



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-15173-TDI/1290

**DEPENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REGIÃO-D  
IONOSFÉRICA COM O CICLO DE ATIVIDADE SOLAR**

Alessandra Abe Pacini Schmidt Marques

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Jean-Pierre Raulin e Mangalathayil Ali Abdu, aprovada em 6 de julho de 2006.

INPE  
São José dos Campos  
2008

Publicado por:

**esta página é responsabilidade do SID**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**Solicita-se intercâmbio  
We ask for exchange**

**Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-15173-TDI/1290

**DEPENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REGIÃO-D  
IONOSFÉRICA COM O CICLO DE ATIVIDADE SOLAR**

Alessandra Abe Pacini Schmidt Marques

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Jean-Pierre Raulin e Mangalathayil Ali Abdu, aprovada em 6 de julho de 2006.

INPE  
São José dos Campos  
2008

523.745

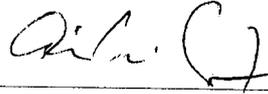
Marques, A.A.P.S.

Dependência das propriedades da Região-D ionosférica  
com o ciclo de atividade solar / Alessandra Abe Pacini  
Schmidt Marques. - São José dos Campos: INPE, 2006.  
118 p. ; (INPE-15173-TDI/1290)

1. Região-D ionosférica. 2. Propagação sub-ionosférica.  
3. Ciclo de atividade solar. 4. Relações solares-terrestres.  
5. Raios-X solares. I. Título.

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

Dra. **Alicia Luiza Clúa de Gonzalez Alarcon**



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. **Mangalathayil Ali Abdu**



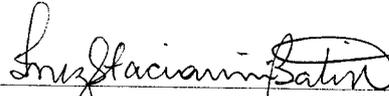
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. **Jean-Pierre Raulin**



Orientador(a) / CRAAM / São Paulo - SP

Dra. **Inez Staciarini Batista**



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. **Vladimir Makhmoutov**



Convidado(a) / LPI/ Rússia / Moscow - RU

Dr. **Pierre Kaufmann**



Convidado(a) / CRAAM / São Paulo - SP

Aluno (a): **Alessandra Abe Pacini Schmidt Marques**

São José dos Campos, 06 de julho de 2006





*“Na lição que o Sol me traduz: viver da própria luz!”.*

*Djavan (Luz)*



*Dedico este trabalho com carinho a meus pais e melhores amigos: Áderson e Emília.*



## AGRADECIMENTOS

Inicio estes agradecimentos por aquele que me acolheu em seu grupo e possibilitou que eu desenvolvesse minha iniciação científica, meu trabalho de conclusão de curso da graduação e essa dissertação de mestrado. Ao **Prof. Pierre Kaufmann**, coordenador do Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie, CRAAM, minha gratidão por seu apoio ao longo desses seis anos de trabalho, por seu carinho e por suas valiosas contribuições. Agradeço de forma especial ao **Prof. Jean-Pierre Raulin**, que me orientou desde o início, em 2000, e contribuiu de diferentes maneiras para o meu amadurecimento profissional e pessoal, me acompanhando nas pesquisas sobre Física Solar durante quatro anos e sobre Relações Solar-Terrestre no período desse mestrado. Sou grata ao **Prof. Mangalathayil Ali Abdu** por ter confiado no meu trabalho e por ter se mantido sempre paciente e pronto a me auxiliar, contribuindo com valiosas sugestões para essa dissertação. Aos **Profs. Pierre Kaufmann, Vladimir Makhmoutov, Inez Staciari****Batista e Alicia L. C. Gonzalez**, que gentilmente fizeram parte da banca examinadora deste trabalho, meu agradecimento pela cuidadosa avaliação realizada, pelas sugestões e pelo carinho. Em seguida, agradeço minha 'família estendida', **Papai, Mamãe, Aline, Zé, Sílvio e Luíza**, que me apoiou em todos os momentos, incluindo os piores! Um agradecimento especial devo a **Vinicius Bordalo Schmidt Marques**, Vini, que com seu amor foi sendo promovido nos últimos dois anos... De namorado, a noivo. De noivo, a marido... Sempre muito compreensivo e companheiro, principalmente nas tardes em que passei estudando para os créditos, lendo artigos, montando apresentações, ou apenas 450 km distante. Recebi o apoio de amigos, antigos e recentes, sem o qual acredito que não teria concluído esta etapa... Então, deixo aqui registrada meus sinceros agradecimentos: À minha grande amiga e comadre **Juliana Bonás Sasso** e à sua família querida pelo enorme carinho e confiança. A todos os amigos do CRAAM, pesquisadores, pessoal do administrativo, alunos e pessoal da limpeza, que sempre me ajudaram como puderam e tornaram mais leves até mesmo os dias mais cinzentos. Em especial, aos amigos: **Botti, Neidinha, Arline, Rodney, Paulinho e Márcio**. Aos amigos do INPE, companheiros de créditos, provas e listas, bons e maus momentos... Agradeço por todo o carinho que recebi dessas pessoas especiais. Não poderia deixar de registrar meu agradecimento mais que especial aos queridos **Pedrina, Christiano, Jonas, Cida e Ceci (fofa)**, que se tornaram minha família joesense. Finalizo agradecendo o essencial suporte financeiro da **CAPES** neste período do mestrado.



## RESUMO

O objetivo desta dissertação é contribuir para o melhor entendimento da ionosfera quiescente em diferentes condições de atividade solar. Para tanto, estudamos a sua resposta a eventos perturbadores externos constituídos pelas emissões em raios-X durante explosões solares. Utilizamos os fluxos em raios-X obtidos com o satélite GOES e os eventos ionosféricos decorrentes, SPAs (*Sudden Phase Anomalies*), observados na fase de sinais de VLF (*Very Low Frequency*) recebidos nas estações de Atibaia e Inubo nos períodos de 1990-1992 (máximo do ciclo solar) e 1994-1997 (mínimo do ciclo solar). Mostramos que a região-D é mais sensível aos eventos solares durante períodos de mínimo do ciclo de atividade solar, o que corresponde a uma altura de referência maior neste período. O estudo detalhado da distribuição espectral em raios-X de cada explosão solar permitiu identificar a energia dos fótons responsáveis pelos eventos ionosféricos, e encontrar a relação entre a energia depositada por eles e a importância da resposta ionosférica decorrente. Além disto, foi visto que apenas durante explosões solares o fluxo destes fótons torna-se capaz de modificar as propriedades elétricas da baixa região-D. Sendo assim, a emissão solar quiescente em raios-X não é relevante na manutenção da baixa ionosfera diurna, reforçando o papel controlador da radiação solar Lyman- $\alpha$  nesta região. Esses resultados permitiram uma interpretação do comportamento de longo prazo da região-D quiescente, apresentando um novo cenário para o estudo de eventos de ionização transientes (gerados por fótons ou partículas) e abrindo uma nova possibilidade de monitoramento das variações da radiação Lyman- $\alpha$ , ao longo do ciclo solar, através de um índice ionosférico.



# DEPENDENCE OF IONOSPHERIC D-REGION PROPERTIES ON SOLAR ACTIVITY CYCLE

## ABSTRACT

The goal of this work is to provide new clues for a better understanding of the quiescent ionosphere during different solar activity conditions. For that we study the lower ionospheric response to external perturbations, as solar X-rays emitted during flares. We use solar X-ray fluxes provided by GOES satellites, and ionospheric SPA (Sudden Phase Anomalies) observed in VLF (Very Low Frequency) phase signals received at Atibaia and Inubo stations during 1990-1992 (solar maximum) and 1994-1997 (solar minimum). We show that the lower ionosphere is more sensitive to the solar events during periods of minimum of solar activity cycle that corresponded to a higher ionospheric reference height. A careful study of the spectral distribution of the solar X-ray flare allowed us to identify the photon energy band responsible for the ionospheric effects, and to find a relation between the X-ray fluence and the size of the subsequent ionospheric response. Moreover we show that only during solar flares the flux of these photons is able to modify the electrical properties of the low D-region. Therefore the quiescent solar X-ray fluxes are not important in the formation of the day time lower ionosphere, confirming the role of the solar Lyman- $\alpha$  radiation to maintain this region. Our results allow a better understanding of the long-term behavior of the quiescent D region, providing a new framework to study transient ionizing events (produced by photons or particles), and suggest a new genuine way of monitoring the long-term Lyman- $\alpha$  variations, using an ionospheric index.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1 Ionosfera Terrestre – Região-D .....	28
1.2 Propagação de Ondas Eletromagnéticas de Baixas Frequências no Guia de Onda Terra-Ionosfera .....	36
1.3 Eventos Transientes de Ionização na Região-D .....	44
1.4 Instrumentação .....	52
<b>2 DADOS e METODOLOGIA</b> .....	<b>57</b>
2.1 Dados Ionosféricos: SPA .....	57
2.2 Dados Solares: Emissão em Raios-X .....	63
<b>3 DEPENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REGIÃO-D IONOSFÉRICA COM O CICLO DE ATIVIDADE SOLAR</b> .....	<b>73</b>
3.1 Sobre a Detectabilidade de Explosões Solares em Raios-X na Região-D ionosférica .....	75
3.2 Sensibilidade da Região-D Ionosférica: uma Dependência com o Ciclo de Atividade Solar .....	79
3.3 Discussão Geral .....	84
<b>4 RESULTADOS RECENTES E PERSPECTIVAS</b> .....	<b>91</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>101</b>
<b>APÊNDICE A – CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO</b> .....	<b>105</b>
<b>ANEXO A - ARTIGOS</b> .....	<b>107</b>



## LISTA DE FIGURAS

1.1 - Concentração dos principais constituintes da atmosfera neutra.....	29
1.2 - Concentração de alguns dos principais constituintes neutros da baixa ionosfera.	31
1.3 - Ângulo zenital e comprimento do trajeto (s) atravessado pela radiação na atmosfera. ....	33
1.4 - Altitudes nas quais a profundidade óptica é unitária em função do comprimento de onda da radiação incidente na atmosfera. ....	34
1.5 - Picos de densidade eletrônica que dividem a ionosfera em suas regiões.....	35
1.6 - Perfil típico da frequência de colisão da baixa ionosfera, indicando seu valor em 70 km de altura. ....	39
1.7 - Curvas de atenuação para o primeiro e segundo modo de propagação em função da frequência. ....	41
1.8 - Curvas de atenuação para o primeiro modo de propagação, em função da frequência, para diferentes alturas do guia de onda .....	42
1.9 - Velocidade de fase em função da frequência da onda para diferentes alturas do guia de onda.....	43
1.10 - Alturas de penetração para elétrons e prótons na atmosfera terrestre em função de suas energias de incidência, para um caso no qual a ação do campo geomagnético é desconsiderada.....	47
1.11 - Exemplo de um evento SPA detectado na fase do sinal de VLF recebido em Atibaia no dia 24/03/91, cujo máximo avanço de fase ocorreu em torno de 14:30 UT.....	49
1.12 - Exemplos de antenas de VLF em 'loop': quadrada (acima) instalada na EACF, e triangular (abaixo) instalada atualmente no Rádio Observatório de Itapetinga.	55
1.13 - Diagrama simplificado do funcionamento de um receptor de ondas de VLF.....	56
2.1 - Cobertura de dados ionosféricos utilizados neste estudo sobreposta à variação de 11 anos dos proxies de Lyman- $\alpha$ e EUV no período. As linhas horizontais representam o período de dados utilizados que foram recebidos em Atibaia (linhas azuis).....	58
2.2 - Tela do programa GEOCLOCK. Representação da parcela iluminada da Terra no dia 15/02/2006, às 11:25UT, com um ângulo zenital de 56.48 graus em Atibaia. As linhas amarelas representam os trajetos utilizados neste trabalho. ...	59
2.3 - Relação existente entre medidas de eventos SPA feitas em dois trajetos distintos (INUBO-LR e INUBO-NWC) e que ocorreram sob valores de $\chi$ próximos, quando normalizadas pelo tamanho do trajeto no qual a medida foi feita. ....	60
2.4 - Relação entre a resposta ionosférica medida por diferentes trajetos e os ângulos zenitais correspondentes. ....	62
2.5 - Variação da altura de referência $h'$ com o ângulo zenital $\chi$ durante máximo (tracejado) e mínimo solar (contínuo). Os ângulos negativos indicam o período do amanhecer, enquanto os positivos representam o entardecer. ....	63
2.6 - Exemplo do perfil temporal do fluxo de raios-X detectados pelo GOES no canal de energia 1 - 8 Å durante uma explosão solar, sobrepondo-se ao nível de fluxo pré-evento. Esse aumento do fluxo pode durar desde alguns minutos até horas...	64
2.7 - Exemplos da importância da subtração do nível pré-evento dos dados raios-X detectados pelo GOES no canal de energia 1 - 8Å. Vemos que nestes casos, o	

nível de emissão integrada no disco solar representa 45%, 45% e 50% do pico do evento P1, P2 e P3, respectivamente.....	65
2.8 - Temperaturas efetivas do plasma solar em função das razões dos fluxos medidos pelos dois detectores do satélite GOES.....	67
2.9 - Exemplo da construção e validação do espectro térmico utilizado neste trabalho. (A) Perfil temporal de uma explosão solar em raios-X observados pelo canal de 1-8 Å; (B) Um exemplo de espectro obtido através da temperatura e da medida de emissão de um determinado instante de tempo do evento; (C) Função de transferência do canal de 1 – 8 Å; e (D) Fluxo calculado na banda de 1 – 8 Å sobreposta aos dados observados pelos sensores de raios-X.....	68
2.10 - Curvas típicas da taxa de produção de pares de elétrons-íons por fótons com diferentes comprimentos de onda (0.5, 1, 2, 3 e 4 Å, e seus intermediários), em função da altura, mostrando a faixa de energias de fótons raios-X responsáveis pela produção de excessos de ionização abaixo de 70km (SPA). As curvas da esquerda são referentes a um intenso evento solar que produziu um grande SPA, e as do quadro da direita são referentes a um evento mais fraco que produziu um pequeno SPA. As taxas de produção referentes à radiação Lyman- $\alpha$ também estão indicadas na figura. A curva grossa representa a taxa de produção eletrônica devida à emissão em raios-X.....	69
2.11 - Espectros térmicos em raios-X durante uma explosão solar (linha contínua) e durante um período quiescente típico de máximo solar (tracejado) e mínimo solar (pontilhado).....	70
2.12 - Taxas de produção de pares de elétron-íon devidas a emissões quiescentes de diferentes níveis (C2: esquerda, equivalendo a um fluxo de $2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ; e B7: direita, equivalendo a $7 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ para o canal de energia de 1-8 Å, comparadas às curvas da taxa de ionização por radiação Ly- $\alpha$ na mesma região da ionosfera. A curva grossa representa a taxa total de produção eletrônica devida à emissão em raios-X. Foi utilizado o mesmo intervalo de energia dos fótons raios-X utilizado na figura 2.10.....	71
3.1 - Diagrama de dispersão das características (fluxo de pico e fator de dureza, ou R) das explosões solares que geraram SPAs detectados. ....	76
3.2 - Distribuição dos valores de fluxo de pico dos eventos solares em raios-X que produziram SPAs, para o canal de energia de 1-8 Å, durante máxima (tracejada) e mínima (contínua) atividade solar. ....	78
3.3 - Distribuições acumuladas dos fluxos de pico das explosões solares, no canal de energia de 1-8 Å que produziram SPAs nos diferentes períodos do ciclo de atividade do Sol (máximo: tracejada; mínimo: contínua). As setas indicam os valores de fluxo abaixo dos quais a probabilidade de ocorrência de SPAs é < 15%.....	78
3.4 - Correlações entre as amplitudes dos SPAs e as fluências $F_X$ das explosões solares responsáveis na banda de energia de 0.5 a 2 Å, para cada um dos períodos do ciclo de atividade solar. ....	81
3.5 - Coeficientes de correlação da relação entre as amplitudes dos SPAs e as fluências $F_X$ das explosões solares responsáveis em diferentes bandas de energia dos raios-X, justificando a escolha do intervalo de 0.5 a 2 Å. ....	82
3.6 - Correlações entre as amplitudes dos SPAs e as fluências $F_X$ das explosões	

solares responsáveis na banda de energia de 0.5 a 2 Å, para cada um dos períodos do ciclo de atividade solar. ....	83
3.7 - Indicação da existência de variações da concentração eletrônica das regiões E e F ao longo do ciclo solar. ....	87
3.8 - Perfis da densidade eletrônica da região-D obtidos considerando diferentes valores para os parâmetros ionosféricos de Wait: $\beta$ e $h_0$ .....	88
4.1 - Oito eventos que não fazem parte do banco de dados utilizado neste trabalho e que foram detectados por diferentes instrumentos (Dunedin e Atibaia), sobrepostos à correlação correspondente ao período de baixa atividade solar encontradas na figura 3.6.....	92
4.2 - Curvas de fluxo de prótons, com energias > 100 MeV, mostrando eventos SPE ocorridos nos dias 17/01/2005 (acima) e 29/10/2003 (abaixo). Sobreposto à curva do dia 29/10/2003, em linhas tracejadas, está indicado o perfil temporal de raios-cósmicos do período, além da seta que mostra o horário do máximo do evento SPA. ....	94
4.3 - Variação dia-noite da fase de sinais de VLF observados pela estação receptora do ROI-Atibaia, no trajeto NAA (Cutler-EUA)-Atibaia. ....	95
4.4 - Distribuição geográfica dos receptores que irão compor a rede SAVNET com relação à região da AMAS, e exemplos de trajetos de propagação a partir das estações transmissoras NAA (Cutler-EUA), NLK (Seattle-EUA) e NPM (Havaí), atualmente em operação. Os transmissores estão representados pelos círculos vermelhos e os receptores pelos amarelos. ....	96
4.5 - Evento SPA observado pela estação receptora de Dunedin, em diferentes trajetos. ....	97



## LISTA DE TABELAS

1.1 - Valores dos potenciais de ionização para alguns dos principais constituintes atmosféricos da região da baixa ionosfera.....	31
1.2- Alguns valores obtidos, para determinados períodos do ciclo solar, para o fluxo mínimo de raios-X (em diferentes faixas de energia) capaz de provocar um SPA. Os fluxos estão dados em W/m <sup>2</sup> . .....	52
2.1 - Estações transmissoras da rede Ômega e receptoras utilizadas neste trabalho, com suas respectivas coordenadas geográficas e frequências de operação.....	57



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMAS	Anomalia Magnética do Atlântico Sul
ARG	estação transmissora de VLF - Argentina
ATI	estação receptora de VLF - Atibaia
AUS	estação transmissora de VLF - Austrália
CLIMAX	estação norte-americana detectora de raios cósmicos
CRAAM	Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie
CME	<i>Coronal Mass Ejection</i>
EACF	Estação Antártica Comandante Ferraz
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i> - ondas eletromagnéticas entre 3 e 30 Hz
EUV	<i>Extreme UltraViolet</i>
GLE	<i>Ground Level Enhancement</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
HAIKU	estação transmissora de VLF - Havaí
HF	<i>High Frequency</i> - ondas eletromagnéticas de frequências entre 3 e 30 MHz
I <sub>SPA</sub>	Importância do evento SPA, em graus
INU	estação receptora de VLF - Japão
L	estação transmissora de VLF - Libéria
LR	estação transmissora de VLF - La Reunion
Ly- $\alpha$	radiação da linha Lyman- $\alpha$ com $\lambda = 1216 \text{ \AA}$
NAA	estação norte-americana transmissora de VLF - Cutler
NDAK	estação norte-americana transmissora de VLF - Dakota do Norte
NLK	estação norte-americana transmissora de VLF - Seattle
NPM	estação transmissora de VLF - Havaí
NWC	estação transmissora de VLF - Austrália
PCA	<i>Polar Cap Absorption Event</i>
POES	<i>Polar Operational Environmental Satellites</i>
RG	Rigidez Geomagnética
RMI	Rigidez Magnética Interplanetária
ROI	Rádio Observatório de Itapetinga - Atibaia-SP
SAVNET	<i>South America VLF NETwork</i> - futura rede de receptores de ondas de VLF
SCNA	<i>Sudden Cosmic Noise Absorption</i>
SEA	<i>Sudden Enhancement of Atmospherics</i>
SES	<i>Sudden Enhancement of Signal</i>
SFD	<i>Sudden Frequency Deviation</i>
SID	<i>Sudden Ionospheric Disturbances</i>
SPA	<i>Sudden Phase Anomalies</i>
SPE	<i>Solar Proton Event</i>
SWF	<i>Short Wave Fadeout</i>
TE	modo de propagação elétrico transversal
TEM	modo de propagação eletromagnético transversal
TM	modo de propagação magnético transversal
VLF	<i>Very Low Frequency</i> - ondas eletromagnéticas de frequências entre 3 e 30 kHz



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Latinos

- A área do 'loop' de uma antena de ondas de VLF
- $A_e$  abertura efetiva de uma antena de ondas de VLF
- B componente do campo magnético perpendicular ao movimento dos elétrons
- $B_0$  módulo do campo magnético
- b número de voltas do fio condutor em uma antena de VLF em 'loop'
- c velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo
- d distância entre dois pontos na superfície da Terra
- $F_p$  fluxo de pico de uma explosão solar em raios-X
- $F_x$  fluência de fótons com  $0.5 \leq \lambda \leq 2 \text{ \AA}$
- f frequência de uma onda eletromagnética
- $H_n$  escala de altura de constituintes atmosféricos neutros
- h altura de um ponto na atmosfera
- $h_0$  altura de referência
- $h'$  altura da região-D perturbada
- $I_\infty$  intensidade da radiação solar fora da atmosfera terrestre
- k número de onda
- $m_e$  massa do elétron
- N índice de refração
- $N_e$  densidade eletrônica
- $n_n$  densidade de um dado constituinte neutro atmosférico
- Q taxa de produção de elétrons
- $q_e$  carga do elétron, ou carga elementar
- $r_T$  raio da Terra
- S sensibilidade de uma antena de ondas de VLF
- s distância atravessada pela radiação na atmosfera
- V voltagem de uma antena de ondas de VLF
- $v_\phi$  velocidade de fase de uma onda eletromagnética

### Gregos

- $\beta$  gradiente de condutividade
- $\Delta$  expressa uma variação
- $\epsilon_0$  permissividade do vácuo
- $\theta$  ângulo entre a direção de propagação de uma onda e o vetor **B** local
- $\lambda$  comprimento de onda
- $\mu_0$  permeabilidade magnética do vácuo
- $\nu$  frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras
- $\rho$  ângulo entre o eixo do 'loop' e a direção de **B**
- $\sigma_A$  seção transversal de absorção
- $\tau$  profundidade óptica
- $\phi$  fase de uma onda eletromagnética
- $\chi$  ângulo zenital
- $\Omega$  parâmetro de condutividade
- $\omega$  frequência angular de uma onda eletromagnética
- $\omega_p$  frequência angular de plasma
- $\omega_b$  girofrequência de elétrons no plasma



## 1 INTRODUÇÃO

As ondas eletromagnéticas de frequências muito baixas (VLF - *Very Low Frequency*. 3-30 kHz) que se propagam no guia de onda Terra-ionosfera são utilizadas para o estudo das características elétricas das regiões ionosféricas D (diurna) e E (noturna). Isso porque, ao se propagarem no guia, transportam informações sobre as condutividades elétricas das paredes que as refletiram através de longos trajetos. Ou seja, os sinais de VLF possibilitam o conhecimento das condições elétricas da baixa ionosfera em escalas globais.

O aparecimento e manutenção da região-D diurna depende de diferentes fontes de ionização: Sol, raios-cósmicos e precipitação de partículas energéticas (oriundas do Sol ou dos cinturões de radiação que circundam a Terra). O Sol é a fonte de energia dominante da ionosfera diurna como um todo, mas em especial da baixa ionosfera, pois contribui com fótons de energias responsáveis por sua ionização quiescente (EUV - Extreme Ultraviolet - e Lyman- $\alpha$ ) e transiente (raios-X). Os raios-X solares de comprimentos de onda inferiores a 10 Å são os maiores responsáveis por excessos de produção eletrônica na região-D. Estes eventos são identificados como eventos SPAs (*Sudden Phase Anomalies*) e SESs (*Sudden Enhancement of Signal*) na fase e na amplitude de sinais de VLF, respectivamente.

Através da análise de SPAs causados por explosões solares, identificamos variações na resposta ionosférica em diferentes períodos do ciclo de atividade do Sol. Isso sugere a possibilidade de se utilizar o acompanhamento das características da região-D quiescente (através da sondagem VLF) como ferramenta para monitorar a atividade solar de longo prazo.

Iniciamos este **Primeiro Capítulo** com uma breve revisão sobre as características da ionosfera terrestre, em especial sobre a região-D, seguida por uma discussão sobre o principal método de estudo da baixa ionosfera:

análise de sinais de VLF propagados no guia de onda Terra-ionosfera. Apresentamos ainda uma compilação dos conhecimentos de eventos transientes de ionização na região-D e depois explicamos o funcionamento da instrumentação utilizada neste estudo.

O **Capítulo 2** apresenta a metodologia adotada e o **Capítulo 3** reúne as análises realizadas durante o período de desenvolvimento desta dissertação, acompanhadas pelas discussões pertinentes. Os resultados recentes e as perspectivas geradas a partir dessa dissertação estão apresentados no **Capítulo 4**. O **Capítulo 5** encerra este trabalho, apresentando as conclusões. As contribuições deste trabalho ao estudo da resposta ionosférica às variações de suas fontes ionizantes compõem o Apêndice e os artigos resultantes compõem o **Anexo** dessa dissertação.

### **1.1 Ionosfera Terrestre – Região-D**

A ionosfera pode ser definida como a porção da atmosfera terrestre situada entre aproximadamente 60 km e 1000 km de altitude (variando do dia para a noite), onde a quantidade de elétrons livres embebidos nos gases da atmosfera neutra é suficiente para influenciar a propagação de ondas de rádio. Essa definição foi utilizada pela primeira vez em 1926, pelo físico escocês Sir Robert Watson - Watt, durante seus estudos sobre radares (Davies, 1966 - cap.1 p.1).

Globalmente o meio ionosférico é eletricamente neutro, podendo então ser considerado um plasma. Além dos íons positivos e elétrons livres, a porção inferior da ionosfera (entre ~ 60 e 90 km) apresenta também uma concentração significativa de íons negativos. Atualmente, a ionosfera é vista como um plasma constituído de diferentes espécies de partículas que depende das características da atmosfera neutra, das variações dos fluxos de radiações solares ionizantes e de influências eletrodinâmicas da magnetosfera.

Ionização é o processo no qual íons são gerados, tanto através da absorção de radiação por constituintes neutros quanto por transferência de energia entre dois constituintes durante uma colisão. Na primeira, chamada de **fotoionização**, fótons oriundos principalmente do Sol e com determinadas energias são absorvidos pelos componentes atmosféricos, ionizando-os e aquecendo o meio. Uma parte significativa da ionosfera diurna é gerada pela absorção atmosférica da radiação solar ultravioleta com comprimentos de onda inferiores a 1026 Å (Banks e Kockarts, 1973 - cap. 17, p. 102). Tal radiação ioniza os elementos O (que é o elemento mais abundante em alturas superiores a 100 km), O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> (constituintes mais abundantes abaixo de 100 km). A distribuição em função altura dos principais constituintes neutros da atmosfera está mostrada na FIGURA 1.1.

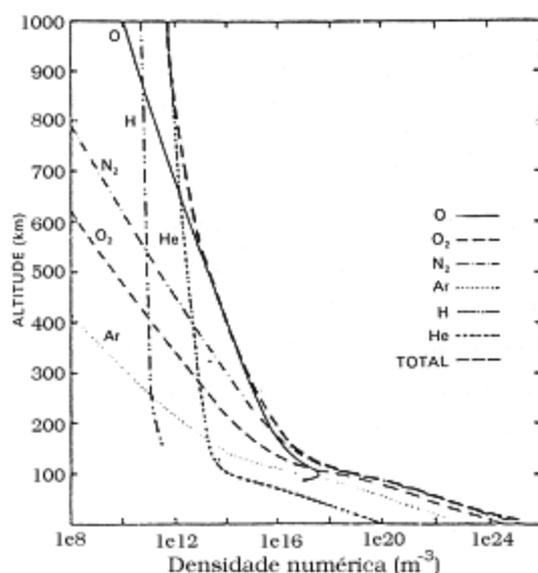


Figura 1.1 - Concentração dos principais constituintes da atmosfera neutra  
FONTE: modificada de Hargreaves (1992 - cap. 4, p. 107)

Os íons formados neste processo de ionização inicial podem se recombinar ou reagir com outras espécies da atmosfera local resultando em outros íons (Hargreaves, 1992, cap. 6, p. 209). Radiações ultravioletas solares com maiores comprimentos de onda participam da ionização de constituintes

minoritários, como, por exemplo, o NO que é ionizado pela radiação Lyman- $\alpha$  (1216 Å) e é importante na baixa ionosfera (Hargreaves, 1992 - cap. 6, p. 230).

No segundo processo, chamado de **ionização por impacto**, a transferência de energia acontece durante a colisão entre partículas energéticas e constituintes da atmosfera. Essas partículas energéticas podem vir de outras galáxias, do Sol, da magnetosfera ou da própria ionosfera, no caso de um processo local de aceleração de um íon ou elétron (Kivelson e Russell, 1995 - cap. 7, p. 183), e são mais importantes na ionização de locais que apresentam uma rigidez magnética menos significativa, como nas regiões de altas latitudes e na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).

A única condição para que haja a ionização é que as energias das partículas e/ou dos fótons ionizantes excedam o potencial de ionização ou energia de ligação de um átomo ou molécula da atmosfera neutra. Acima de 85 km, os constituintes neutros se distribuem em altura segundo um equilíbrio hidrostático com escala de altura diferente para cada constituinte neutro,  $H_n$ . Abaixo desse limite o movimento convectivo atmosférico faz com que a composição relativa da atmosfera seja essencialmente a mesma até a superfície da Terra. Além dos constituintes primários, há traços de outros elementos químicos na região da baixa ionosfera (60 km - 120 km de altitude), como o vapor d'água, dióxido de carbono, ozônio, óxido nítrico e hidrogênio (Davies: 1966, cap. 1 p. 5). A FIGURA 1.2 apresenta as concentrações de alguns dos principais constituintes da atmosfera nestas altitudes, obtidas com o modelo de atmosfera neutra MSIS (<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/msis.html>). Esses valores são válidos para a região de São José dos Campos - SP em períodos de baixa atividade solar. Em seguida, a TABELA 1.1 apresenta os potenciais de ionização e os comprimentos de onda máximos correspondentes de radiação que podem ionizar alguns desses constituintes.

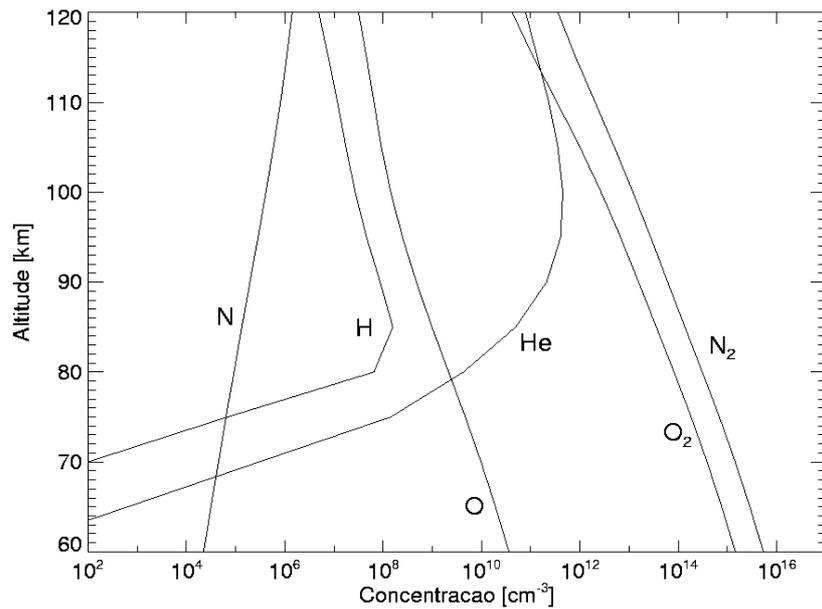


Figura 1.2 - Concentração de alguns dos principais constituintes neutros da baixa ionosfera.

Tabela 1.1 - Valores dos potenciais de ionização para alguns dos principais constituintes atmosféricos da região da baixa ionosfera

<b>Espécie</b>	<b>Potencial de Ionização (eV)</b>	<b><math>\lambda_{\text{MAX}}</math> (Å)</b>
NO	9,25	1340
O <sub>2</sub>	12,08	1027
H <sub>2</sub> O	12,60	985
O <sub>3</sub>	12,80	970
H	13,59	912
O	13,61	911
CO <sub>2</sub>	13,79	899
N	14,54	853
N <sub>2</sub>	15,58	796
He	24,58	504

FONTE: Hargreaves (1992, cap.6, p.223)

Os valores de  $\lambda_{MAX}$  apresentados na TABELA 1.1 permitem a identificação da parcela importante do espectro solar para a ionização da atmosfera terrestre, como os raios-X (1-100 Å) e a emissão no extremo ultravioleta (EUV: 100 - 1000 Å) e da linha Lyman- $\alpha$  (1216 Å), que são radiações cujas variações surgem durante explosões solares e ao longo do ciclo de atividade solar de 11 anos.

A taxa de produção de pares de íons por fotoionização é descrita pela teoria de Chapman como função da altura para um caso simples no qual os detalhes da foto-absorção são substituídos por uma secção transversal de absorção  $\sigma_A$  e a produção iônica é dependente apenas da quantidade de energia da radiação absorvida (Kivelson:1995, cap. 7, p. 184). Neste modelo, que é uma simplificação das condições reais, supõe-se que (Hunsucker, 2003 - cap.1, p.15):

- a atmosfera é composta por espécies distribuídas exponencialmente com uma escala de altura constante;
- a atmosfera é estratificada: não há variações no plano horizontal e o coeficiente de absorção é constante em cada camada, o que equivale a supor que a radiação é monocromática;
- a radiação solar é absorvida proporcionalmente à concentração das partículas do gás.

A taxa de produção (Q) por um dado comprimento de onda  $\lambda$  é proporcional à taxa de decréscimo da intensidade da radiação desse comprimento de onda através da atmosfera, o que é dada por:

$$Q \propto -\frac{dI}{ds} = \sigma_A n_n I_\infty \quad (1.1)$$

onde  $I_\infty$  é a intensidade da radiação fora da atmosfera,  $n_n$  é a densidade de um constituinte neutro, que é função da altura  $h$ , e  $s$  é o comprimento do trajeto atravessado pela radiação na atmosfera. A FIGURA 1.3 mostra esquematicamente uma configuração com a radiação solar incidente a um ângulo zenital,  $\chi$ , que é o ângulo formado entre a vertical em um dado ponto da atmosfera da Terra e a direção do Sol.

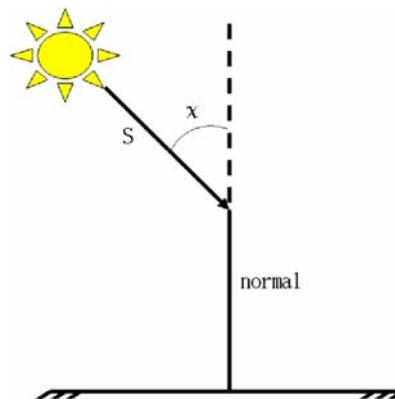


Figura 1.3 - Ângulo zenital e comprimento do trajeto ( $s$ ) atravessado pela radiação na atmosfera.

FONTE: Kivelson e Russell (1995, cap.7, p.185)

Para uma dada altura  $h$ , temos uma intensidade de radiação resultante dada por:

$$I = I_\infty \exp\left(-\int \sigma_A n_n(h) ds\right) \quad (1.2)$$

O argumento da exponencial é  $-\tau$ , onde  $\tau$  é a profundidade óptica que é o parâmetro que especifica a atenuação da radiação solar,  $I_\infty$ , pela atmosfera. A condição de  $\tau$  unitário define a altitude abaixo da qual a queda exponencial do fluxo de radiação solar  $\lambda$  incidente se torna mais efetiva, ou seja, a altura na qual a energia da radiação é significativamente transformada em ionização. Para cada comprimento de onda da radiação solar incidente na Terra existe uma altura diferente na qual  $\tau = 1$  (FIGURA 1.4), o que explica o fato de que para cada altura da atmosfera existe um comprimento de onda que é o maior

responsável por sua ionização. O comportamento desta curva reflete as características das secções transversais de absorção dos componentes majoritários da atmosfera (Davies:1966, cap. 1, p.10-11).

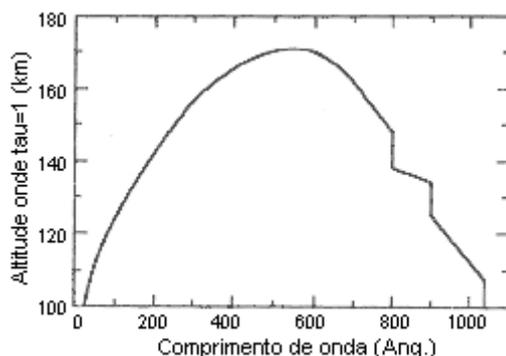


Figura 1.4 - Altitudes nas quais a profundidade óptica é unitária em função do comprimento de onda da radiação incidente na atmosfera.

FONTE: Kivelson e Russell (1995, cap.7, p.186)

O perfil temporal da densidade de elétrons numa região ionizada da atmosfera não depende apenas da taxa de produção eletrônica, mas também da taxa com a qual os elétrons são removidos do volume considerado. Esse processo de perda se dá através de diferentes formas: recombinação dos elétrons com íons positivos, *attachment* (junção dos elétrons com moléculas neutras) e difusão (ou deriva de um grupo de elétrons para fora da região) (Davies (1966), cap. 1, p. 8). E é devido a esses processos de difusão, à concentração dos diferentes constituintes da atmosfera neutra e às condições ambientais envolvidas nos processos de perda de elétrons, que a ionosfera terrestre apresenta seus máximos de densidade eletrônica formando camadas distintas e bem conhecidas (FIGURA 1.5). No período da noite, há apenas dois máximos de densidade, em aproximadamente 110 km e 400 km, que definem as camadas E e F. Já durante o dia, outros picos de densidade eletrônica ocorrem, em aproximadamente 70 km, 105 km, 210 km e 370 km, definindo uma nova camada, a região-D, e subdividindo a camada F em F1 e F2.

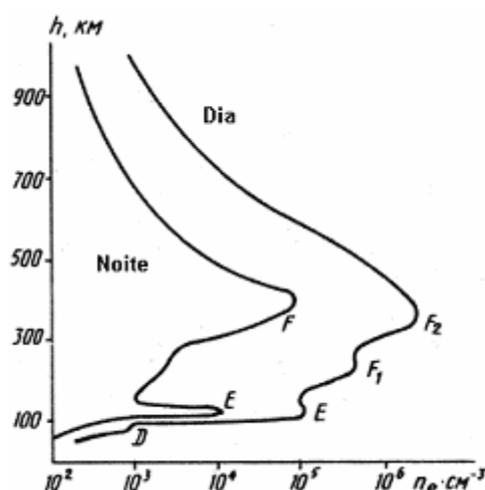


Figura 1.5 - Picos de densidade eletrônica que dividem a ionosfera em suas regiões.

FONTE: <http://www.qrz.ru/solar/articles/ionosfera1.gif>

Neste trabalho nos concentramos no estudo do comportamento da **região-D** perante variações das fontes ionizantes. A densidade eletrônica da região-D é controlada primariamente por processos de produção e perda de ionização denominados fotoquímicos e de colisão, sendo os processos de transporte de plasma desprezíveis. Isso faz com que a radiação solar exerça um forte controle sobre a taxa de ionização na parcela iluminada da ionosfera.

A principal fonte de ionização da região-D é a radiação Lyman- $\alpha$  solar (1216 Å) (Hargreaves (1992), cap. 6, p. 230), que por não possuir energia capaz de ionizar a maior parte dos constituintes atmosféricos de alturas superiores (ver tabela 1.1 e figura 1.2) acaba sofrendo pouca absorção em grandes altitudes conseguindo penetrar até a baixa ionosfera, provocando a dissociação do  $\text{O}_2$  e a ionização do NO, gerando o principal íon da região ( $\text{NO}^+$ ). Existe uma pequena contribuição do espectro UV com comprimentos de onda entre 1027 Å e 1118 Å, que ioniza outro constituinte minoritário, o oxigênio molecular no estado excitado (Hunsucker e Hargreaves, 2003). Raios-X com comprimentos de onda até 8 Å são responsáveis pela ionização de todos os demais constituintes, principalmente o  $\text{N}_2$  e o  $\text{O}_2$ . Sabe-se que há variações temporais do fluxo dessas radiações solares ionizantes relacionadas a eventos

transientes (explosões solares) ou de grandes escalas temporais (ciclo de atividade solar), porém seus efeitos na baixa ionosfera ainda não são totalmente conhecidos.

Investigamos neste estudo as relações entre as variações em diferentes escalas de tempo da emissão solar ionizante e suas conseqüências na região-D ionosférica. Para tanto, utilizamos informações provenientes de ondas eletromagnéticas de muito baixas frequências (VLF) que foram propagadas no guia de onda Terra-ionosfera. Esse método de sondagem ionosférica será explicado a seguir.

## **1.2 Propagação de Ondas Eletromagnéticas de Baixas Frequências no Guia de Onda Terra-Ionosfera**

A forma mais usual de se estudar as propriedades físicas da região-D ionosférica é através da análise de ondas de rádio de VLF que se propagam no espaço limitado inferiormente pela superfície terrestre e superiormente pela base da ionosfera, chamado guia de onda Terra-ionosfera. Ondas de VLF propagadas no guia de onda Terra-ionosfera apresentam grande estabilidade e pouca atenuação (com exceção de períodos de amanhecer e entardecer no trajeto), o que possibilita a propagação da informação contida na onda, referente às condições elétricas das fronteiras do guia de onda, através de longas distâncias.

Dependendo de sua frequência, uma onda eletromagnética pode ser refletida quando incide sobre fronteiras condutoras, podendo ser guiada ao longo dessas estruturas através de reflexões múltiplas. A densidade eletrônica da baixa ionosfera é suficiente para torná-la um bom condutor perante frequências de VLF e ELF (*Extremely Low Frequency* 3 - 30 Hz).

A propagação de uma onda eletromagnética é controlada pelo índice de refração,  $N$ , e densidade eletrônica,  $N_e$ , do meio, e da frequência angular da onda,  $\omega$ . No caso de uma onda se propagando em um plasma,  $N$  é expresso pela equação de Appleton-Hartree (Ratcliffe, 1959), dada por:

$$N^2 = 1 - \frac{X}{U - T \pm \sqrt{Y^2 \cos^2 \theta + T^2}} \quad (1.3)$$

onde:

- $\theta$  é o ângulo entre a direção de propagação e o campo geomagnético;
- $X$  é uma relação entre a frequência angular de plasma,  $\omega_p$ , e a frequência angular da onda,  $\omega$ , dado por:

$$X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.4)$$

sendo  $\omega_p$  dado por:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e q_e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1.5)$$

com  $q_e$  é a carga do elétron,  $m_e$  é a massa do elétron,  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo e  $N_e$  é a densidade eletrônica.

- $Y$  é a razão entre a girofrequência de elétrons no plasma,  $\omega_b$ , e  $\omega$ :

$$Y = \frac{\omega_b}{\omega} \quad (1.6)$$

sendo  $\omega_b$  função da componente perpendicular do campo geomagnético ao movimento do elétron,  $B$  e expressa por:

$$\omega_b = \frac{q_e B}{m_e} \quad (1.7)$$

- $Z$  é a razão entre a frequência de colisão no plasma,  $\nu$  e  $\omega$ :

$$Z = \frac{\nu}{\omega} \quad (1.8)$$

- $U$  é dado por:

$$U = 1 - iZ \quad (1.9)$$

- e o termo T é expresso por:

$$T = \frac{Y^2 \text{sen}^2 \theta}{2(U - X)} \quad (1.10)$$

No interior do guia de onda Terra-ionosfera  $N \approx 1$ , resultando essencialmente em uma propagação em espaço livre das ondas de VLF. Já na fronteira com a região-D ionosférica, N varia rapidamente tornando-se «1 e resultando numa substancial reflexão.

No estudo de ondas eletromagnéticas de LF-HF no plasma ionosférico das regiões E e F, N pode ser escrito através da bem conhecida relação:

$$N^2 = 1 - \frac{\omega_P^2}{\omega^2} \quad (1.11)$$

que é obtida através das aproximações  $Z$  e  $Y \rightarrow 0$  na eq. 1.3. Já no caso da região-D, não é possível considerar  $Z \rightarrow 0$  devido à alta densidade de espécies neutras que faz com que a relação  $\nu \ll \omega$  não seja válida.

Essa frequência de colisão,  $\nu$ , é bem representada por uma exponencial nesta região da ionosfera, e pode ser expressa por (Wait e Spies, 1964):

$$\nu(h) = 1,816 \times 10^{11} \exp(-0,15h) \quad (1.12)$$

Vemos na FIGURA 1.6, que apresenta valores típicos de frequência de colisão, que para uma altura típica da região-D,  $\nu \sim 5 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , fazendo com que o termo  $Z$  seja » 1, não podendo ser desconsiderado na equação 1.3.

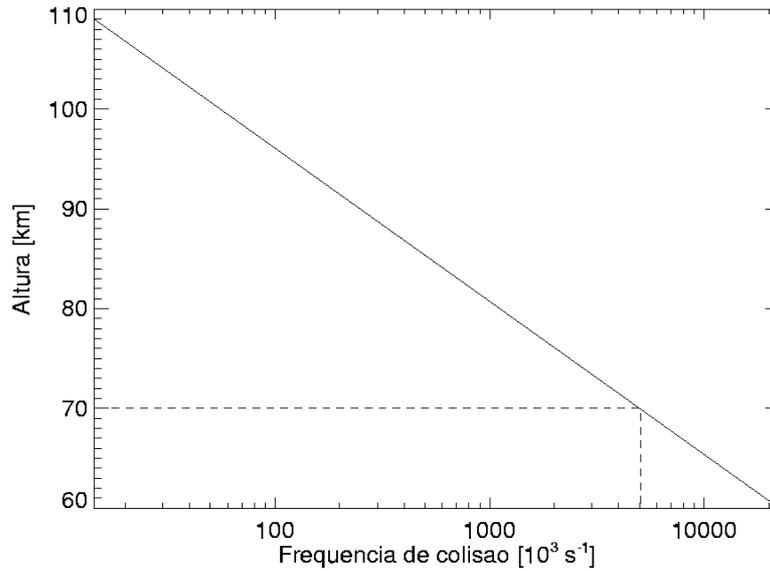


Figura 1.6 - Perfil típico da frequência de colisão da baixa ionosfera, indicando seu valor em 70 km de altura.

Dessa forma, a expressão para o índice de refração da região-D ionosférica fica:

$$N^2 = 1 - i \frac{\omega_p^2}{\omega \nu} = 1 - i \frac{\Omega}{\omega} \quad (1.13)$$

O termo  $\Omega$ , ou parâmetro de condutividade, foi definido por Wait e Spies (1964) como a razão entre  $\omega_p$  e  $\nu$ . Assim como a frequência de colisão, a densidade eletrônica da baixa ionosfera também é bem representada por uma exponencial, o que faz com que o perfil de  $\Omega$  em função da altura seja bem representado por:

$$\Omega(h) = \Omega_0 \exp \beta(h - h_0) \quad (1.14)$$

onde  $h_0$  é a altura de referência (altura na qual  $\Omega(h=h_0) = \Omega_0 = 2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ ), e  $\beta$  é um parâmetro ionosférico muito importante denominado gradiente de condutividade. O gradiente de condutividade mede a taxa de variação de  $\Omega$

com a altura. Em condições quiescentes, o valor geralmente adotado para  $\beta$  é de  $0,3 \text{ km}^{-1}$  durante o dia e  $0,5 \text{ km}^{-1}$  durante a noite (Wait e Spies, 1964).

Existem dois métodos para estudar a propagação de ondas rádio no guia de onda Terra-ionosfera: *ray-tracing*, ou óptica de raios, e soluções de onda completa. A óptica de raios não se aplica quando o meio através do qual uma onda se propaga tem suas características significativamente alteradas no espaço de um comprimento de onda (o que é o caso da propagação VLF no guia de onda Terra-ionosfera). Torna-se necessária a utilização de soluções de onda completa, nas quais os campos da onda são calculados em muitos pontos no intervalo de um comprimento de onda. Várias análises de onda completa foram desenvolvidas, porém, devido aos grandes trajetos percorridos por uma onda VLF, é mais conveniente representar essa propagação em termos de propagação no modo guia de ondas, onde a Terra e a ionosfera formam as paredes de um guia de onda esférico.

A teoria dos modos de um guia de onda é adequada para trajetos longos ( $d > 1000 \text{ km}$ ). Uma onda é confinada quando as dimensões do guia de onda são da mesma ordem do comprimento da onda propagada, o que é verificado para ondas de VLF ( $10 \text{ km} < \lambda_{\text{VLF}} < 100 \text{ km}$ ) propagadas no guia de onda Terra-ionosfera de altura  $70 \text{ km}$ . Podendo ser considerado uma cavidade ressonante, o guia de onda Terra-ionosfera é capaz de manter e propagar em seu interior apenas a energia eletromagnética associada a determinadas frequências ressonantes. Os padrões encontrados na ressonância transversal ao eixo do guia de onda são denominados modos. Os modos de onda do guia de onda Terra-ionosfera são geralmente classificados como elétrico transversal (TE), magnético transversal ou de primeira ordem (TM) e eletromagnético transversal ou de ordem zero (TEM). Essa definição, que depende da geometria do guia de onda, é dada relativamente à direção de propagação da onda. Por exemplo, no caso de um modo TE, a onda não apresenta componente elétrica na direção de propagação (Watt, 1967).

Cada modo se propaga com uma velocidade diferente e os modos TE e TM possuem também frequências de corte associadas, abaixo das quais esses modos tornam-se modos evanescentes e não mais se propagam. Há três parâmetros que governam as características de cada modo: o fator de excitação, a taxa de atenuação e a velocidade de fase. O fator de excitação é a eficiência com a qual um dado modo de propagação é excitado no guia de onda. Pode ser expresso como a razão entre a potência não-atenuada depositada no guia de onda e a potência total radiada por uma antena. Em outras palavras, o fator de excitação mede como um modo é mais fortemente excitado a partir de uma fonte num dado guia de onda com relação a outro modo. A taxa de atenuação é, fisicamente, a perda de intensidade do sinal de VLF, em decibéis, devido às interações da onda com as duas fronteiras do guia de onda dividido pela distância efetiva entre as reflexões, aproximadamente. Esse parâmetro fornece informações sobre a condutividade das fronteiras do guia de onda (Watt, 1967). Wait e Spies (1964) mostraram que a atenuação do modo 2 é maior tanto durante o dia quanto durante a noite (sob mesmas condições) do que a atenuação do modo 1, o que é mais facilmente verificado em baixas frequências, como mostra a FIGURA 1.7.

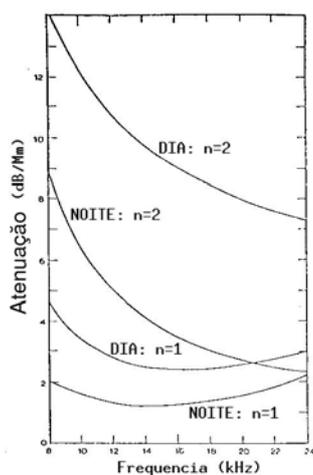


Figura 1.7 - Curvas de atenuação para o primeiro e segundo modo de propagação em função da frequência.

FONTE: Wait e Spies (1964)

Isso indica que, para baixas frequências (inferiores a 24 kHz), o modo 1 é dominante em propagações a grandes distâncias em qualquer período do dia e da noite. A variação da taxa de atenuação do modo 1 causada por mudanças da altura do guia de onda gera variações da amplitude do sinal de VLF. A FIGURA 1.8 mostra o comportamento da taxa de atenuação do modo 1 em função da frequência da onda para diferentes alturas do guia. Vemos então que um decréscimo da altura da base da baixa ionosfera, gerado pelo amanhecer ou por eventos transientes de ionização, pode causar tanto um aumento quanto um decréscimo da amplitude do sinal, dependendo de sua frequência, tornando sua análise complexa.

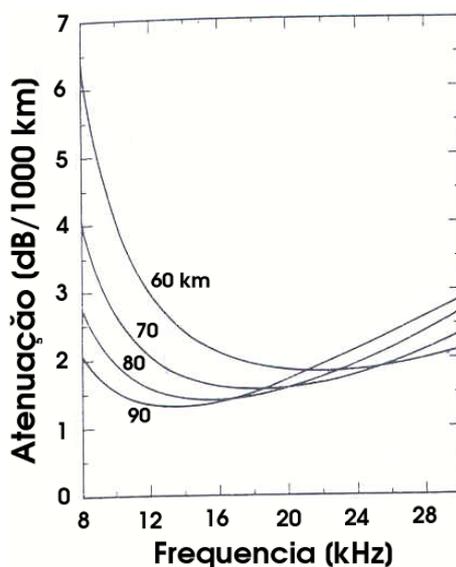


Figura 1.8 - Curvas de atenuação para o primeiro modo de propagação, em função da frequência, para diferentes alturas do guia de onda

FONTE: Wait e Spies (1964)

Já a fase do sinal de VLF responde de uma forma mais uniforme à variação de altura do guia de onda, sofrendo um avanço quando a ionosfera 'abaixa'. A variação de fase medida,  $\Delta\phi$ , é relacionada à variação da velocidade de fase,  $\Delta v_\phi$ , do primeiro modo de propagação da onda de VLF através da relação:

$$\Delta\phi = 360 \frac{d}{\lambda} \frac{\Delta v_\phi}{c} \quad (1.15)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento da onda de VLF,  $d$  é o tamanho do trajeto percorrido por essa onda e  $c$  é a velocidade da luz no espaço livre.

A velocidade de fase do primeiro modo de propagação pode ser definida, considerando a superfície terrestre perfeitamente condutora, como (Wait e Spies, 1964):

$$v_\phi = c \left( 1 - \frac{h}{2r_T} + \frac{\lambda^2}{32h^2} \right) \quad (1.16)$$

onde  $h$  é a altura de reflexão da onda de VLF e  $r_T$  é o raio da Terra. A velocidade de fase,  $v_\phi$ , depende da frequência da onda, da altura do guia, do campo geomagnético e do perfil de densidade eletrônica na região-D. A FIGURA 1.9 mostra que a velocidade de fase aumenta quando a altura do guia de onda diminui, independente da frequência da onda, o que facilita a interpretação das variações de fase do sinal de VLF.

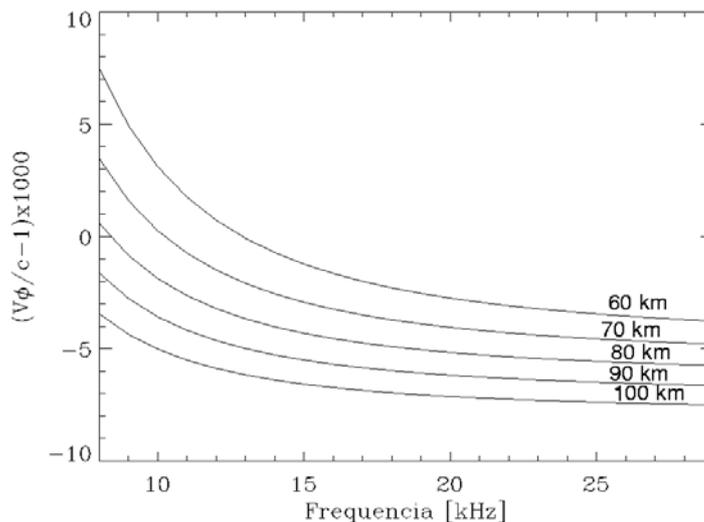


Figura 1.9 - Velocidade de fase em função da frequência da onda para diferentes alturas do guia de onda.

A partir das equações 1.15 e 1.16 torna-se possível determinar a variação efetiva da altura da base da ionosfera,  $\Delta h$ , através da relação resultante (Muraoka et al., 1977):

$$\Delta\phi = 360 \frac{d}{\lambda} \left( \frac{1}{2R} + \frac{\lambda^2}{16h_0^3} \right) \Delta h \quad (1.17)$$

onde  $h_0$  é a altura de referência do guia de onda Terra-ionosfera quiescente,  $h'$  é o nível da ionosfera perturbada e  $\Delta h = h_0 - h'$ .

O estudo da propagação de ondas VLF no guia de onda Terra-ionosfera foi durante muito tempo um tema de maior relevância para sistemas de comunicação a longa distância e para a navegação, e só o deixou de ser com o advento do sistema GPS e das comunicações via satélite. Atualmente, a importância científica deste estudo passou a ser prioridade, pois ele fornece informações sobre a baixa ionosfera, que é uma região com poucas observações já que é muito alta para que sua sondagem seja feita por balões e muito baixa para que satélites possam ser utilizados. Além disso, o estudo da propagação de ondas de VLF permite a análise da região-D através de sua resposta a variações de suas fontes ionizantes, como o Sol.

### **1.3 Eventos Transientes de Ionização na Região-D**

O perfil da densidade eletrônica da região-D ionosférica é diretamente dependente das variações da sua principal fonte de ionização: o Sol. Durante explosões solares, a emissão de radiação eletromagnética sofre um aumento brusco e um feixe de partículas parte em direção ao meio interplanetário. A interação dessas radiações e partículas com o planeta Terra gera uma série de efeitos ionosféricos, que permitem o estudo da reação do plasma ionosférico a eventos transientes de ionização.

O aumento das radiações X e ultravioleta produzem um aumento imediato da densidade eletrônica da ionosfera diurna em várias alturas. Esses aumentos são denominados *Sudden Ionospheric Disturbances* ou SIDs, que são os primeiros efeitos ionosféricos gerados por explosões solares. Quando a explosão solar gera um fluxo importante de partículas energéticas, esses SIDs podem ser seguidos por outros efeitos causados por elas. Quando, por exemplo, os prótons solares espiralam em torno das linhas do campo geomagnético e entram na ionosfera polar, ocorrem os eventos denominados PCAs (*Polar Cap Absorption Events*). Outros efeitos resultantes das partículas oriundas das explosões solares são as auroras e as tempestades geomagnéticas e ionosféricas, que podem ser causadas por elétrons e íons lentos, que chegam à Terra cerca de 20 a 40 horas depois da explosão (Mitra, 1974).

Serão descritos a seguir os processos de excessos de ionização da região-D ionosférica causados por partículas energéticas e por aumentos de fluxo das radiações solares ionizantes.

### **1.3.1 Ionização por impacto**

As partículas energéticas que se precipitam na atmosfera terrestre provocando sua ionização podem ser de origem solar ou galáctica. Estes eventos de precipitação de partículas são mais notados do lado noturno da Terra, pois não são ocultados pela forte ionização gerada pela incidência da radiação solar. A precipitação dessas partículas energéticas depende da intensidade do campo magnético local, por isso, a penetração até a atmosfera ocorre preferencialmente nos pólos magnéticos e em regiões nas quais o campo apresenta uma magnitude menor, como é o caso da região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS).

Essa ionização pode ser produzida por precipitação direta dessas partículas na atmosfera ou por variações do campo magnético terrestre (tempestades geomagnéticas). Durante tempestades geomagnéticas, além do valor global do campo geomagnético diminuir, o número de partículas com energias suficientes para precipitar na atmosfera aumenta, aumentando conseqüentemente a ionização causada por elas.

Uma partícula energética *primária* pode, além de ionizar algumas moléculas durante seu trajeto no interior da atmosfera através de colisões coulombianas, produzir elétrons *secundários*, com energias suficientes para ionizar outros componentes neutros. Além disso, tanto as partículas energéticas primárias quanto as secundárias podem transferir energia para os constituintes atmosféricos através da radiação *bremstrahlung*, que é gerada quando o trajeto dessas partículas é alterado (Kivelson e Russell, 1995, cap. 7, p. 188).

Dependendo de suas energias e da Rigidez Geomagnética (RG) em uma dada região, essas partículas são capazes de penetrar na atmosfera alterando a densidade eletrônica da região-D e provocando eventos de ionização transiente na ionosfera local. Variações da altura de referência da região-D, causadas pela precipitação de partículas energéticas na região da AMAS, foram observadas durante tempestades geomagnéticas (Abdu et al., 1981). Quando essa precipitação ocorre nas regiões das calotas polares, que possuem os menores valores de RG, dá origem aos eventos PCAs. Desconsiderando a ação do campo geomagnético, a precipitação de partículas dependeria apenas de suas energias. A FIGURA 1.10 mostra quais seriam as altitudes nas quais os prótons e elétrons seriam parados caso não houvesse a influência do campo geomagnético, ou seja, as alturas nas quais essas partículas transfeririam totalmente suas energias para os constituintes atmosféricos locais.

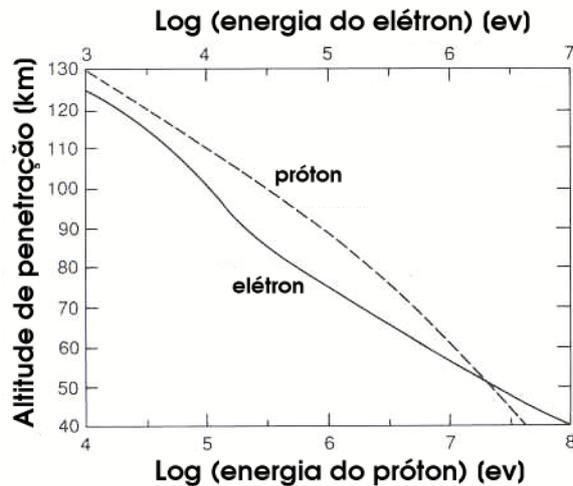


Figura 1.10 - Alturas de penetração para elétrons e prótons na atmosfera terrestre em função de suas energias de incidência, para um caso no qual a ação do campo geomagnético é desconsiderada.

FONTE: modificada de Kivelson e Russell (1995, cap. 7, p. 189).

Outra importante fonte de ionização da baixa ionosfera são os raios cósmicos, que são partículas energéticas, em sua grande maioria prótons, com energias de até  $10^{20}$  eV que chegam ao topo da atmosfera terrestre sem uma direção preferencial. Essas partículas são liberadas por todas as estrelas de nossa galáxia, e de outras, e seguem seu percurso no meio interestelar sofrendo acelerações e desacelerações devido a sua interação com o campo magnético presente no espaço galáctico (Ginzburg e Ptuskin, 1985).

Além de depender da RG, o fluxo de raios cósmicos incidentes no planeta Terra depende também da Rigidez Magnética Interplanetária (RMI). Durante alta atividade solar, o campo magnético do Sol se torna mais intenso, aumentando a intensidade do campo magnético interplanetário e conseqüentemente, dificultando a entrada dos raios cósmicos não-solares na heliosfera. Neste período, estima-se que haja uma diminuição do fluxo de raios cósmicos incidentes na nossa atmosfera. O efeito contrário acontece durante período de atividade solar mínima.

### 1.3.2 Fotoionização

Além da produção de partículas energéticas, durante uma explosão solar matéria coronal também é ejetada e o plasma ambiente é aquecido. O aquecimento do plasma provoca emissão na faixa dos raios-X, através de fótons de energia na faixa de 1-20 keV. Esses fótons são responsáveis pela ionização extra da baixa ionosfera, e produzem os chamados SIDs (*Sudden Ionospheric Disturbances*). Os diferentes tipos de SIDs que ocorrem na região-D ionosférica estão resumidos a seguir (Hargreaves, 1979, cap. 10, p. 230), (Mitra, 1974):

**SES** *Sudden Enhancement of Signal*: aumento súbito da amplitude do sinal, tanto em sinais de VLF como em LF;

**SEA** *Sudden Enhancement of Atmospherics*: aumento das variações na amplitude dos sinais de VLF;

**SWF** *Short Wave Fadeout*: paralisação das comunicações em HF, causada pelo aumento de sua absorção;

**SCNA** *Sudden Cosmic Noise Absorption*: absorção do ruído cósmico recebido em frequências acima da frequência crítica da camada F2;

**SFD** *Sudden Frequency Deviation*: variação, de alguns ciclos por segundo, de uma frequência considerada muito estável propagada no guia de onda Terra-ionosfera;

**SPA** *Sudden Phase Anomaly*: anomalia súbita da fase do sinal de VLF, geralmente um avanço que dura, aproximadamente, 10 minutos e é seguido de uma recuperação lenta que pode durar algumas horas.

Em frequências em torno de 15 kHz a variação de fase observada no sinal de VLF é principalmente causada pela variação da altura de referência da reflexão dessas ondas que se propagam no guia de onda Terra-ionosfera (Mitra, 1974). No caso de ondas de frequências em torno de 2 MHz, tais variações observadas na fase do sinal são causadas, predominantemente, por pequenas

variações do índice de refração a partir do valor unitário. Em frequências intermediárias, onde o efeito do avanço de fase é resultado da combinação das duas causas, a interpretação dos resultados se torna mais complicada (Mitra, 1974). O efeito de 'abaixamento' da ionosfera é facilmente detectado como um SPA no sinal de VLF, especialmente em trajetos longos (Kaufmann e Paes de Barros, 1969), o que faz deste SID o melhor indicador ionosférico de distúrbios causados por explosões solares.

Eventos SPAs foram detectados pela primeira vez, em 16 kHz, no trajeto Rugby - Cambridge por Budden e Ratcliffe, em 1937 (Mitra, 1974). O avanço na fase de um evento SPA pode ter duração de 1 a 30 minutos, e a recuperação pode demorar de 30 minutos até 3 horas, de acordo com as constantes de tempo utilizadas na recepção. A FIGURA 1.11 mostra um exemplo de um grande SPA observado nos dados da fase de um sinal de 12.9 kHz propagado através do trajeto Argentina - Atibaia (2800 km) no dia 24/03/1991.

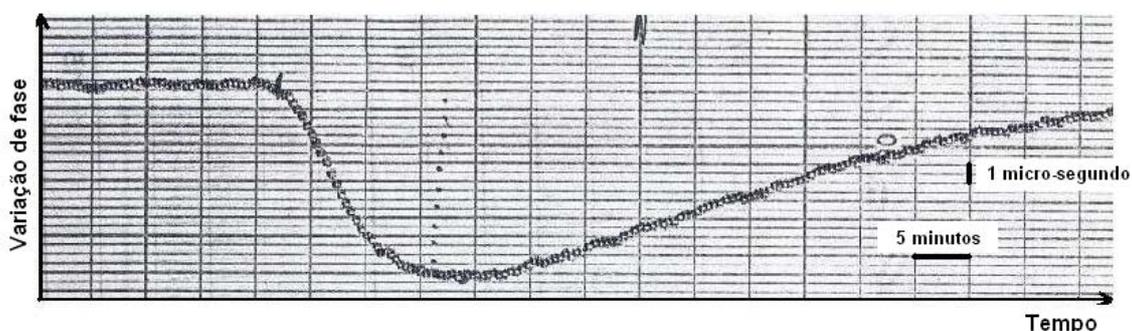


Figura 11 - Exemplo de um evento SPA detectado na fase do sinal de VLF recebido em Atibaia no dia 24/03/91, cujo máximo avanço de fase ocorreu em torno das 14:30 UT

O avanço de fase (medido em micro-segundos) equivale a variações de alguns graus até quase 360 graus, dependendo da importância da emissão de fótons de raios-X proveniente da explosão solar e da orientação da trajetória da onda de VLF em relação ao ponto subsolar, no qual o ângulo zenital é nulo ( $\chi = 0$ ). A

análise da variação de fase de um evento SPA nos permite calcular a variação efetiva da altura de referência do sinal VLF,  $\Delta h$ , para cada trajeto (eq. 1.17 da sessão 1.2), supondo uma ionosfera não estratificada e considerando apenas o modo de propagação no guia de onda de primeira ordem.

Eventos SPA representam um sensível indicador das características e intensidade da energia da emissão em raios-X oriunda de explosões solares. Diversos trabalhos foram feitos com o objetivo de identificar a relação entre a importância do evento SPA (em graus) e os parâmetros da explosão solar em raios-X e o ângulo zenital correspondente, porém ainda não houve um consenso sobre como se dá essa dependência.

Aparentemente, a correção da variação de fase do sinal de VLF causada por uma explosão solar é linearmente relacionada ao logaritmo da média de  $\sec\chi$  ao longo do trajeto percorrido pela onda de VLF (Chilton et al., 1963; Pant, 1994), embora a constante de proporcionalidade varie de explosão para explosão. Isso indica que as características da emissão dos raios-X solares controlam a relação  $\Delta\phi$  versus  $\log(\sec\chi)$  (Muraoka et al., 1977).

Para tornar a análise das relações entre as características de uma explosão solar em raios-X e a resposta ionosférica independente do ângulo zenital, alguns autores corrigem a importância do SPA observado,  $I_{SPA}$ , por  $\sec\chi$  (Muraoka et al., 1977; Pant, 1994). Porém, outros autores desconsideram essa normalização para determinados ângulos (por exemplo: Kaufmann et al. (2002):  $\leq 70^\circ$ ; Pant(1993):  $\leq 81^\circ$ ), ou até para qualquer ângulo (Bracewell e Straker, 1949). Recentemente, McRae e Thomson (2004) mostraram que a dependência do processo de ionização da região-D ionosférica pelo ângulo zenital não é forte, podendo ser mesmo desconsiderada.

Com relação às propriedades das explosões solares, já foi estabelecida por diversos autores uma correlação linear entre  $I_{SPA}$  (em graus) e o logaritmo dos fluxos de pico dos raios-X solares,  $F_P$ , em determinadas faixas de energia:

0 - 3 Å: Kaufmann e Paes de Barros (1969), Deshpande e Mitra (1972);

0 - 8 Å: Kreplin et al. (1962), Kaufmann e Paes de Barros (1969), Deshpande e Mitra (1972);

0.5 - 4 Å: Pant (1993), Kaufmann et al. (2002);

1 - 8 Å: Muraoka et al. (1977), Pant (1993), Kaufmann et al. (2002), McRae e Thomson (2004), Thomson et al. (2005);

e 8 - 20 Å: Kaufmann e Paes de Barros (1969).

Através da extrapolação dos ajustes encontrados em suas correlações, Kaufmann e Paes de Barros (1969) e Muraoka et al. (1977) determinaram o valor mínimo do fluxo de pico em raios-X,  $F_{P(MIN)}$ , necessário para que ocorra um SPA. Da mesma maneira, identificamos os valores de  $F_{P(MIN)}$  correspondentes aos ajustes apresentados pelos demais autores e vimos que esses valores possuem variações entre eles, como mostra a TABELA 1.2. Além disso, as correlações encontradas nestes trabalhos apresentam um espalhamento considerável. A discrepância e o espalhamento encontrados podem ser atribuídos a diferentes causas, as quais procuramos identificar neste trabalho.

Embora os efeitos mais gerais das explosões solares sobre a região-D da ionosfera venham sendo estudados há muito tempo, é relativamente recente a viabilidade de se realizar um estudo quantitativo sobre a relação existente entre a importância (tamanho, duração) da explosão solar e o aumento correspondente da densidade eletrônica na região D ionosférica (McRae e Thomson, 2004).

Tabela 1.2- Alguns valores obtidos, para determinados períodos do ciclo solar, para o fluxo mínimo de raios-X (em diferentes faixas de energia) capaz de provocar um SPA. Os fluxos estão dados em W/m<sup>2</sup>.

	0-3Å	0-8Å	0.5-4Å	1-8Å	2-12Å	8-20Å	MAX	MIN
Kreplin et al. (1962)		2·10 <sup>-6</sup>					X	X
Kaufmann e Paes de Barros (1969)	4,3·10 <sup>-8</sup>	4·10 <sup>-6</sup>				2·10 <sup>-5</sup>	X	
Deshpande e Mitra (1972)	2·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-6</sup>					X	X
Muraoka et al. (1977)				1,5·10 <sup>-6</sup>				X
Pant (1993)			1,6·10 <sup>-7</sup>	1,8·10 <sup>-6</sup>			X	X
Kaufmann et al. (1977)			5·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-6</sup>			X	X
McRae e Thomson (2004)				1·10 <sup>-6</sup>			X	X
Thomson et al.(2005)				2·10 <sup>-6</sup>				X

Utilizando dados recentes da emissão X solar explosiva produtora de SPAs, separados de acordo com o período do ciclo de atividade solar correspondente, veremos que a baixa ionosfera não apenas é um ótimo sensor das variações rápidas da radiação solar ionizante, mas também responde de forma diferenciada de acordo com o período de atividade solar.

#### 1.4 Instrumentação

O sinal de VLF analisado, que foi propagado no guia-de-onda Terra ionosfera, foi gerado por uma estação transmissora que emite as ondas rádio (com frequências entre 3 e 30 kHz) em alta potência. No período de aquisição dos dados utilizados neste estudo (década de 90), o sistema de emissão pulsada de sinais de VLF (Sistema Ômega) estava em funcionamento operando com oito estações transmissoras. Essas estações estavam distribuídas no globo terrestre, e emitiam pulsos sincronizados nas frequências de 10.2 e 13.6 kHz, com um período de 10 segundos. O restante do tempo era preenchido por uma outra frequência emitida de forma contínua, como era o caso da frequência 12.9 kHz para a estação da Argentina.

As ondas eletromagnéticas emitidas por essas estações transmissoras foram recebidas no Rádio Observatório de Itapetinga (Atibaia, São Paulo), que contava basicamente com um sistema de recepção (TRACOR, 1983), uma antena e um padrão atômico, e na estação receptora de Inubo (Japão).

As antenas utilizadas em VLF podem ser do tipo vertical ou em 'loop'. Dependendo de sua geometria, a antena possui uma dada resposta à radiação no espaço, que é proporcional ao ganho dessa antena nas diferentes direções, ou seja, quando se está apontado na direção na qual a antena apresenta melhor resposta, obtemos o maior ganho dessa antena.

Em uma antena vertical, a componente elétrica da onda de VLF provoca uma oscilação dos elétrons constituintes do material condutor da antena, induzindo a corrente elétrica que é detectada. Já na antena de 'loop', que é um fio condutor enrolado em torno de um núcleo de ar, é a componente magnética da onda que provoca a corrente elétrica medida, pois ao atravessar o 'loop' essa componente altera o fluxo magnético em seu interior e induz a força eletromotriz responsável pelo movimento dos elétrons no fio condutor. A voltagem gerada no 'loop' pode ser expressa pelo produto de seis termos:

$$V = 2\pi\mu_0 b A B_0 f \cos \rho \quad (1.18)$$

onde:

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo, que pode ser adotada para 'loops' de núcleos de ar em meios não magnéticos, como ar ou água, por exemplo;

$b$  é o número de voltas;

$A$  é a área do 'loop';

$B_0$  é o campo magnético aplicado;

$f$  é a frequência da onda, e

$\cos \rho$  é o cosseno do ângulo entre o eixo do 'loop' e a direção do campo magnético.

Sabendo que o produto entre  $b$  e  $A$  representa a abertura efetiva da antena  $A_e$ , podemos estabelecer a seguinte expressão para a sensibilidade  $S$  do 'loop':

$$S = \frac{V}{B_0} = 2\pi\mu_0 f A_e \cos \rho \quad (1.19)$$

Pode-se notar a partir da equação 1.19 que, para baixas frequências como as de VLF, uma forma de elevar a sensibilidade da antena é aumentar sua abertura efetiva, o que pode ser feito através do aumento do número de voltas e/ou do aumento do diâmetro da antena. Porém, a construção de uma antena com um diâmetro grande não é viável, fazendo com que essa antena tenha sempre um tamanho muito inferior ao comprimento da onda de VLF. Isso faz com que a corrente gerada na antena no momento em que a onda de VLF atravessa o plano do 'loop' seja muito pequena. Por isso, além de se tomar em conta a sensibilidade dessas antenas em 'loop', é necessário bem sintonizar o sistema de acordo com a frequência da onda que se pretende observar, a fim de tornar a detecção mais eficiente, ou seja, aumentar o fator de qualidade da antena.

Uma antena de VLF em 'loop' pode adquirir diferentes formas geométricas (quadrada ou triangular - isósceles) e é usual utilizar duas antenas com planos ortogonais para detectar as variações do campo eletromagnético em todas as direções. A FIGURA 1.12 mostra um exemplo de antena de VLF em 'loop' quadrada (acima), que está sendo utilizada para o estudo da amplitude do sinal, e que está instalada na Estação Antártica brasileira Comandante Ferraz (EACF), e um sistema com duas antenas em 'loop' triangulares (abaixo), atualmente em fase de testes e ajustes no Rádio Observatório de Itapetinga.



Figura 1.12 - Exemplos de antenas de VLF em 'loop': quadrada (acima) instalada na EACF, e triangular (abaixo) instalada atualmente no Rádio Observatório de Itapetinga.

A fase do sinal recebido ( $\phi_A$ ) por este sistema de recepção e amplificado, é enviada para o conversor de frequência, onde a frequência de entrada é reduzida para 1 kHz (mantendo sua fase) e comparada ao sinal de 1 kHz de um oscilador( $\phi_0$ ), que é controlado pelo padrão de frequência. A diferença de fase  $\phi_A - \phi_0$  produz um erro ( $\epsilon$ ). A existência deste erro faz com que a fase do oscilador seja deslocada até que a condição de erro nulo seja alcançada, criando a diferença de fase ( $\phi_S$ ). O sinal correspondente a esta diferença é gravado em um registrador gráfico com escala de 0 a 100 micro-segundos. Para a medida da amplitude, é medido um outro sinal de saída do oscilador, na

condição de equilíbrio ( $\varepsilon = 0$ ), defasado de 90 graus. A FIGURA 1.13 mostra, de forma esquemática, este processo.

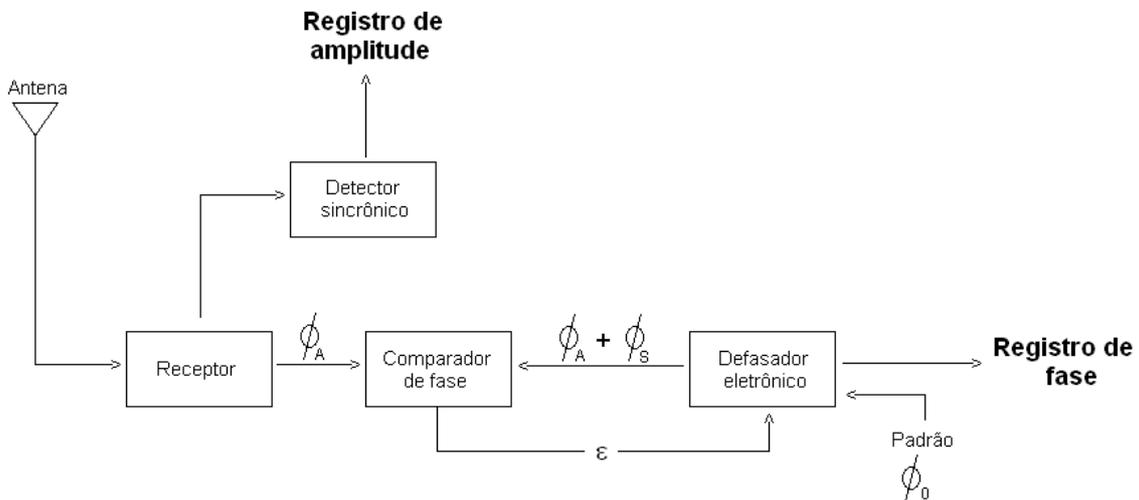


Figura 1.13 - Diagrama simplificado do funcionamento de um receptor de ondas de VLF.

FONTE: modificado de TRACOR (1983).

No período de aquisição dos dados utilizados neste estudo o ROI possuía antenas verticais e quadradas e receptores que permitiam o registro analógico de variações de fase em relação a um padrão de frequência de Césio cuja precisão é superior a  $0.1 \mu\text{s}/\text{dia}$  (Piazza e Kaufmann, 1975).

A partir desses dados, selecionamos um número de eventos SPA que fosse suficiente para realizarmos uma análise estatística da resposta ionosférica perante explosões solares. Esta análise mostrará que através de sinais de VLF recebidos após terem sido propagados no guia de onda Terra-ionosfera é possível monitorar a atividade solar de longas e curtas escalas de tempo.

## 2 DADOS e METODOLOGIA

Um banco de dados foi gerado contendo as características dos SPAs e das explosões solares em raios-X correspondentes. Incluímos neste banco de dados eventos ocorridos tanto em períodos de alta quanto de baixa atividade solar, a fim de investigar uma possível dependência das características ionosféricas quiescentes com o ciclo solar. A seleção e tratamento dos dados ionosféricos e solares serão explicados nas seções seguintes.

### 2.1 Dados Ionosféricos: SPA

#### 2.1.1 Base de dados

Este banco de dados foi montado a partir de SPAs detectados em sinais de VLF recebidos na antiga estação receptora localizada no Rádio Observatório de Itapetinga (ROI) - Atibaia, São Paulo - no período de 1991-1997. Estes dados foram complementados por informações obtidas no observatório de Inubo (Japão) publicadas no periódico *Ionospheric Data of Japan* no período de 1990 - 1991. O sinal de VLF recebido em Inubo e em Atibaia neste período era emitido por diferentes estações transmissoras espalhadas pelo globo terrestre, e em diferentes frequências de VLF. A TABELA 2.1 mostra as coordenadas geográficas e as frequências correspondentes a cada estação transmissora de VLF utilizada.

Tabela 2.1 - Estações transmissoras da rede Ômega e receptoras utilizadas neste trabalho, com suas respectivas coordenadas geográficas e frequências de operação.

<b>Estações</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Frequência (kHz)</b>
Atibaia – ATI	22°11'S 46°36'W	(receptora)
Inubo – INU	35°42'N 140°51'E	(receptora)
North Dakota – NDAK	46°22'N 98°20'W	13,1 e 13,6
Argentina – ARG	43°03'S 65°11'W	12,9

Havaí – HAIKU	21°24'S 157°50'W	11,8 e 13,6
La Reunion – LR	20°58'S 55°17'E	13,6
North West Cape – NWC	21°49'S 114°10'E	22,3
Liberia – L	6°18'N 10°40'W	13,6
Austrália – AUS	38°29'S 146°56'E	13,6

### 2.1.2 Seleção dos dados

A FIGURA 2.1 mostra os períodos de cobertura dos dados ionosféricos utilizados em nossas análises, conjugados à variação da emissão da linha Lyman- $\alpha$  e da banda do extremo ultravioleta (EUV), que são consideradas as radiações mais importantes para a formação da baixa ionosfera quiescente, determinadas através do modelo SOLAR2000 (Tobiska et al., 2000). Este modelo permite que séries temporais de fluxos solares que não tenham sido observados de forma contínua sejam reconstruídas a partir de suas medidas discretas e de observações experimentais de fluxos de outras radiações solares, como o fluxo de fótons com comprimentos de onda de 10.7 cm (índice solar F10.7).

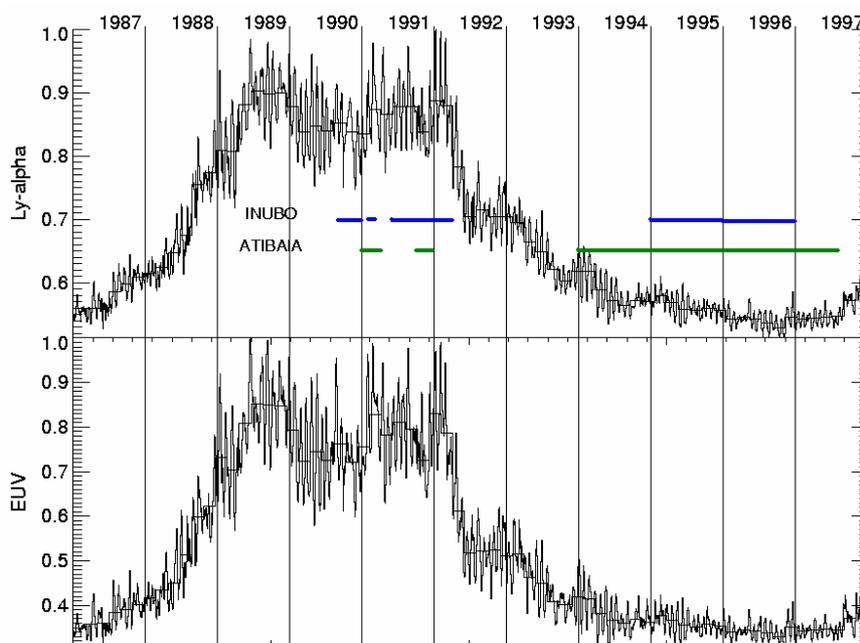


Figura 2.1- Cobertura de dados ionosféricos utilizados neste estudo sobreposta à variação de 11 anos dos proxies de Lyman- $\alpha$  e EUV no período. As linhas

horizontais representam o período de dados utilizados que foram recebidos em Atibaia (linhas azuis).

Dentro do período analisado neste trabalho, foram selecionados SPAs ocorridos em momentos nos quais as trajetórias percorridas pelo sinal de VLF estavam totalmente iluminadas pelo Sol. Para esta seleção, utilizamos o programa GEOCLOCK, que permite a visualização rápida da parcela iluminada do planeta em determinado dia e horário, além de permitir o cálculo da distância entre dois pontos do globo ao longo do grande círculo. A FIGURA 2.2 mostra um exemplo de utilização deste programa.



Figura 2.2 - Tela do programa GEOCLOCK. Representação da parcela iluminada da Terra no dia 15/02/2006, às 11:25UT, com um ângulo zenital de 56.48 graus em Atibaia. As linhas amarelas representam os trajetos utilizados neste trabalho.

Assim, foi selecionado um total de 1387 SPAs, sendo 1185 destes recebidos durante o período de máximo e 202 eventos durante o período de mínimo do ciclo solar. Durante o período de aquisição dos dados aqui estudados, o registro dos dados recebidos em Atibaia possuía uma precisão de  $0.5 \mu\text{s}$  para as medidas de variação de fase e uma resolução temporal de 30 segundos, e sua aquisição era feita de forma analógica. Por isso, foi necessário analisar

individualmente cada um dos SPAs observados no registro desta estação, medindo manualmente sua importância e duração.

### 2.1.3 Normalizações: distância do trajeto e ângulo zenital

Para uma análise conjunta de todos os dados recebidos, independente do trajeto percorrido pela onda de VLF, foi necessário fazer uma normalização dos dados pela distância do trajeto correspondente, porque o avanço de fase do evento detectado é diretamente proporcional ao tamanho do trajeto perturbado. Este avanço de fase, ou importância do SPA ( $I_{SPA}$ ), é medido em microssegundos e pode ser expresso também em graus a partir da relação:

$$\Delta\phi[\text{graus}] = 360I_{SPA}[\mu\text{s}] \cdot 10^{-6} \cdot f_{VLF}[\text{Hz}] \quad (2.1)$$

A FIGURA 2.3 mostra a consistência entre as medidas de  $\Delta\phi$  obtidas simultaneamente em diferentes trajetos inclusos na região iluminada da ionosfera, que foram causadas pela mesma explosão solar sob ângulos zenitais próximos e inferiores a  $40^\circ$ .

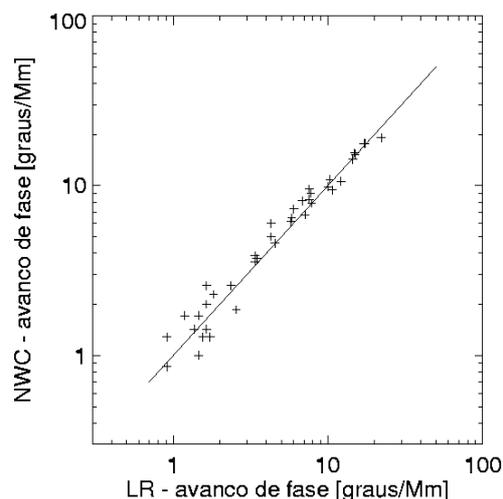


Figura 2.3 - Relação existente entre medidas de eventos SPA feitas em dois trajetos distintos (INUBO-LR e INUBO-NWC) e que ocorreram sob valores de  $\chi$  próximos, quando normalizadas pelo tamanho do trajeto no qual a medida

foi feita.

O espalhamento observado na figura anterior traduz a dependência das medidas com a orientação do trajeto correspondente, com relação ao ponto subsolar no instante do evento. Para que as observações dos SPAs se tornem independente também dessa influência é necessário aplicar uma normalização por  $\chi$ . Foram determinados então os ângulos zenitais ( $\chi$ ) de incidência da radiação solar que produziu cada um dos eventos pertencentes ao nosso banco de dados utilizando o tempo de ocorrência desses SPAs. Pelo fato dos trajetos serem longos, envolvendo grandes diferenças de longitudes e latitudes entre as estações de transmissão e recepção, adotamos um valor representativo do ângulo zenital. A determinação deste valor consistiu em, inicialmente, dividir o percurso da onda de VLF em várias partes iguais (100 km) e calcular o valor de  $\chi$  no centro de cada parte. Dentre os vários valores de  $\chi$  calculados para cada trajeto, utilizamos a média desses valores ( $\chi_{med}$ ), lembrando que em muitos casos o valor adotado não representa bem a influência sofrida nos diferentes pontos do trajeto, principalmente para aqueles com maior componente Leste-Oeste.

Por esta razão, não há na literatura um consenso sobre a forma de tornar a importância da resposta ionosférica independente de  $\chi$ . Como vimos no capítulo anterior, alguns autores desconsideram essa influência para determinados ângulos (por exemplo: Kaufmann et al. (2002)  $\chi \leq 70^\circ$ ; Pant (1993)  $\chi \leq 81^\circ$ ), e outros não a consideram para nenhum ângulo (Bracewell e Straker, 1949). McRae e Thomson (2004) mostraram que a dependência do processo de ionização da região-D ionosférica devido a explosões pelo ângulo zenital não é forte, podendo mesmo ser desconsiderada. Porém, outros autores realizam essa normalização multiplicando a importância do SPA pela  $\sec\chi$  (Muraoka et al. 1977; Pant, 1993), baseados em estudos anteriores que mostraram que a importância da resposta ionosférica é linearmente dependente do  $\log[\sec\chi]$  (Chilton et al., 1963). A FIGURA 2.4 mostra que não é

possível definir uma única função de dependência de  $I_{SPA}$  com  $\chi_{med}$ , confirmando o estudo anterior de Chilton et al. (1963). Nove explosões solares foram escolhidas e numeradas de forma crescente com a intensidade da emissão explosiva. Essas explosões produziram SPAs medidos simultaneamente em diferentes trajetos, conseqüentemente com diferentes ângulos zenitais.

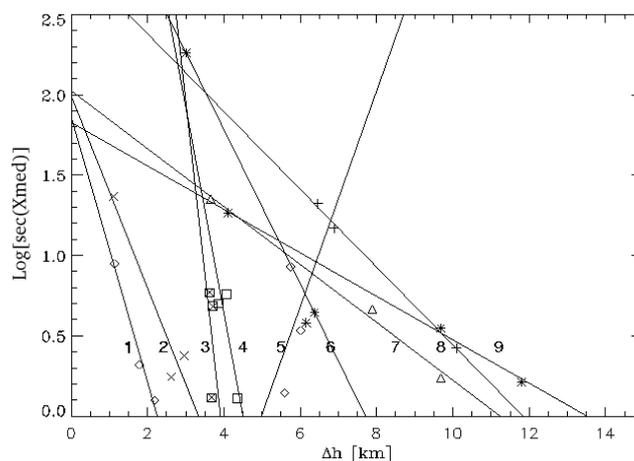


Figura 14 - Relação entre a resposta ionosférica medida por diferentes trajetos e os ângulos zenitais correspondentes.

Ajustamos as observações feitas, para cada explosão, com a reta  $\log[\chi_{med}] = \text{constante} \cdot f(\Delta h)$ , onde  $\Delta h = h_0 - h'$ , para os valores de  $h_0$  dados pela função  $h_0(\chi)$  (FIGURA 2.5), que foi modelada por McRae e Thomson (2000), e é válida para trajetos trans-equatoriais e de baixa e média latitude.

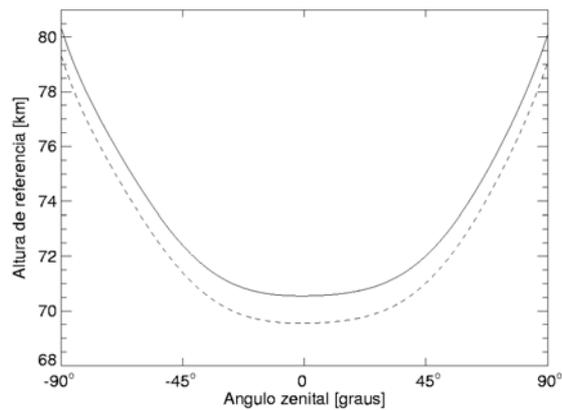


Figura 15 - Variação da altura de referência  $h'$  com o ângulo zenital  $\chi$  durante máximo (tracejado) e mínimo solar (contínuo). Os ângulos negativos indicam o período do amanhecer, enquanto os positivos representam o entardecer.  
 FONTE: McRae e Thomson (2000)

Assim, além de notarmos de forma imediata na figura 2.4 que o coeficiente angular do ajuste varia de explosão para explosão (Chilton et al., 1963) impossibilitando a adoção de uma correção única pelo ângulo  $\chi_{med}$ , vemos também que os valores de  $\Delta h$  no ponto sub-solar (onde  $\chi = 0$ ) estimados através da extrapolação do ajuste crescem com o aumento da intensidade da explosão solar, sugerindo que quanto maior a explosão solar, maior o 'abaixamento' ionosférico.

## 2.2 Dados Solares: Emissão em Raios-X

### 2.2.1 Base de dados

Para a análise da resposta ionosférica aos eventos solares transientes, foi necessário obter informações sobre as características das explosões solares que geraram os SPAs selecionados. Utilizamos dados dos detectores de raios-X a bordo dos satélites GOES, que possuem uma série de instrumentos para monitorar o Sol. Orbitando a 35000 km de altitude, os instrumentos do GOES fazem medidas da emissão em raios-X proveniente do disco solar, e ainda fornecem informações sobre o fluxo de partículas energéticas e sobre o campo

magnético da Terra. A emissão em raios-X do disco solar inclui emissões quiescentes e explosivas e é detectada pelos sensores de raios-X que operam em duas bandas de comprimentos de ondas de fótons: 0.5-4 Å e 1-8 Å, o que corresponde às energias entre 2 e 20 keV. Os detectores fornecem os fluxos de raios-X em unidade de  $W/m^2$ , em função do tempo, com uma resolução temporal de 3 segundos.

### 2.2.2 Subtração do nível pré-evento

Os detectores do satélite GOES não possuem resolução espacial e portanto o fluxo em raios-X por eles medido contém a emissão quiescente e explosiva originadas em todas as regiões ativas presentes no disco solar. A FIGURA 2.6 mostra o fluxo de uma emissão explosiva sobrepondo-se a um fluxo pré-evento correspondente às outras contribuições do restante do disco.

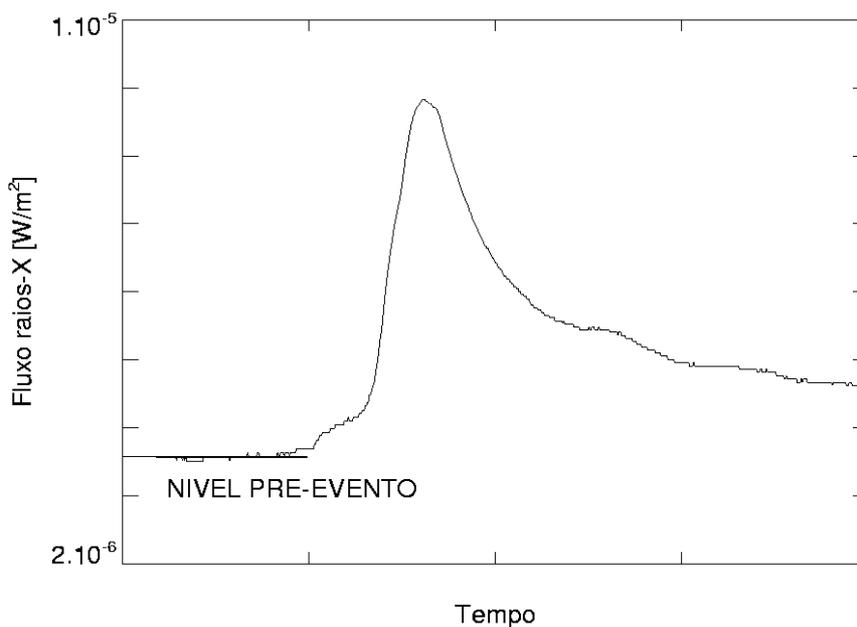


Figura 16 - Exemplo do perfil temporal do fluxo de raios-X detectados pelo GOES no canal de energia 1 - 8 Å durante uma explosão solar, sobrepondo-se ao nível de fluxo pré-evento. Esse aumento do fluxo pode durar desde alguns minutos até horas.

Supondo que apenas o excesso de raios-X é responsável pela ionização extra na região-D, subtraímos o nível quiescente pré-evento. Mostraremos ao final deste capítulo que este nível pré-evento realmente não contribui para a ionização do nível quiescente da ionosfera, precedente ao evento SPA, justificando assim este procedimento. Nestas condições, desconsiderar o nível pré-evento torna-se especialmente importante para a análise de pequenas explosões, nas quais o fluxo explosivo de interesse não supera consideravelmente o fluxo total do Sol. A FIGURA 2.7 apresenta três exemplos de pequenas explosões geradoras de SPA que ocorreram sobre um nível pré-evento de mesma ordem do fluxo em excesso, ilustrando a necessidade de adotar a metodologia apresentada.

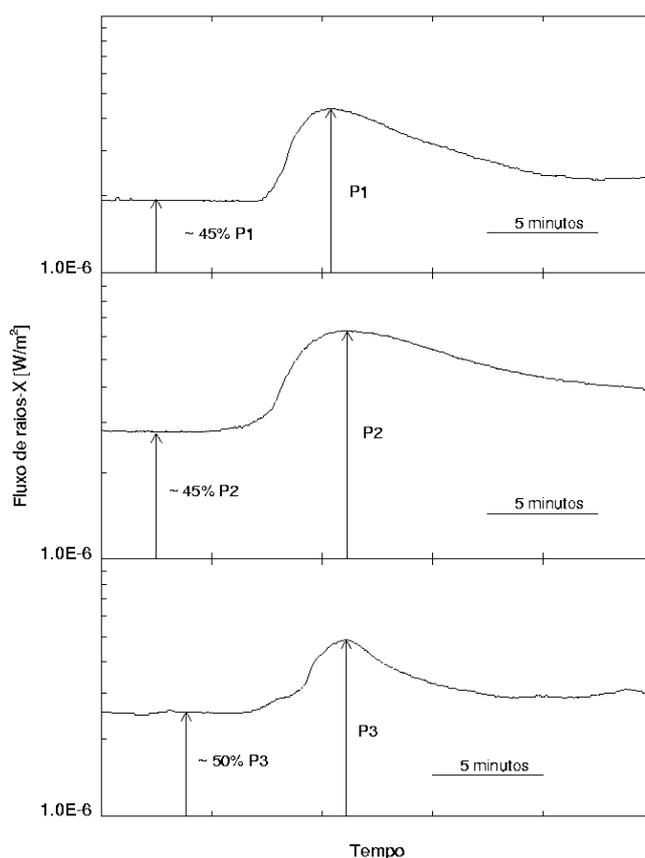


Figura 17 - Exemplos da importância da subtração do nível pré-evento dos dados raios-X detectados pelo GOES no canal de energia 1 - 8Å. Vemos que nestes casos, o nível de emissão integrada no disco solar representa 45%,

45% e 50% do pico do evento P1, P2 e P3, respectivamente.

### 2.2.3 Determinação dos espectros térmicos das explosões solares

Com o objetivo de identificar a energia dos fótons mais importantes para a produção de ionização extra na região-D, determinamos o espectro das explosões supondo que a emissão em raios-X é gerada pelo aquecimento do plasma das regiões ativas. Um espectro térmico é caracterizado pela temperatura (T) do plasma emissor e por sua medida de emissão (EM), que pode ser expressa por:

$$EM = \int_V N_e^2 dV \quad (2.2)$$

onde  $dV$  é um elemento diferencial do volume,  $V$ , do plasma emitindo, e  $N_e$  é sua densidade eletrônica.

Assim, o fluxo em raios-X emitido no comprimento de onda  $\lambda$ , supondo um plasma isotérmico à temperatura  $T$ , pode ser representado através do produto entre EM e uma função da temperatura (Thomas et al., 1985):

$$F(EM, T, \lambda) = EM \times f(T, \lambda) \quad (2.3)$$

Nestas condições, a razão (R) entre as emissões detectadas pelos dois canais de energia do satélite GOES só depende da temperatura do plasma emissor, permitindo sua determinação através da curva parametrizada  $T$  versus  $R$  (FIGURA 2.8) deduzida do modelo térmico de Mewe (Thomas et al., 1985; Garcia, 1994; Sylwester et al., 1995), que é expressa por:

$$T(R) = 3,15 + 77,2R - 164R^2 + 205R^3 \quad (2.4)$$

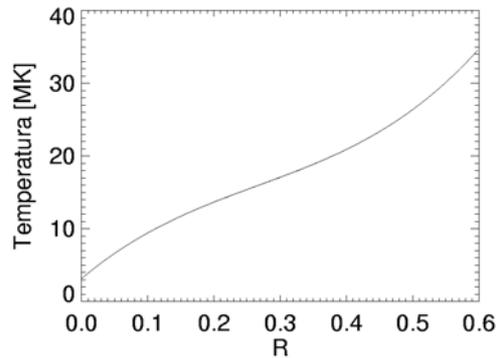


Figura 18 - Temperaturas efetivas do plasma solar em função das razões dos fluxos medidos pelos dois detectores do satélite GOES.

A partir dos fluxos de raios-X observados e dos valores correspondentes de  $T$ , o valor EM da região ativa explosiva foi determinado utilizando a eq. 2.3. Assim, foi possível calcular uma distribuição espectral dos fluxos de raios-X observado, ou seja, um espectro para cada evento solar que produziu um SPA. A validade dos espectros calculados foi testada através de uma convolução entre eles e as funções de transferência dos detectores do GOES (0.5-4 Å e 1-8 Å), que são as respostas dos detectores em função do comprimento de onda da radiação incidente. A FIGURA 2.9 exemplifica esse procedimento, mostrando no quadro A o perfil temporal de uma explosão solar detectada pelo canal de 1-8 Å.

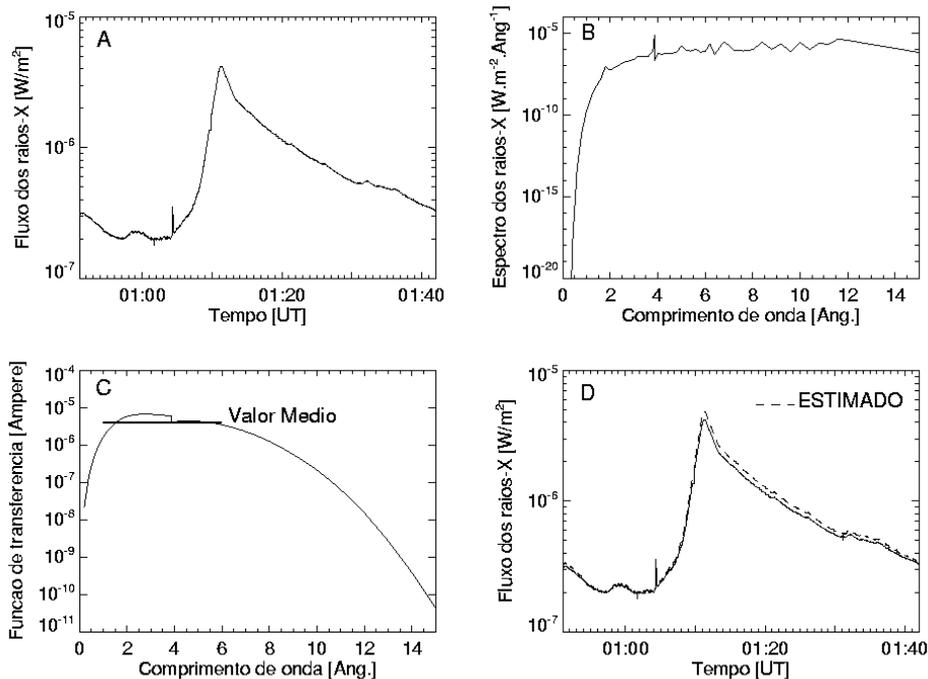


Figura 19 - Exemplo da construção e validação do espectro térmico utilizado neste trabalho. (A) Perfil temporal de uma explosão solar em raios-X observados pelo canal de 1-8 Å; (B) Um exemplo de espectro obtido através da temperatura e da medida de emissão de um determinado instante de tempo do evento; (C) Função de transferência do canal de 1 – 8 Å; e (D) Fluxo calculado na banda de 1 – 8 Å sobreposta aos dados observados pelos sensores de raios-X.

Com os valores de  $T$  e  $EM$  calculados em cada instante foi possível determinar a distribuição espectral da radiação (quadro B, por exemplo), que foi convoluído com a função de transferência do detector de fótons de 1-8 Å. Essa função de transferência está mostrada no quadro C, assim como seu valor médio na banda de observação. Dessa forma, obtivemos a resposta do detector ao fluxo do evento, que nos permite estimar os valores que teriam sido medidos pelo instrumento. No quadro D vemos o fluxo do canal de 1-8 Å estimado através desse procedimento sobreposto ao fluxo realmente medido pelo detector, verificando assim que os espectros térmicos calculados

representavam de maneira satisfatória os fluxos integrados observados em raios-X pelo GOES.

Utilizamos esses espectros térmicos durante excessos explosivos e o modelo de eficiência de fotoionização para cada energia de fótons encontrado no trabalho de Ohshio (1978), para determinar a taxa de produção de pares de elétrons-íons, em função da altura na atmosfera. A FIGURA 2.10 mostra exemplos de curvas das taxas de produção obtidas para cada comprimento de onda do intervalo entre 0.5 e 4 Å, para dois eventos de intensidades diferentes, sobrepostas às taxas de produção causadas pela radiação Lyman- $\alpha$ .

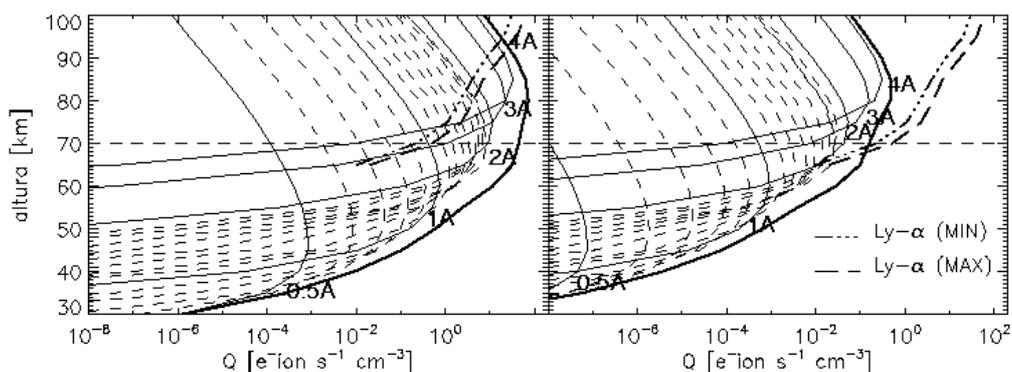


Figura 20 - Curvas típicas da taxa de produção de pares de elétrons-íons por fótons com diferentes comprimentos de onda (0.5, 1, 2, 3 e 4 Å, e seus intermediários), em função da altura, mostrando a faixa de energias de fótons raios-X responsáveis pela produção de excessos de ionização abaixo de 70 km (SPA). As curvas da esquerda são referentes a um intenso evento solar que produziu um grande SPA, e as do quadro da direita são referentes a um evento mais fraco que produziu um pequeno SPA. As taxas de produção referentes à radiação Lyman- $\alpha$  também estão indicadas na figura. A curva grossa representa a taxa de produção eletrônica devida à emissão em raios-X.

A curva grossa indica a ionização total causada pelos raios-X. Vemos que há um excesso de ionização, com relação ao nível correspondente à radiação Ly-

$\alpha$ , na altura de referência (70 km) e abaixo dela no momento da explosão (notado como o SPA) devido a fótons de comprimentos de onda menores ou iguais a 2Å. Por isso adotamos o intervalo entre 0.5 e 2 Å como sendo a banda de interesse na geração de excessos de ionização da região-D ionosférica.

O fluxo de fótons com comprimentos de onda  $\leq 2\text{Å}$  torna-se suficiente para provocar ionizações extras na região-D apenas durante explosões solares. Em períodos quiescentes, a distribuição espectral da emissão em raios-X não conta com uma contribuição significativa destes fótons. A FIGURA 2.11 mostra o espectro térmico do excesso em raios-X durante uma explosão (linha contínua) e durante períodos quiescentes referentes ao período de atividade solar máxima (linha tracejada) e de atividade solar mínima (linha pontilhada). Notamos que há uma grande diferença espectral entre períodos explosivos e quiescentes, em particular para baixos comprimentos de onda, devido às diferenças de temperatura do plasma explodindo ( $10^7$  K) comparado com a correspondente do plasma quiescente ( $5 \times 10^6$  K) que não varia ao longo do ciclo solar. Isso evidencia a importância do aumento da temperatura da região ativa, que ocorre durante explosões solares, na produção de fótons geradores de eventos ionosféricos SPAs.

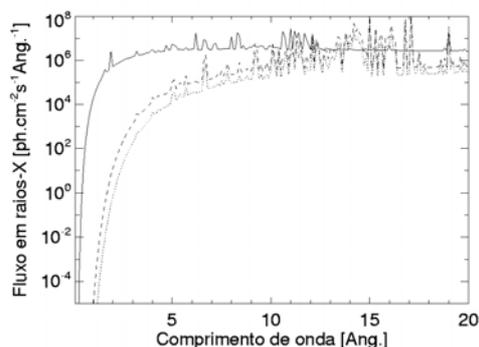


Figura 21 - Espectros térmicos em raios-X durante uma explosão solar (linha contínua) e durante um período quiescente típico de máximo solar (tracejado) e mínimo solar (pontilhado).

O aumento observado pelo GOES dos fluxos quiescentes dos canais de energia dos raios-X durante períodos mais ativos do Sol é devido ao maior número de regiões ativas, ou seja, ao aumento proporcional de EM (eq. 2.3), e não ao aumento da temperatura destas regiões, que se mantém entre  $\approx 3$  e  $5 \times 10^6$  K ao longo do ciclo de atividade solar. Conseqüentemente, a distribuição espectral da emissão quiescente é pouco dependente do ciclo solar, permanecendo sem uma contribuição significativa de fótons com  $\lambda \leq 2$  Å. A FIGURA 2.12 ilustra esse fato, mostrando que a taxa de ionização produzida em torno de 70 km de altitude por emissões quiescentes em raios-X de diferentes níveis é muito inferior à ionização causada pela radiação Lyman- $\alpha$ , indicando que, sob tais condições, esta radiação representa o papel mais importante no processo de ionização da região-D ionosférica. Isso faz com que a subtração do nível pré-evento em raios-X mostrada na seção anterior e utilizada em nossas análises seja justificada.

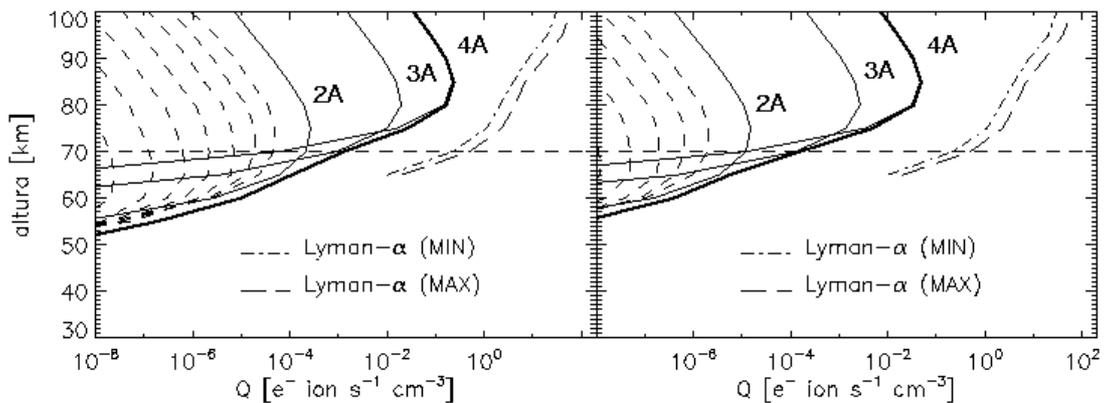


Figura 22 - Taxas de produção de pares de elétron-íon devidas a emissões quiescentes de diferentes níveis (C2: esquerda, equivalendo a um fluxo de  $2 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ; e B7: direita, equivalendo a  $7 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$  para o canal de energia de 1-8 Å, comparadas às curvas da taxa de ionização por radiação Ly- $\alpha$  na mesma região da ionosfera. A curva grossa representa a taxa total de produção eletrônica devida à emissão em raios-X. Foi utilizado o mesmo intervalo de energia dos fótons raios-X utilizado na figura 2.10.



### **3 DEPENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA REGIÃO-D IONOSFÉRICA COM O CICLO DE ATIVIDADE SOLAR**

O Clima Espacial é determinado pelo impacto de fenômenos solares (explosões, ejeções de matéria, vento, fluxo de radiação e de partículas) e do campo magnético interplanetário sobre o ambiente terrestre. Sendo o Sol o principal controlador do Clima Espacial, a conexão entre seus processos físicos e os terrestres gera conseqüências diretas em nossa atmosfera, oceanos e continentes. O fluxo de radiação incidente na Terra depende do ciclo de atividade solar e é responsável por variações de curta escala no Clima Espacial e de longo prazo no clima global. Parte do espectro dessa radiação, correspondente às faixas dos raios-X e à linha Ly- $\alpha$ , é responsável pela maior parte da ionização relativa à baixa ionosfera. Ao longo do ciclo de 11 anos da atividade solar o fluxo desses fótons ionizantes sofre variações de fatores 2-3, que são associadas ao aparecimento, crescimento e desaparecimento de regiões ativas no disco solar. Acima dessa variação, o fluxo em raios-X sofre ainda aumentos bruscos de várias ordens de grandeza durante explosões solares. Os efeitos dessa emissão explosiva sobre a ionização da baixa ionosfera são conhecidos, mas a influência das variações de longo prazo do fluxo de raios-X provenientes de regiões ativas quiescentes em seu comportamento ainda não possui uma interpretação conclusiva (Nicolet e Aikin, 1960; Poppoff et al., 1964; Thomson et al., 2005). Embora no trabalho de Kaufmann e Paes de Barros (1969) tenha sido levantada a hipótese de haver uma possível influência do ciclo solar na resposta ionosférica às explosões, este fato só veio a ser estudado na presente dissertação. McRae e Thomson (2004) mostraram que durante período de alta atividade solar, a altura de referência da região-D apresenta-se  $\sim 1$  km mais baixa do que durante mínimo, o que sugere também um efeito do ciclo do Sol na ionização quiescente dessa região ionosférica. Entretanto, esses autores não realizaram uma análise sob este enfoque no artigo em questão. Recentemente, Sátori et al. (2005)

interpretaram variações observadas na propagação de ondas de ELF como sendo evidências de efeitos da variação de 11 anos dos raios-X sobre o perfil de condutividade da ionosfera entre 90 e 100 km de altura. Porém essa interpretação não é válida para a região-D, pois como vimos no capítulo anterior, os raios-X gerados em regiões ativas quiescentes não controlam a ionização em torno de 70 km de altitude por não apresentarem fluxos significativos de fótons com  $0.5 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 2 \text{ \AA}$ , que são os mais importantes no processo de ionização extra dessa região. O objetivo central desse trabalho é identificar de que maneira a região-D reage às variações de fluxos de fótons ionizantes ao longo do ciclo de atividade solar, utilizando informações contidas na fase de sinais de VLF propagados no guia de onda Terra-ionosfera.

A partir do estudo de eventos de ionização transientes causados por explosões solares em raios-X, foi possível identificar padrões na resposta ionosférica de acordo com o ciclo solar que nos permitiram interpretar o comportamento de longo prazo da região-D quiescente. Apresentaremos na seção 3.1 a análise dos parâmetros das explosões solares que foram capazes de provocar um SPA nos sinais de VLF. Esta primeira abordagem mostrou que a região-D apresenta uma maior sensibilidade a pequenos eventos solares durante períodos de mínima atividade do Sol. Os resultados gerados foram publicados na revista arbitrada 'Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics' (Raulin, Pacini, Kaufmann, et al., 2006), e serviram de base para o estudo subsequente, que procurou quantificar a variação da resposta ionosférica a explosões solares em raios-X em diferentes períodos do ciclo de atividade solar. Para realizar esta segunda análise, utilizamos o intervalo de energia dos fótons raios-X efetivamente responsáveis pelo excesso de ionização, que foi identificado conforme descrição encontrada no capítulo anterior, e consideramos também a variação temporal de cada explosão solar que ocorreu em determinado período do ciclo. Encontramos também evidências da influência do ciclo de atividade solar sobre o comportamento da região-D, que resultaram em um artigo que foi aceito pela revista 'Journal of Geophysical Research' (Pacini e Raulin, in press).

Esta análise será detalhada na seção 3.2. Finalizaremos este capítulo com uma discussão sobre os resultados, implicações e perspectivas dessas análises.

### **3.1 Sobre a Detectabilidade de Explosões Solares em Raios-X na Região-D ionosférica**

Investigamos as características das explosões solares que foram capazes de provocar SPAs detectados em diferentes períodos do ciclo solar (conforme cobertura de dados mostrada na figura 2.1), independentemente da importância do 'abaixamento' ionosférico produzido. Dessa forma foi possível identificar o comportamento da região-D quiescente durante períodos de alta e baixa atividade do Sol.

As informações do fluxo de pico,  $F_P$ , e do fator de dureza (ou razão,  $R$ , entre as emissões detectadas pelos dois canais de energia do GOES) de todas as explosões solares que produziram SPAs, determinadas através dos dados em raios-X fornecidos pelos dois canais de energia do GOES (ver detalhes do procedimento no capítulo 2, seção 2.2), serviram de base para esta análise. Para cada canal de energia, dividimos essas informações de acordo com o período do ciclo solar correspondente à ocorrência da explosão. A FIGURA 3.1 mostra um diagrama de dispersão dessas características já separadas: mínimo solar (lado esquerdo), máximo (direito), canal de 1-8 Å (acima) e canal de 0.5-4 Å (abaixo). As linhas tracejadas são arbitrárias e servem de padrões para a análise estatística desta figura. Vemos que no canal de menor energia do GOES (1-8 Å), cerca de 15% dos eventos ocorridos no período de mínima atividade possuíam  $F_P \leq 10^{-6} \text{ W/m}^2$  (valor indicado pela linha tracejada horizontal). Abaixo do mesmo valor, encontramos no período de máximo solar uma porcentagem muito inferior do total de eventos ocorridos no período. O mesmo se deu para o canal mais energético dos raios-X (0.5-4 Å), quando utilizamos como referência o nível de fluxo de  $10^{-7} \text{ W/m}^2$ . Isso sugere que a

região-D ionosférica responde melhor aos menores eventos durante mínimo solar, sugerindo a existência de uma maior detectabilidade ionosférica às explosões solares fracas em raios-X em períodos de baixa atividade do Sol.

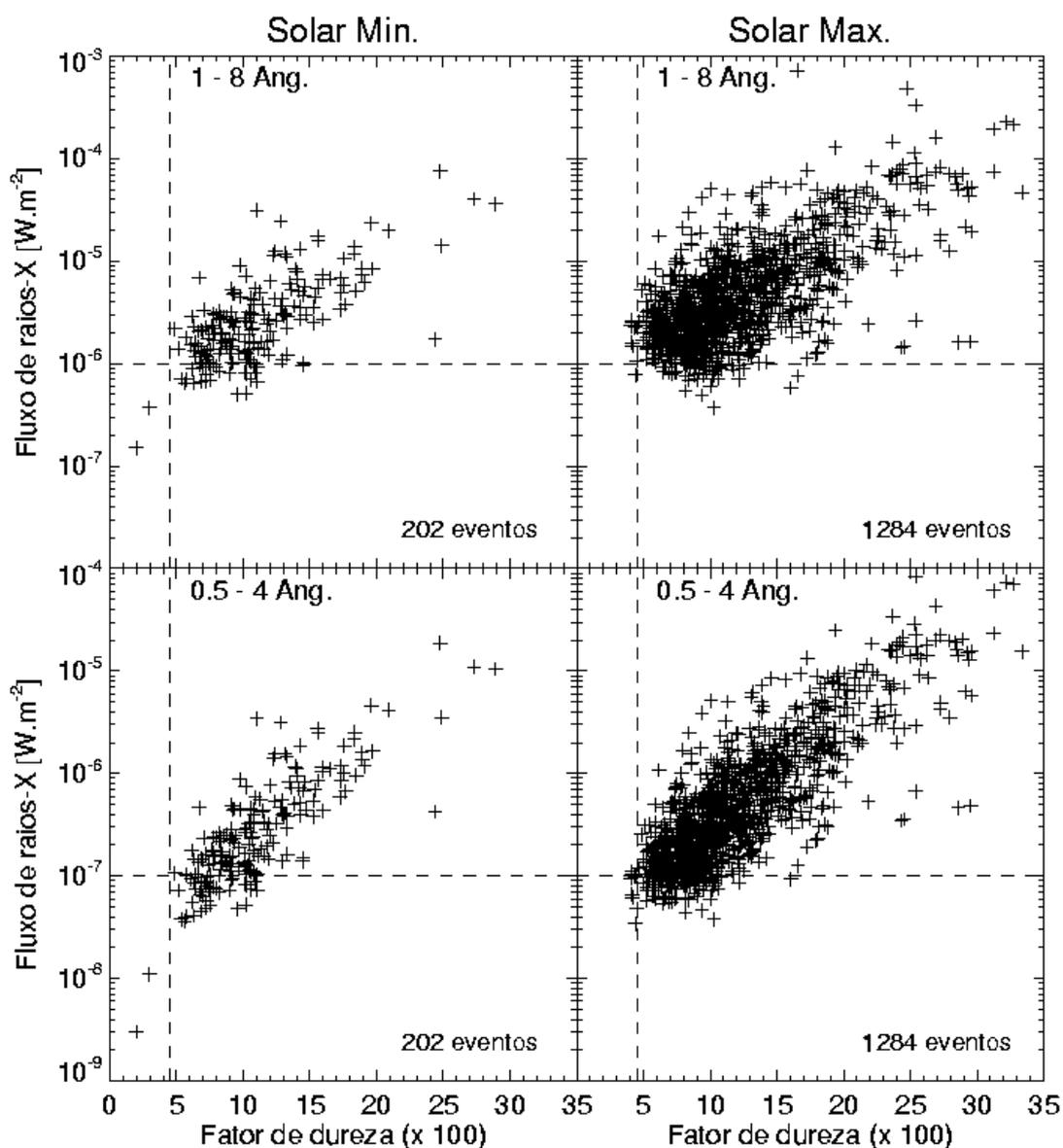


Figura 23.1 - Diagrama de dispersão das características (fluxo de pico e fator de dureza, ou R) das explosões solares que geraram SPAs detectados.

Além disso, esta figura indica que o valor mínimo de  $F_p$  necessário para produzir um SPA varia entre os dois períodos do ciclo solar. Este fato pode ser notado comparando os menores fluxos de raios-X que geraram SPA nos

diferentes períodos do ciclo. Notamos que este valor é maior durante o período de alta atividade solar.

Por outro lado, ao analisarmos os limites impostos pelos fatores de dureza dos eventos, notamos que praticamente todas as explosões solares que produziram resposta ionosférica medida possuem valores superiores a 0.045 (indicado pelas linhas tracejadas verticais), tanto durante máximo quanto durante mínimo de atividade solar, sugerindo que o espectro da explosão seja um fator determinante para a ocorrência de eventos de excessos de ionização na região-D ionosférica.

Para melhor entender a influência do ciclo solar na ocorrência de SPAs, foram feitos histogramas de distribuição dos valores de  $F_p$  das explosões solares que produziram SPAs, separados de acordo com o ciclo solar. Estes histogramas estão mostrados na FIGURA 3.2 para o canal de 1-8 Å, onde vemos a distribuição referente ao período de máxima atividade em linhas tracejadas e a correspondente ao mínimo em linhas contínuas. Utilizamos para este histograma larguras (binsizes) de  $0.3 \text{ W/m}^2$ , pois verificamos que dessa forma o comportamento da distribuição para eventos com fluxos de pico até  $10^{-5} \text{ W/m}^2$  não é influenciado. Notamos que a proporção de SPAs gerados por pequenos eventos ( $F_p \leq 2-3 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ ) é maior durante períodos de mínima atividade solar comparada ao período de maior atividade. Essa proporção pode ser interpretada como a probabilidade de ocorrência de SPAs gerados por eventos com determinados fluxos de pico. Isso significa que é mais provável que pequenos eventos produzam SPAs durante mínimo do que durante máximo. Para eventos raios-X maiores, a probabilidade não mais depende da atividade solar. Os resultados encontrados neste histograma se repetiram para os dados do canal mais energético (0.5 - 4 Å), e confirmaram a existência de uma maior sensibilidade ionosférica a eventos solares em raios-X durante o mínimo solar.

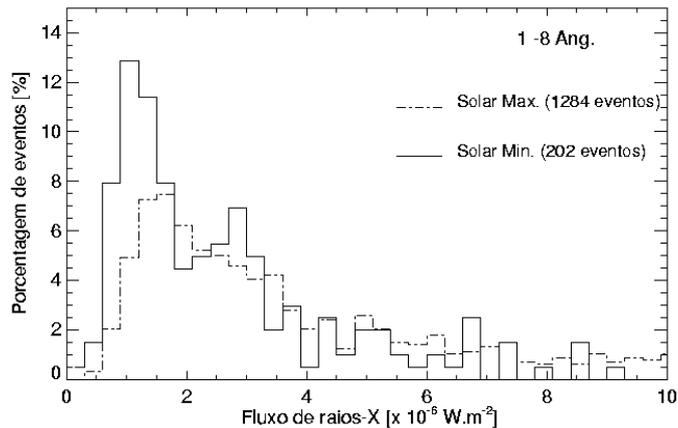


Figura 24 - Distribuição dos valores de fluxo de pico dos eventos solares em raios-X que produziram SPAs, para o canal de energia de 1-8 Å, durante máxima (tracejada) e mínima (contínua) atividade solar.

A indicação de que o valor mínimo de fluxo raios-X necessário para produzir um SPA varia com o ciclo solar é reforçada pela FIGURA 3.3, onde apresentamos uma distribuição acumulada dos fluxos de 1-8 Å para os diferentes períodos do ciclo de atividade do Sol.

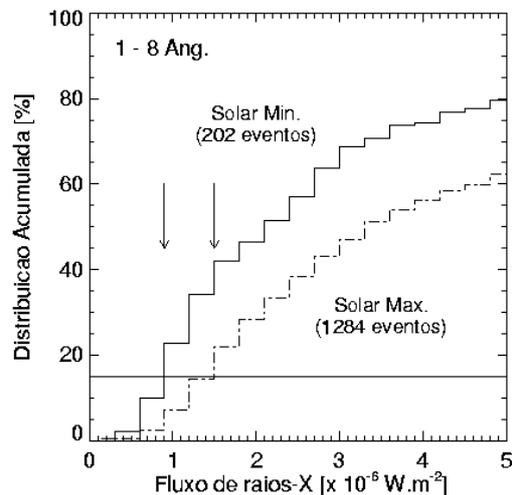


Figura 25 - Distribuições acumuladas dos fluxos de pico das explosões solares, no canal de energia de 1-8 Å que produziram SPAs nos diferentes períodos do ciclo de atividade do Sol (máximo: tracejada; mínimo: contínua). As setas indicam os valores de fluxo abaixo dos quais a probabilidade de

ocorrência de SPAs é  $< 15\%$ .

Novamente o período de máxima atividade está representado por linhas tracejadas e o mínimo por linhas contínuas. As flechas indicam os valores de  $F_p$  abaixo dos quais a probabilidade de ocorrência de um SPA associado é inferior a 15%, mostrando que há uma clara diferença entre esses valores para máximo e mínimo solar. Essa figura sugere que o valor mínimo de fluxo em raios-X capaz de produzir um SPA é mais baixo durante mínimo solar, quando pequenas explosões solares que pouco produzem SPAs em períodos de máximo são responsáveis por uma maior proporção de SPAs produzidos. Essa tendência também se aplica aos fluxos detectados pelo canal de mais alta energia (0.5-4 Å).

Esses resultados apresentam um novo cenário para o estudo da resposta da região-D às explosões solares, no qual a sensibilidade ionosférica é maior para pequenas explosões durante baixa atividade do Sol.

### **3.2 Sensibilidade da Região-D Ionosférica: uma Dependência com o Ciclo de Atividade Solar.**

A partir dos indícios levantados na análise descrita anteriormente, tornou-se interessante entender de que forma a região-D ionosférica responde às explosões solares e qual é a influência do ciclo solar nessa relação. A investigação sobre a dependência da importância do SPA com o tamanho da explosão em raios-X foi feita por diversos autores (por exemplo: Kaufmann e Paes de Barros (1969), Muraoka et al. (1977), Pant (1993), Kaufmann et al. (2002), McRae e Thomson (2004) e Thomson et al. (2005)), porém as correlações encontradas nestes trabalhos, além de apresentarem dispersões significativas, não concordam entre si. Isso pode ser atribuído a vários fatores, incluindo à escolha dos intervalos de energia dos raios-X utilizados, à ausência de distinção dos eventos ocorridos em diferentes períodos do ciclo solar e à

adoção de um parâmetro físico inadequado para representar a explosão solar. Com nossos dados separados de acordo com o período do ciclo solar correspondente e após um cuidadoso tratamento dos dados em raios-X (detalhado no capítulo 2, seção 2.2), foi possível analisar a correlação existente entre as características das explosões solares e dos SPAs tomando em conta esses fatores.

Selecionamos para esta análise aproximadamente 40 eventos SPAs detectados na fase de ondas de VLF propagadas através do trajeto ARG-ATI. Esses eventos foram gerados por explosões solares que apresentaram um perfil temporal simples do fluxo em raios-X e, em sua maioria, ocorreram no período de verão no trajeto, o que elimina possíveis influências sazonais na análise. Através da integral do perfil temporal da emissão da banda de 0.5-2 Å entre os tempos de início da explosão solar e de máximo do SPA, calculamos o valor da fluência,  $F_X$  em  $J/m^2$ , que foi adotada como parâmetro representativo da explosão solar nesta análise. A fluência da explosão solar nos informa sobre o total de energia injetada na atmosfera terrestre ao longo do evento, enquanto o parâmetro fluxo de pico, comumente utilizado nos trabalhos anteriores, representa uma potência em um dado instante de tempo, não sendo dessa forma o parâmetro mais indicado para se associar à importância do SPA produzido ( $I_{SPA}$ ).

Assim, encontramos correlações extremamente boas entre  $I_{SPA} \times F_X$  para os dois períodos do ciclo solar, com coeficientes de correlação maiores que 0.95, como mostra a FIGURA 3.4.

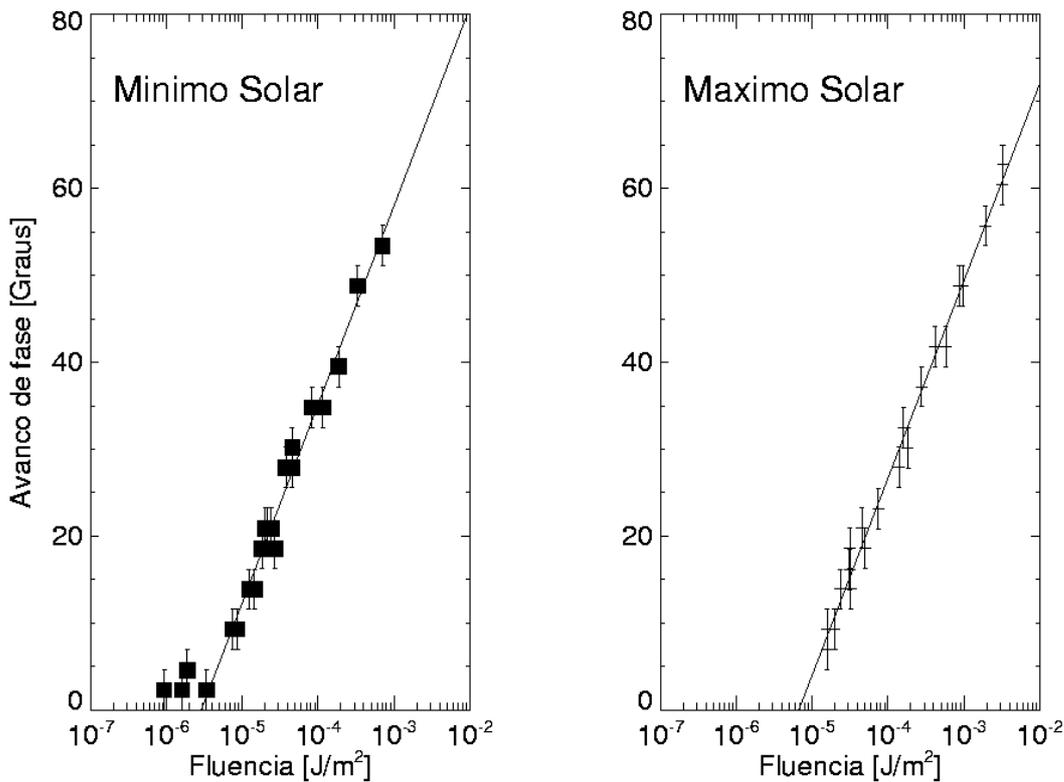


Figura 26 - Correlações entre as amplitudes dos SPAs e as fluências  $F_X$  das explosões solares responsáveis na banda de energia de 0.5 a 2 Å, para cada um dos períodos do ciclo de atividade solar.

Através da extrapolação dos ajustes obtidos em cada correlação, foi possível estimar os valores mínimos de  $F_X$  depositadas na baixa ionosfera que foram capazes de produzir SPAs. Encontramos para o período de alta atividade solar um valor mínimo de  $F_{X(MIN)} \sim 7 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^2$  enquanto para o período de baixa atividade o valor encontrado foi de  $F_{X(MIN)} \sim 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^2$ . Notamos que, para o período de baixa atividade solar, algumas explosões com fluências inferiores ao valor  $F_{X(MIN)}$  estimado no ajuste produziram SPAs de aproximadamente 2° de importância, o que corresponde neste caso (para esta frequência e trajeto) ao valor do ruído de detecção ( $\sim 0.5 \mu\text{s}$ ). Tendo em vista a diferença entre as correlações encontradas para máximo e mínimo solar, a influência do ciclo sobre a resposta da região-D a eventos solares em raios-X fica evidenciada.

A fim de reforçar e validar a escolha da banda de energia dos fótons adotada (0.5-2 Å), fizemos essa correlação utilizando também as fluências de fótons com maiores comprimentos de onda. Vimos que a qualidade da correlação é dependente do intervalo de tempo adotado na integração do perfil temporal dessa banda de energia, e do próprio intervalo de energia adotado. A FIGURA 3.5 mostra os coeficientes de correlação encontrados em função do comprimento de onda dos fótons utilizados, indicando que a importância do SPA possui uma relação mais estreita com a fluência dos fótons da banda 0.5-2 Å, apoiando assim a adoção deste intervalo.

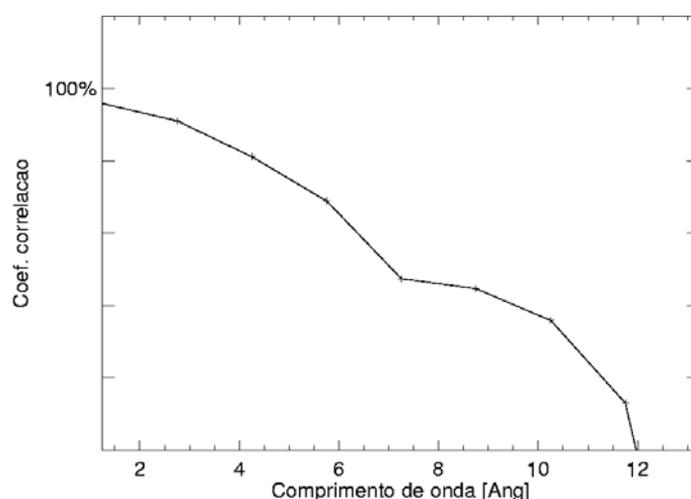


Figura 27 - Coeficientes de correlação da relação entre as amplitudes dos SPAs e as fluências  $F_X$  das explosões solares responsáveis em diferentes bandas de energia dos raios-X, justificando a escolha do intervalo de 0.5 a 2 Å.

A importância do SPA está diretamente relacionada com a variação efetiva da altura de referência da região-D através da expressão 1.17 (capítulo 1), por isso foi possível determinar para cada  $\Delta\phi$  medido um valor de  $\Delta h$  correspondente. Assim, mostramos na FIGURA 3.6 as correlações entre  $\Delta h$  e  $F_X$  para os dois períodos do ciclo solar, dentro de uma mesma escala. Essa figura deixa clara a distinção entre os ajustes, mostrando que certa quantia de energia em raios-X depositada na baixa ionosfera por uma explosão solar

provoca um 'abaixamento' ionosférico maior (~ 1 km) quando ocorre durante mínimo solar do que se ocorresse durante máximo.

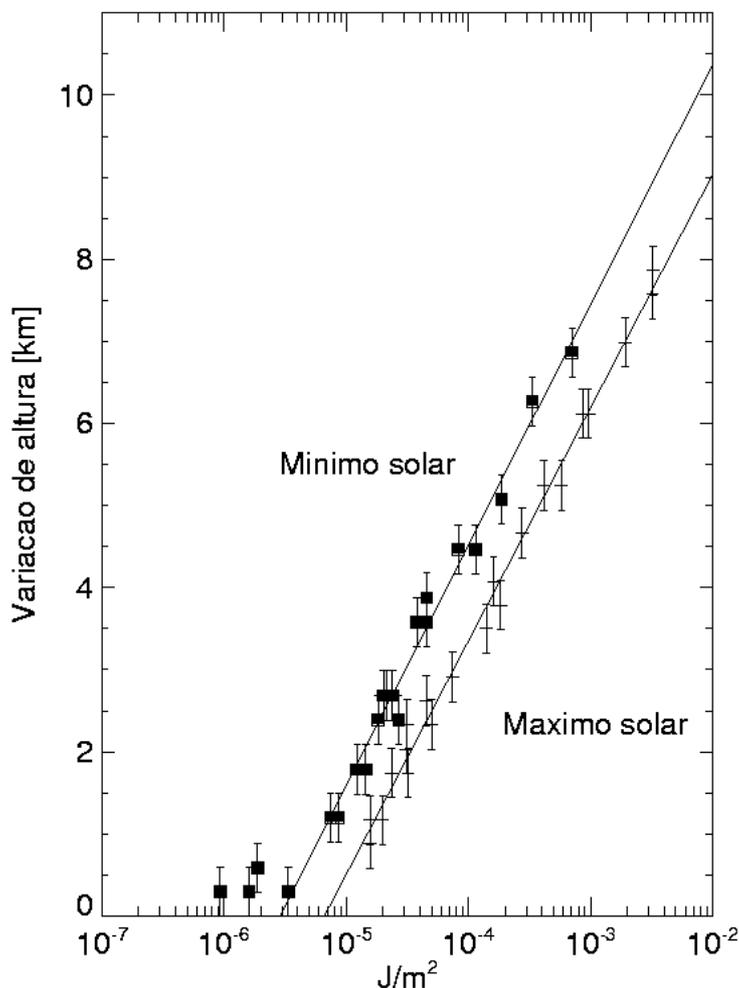


Figura 28 - Correlações entre as amplitudes dos SPAs e as fluências  $F_X$  das explosões solares responsáveis na banda de energia de 0.5 a 2 Å, para cada um dos períodos do ciclo de atividade solar.

Este resultado confirma a variação da sensibilidade ionosférica com o ciclo de atividade solar, e está de acordo com resultados do trabalho de McRae e Thomson (2000), que mostram que a altura de referência da região-D é diferente nos períodos extremos do ciclo, sendo mais alta em torno de 1 km durante baixa atividade do Sol.

### 3.3 Discussão Geral

Nossos resultados apresentaram uma nova perspectiva para o estudo do comportamento da região-D ao longo do ciclo de atividade solar. Identificamos a existência de uma maior sensibilidade da região-D durante mínimo solar através do estudo de SPAs observados na fase de sinais de VLF propagados no guia de onda Terra-ionosfera durante dois períodos extremos do ciclo solar.

Estudos publicados anteriormente (Kreplin et al., 1962; Kaufmann e Paes de Barros, 1969; Deshpande e Mitra, 1972; Muraoka et al., 1977; Pant, 1993; Kaufmann et al., 2002; McRae e Thomson, 2004; Thomson et al., 2005) basearam suas análises em correlações encontradas entre os valores de fluxo de pico das explosões solares, obtidas em diferentes bandas de energia dos raios-X, e os avanços de fase dos sinais de VLF subsequentes. A influência do ciclo de atividade do Sol na resposta ionosférica às explosões não foi notada por esses autores, embora a importância de se considerar possíveis variações de longo prazo dos parâmetros da região-D já houvesse sido citada na literatura da época (Kaufmann e Paes de Barros, 1969; Piazza e Kaufmann, 1975). Essas correlações apresentavam espalhamentos significativos, e ao realizarmos uma comparação entre os diferentes trabalhos, vimos que elas indicavam também valores mínimos de fluxo raios-X capazes de produzir um SPA que não concordavam entre si, mesmo quando as análises eram feitas a partir da mesma banda de energia de fótons (por exemplo: Kaufmann et al. (2002) e McRae e Thomson (2004) - ver tabela 1.2). Como foi citado na seção anterior, as possíveis causas para a discrepância e para o espalhamento observado nessas correlações foram:

**a)** ausência de distinção entre eventos raios-X ocorridos em períodos extremos do ciclo de atividade do Sol que, como mostramos em nossas análises, produzem respostas ionosféricas distintas, já que a região-D apresenta uma sensibilidade dependente do ciclo solar.

**b)** adoção de diferentes tipos de correção das amplitudes dos SPAs medidas em função do ângulo zenital correspondente. Enquanto alguns autores não levaram em consideração a influência de  $\chi$  na resposta ionosférica (Bracewell e Straker, 1949; McRae e Thomson, 2004), outros adotaram como fator de correção de qualquer SPA detectado a função  $\sec(\chi)$  (Muraoka et al., 1977; Pant, 1994). Porém, também há estudos em que essa correção foi considerada necessária apenas para determinados valores de  $\chi$  (Pant (1993) para  $\chi > 81^\circ$ , Kaufmann et al. (2002) para  $\chi > 70^\circ$ ). Neste estudo, consideramos que o ângulo zenital apenas se torna um fator de interferência importante quando seu valor ultrapassa  $60^\circ$ . Utilizamos então eventos com  $\chi \leq 60^\circ$ , e assim não houve necessidade de se aplicar nenhum tipo de correção devido ao ângulo zenital.

**c)** utilização do valor do fluxo de pico das explosões solares que inclui o nível pré-evento dos raios-X. Vimos no capítulo anterior que esse nível pré-evento não participa da formação de um SPA e nem interfere na ionização quiescente da região-D, podendo ser desconsiderado. Além disso, a ausência da subtração desse nível pré-evento prejudica as análises de pequenas explosões.

**d)** utilização de intervalos de energia de raios-X que incluíam fótons que não participam da produção dos eventos SPAs. Foi mostrado no capítulo anterior que fótons com  $\lambda > 2 \text{ \AA}$  não contribuem para a ionização extra medida através dos eventos SPAs (ver figura 2.10), porém fótons com comprimentos de onda de até  $20 \text{ \AA}$  foram considerados nestes trabalhos citados.

**e)** análise da relação existente entre a amplitude do SPA e a potência máxima da explosão solar, em  $\text{W/m}^2$ , que é associada a uma taxa de produção eletrônica. Sendo o evento SPA resultado de um aumento da concentração de elétrons ocorrido ao longo do evento solar, é necessário então considerar a variação temporal do espectro da explosão correspondente. Assim, o

parâmetro solar que melhor representa a quantidade de energia depositada na baixa ionosfera ao longo do evento é a fluência, em  $\text{J}/\text{m}^2$ .

Procurando evitar essas fontes de discrepância, foi possível obter resultados mais precisos que nos permitiram identificar a sutil variação da altura de referência quiescente da região-D em diferentes períodos do ciclo. A variação identificada concorda com resultados recentes de McRae e Thomson (2000), que apresentaram um aumento ( $\sim 1$  km) da altura de referência da região-D quiescente entre os períodos de máximo e de mínimo solar. Isso corresponde a uma variação efetiva da altura da camada refletora das ondas de VLF, que foi identificada por esses autores através do ajuste das características dessas ondas propagadas no lado diurno do planeta feito pelo código 'Long Wave Propagation Capability' (LWPC). Através deste mesmo ajuste, os autores observaram um aumento de  $0.05 \text{ km}^{-1}$  no valor do gradiente de condutividade,  $\beta$ , com o aumento da atividade solar, indicando uma alteração das características elétricas do plasma da região-D ao longo do ciclo solar.

Evidências dessas variações de longo prazo das características ionosféricas foram encontradas também para outras alturas da ionosfera. Sători et al. (2005) encontraram indícios de variações de longo prazo do perfil de condutividade das alturas da baixa ionosfera entre 90 e 100 km através do estudo da propagação de ondas de ELF no guia de onda Terra-ionosfera. Essas variações foram atribuídas pelos autores à variação do fluxo de raios-X de comprimentos de onda superiores a  $2 \text{ \AA}$  ao longo do ciclo solar. Modulações da concentração de elétrons nas camadas E e F da ionosfera causadas pelo ciclo solar também foram identificadas através da utilização de ondas de HF (3 - 30 MHz). A FIGURA 3.7 mostra a variação dos valores máximos das frequências de ondas de HF que são refletidas por essas camadas ao longo do ciclo solar, indicando um aumento da concentração de elétrons nos períodos de máximo solar, já que quanto maior a concentração eletrônica na camada, maior é o valor da máxima frequência refletida por ela.

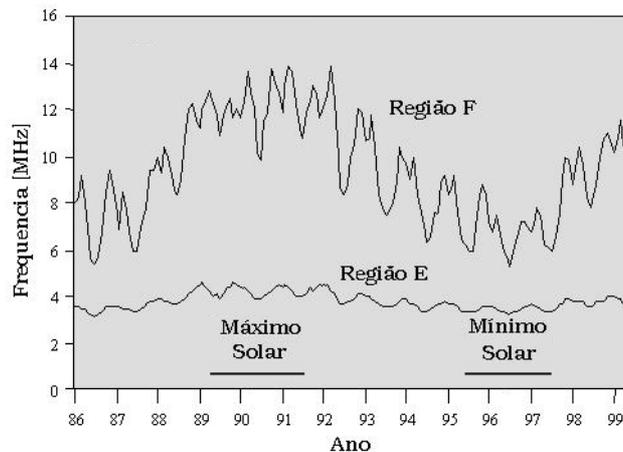


Figura 29 - Indicação da existência de variações da concentração eletrônica das regiões E e F ao longo do ciclo solar.

FONTE: modificada de [www.chl.chalmers.se/mrk/wave-prop/Introduction2H-Propagation.htm](http://www.chl.chalmers.se/mrk/wave-prop/Introduction2H-Propagation.htm)

Variações da concentração eletrônica da região-D com o ciclo de atividade solar foram identificadas por diversos autores através de diferentes dados experimentais e teóricos (ver revisão na tabela 1 em Danilov (1998)), porém os resultados encontrados são discrepantes e até mesmo contraditórios, não havendo ainda um consenso sobre a questão. O que se sabe é que há um aumento relativo da concentração de elétrons com o aumento da atividade solar na parte superior da região-D, enquanto que esse padrão se inverte na parte inferior, havendo então um decréscimo da concentração eletrônica com uma maior atividade do Sol (Danilov, 1998). Atribuindo aos parâmetros ionosféricos de Wait ( $\beta$  e  $h_0$ ) valores encontrados na literatura, foi possível construir perfis da densidade eletrônica ( $N_e$ ) da região-D e comprovar este comportamento, como mostra a FIGURA 3.8. Utilizamos os valores encontrados por McRae e Thomson (2000) através da utilização do código LWPC para dois períodos extremos de atividade solar (máximo:  $\beta = 0.45 \text{ km}^{-1}$  e  $h_0 = 70 \text{ km}$ ; mínimo:  $\beta = 0.4 \text{ km}^{-1}$  e  $h_0 = 71 \text{ km}$ ) e por Piazza e Kaufmann (1975) como resultado de um estudo comparativo entre SIDs medidos em sinais de VLF durante períodos de máximo e mínimo solar (máximo:  $\beta = 0.3 \text{ km}^{-1}$ ;

mínimo:  $\beta = 0.25 \text{ km}^{-1}$ ). Vemos que  $N_e$  é sempre maior durante máximo solar para alturas acima de 62 km, utilizando valores de Piazza e Kaufmann (1975), e de 65 km, utilizando valores de McRae e Thomson (2000).

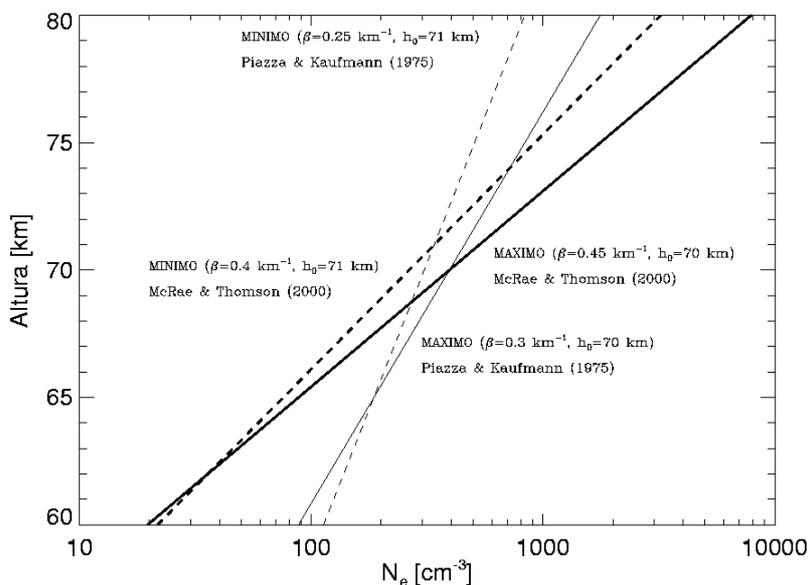


Figura 30 - Perfis da densidade eletrônica da região-D obtidos considerando diferentes valores para os parâmetros ionosféricos de Wait:  $\beta$  e  $h_0$

Essa influência da atividade solar nas características da região-D quiescente é notada também na nossa correlação mostrada na figura 3.6, onde fica evidente que a resposta da baixa ionosfera à incidência de fótons raios-X (da banda 0.5 - 2 Å) é diferente em diferentes períodos do ciclo solar. Sendo os ajustes encontrados dependentes do ciclo solar, existe a possibilidade de se monitorar as variações de longo prazo dos fluxos ionizantes do período quiescente através de um índice ionosférico extraído dessas correlações, desde que esta análise seja estendida ao longo do ciclo solar. Torna-se então interessante investigar se os ajustes encontrados são válidos independentemente dos instrumentos e dos trajetos nos quais os SPAs foram observados. Isso porque para uma análise contínua ao longo do ciclo será necessário utilizar novos dados, já que os que foram utilizados neste estudo correspondem a dois

períodos extremos do ciclo solar e foram observados através de um sistema de transmissão e recepção de ondas de VLF atualmente desativado.

Como vimos no capítulo anterior (seção 2.2), a emissão em raios-X proveniente de regiões ativas quiescentes não provoca excessos de ionização significativos na região-D capazes de serem notados como um evento SPA na fase de sinais de VLF, mesmo durante máximo solar. Ou seja, a taxa de produção de pares de elétrons-íon associada a essa radiação não supera a taxa de ionização causada pela radiação Ly- $\alpha$  (ver figura 2.12), fazendo com que qualquer variação de longo prazo do perfil de densidade eletrônica da região-D possa ser associada à variação do fluxo Ly- $\alpha$  incidente na Terra. Este resultado já era indicado na figura 3.1 através do limite imposto pelo fator de dureza R. A emissão quiescente dos raios-X provém de regiões ativas solares com temperaturas de  $\sim 5 \cdot 10^6$  K, apresentando um espectro com fator de dureza  $< 0.04$ . Sendo assim, variações da altura de reflexão das ondas de VLF ocorridas ao longo do ciclo solar devem traduzir as variações do fluxo Ly- $\alpha$  incidente na Terra.

A radiação Ly- $\alpha$  é uma importante fonte eletromagnética de energia para nosso planeta, pois é responsável por mudanças da atmosfera nas alturas entre 70 - 100 km produzindo o oxigênio molecular e a dissociação de constituintes hidratados, e desempenha um papel fundamental na química de espécies minoritárias da região-D ionosférica como vapor d'água, ozônio e óxido nítrico (Woods et al., 2000). Além disso, essa linha espectral é extremamente importante na dinâmica da atmosfera terrestre, que afeta desde a órbita de satélites próximos até o clima da Terra (Floyd et al., 2002). O acompanhamento das variações temporais dessa radiação é importante para melhor estimar o valor da constante solar ao longo do ciclo, já que a linha Ly- $\alpha$  está na região do espectro solar onde ocorrem as mais significativas variações relativas. A precisa determinação da constante solar irá auxiliar pesquisas desenvolvidas sobre o Clima Espacial. Apesar disso, não há atualmente um monitoramento

contínuo da radiação solar dessa linha espectral, sendo necessária uma determinação indireta obtida através de modelos tipo 'proxy' que estimam o fluxo da radiação de interesse a partir de medidas de outra faixa do espectro solar, como é o caso do modelo SOLAR2000 (Tobiska et al., 2000).

Neste contexto, torna-se interessante buscar e aperfeiçoar uma nova maneira de monitorar as variações do fluxo de Ly- $\alpha$  utilizando, neste caso, um índice ionosférico que mediria as conseqüências dessas variações.

#### 4 RESULTADOS RECENTES E PERSPECTIVAS

Como foi visto no capítulo anterior, os ajustes obtidos entre  $I_{SPA}$  (ou  $\Delta h$ ) e  $F_X$  se mostraram sensíveis a variações da atividade solar em diferentes extremos do ciclo de 11 anos. Este fato torna viável o acompanhamento das variações de longo prazo das radiações solares ionizantes da região-D através da utilização de um índice ionosférico obtido a partir dessas correlações. A fim de verificar se os ajustes encontrados neste estudo são válidos para SPAs medidos por qualquer instrumento e/ou trajeto, sobreposemos à correlação mostrada na figura 3.4 (esquerda) oito novos pontos que representam eventos detectados em diferentes trajetos em período de baixa atividade solar e que não fizeram parte do banco de dados utilizado neste estudo. Seis destes SPAs foram observados em sinais de VLF recebidos na estação de DUNEDIN (DUN), Nova Zelândia, que foram emitidos por diferentes estações transmissoras: norte-americana (NLK-Seattle), japonesa (Japão) e havaiana (NPM-Havaí). Os dois outros SPAs estudados foram recebidos pelo novo sistema de recepção que está em fase de testes e ajustes no Rádio Observatório de Itapetinga - Atibaia, e ocorreram em trajetos que, partindo da estação norte-americana NAA (Maine-EUA), passam na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). A FIGURA 4.1 mostra os oito novos eventos sobrepostos à nossa correlação.

Notamos que os eventos 4 e 5 estão de acordo com a correlação, enquanto que os demais eventos apresentam maiores discrepâncias. Embora tenham sido detectados por um novo sistema de recepção, esses dois eventos coincidentes com o ajuste foram também recebidos em Atibaia, assim como os 21 eventos integrantes da correlação prévia. Isso sugere uma possível dependência do ajuste encontrado com o trajeto percorrido pelas ondas de VLF, pois nesses dois casos, parte desses trajetos se encontra dentro da região da AMAS. Dos eventos recebidos em Dunedin, os de número 7 e 8 são aqueles que apresentam maiores discrepâncias com relação ao ajuste

apresentado. Um ponto fora da correlação sugere que há outro fator ionizante contribuindo para a formação do SPA, além da fotoionização pelos raios-X.

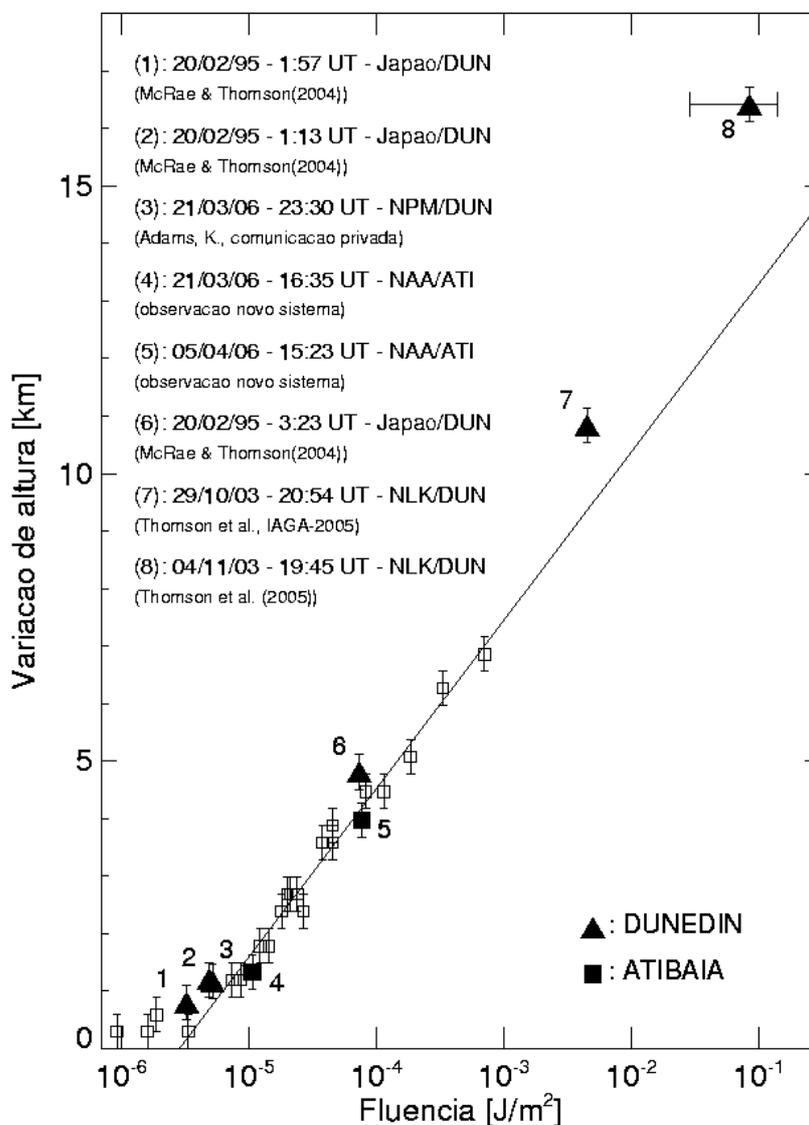
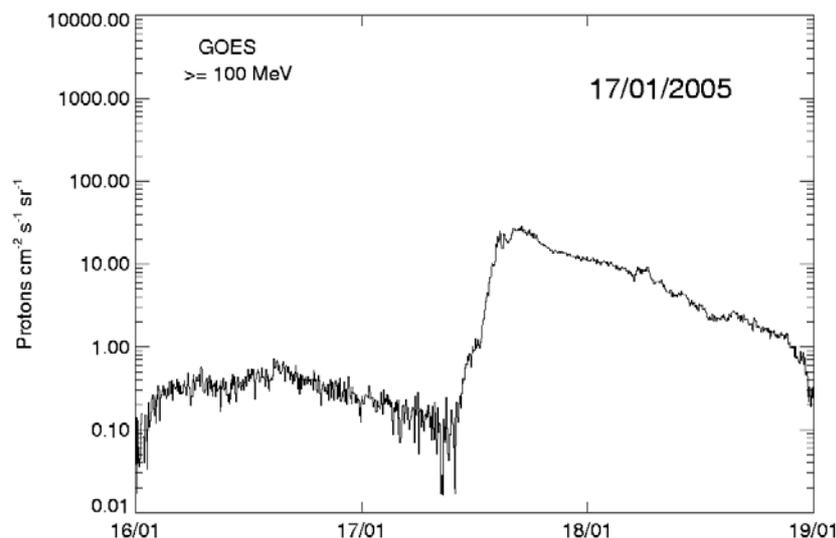


Figura 31 - Oito eventos que não fazem parte do banco de dados utilizado neste trabalho e que foram detectados por diferentes instrumentos (Dunedin e Atibaia), sobrepostos à correlação correspondente ao período de baixa atividade solar encontradas na figura 3.6.

Trabalhos recentes têm mostrado que aumentos bruscos do fluxo de prótons energéticos gerados por grandes explosões solares (SPE - *Solar Próton Events*) são capazes de penetrar até a baixa ionosfera e causar ionização extra nas proximidades da altura de referência da região-D e abaixo dela, chegando até 30 km (Clilverd et al., 2005; Seppälä et al., 2005; Clilverd et al., 2006). Seppälä et al. (2005) identificaram anomalias da fase de ondas de VLF propagando em trajetos de altas latitudes que foram associadas a um evento SPE durante a grande explosão solar de 17/01/2005 (FIGURA 4.2, quadro superior). O SPA de número 7 também ocorreu durante um SPE, originado pelo grande evento solar de 29/10/2003 classificado de X10, com um fluxo de prótons ainda maior (Figura 4.2, quadro inferior). Além disso, simultaneamente houve um aumento do fluxo de raios cósmicos (GLE - *Ground Level Enhancement*) detectado pela estação CLIMAX, com uma rigidez magnética igual à da localização da estação receptora de Dunedin (Figura 4.2, quadro inferior), evidenciando a precipitação de prótons de energia de pelo menos 2 GeV na atmosfera. Estes fatos sugerem a participação de prótons energéticos na formação do SPA de número 7, o que explicaria a discrepância observada entre este ponto e o ajuste da figura 4.1.



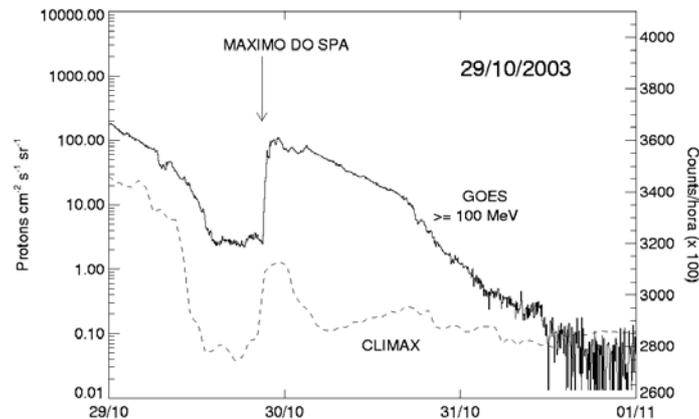


Figura 32 - Curvas de fluxo de prótons, com energias > 100 MeV, mostrando eventos SPE ocorridos nos dias 17/01/2005 (acima) e 29/10/2003 (abaixo).

Sobreposto à curva do dia 29/10/2003, em linhas tracejadas, está indicado o perfil temporal de raios-cósmicos do período, além da seta que mostra o horário do máximo do evento SPA.

Já no período de ocorrência do SPA de número 8 que foi associado à grande explosão solar de 04/11/2003, não houve eventos SPE e GLE capazes de justificar a discrepância observada na figura 4.1, que também não pode ser atribuída à saturação dos detectores em raios-X do GOES. Porém, o período entre o final de Outubro de 2003 e meados de Dezembro de 2003, foi peculiar para o ambiente espacial já que este foi geomagneticamente muito perturbado, sendo talvez um dos períodos mais perturbado até então segundo Baker et al. (2004). Isto se deve à ocorrência sucessiva de grandes eventos solares, e as subseqüentes chegadas na magnetosfera terrestre de partículas de altas energias, de ondas de choque e de eventos de CME (*Coronal Mass Ejection*). Como resultado observou-se uma alteração brutal nos cinturões de radiação de Van Allen, que ficaram repletos de elétrons de altas energias por aproximadamente 40 dias (ver figuras do artigo de Baker et al. (2004)). Dados dos satélites POES mostram que efetivamente houve precipitação de parte destes elétrons no dia da grande explosão solar que gerou o SPA de número 8 não-coincidente com nosso ajuste da figura 4.1.

Estudos posteriores poderão quantificar e estudar em detalhes a participação das partículas na ionização extra medida na região-D. De qualquer forma, ressaltamos aqui a necessidade de bem distinguir as diferentes fontes ionizantes responsáveis por um evento SPA para que os ajustes encontrados forneçam corretamente um índice ionosférico que possibilite o monitoramento da radiação solar responsável pela formação e manutenção da região-D quiescente, ao longo do ciclo de atividade do Sol. Esse índice, proveniente da análise das propriedades das ondas de VLF poderá ser definido como, por exemplo, o valor mínimo da fluência capaz de provocar um SPA,  $F_{X(MIN)}$ , encontrado através dos ajustes apresentados na figura 3.6, ou os parâmetros ionosféricos de Wait,  $\beta$  e  $h_0$ . O parâmetro que será utilizado como índice ionosférico deverá ter suas variações acompanhadas diariamente. No caso dos parâmetros de Wait, esse acompanhamento seria viável através da utilização do código LWPC, que identifica os valores de  $\beta$  e  $h_0$  compatíveis com as características das ondas de VLF observadas, e é capaz de simular a variação dia-noite da fase e da amplitude do sinal recebido, como mostrado na FIGURA 4.3.

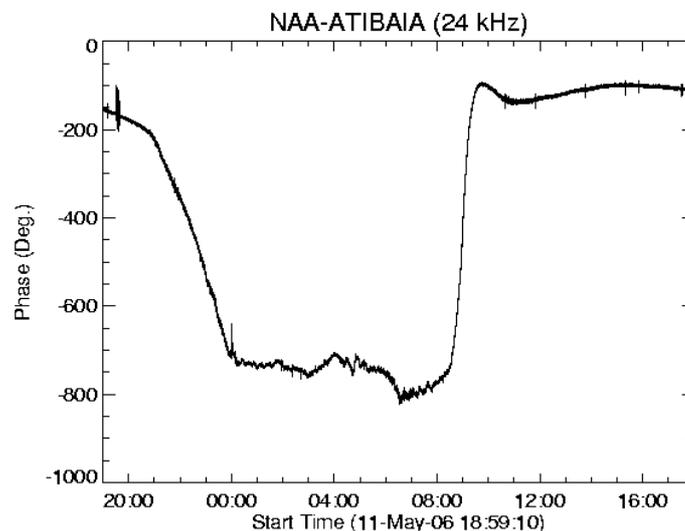


Figura 33 - Variação dia-noite da fase de sinais de VLF observados pela estação receptora do ROI-Atibaia, no trajeto NAA (Cutler-EUA)-Atibaia.

A variação dia-noite mostrada na figura 4.3 foi observada nos sinais recebidos através do novo sistema de recepção de ondas de VLF que está em fase de testes e ajustes no ROI - Atibaia. Esses dados foram registrados digitalmente através do novo sistema de recepção SoftPal, o mesmo que irá compor as novas estações receptoras da futura rede SAVNET, proposta dentro do programa do Ano Heliofísico Internacional (IHY2007) por instituições de pesquisa nacionais e internacionais lideradas pelo CRAAM. Os receptores de VLF que irão compor essa rede serão distribuídos na América Latina e Antártica, e permitirão o registro de variações de 1dB na amplitude (relativas ao seu nível calmo) e da ordem de  $0.8^\circ/\text{Mm}$  na fase do sinal. A distribuição geográfica desses receptores irá permitir o estudo da influência da AMAS na ionização da região-D ionosférica, como mostra a FIGURA 4.4.

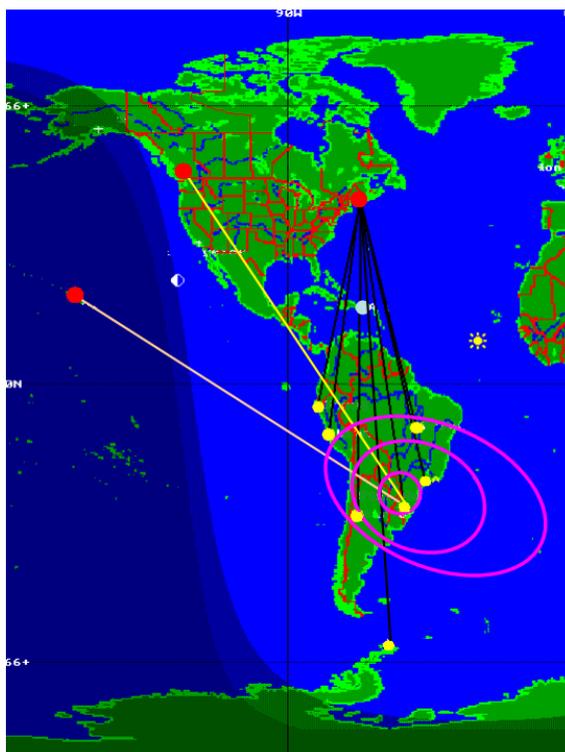


Figura 34 - Distribuição geográfica dos receptores que irão compor a rede SAVNET com relação à região da AMAS, e exemplos de trajetetos de propagação a partir das estações transmissoras NAA (Cutler-EUA), NLK (Seattle-EUA) e NPM (Havaí), atualmente em operação. Os transmissores estão representados pelos círculos vermelhos e os receptores pelos amarelos.

Através desse método de recepção, torna-se possível analisar de maneira mais precisa longas variações da fase e da amplitude do sinal, assim como variações transientes, como um SPA (FIGURA 4.5). O evento mostrado na figura 4.5 foi observado pela estação receptora de Dunedin (Adams, K. comunicação privada), a partir de diferentes trajetos, utilizando também o sistema de recepção SoftPal.

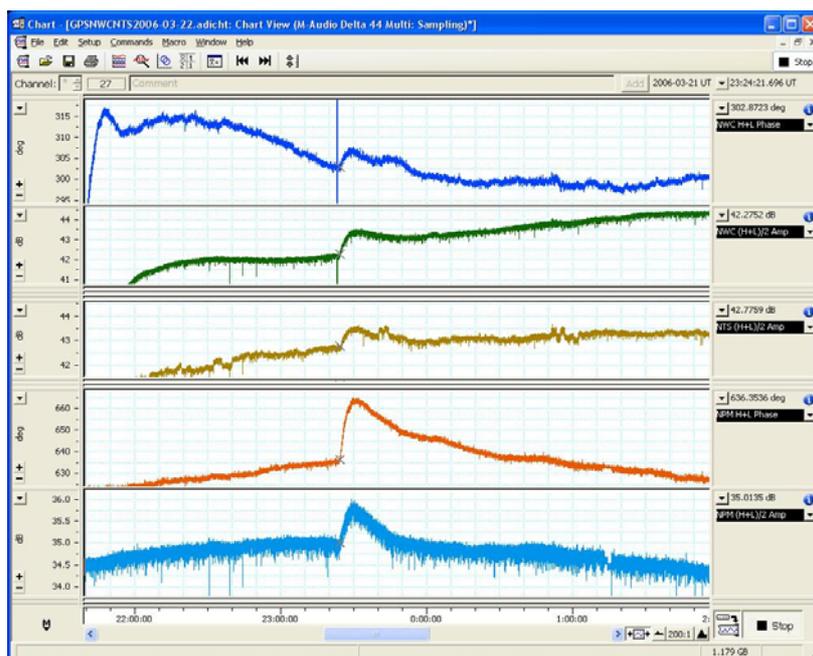


Figura 35 - Evento SPA observado pela estação receptora de Dunedin, em diferentes trajetos.

Dessa forma, a rede SAVNET irá favorecer as análises futuras que serão desenvolvidas seguindo os novos rumos indicados pelos resultados dessa dissertação, e irá permitir: **(i)** um monitoramento contínuo e de longo prazo das características da região-D ( $\beta$  e  $h_0$ ) a partir bancos de dados novos e já existentes; **(ii)** comparação dos valores de  $\beta$  e  $h_0$  com medidas das variações do fluxo de Ly- $\alpha$  feitas simultaneamente; **(iii)** maior precisão nas correlações entre  $F_x$  e AMP, que irá permitir o estudo detalhado dos efeitos dos raios-X das explosões solares e da contribuição das partículas energéticas na ionização extra medida na região-D, e; **(iv)** a investigação da importância da AMAS na ionização da região-D ionosférica.



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de identificar padrões na resposta da região-D ionosférica a variações de suas fontes ionizantes, e assim entender a influência do ciclo solar nessa interação. Este procedimento foi equivalente a considerar o plasma quiescente da baixa ionosfera como um grande sensor de radiação solar, estudando a calibração de sua resposta à perturbações externas. Utilizando SPAs observados na fase de sinais de VLF durante períodos de máximo e mínimo de atividade solar, foi possível entender de forma mais clara o papel dos raios-X solares em eventos de excesso de ionização e identificar um padrão de comportamento da região-D quiescente para diferentes condições de atividade solar.

Assim, concluímos que a região-D ionosférica é mais sensível à eventos de ionização causados por raios-X solares durante períodos de baixa atividade solar, o que foi interpretado como um aumento da altura de referência da região-D ionosférica nesse período. O estudo da distribuição espectral da radiação explosiva em raios-X nos permitiu identificar os fótons com comprimentos de onda entre 0.5 e 2 Å como os responsáveis por excessos notáveis de ionização na base inferior da região-D. Dessa forma, foi possível achar uma relação entre a fluência dos fótons de raios-X e a importância dos SPAs detectados e observamos que ela é diferente para diferentes condições de atividade solar. Similarmente mostramos que a emissão solar quiescente em raios-X, mesmo durante o máximo de atividade solar, tem características espectrais tais que não influem nas propriedades elétricas da região-D em alturas menores que a altura de referência. Essa evidência reforça a importância do papel da emissão Lyman- $\alpha$  na formação e manutenção da camada D da ionosfera.

Os resultados decorrentes desta dissertação apresentam um novo cenário para o estudo de eventos de ionização transientes na região-D ionosférica, sejam

eles originados por fótons ou por partículas energéticas. Além disso, os resultados obtidos sugerem uma possibilidade genuína de monitoramento das variações de longo prazo da radiação solar Lyman- $\alpha$ , que poderá ser feito através da utilização de um índice ionosférico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdu, M.A.; Batista, I.S.; Piazza, L.R.; Massambani, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic anomaly – Evidence from VLF phase measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. A9, p. 7533-7542, 1981.

Baker, D.N.; Kanekal, S.G.; Li, X.; Monk, S.P.; Goldstein, J.; Burch, J. An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the 'Halloween' solar storm in 2003. **Nature**, v. 432, p. 878-881, 2004

Banks, P.; Kockarts, C. **Aeronomy – part B**. San Diego, CA, EUA: Academic Press, 1973.

Bracewell, R.N.; Straker, T.W. The study of solar flares by means of very long radio waves. **Monthly Notices Royal Astronomical Society**, v. 109, p.28-+, 1949.

Chilton, C.J.; Steele, F.K.; Norton, R.B. Very-low-frequency phase observations of solar flare ionization in the D region of the ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 17, p. 5421-+, 1963.

Cliilverd, M.A.; Rodger, C.J.; Ulich, T.; Seppälä, A.; Turunen, E.; Botman, A.; Thomson, N.R. Modeling a large solar proton event in the southern polar atmosphere. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 110, n. 09307, p. 9307-+, 2005.

Cliilverd, M.A.; Seppälä, A.; Rodger, C.J.; Thomson, N.R.; Verronen, P.T.; Turunen, E.; Ulich, T.; Lichtenberger, J.; Steinbach, P. Modeling polar ionospheric effects during the October-November 2003 solar proton events. **Radio Science**, v. 41, n. RS2001, p. 2001-+, 2006.

Danilov, A.D. Solar activity effects in the ionospheric D region. **Annales Geophysicae**, v. 16, n. 12, p. 1527-1533, 1998.

Davies, K. **Ionospheric radio propagation**. Dover, NY, EUA, Dover Publications, 1966.

Deshpande, S.D.; Subrahmanyam, C.V.; Mitra, A.P. Ionospheric effects of solar flares – 1. The statistical relationship between X-ray flares and SID's. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 34, n. 2, p. 211-227, 1972.

Floyd, L.; Tobiska, W.K.; Cebula, R.P. Solar uv irradiance, its variation, and its relevance to the earth. **Advances in Space Research**, v. 29, n.10, p. 1427-1440, 2002.

- Garcia, H.A. Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements. **Solar Physics**, v.154, n.2, p.275-308, 1994.
- Ginzburg, V.L.; Ptuskin, V.S. The origin of cosmic rays. **Astrophysics and Space Physics Reviews**, v. 4, p. 161-256, 1985.
- Hargreaves, J. **The upper atmosphere and solar-terrestrial relations – a introduction to the aerospace environment**. New York, NY, EUA: Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 1979.
- , **The solar-terrestrial environment**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1992.
- Hunsucker, R.; Hargreaves, J. **The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 2003.
- Kaufmann, P.; Paes de Barros, M.H. Some relationships between solar x-ray bursts and SPA's produced on VLF propagation in the lower ionosphere. **Solar Physics**, v. 9, n. 2, p. 478-+, 1969.
- Kaufmann, P.; Rizzo Piazza, L.; Fernandez, J.H.; Rocha da Silva, M. Solar flares not producing sudden phase advances. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 107, n. A8, p. 30-1, 2002.
- Kivelson, M.; Russell, C. **Introduction to space physics**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1995.
- Kreplin, R.W.; Chubb, T.A.; Friedmann, H. X-ray and Lyman-alpha emission from the Sun as measured from NRL SR-1 satellite. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p.2231-+, 1962.
- McRae, W.M.; Thomson, N.R. VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 62, n. 7, p. 609-618, 2000.
- Mitra, A.P. **Ionospheric effects of solar flares**: Dordrecht, Reidel, Astrophysics and Space Science Library, 1974.
- Muraoka, Y.; Murata, H.; Sato, T. The quantitative relationship between VLF phase deviations and 1-8 Å solar X-ray fluxes during solar flares. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 39, p. 787-792, 1977.
- Nicolet, M.; Aikin, A.C. The formation of the D region of the ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, p. 1469-+, 1960.

Ohshio, M. **Ionospheric D region disturbances caused by solar X-ray flares**. Tese – Radio Research Laboratories / Ministry of Post and Telecommunications, 1978.

Pacini, A.A.; Raulin, J.-P. Solar X-ray flares and ionospheric Sudden Phase Anomalies relationship: a solar cycle dependence. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, Maio 2006. Aceito.

Pant, P. Relation between VLF phase deviations and solar X-ray fluxes during solar flares. **Astrophysics and Space Science**, v. 209, n. 2, p. 297-306, 1993.

Pant, P. Sudden phase anomalies during solar flares. **Bulletin of the Astronomical Society of India**, v. 22, n. 2, p. 159-163, 1994.

Piazza, L.R.; Kaufmann, P. Change of low ionosphere characteristics with solar cycle deduced from solar flare effects at VLF. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 37, p. 1281-1283, 1975.

Poppoff, I.G.; Whitten, R.C.; Edmonds, R.S. The role of nonflare X radiation in the D region. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, p. 4081-+, 1964.

Ratcliffe, J.A. **The magneto-ionic theory and its application to the ionosphere**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1959.

Raulin, J.-P.; Pacini, A.A.; Kaufmann, P.; Correia, E.; Martinez, M.A.G. On the detectability of solar X-ray flares using very low frequency sudden phase anomalies. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 9, p. 1029-1035, 2006.

Sátori, G.; Williams, E.; Mushtak, V. Response of the Earth ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 67, n. 6, p. 553-562, 2005.

Seppälä, A.; Verronen, P.T.; Clilverd, M.A.; Rodger, C.J.; Turunen, E.; Ulich, T.; Enell, C.-P. The high energy proton fluxes of January 2005: impact on middle atmosphere. In: IAGA Scientific Assembly, 2005, Toulouse, França. **Proceedings of IAGA Scientific Assembly**. p. 825.

Sylwester J.; Garcia, H.A.; Sylwester, B. Quantitative interpretation of GOES soft X-ray measurements. 1. The isothermal approximation: application of various atomic data. **Astronomy & Astrophysics**, v. 293, p. 577-585, 1995.

Thomas, R.J.; Crannell, C.J.; Starr, R. Expressions to determine temperatures and emission measures for solar X-ray events from GOES measurements. **Solar Physics**, v. 95, n.2, p. 323-329, 1985.

Thomson, N.R.; McRae, W.M. Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 66, n. 1, p. 77-87, 2004.

Thomson, N.R.; Rodger, C.J.; Clilverd, M.A. Large solar flares and their ionospheric D region enhancements. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 110, n. A0, p. 6306+, 2005.

Tobiska, W.K.; Woods, T.; Eparvier, F.; Viereck, R.; Floyd, L.; Bouwer, D.; Rottman, G.; White, O.R. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 62, n. 14, p. 1233-1250, 2000.

Tracor. **Manual de VLF: 599K VLF/LF tracking receiver**. Austin: Tracor Instruments Publisher, 1983. Tracor Instruments Series.

Wait, J.; Spies, K. **Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves**. Boulder, CO, EUA, NBSTechnical Note 300, 1964.

Watt, A. **VLF radio engineering**. Oxford, New York: Pergamon Press, 1967.

Woods, T.N.; Tobiska, W.K.; Rottman, G.J.; Worden, J.R. Improved solar Lyman- $\alpha$  irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. 27, p. 195-216, 2000.

## APÊNDICE A – CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Com o objetivo principal de identificar padrões na resposta da baixa ionosfera, realizamos análises sobre a relação entre as características de explosões solares e suas consequências na região-D, de acordo com o período do ciclo de atividade solar nos quais eles ocorreram. Essas abordagens foram detalhadas no Capítulo 2 e trouxeram resultados, descritos no Capítulo 3, que sugerem um novo cenário para o monitoramento da região-D quiescente. As principais contribuições deste trabalho foram parcialmente publicadas em revistas internacionais arbitradas, incluídas neste anexo, cujos enfoques são os seguintes:

- **On the detectability of solar X-ray flares using Very Low Frequency sudden phase anomalies.- *Raulin et al. (2006) (anexo)*:** A resposta da baixa ionosfera à radiação solar explosiva demonstrou ter sensibilidade variável de acordo com o ciclo de atividade solar. Durante períodos de baixa atividade existe uma maior probabilidade de ocorrência de SPAs produzidos por explosões solares de pequeno porte (inferiores às classes C2-C3 do GOES). Para explosões mais intensas, a probabilidade de ocorrência de SPAs subsequentes não mais depende do ciclo. Este resultado explica trabalhos anteriores que mostraram que a base da ionosfera é mais baixa durante máximo solar.
- Estudo do espectro da emissão em raios-X durante explosões solares nos levou à identificação da banda de energia de fótons que é a maior responsável pela produção de ionização extra na região-D, ou seja, de eventos SPAs. Vimos que o fluxo de fótons dessa banda de energia (0.5 – 2 Å) apenas se torna suficiente para provocar excessos notáveis de ionização em 70 km de altitude (e abaixo disso) durante explosões solares. A emissão quiescente de raios-X possui um espectro tal que a contribuição desses fótons na ionização da região-D não é significativa perante a ionização causada pela linha Ly- $\alpha$ . Pelo fato do espectro dos

raios-X quiescentes não sofrer alterações importantes ao longo do ciclo de atividade solar, já que a temperatura de uma região ativa fora de explosões permanece em torno de 3 - 5 MK, este resultado nos permite atribuir variações de longo prazo da ionização da região-D a variações do fluxo Ly- $\alpha$ . Os resultados deste estudo serão submetidos em breve à Revista Brasileira de Geofísica (Raulin, Carvalho de Moraes e Pacini).

- **Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies: a solar cycle phase dependence.** – *Pacini e Raulin (2006), in press (anexo)*: A amplitude da resposta ionosférica depende da energia total depositada durante a explosão solar por fótons solares de comprimentos de onda entre 0.5 e 2 Å. Mostramos que essa relação também varia de acordo com o ciclo de atividade solar, fazendo com que uma certa explosão produza um SPA maior durante mínimo de atividade solar. Foi possível encontrar um valor mínimo de energia depositada na ionosfera capaz de produzir um SPA detectável, e ele é menor durante baixa atividade solar. Estes resultados confirmam que a região-D ionosférica possui uma sensibilidade dependente do ciclo de atividade solar.

Mostramos então que a baixa ionosfera tem uma sensibilidade variável de acordo com o ciclo solar. Este resultado possibilitará o monitoramento de longo prazo da radiação solar responsável pela formação da região-D: emissão da linha Lyman- $\alpha$ . O conhecimento desta faixa do espectro e de suas variações temporais é um elemento fundamental na quantificação da energia solar total depositada na atmosfera terrestre, o que é atualmente inviável devido à falta de observações contínuas dessas radiações.

## ANEXO A - ARTIGOS

- **On the detectability of solar X-ray flares using Very Low Frequency sudden phase anomalies**

**AUTORES:** Jean-Pierre Raulin, Alessandra Abe Pacini, Pierre Kaufmann, Emília Correia e Maria Aparecida G. Martinez

**REVISTA:** Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics

**DADOS DA PUBLICAÇÃO:** Vol. 68, 9, p. 1029-1035, 2006

- **Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies: a solar cycle phase dependence**

**AUTORES:** Alessandra Abe Pacini e Jean-Pierre Raulin

**REVISTA:** Journal of Geophysical Research

**DATA DE APROVAÇÃO:** 10/05/2006

**SITUAÇÃO ATUAL:** *in press*



## On the detectability of solar X-ray flares using very low frequency sudden phase anomalies

Jean-Pierre Raulin<sup>a,\*</sup>, Alessandra Abe Pacini<sup>a,b</sup>, Pierre Kaufmann<sup>a,c</sup>,  
Emília Correia<sup>a,b</sup>, Maria Aparecida G. Martinez<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil

<sup>b</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, SP, Brazil

<sup>c</sup>Centro de Componentes Semicondutores, Universidade de Campinas, Campinas, SP, Brazil

<sup>d</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brazil

Received 18 August 2005; received in revised form 25 October 2005; accepted 20 November 2005

### Abstract

We have studied ionization excesses produced by enhancements of X-ray emission during solar flares using the very low frequency (VLF) response of the lower edge of the ionospheric D region. We focus on whether or not the X-rays associated with a given solar flare were responsible for a sudden phase anomaly (SPA) event, independently of the characteristics of the SPA. Approximately 1300 and 200 solar events were found to cause an ionospheric event, during periods of high and low solar activity, respectively. The main results of the present work are: (i) definite spectral characteristics are required for a solar flare to produce a measurable SPA; (ii) the probability of SPA occurrence due to faint solar flares, of X-ray class C1–C2 or lower, is higher during solar minimum; (iii) the same probability for more intense solar flares (class C3 or higher) does not depend on the solar activity conditions. Our observations suggest that the low ionosphere has different sensitivities depending on the solar activity, being more sensitive when the Sun is less active. These results also constitute an observational confirmation of recent findings showing that the ionospheric reference height is lower (by about  $\leq 1$  km) during solar maximum.

© 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Solar flares; X-rays; Ionosphere; Solar activity cycle; Very low frequency propagation

### 1. Introduction

The physical processes acting in the D region of the ionosphere are complex and not well understood, both because of the chemistry occurring there and because of the sparse monitoring of this part of

the ionosphere. Therefore temporal variations due to transient phenomena like solar flares, and in particular on longer time scales during the solar cycle are still not fully understood. It is common to characterize the ionospheric D region in terms of the parameters,  $\beta$  (conductivity gradient in  $\text{km}^{-1}$ ), and  $H'$  (reference height in km), which govern the refractive index of the low ionosphere (Wait and Spies, 1964). During quiet solar conditions, the X-ray emission from the Sun is not a significant

\*Corresponding author. Tel.: +5511 32368697;  
fax: +5511 32142300.

E-mail address: raulin@oraam.mackenzie.br (J.-P. Raulin).

source of ionization in the D region. However, at the time of explosive events on the solar disk, an excess of X-ray radiation hits the Earth and those photons with  $\lambda < 1 \text{ nm}$  can penetrate down to D region altitudes or even lower, and change appreciably the parameters  $\beta$  and  $H'$  there.

Sudden Phase Anomalies (SPAs) in very low frequency (VLF) subionospheric propagation are sensitive indicators of the properties of X-ray flux excesses occurring during solar flares. The SPA amplitudes have been found related to the flare X-ray peak fluxes in different energy channels (Kreplin et al., 1962; Kaufmann and Paes de Barros, 1969; Kaufmann et al., 2002; Deshpande, 1972; Mursaka et al., 1977; Pant, 1993; McRae and Thomson, 2004). Particular attention has been given to find out, in a given energy band, what would be the minimum flux (or threshold)  $F_m$  able to produce a detectable ionospheric response. The results show that  $F_m$  may vary by almost one order of magnitude. As will be discussed later, this may be due to the fact that the ionospheric and solar data bases mixed both maximum and minimum solar activity periods. Although the importance of comparing the threshold power, in a given X-ray energy band, for different solar activity conditions was suggested long time ago (Kaufmann and Paes de Barros, 1969), this has not been reported so far. Only recently, McRae and Thomson (2000, 2004) have studied how the parameters  $\beta$  and  $H'$  vary with the solar activity. In the extreme low frequency (ELF) range, Satori et al. (2005) report several tenths of percent changes of the conductivity height profile across the solar activity cycle.

The goal of the present work is to study the occurrence of SPA events caused by excesses in the X-ray emission associated with solar flares, and to

find out how this occurrence varies with the solar activity conditions. In Section 2 we present the data we have used and we show the observational results we have obtained in Section 3. These results are discussed in Section 4 and we present our conclusions in Section 5.

## 2. Instrumentation and data analysis

We have monitored at Atibaia (São Paulo, Brazil), VLF signals from the Omega navigation network transmitters, in both phase and amplitude. The tracking receivers were controlled by a Cesium beam atomic standard (Piazza and Kaufmann, 1975). In this work we present phase data from North Dakota (NDAK), Haiku (HAI), and Argentina (ARG) transmitters, received at Atibaia (ATI). These data have been complemented by SPA records received at Inubo (INU), Japan (Ionospheric Data in Japan, 1990–1992, 1995–1997), from transmitting stations located at La Reunion (LR), Liberia (L), NDAK, HAI, Australia (AUS), and also North West Cape (NWC), Australia which was not part of the Omega network. Details of different paths such as distances and operating frequencies are indicated in Table 1.

The solar flare X-ray measurements were obtained from the GOES full-disk detectors in the energy channels: CH1 (0.1–0.8 nm) and CH2 (0.05–0.4 nm), corresponding to photons of energy between few keV and 15 keV. The peak flux for each flare has been estimated after subtracting a pre-flare X-ray level. A hardening factor,  $\gamma$ , has been estimated by the ratio of X-ray peak fluxes in the CH2 and CH1 channels, i.e.  $F_{p2}/F_{p1}$ . We have selected SPA events during which the ionosphere

Table 1  
Characteristics of the VLF paths used in this work

Stations	Frequency (kHz)	Distances (Mm)	Period of observation
ATI	(received)	–	–
INU	(received)	–	–
NDAK	13.1el13.6	from ATI: 9.3 from INU: 9.14	10–12/91 (ATI); 90–92 and 95–97 (INU)
ARG	12.9	from ATI: 2.8	01–03 and 10–12/1991 and 94–97 (ATI)
HAI	11.8el13.6	from ATI: 13.0 from INU: 6.1	94–97 (ATI); 90–92 and 95–97 (INU)
LR	13.6	from INU: 10.97	90–92 and 95–97 (INU)
NWC	22.3	from INU: 6.99	90–91 and 95–97 (INU)
L	13.6	from INU: 14.48	91–92 and 95–97 (INU)
AUS	13.6	from INU: 8.27	92 and 95–97 (INU)

The first three columns indicate the station identification, the operating frequency (kHz) and the distances (Mm) to the receivers. In the last column we indicate the time periods of the observations.

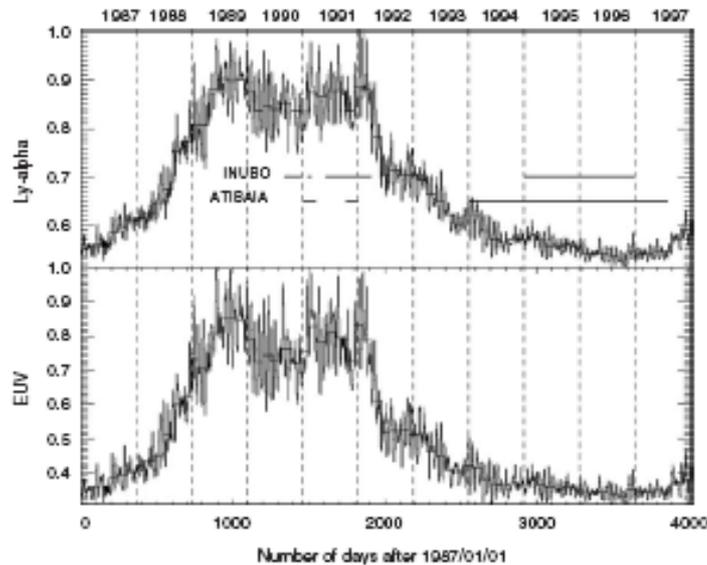


Fig. 1. Horizontal full thick lines illustrate the observing periods of the data used. These lines are superimposed on the time evolution of two solar proxies.

above the detecting path was totally illuminated, or sunlit.

In Fig. 1 we show the time coverage of the data, using horizontal lines, comparing with 11 years of two proxy solar indices which are parts of the SOLAR2000 Research Grade model (Tobiska, 2004): EUV wavelength and the line Ly- $\alpha$  emission normalized to their respective maxima. These wavelengths are believed mainly responsible for the formation of the quiet day ionosphere. Since these radiations are not measured continuously, the proxies are reconstructed from observations and models to ensure long time series, for example using data from Atmospheric Explorer-E (AE-E), the Solar Mesospheric Explorer (SME), and the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) for the Lyman- $\alpha$  irradiance (Woods et al., 2000). Therefore Fig. 1 shows that we have explored time periods of different solar activity characteristics.

### 3. Observational results on the detectability of sudden phase anomalies

In this section we describe our observational results. We stress out that we are interested only in the X-ray peak flux of those solar flares that

produced a SPA, independently of the size of the ionospheric response and of the solar zenith angle  $\chi$ .

The relation between the SPAs intensities and the solar X-ray fluxes (e.g. Kaufmann and Paes de Barros, 1969), as well as the study of those solar flares that did not produce SPAs (Kaufmann et al., 2002), are beyond the scope of this paper. Even if we did not take into account the solar zenith angle  $\chi$ , we mention that the following results are similar if we choose only the SPA-producing X-ray flares with  $\chi$  lower than  $30^\circ$ .

In Fig. 2 we show scatter diagrams for all the solar flares detected in X-rays that have been associated in time with SPAs. For each flare,  $F_{p1}$  and  $F_{p2}$  are shown as a function of  $\gamma$  and for different solar activity time periods (quiet: left column; active: right column). The horizontal dashed lines serve as a reference level, and allow us to see that during low solar activity time periods more than 15% of the total number of X-ray-flares-producing SPAs are such that  $F_{p1} < 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  in channel CH1. A similar statement is also true for channel CH2 for which we have  $F_{p2} < 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$ . These percentages reduce to less than a few percents during solar maximum epochs (right column). Moreover we note that the minimum X-ray flux

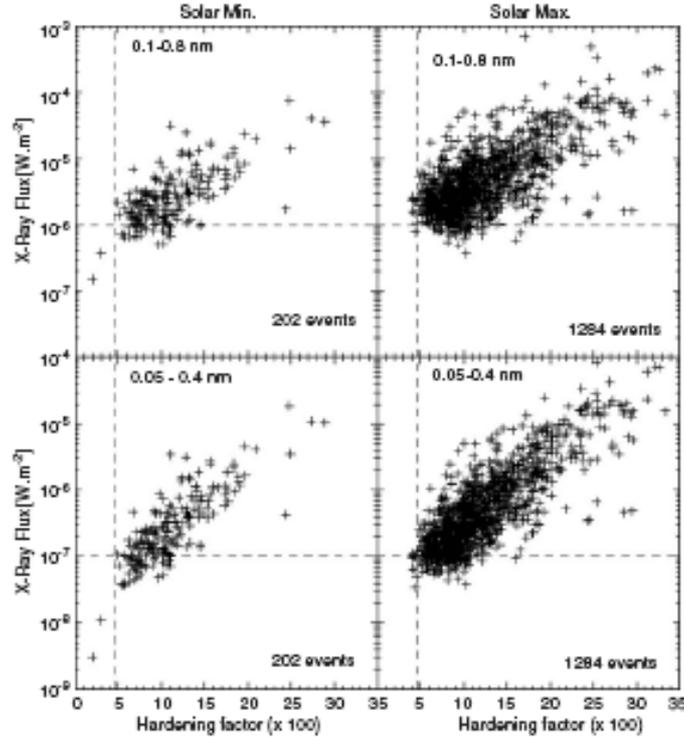


Fig. 2. Background subtracted GOES X-ray peak fluxes in channels CHI (top) and CH2 (bottom) versus hardening factor  $\gamma$  for all the solar flares that have produced a SPA during solar minimum (left) and maximum (right) time periods. Horizontal dashed lines are just indicative of a certain X-ray power level (discussed in the text).

that produced a SPA is slightly lower during solar minimum conditions than during solar maximum. Finally, Fig. 2 shows (see the dashed vertical lines) that the vast majority of X-ray flares producing SPAs have a hardening factor greater or equal to 0.045, irrespective of the time of the solar cycle.

In order to strengthen the above results we have made plots of the distributions of  $F_{p1}$  and  $F_{p2}$  values. These are shown in Fig. 3 where the vertical axes are the proportion of solar flares producing SPAs, with a peak flux within a given range. Therefore, the distribution shown has to be understood as the probability,  $P$ , for a given X-ray class flare to produce a SPA. We see a quite distinct behavior for solar flares depending on their peak flux  $F_{p1}$  and  $F_{p2}$  values. For those flares with  $F_{p1} \geq 2-3 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  (top) or  $F_{p2} \geq 2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$  (bottom), the probability  $P$  is roughly

independent of the level of solar activity during which the solar event occurred. On the other hand, for solar events with  $F_{p1} \leq 2 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  (top) or  $F_{p2} \leq 2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$  (bottom), their probability of producing SPAs is greater during solar minimum compared to that during solar maximum. We note that the bin size of the histogram is  $0.3 \text{ W m}^{-2}$  and we note that its value does not modify the shape of the distribution, at least for X-ray events up to GOES-class M, i.e. with a peak flux  $10^{-5} \text{ W m}^{-2}$ .

In Fig. 4 we have plotted the cumulative distribution corresponding to Fig. 3, i.e. its integral as a function of the X-ray peak flux. To get an idea of the order of magnitude of the lower limit of X-ray flux ( $F_m$ ) needed to produce a SPA, we show a horizontal line at a flux level below which less than 15% of the total solar events have been detected. This means that the probability of occurrence of a

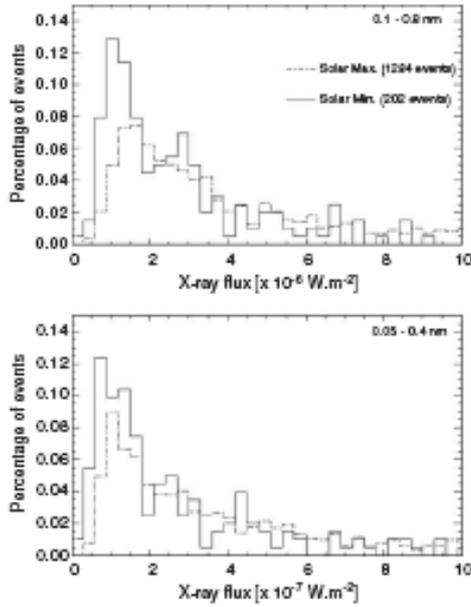


Fig. 3. Occurrence distribution of  $F_{p1}$  (top) and  $F_{p2}$  (bottom) values for solar events during solar minimum (full line) and solar maximum (dashed line).

SPA caused by a solar flare with peak flux lower than  $F_m$  is 0.15. The corresponding levels are therefore  $0.9 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  and  $1.5 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  for solar minimum and maximum periods, respectively for the CH1 channel. These values are referred to B9 and C1.5 X-ray GOES-class solar events, respectively. For the channel CH2 we find similarly  $6 \times 10^{-8}$  and  $1.2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$  for solar minimum and maximum periods, respectively.

#### 4. Discussion

We have analyzed the detectability of solar X-ray flares using records of VLF sudden phase anomalies. Approximately 1300 and 200 solar events, respectively, were selected for their ionospheric responses during solar maximum and solar minimum. In this work we concentrate on the size of the solar events that produced SPAs independently of the intensity of the ionospheric response as well as of the solar zenith angle. The main results of the present work are: (i) almost all the solar flares responsible for a measurable SPA have a hardening

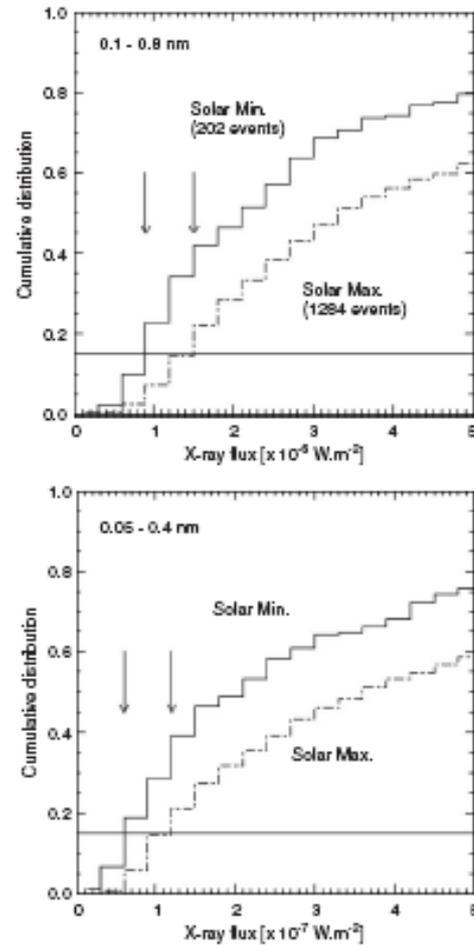


Fig. 4. Cumulative distribution of  $F_{p1}$  and  $F_{p2}$  values showing, for a given X-ray power  $F$ , the probability occurrence of a SPA caused by a solar flare with a X-ray peak flux lower or equals to  $F$ .

factor greater than 0.045; (ii) the probability of SPA occurrence due to solar flares of X-ray class C1–C2 or lower, is higher during solar minimum compared to solar maximum; (iii) the probability of SPA occurrence due to more intense solar flares (class C3 or higher) does not depend on the solar activity time period; (iv) the X-ray flux value,  $F_m$ , for which the probability of SPA occurrence is less than 15% is

lower during solar minimum compared to during solar maximum.

The search for the minimum solar X-ray flux,  $F_{\min}$  that could produce an ionospheric SPA has been reported many times in the past (Kaufmann and Paes de Barros, 1969; Kaufmann et al., 2002; Muraoka et al., 1977; Pant, 1993; McRae and Thomson, 2004), using various X-ray energy bands from 0–0.3 nm for the most energetic to 0.8–2 nm. In most of these works the way to find out  $F_{\min}$  was to correlate the SPA amplitudes to the logarithm of the X-ray peak flux. However the results generally disagree between each other, sometimes by almost one order of magnitude. For example in the channel 0.1–0.8 nm, Kaufmann et al. (2002) found  $F_{\min} = 5.0 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  while Fig. 2 of McRae and Thomson (2004) shows  $F_{\min} = 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$ . Many reasons may have caused these discrepancies such as different SPA normalizations, in particular for the angle  $\chi$  (Chilton et al., 1963), or the use of the solar event X-ray peak flux instead of the pre-flare background subtracted peak value. The latter is critical and especially for small solar flares which may have their peak flux reduced by a factor 3 or more after the pre-flare background is subtracted. Another alternative is that the cited works did not discriminate the studied events depending on the solar activity period when they occurred. In general, the time periods analyzed involved epochs of both solar minimum and maximum. In the present work we have carefully separated the data and compared the observational results obtained during quiet solar activity to those obtained during high solar activity. Under these conditions we have shown that the occurrence of SPA in the low D region does depend on the solar cycle conditions.

We can understand our results if we assume that the low ionospheric D region has a different sensitivity for different solar activity cycle periods. At VLF frequency ranges SPAs originate because of a change in the reference height  $H'$ , consequently a change in the reflection height, rather than a change in the refraction index along the wave propagation path (Mitra, 1974). Then the different behavior of the low ionosphere response to small C class solar events during solar maximum and minimum, can be interpreted as different reference heights, i.e. reflection heights. Recently, McRae and Thomson (2000, 2004) have used the long wave propagation capability (LWPC) code to interpret VLF phase and amplitude daytime variations observed on long paths. Their work effectively shows that the iono-

spheric height is somewhat lower (by about  $\approx 1 \text{ km}$ ) during solar maximum as compared with solar minimum. It is interesting to note that although the above height change is rather small (about 1% of the average reference height for normal day conditions), it produces clear differences in the SPA occurrence probabilities as shown in Fig. 3. We believe that these differences only show up after the careful treatment on the ionospheric and the solar data, in particular the epoch when the events happened and the removal of the pre-flare X-ray emissions. The lack of such treatment probably can explain the discrepancies in previous works as mentioned earlier. Finally we mention that, although a change of the reflection height can explain our results, the effect of the variations of the sharpness parameter  $\beta$  with the solar activity cycle (McRae and Thomson, 2000) has not been taken into account. However this change in  $\beta$  during the solar cycle is unlikely to be a very significant factor here.

## 5. Conclusions

In this work, we analyzed the detectability of solar flares in the low ionospheric D region using Sudden Phase Anomalies (SPAs) detected at VLF and produced by the excess of X-ray emission characteristics during the solar events. For this, we carefully separated the events depending on whether they occurred during solar maximum or minimum periods, and we removed the pre-flare X-ray signal in order to estimate the peak fluxes. Our main result is that the probability of detecting SPAs produced by low X-ray C class (GOES) flares is higher at the time of minimum of solar activity. For larger X-ray class (GOES) flares, this probability is solar-cycle independent. This finding can be understood if the low ionosphere D region is more sensitive during low solar activity epochs. The results obtained also nicely agree with the findings of McRae and Thomson (2000, 2004) which show that the ionospheric reference height is higher during solar minimum time periods.

## Acknowledgements

We thank two anonymous referees for a detailed reading of the text and useful comments. JPR and PK would like to thank Brazilian funding agencies CNPq (Procs: 304433/2004-7 and 300249/2003-4) and FAPESP (Proc. 2005/51422-6) for their support.

## References

- Chilton, C.J., Steele, F.K., Norton, R.B., 1963. *Journal of Geophysical Research* 68, 5421.
- Deshpande, S.D., 1972. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 34, 211.
- Ionospheric Data in Japan 1990–1992, 1995–1997. Communications Research Laboratory Ministry of Posts and Telecommunications, Tokyo, Japan.
- Kaufmann, P., Paes de Barros, M.H., 1969. *Solar Physics* 9, 478.
- Kaufmann, P., Piazza, L.R., Fernandez, J.H., 2002. *Journal of Geophysical Research* 107, 30.
- Kreplin, R.W., Chubb, T.A., Friedman, H., 1962. *Journal of Geophysical Research* 67, 2231.
- McRae, W.M., Thomson, N.R., 2000. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62, 809.
- McRae, W.M., Thomson, N.R., 2004. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66, 77.
- Mitra, A.P., 1974. *Astrophysics & Space Science Library*. Reidel, Dordrecht.
- Muraoka, Y., Murata, H., Sato, T., 1977. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 39, 787.
- Pant, P., 1993. *Astrophysics and Space Science* 209, 297.
- Piazza, L.R., Kaufmann, P., 1975. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 37, 1281.
- Sátori, G., Williams, E., Mushtak, V., 2005. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67, 553.
- Tobiska, W.K., 2004. *Advanced Space Research* 34, 1736.
- Wait, J.R., Spies, 1964. K. NBS Technical Note, p. 300.
- Woods, T.N., Tobiska, W.K., Rottman, G.J., Worden, J.R., 2000. *Journal of Geophysical Research* 105, 27195.



2 Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase  
 3 anomalies relationship: A solar cycle  
 4 phase dependence

5 Alessandra Abe Pacini<sup>1,2</sup> and Jean-Pierre Raulin<sup>1</sup>

6 Received 13 January 2006; revised 15 March 2006; accepted 17 May 2006; published XX Month 2006

7 [1] We investigate the relation between sudden phase anomaly (SPA) amplitudes ( $\Delta\phi$ )  
 8 and solar X-ray flares importance and study if it has a solar activity cycle dependence. We  
 9 find a very significant correlation between  $\Delta\phi$  and the X-ray fluences,  $F_X$  (time-integrated  
 10 photon fluxes) in the range 0.5–2 Å. Compared with earlier works, the improvements  
 11 of the  $\Delta\phi$  versus  $F_X$  relation allow us to study separately solar events as a function of their  
 12 occurrence in the solar activity cycle, and we find that the  $\Delta\phi$  versus  $F_X$  relation is  
 13 different depending on the epoch within the solar cycle. In particular, a minimum X-ray  
 14 fluence of  $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ J m}^{-2}$  is needed during solar activity minimum to trigger a SPA,  
 15 while during solar maximum,  $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ J m}^{-2}$  is required. Similarly, a solar flare will  
 16 produce a SPA during solar minimum that is greater by  $\sim 2.8^\circ \text{ M j m}^{-1}$  than would a flare of  
 17 the same size during solar maximum. These results confirm recent findings about the  
 18 dependence with the solar activity of the ionospheric undisturbed D region sensitivity. A  
 19 possible consequence would be the monitoring of the long-term solar irradiance, which  
 20 maintains the D region, through measurements of VLF wave propagation properties.

21 Citation: Pacini, A. A., and J.-P. Raulin (2006), Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: A solar  
 22 cycle phase dependence, *J. Geophys. Res.*, 111, XXXXXX, doi:10.1029/2006JA011613.

24 1. Introduction

25 [2] The investigation of the behavior of the low terrestrial  
 26 ionosphere can be achieved by analyzing the characteristics  
 27 of VLF (very low frequency, 3–30 kHz) waves propagation  
 28 over long distances within the Earth-ionosphere waveguide,  
 29 since these characteristics transmit information about the  
 30 electrical properties of the waveguide's boundaries. VLF  
 31 propagation has long been studied because of its importance  
 32 to long-distance communication systems and navigation.  
 33 Although the advantages afforded by GPS implementation  
 34 and satellite communications have largely replaced VLF  
 35 propagation monitoring for this purpose, such monitoring  
 36 remains an important tool for scientific applications such as  
 37 investigations of the physical properties of the ionosphere.

38 [3] The main ionization source of the undisturbed day-  
 39 time ionospheric D region is the solar Lyman  $\alpha$  (1216 Å)  
 40 radiation, but during solar flares significant ionization  
 41 enhancements occur caused by the (few orders of magni-  
 42 tude) excess of solar X-ray ( $\lambda < 10 \text{ Å}$ ) fluxes at the time the  
 43 solar active centers are heated up to few tens of millions  
 44 degrees. Any variation in the D region electronic density  
 45 causes changes in the conductive properties of the Earth-  
 46 ionosphere waveguide upper border, mimicking variations

of one or both of the well known Wait parameters [Wait, 47  
 1958; Wait and Spies, 1964]: the reference height  $H$  (km), 48  
 and the conductivity gradient or sharpness  $\beta$  ( $\text{km}^{-1}$ ). Thus 49  
 energetic ( $\lambda < 4 \text{ Å}$ ) photons entering the ionosphere can 50  
 ionize part of the neutral atmosphere resulting in a new 51  
 electron vertical profile in the D region with new values for 52  
 $H$  and  $\beta$ . Variations of  $H$  (and therefore in the reflection 53  
 height for VLF waves) and  $\beta$  are detected on the phase (as 54  
 sudden phase anomalies or SPAs) and the amplitude of 55  
 long-distance propagating waves. The SPA events (gener- 56  
 ally observed as phase advances,  $\Delta\phi$ ) depends on the level 57  
 of X-ray fluxes, the time of the solar event and of the 58  
 characteristics of the path. 59

[4] The present paper is motivated by the recent findings 60  
 in the work of Raulin et al. [2006], who showed that during 61  
 periods of low solar activity the probability of detecting 62  
 SPAs produced by low X-ray C2–3 class solar flares (peak 63  
 flux  $< 2\text{--}3 \cdot 10^{-6} \text{ W m}^{-2}$  in the 1–8 Å energy range) is 64  
 higher during solar minimum, compared to solar maximum. 65  
 On the other hand the probability of detecting SPAs 66  
 produced by larger X-ray flares is solar cycle phase- 67  
 independent. The consequence is that the low ionosphere, 68  
 taken as a solar photon detector, has a sensitivity which 69  
 depends on the solar activity conditions. So that different 70  
 relations may exist between the sizes of solar X-ray flares 71  
 and the resulting SPA events in the low ionosphere, as a 72  
 function of the solar cycle phase. Indeed there are many 73  
 papers about the correlation between the peak flux of solar 74  
 X-ray events and the amplitude of the subsequent SPAs 75  
 [e.g., Kaufmann and Paes de Barros, 1969; Muraoka et al., 76

<sup>1</sup>Centro de Radioastronomia e Astrofisica Mackenzie, Universidade  
 Presbiteriana Mackenzie, Sao Paulo, Brazil.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos,  
 Brazil.

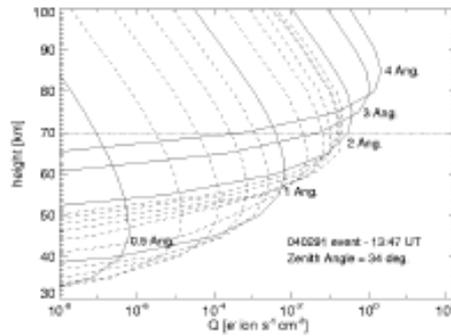


Figure 1. Typical ion pair production rate curves showing the relevant photon energies to produce an ionospheric SPA. Different photon energy curves are shown: 0.5, 1, 2, 3, and 4 Å (solid lines) and 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, and 1.8 Å (dashed lines). The dotted horizontal line represents a reference ionospheric height at 70 km.

1977; Pant, 1993; Kaufmann *et al.*, 2002; McEneaney and Thomson, 2004; Thomson *et al.*, 2005]. However, the results of these various studies are not in agreement, and each correlation is generally not well defined, presenting a large spread. In this paper, we study the relationship of SPAs to the phase of the solar activity cycle through a careful treatment of solar X-ray spectra and their time variation. This may provide an explanation for the disparate results from earlier studies. Further, using such a relationship, continuous VLF observations may prove to be a useful measure of the long-term component of solar activity as manifested by solar radiations that maintain the D region.

[j] In section 2 we present the data and the methods. Section 3 presents and discusses the obtained results. Section 4 presents the conclusions.

## 2. Instrumentation and Data Analysis

[k] VLF signals from the Omega navigation network transmitters have been monitored at Atibaia (São Paulo, Brazil), in both phase and amplitude. The Omega network [Gostad, 1975] was composed by eight VLF transmitting stations operating at frequencies between 10 to 14 kHz, distributed around the world and provided information that was used for navigating systems since 1968 up to 1997, when the GPS system was declared fully operational. The tracking receivers at Atibaia were controlled by a Cesium beam atomic standard [Kaufmann *et al.*, 1967]. An accuracy of 0.5  $\mu$ s is obtained in the measurements of the recorded phases.

### 2.1. Data Selection

[l] The complete SPA database is described by Raulin *et al.* [2006] (see Figure 1 and Table 1 of Raulin *et al.* [2006] as well as the corresponding explanations). From this data collection we have chosen the simplest events, i.e., those produced by well-defined soft X-ray flares with a simple time profile, to avoid the superposition in time of subsequent flares and the corresponding complex time profiles

which would result for the registered phases. We also restricted our analysis to the single north-south oriented VLF (12.9 kHz) propagation path Atibaia (ARG) of 2880 km (2.88 Mm) length, making unnecessary normalization of the observed phase anomalies ( $\Delta\phi$ ) for path length. Finally, we have chosen events for which the solar zenith angle was lower than  $60^\circ$ . As a result, we end up with  $\sim 20$  events for each periods of minimum (1994–1997) and maximum (January–March 1991) of solar activity, and most of the events were chosen during summer time in order to avoid possible seasonal effects.

### 2.2. X-Ray Data Analysis

[m] The soft and hard X-ray data records were obtained from GOES full-disk detectors in 1–8 Å and 0.5–4 Å wavelength ranges with a time resolution of 3 s. For each event, and for each detector, we have subtracted a preflare X-ray level. This procedure is important when studying the smallest events, for which the prelevel emission may be as important as the proper X-ray emission excess that is observed.

[n] From the ratio of the X-ray fluxes detected in the two energy ranges, we have determined the temperature time profile of the emitting plasma assuming Mewe isothermal spectral models [García, 1994; Sylwester *et al.*, 1995]. We used these spectra to determine the main X-ray energy range responsible for the ionization excesses resulting as SPAs. For this we employ the photo ionization efficiency ( $e^-$  ions photon $^{-1}$  cm $^{-1}$ ) curves for different photon energies in the work of Okajima [1978]. Once multiplied by a photon flux (photon cm $^{-2}$  s $^{-1}$  keV $^{-1}$ ) we find the result shown in Figure 1 for a particular solar event,  $t = t_e$ , the  $e^-$  ion production rate at the peak flare time as a function of altitude and photon energy in the photon wavelength range between 0.5–4 Å. Figure 1 does not present much changes for the other events of the whole database. We conclude that the most efficient X-ray radiation capable of producing a significant ionization at and below the undisturbed reflection level ( $\sim 70$  km) is that composed of  $\leq 2$  Å photons. Therefore for each event we computed the X-ray emission time profile integrated in the 0.5–2 Å energy band. In addition to what has been done in previous studies, we also take into account the time variations of the spectrum during the flare development. For this we integrate in time the X-ray profiles obtained as explained above, between the starting of the X-ray emission and the time of the maximum of the corresponding SPA event, obtaining in that way for each solar flare a X-ray fluence  $F_X$ , in J m $^{-2}$ .

## 3. Results and Discussion

[o] The main result of this paper is shown in Figure 2 as the relation between  $\Delta\phi$  (in degrees) and  $F_X$  (in J m $^{-2}$ ) for all the chosen events during solar maximum and minimum (squares) periods, and we found very good correlations with coefficients greater than 0.95. We have also transformed the phase changes  $\Delta\phi$  into the lowering altitudes ( $\Delta H$ ) of the undisturbed ionospheric reference height  $H$ , given by  $\Delta H = H - H_f$  where  $H_f$  is the flare-disturbed reference height.  $\Delta H$  values are shown in the left vertical axis. In Figure 2 we can define a lower fluence,  $F_{XMIN} \sim 7 \cdot 10^{-6}$  J m $^{-2}$  below which no ionospheric response is detected during solar maximum. 171

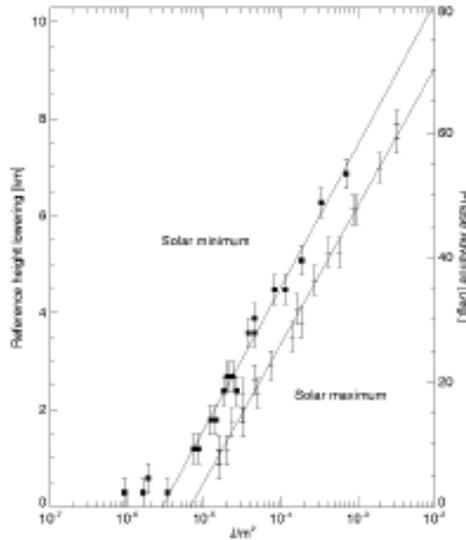


Figure 2. Relation between  $\Delta\varphi$  (and the corresponding  $\Delta H$ ) and  $F_X$  for solar minimum (squares) and solar maximum.

172 The similar lower limit for the period of minimum of solar  
 173 activity is smaller at about  $F_{XMIN} \sim 2.50 \times 10^{-6} \text{ J m}^{-2}$   
 174 with a clear lower detection limit threshold at  $\sim 2^\circ$ , i.e., a  
 175 phase advance of  $\sim 0.5 \mu\text{s}$  at the corresponding VLF  
 176 frequency (12.9 kHz), close to the minimum  $\Delta\varphi$  detectable  
 177 by the instrumentation. Moreover, we note that the correlations  
 178 shown are well separated each other, leading to a  
 179 different  $\Delta\varphi$  (or  $\Delta H$ ) -  $F_X$  relation depending on the solar  
 180 activity period under consideration. These correlations also  
 181 tell us that for a given X-ray fluence input during solar  
 182 minimum, we expect a SPA greater by about  $7.5^\circ$  ( $\sim 1.6 \mu\text{s}$   
 183 at 12.9 kHz for the corresponding 2.88 Mm path) compared  
 184 to what it would be during solar maximum. In terms of the  
 185 lowering of the reference height, Figure 2 tells us that for a  
 186 given strength solar flare  $\Delta H$  will be greater during solar  
 187 minimum period by  $\sim 1 \text{ km}$ , indicating that the reference  
 188 height is lower during solar maximum by the same amount.  
 189 [ii] We can understand these results if the ionosphere  
 190 sensitivity to solar X-ray photons is different for different  
 191 periods of solar activity, confirming recent results [Raulin *et al.*,  
 192 2006] on the solar cycle dependence of the probability  
 193 of occurrence of SPAs caused by solar X-ray flares.

194 [iii] The present results as well as the former ones [Raulin  
 195 *et al.*, 2006] are also in agreement with the study of the  
 196 undisturbed ionospheric reflection height [McRae and  
 197 Thomson, 2000]. These authors adjusted daytime VLF  
 198 phase and amplitude variation records using a long wave  
 199 propagation capability code, and their results show that the  
 200 Wait reference height,  $H$  [Wait, 1958; Wait and Spies, 1964]  
 201 was lower by about  $\sim 1 \text{ km}$  during solar maximum compared  
 202 to that at the minimum of solar activity. This  
 203 corresponds to an equivalent lowering of the reflection

height by the same quantity. Therefore we expect during a  
 given solar flare, a more important lowering (by  $\sim 1 \text{ km}$ ) of  
 the upper boundary during solar minimum simply because  
 the undisturbed reference height is higher at that time. This  
 is what we find and show in Figure 2. We finally mention  
 that although this change ( $\sim 1 \text{ km}$ ) in the Wait parameter  $H$   
 is low ( $\sim 1\%$  of the undisturbed reflection height), its effect  
 is clearly detected (see Figure 2) using the low ionospheric  
 D region as a sensor of solar flare produced X-ray photons.

[1] As mentioned earlier, many previous studies have  
 tried to relate the size of solar flares to the amplitude of the  
 subsequently detected phase anomalies. Although it has  
 been suggested that the D region parameters vary with solar  
 cycle phase [Kaufmann and Pass de Barros, 1969; Rizzo  
 Piazza and Kaufmann, 1975], the effect remains unanalyzed.  
 Gross correlations are generally presented between solar  
 flare X-ray peak fluxes ( $F_{FX}$  in  $\text{W m}^{-2}$ ) and phases advances  
 ( $\Delta\varphi$ ). However, the ( $\Delta\varphi$ ) versus  $F_{FX}$  plots are in general very  
 scattered with sometimes almost one order of magnitude  
 differences between the lowest detectable X-ray peak fluxes  
 found, even though the same photon energy ranges were  
 used [Kaufmann *et al.*, 2002; McRae and Thomson, 2004].  
 In the present study we used background subtracted X-ray  
 data which issue is important for the correlation shown in  
 Figure 2, in particular, for the smaller events. Instead of an  
 X-ray power,  $F_{FX}$ , which is related to an ionization rate, we  
 computed an X-ray fluence,  $F_X$ , in the photon energy range  
 0.5–2 Å assuming a thermal spectrum for each event, and  
 integrated until the peak time of the ionospheric response  
 after which we have assumed the recombination processes  
 overcome the accumulation of photoionization electrons.  
 Compared to  $F_{FX}$ , the fluence  $F_X$  better reflects the energy  
 deposited in the ionospheric D region, and thus is better  
 suited for the comparison with  $\Delta\varphi$  (and  $\Delta H$ ). We also did  
 similar correlations as shown in Figure 2 using wider energy  
 bands (e.g., 1–8 Å GOES channel), and we found that the  
 correlation coefficients decrease correspondingly. This is  
 independently confirmed in Figure 1 where we see that  $>3$   
 Å photons will produce conductivity changes, but at alti-  
 tudes  $\geq 80 \text{ km}$ , i.e., above the reflection height for VLF  
 waves. Similarly the use of larger integration times (e.g., up  
 to the end of the X-ray time profile) spoiled the quality of the  
 correlations shown in Figure 2.

[14] The results of the present paper show that the  
 response of the ionospheric lower D region to solar photons  
 is dependent of the phase of the solar cycle. A direct  
 consequence is that we could define an ionospheric param-  
 eter or index capable to reproduce the solar activity cycle  
 variations. This quantity can be the  $F_{XMIN}$  parameter  
 defined earlier or one, or both, of the Wait ionospheric  
 parameters, the conductivity gradient ( $\beta$ ) or/and the refer-  
 ence height ( $H$ ). As for the later, there are already sugges-  
 tions based on the study of few cases that it varies with the  
 solar cycle phase [McRae and Thomson, 2000]. Since  
 diurnal undisturbed ionospheric D region is maintained  
 mainly by direct Lyman  $\alpha$  (1216 Å) radiation, changes of  
 the VLF waves reflection height with respect to the solar  
 cycle phase are indicative of similar variations in the Lyman  
 $\alpha$  incident flux at the Earth's atmosphere. The Lyman  $\alpha$   
 radiation is an important electromagnetic source of energy  
 for the Earth, since it is responsible for atmospheric changes  
 in the 70–110 km altitude range, produces the molecular

oxygen and the water clusters dissociation, and plays an important role in the chemistry of the minor species such as water vapor, ozone and nitric oxide [Woods *et al.*, 2000, and references therein]. Despite our poor knowledge of the long-term behavior of the Lyman  $\alpha$  line, it can vary by few hundred percent along the solar cycle [Lanz, 2000]. However, because of the atmospheric absorption it must be measured from space using rockets, balloons, the space shuttle and satellites in Earth orbit. These measurements have been made by several instruments since 1967 but they are noncontinuous, sometimes does not overlap in time, and differ in their calibration and in their estimated accuracies [Woods *et al.*, 2000; Floyd *et al.*, 2002]. To study the impact of Lyman  $\alpha$  variations on Earth, it is important to have spectrally well resolved data variation over recent periods (where there are direct measurements) and also for more distant past. For this reason the adjustments for the available data must be determined using proxy models, like SOLAR2000 [Tobiska *et al.*, 2000] as shown in the paper of Raulin *et al.* [2006, Figure 1].

[u] Therefore the results shown in this paper suggest the feasibility of monitoring the long-term solar activity in a spectral range which knowledge is crucial for a better understanding of solar-terrestrial relationships, in directly using the properties of VLF waves propagation within the Earth-ionosphere waveguide. Further analysis is needed (1) to show the present results continuously along the solar cycle, and not only for two extreme cases of solar activity conditions and (2) to improve the uncertainties of the method to be comparable to that obtained with proxy measurements.

#### 4. Concluding Remarks

[16] In this work we found that the ionospheric SPA amplitude  $\Delta\phi$  is correlated with the solar X-ray energy input,  $F_X$ , during the solar flare which produced it. The improvement in the quality of the obtained correlation, when compared to previous similar studies, resulted from the integration in time of the X-ray flux within a specific photon energy range (0.5–2 Å), after a careful treatment of the X-ray data. The better defined correlation allowed us to find different relations between  $\Delta\phi$  (or  $\Delta H$ ) and  $F_X$ , depending on the solar activity period in which the solar flares occurred. In particular, the minimum energy input necessary to produce a ionospheric SPA was found lower during solar minimum ( $\sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ J m}^{-2}$ ) than during solar maximum ( $\sim 7.10^{-6} \text{ J m}^{-2}$ ). Similarly a given solar flare should produce a larger (by almost  $2.6^\circ \text{ Mm}^{-1}$ ) SPA during solar minimum. These findings can be understood if the low ionospheric  $D$  region has a sensitivity dependence on the phase of the solar activity cycle, confirming recent results on the occurrence probability of SPAs [Raulin *et al.*, 2006] and on the estimation of Wait ionospheric parameters [McRae and Thomson, 2000]. An interesting implication of the present results is the possibility of monitoring the solar activity cycle, in particular, the Lyman  $\alpha$  line emission, using VLF waves propagation characteristics. Long-term past and present monitoring of the Lyman  $\alpha$  radiation is not currently available, but only inferred through proxy time series, although it is an essential information needed to better understand the influences of the Sun variations on the Earth atmosphere. A continuous

monitoring of the undisturbed  $D$  region by VLF waves, or the use of similar already existing past time series, could thus provide complementary information to the long-term variations of the Lyman  $\alpha$  radiation.

[17] Acknowledgments. The authors thank the comments and suggestions of Kaufmann which improved the quality and the clarity of the paper. I.P.R. thanks the partial support of CNPq agency through Proc. 30443/2004-7. A.A.P. thanks CAPES agency for the support she received. We thank two anonymous referees for a careful reading of the text, and suggestions which improved the paper.

[18] Zeyin Fu thanks Zhi-Xiao and Linton Floyd IV for their assistance in evaluating this paper.

#### References

- Floyd, L., W. K. Tobiska, and R. P. Cobble (2002), Solar UV irradiance variation, and its influence to the Earth, *Adv. Space Res.*, **29**(10), 1427–1440.
- Garcia, H. A. (1994), Temperature and emission measure from GOES soft X-ray measurements, *Sol. Phys.*, **154**, 275–308.
- Govind, P. K. (1975), OMEGA windfinding systems, *J. Appl. Meteorol.*, **14**, 1503–1511.
- Kaufmann, P., and M. H. Pons de Barro (1969), Some relationships between solar X-ray bursts and SPA's produced on VLF propagation in the lower ionosphere, *Sol. Phys.*, **9**, 478–486.
- Kaufmann, P., R. E. Schaal, W. Lopes, and L. Anzaki (1967), VLF propagation across the geomagnetic anomaly during SIDs, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 1443–1451.
- Kaufmann, P., L. Rizzo Piacca, J. H. Fernandez, and M. Rocha de Silva (2002), Solar flares not producing sudden phase advances, *J. Geophys. Res.*, **107**(A8), 1219, doi:10.1029/2001JA002929.
- Lean, J. (2000), Short-term, direct indices of solar variability, *Space Sci. Rev.*, **94**, 39–51.
- McLain, W. W., and N. R. Thomson (2000), VLF phase and amplitude: Daytime ionospheric parameters, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **62**, 609–618.
- McLain, W. W., and N. R. Thomson (2004), Solar flare induced ionospheric  $D$ -region enhancements from VLF phase and amplitude observations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **66**, 77–87.
- Murakami, Y., H. Murai, and T. Sato (1977), The quantitative relationship between VLF phase deviations and 1–8 Å solar X-ray fluxes during solar flares, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **39**, 787–792.
- Ohno, M. (1978), Ionospheric  $D$  region disturbances caused by solar X-ray flares, pp. 527–535, Radio Res. Lab., Minist. of Posts and Telecommunications, Tokyo, Japan.
- Park, P. (1993), Relation between VLF phase deviations and solar X-ray fluxes during solar flares, *Astrophys. Space Sci.*, **209**, 297–306.
- Raulin, J.-P., A. A. Pacini, P. Kaufmann, E. Corcos, and M. A. G. Martinez (2006), On the detectability of solar X-ray flares using very low frequency sudden phase anomalies, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **68**, 1029–1035.
- Rizzo Piacca, L., and P. Kaufmann (1975), Change of low ionosphere characteristics with solar cycle deduced from solar flare effects at VLF, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 1281–1283.
- Sylvester, J., H. A. Garcia, and B. Sylvester (1995), Quantitative interpretation of GOES soft X-ray measurements I. The isothermal approximation: Application of various atomic data, *Astron. Astrophys.*, **293**, 577–585.
- Tobiska, W. K., T. Woods, F. Aparicio, R. Viereck, L. Floyd, D. Brunser, G. Rotman, and G. R. White (2000), The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **62**, 1253–1250.
- Thomson, N. R., C. J. Radger, and M. A. Cliver (2005), Large solar flares and their ionospheric  $D$  region enhancements, *J. Geophys. Res.*, **110**, A06306, doi:10.1029/2005JA011038.
- Wait, J. R. (1958), Introduction by an oscillant magnetic dipole over two-layer ground, *Appl. Sci. Res.*, **4**(B7), 75–80.
- Wait, J. R., and K. Spies (1964), Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, *NBS Tech. Note 580*, Natl. Bur. of Stand., Gaithersburg, Md.
- Woods, T. N., W. K. Tobiska, G. J. Rotman, and J. R. Worden (2000), Improved solar Lyman  $\alpha$  irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations, *J. Geophys. Res.*, **105**, 27,195–27,215.

A. A. Pacini and J.-P. Raulin, Centro de Radioastronomia e Astrofísica Mackenzie, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação 896 São Paulo, SP 01302-907, Brazil. (raulini@cernam.mackenzie.br)

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.