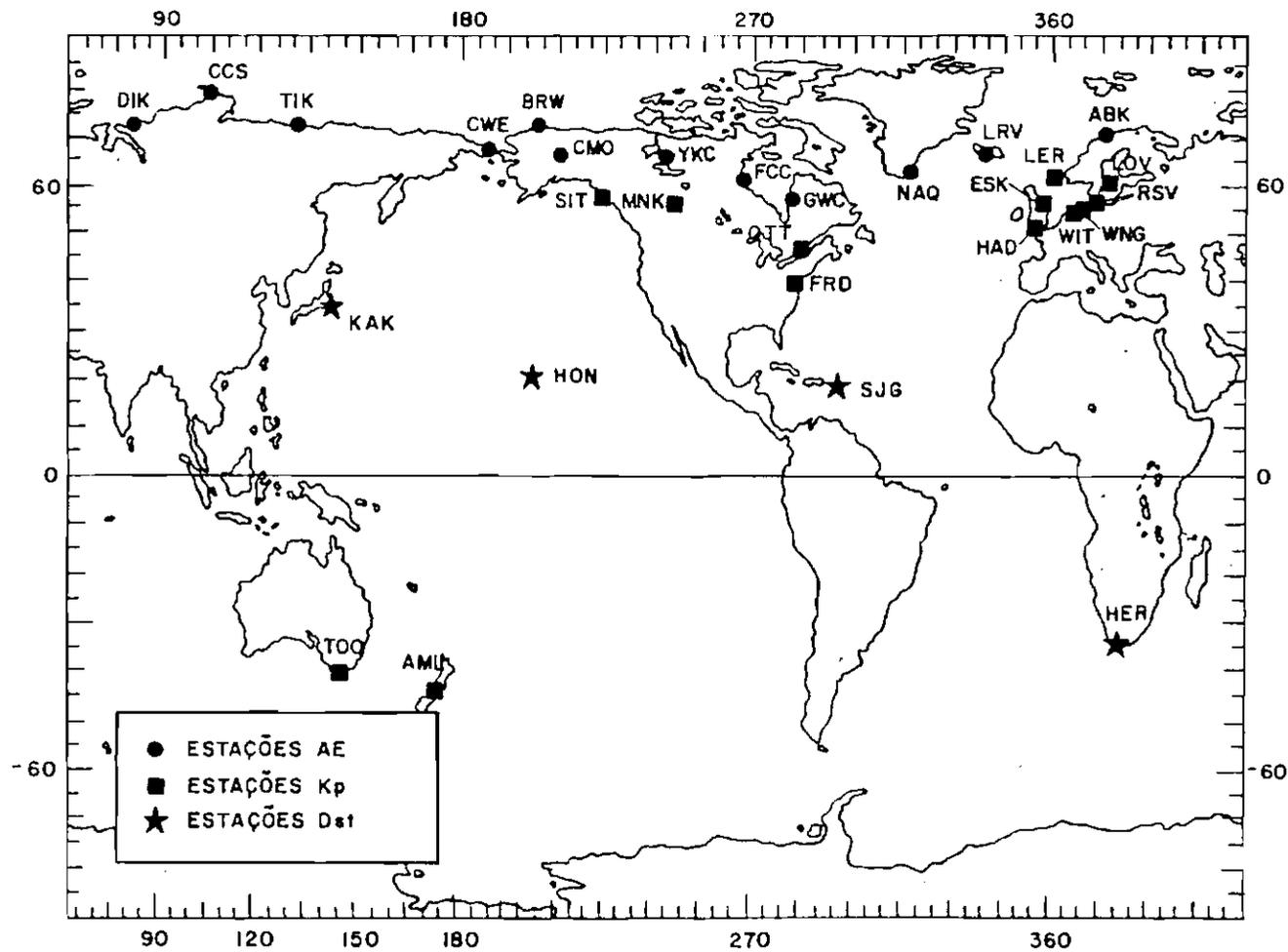


Fig. 3.1 - Estações geomagnéticas.

FONTE: Modificada de Allen e Feynman (1979), p. 387.

TABELA 3.2 - COORDENADAS GEOMAGNÉTICAS  
DAS ESTAÇÕES (EM GRAUS)

Índice AE	LATITUDE	LONGITUDE
Leirvogur	66,8	69,5
Narssarssuaq	68,7	44,2
Great Whale River	68	353,8
Fort Churchill	70,3	326
Yellowknife	69,9	294,4
College	64,8	259,6
Barrow	69,6	246,6
Cape Wellen	62,5	242,6
Tixie Bay	65,8	195,5
Cape Chelyuskin	71,6	174,2
Dixon Island	68,3	154,7
Abisko	65,4	103,6
Índice ap	LATITUDE	LONGITUDE
Lerwick	59,4	83
Eskdalemuir	54,6	79
Hartland	50,2	76,3
Ottawa	58,5	356,2
Fredericksburg	51,5	352,8
Meanook	62,6	300,8
Sitka	59,9	275,9
Amberley	-50,1	254,1
Toolangi	-48,5	220,3
Lovö	56,5	97,1
Rude-Skov	53,3	91,4
Wingst	51,4	87,8
Witteveen	50,6	85,7
Índice Dst	LATITUDE	LONGITUDE
San Juan	29,6	3,1
Honolulu	21,1	266,5
Kakioka	26	206
Hermanus	-33,3	80,5

FONTE: Mayaud (1980), p. 137.

TABELA 3.3 - CONVERSÃO DE Kp PARA ap

Kp	ap (nT)	Kp	ap(nT)
0o	0	5-	39
0+	2	5o	48
1-	3	5+	56
1o	4	6-	67
1+	5	6o	80
2-	6	6+	94
2o	7	7-	111
2+	9	7o	132
3-	12	7+	154
3o	15	8-	179
3+	18	8o	207
4-	22	8+	236
4o	27	9-	300
4+	32	9o	400

FONTE: Menvielle e Berthelier (1991), p. 421.

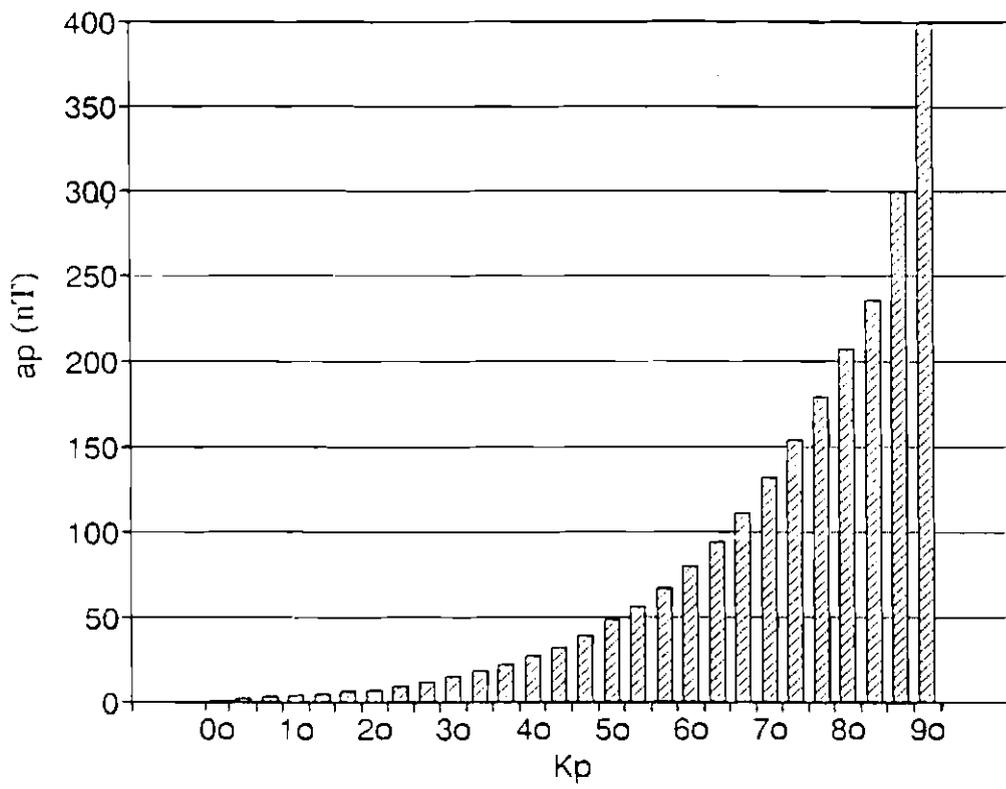


Fig. 3.2 - Relação de  $a_p$  com  $K_p$ .

Os valores de  $a_p$  representam a metade da maior amplitude média observada na componente H, D ou Z mais perturbada. Portanto para um  $a_p = 18$  nT o valor da perturbação média é de 36 nT (Lincoln, 1964; Menvielle e Berthelier, 1991; Rostoker, 1972).

### 3.3 - O ÍNDICE AE

Definido por Davis e Sugiura em 1966, o índice AE e os seus índices associados (AU, AL e A0) monitoram a atividade magnética da região auroral. Doze observatórios localizados na região sub-auroral e distribuídos de maneira uniforme ao redor do globo são usados atualmente para registrar as variações da componente H (Figura 3.1).

Desde 1975 estas variações são registradas com a resolução suficiente para obtermos o índice AE a cada minuto. Este é obtido através da superposição em mesma escala de amplitude e tempo dos vários magnetogramas obtidos nos diferentes observatórios. O nível de tempo calmo deve ser determinado para cada um deles e subtraído dos valores medidos, deixando assim, somente o valor da perturbação. Na superposição a amplitude da envoltória superior define o valor de AU e a amplitude da envoltória inferior define o valor de AL. A diferença entre os dois será AE, ou seja,  $AE = AU - AL$  (Figura 3.3) (Krohel, 1989; Mayaud, 1980; Rostoker, 1972).

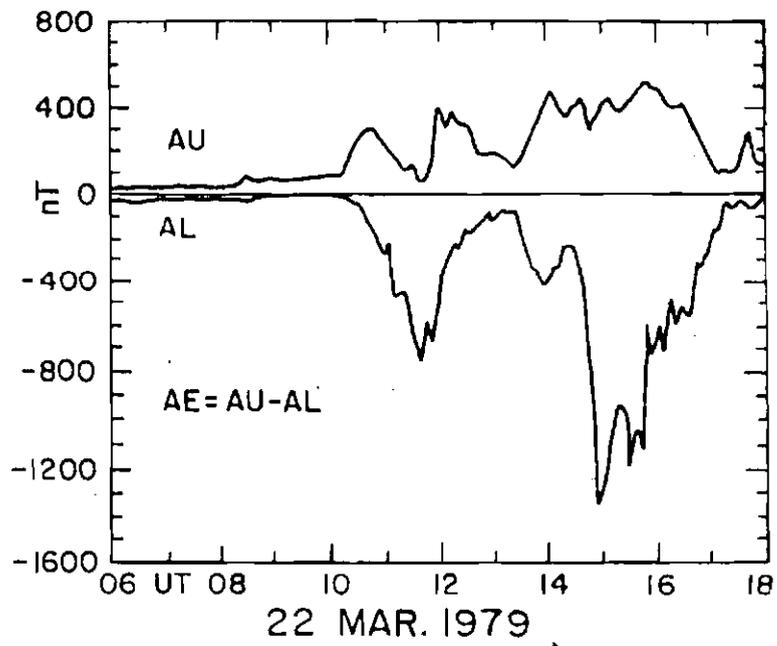


Fig. 3.3 - O índice AE, AL e AU.

FONTE: Krohel (1989), p. 321.

De certa forma AU e AL são índices locais, já que correspondem à amplitude das perturbações da componente H em dois observatórios. No entanto, estes valores extremos locais são determinados por comparação com os dados de todos os observatórios ao redor do globo e portanto AE deve ser considerado um índice global para a zona auroral. As variações mostram padrões de comportamento que definem características globais e estatísticas das correntes associadas com as subtempestades (Allen e Feynman, 1979).

#### 3.4 - O ÍNDICE Dst

Entre todos os índices, o índice Dst é provavelmente aquele que com melhor precisão monitora e registra o fenômeno para o qual foi designado. Isto se deve à grande simplicidade das variações magnéticas causadas pela corrente de anel: elas são axialmente simétricas em seu regime estacionário e não dependem da longitude ou da hora local.

Supondo que outras variações transitórias regulares ou irregulares são eliminadas na derivação, obtém-se um índice que já não é uma informação sumarizada mas um registro puro do fenômeno a qualquer taxa de amostragem. No entanto, várias dificuldades são encontradas na eliminação das variações transitórias e principalmente das variações seculares que, ao longo dos anos, varia de observatório para observatório.

Como o campo produzido pela corrente de anel equatorial é quase paralela ao eixo do dipolo, seu efeito é predominante na componente H e mais forte em

baixas latitudes. Nessa região, é menor a amplitude das variações irregulares originadas em latitude aurorais, porém é grande a influência das variações regulares Sq e do eletrojato equatorial, que devem ser eliminadas no cálculo de Dst (Mayaud, 1980).

Visando minimizar as influências dos eletrojatos aurorais e equatoriais, uma rede de observatórios (quatro, atualmente) localizada em baixas latitudes ( $20^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  do equador geomagnético) é utilizada para a obtenção do índice Dst (Figura 3.1). O método para o cálculo do índice Dst é mostrado no Apêndice.

### 3.5 - ALGUMAS DIFICULDADES NO USO DOS ÍNDICES

A distribuição inadequada dos observatórios torna difícil a interpretação dos índices geomagnéticos já que estes foram definidos para uma distribuição uniforme dos observatórios. Assim sendo, a magnitude das perturbações ocorridas nas regiões entre os observatórios será estimada imprecisamente.

#### 3.5.1 - DIFICULDADES COM O ÍNDICE $a_p$

Como há uma grande concentração de estações na Europa ocidental e ausência de estações no setor soviético e no espaço compreendido pelo Oceano Atlântico, temos que subtempestades ocorrendo nessas regiões produzem valores pequenos de Kp. Iguamente perturbações em latitudes superiores à região compreendida pelas estações serão fracamente

detectadas. Além disso pelo fato de Kp ser "tri-horário", é impossível determinar o início de uma subtempestade com este índice.

Também o movimento do oval auroral em direção ao equador durante a ocorrência de tempestades magnéticas representa uma incerteza na interpretação do índice Kp, já que uma intensificação de Kp pode representar: a) uma intensificação real da corrente do eletrojato auroral, b) um movimento do eletrojato auroral em direção aos observatórios de Kp ou, c) a combinação de ambos os fenômenos. No entanto, este é valioso na determinação de tendências a longo prazo e na análise estatística de períodos de atividade magnetosférica (Rostoker, 1972).

### 3.5.2 - DIFICULDADES COM O ÍNDICE AE

Também apresenta problemas de distribuição longitudinal podendo não registrar subtempestades muito localizadas. Também o citado movimento do oval auroral em direção ao equador pode ser confundido com um enfraquecimento do eletrojato auroral. Este aspecto será mais estudado adiante. Ainda, a contração do oval auroral em direção às regiões polares bem acima da latitude média dos observatórios e a existência de correntes alinhadas ao campo são também fatores que prejudicam a precisão do índice AE (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972).

### 3.5.3 - DIFICULDADES COM O ÍNDICE Dst

O índice Dst por sua vez, por monitorar a corrente de anel que apresenta um comportamento global, dispensa uma distribuição maior de observatórios longitudinalmente. Encontra, todavia, dificuldades em avaliar contribuições provenientes da corrente de anel quando assimétrica e da corrente na magnetopausa que oscila com as perturbações provenientes do meio interplanetário (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972).

### 3.6 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO ESTATÍSTICO DOS ÍNDICES

Ainda que apresentem falhas, os índices são ótimos indicadores do nível mínimo de atividade geomagnética. Não são recomendados na análise de casos individuais mas sim na análise estatística de tendências globais.

Nesta classe de análise encontram-se trabalhos que analisando as médias mensais e anuais dos índices tentam entender melhor a variação da atividade geomagnética nos ciclos solares ou ainda, estabelecer níveis calmos de referência para períodos de pouca atividade geomagnética, e outros.

O pioneirismo deste trabalho está em explorar melhor e mais sistematicamente os índices, correlacionando-os dois a dois, e realizando pela primeira vez uma correlação múltipla entre os índices Dst, ap e AE para várias escalas de tempo e para duas épocas do ciclo solar. Buscou-se assim uma melhor

compreensão dos fenômenos magnetosféricos e correntes associadas, e dos índices que as monitoram.

Mais concretamente, através das correlações entre os índices, obteve-se informações de como ocorrem os processos de dissipação de energia na magnetosfera: a corrente de anel e auroral, as tempestades e subtempestades, que são os efeitos finais da interação vento solar-magnetosfera.

### 3.7 - OBTENÇÃO DOS ÍNDICES

Escolheu-se como objetos de estudo, o ano de 1979, ano de máxima atividade solar com várias (sete) tempestades intensas ( $Dst_{min.} < -100nT$ ) e o ano de 1974, ano próximo ao mínimo solar, na fase decrescente do ciclo anterior, com algumas (três) tempestades intensas e com uma peculiaridade, que é a constante e intensa atividade auroral.

Os dados foram obtidos em fitas magnéticas cedidas pelo World Data Center (Boulder, Colorado) e pelo Laboratório de Propulsão a Jato (JPL) da NASA (Pasadena, California).

Através da elaboração de programas específicos pôde-se:

- a) tornar viável a utilização dos dados através da redefinição dos registros e das áreas de dados nas fitas de modo compatível ao computador Burroughs B6800;

- b) organizar e reagrupar os dados em dias, meses e anos;
- c) realizar as médias necessárias (horária, "tri-horária", mensal e anual);
- d) realizar correlações entre dois índices (Bevington, 1969);
- e) identificar a defasagem temporal entre eles através da melhor correlação obtida para diferentes defasagens;
- f) realizar correlações múltiplas (entre três índices) (Bevington, 1969);
- g) confeccionar gráficos diversos (exemplo na Figura 3.4).

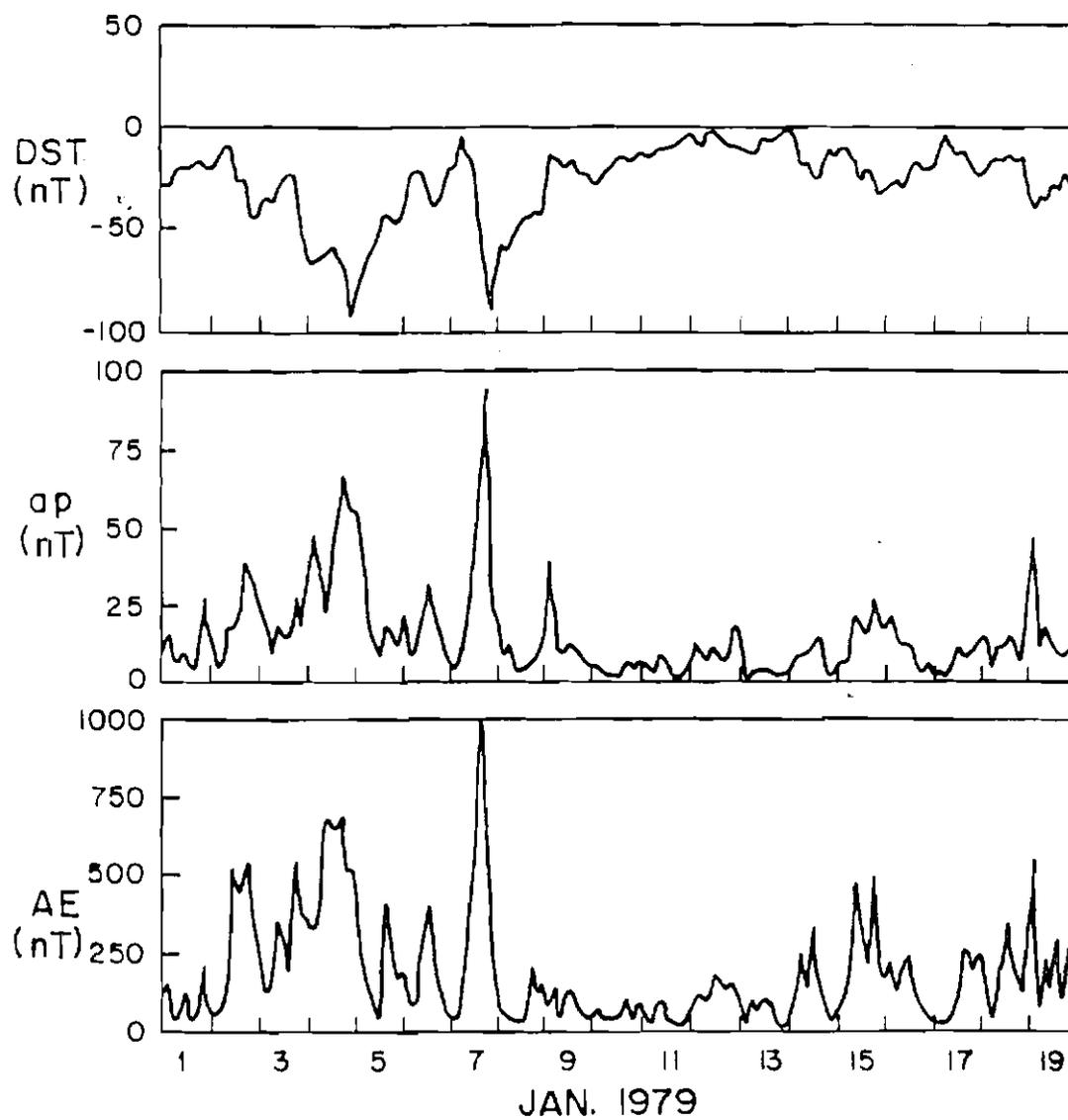


Fig. 3.4 - Os índices Dst, ap e AE.

CAPÍTULO 4VARIAÇÃO TEMPORAL DOS ÍNDICES4.1 - INTRODUÇÃO

Para estudar a variação temporal da atividade geomagnética, comparou-se as médias anuais dos índices para o ano de 1974 (próximo ao mínimo solar) e para o ano de 1979 (máximo solar). Ainda para estes anos estudou-se a existência de variações sazonais através de médias mensais.

4.2 - MÉDIAS ANUAIS

Efetuando-se as médias anuais a partir de valores horários para AE e Dst e "tri-horários" para ap obtivemos os valores apresentados na Tabela 4.1

TABELA 4.1 - MÉDIAS ANUAIS DOS ÍNDICES

ANO	<AE>(nT)	<ap>(nT)	<-Dst>(nT)
1974	282,7	19,6	13,9
1979	221,2	14,5	16,3

Analisando-se as regiões de dissipação de energia, os eletrojetos aurorais (AE) e a corrente de anel (Dst), nota-se primeiramente que a média anual de AE em 1974 é superior à média anual de AE em 1979. Isto nos indica uma maior intensidade média das correntes aurorais em 1974, o que está relacionado com a presença de buracos coronais no Sol, típica de anos de menor atividade solar. Esses buracos coronais, que podem durar algumas semanas, geram feixes recorrentes de partículas que provocam um aumento na velocidade média do vento solar. Sendo a energia de acoplamento  $E$ , entre o vento solar e a magnetosfera proporcional à velocidade do vento solar e à componente vertical do campo magnético interplanetário (Gonzalez et al., 1992), tem-se com o aumento da velocidade média do vento solar, um conseqüente aumento de  $E$ , que é registrado por AE. Esse aumento não é, no entanto, suficiente para intensificar a corrente de anel que se mantém em nível calmo, sendo intensificada apenas pela ocorrência de algumas tempestades em 1974.

Por sua vez, a média de Dst em 1979 é maior que a média de Dst em 1974. O ano de 1979 está situado no período de máxima atividade solar e portanto apesar da inexistência de buracos coronais, a ocorrência de explosões solares é maior. Essas explosões solares geram flutuações na componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário. Estas por sua vez podem dar origem a reconexões com o campo magnético terrestre, ocasionando uma grande penetração de energia suficiente para intensificar a corrente de anel, dando lugar às tempestades magnéticas.

Ainda que, por ocasião das tempestades magnéticas ocorra também uma intensificação de AE, esta não é persistente e duradoura como a gerada pelos feixes recorrentes de partículas típicos dos anos próximos do mínimo solar. Estas características para as regiões de dissipação de energia podem ser observadas nos gráficos para AE e Dst da Figura 4.1.

Pode-se observar ainda que igualmente ao índice AE, a média de ap em 1974 é maior do que em 1979. Este comportamento análogo entre ap e AE será observado melhor nos capítulos seguintes.

#### 4.3 - MÉDIAS MENSAS

Nos gráficos das médias mensais dos índices Dst, ap e AE (Figura 4.2, 4.3 e 4.4) percebe-se que os três índices possuem uma variação sazonal tanto em 1974 como em 1979.

Pode-se observar que a influência da variação sazonal é maior para o índice Dst, média para o índice ap e menor para o índice AE. Como foi citado no Capítulo 2, outros estudos já haviam observado essa variação sazonal, mas apenas para os índices Dst e ap.

Os valores picos dos índices situam-se entorno de março/abril e setembro/outubro, meses que correspondem aos equinócios.

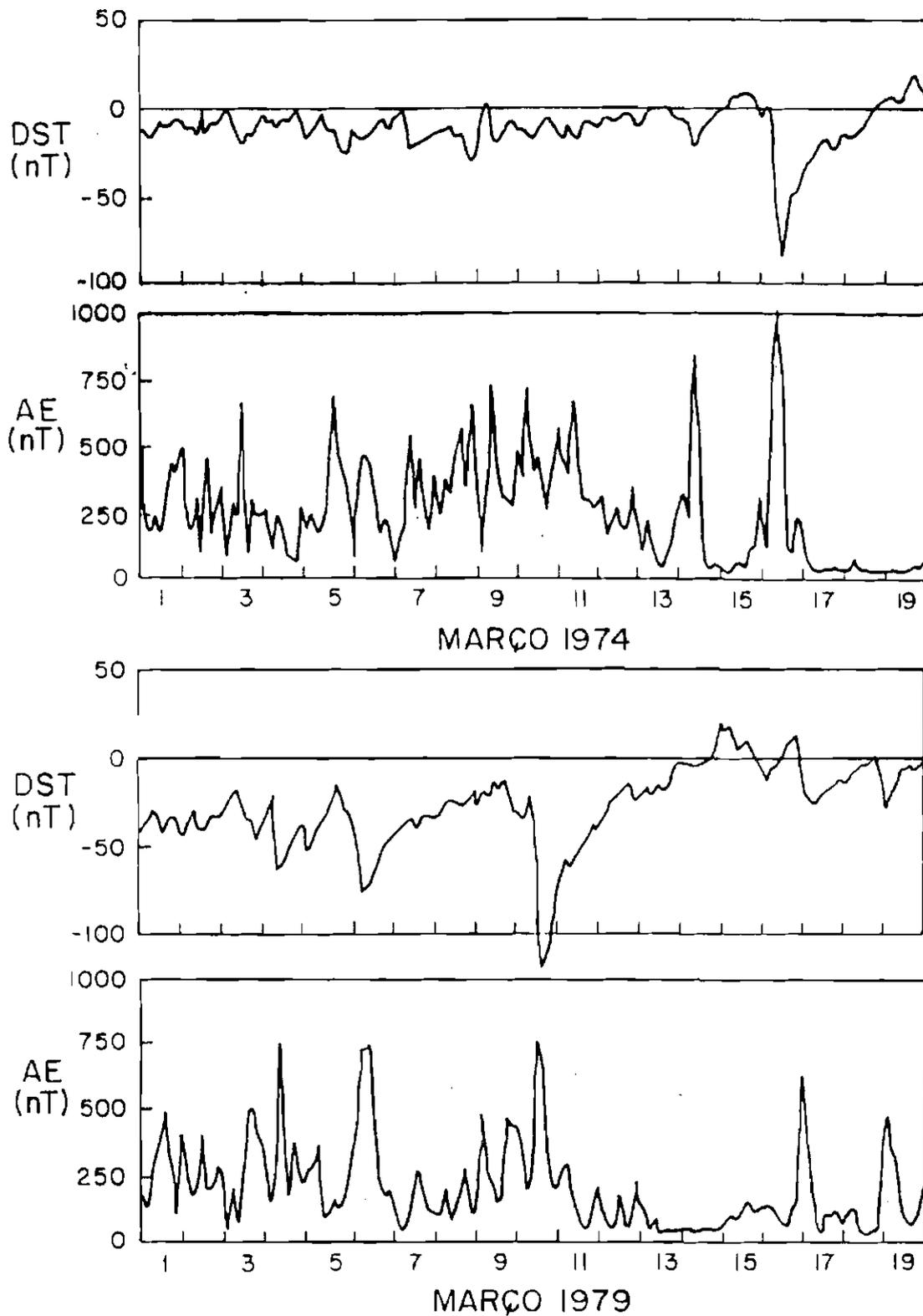


Fig. 4.1 - Amostra da variação de AE e de Dst para os anos 1974 e 1979.

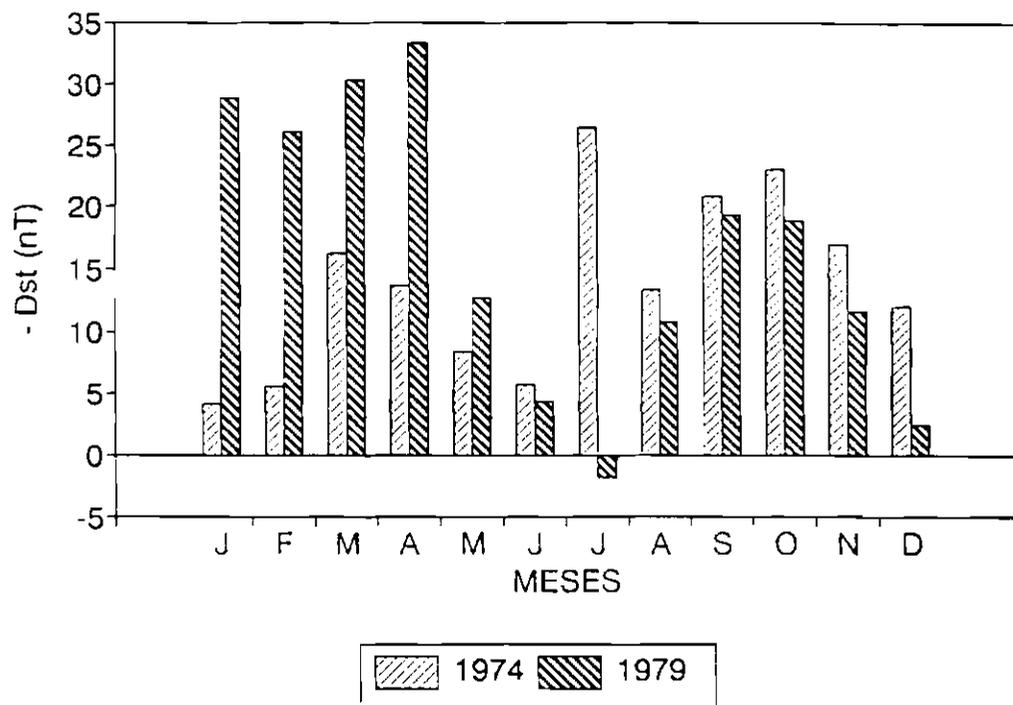


Fig. 4.2 - Média mensal de Dst.

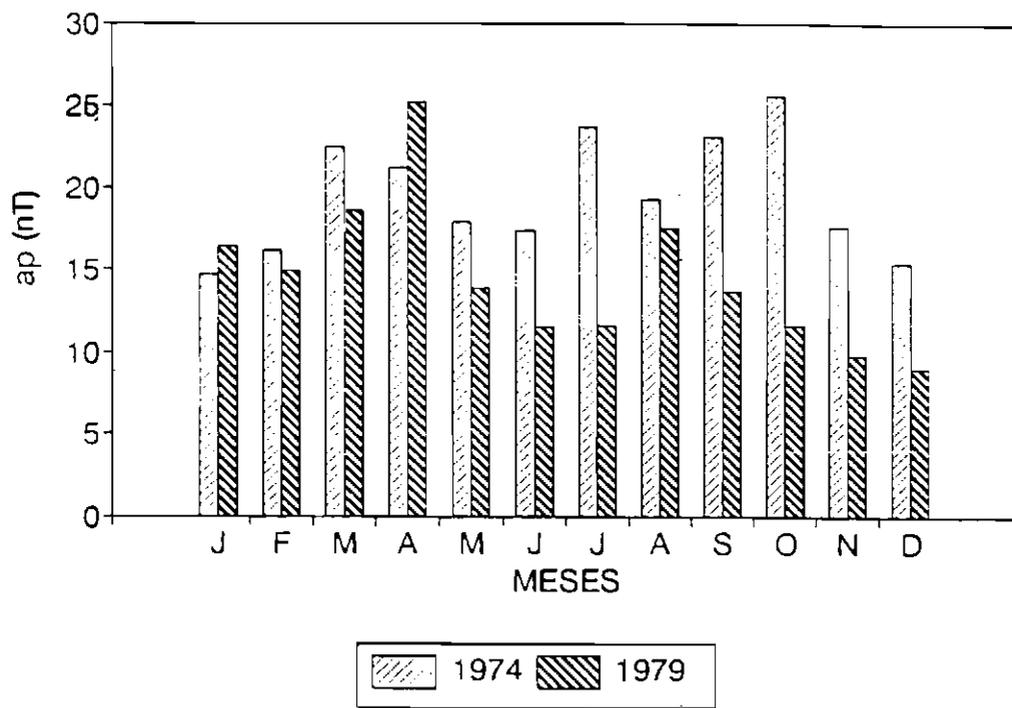


Fig. 4.3 - Média mensal de ap.

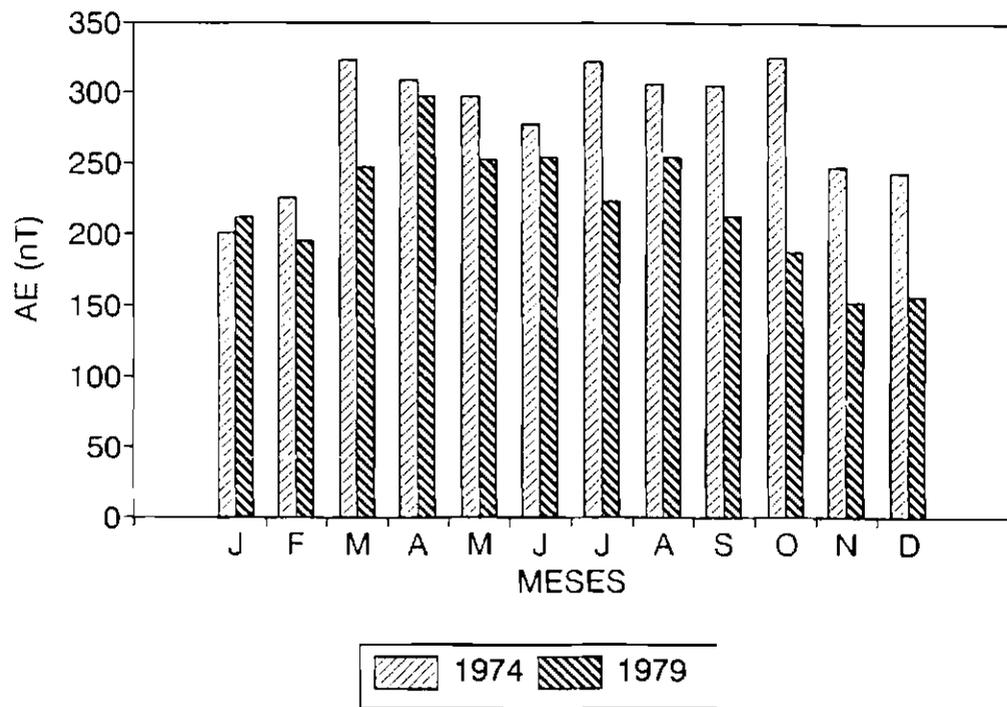


Fig. 4.4 - Média mensal de AE.

Na Figura 4.2 pode-se observar a presença de um pico no mês de julho para o ano de 1974. Trabalhos recentes (Clúa de Gonzalez et al., 1992) mostram a possível existência deste pico na variação sazonal da atividade geomagnética.

## CAPÍTULO 5

### RELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES PARA DIFERENTES ESCALAS TEMPORAIS

#### 5.1 - INTRODUÇÃO

Pouco se tem estudado sobre a interdependência entre o índice planetário  $ap$ , o índice Dst e os índices aurorais AE e seus derivados. Rostoker (1991) mostra gráficos de valores de AE em função de  $K_p$  para os meses de 1978 e alguns meses de 1975 e Campbell (1979) calcula correlações entre Dst e  $ap$ , e AE e  $ap$  somente para médias diárias de 1965.

No presente trabalho estendeu-se este estudo para anos diferentes, com valores horários e "tri-horários", realizando-se uma abordagem mais completa do assunto: correlações anuais, mensais e nas fases das tempestades magnéticas, entre AE e -Dst,  $ap$  e -Dst, e  $ap$  e AE.

Todas as correlações apresentadas neste trabalho tiveram um probabilidade de não-correlação abaixo de 0,01%.

#### 5.2 - CORRELAÇÕES ANUAIS

As correlações anuais obtidas para os anos de 1974 e 1979 entre os índices AE, Dst e  $ap$  foram: AE x -Dst,  $ap$  x -Dst e  $ap$  x AE. Para isso, como o índice  $ap$  é "tri-horário", as correlações envolvendo

o índice ap é "tri-horário", as correlações envolvendo ap serão sempre feitas com valores médios "tri-horários" de Dst e AE. Entre AE e Dst calculou-se correlações com valores horários de ambos, apenas para efeito de comparação.

Notou-se nas correlações tanto para 1974 como para 1979 a existência de uma defasagem temporal entre AE e Dst e entre ap e Dst. Tendo em conta este atraso de Dst em relação à AE e ap obteve-se melhores correlações para defasagens ("lags") iguais a 1 intervalo. Este intervalo será de 0 a 1 hora para correlações utilizando valores horários, e de 0 a 3 horas para o correlações feitas com médias "tri-horárias" (Figuras 5.1 e 5.2).

Atribuiu-se essa defasagem de Dst a duas causas possíveis:

- a) a corrente de anel responde mais lentamente a uma perturbação externa:
  - i) por ser uma corrente mais volumosa e ter portanto uma inércia maior que as correntes aurorais monitoradas por AE e as correntes ionosféricas monitoradas por ap;
  - ii) pelo fato de crescer gradualmente com várias injeções sucessivas de energia, enquanto que as correntes ionosféricas e aurorais respondem prontamente a cada uma delas;

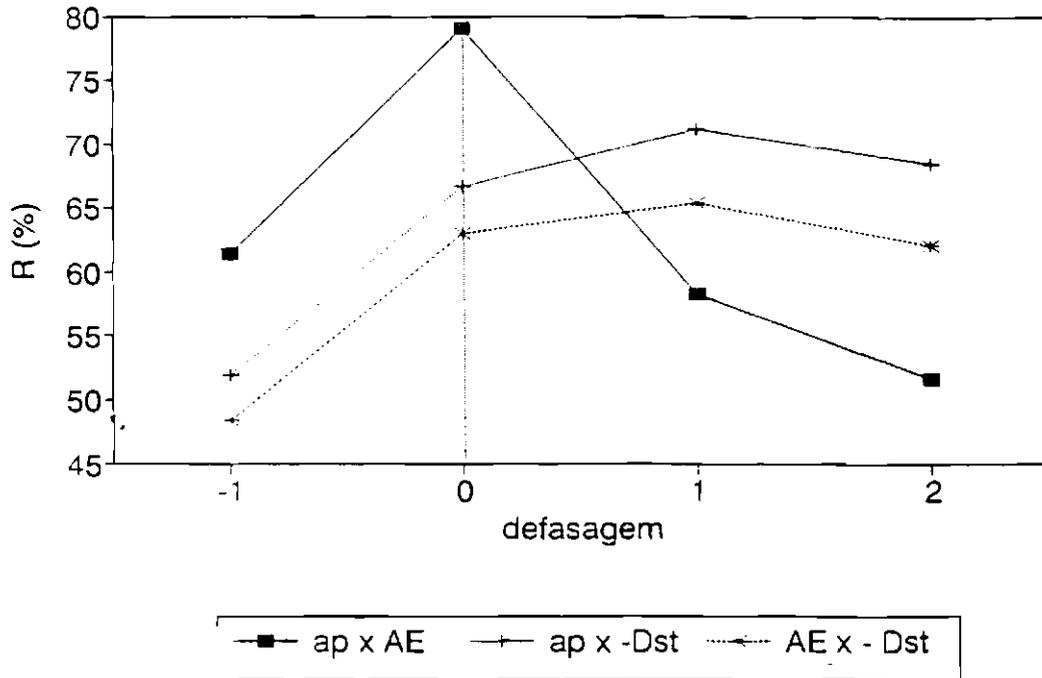


Fig. 5.1 - Defasagem temporal para as correlações anuais de 1974 (valores "tri-horários").

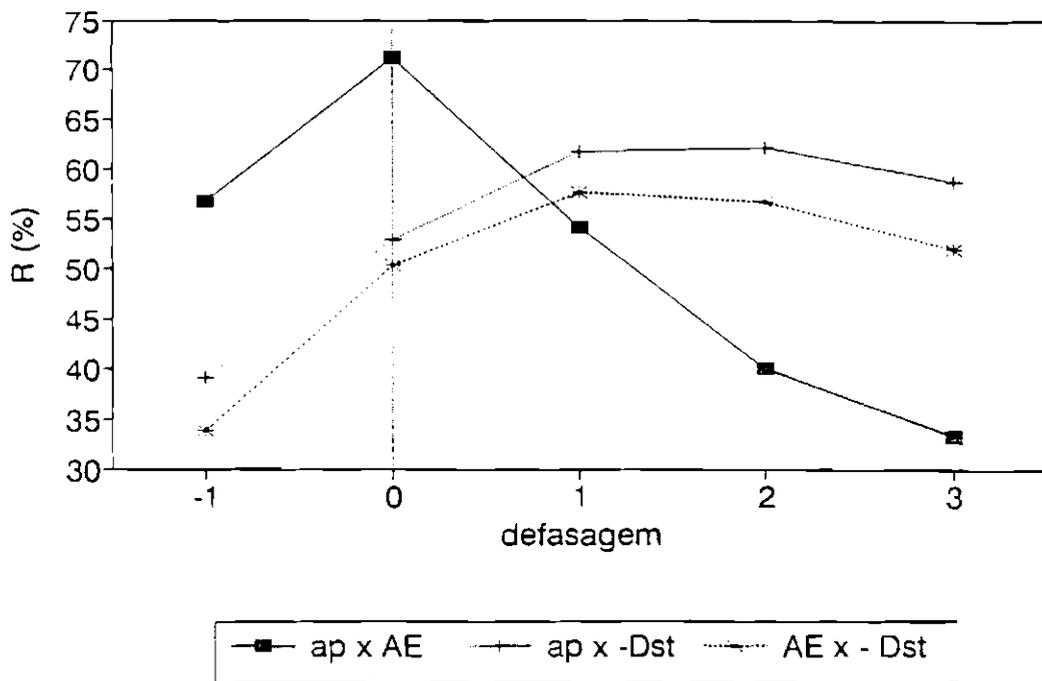


Fig. 5.2 - Defasagem temporal para as correlações anuais de 1979 (valores "tri-horários").

b) pela assimetria no crescimento da corrente de anel, o Dst, sendo uma média da variação observada em cada uma das estações, subestimarão o valor real da corrente de anel ainda em formação. Pelo contrário, os índices ap e AE são sensíveis a perturbações ainda que locais.

A utilização de um índice assimétrico para a corrente de anel, elimina quase que completamente a defasagem com o índice AE (Kawasaki e Akasofu, 1971).

Para uma melhor avaliação da defasagem seria propícia a utilização de um índice Dst e ap com maior resolução temporal. No entanto, este ainda não está disponível.

Nas figuras que se seguem os valores que se encontram acima das barras dos gráficos são os coeficientes de correlação e acima destes estão os valores das defasagens temporais expressos em termos de intervalos. As correlações mostradas são todas feitas com valores "tri-horários", a menos que indicado o contrário como na Figura 5.3.

As correlações em 1974 são, em geral, melhores do que as correlações em 1979 já que em 1974 a atividade geomagnética apesar de não ser tão intensa como em 1979 é no entanto bem mais constante e duradoura.

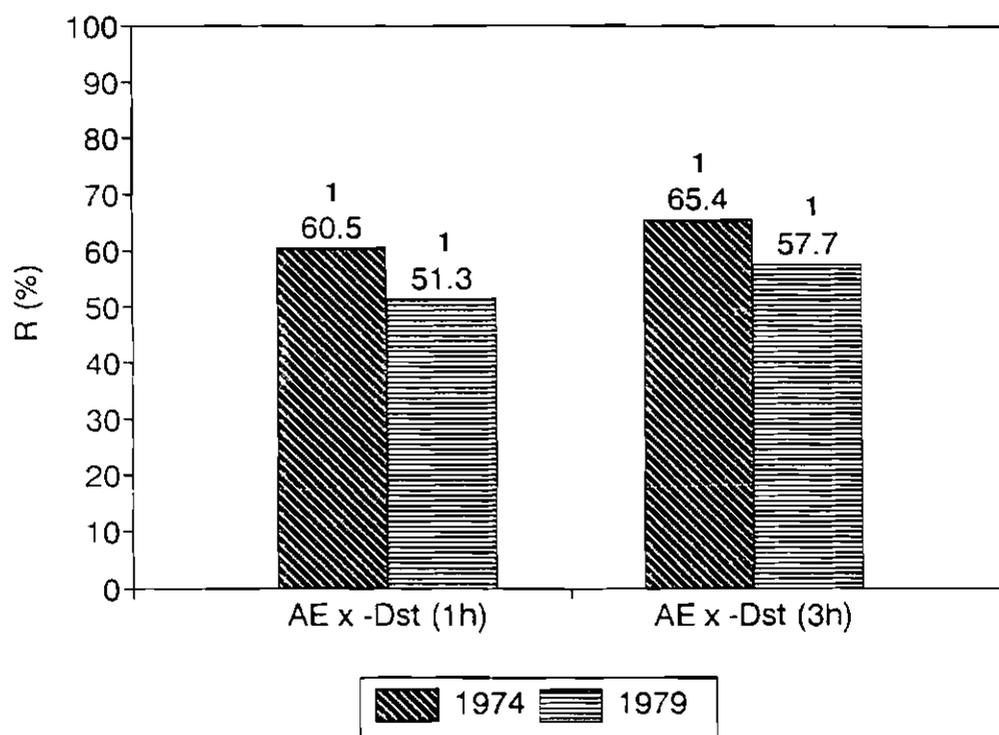


Fig. 5.3 - Correlação anual AE x -Dst para valores horários e "tri-horários".

### 5.2.1 - CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE AE E -Dst

O índice AE monitora as correntes ionosféricas aurorais que possuem alta variabilidade temporal. Já o índice Dst monitora a corrente de anel que é uma corrente de escala muito maior e não apresenta flutuações tão rápidas.

Portanto ao adotar-se valores "tri-horários" para AE, obteve-se uma suavização maior deste e conseqüentemente uma melhor correlação com Dst (Figura 5.3). Ainda assim esta correlação é a menor que aquelas entre  $ap \times -Dst$  e  $ap \times AE$  (Figura 5.4).

A correlação entre AE e Dst é relativamente pequena já que temos:

- a) um diferente comportamento de resposta das correntes aurorais e da corrente de anel a uma perturbação externa. Enquanto que a corrente de anel responde a uma série de perturbações sucessivas de maneira cumulativa, as correntes ionosféricas respondem a cada uma delas isoladamente;
- b) o índice AE ao ser construído a partir da diferença entre AU e AL, elimina em si as perturbações causadas pelas variações da corrente de anel nos eletrojetos aurorais (Mayaud, 1980);

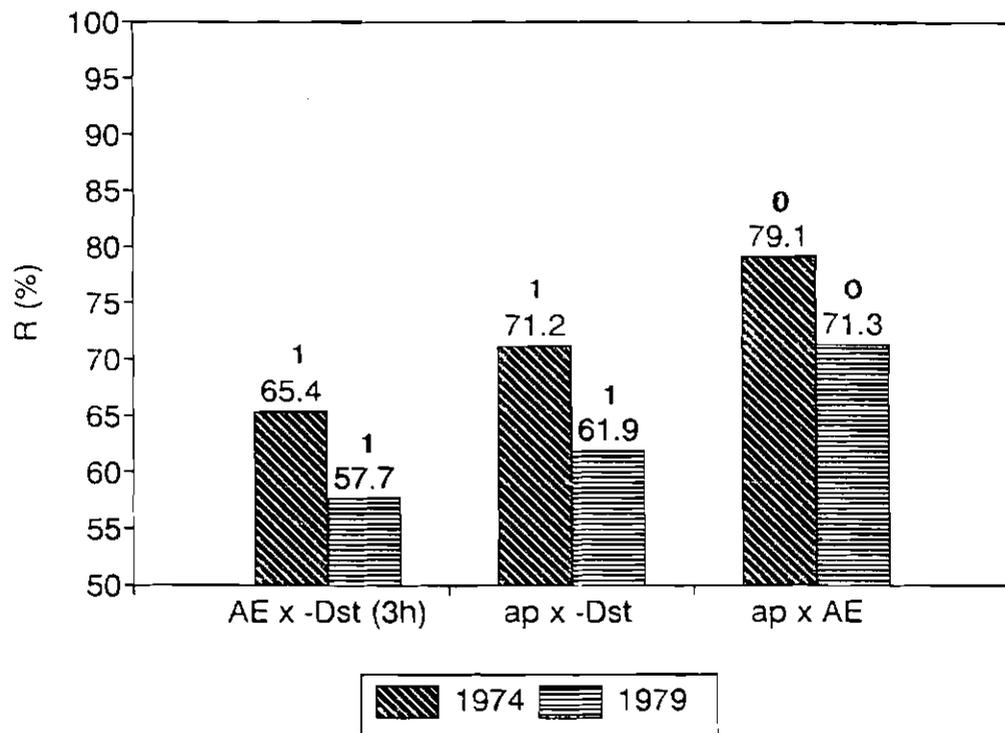


Fig. 5.4 - Correlações anuais (valores "tri-horários").

- c) a localização dos magnetômetros responsáveis pelo Dst é razoavelmente afastada da localização dos responsáveis pelo AE para que influências recíprocas sejam significativas (Figura 3.1).

No entanto como a origem externa das perturbações de ambos os índices é comum, tem-se ainda alguma correlação entre os dois.

#### 5.2.2 - CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE $ap$ E $-Dst$

As correlações  $ap$  x  $-Dst$  apresentam valores maiores do que as correlações AE x  $-Dst$  (Figura 5.4) pelos motivos abaixo:

- a)  $ap$  mede variações geomagnéticas globais, entre as quais estão as provocadas pela corrente de anel;
- b) há proximidade geográfica entre os magnetômetros responsáveis pelos dois índices (Figura 3.1) que de certa forma monitoram o mesmo fenômeno. No entanto, como será visto no item 5.2.3,  $ap$  é muito influenciado pelas variações das correntes aurorais, de forma que não poderá apresentar uma correlação alta com Dst.

Quando se calculou os valores da correlação  $ap$  x  $-Dst$  para dois estados da corrente de anel, calmo ( $-Dst < 50$  nT) e perturbado

( $50 < -Dst < 250$  nT), obteve-se (Tabela 5.1):

TABELA 5.1 - CORRELAÇÃO  $ap$  x  $-Dst$  EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE DA CORRENTE DE ANEL

INTENSIDADE DA CORRENTE DE ANEL		$R_{1974}$	$R_{1979}$
CALMA	( $-Dst < 50$ nT)	54,3 %	53,3 %
INTENSA	( $50 < -Dst < 250$ nT)	66,9 %	66,1 %

Pôde-se concluir que quando a corrente de anel se intensifica tem-se uma melhor resposta de  $ap$  às variações desta, ou seja, a correlação  $ap$  x  $-Dst$  também aumenta. Isto pôde ser observado com maior nitidez no estudo das correlações mensais.

### 5.2.3 - CORRELAÇÃO ANUAL ENTRE $ap$ E AE

As correlações  $ap$  x AE apresentam valores ainda maiores que  $ap$  x  $-Dst$  (Figura 5.4) já que:

- a) como acontece também com  $ap$  x  $-Dst$ , por  $ap$  medir variações geomagnéticas globais, inclui em si as variações provocadas pelas correntes aurorais e portanto correlaciona-se bem com AE;
- b) há uma grande proximidade geográfica entre os magnetômetros que monitoram  $ap$  e AE (Figura 3.1);

- c) as correntes que sensibilizam  $ap$  e  $AE$  são ionosféricas e portanto apresentam a mesma variabilidade temporal (o que não sucede no caso de  $ap$  x  $-Dst$ ). Daí também a inexistência de defasagens ("lags") entre  $ap$  e  $AE$  em todas as correlações efetuadas.

### 5.3 - CORRELAÇÕES MENSAIS

Realizou-se analogamente, as correlações  $AE$  x  $-Dst$ ,  $ap$  x  $AE$  e  $ap$  x  $-Dst$  para todos os meses de 1974 e 1979. Utilizou-se também valores "tri-horários". Os valores destas correlações são mostrados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

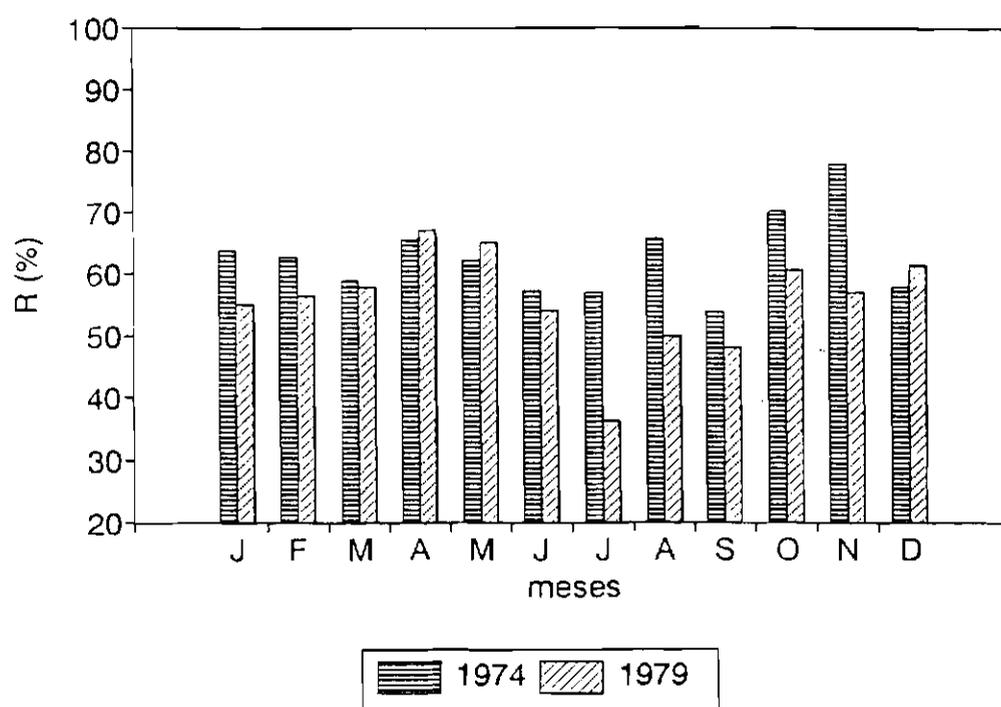


Fig. 5.5 - Correlações mensais AE x -Dst (valores "tri-horários").

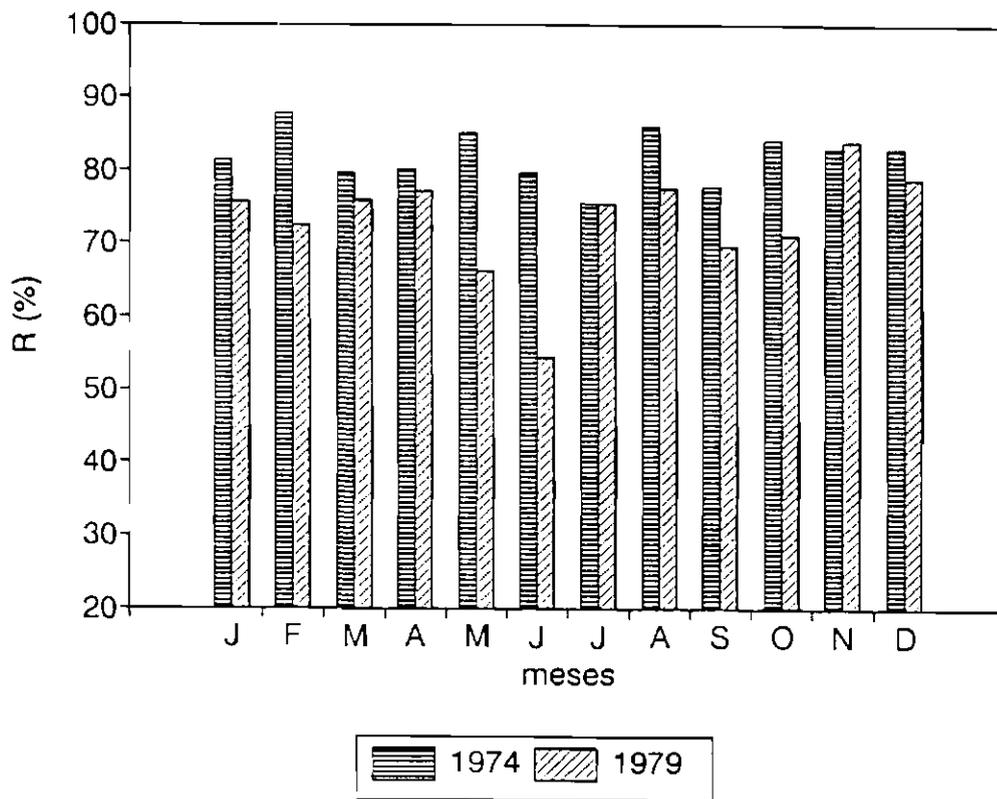


Fig. 5.6 - Correlações mensais  $ap \times AE$ .

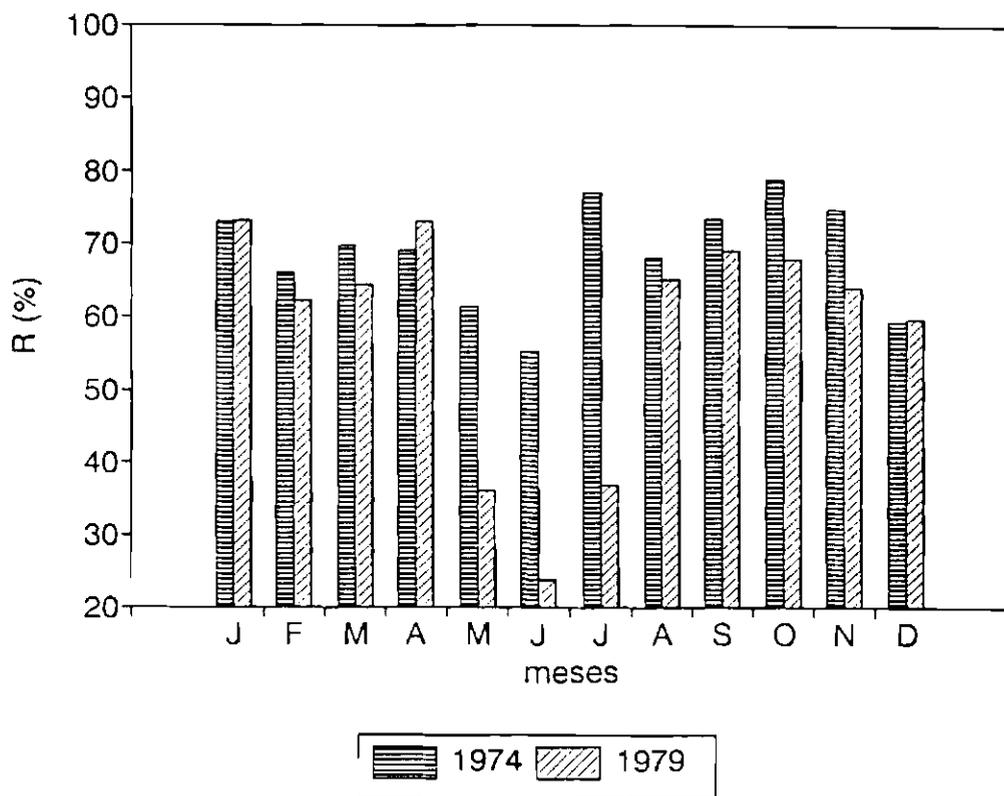


Fig. 5.7 - Correlações mensais ap x -Dst.

Nestas figuras convém destacar os seguintes fatos:

a) as correlações mensais aumentam quando a atividade aumenta e por isso há também nestas uma variação sazonal. Em particular  $ap \times -Dst$  está fortemente influenciada pelo nível de atividade em baixas latitudes registrado pelo índice Dst. Ilustram este fenômeno as Figuras 5.8 e 5.9 para os anos 1974 e 1979 respectivamente. Obteve-se para as correlações entre os valores médios mensais de  $-Dst$  e os valores mensais de  $ap \times -Dst$  os seguintes resultados:

i) para 1974,  $\langle -Dst \rangle \times (ap \times -Dst) = 69\%$  ;

ii) para 1979,  $\langle -Dst \rangle \times (ap \times -Dst) = 68\%$ .

Portanto, um nível maior de atividade geomagnética em baixas latitudes proporcionará uma melhor correlação entre o índice Dst e o índice  $ap$ , já que sendo mais intensa a corrente de anel, exercerá uma maior influência em  $ap$  cujos magnetômetros estão a médias latitudes.

b) é consistente com os resultados para as correlações anuais o fato de  $ap \times AE > ap \times -Dst > AE \times -Dst$  nas correlações mensais.

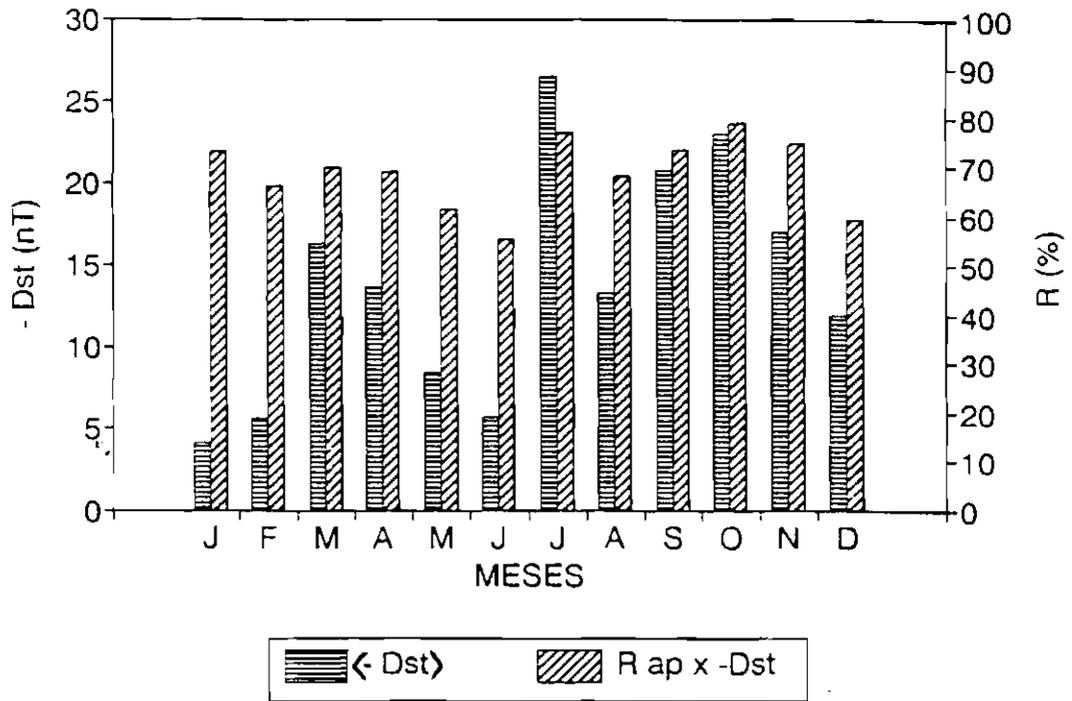


Fig. 5.8 - Correlação entre as médias mensais de  $-Dst$  e as correlações mensais  $ap\ x\ -Dst$  para 1974.

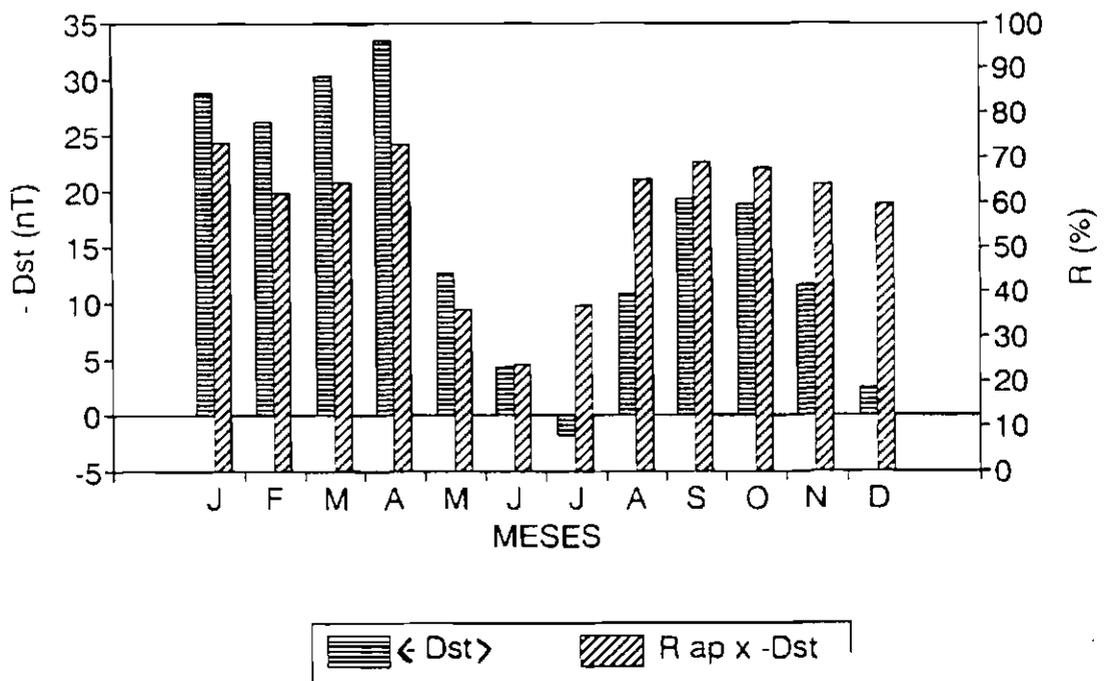


Fig. 5.9 - Correlação entre as médias mensais de  $-Dst$  e as correlações mensais  $ap\ x\ -Dst$  para 1979.

#### 5.4 - CORRELAÇÕES NOS PERÍODOS DE ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA

Para o estudo da interdependência dos índices durante períodos de atividade geomagnética, foram escolhidas 7 tempestades intensas ( $Dst_{\text{mín.}} < -100$  nT) e 11 moderadas ( $-100 < Dst_{\text{mín.}} < -75$  nT) do ano de 1979. Utilizando valores "tri-horários", calculou-se as correlações  $ap \times AE$ ,  $ap \times -Dst$ , e  $AE \times -Dst$  para as fases principal e de recuperação das tempestades escolhidas. Na Figura 5.10 temos uma comparação entre as correlações anuais e as correlações para as fases principal e de recuperação.

Pode-se perceber que durante as tempestades a correlação entre os índices aumenta em relação à correlação anual, já que os índices acusam conjuntamente uma intensificação na atividade magnetosférica. No entanto a correlação  $ap \times AE$  é prejudicada na fase principal já que  $ap$  está mais sensível ao  $Dst$  do que ao índice  $AE$  que durante esta fase sofre rápidas e intensas perturbações ( $ap \times AE = 62,8\%$  e  $ap \times -Dst = 77,3\%$ ). Ainda, no caso de tempestades mais intensas tem-se a expansão do oval auroral em direção ao equador e uma conseqüente diminuição nos valores de  $AE$  ainda que não necessariamente uma diminuição de intensidade nos eletrojetos aurorais.

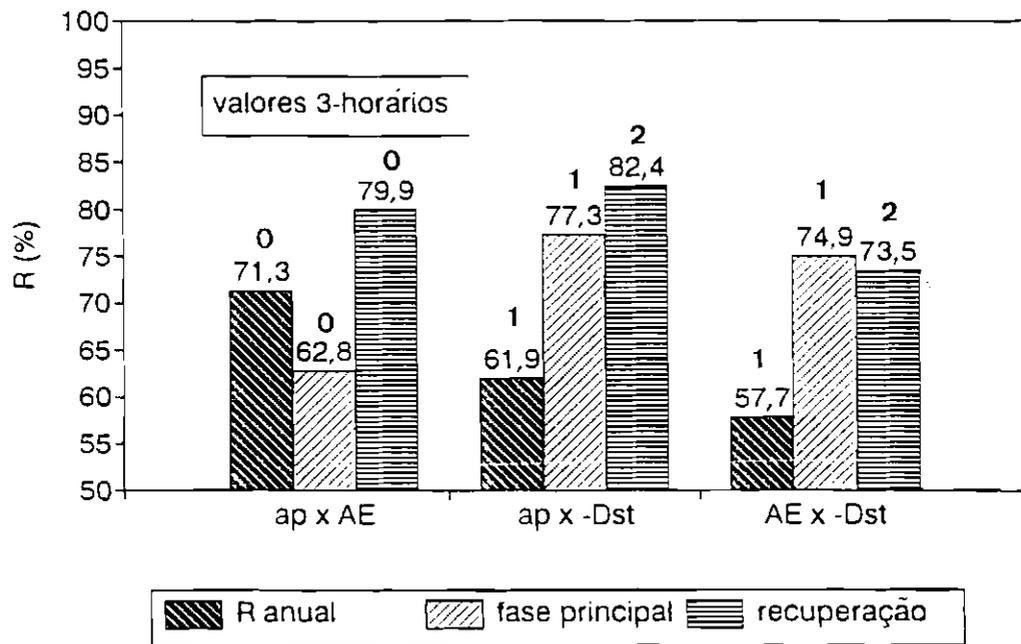


Fig. 5.10 - Correlações anuais e as correlações nas fases de tempestades magnéticas de 1979.

Na fase de recuperação a injeção de energia com as perturbações intensas associadas já quase não existem, o que proporciona um aumento generalizado das correlações (Figura 5.10). Também na fase de recuperação, com essa diminuição de injeção de energia na magnetosfera, as correntes aurorais se dissipam rapidamente enquanto que a corrente de anel, mais volumosa e externa à atmosfera, se dissipa lentamente, daí o aumento da defasagem neste período da tempestade (Figura 5.10). Justifica-se então, que  $AE \times -Dst$  e  $ap \times -Dst$  apresentem uma defasagem maior (3 a 6 horas).

Para as correlações  $AE \times -Dst$  é possível observar um aumento na correlação durante ambas as fases da tempestade (74,9% na fase principal e 73,5% na fase de recuperação) em relação ao valor anual (57,7%). Essa melhora é esperada já que tanto as correntes aurorais como a corrente de anel estão respondendo a um mesmo fenômeno, que é a injeção de energia na magnetosfera e conseqüentemente realizando a sua dissipação (Kamide e Fukushima, 1971). Será visto, no entanto, no Capítulo 7, que para tempestades muito intensas  $Dst_{\text{mín.}} < -150 \text{ nT}$ ,  $AE$  não acompanha o crescimento de  $-Dst$ , desacoplamento esse, causado pela citada expansão do oval auroral.

CAPÍTULO 6A CORRELAÇÃO MÚLTIPLA6.1 - INTRODUÇÃO

O índice  $ap$  como foi visto anteriormente correlaciona-se bem com Dst ( $r=71,2\%$  para 1974 e  $r=61,9\%$  para 1979) e ainda melhor com AE ( $r=79,1\%$  para 1974 e  $r=71,3\%$  para 1979); também foi visto que  $ap$  possui um comportamento "intermediário" tanto nas variações temporais como nas suas relações com outros índices. Como afirma Rostoker, (1972, p. 940) "embora o índice  $K_p$  (e portanto  $ap$ ) seja capaz de descrever o estado geral da atividade geomagnética planetária, ele contém contribuições de pelo menos duas maiores fontes, o eletrojato auroral e a corrente de anel". Pode-se portanto esperar que o índice  $ap$  possa ser expresso em termos de AE e Dst com uma melhor precisão do que nas regressões lineares das correlações anteriores onde utilizou-se apenas valores de AE ou Dst. Pode-se assim tentar obter uma estimativa de  $ap$ , AE ou Dst em função dos outros dois índices. Para isso usou-se a correlação múltipla. Esta é a **primeira vez** que se estuda quantitativamente a relação entre os três índices. Objetiva-se encontrar uma função do tipo,

$$ap = a + bAE + c(-Dst)$$

onde  $a, b$  e  $c$  são os coeficientes do ajuste linear.

Nas correlações que seguirão, são utilizados valores de Dst atrasados de um intervalo ("lag"=1) em relação à ap e AE, já que esta é a defasagem de Dst apresentada na maioria dos casos estudados nos capítulos anteriores.

## 6.2 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA ANUAL

Obteve-se então para os anos de 1974 e 1979 os seguintes valores:

a) 1974     $r = 83,2 \%$

$$ap = -1,1 + 5,5 \times 10^{-2}AE + 36,6 \times 10^{-2}(-Dst)$$

$$(\pm 0,05) \quad (\pm 0,1 \times 10^{-2}) \quad (\pm 1,5 \times 10^{-2})$$

b) 1979     $r = 75,7 \%$

$$ap = -0,6 + 5,1 \times 10^{-2}AE + 23,0 \times 10^{-2}(-Dst)$$

$$(\pm 0,04) \quad (\pm 0,1 \times 10^{-2}) \quad (\pm 1,1 \times 10^{-2})$$

Para uma comparação com os valores das correlações anuais é mostrada na Figura 6.1 os valores das correlações múltiplas para 1974 e 1979.

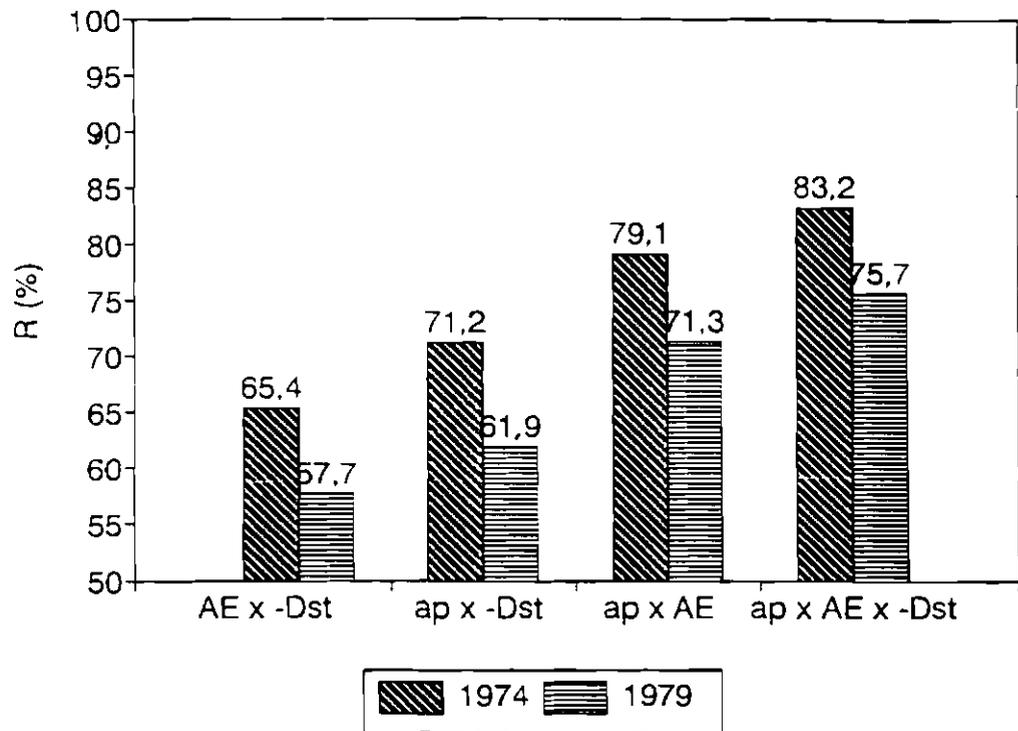


Fig. 6.1 - As correlações anuais e a correlação múltipla.

Há uma melhora nos valores da correlação múltipla para 1974 e para 1979. Observa-se ainda que os coeficientes  $a$  dos dois ajustes são pequenos em comparação com os valores usuais de  $ap$ . Isto significa que as principais fontes contribuintes do índice  $ap$  são realmente o eletrojato auroral (AE) e a corrente de anel (Dst), sendo desprezíveis os efeitos de outras correntes.

### 6.3 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA PARA PERÍODOS DE ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA DIFERENTES

Realizou-se a mesma correlação múltipla para períodos de intensa atividade magnetosférica como julho de 1974 ( $\langle Dst \rangle = -26,5$  nT) e para períodos calmos como junho de 1974 ( $\langle Dst \rangle = -5,7$  nT) e obteve-se os resultados mostrados na Figura 6.2.

Para junho onde o nível médio de Dst é baixo, a influência de Dst sobre  $ap$  é pequena ( $R=55,2\%$ ). Portanto a correlação múltipla  $ap \times AE \times -Dst$  é aproximadamente igual à correlação  $ap \times AE$ , ou seja,  $ap$  sofre somente as influências das correntes aurorais.

Por outro lado, em julho, a intensidade média de Dst é alta e a sua influência sobre  $ap$  também ( $r=77\%$ ). Levando portanto em consideração na correlação múltipla a influência da corrente de anel (Dst) e das correntes aurorais (AE), obtem-se uma correlação para  $ap \times AE \times -Dst$  maior ( $r=83,3\%$ ) que se fosse considerado na estimativa de  $ap$ , somente o índice AE ou o Dst.

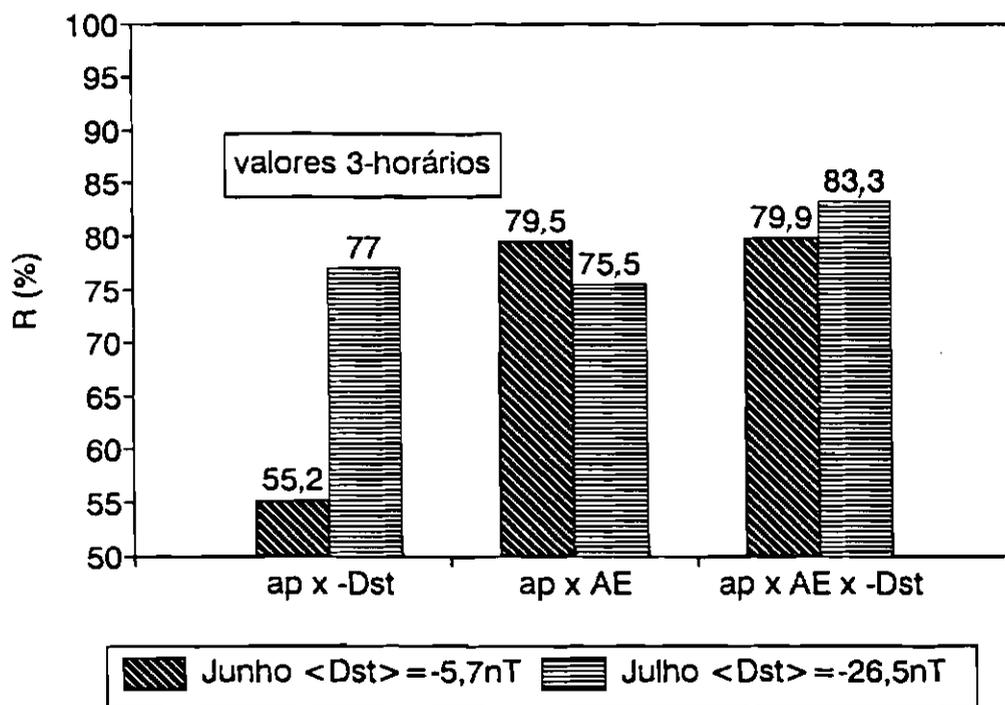


Fig. 6.2 - Correlações mensais e a correlação múltipla para junho e julho de 1974.

#### 6.4 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA PARA MÉDIAS MENSAIS

Para estimativas em maior escala temporal pode-se utilizar médias mensais dos índices. A partir então da regressão linear para uma determinada época do ciclo solar, conhecida a média mensal de dois índices, torna-se possível estimar o valor do terceiro índice em uma época afim do ciclo solar.

Realizou-se a correlação múltipla para médias mensais de 1974 e 1979 e os seguintes valores foram obtidos:

a) 1974     $r = 94,1 \%$

$$ap = 3,278 + 0,046AE + 0,236(-Dst)$$

$$(\pm 1,333) \quad (\pm 0,013) \quad (\pm 0,077)$$

b) 1979     $r = 94,4 \%$

$$ap = -2,930 + 0,061AE + 0,231(-Dst)$$

$$(\pm 1,65) \quad (\pm 0,012) \quad (\pm 0,047)$$

As Tabelas 6.1 e 6.2 mostram os valores mensais de AE, Dst e ap para 1974 e 1979 respectivamente, utilizados na correlação múltipla; os valores ap' estimados através das equações do ajuste e dos valores de AE e Dst, dão uma idéia da precisão das mesmas.

TABELA 6.1 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA PARA MÉDIAS MENSAIS DE  
1974

1974	AE(nT)	Dst(nT)	ap(nT)	ap'(nT)	diferença(%)
JAN.	200,8	4,1	14,8	13,5	8,8
FEV.	226,3	5,6	16,2	15	7,4
MAR.	323,7	16,3	22,5	22	2,2
ABR.	308,8	13,7	21,2	20,7	2,3
MAIO	297,4	8,4	17,9	19	6,1
JUN.	278,1	5,7	17,4	17,4	0
JUL.	322,2	26,5	23,7	24,4	2,9
AGO.	306,6	13,3	19,3	20,5	6,2
SET.	305,9	20,8	23,1	22,3	3,4
OUT.	325,6	23	25,6	23,7	7,4
NOV.	247,6	17	17,6	18,7	6,2
DEZ.	244,5	12	15,4	17,4	13

TABELA 6.2 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA PARA MÉDIAS MENSAIS DE  
1979

1979	AE(nT)	Dst(nT)	ap(nT)	ap'(nT)	diferença(%)
JAN.	212,2	-28,8	16,4	16,8	2,4
FEV.	196	-26,1	14,9	15,1	1,3
MAR.	247,9	-30,3	18,6	19,3	3,8
ABR.	297,4	-33,4	25,2	23	8,7
MAIO	252,9	-12,7	13,9	15,5	11,5
JUN.	254,8	-4,31	11,5	13,7	19,1
JUL.	223,1	1,8	11,6	10,3	11,2
AGO.	254,8	-10,8	17,5	15,2	13,1
SET.	212,6	-19,3	13,7	14,6	6,6
OUT.	188	-18,9	11,6	13	12
NOV.	152,2	-11,6	9,8	9,1	7,1
DEZ.	156,8	-2,5	9	7,3	18,8

A correlação múltipla pode ser então usada como uma maneira de estimar um dos índices AE, ap ou Dst a partir de dois conhecidos. Pode-se, por exemplo, preencher com essas estimativas as possíveis lacunas existentes nos registros dos índices, que muitas vezes inviabilizam o estudo de parâmetros a eles associados.

CAPÍTULO 7OUTROS ESTUDOS ENVOLVENDO RELAÇÕES ENTRE ÍNDICES7.1 - A RELAÇÃO ENTRE A SOMA DOS VALORES HORÁRIOS DE  
AE DURANTE A FASE PRINCIPAL DAS TEMPESTADES E O  
VALOR MÍNIMO DE Dst ATINGIDO EM CADA UMA DELAS

Como o índice AE está relacionado com a ocorrência de subtempestades, Davis e Parthasarathy (1967), estabeleceram uma relação entre a intensidade máxima de uma tempestade e a intensidade das subtempestades que precedem este máximo para algumas tempestades do ano de 1958. Para isso relacionaram o valor mínimo atingido por Dst com a somatória dos valores horários de AE durante intervalos de 1, 5, 10 e 15 horas precedendo o valor mínimo de Dst, e obtiveram uma melhor correlação para o intervalo de 10 horas (82 %).

No intuito de entender o porque deste resultado realizou-se com 22 tempestades (9 intensas e 13 moderadas) (Tabela 7.1) a correlação entre o valor mínimo atingido por Dst em cada uma delas com a somatória de AE no intervalo correspondente à fase principal de cada uma. Obteve-se uma correlação de 58,6 %. Efetuou-se então novamente a correlação porém utilizando desta vez um intervalo fixo de 10 horas precedendo o valor mínimo de Dst para a soma dos valores de AE. Obteve-se então uma correlação notavelmente maior,  $r=86,0$  % (Figura 7.1).

TABELA 7.1 - DATA, VALOR MÍNIMO DE Dst E DURAÇÃO DA FASE PRINCIPAL DAS TEMPESTADES

TEMPESTADE	DATA	Dst <sub>min.</sub> (nT)	DURAÇÃO(h)
1	04/02/79	-55	12
2	11/02/79	-66	16
3	28/02/79	-64	11
4	16/04/79	-55	9
5	01/05/79	-52	13
6	20/09/79	-57	6
7	24/09/79	-52	11
8	25/09/79	-51	5
9	07/01/79	-100	8
10	23/11/79	-88	14
11	04/03/79	-77	5
12	06/03/79	-79	8
13	13/11/79	-92	17
14	29/03/79	-129	11
15	04/04/79	-202	13
16	25/04/79	-129	6
17	18/09/79	-158	12
18	28/08/78	-221	11
19	29/09/78	-208	13
20	25/11/78	-144	7
21	06/07/74	-204	4
22	15/09/74	-159	7

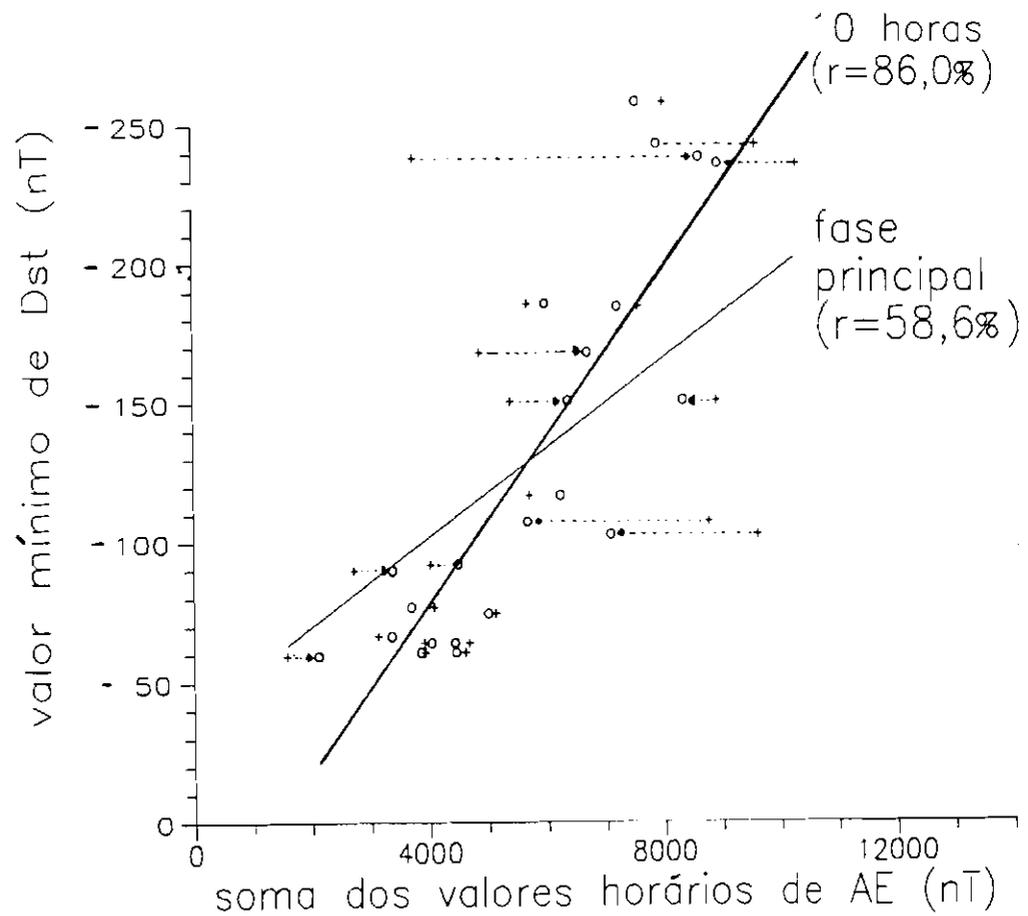


Fig. 7.1 - Correlação entre o valor mínimo de Dst atingido em cada tempestade e a soma dos valores horários de AE durante a fase principal e durante 10 horas precedendo o mínimo de Dst.

Por fim, refez-se os mesmos cálculos para outros intervalos de tempo, mostrados na Figura 7.2. Vê-se então que a máxima correlação  $r=86,6\%$  ocorre para o tempo de soma de AE de 11 horas.

Fica portanto reforçada com este estudo o fato de que a magnitude de uma tempestade está correlacionada com a atividade auroral integrada em um intervalo de tempo constante, próximo a 11 horas, ainda que as tempestades tenham uma fase principal mais ou menos extensas do que esse intervalo de tempo. É possível observar na Figura 7.3 que na amostra selecionada de 22 tempestades não existe uma distribuição preferencial da duração das fases principais em torno de 10 ou 11 horas, o que desfavorece a hipótese de que este valor esteja associado à média dos tempos das fases principais.

Assim, ainda que o tempo médio das fases principais (9,95 horas), seja aproximadamente o mesmo do valor encontrado de 11 horas, este último deve estar associado a tempos característicos de processos de energização e de estabelecimento de correntes na magnetosfera ainda não conhecidos.

Na Tabela 7.2 o ajuste da somatória de AE com o mínimo de Dst para 10 horas é feito para algumas tempestades. O ajuste é dado pela seguinte equação:

$$-Dst_{\text{mín.}} = 0,0258 \sum AE - 36,5.$$

$$(\pm 0,0034) \quad (\pm 30,6)$$

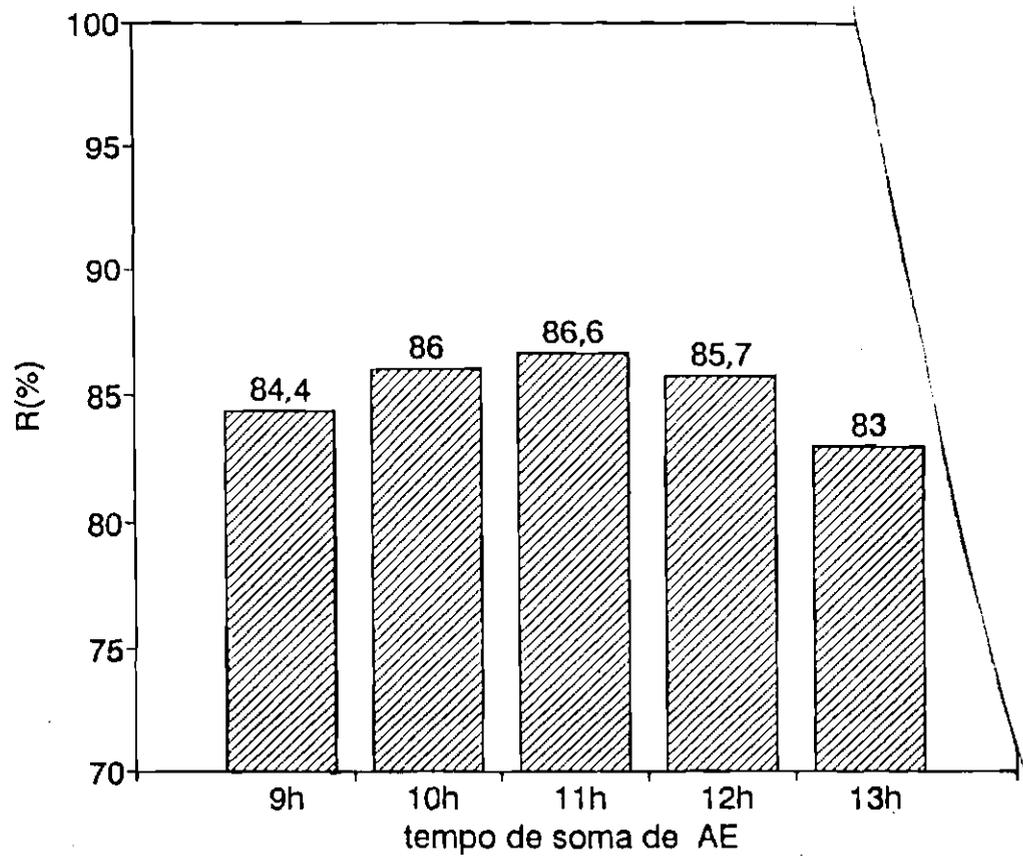


Fig. 7.2 - Correlação para 1979, entre a soma dos valores horários de AE durante diferentes intervalos e o valor mínimo de Dst atingido em cada uma delas.

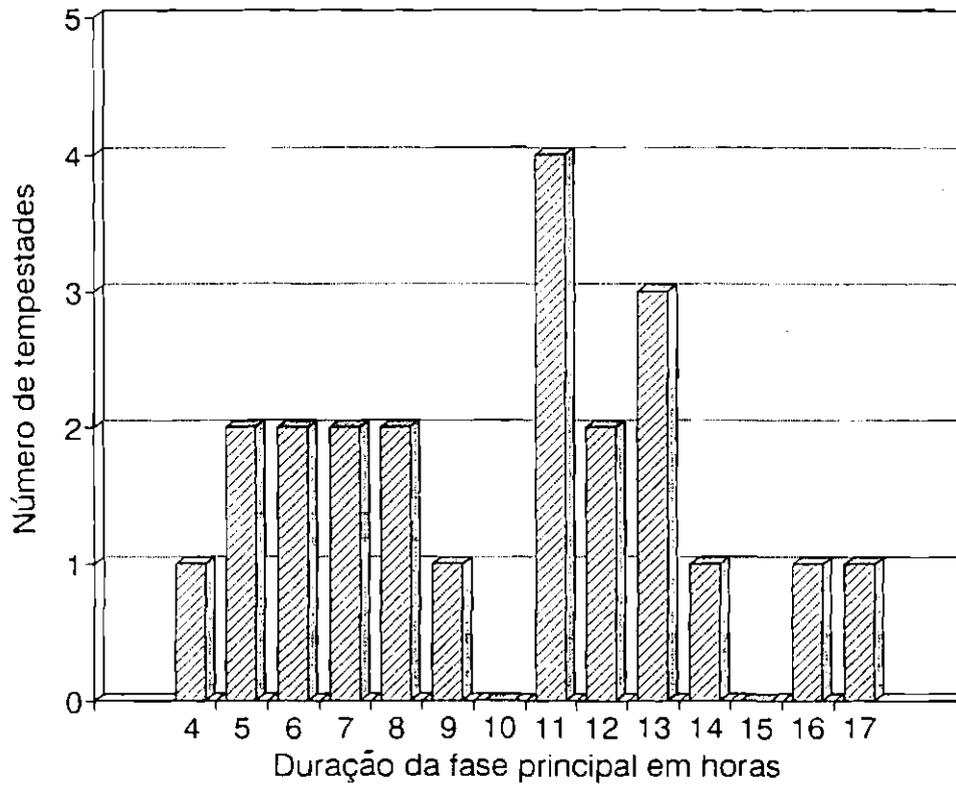


Fig. 7.3 - Número de tempestades para diferentes durações da fase principal.

TABELA 7.2 - EXEMPLOS DE AJUSTE DO MÍNIMO DE Dst EM FUNÇÃO DA SOMATÓRIA DE AE EM 10 HORAS

DATA	$\Sigma$ AE	Dst <sub>mín.</sub> (real)	Dst <sub>mín.</sub> (ajustado)	Diferença
09/08/72	7378 nT	-154 nT	-154,4 nT	0,2 %
27/08/72	4598 nT	- 82 nT	- 82,5 nT	0,5 %
14/07/82	13484 nT	-338 nT	-312,4 nT	7,7 %

7.2 - A EVOLUÇÃO DO AE COM O Dst DURANTE AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

O trabalho de Akasofu (1981) é o único que versa sobre a relação entre AE e Dst durante as tempestades geomagnéticas e por isso é amplamente referenciado. Dada a importância deste assunto que trata como o anterior da relação tempestade-subtempestade, ampliou-se também este trabalho realizando-se o estudo desta relação para 13 tempestades (o trabalho de Akasofu estuda apenas 2 tempestades).

De maneira geral pode-se classificar o comportamento de AE em relação ao Dst das seguintes maneiras:

- a) para tempestades com um valor mínimo de Dst entre -100 nT e -150 nT tem-se uma diminuição de Dst acompanhada por um crescimento gradual de AE (Figura 7.4);
  
- b) para tempestades com um valor mínimo de Dst entre -150 nT e -250 nT tem-se com a diminuição de Dst uma saturação de AE entorno de um patamar de aproximadamente 1000 nT tal como foi observado por Akasofu (1981), (Figura 7.5);
  
- c) para tempestades bem intensas com valor mínimo de Dst menores que -250 nT obteve-se para dois casos analisados, dois comportamentos diversos:
  - i) AE satura-se em torno de um patamar ainda superior a 1000 nT (Figura 7.6);
  
  - ii) AE apresenta no início da fase principal um crescimento rápido, bem acima de 1000 nT, e conseqüentemente um decréscimo gradual (Figura 7.7).

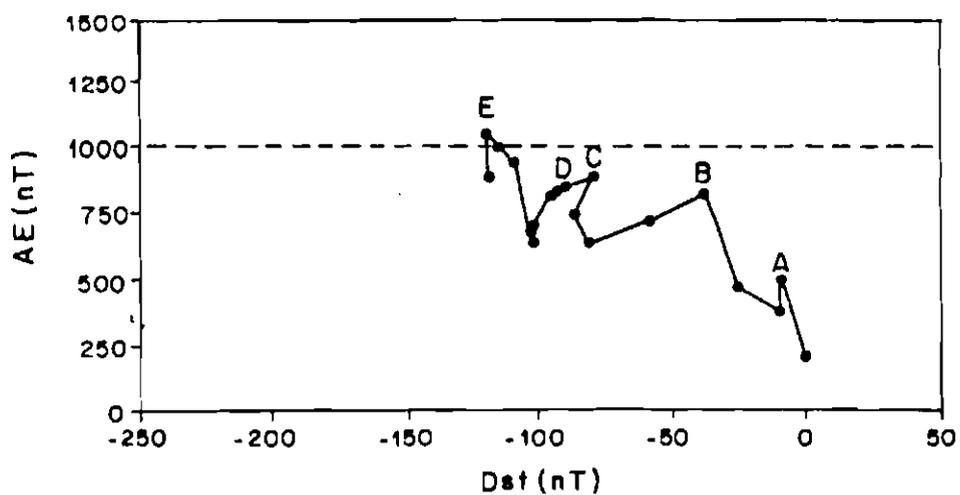


Fig. 7.4 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 13 de outubro de 1974.

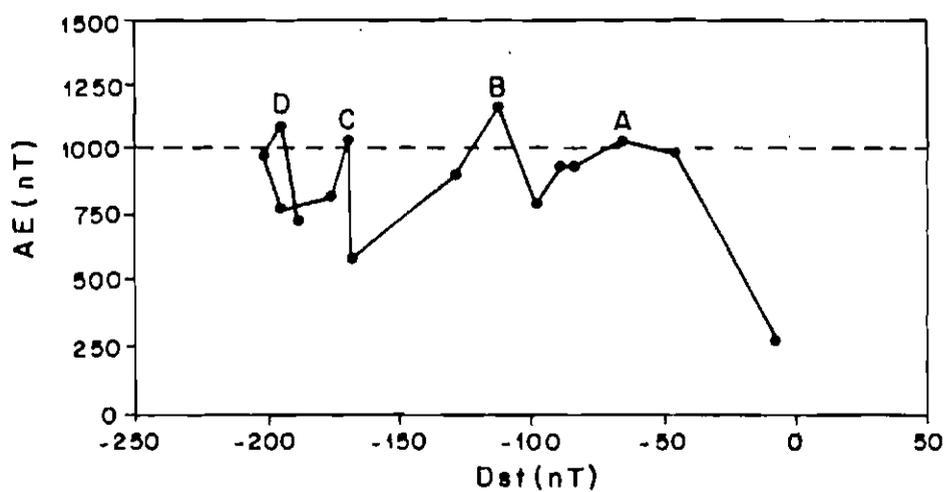


Fig. 7.5 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 4 de abril de 1979.

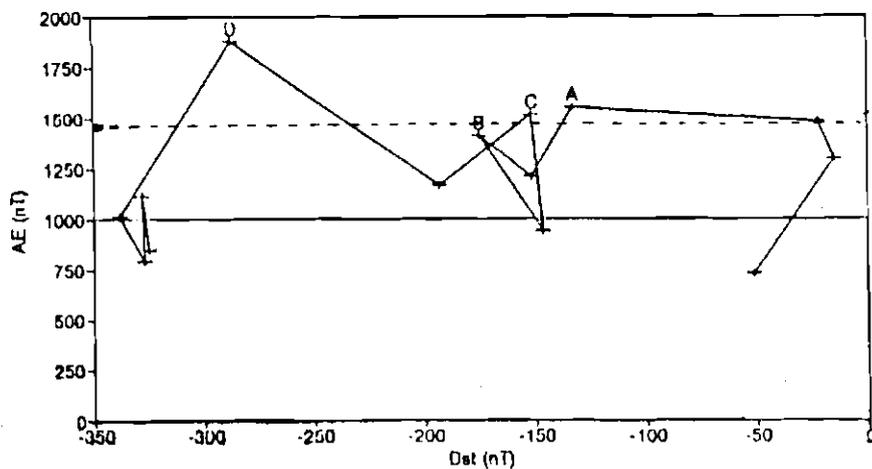


Fig. 7.6 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 13 de julho de 1982.

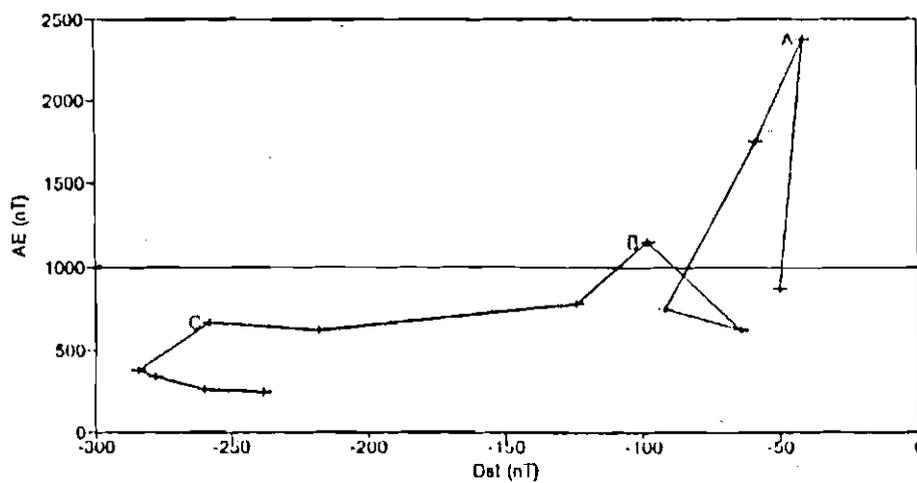


Fig. 7.7 - A evolução de AE com Dst para a tempestade de 8 de março de 1970.

No caso (a), a diminuição de Dst é acompanhada pelo crescimento de AE, o que representa uma simples energização simultânea das correntes aurorais e da corrente de anel.

No caso (b), a saturação de AE pode ser explicada pela expansão de oval auroral (Capítulo 3, item 3.5.1) e os picos espaçados de AE entorno de 1000 nT podem estar relacionados com subtempestades já que estas tem duração típica de aproximadamente 3 horas.

No caso (c) a ausência de mais dados para tempestades muito intensas não permite uma generalização a seu respeito.

Neste estudo seria conveniente uma correção do índice AE com a utilização de observatórios em latitudes mais baixas para a monitoração do eletrojato no decorrer da expansão auroral para várias tempestades. Khorosheva realizou este estudo para a tempestade de 23 de março de 1969 (Feldstein, 1992). Poder-se-ia então verificar em que medida a saturação de AE é devida à expansão auroral e em que medida há realmente uma saturação física intrínseca do eletrojato auroral

### 7.3 - CORRELAÇÃO ENTRE O VALOR MÍNIMO DE Dst E O VALOR MÁXIMO DE ap ATINGIDOS DURANTE AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Como concluiu-se, no Capítulo 5, nas correlações mensais entre índices, os índices ap e Dst se correlacionam melhor se a intensidade de -Dst for maior. Portanto deve-se esperar que o mínimo valor de Dst em uma tempestade, esteja bem correlacionado com o máximo valor de ap.

Selecionou-se os valores mínimos de Dst e máximos de ap para 46 tempestades de 1979. A correlação obtida foi de  $r=88,1\%$  e o gráfico do ajuste é apresentado na Figura 7.8.

Pode-se então, tendo somente o valor mínimo de Dst para uma tempestade, estimar o valor máximo de ap para esta mesma tempestade e vice-versa. Também é possível sendo os registros de Dst bem mais recentes que os de ap, estimar valores mínimos de Dst para tempestades ocorridas antes de 1957, data dos primeiros registros de Dst.

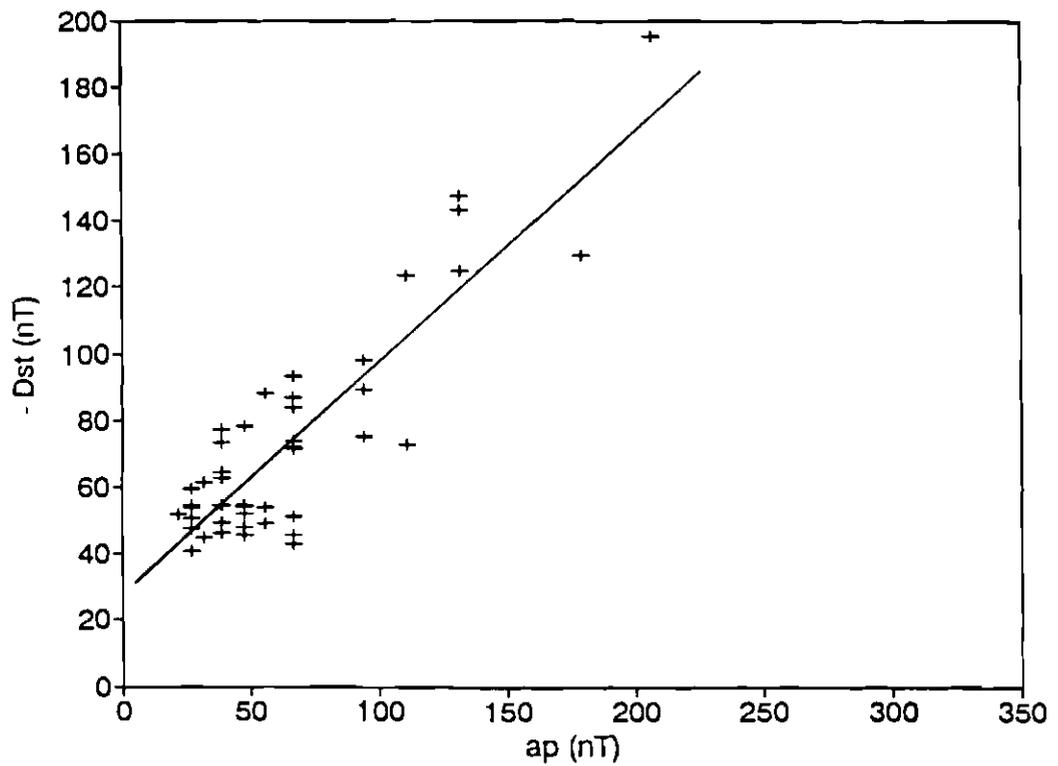


Fig. 7.8 - Ajuste linear dos valores mínimos de Dst com os valores máximos de ap atingidos em 46 tempestades de 1979.

Obtivemos a seguinte relação para o ajuste:

$$-Dst_{\text{mín.}} = 0,7ap_{\text{máx.}} + 27 .$$

$$(\pm 0,06) \quad (\pm 16)$$

A Tabela 7.3 ilustra a utilização do ajuste acima para uma estimativa dos valores de Dst para algumas tempestades de 1978 e de 1970.

TABELA 7.3 - EXEMPLO DE AJUSTE DE  $Dst_{\text{mín.}}$  EM FUNÇÃO DE  $ap_{\text{máx.}}$ .

DATA	$ap_{\text{máx.}}$	$Dst_{\text{mín.}}$ (real)	$Dst_{\text{mín.}}$ (ajustado)	Diferença
28/08/78	236 nT	-217 nT	-192 nT	11 %
29/09/78	207 nT	-201 nT	-171 nT	15 %
25/11/78	132 nT	-140 nT	-119 nT	15 %
13/07/70	400 nT	-317 nT	-307 nT	3 %

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

#### 8.1 - MÉDIAS ANUAIS

Como a média de AE em 1974 é maior que a média de AE em 1979, pode-se dizer que 1974 apesar de estar próximo ao ano de mínima atividade solar, a atividade auroral esteve mais intensa que em 1979 ano de máxima atividade solar. Conclui-se que a presença de buracos coronais no Sol, típica de anos de menor atividade solar e responsável por feixes recorrentes de partículas, apresenta-se especialmente ativa neste ano e deve ser responsável por esta alta atividade auroral em 1974. O índice Dst médio de 1979 é maior que Dst médio de 1974 já que em 1979 há uma maior ocorrência de tempestades geomagnéticas e portanto uma maior atividade da corrente de anel. A média do índice ap em 1974 é maior que a média de ap em 1979, seguindo portanto o comportamento do índice AE.

#### 8.2 - MÉDIAS MENSAIS

Observou-se que tanto em 1974 como em 1979 houve um incremento das médias dos índices, e portanto da atividade geomagnética, perto dos equinócios. Esta variação sazonal é maior para o índice Dst, média para o índice ap e menor para o índice AE.

### 8.3 - CORRELAÇÕES ANUAIS

As correlações apx-Dst e AEx-Dst revelam uma defasagem temporal (lag) de em média 1 intervalo (atraso de 0 a 3 horas no Dst). Esta defasagem não existe para apxAE. Deve-se portanto às características físicas da corrente de anel e também à construção do índice Dst.

As correlações assumem valores crescentes na ordem: AEx-Dst, apx-Dst, apxAE. Isto se deve a razões de ordem geométrica (distribuição dos observatórios) e de ordem física, já que as correntes responsáveis pelas perturbações magnéticas provêm de fenômenos comuns ou inter-relacionados. As correlações em 1974 são melhores do que as correlações em 1979 já que em 1974 a atividade geomagnética apesar de não ser tão intensa como em 1979 é no entanto bem mais constante e duradoura.

### 8.4 - CORRELAÇÕES MENSAIS

Para os dois anos as correlações mensais também apresentam variações sazonais de forma que quando as médias mensais dos índices são altas as correlações do mês correspondentes também o são. Isto reforça a conclusão sobre a variação sazonal da atividade geomagnética. Ainda observou-se uma forte influência do nível de Dst na correlação apx-Dst, ou seja, quanto maior -Dst maior apx-Dst.

#### 8.5 - CORRELAÇÕES NOS PERÍODOS DE ATIVIDADE GEOMAGNÉTICA

Observou-se ainda que na fase principal das tempestades (1979), as correlações AEx-Dst, apx-Dst e apxAE, são menores que na fase de recuperação das mesmas. Isto indica a existência de uma dinâmica mais intensa e uma maior amplitude de variação dos índices na fase principal do que na fase de recuperação das tempestades. A defasagem entre ap e Dst e AE e Dst se intensifica na fase de recuperação já que a dissipação da corrente de anel é bem mais lenta.

Pode-se perceber que durante as tempestades, com a exceção do caso apxAE (fase principal) onde AE sofre variações intensas e ap é mais sensível a Dst nesta fase, a correlação entre os índices aumenta em relação à correlação anual, já que os índices acusam conjuntamente uma intensificação na atividade magnetosférica. Durante as tempestades, com a intensificação da corrente de anel e portanto de Dst, a correlação apx-Dst passa a ser a melhor das três.

#### 8.6 - CORRELAÇÃO MÚLTIPLA

Pela primeira vez estudou-se uma correlação múltipla entre os índices AE, Dst e ap. Os resultados deste ajuste apresentaram-se melhores que os realizados através de correlações simples (entre dois índices). Serão também melhores quanto maior os intervalos de tempo das médias utilizadas. Será possível através deste método estimar um dos índices AE, ap ou Dst a partir de dois conhecidos e então

preencher com essas estimativas as lacunas existentes nos registros dos índices, que muitas vezes inviabilizam o estudo de parâmetros a eles associados.

#### 8.7 - RELAÇÃO ENTRE A SOMA DOS VALORES HORÁRIOS DE AE DURANTE A FASE PRINCIPAL DAS TEMPESTADES E O VALOR MÍNIMO DE Dst ATINGIDO EM CADA UMA DELAS

Realizou-se para 22 tempestades um estudo da soma de AE durante a fase principal e durante 9, 10, 11, 12 e 13 horas que precedem o mínimo valor de Dst atingido nestas tempestades. Fica patente a melhor correlação da soma de AE com  $Dst_{\text{mín.}}$  para o intervalo de aproximadamente 10 horas. Pôde-se com este ajuste calcular a partir dos valores de AE o valor mínimo de Dst com boa precisão.

#### 8.8 - EVOLUÇÃO DO AE COM O Dst DURANTE AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

A evolução do AE com o Dst pode se dar de três formas diferentes. Para tempestades moderadas o índice AE aumenta com a diminuição de Dst. Para tempestades intensas temos a saturação de AE comentada por Akasofu (1981) e para tempestades bem intensas AE apresentou um comportamento diverso dos anteriores que no entanto não pode ser generalizado devido à pequena ocorrência deste tipo de tempestades.

8.9 - CORRELAÇÃO ENTRE O VALOR MÍNIMO DE Dst E O VALOR MÁXIMO DE ap ATINGIDOS DURANTE AS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Obteve-se para 46 tempestades de 1979 o seguinte ajuste:

$$-Dst_{\text{mín.}} = 0,7ap_{\text{máx.}} + 27.$$

Pôde-se tendo somente o valor mínimo de Dst para uma tempestade, estimar o valor máximo de ap para esta mesma tempestade e vice-versa. Sendo os registros de Dst bem mais recentes que os de ap, torna-se possível estimar valores mínimos de Dst para tempestades ocorridas antes de 1957, data dos primeiros registros de Dst.

8.10 - CONCLUSÕES GERAIS

Pôde-se com este estudo sobre a atividade magnetosférica através dos índices obter de maneira simples várias informações interessantes sobre processos físicos de dissipação de energia na magnetosfera e simultaneamente entender melhor a acuidade de cada índice.

A existência de índices mais precisos e com maior resolução temporal e espacial possibilitaria uma maior compreensão dos fenômenos que monitoram. A criação de um índice Dst para a corrente de anel assimétrica baseado em um número maior de estações e de um índice ap horário são exemplos de possíveis melhoras neste sentido.

Na Tabela 8.1 apresentamos resumidamente os principais resultados quantitativos deste trabalho.

**TABELA 8.1 - OS PRINCIPAIS RESULTADOS QUANTITATIVOS DESTE TRABALHO**

MÉDIAS ANUAIS	<AE>(nT)	<ap>(nT)	<-Dst>(nT)
1974	282,7	19,6	13,9
1979	221,2	14,5	16,3

CORRELAÇÕES ANUAIS(%)	AEx-Dst	apx-Dst	apxAE
1974	65,4	71,2	79,1
1979	57,7	61,9	71,3

CORRELAÇÕES NAS TEMPESTADES (%)	AEx-Dst	apx-Dst	apxAE
fase principal	74,9	77,3	62,8
fase de recuperação	73,5	82,4	79,9

R MÚLTIPLA	apxAEEx-Dst	AJUSTES
1974	R = 83,2%	$ap = -1,1 + 5,5 \times 10E-2 AE + 36,6 \times 10E-2 (-Dst)$
1979	R = 75,7%	$ap = -0,6 + 5,1 \times 10E-2 AE + 23,0 \times 10E-2 (-Dst)$

R (Dst mín. x $\Sigma AE$ )	
fase principal	R = 58,6%
10 horas	R = 86,0% $\rightarrow -Dst \text{ mín.} = 0,0258 \Sigma AE - 36,5$

R (Dst mín. x ap máx.)	R = 88,1% $\rightarrow -Dst \text{ mín.} = 0,7 ap \text{ máx.} + 27$
------------------------	--

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akasofu, S.-I. Relationships between the AE and Dst indices during geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, 86(A6):4820-4822, June 1981.
- Allredge, L.R. Instruments and geomagnetic stations. In: Matsushita, S.; Campbell W.H. **Physics of geomagnetic phenomena**. New York, Academic, 1964. cap. I-2, p. 29-66.
- Allen, J.H.; Feynman, J. Review of selected geomagnetic activity indices. In: International solar-terrestrial predictions: **Solar-terrestrial predictions proceedings**, Boulder, Apr. 23-27, 1979. Washington, D.C., NOAA, 1979. v. 2, p. 385-398.
- Baumjohann, W. Merits and limitations of the use of geomagnetic indices in solar wind-magnetosphere coupling studies. In: Kamide, Y.; Slavin, J.A. **Solar wind-magnetosphere coupling**. Tokyo, Terra Scientific Publishing Company, 1986. p.3-15.
- Bevington, P.R. **Data reduction and error analysis for the physical sciences**. New York, McGraw-Hill, 1969.
- Campbell, W.H. Occurrence of AE and Dst geomagnetic index levels and the selection of the quietest days in a year. **Journal of Geophysical Research**, 84(A3):875-881, Mar. 1979.
- Clúa de Gonzalez, A.L.; Gonzalez, W.D.; Dutra, S.L.G.; Tsurutani, B.T. Periodic variation in the geomagnetic activity: a study based on the Ap index. Submetido para publicação no **Journal of Geophysical Research**, 1992.
- Davis, T.N.; Parthasarathy, R. The relationship between polar magnetic activity DP and growth of the geomagnetic ring current. **Journal of Geophysical Research**, 72(23):5825-5836, Dec. 1967.
- Feldstein, Y.I. Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary parameters. **Space Science Reviews**, 59(1/2):83-165, 1992.

- Gonzalez, W.D.; Gonzalez, A.L.C.; Tsurutani, B.T. Interplanetary-magnetosphere coupling during intense geomagnetic storms at solar maximum. **Geofísica Internacional**, 31(1):11-18, 1992.
- Hirman, J.W.; Heckman, G.R.; Greer, M.S.; Smith, J.B. Solar and geomagnetic activity during cycle 21 and implications for cycle 22. **EOS, Transactions**, 69(42):962-973, Oct. 1988.
- Jursa, A.S. **Handbook of geophysics and the space environment**. Springfield, Air Force Geophysics Laboratory, United States Air Force, 1985.
- Kamide, Y.; Fukushima, N. Analysis of magnetic storms with DR-indices for equatorial ring current field. **Report of Ionosphere and Space Research in Japan**, 25(2):125-162, 1971.
- Kawasaki, K.; Akasofu, S.-I. Low-latitude DS component of geomagnetic storm field. **Journal of Geophysical Research**, 76(10):2396-2405, Apr. 1971.
- Kroehl, H.W. A critical evaluation of the AE indices. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 41(3): 317-329, 1989.
- Lincoln, J.V. Geomagnetic indices. In: Matsushita, S.; Campbell W.H. **Physics of geomagnetic phenomena**. New York, Academic, 1964. cap. I-3, p. 67-100.
- Mayaud, P.N. **Derivation, meaning and use of geomagnetic activity indices**. Washington, D.C., American Geophysical Union, 1980.
- Mendes Jr., O. **A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas (1978 - 1979)**. (Tese de Doutorado em Ciência Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, ago. 1992. 269 p. (INPE-5445-TDI/491).
- Menvielle, M.; Berthelier, A. The K-derived planetary indices: description and availability. **Reviews of Geophysics**, 29(3):415-432, Aug. 1991.
- Merril, R.T.; McELHINNY, M.W. **The Earth's magnetic field**. New York, Academic, 1983.
- National Academy of Sciences (NAS) **Space plasma physics: the study of solar-system plasmas**. Washington, D.C., 1978. v. 1.

- Nishida, A. **Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere**. New York, Springer-Verlag, 1978.
- Papagiannis, M.D. **Space physics and space astronomy**. New York, Gordon and Breach Science, 1978.
- Parkinson, W.D. **Introduction to geomagnetism**. London, Scottish Academic, 1983.
- Rostoker, G. Geomagnetic Indices. **Reviews of geophysics and space physics**, 10(4):935-950, Nov. 1972.
- Rostoker, G. A quantitative relationship between AE and Kp. **Journal of Geophysical Research**, 96(A4):5853-5857, Apr. 1991.
- Russell, C.T.; McPherron, R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, 78(1):92-108, Jan. 1973.
- Sugiura, M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY. In: ——— **Annals Of The International Geophysical Year**. New York, Pergamon, 1964. v. 35, part I.
- Sugiura, M. What do we expect in magnetic activity in the current solar cycle? **EOS, Transactions**, 61(43): 673-675, Oct. 1980.

APÊNDICEO MÉTODO DE OBTENÇÃO DO ÍNDICE DST

Apresenta-se a seguir o método de obtenção do índice Dst (Baumjohann, 1986; Rostoker, 1972; Sugiura, 1964). Na  $i$ -ésima estação, o campo magnético horizontal  $H^1$  observado no tempo universal  $t$  pode ser considerado como a soma do campo permanente  $H_0^1$  (incluindo a variação secular), a variação diária solar  $Sq^1$ , a variação diária lunar  $L^1$  e uma perturbação  $D^1$ , podendo ser escrito como:

$$H^1(t) = H_0^1(t) + Sq^1(t) + L^1(t) + D^1(t). \quad (A.1)$$

A variação lunar, por ser pequena, foi subseqüentemente desprezada. O valor médio de  $H^1(t)$  é calculado sobre cada ano e denominado  $H_{00}^1$ . A contribuição do campo permanente  $H_0^1(t)$  pode ser escrita, conforme sugestão feita na análise dos dados do Ano Internacional Geofísico 1957-1958 (Sugiura, 1964), como:

$$H_0^1(t) = H_{00}^1 + \Delta H_0^1(t). \quad (A.2)$$

Tomando agora o desvio do valor observado  $H^1(t)$  de  $H_{00}^1$ , com:

$$\Delta H^1(t) = H^1(t) - H_{00}^1, \quad (A.3)$$

e tomando a média de cada parâmetro sobre todas as estações, tem-se:

$$\langle \Delta H(t) \rangle = \langle \Delta H_0(t) \rangle + \langle Sq(t) \rangle + \langle D(t) \rangle. \quad (A.4)$$

A parcela  $\langle Sq(t) \rangle$  pode ser determinada da seguinte maneira. Em cada estação, para os 5 dias calmos internacionais, a

variação média de 24 horas a partir da meia-noite em tempo universal (reestruturada mais adiante) foi subtraída de cada um dos 25 valores médios horários; a variação entre 2 valores consecutivos (meias-noites) foi suposto ser linear. Os 25 valores médios horários alterados representam a variação Sq em cada estação e os valores horários foram promediados sobre todas as estações para produzir o valor Sq médio. Esse Sq médio foi expandido em uma série de fourier dupla com o número do mês M e o tempo universal t como variáveis, assim:

$$\langle Sq \rangle = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=1}^6 A_n^m \cos(m.t + \alpha_m) \cdot \cos(n.M + \beta_n), \quad (A.5)$$

e para cada dia um Sq médio foi sintetizado dessa série. Em cada dado instante t, o valor de Sq assim obtido definia  $\langle Sq(t) \rangle$ .

Diferentes técnicas estão agora sendo utilizadas na obtenção do nível de referência da linha de base e da variação do Sq no cálculo do índice Dst. Atualmente, o nível de referência é obtido pela expansão do valor da linha de base em uma série de potências no tempo, onde os coeficientes para os termos até o termo quadrático são determinados pelo método dos mínimos quadrados e as médias anuais do H são usadas para os 5 dias calmos internacionais de cada mês. Dessa maneira o efeito das variações seculares é removido através do cálculo do valor médio anual de H. Em adição a essa modificação, a contribuição Sq é agora determinada em cada estação (como já descrito nesta secção). No entanto, o valor de Sq subtraído é estabelecido para cada estação separadamente antes da promediação sobre as estações que contribuem. Além do mais, a mudança não-cíclica em Sq é agora removida

supondo ser ela linear da meia-noite em hora local até a meia-noite seguinte em hora local durante os dias calmos internacionais.

Para os dados do Ano Geofísico Internacional, a quantidade  $\langle \Delta H(t) - S_q(t) \rangle$  ( =  $\langle \Delta H_0 \rangle + \langle D(t) \rangle$  ) foi calculada, permanecendo próxima de um nível fixo durante os períodos calmos. Isso significava que as variações seculares foram quase totalmente eliminadas no tratamento das médias e, portanto,  $\langle \Delta H_0(t) \rangle$  foi suposto ser constante. Essa constante estabelece o nível zero para o índice Dst.

Todos os dias calmos em que 2 ou mais dias sucessivos tinham o índice ap (relacionado às correntes que fluem na ionosfera) não excedendo a 7 foram selecionados, e a quantidade  $\langle \Delta H(t) - \langle S_q(t) \rangle$  ( =  $\langle \Delta H_0 \rangle + \langle D(t) \rangle$  ) foi promediada sobre todos esses dias calmos escolhidos. Essa média, que resultou em 31 nT, foi considerada como a constante  $\langle \Delta H_0 \rangle$ .

Desde que as estações estão todas em torno de baixas latitudes e distribuídas quase uniformemente em longitude,  $D(t)$  pode ser assumido como  $Dst(t)$ , desconsiderando uma pequena perturbação  $D_s$  devida à interferência de outras fontes.

Essas considerações permitem descrever operacionalmente o índice Dst como:

$$Dst(t) = \langle H(t) - H_{00} \rangle - \langle S_q(t) \rangle - \langle \Delta H_0 \rangle. \quad (A.6)$$

O valor do índice Dst foi normalizado para o equador magnético após ter sido multiplicado por  $\sec(\theta_m)$ , onde  $\theta_m$  é a latitude geomagnética média dos observatórios cujos dados

são utilizados. Esse valor normalizado é agora o índice Dst equatorial (Mendes Jr., 1992).