



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.17.16-TDI

CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DA BAIXA IONOSFERA A TRANSIENTES SOLARES

Hernán Rivero Gavilán

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre, orientada pelos Drs. Emília Correia, e Alisson Dal Lago, aprovada em 25 de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JU4DU8>>

INPE
São José dos Campos
2015

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

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

Membros:

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.17.16-TDI

CARACTERIZAÇÃO DA RESPOSTA DA BAIXA IONOSFERA A TRANSIENTES SOLARES

Hernán Rivero Gavilán

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre, orientada pelos Drs. Emília Correia, e Alisson Dal Lago, aprovada em 25 de maio de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3JU4DU8>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rivero Gavillan, Hernán.

R522c Caracterização da resposta da baixa ionosfera a transientes solares / Hernán Rivero Gavilán. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxiv + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/07.28.17.16-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Emília Correia, e Alisson Dal Lago.

1. Explosões solares. 2. Muita baixa frequência. 3. SAVNET. 4. Região-d. I.Título.

CDU 550.388:523.985

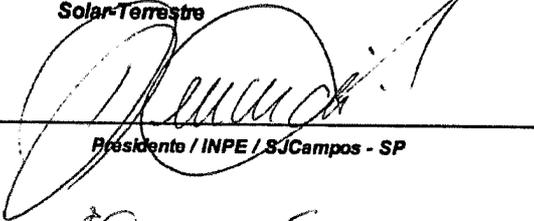


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

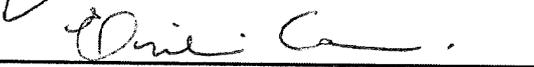
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
**Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre**

Dr. Clezio Marcos De Nardin



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Emília Correia



Orientador(a) / CRAAM/Mackenzie / São Paulo - SP

Dr. Alisson Dal Lago



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Ivan Jelinek Kantor



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Jean-Pierre Raulin



Convidado(a) / CRAAM/Mackenzie / São Paulo - SP

Dr. José Henrique Fernandez



Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Título: "Caracterização da Resposta da Baixa Ionosfera a Transientes Solares"

Aluno (a): **Hernan Rivero Gavilan**

São José dos Campos, 25 de Maio de 2015

“Quando estás certo, ninguém se lembra; quando estás errado, ninguém esquece”.

Provérbio irlandês

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Pierre Kaufmann, coordenador do Centro de Radio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie, CRAAM, minha gratidão por me dar a oportunidade de trabalhar neste centro durante esses anos.

Um agradecimento pessoal para a Dra. Emilia Correia por confiar em mim, desde que nos conhecemos, tanto nos bom quanto nos maus momentos que passei, e pela dedicação que mostrou ao me orientar como pesquisador.

Agradeço também ao doutor Alisson Dal Lago, como co-orientador deste trabalho por sua disposição, durante todo esse tempo.

A minha mãe, Isabel Erasma Gavilán Ramos, por todo seu apoio, confiança Ruth Rivero Gavilán e meu sobrinho Alejandro aos que espero ver com muita ansiedade.

Dedico este trabalho também para o Licenciado Walter Guevara Day, diretor do departamento de Astronomia da *Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial* (CONIDA), que me apoiou desde que foi meu professor e posterior chefe e a todos os que trabalham nesse departamento.

Para os integrantes e ex-integrantes do Museu Histórico de Ciências Físicas (MHCF) que me ensinaram o amor pela ciência. Um agradecimento para o Dr. Victor de la Luz, parceiro de aventuras urbanas em São Paulo, por me estimular na área da difusão científica.

Para Ana Paula, João Hannuch e aos integrantes do grupo de teatro de Higienópolis da Cultura Inglesa pela oportunidade de desenvolver as minhas habilidades teatrais, tornando assim um sonho de criança em realidade. Em especial à Isadora del Plato, por sua amizade e compromisso.

Finalizo agradecendo o essencial suporte financeiro da FAPESP (Processo numero 2010/05309-1) e à Agência CAPES pelo apoio prestado para poder desenvolver a presente tese de doutorado.

RESUMO

A partir de observações obtidas da rede SAVNET entre abril 2007 e dezembro 2011, período que corresponde ao final do mínimo do ciclo solar 23 e começo do ciclo solar 24, estudamos 366 eventos solares que produziram um SPA detectável. Durante o período de estudo obtemos que o limite de detecção mínimo corresponde à eventos classe GOES B3.0, com uma probabilidade de detecção de 39% e que eventos solares maiores que classe GOES B.6 possuem uma probabilidade de detecção de 100%. A correlação entre os SPAs normalizados pelo trajeto iluminado versus o logaritmo do excesso de fluxo de eventos em raios-X e da fluência solar na banda de 0,5 – 2 Å mostra uma tendência exponencial, ao serem considerados na análise eventos fracos com classificação GOES inferior a C1. A correlação entre o tempo de relaxamento, Δt_{rel} , e o tempo de crescimento do fluxo solar, ΔT_c , sugere que a tendência exponencial, quando incluídos os eventos em raios-X fracos, poderia estar relacionada com a resposta da ionosfera frente a competição entre os mecanismos de fotoionização devido ao incremento do fluxo de raios-X e os processos de recombinação.

CHARACTERIZATION OF LOW IONOSPHERE RESPONSE TO SOLAR TRANSIENTS

ABSTRACT

From SAVNET network database we study 366 solar events that produced SPAs between April 2007 to December 2011, period that corresponding to the minimum of the 23rd and beginning of the 24th solar cycle. During this period we obtained that the lower limit detection for producing a significant SPA at this VLF path corresponds to B3.0 GOES class with a probability of detection of 39 % and that solar flares greater than B6 GOES class have a probability detection of 100%. The correlation between the SPA's normalized intensity by the illuminated path and by $\sec(\chi_{\text{mean}})$ versus the logarithm X-ray solar flux peak excess, the solar fluence in the 0.5 – 2 Å band shows an exponential response when include faint events, with GOES classification lesser than C1. Correlation between the relaxation time, Δt_{rel} , and the crescent time of solar flux, ΔT_c , suggests that such exponential behavior, observed when including weak events, might be related to the role of ionospheric response under the competition between photoionization due the excess of X-rays radiation and recombination processes.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Perfil da densidade eletrônica da ionosfera em condições diurnas e noturnas para períodos de máximo (R=200) e mínimo (R = 0) de atividade solar.	5
Figura. 1.2 - Taxas de fotoionização computadas para $\chi=0^\circ$ em condições quiescentes.	8
Figura. 1.3 - Exemplo de perfil de fotoionização de raios-X entre 1 – 5 Å para um evento solar M1.5 computadas para $\chi=50^\circ$	10
Figura. 1.4 - Taxa de ionização dos raios cósmicos para diferentes latitudes geomagnéticas (0, 50 e 70°) e para máximo e mínimo de atividade solar.	12
Figura 1.5 - Taxa de produção de íons ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$) como função da altitude devido a elétrons monoenergéticos de diferentes energias iniciais.	13
Figura 1.6 - Distribuição em altitude de vários coeficientes de recombinação efetiva calculado por diferentes autores.	16
Figura 1.7 - Razão dos íons negativos e os elétrons em função da altitude para $\chi = 45^\circ$	17
Figura 1.8 - Perfil da frequência de colisão, indicando seu valor em 70 km de altura.	22
Figura 1.9 - Curvas de atenuação para o primeiro e segundo modo de propagação em função da frequência.	24
Figura 1.10 - Curvas de atenuação em função da frequência para alturas de reflexão entre 60 e 90 km para o modo $N_m=1$ em condições diurnas.	26
Figura 1.11 - Velocidade de fase em função da frequência da onda para diferentes alturas de reflexão.	28
Figura 1.12 - Efeitos ionosféricos associados a explosões solares.	29
Figura 1.13 - (a) Perfil de fase VLF para o trajeto NAA-PLO do 28/03/2008 e (b) fluxo de raios-X no canal GOES de 1-8 Å para o mesmo dia.	31
Figura 1.14 - Reconstrução das observações de Ohshio entre 15 de março e 13 de abril de 1966 (1979).	33
Figura 1.15 - Correlação da fluência (J m^{-2}) e a variação da altura de referência h_o (km).	34
Figura 1.16 - Correlação de $\log(P_{xm})$ como função do fluxo médio de Lyman- α para diferentes períodos de atividade solar.	36
Figura 2.1 - Mapa mostrando a localização das estações receptoras da rede SAVNET (losangos) e algumas estações transmissoras VLF (triângulos).	38
Figura 2.2 – Equipamento da estação receptora de ondas de VLF da rede SAVNET instalado no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), Atibaia.	39
Figura. 3.1 - Variação do fluxo de Lyman- α durante o período de estudo (Fonte: http://lasp.colorado.edu/lisird/lya/).	42
Figura 3.2 - Exemplo de SPA detectado no NAA – PLO entre as 17:00 e 22:00 UT, onde definimos o parâmetro $\Delta\Phi$	43
Figura 3.3 - Exemplo do perfil temporal do fluxo de raios-X detectado pelo GOES no canal de energia 0,5 – 4 Å durante uma explosão solar.	46

Figura 3.4 - Temperatura do plasma térmico solar em função das razões dos fluxos medidos nos dois canais de energia do satélite GOES.	47
Figura 4.1 - Probabilidade de detecção de eventos solares para o trajeto NPM - PLO para o período 2007 – 2010.	52
Figura 4.2 - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e o excesso do fluxo de raios-X para cada canal de energia GOES: XL (a) e XS (b) para o período 2007 – 2010.	54
Figura 4.3 - Idem da Figura 4.2, com avanço de fase medido em microssegundos.	56
Figura 4.4. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e a fluência calculada entre 0,5 e 2 Å para o período 2007 – 2010.	57
Figura 4.5. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM e o fluxo raios-X na faixa de 0,5 a 2 Å para os eventos solares ocorridos em 2011.	59
Figura 4.6 - Idem da Figura 4.5, com avanço de fase medido em microssegundos.	61
Figura 4.7. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e a fluência calculada entre 0,5 e 2 Å para o período 2011.	63
Figura 4.8 - (a) Fluxo de raios-X na faixa de 1 – 8 Å do dia 19 de janeiro de 2010; (b) perfil de avanço de fase para o trajeto de propagação VLF NAU – PLO para esse dia; (c) comparação do perfil de amplitude do dia calmo (linha azul) e do dia perturbado (linha preta) e; (d) perfil da diferença de amplitude.	65
Figura 4.9 - Perfis de amplitude e fase observados não perturbado (linha azul) e perturbados (linha preta) dos trajetos de NAU – PLO (lado esquerdo) e NAA – PLO (lado direito).	68
Figura 4.10 - Definição observacionalmente do tempo de relaxamento, Δt_{rel} , e do tempo de crescimento, ΔT_c	69
Figura 4.11 - Correlação entre o tempo de relaxamento, Δt_{rel} , e o logaritmo do pico do fluxo de raios-X para o canal GOES 0,5 – 4 Å para condições do amanhecer e do entardecer para períodos de mínimo (2007 - 2010) e subida de máximo (2011).	70
Figura 4.12 - Correlação entre a fluência solar entre 0,5 – 2 Å e o tempo de relaxamento, Δt_{rel} , para condições matinais e no entardecer.	72
Figura 4.13 - Correlação entre o tempo de crescimento e o tempo de relaxamento durante máximo e mínimo de atividade solar. Os quadros pretos correspondem a eventos fracos, enquanto que os eventos intensos são representados por diamantes vermelhos.	73

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 1.1 Tipos de SIDs que ocorrem na região D ionosférica.	29
Tabela 1.2 -Tipos de SIDs que ocorrem na região D ionosférica.	30
Tabela 1.3 - Recopilação de P_{xm} e fluxo médio de Ly- α obtidos de diferentes publicações.	35
Tabela 2.1 – Localização geográfica das estações receptoras da rede SAVNET.	39
Tabela 3.1 – Estações transmissoras e receptoras utilizadas, com suas respectivas coordenadas geográficas e frequências de operação.	41
Tabela 4.1 - Valores dos eventos em raios-X dos canais de energia GOES 1 – 8 Å e 0,5 – 2 Å para os trajetos de propagação VLF de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM – PLO correspondente ao período 2007 – 2010.	51
Tabela 4.2 - Valores mínimos de fluxo de raios-X dos canais GOES XL e XS para os trajetos de propagação VLF de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM – PLO correspondente ao período 2011.	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ATI	Estação receptora de VLF da rede SAVNET – Atibaia, Brasil.
CAS	Estação receptora de VLF da rede SAVNET – CASLEO, Argentina.
CASLEO	Complejo Astronómico El Leoncito.
CRAAM	Centro de Radio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie.
EACF	Estação receptora de VLF da rede SAVNET – Estação Antártica Comandante Ferraz, Antártica.
EM	Emission Measure
EUV	Extreme UltraViolet
GOES	<i>Geostacionary Operational Enviroment Satéllites.</i>
GPS	<i>Global Position System.</i>
ICA	Estação receptora de VLF da rede SAVNET – Ica, Peru
IHY	<i>International Heliophysics Year</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
NAA	Estação emissora de VLF – Cuttler, EUA.
NAU	Estação emissora de VLF – Aguada, Porto Rico.
NDK	Estação emissora de VLF – Dakota do Norte, EUA.
NLK	Estação emissora de VLF – Jim Creek, EUA.
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
NPM	Estação emissora de VLF – Havaí, EUA.
NWC	Estação emissora de VLF – North West Cape, Austrália.
PAL	Estação transmissora de VLF da rede SAVNET – Palmas, Brasil.
PIU	Estação transmissora de VLF da rede SAVNET – Piura, Peru.
PLO	Estação transmissora de VLF da rede SAVNET – Punta Lobos, Peru.
ROI	Radio Observatório de Itapetinga.

SAVNET	<i>South America VLF NETwork</i> , receptores de ondas VLF.
SCNA	Sudden Cosmic Noise Absorption
SEA	Sudden Enhancement of Atmospheric
SEC	Space Environment Center
SES	Sudden Enhancements of Signal
SFD	Sudden Frequency Deviation
SID	Sudden Ionospheric Disturbances
SMS	Estação receptora de VLF da rede SAVNET – São Martinho, Brasil.
SoftPAL	Software Phase and Amplitude Logger
SPA	Sudden Phase Anomalies
SWF	Short Wave Fadeout
VLF	<i>Very Low Frequency</i> – ondas eletromagnéticas de muita baixa frequência.

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Molécula ou elemento químico.
A^-	Íon.
a	Raio da Terra.
a_e	Coeficiente de recombinação elétron-ion
a_i	Coeficiente de recombinação íon-ion
a_j	Coeficiente de junção eletrônica.
$B\delta$	Fluxo de raios-X solar na faixa de comprimentos de onda 1 – 8 Å.
$b\delta$	Resposta do detector GOES na faixa de comprimentos de onda 1 – 8 Å
c	Velocidade da luz no vácuo.
d	Distância entre dois pontos da Terra.
d_e	Coeficiente de separação associativa.
dE/ds	Perda de energia por partícula em uma colisão inelástica.
dV	Diferencial do volume do plasma emissor.
e^*	Elétron energizado.
$E(\lambda)$	Intensidade espectral do raios-X solar.
F_x	Fluência solar na banda de 0.5 – 2.0 Å.
f	Frequência da onda.
h	Constante de Plank.
h_0	Altura de referência não perturbada.
j	Número imaginário.
M	Íon ou molécula.
m_e	Massa do elétron.
n	Índice de refração de um meio ionizado.
n_n	Densidade do gás neutro em função da altura.
$N(NO,z)$	Concentração de NO em função da altura.
$N(O,z)$	Concentração de O em função da altura.
N^+	Densidade dos íons positivos.

N^-	Densidade dos íons negativos
N_e	Densidade eletrônica.
N_m	Modo de propagação de ondas de VLF.
P_{xm}	Intensidade do fluxo mínimo para produzir um SPA.
$Q(z)$	Taxa de produção da radiação corpuscular.
$q(NO^+, z)$	Taxa de produção do NO ⁺ em função da altitude.
$q(O_2^+)$	Taxa de produção do íon positivo do oxigênio molecular.
q	Taxa de produção dos íons devido ao aumento do fluxo de raios-X.
$q_i(\chi, z)$	Taxa de produção de íons para raios-X em função da altura e do ângulo zenital
q_e	Carga do elétron.
r	Altura de reflexão da onda VLF.
r'	Altura de reflexão perturbada da onda VLF.
R	Razão entre os canais de energia do GOES na faixa de 0.5 – 4 Å e 1 – 8 Å.
T	Temperatura do plasma coronal.
v_ϕ	Velocidade de fase da onda.
W	Energia media para a formação de pares de íons.
X	Razão entre a frequência angular de plasma ω_N e a frequência angular ω
Y_L	Razão entre a componente longitudinal de ω_B e a frequência angular ω
Y_T	Razão entre a componente transversal de ω_B e a frequência angular ω
$Y_i(\chi, z)$	Coefficientes de fotoionização local.
Z	Razão entre a frequência de colisão ν e a frequência angular ω
z	Distância zenital
z_0	Distância zenital para $\tau=1$
α_{eff}	Coefficiente de recombinação efetiva.
β	Gradiente de condutividade.
$\rho(z)$	Densidade do ar.
Θ	Ângulo sólido.
χ	Ângulo zenital solar.

χ_m	Ângulo zenital médio solar.
Δ	Expressa uma variação.
$\Delta\lambda_i$	Faixa de comprimento de onda
$\Delta\Phi$	Intensidade do SPA.
$\Delta\Phi_A$	Magnitude da fase no máximo do SPA.
$\Delta\Phi_B$	Magnitude da projeção do máximo do SPA no perfil de fase.
ε_0	Permissividade do vácuo.
ϕ	Fase de onda eletromagnética.
λ	Comprimento de onda.
λ_n	Razão da densidade dos íons negativos e da densidade eletrônica.
σ_e	Condutividade elétrica.
ν	Frequência de colisão do plasma.
Ω	Parâmetro de condutividade.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Ionosfera terrestre	3
1.2. Baixa ionosfera.....	6
1.3. Mecanismos de ionização da baixa ionosfera.	7
1.4. Equilíbrio de ionização.	14
1.5. Composição química da baixa ionosfera.	18
1.6. Propagação de ondas eletromagnéticas de baixas frequências no guia de onda terra-ionosfera.	20
1.7. Efeitos das explosões solares na baixa ionosfera.	28
2 INSTRUMENTAÇÃO	37
3 DADOS E METODOLOGIA	41
3.1. Seleção de dados VLF	41
3.2. Definição de $\Delta\Phi$	43
3.3. Normalização pela distância do trajeto iluminado e cálculo do ângulo zenital χ_{med}	44
3.4. Dados solares.....	45
3.5. Cálculo dos espectros térmicos das explosões solares	46
3.6. Cálculo da fluência solar em raios-X moles.....	48
4 RESULTADOS OBSERVACIONAIS	51
4.1. Estudo estatístico da resposta ionosférica em função do mínimo de atividade solar do ciclo solar 23 (2007 - 2010).....	51
4.2. Estudo estatístico da resposta ionosférica em função da atividade do ciclo solar 24 (2011).....	58
4.3. Condições de propagação do trajeto VLF de NAU – PLO.....	64
4.4. Mudanças do tempo de relaxamento ao longo do ciclo solar	69
5 DISCUSSÃO	75
5.1. Mudanças nas condições de propagação devidas a explosões solares durante o ciclo de atividade solar.....	75
6 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1 INTRODUÇÃO

O estudo da baixa ionosfera (região D e C) pode ser feito utilizando-se várias técnicas, entre elas a técnica de propagação de ondas eletromagnéticas de muito baixa frequência (VLF, Very Low Frequency, 3 - 30 kHz). As informações obtidas utilizando a técnica de VLF se restringem ao limite inferior da ionosfera onde se dá a reflexão do sinal, que em condições diurnas calmas localiza-se a uma altura de 70 km, onde a densidade eletrônica é de aproximadamente 400 cm^{-3} e em condições noturnas para uma altura que varia entre 85 e 90 km, com densidade eletrônica por volta de 20 cm^{-3} . Estas altitudes não são acessíveis aos balões estratosféricos e aos satélites e a baixa densidade eletrônica nessa porção da atmosfera dificulta as observações mediante radares e ionosondas (BILITZA, 2003). Outra vantagem desta técnica é a possibilidade de se fazer observações contínuas a custos relativamente baixos.

O estudo das propriedades observadas do sinal de VLF é utilizado para caracterizar distúrbios ocorridos na baixa ionosfera, que podem ser de diferentes escalas temporais e espaciais, originados tanto por fontes externas como internas da atmosfera terrestre. O estudo das propriedades elétricas da baixa ionosfera pode ser desenvolvido por meio de dois parâmetros que permitem caracterizar o perfil da condutividade elétrica: a altura de referencia h_0 (em km) e o gradiente de condutividade (em km^{-1}) (Wait e Spies, 1964).

Em condições calmas o mecanismo de formação diurna da baixa ionosfera é a radiação solar Lyman- α de 1216 \AA (Nicolet e Alkin, 1960) pela ionização das moléculas de óxido nítrico (NO). Durante a ocorrência das explosões solares, quando o fluxo de raios-X sofre um aumento rápido de intensidade, tem-se um aumento significativo da concentração eletrônica da ionosfera terrestre. No caso da baixa ionosfera, o aumento da radiação solar de comprimentos de onda inferiores aos 2 \AA é responsável por aumentos significativos da ionização na base da ionosfera diurna. Este aumento da ionização no GCP (Great Circle

Path em inglês) é percebido como um evento SPA (Sudden Phase Anomalies) que é um avanço na fase do sinal de VLF.

As correlações entre a intensidade do pico dos SPAs e o logaritmo do pico do fluxo de raios-X das explosões solares, especialmente na faixa de 1 – 8 Å, têm sido utilizados como ferramenta para analisar os efeitos destes transientes solares na baixa ionosfera. Há muitos estudos sobre a relação entre os SPAs e o pico de fluxo dos eventos em raios-X solares em diferentes canais de energia (0,5 – 3 Å, 0,5 – 4 Å, 0,5 – 5 Å, 1 – 8 Å e 8 – 20 Å), mostrando uma correlação linear entre a intensidade do SPA normalizado pela distância entre transmissor e receptor VLF e o logaritmo do fluxo de raios-X solares para eventos maiores que classe GOES C1 (KAUFMANN; PAES DE BARROS, 1969; MURAOKA et al. 1977; PANT, 1993; KAUFMANN et al., 2002). Em muitos desses estudos tanto a sensibilidade da instrumentação assim como o não se considerar prováveis efeitos do ciclo de atividade solar limitaram a análise de eventos fracos.

Pacini e Raulin (2006) à partir do estudo da relação entre a intensidade do SPA com o logaritmo da fluência de emissão de raios-X (integração temporal do fluxo) na faixa de 0,5 e 2 Å, mostraram que a sensibilidade da baixa ionosfera para detectar SPAs é maior durante períodos de mínimo de atividade solar, devido a que a altitude da base da ionosfera durante o período de mínimo é 1 km mais elevado do que no período de máximo, confirmando os resultados obtidos por McRae e Thompson (2000) obtidos a partir da variação da altura de referência h' .

Há poucos trabalhos (COMMARMOND, 1977; ZIGMAN et al., 2007) que utilizam o tempo de relaxamento como parte do estudo dos efeitos das explosões solares na baixa ionosfera. Este parâmetro representa a diferença de tempo entre os picos do fluxo solar e do SPA. O valor deste parâmetro

nesse instante de tempo depende do coeficiente de recombinação, assim como da concentração eletrônica.

Para melhor entendermos a resposta da ionosfera aos fenômenos solares, este trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos das explosões solares na baixa ionosfera considerando a evolução do ciclo de atividade solar, cobrindo o mínimo do ciclo solar 23 e a subida do ciclo solar 24. Este trabalho também avalia o efeito do sentido de propagação, considerando trajetos norte-sul e leste-oeste. Também foi estudada a resposta da baixa ionosfera analisando os tempos de relaxamento e a intensidade dos eventos solares que causam os SPAs.

Nesta tese de doutorado apresentamos no primeiro capítulo uma breve revisão bibliográfica sobre a baixa ionosfera terrestre, com uma descrição dos efeitos solares, com suas características e dependências. No segundo capítulo descrevemos a metodologia utilizada no presente trabalho, onde introduzimos o parâmetro $\Delta\Phi$, o cálculo da fluência, do ângulo zenital médio e o tempo de relaxamento, Δ_{rel} . No terceiro capítulo mostramos os resultados obtidos para os trajetos de propagação VLF NAA-PLO, NAU-PLO e NPM-PLO entre os anos 2007-2011. Finalmente apresentaremos uma discussão de nossos resultados no quarto capítulo.

1.1. Ionosfera terrestre

A ionosfera pode ser definida como a região ionizada da atmosfera que contém um número significativo de elétrons livres e íons positivos. Estende-se a partir de aproximadamente 60 km até 1000 km de altitude, variando do dia para a noite, onde a quantidade de elétrons livres embebidos em um gás neutro é suficiente para influenciar a propagação de ondas de rádio. Além de íons positivos e elétrons livres, a porção inferior da ionosfera (entre 60 – 90 km de altitude) apresenta também uma concentração significativa de íons negativos.

A incidência de radiação na atmosfera terrestre, especialmente a radiação solar (raios-X e raios ultravioleta), como a precipitação de partículas energéticas provenientes de fontes extrassolares, da magnetosfera ou da ionosfera, provocam a ionização de várias espécies da atmosfera neutra. Expressando isto matematicamente:



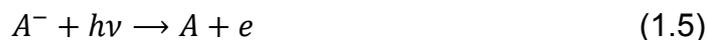
onde e^* representa um elétron energizado. Cada um destes agentes de ionização é dependente de vários fatores: iluminação solar, atividade solar, latitude geográfica entre outros (DANILOV, 1970). A natureza dos íons produzidos por cada agente ionizante depende da energia da radiação e da composição da atmosfera na altitude em que ocorre a ionização. Por exemplo, diferentes íons podem ser produzidos a partir de uma partícula inicial (ou primária) através de reações de intercâmbio de carga elétrica com moléculas neutras:



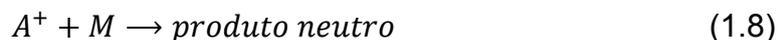
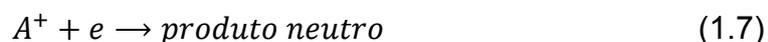
Os íons negativos podem ser formados por junção eletrônica (attachment) de espécies neutras:



Elétrons podem ser expulsos a partir de íons negativos, tanto por foto-detachment ou detachment colisional:



Finalmente, partículas carregadas positiva e negativamente podem se recombinar:



A importância de cada um destes mecanismos de ionização, a concentração dos diferentes constituintes da atmosfera neutra, os processos de difusão e as condições ambientais envolvidas no processo de recombinação provocam inflexões na concentração eletrônica da ionosfera, que caracterizam as chamadas regiões ionosféricas C, D, E, F1, F2. Na Figura 1.1 mostramos o perfil de densidade eletrônica da ionosfera para condições diurnas e noturnas em períodos de máximo e mínimo de atividade solar.

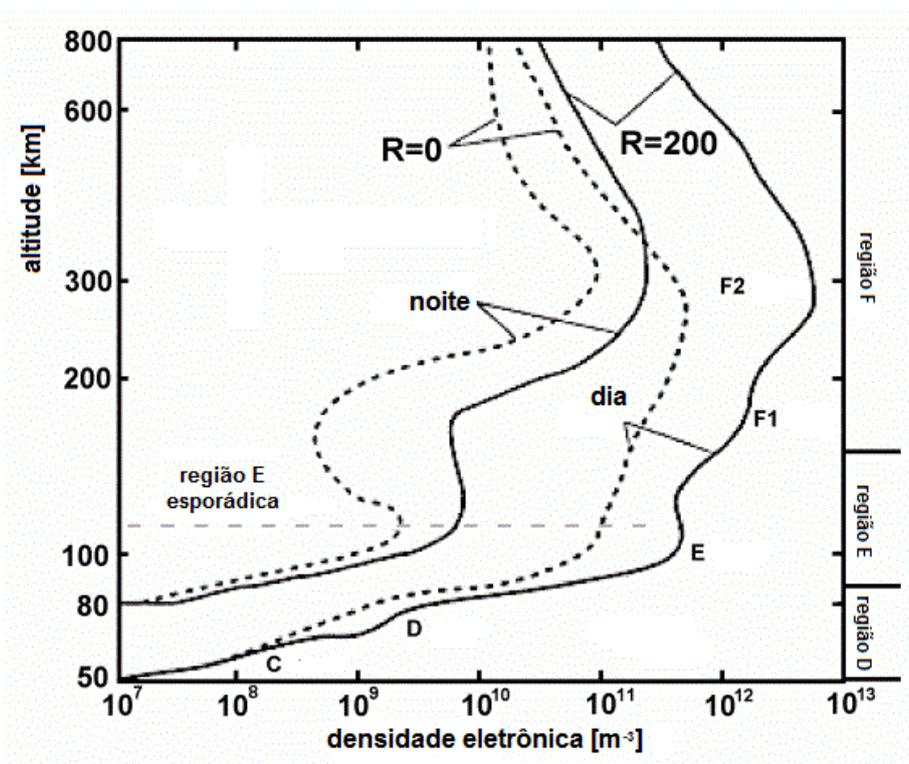


Figura 1.1 - Perfil da densidade eletrônica da ionosfera em condições diurnas e noturnas para períodos de máximo (R=200) e mínimo (R = 0) de atividade solar.

(Fonte: Modificado de http://roma2.rm.ingv.it/en/research_areas/4/ionosphere)

1.2. Baixa ionosfera.

A existência de ionização abaixo dos 100 km foi detectada pelas primeiras pesquisas ionosféricas por métodos de rádio propagação devido a influência exercida na reflexão e absorção de ondas de rádio de alta frequência pela ionização dessas altitudes desde a primeira metade do século XX (Danilov, 1970). Apesar disso, a região D é a região ionosférica menos estudada devido à posição que ocupa. A presença de um ainda grande número de moléculas na atmosfera terrestre acima dos 90 km provoca uma forte absorção de radiação solar com comprimentos de onda inferiores aos 1000 Å, com exceção da radiação Lyman- α (1216 Å) devido ao baixo valor da seção eficaz de absorção do óxido nítrico (NO). As radiações solares que penetram até essas altitudes são capazes de produzir uma baixa taxa de ionização das moléculas de nitrogênio molecular (N₂), oxigênio molecular (O₂) e óxido nítrico (NO). Por outro lado, a alta densidade atmosférica e a baixa temperatura são responsáveis de eficientes processos de recombinação entre íons positivos e elétrons.

Durante condições diurnas o limite superior da baixa ionosfera ocorre por volta de 90 km, enquanto que para o limite inferior a altitude mais aceita é de 60 km, o que corresponde a região D e a transiente região C. Com relação à atmosfera neutra, a baixa ionosfera tem seu início dentro da mesosfera e estende-se até a termosfera. Nesta região, as propriedades físicas tais como temperatura, pressão e densidade variam diretamente com a latitude e estação do ano. Nesta região observam-se ainda variações diárias decorrentes de vários mecanismos, ainda não totalmente compreendidos, como a anomalia de inverno (TAUBENHEIM, 1983).

Uma consequência da elevada densidade de partículas neutras desta região são os elevados valores da frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras, ν , o que produz uma apreciável concentração de íons negativos (DANILOV, 1970). Devido a que a frequência de colisão é varias ordens de

grandeza maior do que a girofrequência, tanto para elétrons como para íons, pode se desprezar a influência do campo geomagnético nos estudos desta região ionosférica.

A composição química da baixa ionosfera apresenta uma mistura homogênea de gases constituída de 78% de nitrogênio molecular (N_2), 21% de oxigênio molecular (O_2) e de constituintes denominados de minoritários, mas de grande importância para esta porção da ionosfera. Dos constituintes minoritários o óxido nítrico (NO) é o mais importante pelo papel que exerce na formação e manutenção da baixa ionosfera diurna calma. Outro constituinte minoritário importante é o oxigênio atômico (O), cuja concentração está associada à molécula de ozônio (O_3) através de reações de dissociação do ozônio e recombinação do oxigênio, tendo estes grande participação na química dos íons negativos e na formação da transiente região C ionosférica (COMMARMOND, 1977).

Dentre outros constituintes minoritários destacam-se ainda o oxigênio molecular metaestável O_2 ($^1\Delta_g$) e o nitrogênio molecular (N_2) que participa da produção de pares de íons e do vapor d'água proveniente da baixa estratosfera responsável pelas reações de hidratação de íons na baixa ionosfera.

1.3. Mecanismos de ionização da baixa ionosfera.

Existem dois mecanismos para explicar a ionização da baixa ionosfera: o primeiro é a absorção de radiação eletromagnética por parte dos constituintes neutros, sendo denominado este processo de fotoionização, que é representado pela radiação Lyman- α , a radiação EUV entre 1027 e 1118 Å e os raios-X de comprimentos de onda menores aos 2 Å. O segundo mecanismo de ionização é a colisão entre partículas energéticas e constituintes neutros, processo chamado de ionização corpuscular.

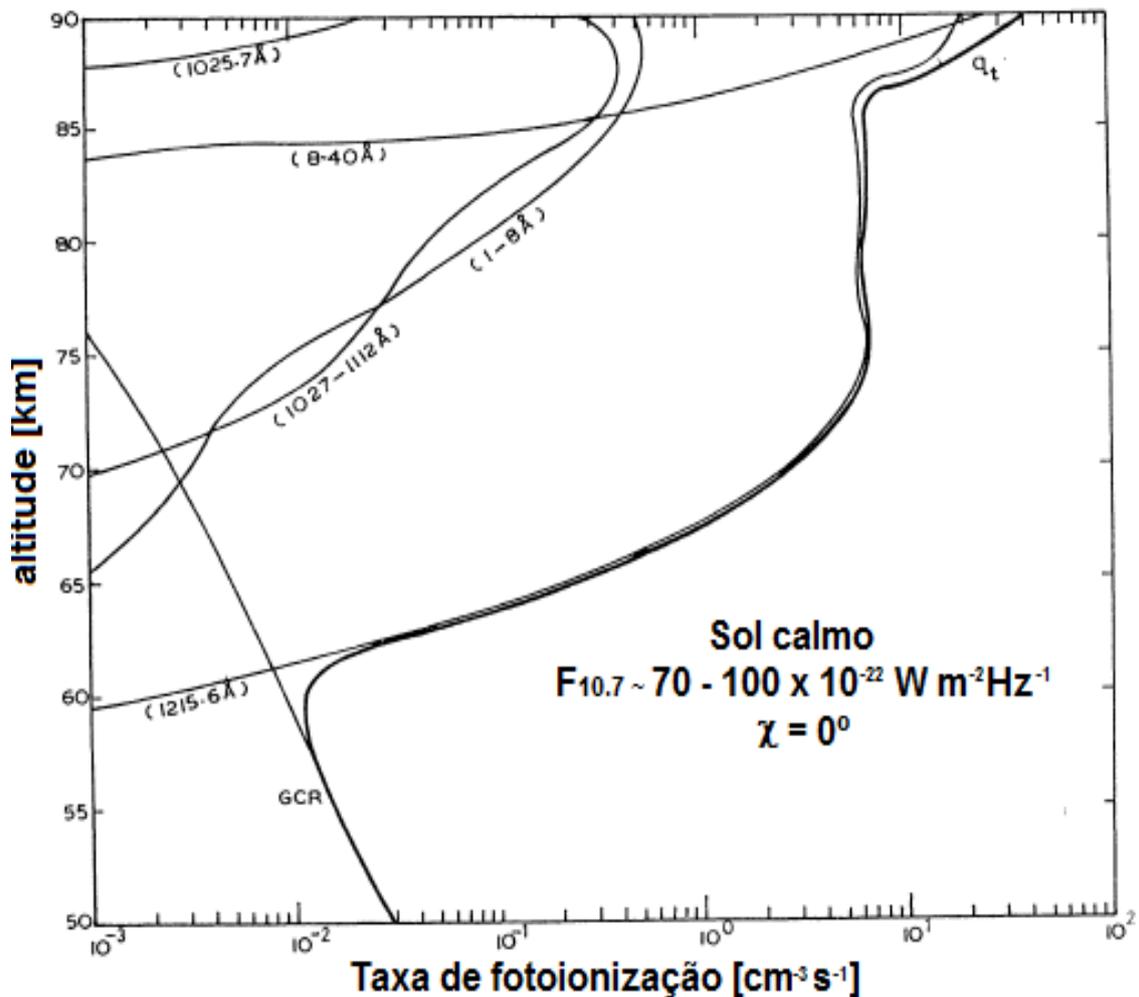


Figura. 1.2 - Taxas de fotoionização computadas para $\chi=0^\circ$ em condições quiescentes.
 Fonte: Modificado de Balachandra (1991).

Na Figura 1.2 mostramos o perfil de produção de cada um destes agentes ionizantes da baixa ionosfera em condições não perturbadas para um ângulo zenital de $\chi=0^\circ$. A fotoionização é produzida pela absorção de fótons, por parte dos constituintes atmosféricos neutros. Este mecanismo de ionização é mais importante em baixas e médias latitudes ficando confinado no hemisfério iluminado pelo Sol. A principal fonte de ionização diurna da região D é a radiação Lyman- α solar (1216 Å), como vemos na Figura 1.2, devido que sofre pouca absorção em grandes altitudes conseguindo penetrar até a baixa ionosfera provocando a dissociação do O_2 e a ionização do NO, gerando o

principal íon da região (NO^+). A taxa de fotoionização do NO, ionizado pela radiação solar de Lyman- α , é computada a partir da relação (TOHMATSU, 1990):

$$q(\text{NO}^+, z) = 6,0 \times 10^{-7} n(\text{NO}, z) \times \exp[-1,5 \times 10^{-20} \text{sec } \chi \int_z^{\infty} n(\text{O}_2, z) dz] \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad (1.9)$$

O espectro EUV entre 1027 e 1118 Å ioniza o oxigênio excitado no seu estado $\text{O}_2({}^1\Delta_g)$, cuja taxa de fotoionização podemos reproduzir pela seguinte relação empírica (Balachandra, et al. 1991):

$$q(\text{O}_2^+) = [\text{O}_2({}^1\Delta_g)](0,549 \times 10^{-9} \exp(-2,406 \times 10^{-20} [\text{O}_2] H(\text{O}_2) \text{sec } \chi) + 2,164 \times 10^{-9} \exp(-8,508 \times 10^{-20} [\text{O}_2] H(\text{O}_2) \text{sec } \chi)) \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \quad (1.10)$$

A contribuição dos raios-X solares ($\lambda \leq 10 \text{ \AA}$) depende do nível de atividade solar. De mínimo para máximo de atividade solar a variação da intensidade do background do fluxo de raios-X é um fator de várias ordens de grandeza, mas tem pouca importância quando é comparada com a radiação de Lyman- α em períodos calmos. Somente durante as explosões solares a radiação de raios-X substitui a radiação solar de Lyman- α como agente principal de ionização da baixa ionosfera, ionizando todos os constituintes atmosféricos presentes na baixa ionosfera.

A taxa de produção dos raios-X solares é descrita pela seguinte relação (OHSHIO, 1979):

$$q_i(\chi, z) = \sum Y_i(\chi, z) \frac{\lambda_i}{hc} E(\lambda_i) \Delta\lambda_i \quad (1.11)$$

onde $E(\lambda_i)$ é a intensidade espectral do raios-X solar, em $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$, h é a constante de Plank, c a velocidade da luz, $\Delta\lambda_i$ a faixa de comprimento de onda

para calcular a intensidade espectral e $Y_i(\chi, z)$ os coeficientes de fotoionização local calculados por Ohshio (1979).

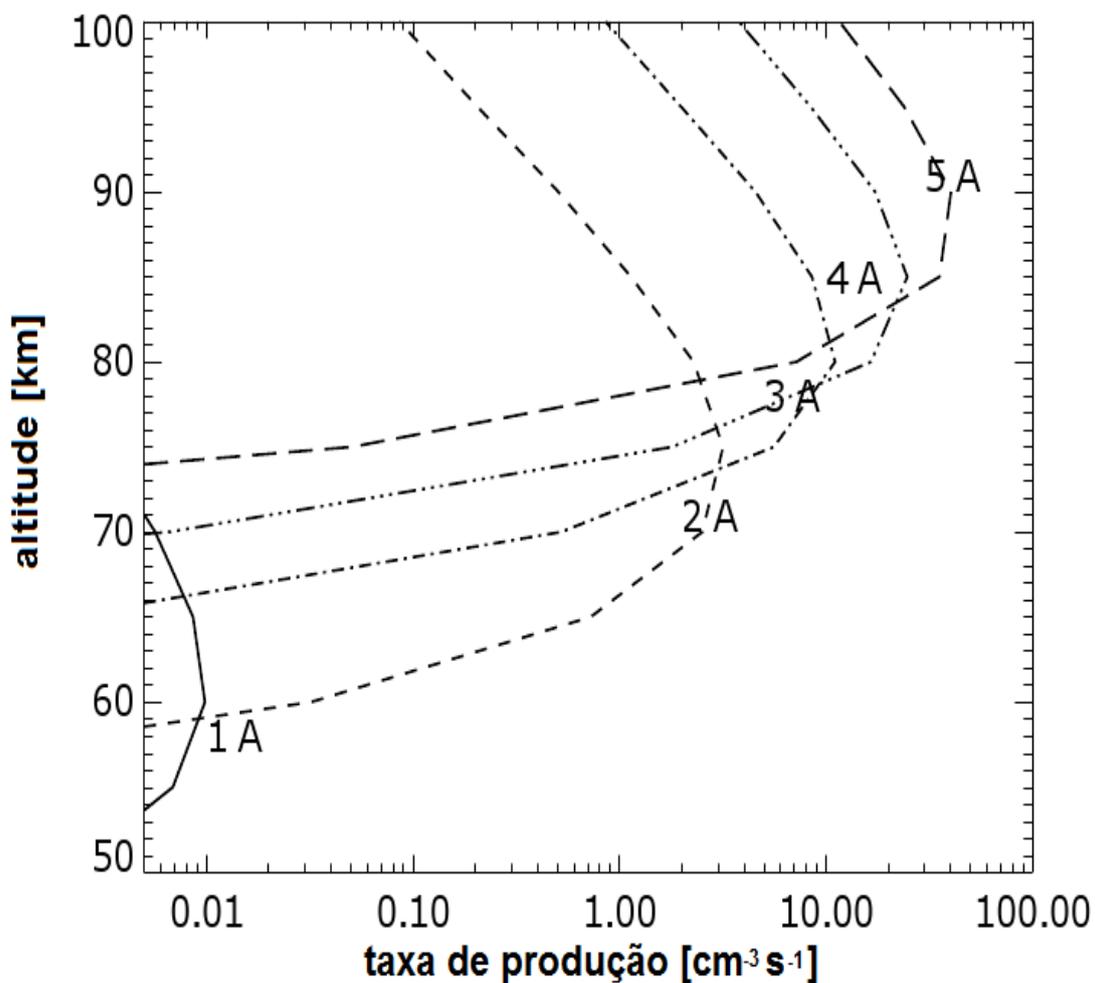


Figura. 1.3 - Exemplo de perfil de fotoionização de raios-X entre 1 – 5 Å para um evento solar M1.5 computadas para $\chi=50^\circ$.

Na Figura 1.3 mostramos o cálculo de perfis de taxa de produção de raios-X utilizando os coeficientes de fotoionização local de Ohshio para $\chi = 50^\circ$ de uma explosão solar tipo GOES M1.5 para comprimentos de onda entre 1 e 5 Å, onde os picos de produção para comprimentos de onda menores que 2 Å são responsáveis pela ionização da base da ionosfera terrestre

(ANANTHAKRISHNAN et al., 1973; MURAOKA et al. 1977; PACINI; RAULIN, 2006).

No segundo processo, chamado de ionização corpuscular, a transferência de energia acontece durante a colisão entre partículas energéticas e constituintes da atmosfera. Embora esta ionização seja normalmente menor que aquela produzida pelos fótons solares durante o dia, pode tornar-se importante durante períodos perturbados e durante a noite, quando a radiação solar está ausente. A taxa de produção devido à radiação corpuscular é definida como (BRASSEUR; SOLOMON, 2005):

$$Q(z) = \frac{\rho(z)}{W} \int_E \int_{\Omega} \frac{dE}{ds} j(z, E) dE d\Theta \quad (1.12)$$

onde W é a energia média requerida para a formação de pares de íons ($W \cong 35$ eV), $\rho(z)$ a densidade do ar, dE/ds a perda de energia por partícula em uma colisão inelástica e Θ o ângulo sólido.

Partículas extra-solares com energias médias superiores aos 0,1 BeV (10^9 eV), denominados raios cósmicos, podem atravessar a atmosfera a altitudes acima dos 50 km de altitude sem degradação de energia (TOHMATSU, 1990). A taxa de produção de pares de íons dos raios cósmicos cresce exponencialmente com a penetração na atmosfera, como mostrado na Figura 1.4.

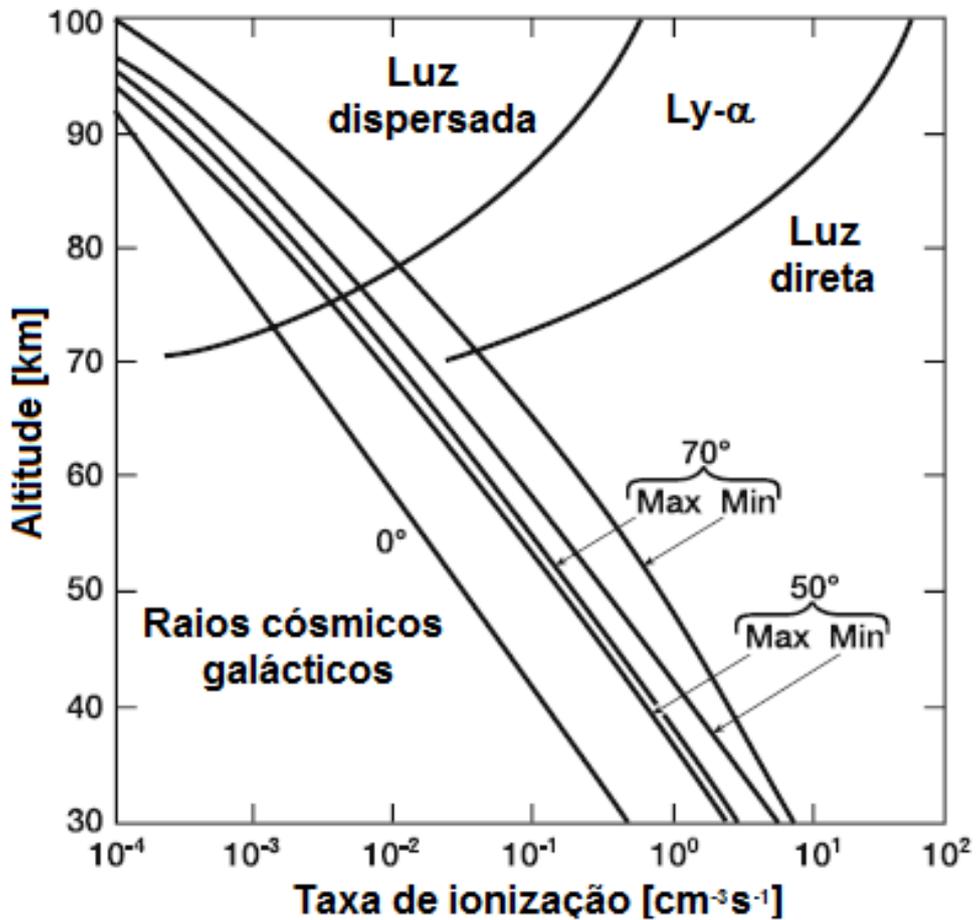


Figura. 1.4 - Taxa de ionização dos raios cósmicos para diferentes latitudes geomagnéticas (0, 50 e 70°) e para máximo e mínimo de atividade solar.

Fonte: Modificado de Brasseur e Solomon (2005).

A intensidade dos raios cósmicos depende da latitude geomagnética, de modo que somente partículas acima de determinada energia podem penetrar na atmosfera para uma determinada latitude, chamada latitude de corte. A intensidade dos raios cósmicos é afetada pelo campo magnético interplanetário, sendo em menor escala durante os máximos de atividade solar e em maior grau durante os mínimos de atividade solar, num fator de 2 entre ambos os períodos de atividade solar.

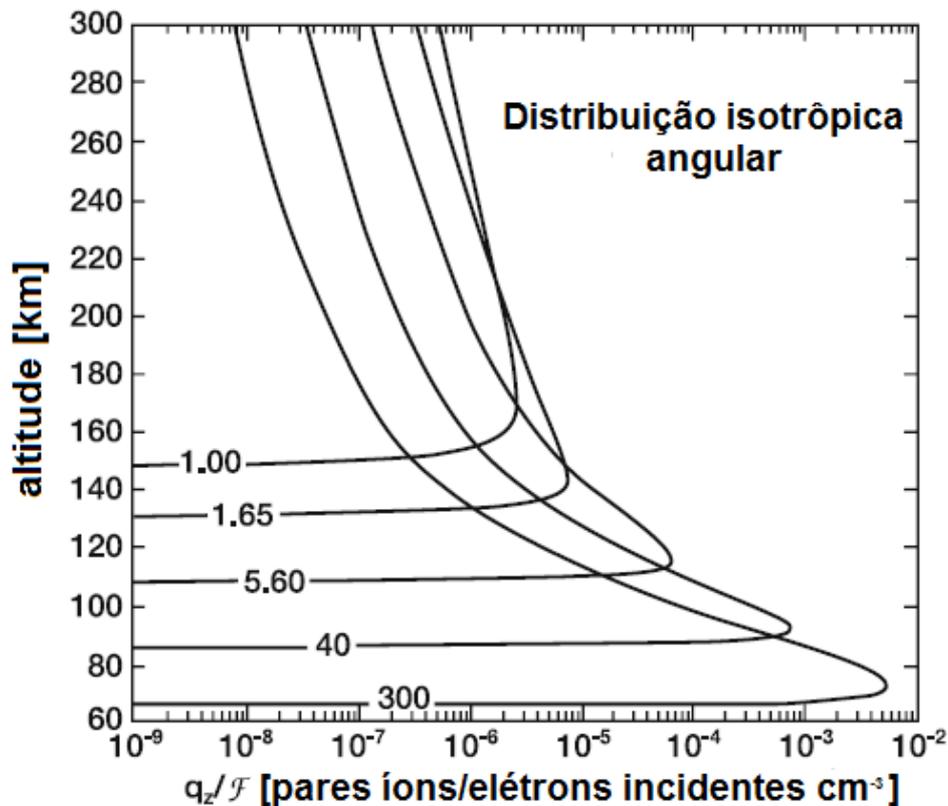


Figura 1.5 - Taxa de produção de íons ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$) como função da altitude devido a elétrons monoenergéticos de diferentes energias iniciais.

Fonte: Modificado de Brasseur e Solomon (2005).

A precipitação de elétrons durante períodos de máximo de atividade solar é uma importante fonte de ionização na baixa ionosfera, principalmente em altas latitudes e na Anomalia Magnética da América Sul. A altitude de máxima ionização é tipicamente 120 km para elétrons com energias de 10 keV, 80 km para 100 keV e 70 km para 500 keV. Precipitações de partículas com energias superiores aos 100 keV são associadas com tempestades geomagnéticas no cinturão de radiação sub-auroral (BRASSEUR; SOLOMON, 2005). A Figura 1.5 mostra a taxa de ionização acima dos 60 km de altitude devido a elétrons monoenergéticos com diferentes energias iniciais para um fluxo de elétrons de $1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

1.4. Equilíbrio de ionização.

Os processos físicos e químicos que governam o comportamento do plasma ionosférico estão relacionados através de uma equação de equilíbrio ou de continuidade. Esta equação inclui os processos de produção e destruição de íons e os processos de transporte. Para condições correspondentes com a baixa ionosfera, onde desprezamos termos de difusão, a equação de continuidade para os elétrons, íons negativos e íons positivos é definida como (COMMARMOND, 1977):

$$\frac{dN_e}{dt} = q + d_e N^- - \alpha_e N_e N^+ - a_j N_e \quad (1.13a)$$

$$\frac{dN^-}{dt} = a_j N_e - \alpha_i N^- N^+ - d_e N^- \quad (1.13b)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = q - \alpha_e N_e N^+ - \alpha_i N^- N^+ \quad (1.13c)$$

N_e : densidade eletrônica.

N^- : densidade dos íons negativos.

N^+ : densidade dos íons positivos.

q : taxa de produção dos íons devido ao aumento do fluxo de raios-X.

a_j : coeficiente de junção eletrônica (attachment).

d_e : coeficiente de separação associativa (detachment).

α_e : coeficiente de recombinação elétron-íon.

α_i : coeficiente de recombinação íon-íon.

Um parâmetro importante no estudo das partículas carregadas é a razão da densidade dos íons negativos e a densidade eletrônica.

$$\lambda_n = \frac{N^-}{N_e} \quad (1.14)$$

Adicionalmente consideramos a condição de neutralidade:

$$N^+ = N_e + N^- = (\lambda_n + 1)N_e \quad (1.15)$$

Em condições de equilíbrio fotoquímico e dado que o tempo de vida dos elétrons produzidos pelos mecanismos de ionização na região-D é muito breve, temos que:

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{dN^+}{dt} = \frac{dN^-}{dt} = 0 \quad (1.16)$$

Seguindo estas considerações e utilizando as equações (1.13a), (1.13b) e (1.13c) podemos obter expressões da densidade dos íons negativos, positivos e dos elétrons:

$$N^+ = \sqrt{\frac{q(\lambda_n+1)}{\alpha_e+\lambda_n\alpha_i}} \quad (1.17a)$$

$$N^- = \lambda_n \sqrt{\frac{q}{(\lambda_n+1)(\alpha_e+\lambda_n\alpha_i)}} \quad (1.17b)$$

$$N_e = \sqrt{\frac{q}{(\lambda_n+1)(\alpha_e+\lambda_n\alpha_i)}} = \sqrt{\frac{q}{(\lambda_n+1)\alpha_{eff}}} \quad (1.17c)$$

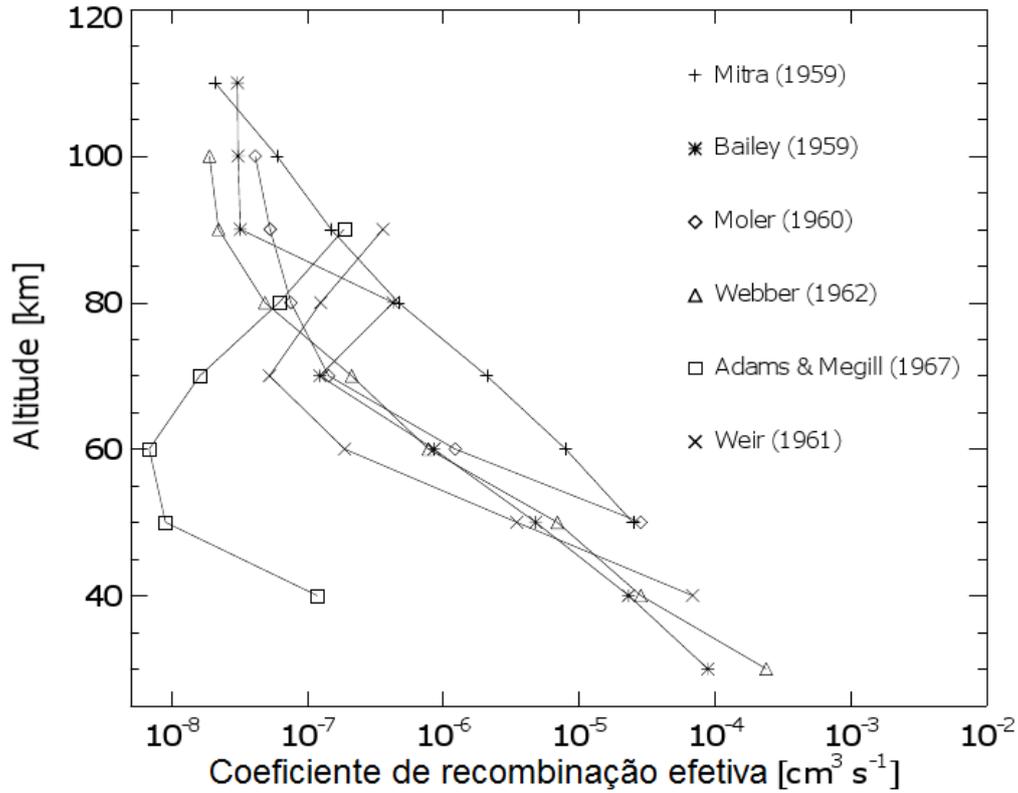


Figura 1.6 - Distribuição em altitude de vários coeficientes de recombinação efetiva calculado por diferentes autores.

O termo α_{eff} é o coeficiente de recombinação efetiva, o qual envolve os processos de perda eletrônica que agem na região-D. Esse parâmetro é um parâmetro importante porque permite controlar diretamente a distribuição em altitude da densidade eletrônica que se produz por ação de uma explosão solar. A Figura 1.6 mostra diferentes valores de coeficientes de recombinação efetiva em função da altitude obtida por diferentes autores.

Mediante a condição de equilíbrio (1.16) em (1.13b) podemos obter outra expressão para λ_n :

$$\lambda_n = \frac{a_j}{d_e + \alpha_i N^+} \quad (1.18)$$

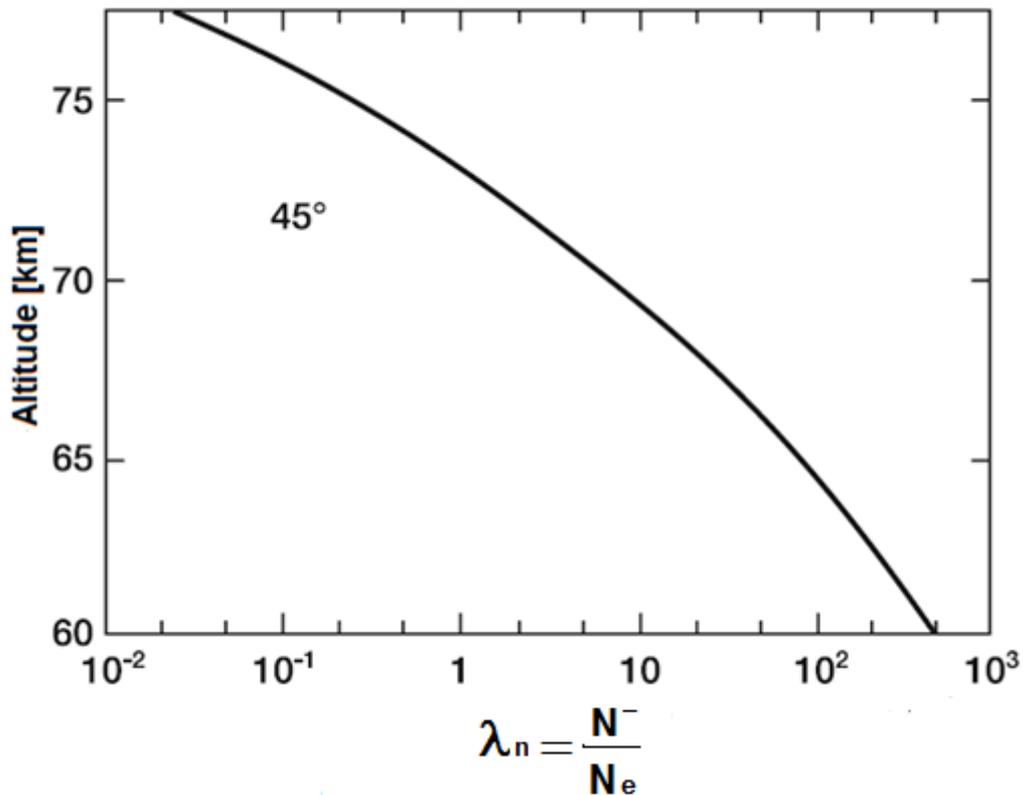


Figura 1.7 - Razão dos íons negativos e os elétrons em função da altitude para $\chi = 45^\circ$.

Fonte: modificado de Brasseur e Solomon (2005).

A equação 1.18 mostra que λ_n depende principalmente da taxa da junção dos elétrons nas partículas neutras e na taxa de separação associativa pela radiação solar e as colisões. A Figura 1.7 mostra o perfil de λ_n entre 60 e 80 km de altitude onde observamos que este coeficiente diminui com a altitude, atingindo a unidade em torno dos 73 km de altitude. Para altitudes acima dos 90 km, o parâmetro λ_n é considerado desprezível.

Derivando (1.15) em função do tempo e utilizando (1.13c) e (1.14) podemos expressar a equação de continuidade em função da concentração eletrônica como:

$$N_e \frac{d\lambda_n}{dt} + (\lambda_n + 1) \frac{dN_e}{dt} = q - (\lambda_n + 1) \alpha_{eff} N_e^2 \quad (1.19)$$

Ainda se λ_n não é nulo, podemos desprezar a variação temporal de λ_n , pelo que re-escrevemos (1.19) como:

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{q}{(\lambda_n+1)} - \alpha_{eff}N_e^2 \quad (1.20)$$

1.5. Composição química da baixa ionosfera.

A química dos íons positivos na baixa ionosfera é relativamente bem entendida. Os íons positivos pelos mecanismos de ionização já citados previamente são:

- N_2^+ devido a ionização de N_2 pelos raios-X e os raios cósmicos.
- O_2^+ devido a ionização de O_2 pelos raios-X, os raios cósmicos e a ionização de $O_2(^1\Delta_g)$ pela radiação EUV de comprimentos de onda inferiores aos 1118 Å.
- NO^+ devido a ionização de NO pela radiação Lyman- α (1216 Å).

Esses íons sofrem reações de transferência de carga muito rápidas dadas por:



e devido à grande concentração de O_2 , ocorre a perda dos íons N_2^+ e O_2^+ rapidamente, o que, em conjunto com a reação:



leva a uma maior concentração do íon NO^+ , tornando-se majoritário em aproximadamente 80 km juntamente com o íon O^+ . Iniciando com NO^+ como íon precursor a uma altitude de 80 km, tem-se a formação de aglomerados

iônicos através de reações de associação com N_2 e O_2 , seguido por reações de troca com CO_2 e H_2O . A formação dos aglomerados de O_2^+ tem particular interesse quando este torna-se dominante na região D. Isto ocorre quando a ionização é devida a partículas energéticas (condições perturbadas ou no período noturno em altas latitudes).

Na parte superior da região D, onde a temperatura é normalmente inferior a 210 K, a formação dos aglomerados iônicos pode ocorrer via oxigênio atômico, enquanto que na parte inferior da região D torna-se suficientemente alta para dissociar o O_4^+ , de modo que tornam o íon O_2^+ dominante desde que a concentração de NO seja baixa.

A formação de íons negativos primários na parte mais baixa da ionosfera se deve à reações de associação de elétrons livres com os gases neutros, principalmente com o oxigênio molecular através de uma reação de três corpos. A formação de O^- através da reação do ozônio com elétron é um processo importante da região D porque forma parte da cadeia que permite a formação de CO_3^- . Durante o amanhecer tanto o CO_3^- como o NO_3^- reagem rapidamente com o oxigênio molecular para liberar O_2^- segundo estas reações:



O O_2^- liberado ao reagir com o oxigênio atômico produz ozônio, liberando elétrons que são os responsáveis da formação da transiente região C ionosférica (COMMARMOND, 1977).



Outra contribuição na formação dos íons negativos é dada pela dissociação radiativa do O_2^- e O^- que formam O_2^+ e O^- , sendo a formação de O^- através da associação radiativa, um processo dominante no limite superior da região D. No entanto, a reação de três corpos é o mecanismo dominante na formação de O^- abaixo de 85 km até aproximadamente o máximo de densidade de ozônio a noite, entre 70 e 75 km onde domina a ligação associativa. Este íon principal segue cadeias de reações até atingir íons moleculares finais, NO_3^- e HCO_3^- , a partir dos quais se inicia a formação de aglomerados iônicos.

No período diurno a presença da radiação solar atua na dissociação dos íons negativos, sendo a foto-dissociação considerada a responsável pela maior variação dia-noite no equilíbrio entre as concentrações dos íons negativos e dos elétrons.

1.6. Propagação de ondas eletromagnéticas de baixas frequências no guia de onda terra-ionosfera.

Existem dois métodos para estudar a propagação de ondas de VLF: a teoria de raios (ray – tracing) e a teoria de modos de propagação de guia de onda (WAIT, 1959). A teoria de raios é conveniente para distâncias menores que 1000 km, quando o número de reflexões é pequeno. Para distâncias maiores que 1000 km, o número de raios a ser considerado aumenta, incrementando o grau de complexidade dos cálculos, razão pela qual a teoria de raios deixa de ser interessante.

Por tanto para estudar a propagação subionosférica de ondas de VLF em grandes distâncias se utiliza a teoria de modos do guia de onda, onde as características de cada modo dependem das condições de fronteira do guia de onda. A superfície da Terra é um condutor de eletricidade e pode refletir sinais de muito baixa frequência, o que inclui as ondas VLF. A baixa ionosfera resulta ser um bom refletor de ondas VLF. Em consequência, a Terra e a baixa

ionosfera constituem duas camadas de um guia de ondas onde as ondas VLF podem propagar-se, comumente chamado de guia de onda Terra – ionosfera.

A absorção de ondas de rádio na baixa ionosfera ocorre devido às colisões entre elétrons e constituintes neutros da atmosfera. Estas colisões convertem parte da energia da onda em energia térmica, reduzindo sua intensidade. O número médio de colisões que faz um elétron por unidade de tempo com as moléculas de ar depende da densidade das moléculas e, em menor grau, da velocidade de distribuição dos elétrons (DEMIRKOL, 1999).

Segundo Wait e Spies (1964), o perfil da frequência de colisão, $\nu(h)$, para as altitudes correspondentes com a baixa ionosfera é representado por uma função tipo exponencial:

$$\nu(h) = 1,816 \times 10^{11} \exp(-0,15h) \text{ Hz} \quad (1.27)$$

onde h é a altitude em km. A Figura 1.8, mostra a variação de ν em função da altura onde notamos que para uma altitude de 70 km, a frequência de colisão é da ordem de $4 \times 10^6 \text{ Hz}$.

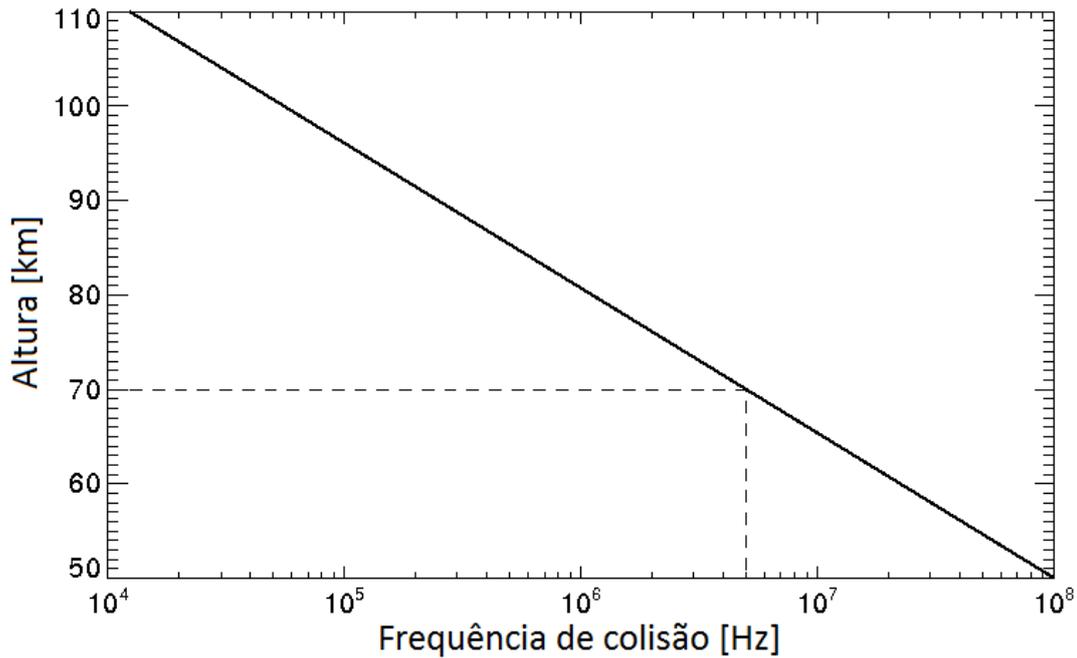


Figura 1.8 - Perfil da frequência de colisão, indicando seu valor em 70 km de altura.

Na baixa ionosfera a condutividade do plasma ionosférico σ depende da densidade eletrônica, N_e , e da frequência de colisão ν . A partir da condutividade ionosférica podemos deduzir uma variável introduzida por Wait e Spies (1964), chamada parâmetro de condutividade, Ω , expresso em s^{-1} :

$$\sigma_e = \frac{N_e q_e^2}{m_e \nu} = \varepsilon_0 \frac{\omega_N^2}{\nu} = \varepsilon_0 \Omega \quad (1.28)$$

que é definido como a razão entre o quadrado da frequência natural do plasma, ω_N^2 , e a frequência de colisão dos elétrons e as partículas neutras, ν .

$$\omega_N = \sqrt{\frac{N_e q_e^2}{m_e \varepsilon_0}} \quad (1.29)$$

$$\Omega = \frac{\omega_N^2}{\nu} \quad (1.30)$$

sendo q_e a carga do elétron, m_e a massa do elétron, e ε_0 a permissividade do vácuo. O parâmetro de condutividade pode expressar-se como uma função exponencial da forma:

$$\Omega(h) = \Omega_0 \exp \beta(h - h_0) \quad (1.31)$$

onde h_0 é a altura de referência, que é a altura na qual $\Omega(h = h_0) = \Omega_0 = 2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ e β é o gradiente de condutividade, ou seja, a taxa de variação de Ω com a altura. Em condições quiescentes, o valor geralmente adotado para β é de $0,3 \text{ km}^{-1}$ durante o dia, e $0,5 \text{ km}^{-1}$ durante a noite (WAIT; SPIES, 1964). Em condições perturbadas, o aumento na concentração de elétrons é mais acentuado do que a taxa de aumento na frequência de colisões, de modo que o gradiente de condutividade tende a ser maior do que em condições calmas (Mc era; THOMSON, 2003; THOMSON; RODGER, 2005).

Utilizando as equações (1.27), (1.29), (1.30) e (1.31), o perfil da densidade eletrônica na baixa ionosfera em função do gradiente de condutividade e da altura de referência é expresso como:

$$N_e(h) = 1,427 \times 10^7 \exp(\beta(h' - h_0) - 0,15h') \quad (1.32)$$

O modelo de Wait e Spies (1964) permite descrever as ondas VLF que se propagam no guia de onda Terra – ionosfera em termos de seus modos de propagação e as características de cada modo são governadas pelo fator de excitação, a taxa de atenuação e a velocidade de fase.

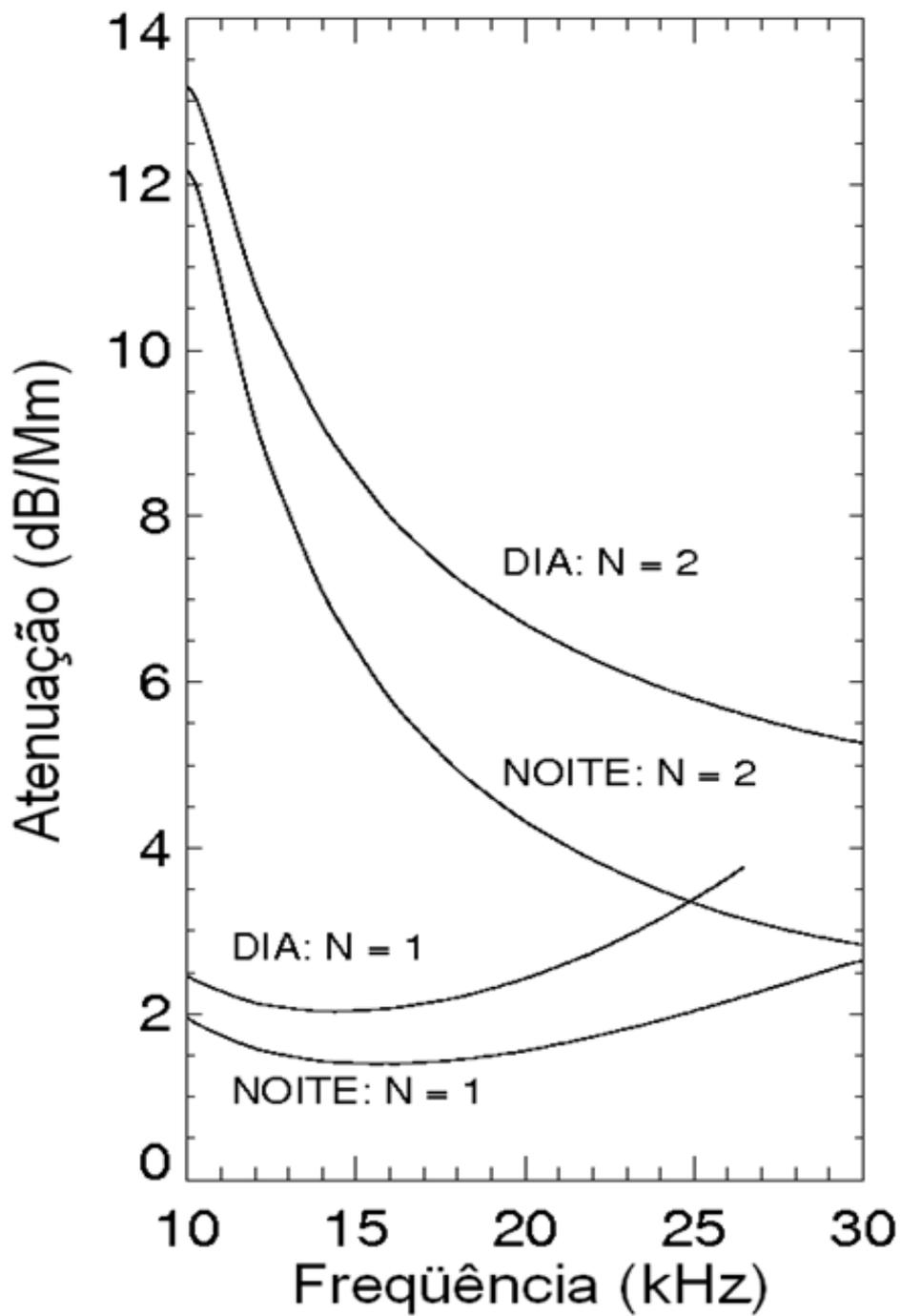


Figura 1.9 - Curvas de atenuação para o primeiro e segundo modo de propagação em função da frequência.

Fonte: Wait e Spies (1964).

O fator de excitação, que 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 e a potência total radiada por uma antena. A taxa de atenuação representa a perda de potência do sinal da estação transmissora devido à interação da onda com as duas fronteiras do guia de onda por unidade de distância, e é medida em decibels/Mm. 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 1 ($N_m = 1$) é menor do que a atenuação do modo 2 ($N_m = 2$) durante o dia, o que é ilustrado na Figura 1.9 e, portanto, o modo $N_m = 1$ é o modo dominante para a propagação diurna de sinais de VLF para frequências entre 3 e 30 kHz.

A Figura 1.10 mostra o comportamento da taxa de atenuação do modo 1 em função da frequência da onda, para diferentes alturas de guia de onda. Portanto, um abaixamento da altura do guia de onda, originado pelo amanhecer ou por eventos transientes de ionização, poderá causar tanto um aumento, quanto um decréscimo da atenuação do sinal, dependendo da sua frequência.

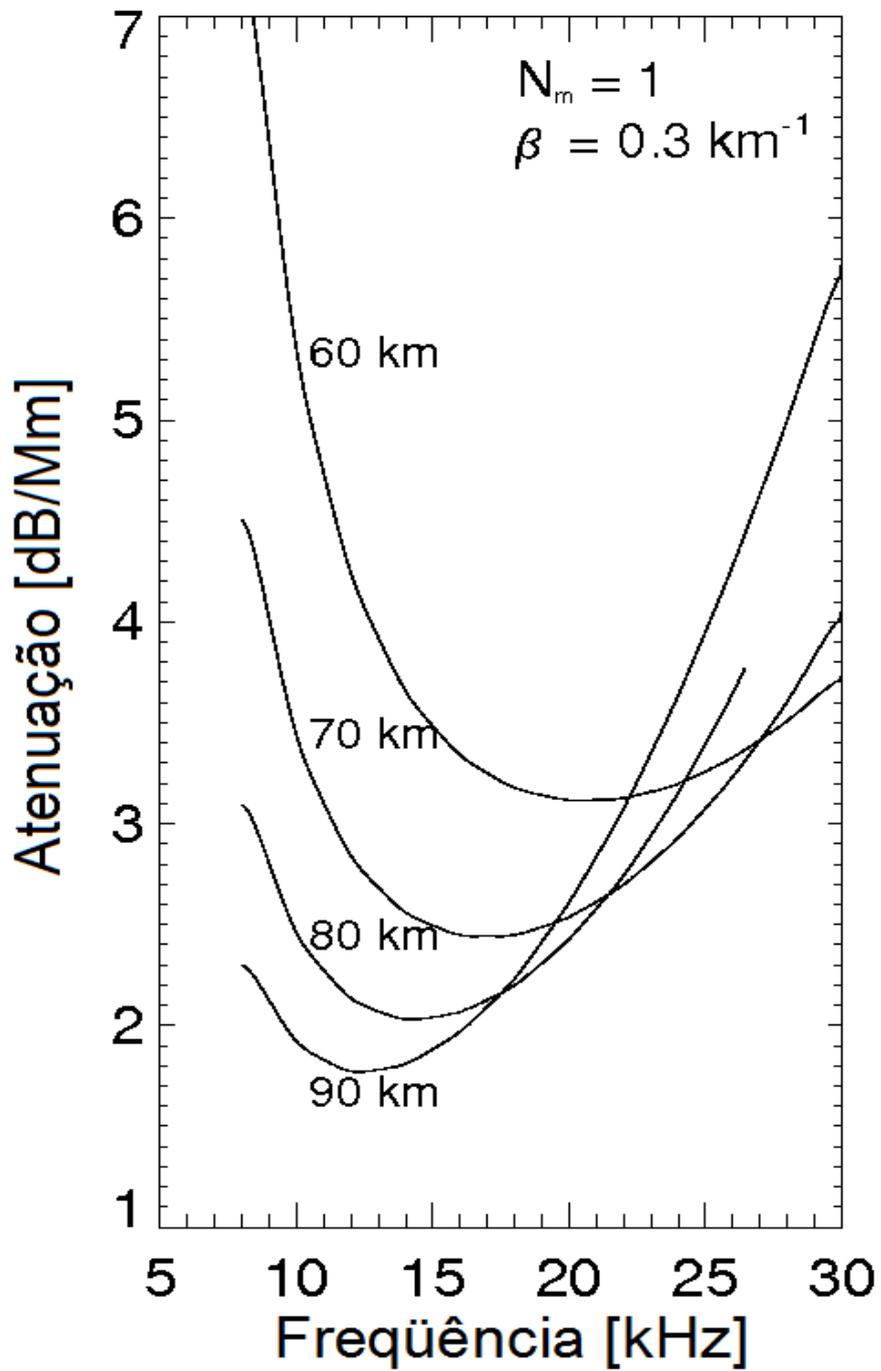


Figura 1.10 - Curvas de atenuação em função da frequência para alturas de reflexão entre 60 e 90 km para o modo $N_m=1$ em condições diurnas.

A variação de fase diurna produzida por uma diminuição da altura do guia de onda, $\Delta\phi$, é relacionada à variação de velocidade de fase, Δv_ϕ do primeiro modo de propagação através da relação:

$$\Delta\phi = 360 \frac{d}{\lambda} \frac{\Delta v_\phi}{c} \quad (1.33)$$

onde λ é o comprimento de onda, d o comprimento da parte iluminada do trajeto e c é a velocidade da luz no vácuo. A velocidade de fase do primeiro modo de propagação pode ser definida, considerando a superfície terrestre perfeitamente condutora, como (MURAOKA et al., 1977):

$$v_\phi = c \left(1 - \frac{r}{2a} + \frac{\lambda^2}{32r^2} \right) \quad (1.34)$$

onde r é a altura de reflexão da onda VLF e a é o raio da Terra. A velocidade de fase, v_ϕ , depende da frequência da onda, das condutividades elétricas da superfície terrestre e da baixa ionosfera.

A Figura 1.11, mostra a velocidade de fase em função da frequência para diferentes alturas de reflexão, onde se tem que a velocidade de fase aumenta quando a altura de reflexão diminui independentemente da frequência. A partir da equação 1.34 podemos reescrever a variação de fase, $\Delta\phi$, definida na equação 1.33 em relação à variação da altura da base da ionosfera, $\Delta r = r' - r$, onde r' é a altura de reflexão da ionosfera perturbada (MURAOKA et al., 1977).

$$\Delta\phi = -360 \frac{d}{\lambda} \left(\frac{1}{2a} + \frac{\lambda^2}{16r^3} \right) \Delta r \quad (1.35)$$

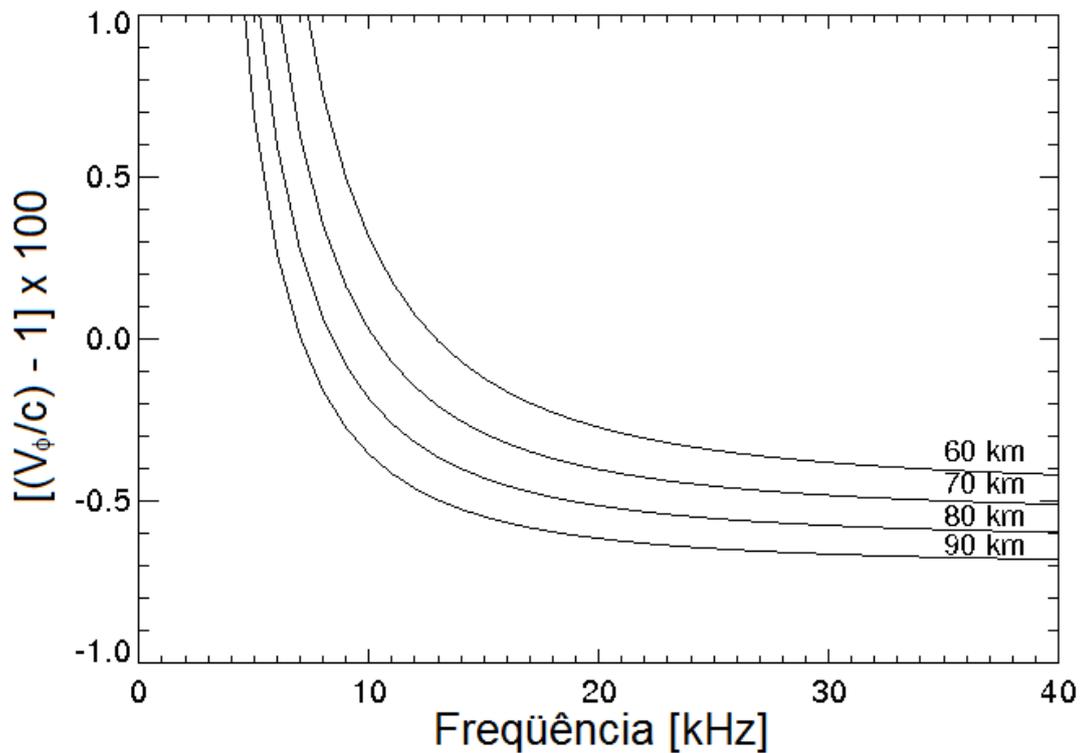


Figura 1.11 - Velocidade de fase em função da frequência da onda para diferentes alturas de reflexão.

Esta relação permite relacionar observações de avanços de fase que traduzem mudanças do perfil de condutividade com abaixamentos correspondentes da baixa ionosfera.

1.7. Efeitos das explosões solares na baixa ionosfera.

Uma explosão solar é definida como uma erupção no Sol que acontece quando a energia armazenada é subitamente liberada. As explosões solares produzem uma expulsão de radiação ao longo do espectro electromagnético, desde ondas de radio até raios gama. Durante as explosões solares, o plasma solar ambiente das regiões ativa é aquecido até dezenas de milhões de graus o qual produz emissão na faixa dos raios-X, através de fótons de energia na faixa de 1-20 keV e partículas são aceleradas podendo escapar para o meio interplanetário.

As explosões solares são classificadas segundo o brilho dos raios-X no comprimento de ondas de 1 à 8 Angstroms como apresentado na Tabela 1.1. Cada categoria das explosões solares têm nove subdivisões, de C1 até C9, M1 até M9, e X1 até X9.

Tabela 1.1 Tipos de SIDs que ocorrem na região D ionosférica.

Classe	Pico entre 1 e 8 Angstroms ($W m^{-2}$)
B	$I < 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq I < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq I < 10^{-4}$
X	$I < 10^{-4}$

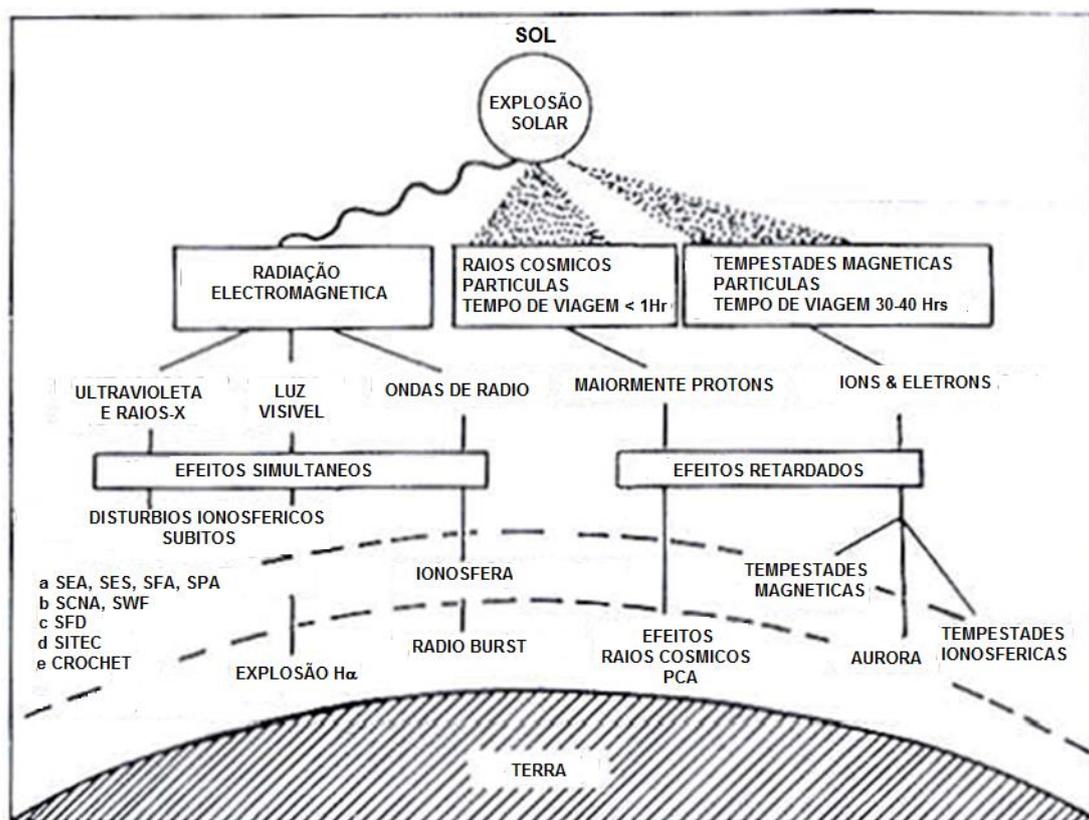


Figura 1.12 - Efeitos ionosféricos associados a explosões solares.

Fonte: modificado do Mitra (1974).

O aumento da radiação produzida durante as explosões solares provoca excessos de ionização na ionosfera em distintas altitudes e escalas temporais, como mostra a Figura 1.12. O aumento do fluxo de raios-X moles (1 - 20 keV) provoca súbitos aumentos de concentração eletrônica de diferentes graus em diferentes altitudes, chamados de SIDs (Sudden Ionospheric Disturbances) e ocorrem na sua maioria na região D ionosférica (Mitra, 1974). Os diferentes tipos de SIDs que ocorrem na baixa ionosfera estão resumidos na Tabela 1.2

Tabela 1.2 -Tipos de SIDs que ocorrem na região D ionosférica.

SES (Sudden Enhancements of Signal).	Aumento súbito do sinal, tanto em sinais VLF como em LF (Low Frequency, 30 kHz – 300 kHz).
SEA (Sudden Enhancement of Atmospherics)	Aumento das variações na amplitude dos sinais de VLF.
SWF (Short Wave Fadeout)	Corte das comunicações em HF (High Frequency, 3 – 30 MHz), que é causada pelo aumento da absorção.
SPA (Sudden Phase Anomaly)	Avanço súbito da fase do sinal, seguido de uma recuperação lenta.
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 se propagando no guia de onda Terra-ionosfera.

Dentro desse grupo o SID mais sensível com as explosões solares são os SPAs, que são súbitos avanços de fase nos sinais de VLF, produzidos como consequência de excessos de ionização decorrente da emissão de raios-X das explosões solares que produzem o abaixamento da altura de referência, h_o , (e. g. KAUFMANN et al. 1969).

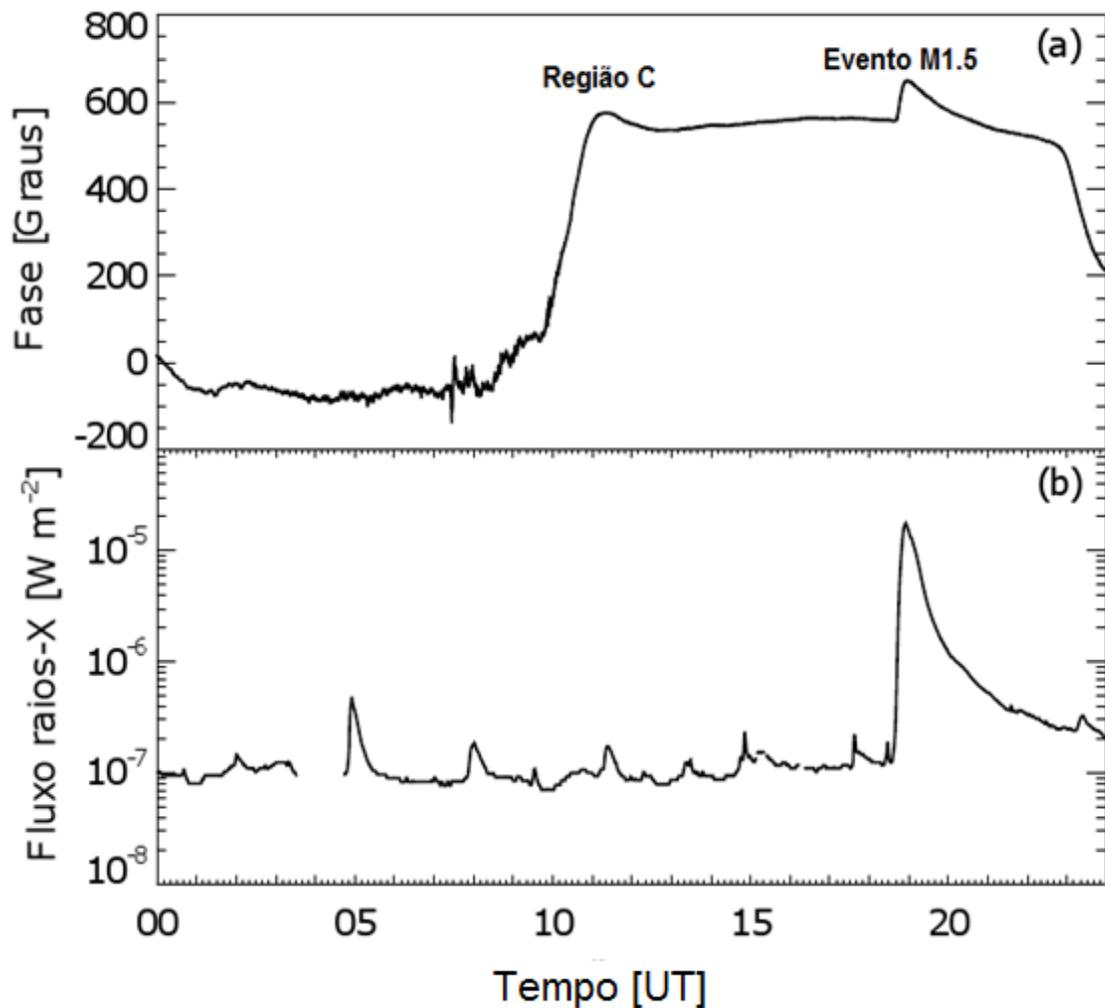


Figura 1.13 - (a) Perfil de fase VLF para o trajeto NAA-PLO do 28/03/2008 e (b) fluxo de raios-X no canal GOES de 1-8 Å para o mesmo dia.

A Figura 1.13 (a) mostra o perfil de variação de fase para o trajeto NAA-PLO correspondente ao dia 28/03/2008 e na Figura 1.13 (b) a variação correspondente do fluxo de raios-X para o canal de 1-8 Å. O perfil de fase mostra o avanço de fase produzido pela formação da região C ionosférica, com uma intensidade de ~ 41 graus e cujo pico acontece as 11:21 UT. A partir das 19:00 UT observamos um evento solar cujo fluxo de raios-X começa a aumentar, atingido seu máximo as 19:34 UT com uma intensidade de $1,5 \times 10^{-5}$

$W m^{-2}$ (classificação GOES M1.5). Esse aumento de fluxo produz um avanço de fase de ~ 94 graus.

De forma geral um SPA é dividido em duas fases: a primeira de tipo impulsiva que é caracterizada por um aumento súbito da fase dos sinais VLF, produzida pelo rápido incremento do fluxo de raios-X solar; seguido de uma fase de decremento que é caracterizada por uma recuperação lenta que pode durar algumas horas. Há muitos estudos sobre a relação entre os SPAs e o pico de fluxo dos eventos em raios-X solares em diferentes canais de energia (0,5 – 3 Å, 0,5 – 4 Å, 0,5 – 5 Å, 1 – 8 Å e 8 – 20 Å), mostrando uma correlação linear entre a intensidade do SPA normalizado pela distância e o logaritmo do fluxo de raios-X solares para eventos maiores que classe GOES C1 (KAUFMANN; PAES DE BARROS, 1969; MURAOKA et al. 1977; Pant, 1993; Kaufmann et al., 2002). Em muitos desses estudos tanto a sensibilidade da instrumentação como o não considerar prováveis efeitos do ciclo de atividade solar limitaram a análise de eventos fracos. Esses trabalhos apresentam também dispersões significativas, que podem ser atribuídas a vários fatores incluindo a ausência de distinção dos eventos ocorridos em diferentes períodos do ciclo solar e à escolha dos intervalos de energia utilizados.

Um dos poucos trabalhos que consideravam os efeitos de eventos fracos é de Ohshio (1979), donde foram estudados 22 SPAs detectados entre 15 de março e 13 de abril de 1966, período que corresponde com o início do ciclo de atividade solar 20. A relação entre os avanços de fase desses eventos com o máximo do fluxo de raios-X feitos para o canal de 0,5 – 5 Å também sugere uma relação exponencial na faixa de eventos fracos, tão como apreciamos na Figura 1.14.

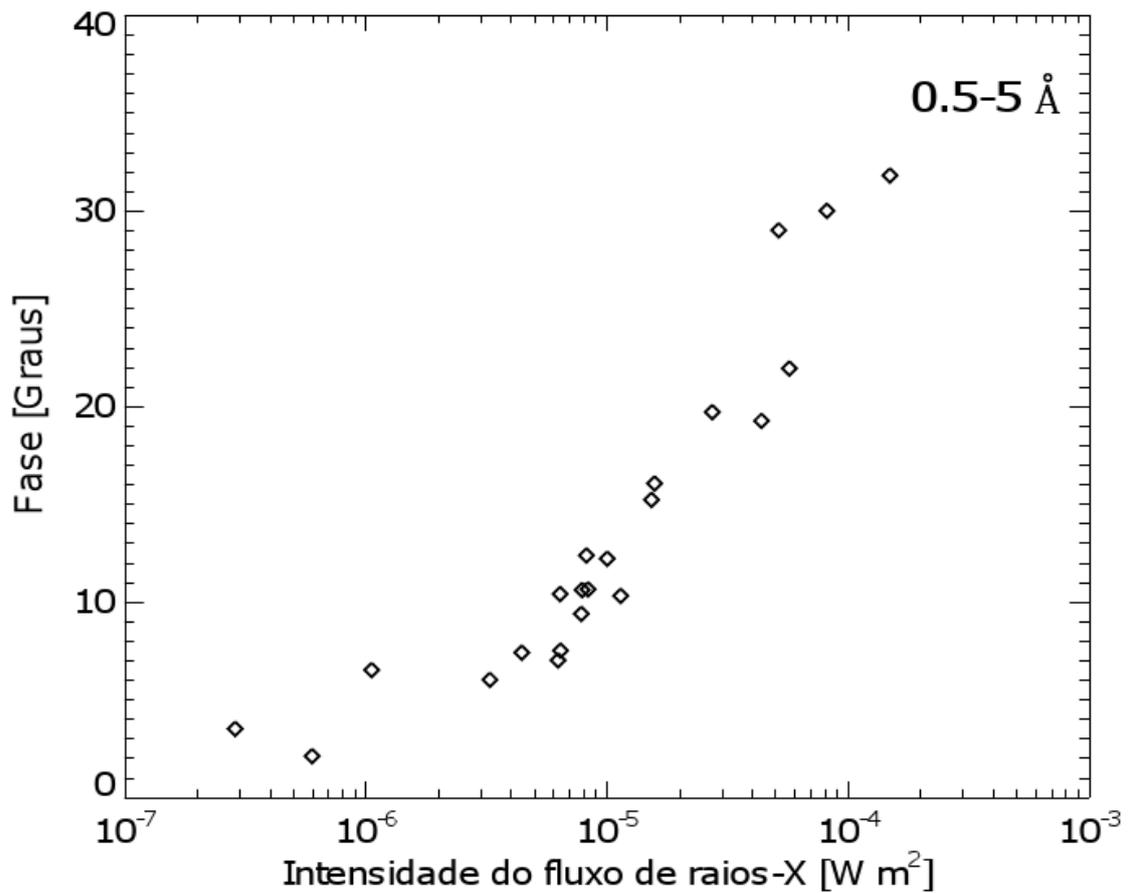


Figura 1.14 - Reconstrução das observações de Ohshio entre 15 de março e 13 de abril de 1966 (1979).

A Figura 1.14 mostra uma baixa dispersão sugerindo que a contribuição da radiação solar para comprimentos de onda maiores que 2 Å durante as explosões solares é menos importante.

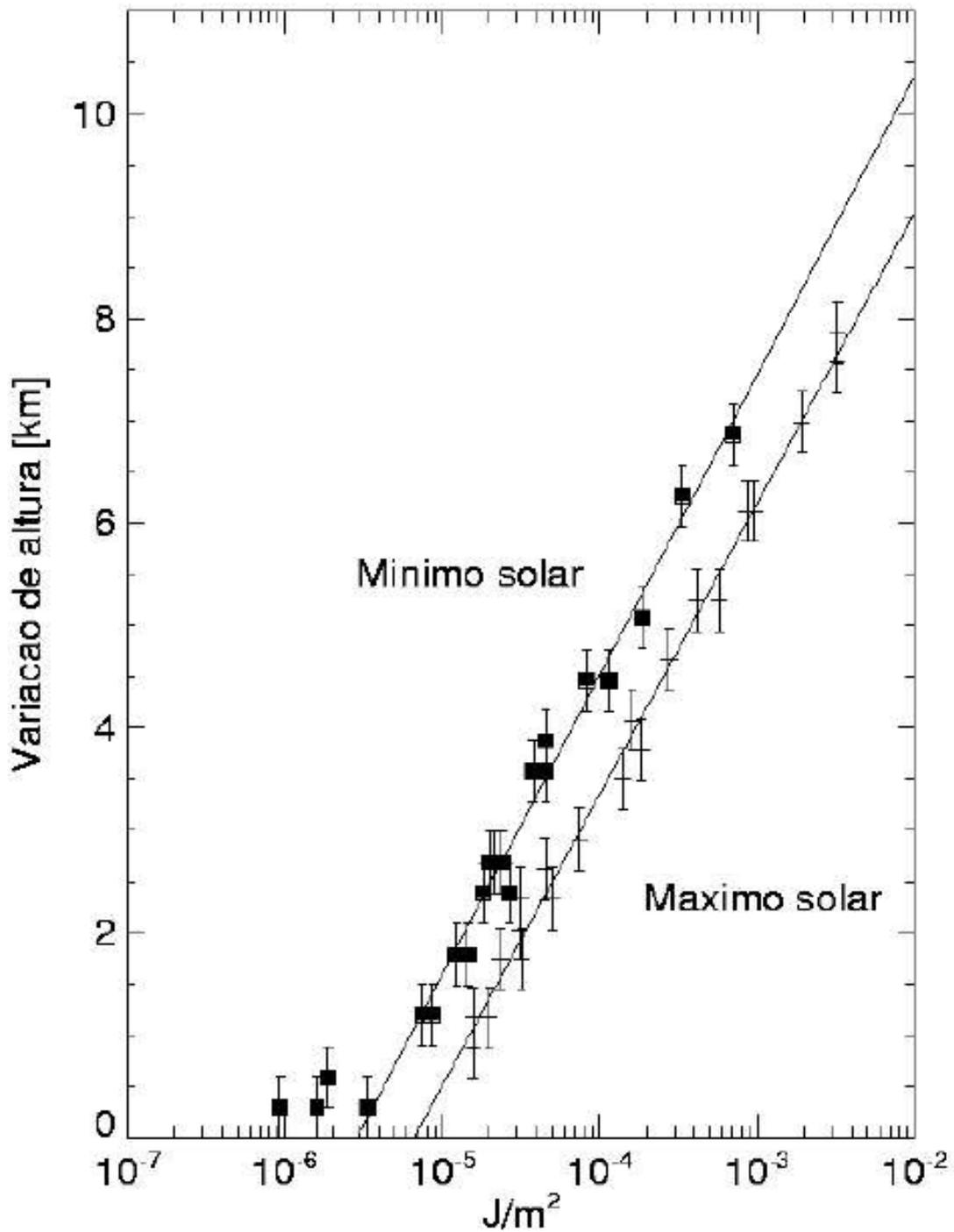


Figura 1.15 - Correlação da fluência ($J m^{-2}$) e a variação da altura de referência h_0 (km).

Fonte: Pacini e Raulin (2006).

Pacini e Raulin (2006) estudaram a relação entre a intensidade do avanço de fase em função da altura de referencia com a fluência do fluxo de raios-X

(integração temporal do fluxo) na faixa de 0,5 e 2 Å. A Figura 1.15 mostra que a sensibilidade da baixa ionosfera para detectar SPAs é maior durante períodos de mínimo de atividade solar, devido a que a altitude da base da ionosfera durante os períodos de mínimo de atividade solar é 1 km mais elevada comparada com os períodos de máximo de atividade solar, confirmando os resultados obtidos por McRae e Thompson (2000) obtidos a partir da variação da altura de referência h' . Pacini e Raulin (2006) reportam que o valor mínimo de fluência para períodos de máximo de atividade solar é de $7 \times 10^6 \text{ J m}^{-2}$ enquanto que para o período de mínimo de atividade solar é de $2,5 \times 10^6 \text{ J m}^{-2}$.

Recentemente, um estudo estatístico de 471 eventos detectados pela rede SAVNET entre maio 2006 e setembro 2009 (RAULIN et al., 2010), mostrou que à mínima potência de fluxo de raios-X necessário para produzir um SPA (P_{xm}) para esse período corresponde a eventos de classe GOES B 2.6. A Tabela 1.3 lista os valores de P_{xm} e do fluxo de Ly- α médio obtidos de vários trabalhos (RAULIN et al., 2010)

Tabela 1.3 - Recopilação de P_{xm} e fluxo médio de Ly- α obtidos de diferentes publicações.

	Fluxo Ly- α médio ($10^{11} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	P_{xm} (10^{-6} W m^{-2})	Referencia
(1)	4,9	4 (C4)	Kaufmann e Paes de Barros (1969)
(2)	4,98	5 (C5)	Kaufmann et al. (2002)
(3)	4,6	2 (C2)	Pant et al. (1983), Pant (1993)
(4)	4,2	1 (C1)	Mc Rae e Thomson (2004), Thomson et al. (2005)
(5)	4,11	0.9 (B9)	Zigman et al. (2007)
(6)	4,9	3.4 (C3.4)	Commarmond (1977)
(7)	3,9	0.6 (B.6)	Pacini, (2006)
(8)	3,55	0.27 (B2.7)	Raulin et al. (2010)

Fonte: Raulin et al. (2010).

A correlação destas observações é mostrada na Figura 1.16 a qual sugere que uma explosão solar é detectável na baixa ionosfera sempre que a intensidade do evento supere a radiação Lyman- α quiescente, resultado coerente com a

idéia de que a baixa ionosfera diurna quiescente é mantida pela radiação solar Lyman- α (RAULIN et al., 2010).

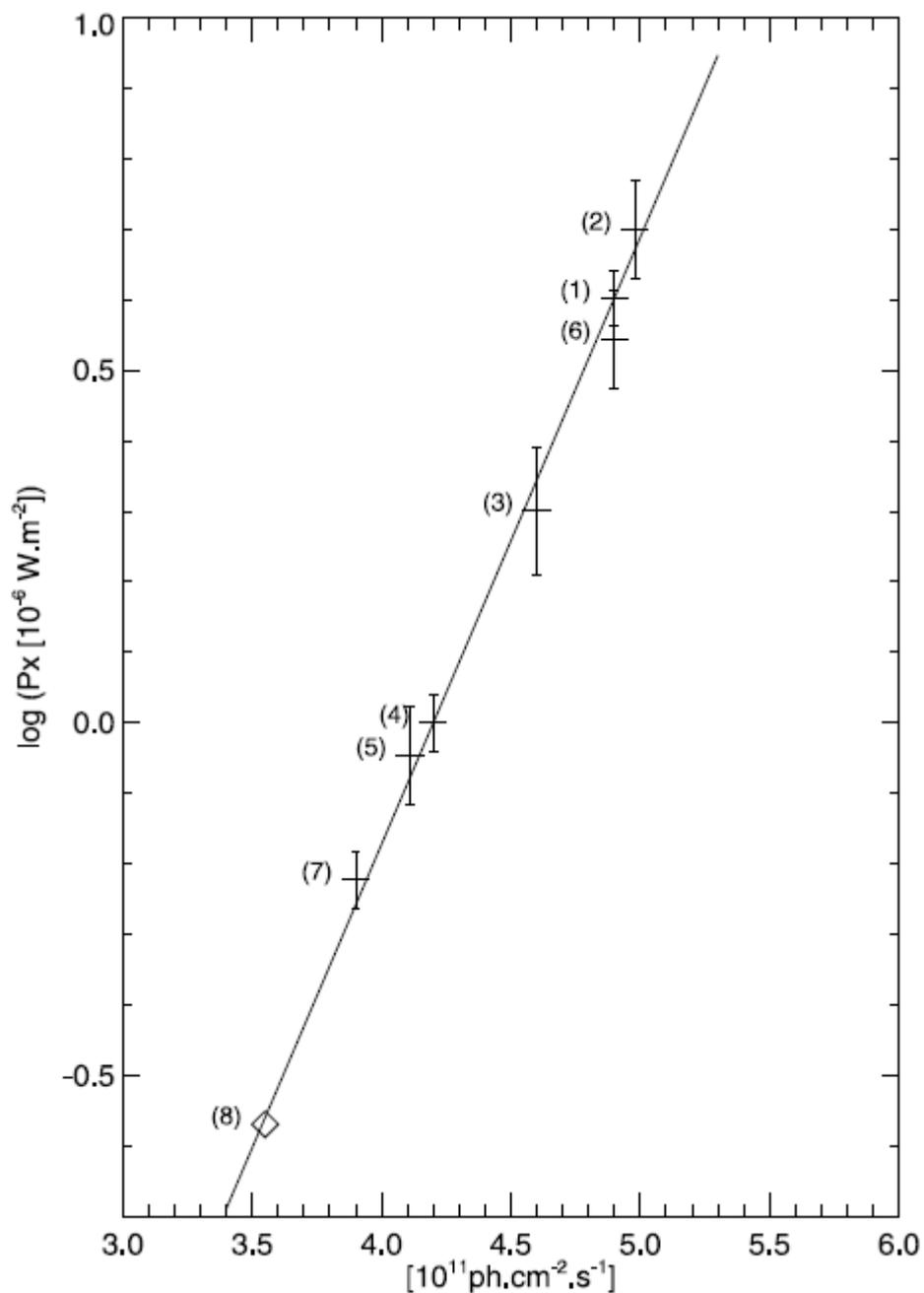


Figura 1.16 - Correlação de $\log(P_{xm})$ como função do fluxo médio de Lyman- α para diferentes períodos de atividade solar.

Fonte: Raulin et al. (2010)

2 INSTRUMENTAÇÃO

Como parte do International Heliophysical Year (IHY) a rede SAVNET (South America VLF NETwork) foi implementada dentro de um projeto internacional liderado pelo Brasil e inclui a colaboração de Argentina, México e Peru. SAVNET está composta por 8 estações receptoras VLF, 3 estações localizadas no Brasil, 3 no Peru, 1 na Argentina e 1 na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), cujas localizações geográficas são ilustradas na Figura 3.1 e cujas coordenadas geográficas são apresentadas na Tabela 2.1.

SAVNET tem como objetivos principais monitorar a ionosfera frente a atividade solar em diferentes escalas temporais, tanto de perturbações solares rápidas (explosões solares), como variações devidas ao ciclo de atividade solar, e estudar a estrutura espacial da Anomalia Magnética do América Sul. Outros objetivos preveem obter diagnósticos na baixa ionosfera de possíveis efeitos eletromagnéticos relacionados com atividade sísmica, e a detecção de fontes celestes de raios-X e raios gama. (RAULIN et al., 2009a, b).

As estações receptoras da rede SAVNET rastreiam basicamente sinais de estações transmissoras de ondas de VLF localizadas em Cuttler-EUA (NAA), Aguada-Porto Rico (NAU), North Dakota-EUA (NDK), Jim Creek-EUA (NLK), Havaí-EUA (NPM) e North West Cape-Austrália (NWC).

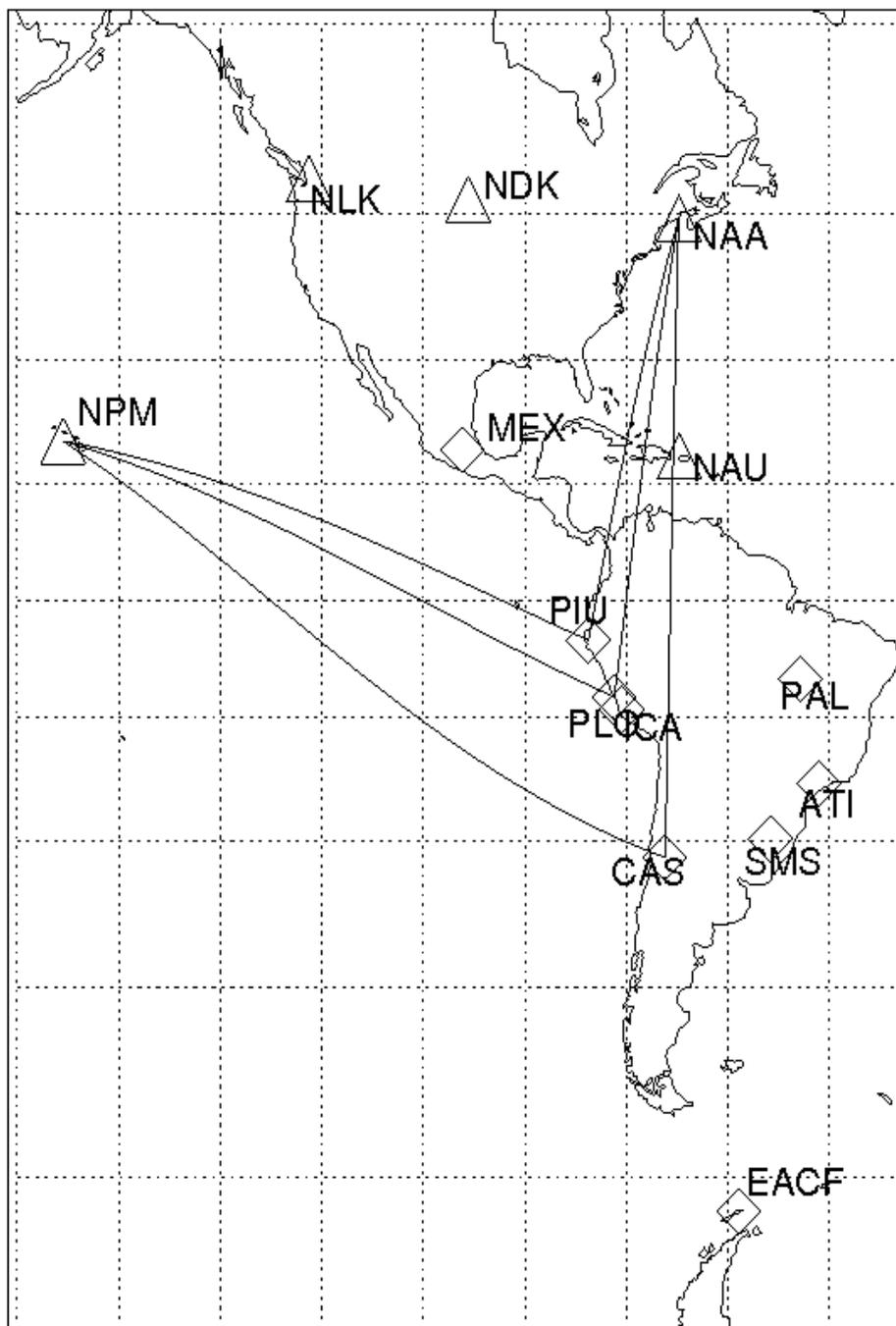


Figura 2.1 - Mapa mostrando a localização das estações receptoras da rede SAVNET (losangos) e algumas estações transmissoras VLF (triângulos).

Tabela 2.1 – Localização geográfica das estações receptoras da rede SAVNET.

Estação receptora (RX)	Coordenadas geográficas
ATI	23° 11' S 46° 33' W
CAS	31° 48' S 69° 18' W
EACF	62° 5' S 58° 23' W
ICA	14° 01' S 75° 44' W
PAL	10° 10' S 49° 20' W
PLO	12° 30' S 76° 47' W
PIU	05° 10' S 80° 38' W
SMS	29° 43' S 53° 43' W

A rede SAVNET começou a operar em abril de 2007 com alguns receptores e a partir de abril de 2009 a rede já estava operando com 8 receptores. Cada um dos receptores da rede conta com três antenas e pré-amplificadores. Uma antena vertical e duas antenas do tipo “loop” apontando para direções aproximadamente ortogonais. Em cada base contamos com um receptor GPS (Global Positioning System), uma placa de áudio utilizada como conversor Analógico/Digital (A/D) e um computador dotado do código SoftPAL (Software Phase and Amplitude Logger), que é utilizado para registrar a fase e amplitude dos sinais de VLF. Na Figura 2.2 mostramos a base instalada no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), Atibaia, onde foi desenvolvida a instrumentação da rede, e realizados os testes pertinentes.



Figura 2.2 – Equipamento da estação receptora de ondas de VLF da rede SAVNET instalado no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), Atibaia.

O sinal proveniente de cada antena é amplificado e digitalizado, utilizando uma placa de áudio. A fase do sinal (ϕ) é comparada com um sinal temporal fornecido pelo cristal da placa de áudio, sendo este estabilizado com o pulso de segundo obtido pelo GPS. Ao final obtém-se uma precisão da ordem de 0,03 – 0,1 microssegundos para as medidas de fase. Com isto, a rede SAVNET pode descrever a evolução temporal da fase tanto em períodos longos como durante as variações diurnas ou durante fenômenos solares transientes, sem deriva de fase significativa.

3 DADOS E METODOLOGIA

3.1. Seleção de dados VLF

Nosso banco de dados foi montado a partir dos SPAs detectados em sinais de VLF das estações receptoras da rede SAVNET de Punta Lobos (PLO), Piura (PIU) e Casleo (CAS) desde maio de 2007. A Tabela 3.1 mostra as coordenadas geográficas e as frequências das estações VLF transmissoras, as estações receptoras pertencentes à rede SAVNET que foram utilizadas neste trabalho e o comprimento de cada trajeto de propagação, expresso em Mm.

Tabela 3.1 – Estações transmissoras e receptoras utilizadas, com suas respectivas coordenadas geográficas e frequências de operação.

	Coordenadas geográficas	Estação Receptora (RX)	Frequência (kHz)	Distância (Mm)
NAA	44° 39' N, 67° 16' W	CAS	24,0	8,54
		PLO		6,46
		PIU		5,72
NPM	21° 25' N, 158° 08' W	CAS	21,4	11,19
		PLO		9,68
		PIU		8,97
NAU	18° 36' N, 67° 11' W	PLO	40,75	3,63

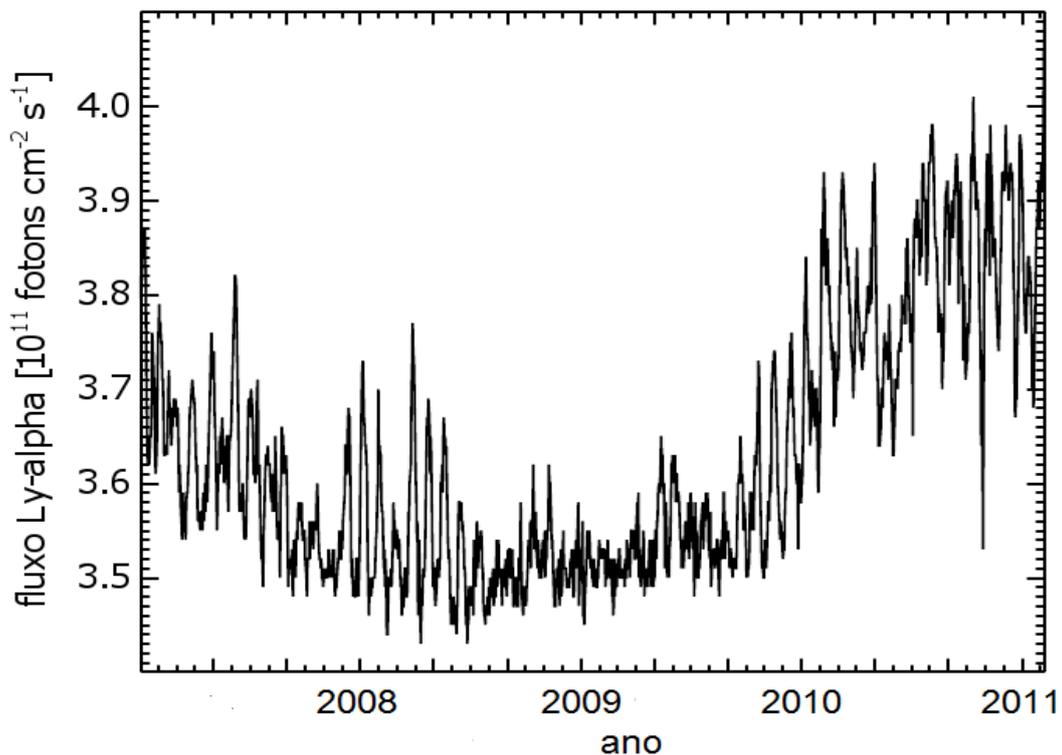


Figura. 3.1 - Variação do fluxo de Lyman- α durante o período de estudo (Fonte: <http://lasp.colorado.edu/lisird/lya/>).

A Figura 3.1 mostra a variação da emissão da linha Lyman- α durante o presente período de estudo, determinada através do modelo SOLAR2000 (TOBISKA et al. 2000). Este modelo permite que series temporais de fluxos solares que não tenham sido observados de forma contínua sejam reconstruídas a partir de suas medidas discretas e de observações de fluxos de outras radiações solares, como o fluxo de fótons com comprimentos de onda de 10,7 nm. Nosso critério de seleção de dados é selecionar SPAs produzidos por eventos solares com perfis temporais simples em raios-X. Segundo esse critério selecionamos 404 eventos registrados pela rede SAVNET entre abril de 2007 e dezembro de 2011.

3.2. Definição de $\Delta\Phi$.

Na Figura 3.2, apresenta um exemplo de SPA onde são definidos o pico do avanço de fase do SPA (ponto **A**), medido a partir da linha de base que define o nível de base (ponto **B**). A intensidade do SPA, $\Delta\Phi$, é definido a partir da equação 3.1

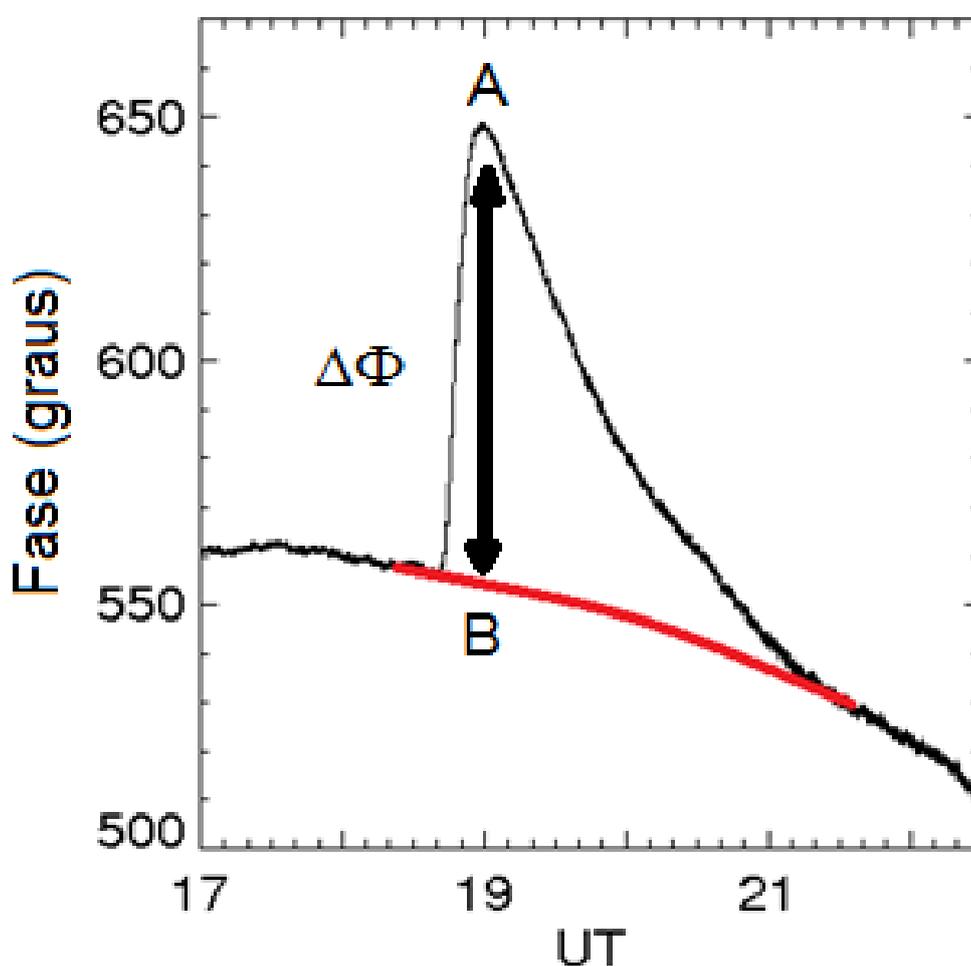


Figura 3.2 - Exemplo de SPA detectado no NAA – PLO entre as 17:00 e 22:00 UT, onde definimos o parâmetro $\Delta\Phi$.

$$\Delta\Phi = \Phi_A - \Phi_B \quad (3.1)$$

Neste trabalho utilizaremos o efeito de fase $\Delta\Phi$, já proposto por diferentes autores (KAUFMANN; PAES DE BARROS, 1969; MURAOKA et al. 1977; PANT, 1993; KAUFMANN et al., 2002) para caracterizar o efeito na baixa ionosfera de raios-X das explosões solares.

3.3. Normalização pela distância do trajeto iluminado e cálculo do ângulo zenital χ_{med}

Pelo fato dos trajetos de propagação utilizados 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 VLF em 100 porções iguais e calcular o valor de χ no centroide de cada parte. Dentre os vários valores de χ calculados para cada trajeto, utilizamos a média desses valores (χ_m) para definir o ângulo zenital de incidência da radiação solar que produziu cada um dos eventos pertencentes ao nosso banco de dados utilizando o tempo de ocorrência desses SPAs.

Para uma análise conjunta de todos os dados recebidos, independente do trajeto percorrido pelas ondas VLF, foi necessário fazer uma normalização dos dados de fase pela distância do trajeto iluminado correspondente, porque o avanço de fase do evento detectado é diretamente proporcional ao comprimento do trajeto percorrido pela onda. Através das sub-divisões utilizadas para calcular χ_m , calculamos o comprimento do trajeto de propagação iluminado considerando os segmentos com valores de ângulos zenitais menores que 96° no instante em que a explosão solar atinge seu máximo.

3.4. Dados solares

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 do Sol, e ainda fornecem informações sobre o fluxo de partículas energéticas e sobre o campo magnético interplanetário. A emissão em raios-X do disco solar é detectada pelos sensores do GOES que operam em duas bandas de comprimentos de onda: 0,5 – 4 Å e 1 – 8 Å, o que corresponde as energias entre 2 e 20 keV. O fluxo em raios-X é medido em unidades de $W m^{-2}$, aqui são utilizados os dados com uma resolução temporal de 1 minuto.

Os detectores do satélite GOES não possuem resolução espacial, portanto o fluxo em raios-X por eles medido contém tanto a emissão quiescente como a explosiva originadas nas regiões ativas presentes no disco solar. A Figura 3.3 mostra o fluxo de uma explosão solar de perfil temporal simples registrada pelo satélite GOES 11 no canal de 0,5 – 4 Å sobrepondo-se a um fluxo pré-evento correspondente a emissão total do disco solar.

Para cada evento analisado foi subtraído o nível pré-evento para se avaliar o efeito da emissão de radiação de raios-X produzido pela explosão solar na baixa ionosfera. Este procedimento é mais importante para os eventos pequenos, devido a que o fluxo explosivo de interesse não supera consideravelmente o fluxo total do Sol.

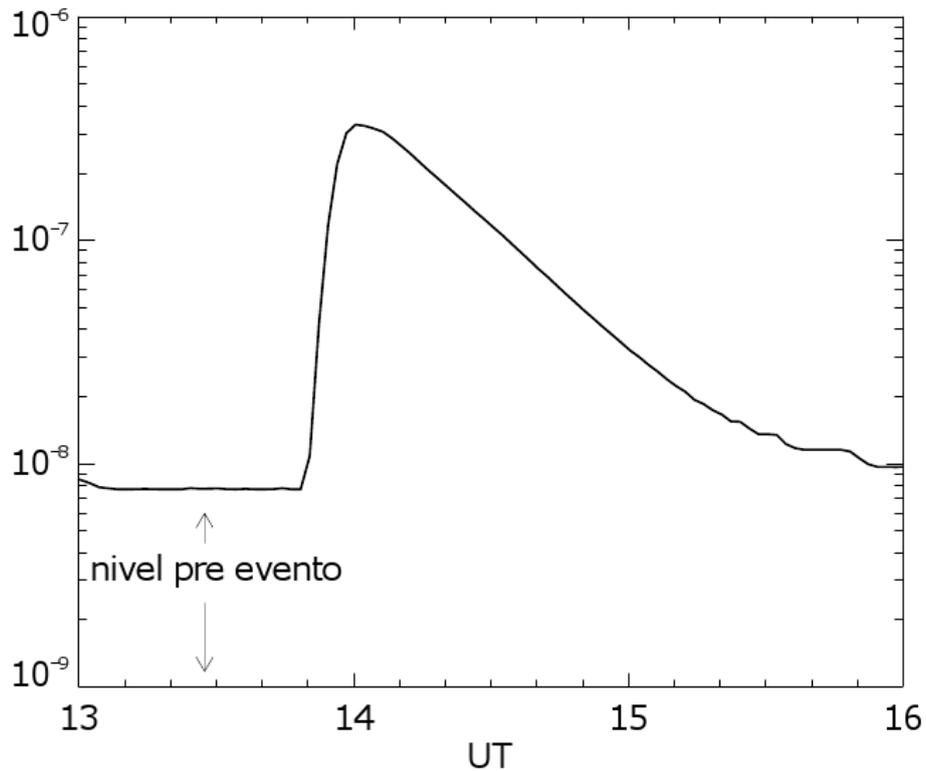


Figura 3.3 - Exemplo do perfil temporal do fluxo de raios-X detectado pelo GOES no canal de energia 0,5 – 4 Å durante uma explosão solar.

3.5. Cálculo dos espectros térmicos das explosões solares

Com o objetivo de selecionar a faixa de energia de interesse responsável por ionizar a baixa ionosfera determinamos o espectro térmico das explosões solares, 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), integrada em todo o volume da região ativa que pode ser expressa como:

$$EM = \int_V N_e^2 dV \quad (3.2)$$

onde dV é um elemento diferencial do volume, V , do plasma emissor, e N_e é sua densidade eletrônica. Assim o fluxo em raios-X emitido num comprimento de onda λ , supondo um plasma isotérmico à temperatura T , pode ser representado através do produto entre EM e uma função de temperatura (THOMAS et al. 1985).

$$F(EM, T, \lambda) = EM \times f(T, \lambda) \quad (3.3)$$

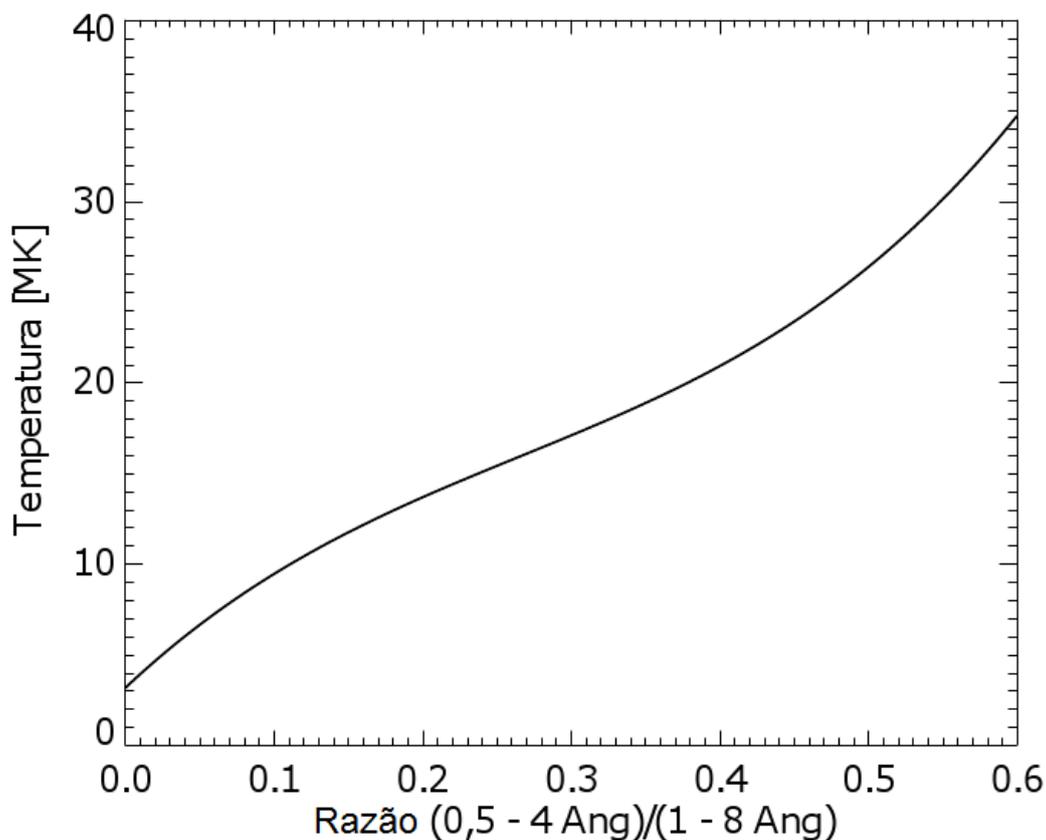


Figura 3.4 - Temperatura do plasma térmico solar em função das razões dos fluxos medidos nos dois canais de energia do satélite GOES.

Thomas et al., (1985) definiram expressões para a temperatura do plasma emissor a partir da razão (R) entre as emissões detectadas nos dois canais de

energia do satélite GOES, assumindo que o plasma tem um espectro térmico. A temperatura do plasma emissor de cada um dos eventos é determinada a partir da curva parametrizada R versus T, que foi deduzida do modelo térmico de Mewe (THOMAS et al., 1985; GARCÍA, 1994), que é expressa pela equação (3.4), e que mostramos sua representação gráfica na Figura 3.4.

$$T(R) = 3,15 + 77,2R - 164R^2 + 205R^3 \quad (3.4)$$

A partir dos fluxos de raios-X e dos valores correspondentes de T, o valor da medida de emissão é definido pela seguinte equação (THOMAS et al., 1985):

$$EM = \frac{10^{55} B_8}{10^{55} b_8(T)} \quad (3.5)$$

$$10^{55} b_8(T) = -3,86 + 1,17T - 1,31 \times 10^{-2} T^2 + 1,78 \times 10^{-4} T^4 \quad (3.6)$$

sendo B_8 o fluxo de raios-X solar total detectado entre 1 – 8 Å e $b_8(T)$ a resposta do detector para comprimentos de onda de 1 - 8 Å. Assim é possível se calcular uma distribuição espectral dos fluxos de raios-X observado, ou seja, um espectro para cada evento que produziu um SPA.

3.6. Cálculo da fluência solar em raios-X moles.

Como mencionamos anteriormente na seção 1.3, os fótons solares com comprimentos de onda menores que 2 Å são os responsáveis pela ionização da base da ionosfera terrestre e que a maioria dos estudos compara a intensidade dos SPAs com o fluxo de raios-X solar em diferentes faixas de

comprimentos de onda. Porém devido às dispersões achadas nas correlações obtidas por diferentes autores, é conveniente procurar outro parâmetro para diagnosticar as condições da baixa ionosfera em condições perturbadas com maior precisão.

Tomando em consideração esses fatos utilizamos um parâmetro utilizado por Pacini e Raulin (2006) chamado de fluência solar, F_x , em J m^{-2} . A fluência, F_x , é calculada a partir da integração do perfil temporal do espectro térmico na banda de 0,5 – 2 Å entre os tempos de início da explosão e de máximo do SPA. A vantagem de utilizar a fluência é que ela nos informa sobre o total de energia injetada na atmosfera terrestre ao longo do evento, além de ser suficientemente sensível para detectar as variações decorrentes de eventos solares fracos.

4 RESULTADOS OBSERVACIONAIS.

4.1. Estudo estatístico da resposta ionosférica em função do mínimo de atividade solar do ciclo solar 23 (2007 - 2010)

Através dos dados obtidos pela rede SAVNET foram estudadas as variações de fase nos sinais VLF produzidas pelas explosões solares no período 2007-2010 para caracterizar a reposta da ionosfera durante o período de baixa atividade do ciclo solar 23. O erro típico de nossas medidas observacionais de 3σ normalizado pela distância, que é representado pelo desvio padrão σ , é de aproximadamente 2,5 graus para cada trajeto utilizado.

Os valores de fluxo mínimo dos eventos em raios-X que produziram significativos $\Delta\Phi$ para o período 2007 – 2010 dos três trajetos de propagação para o canal GOES de 0,5 – 2 Å (XS) e canal GOES de 1 – 8 Å (XL). estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores dos eventos em raios-X dos canais de energia GOES 1 – 8 Å e 0,5 – 2 Å para os trajetos de propagação VLF de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM – PLO correspondente ao período 2007 – 2010.

Trajeto de Propagação.	Número de eventos	Mínimo valor fluxo XL	Mínimo valor fluxo XS
NAU – PLO	88	$5,7 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$3,68 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
NAA – PLO	75	$4,1 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$2,97 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
NPM – PLO	91	$3,0 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$1,76 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$

Utilizando os dados coletados do trajeto de propagação VLF de NPM - PLO, por sua maior sensibilidade de detecção, determinamos a probabilidade de detecção de eventos para o período 2007 - 2010. Utilizamos aqueles eventos com ângulos zenitais médios menores aos 70°.

A Figura 4.1 mostra que eventos com intensidade de $3,0 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$ (classificação GOES B3) tem uma probabilidade de detecção de 39% de produzir um SPA, o qual representa o nosso limite de detectabilidade. Outro

fato à comentar é que eventos com intensidades superiores aos $6,0 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$ têm uma probabilidade do 100% de produzir um SPA no trajeto NPM - PLO.

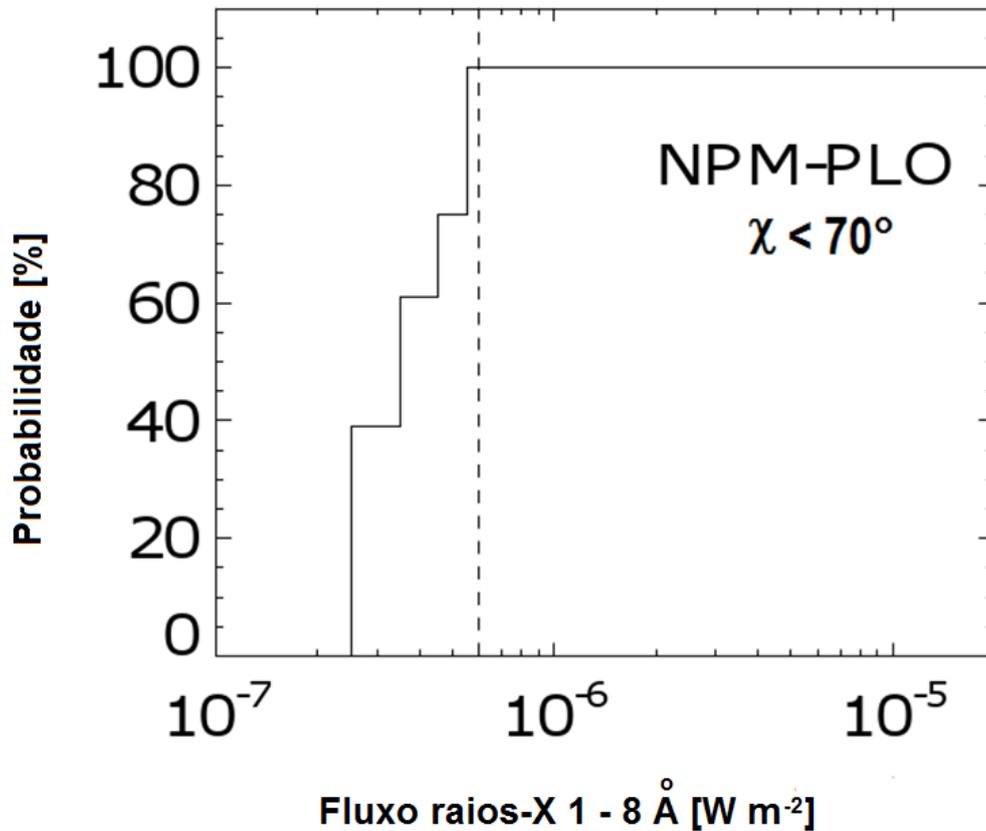


Figura 4.1 - Probabilidade de detecção de eventos solares para o trajeto NPM - PLO para o período 2007 – 2010.

A Figura 4.2 mostra a correlação dos avanços de fase normalizados pelo trajeto iluminado e pelo ângulo zenital médio para os trajetos de propagação de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM – PLO para o período 2007-2010 com relação ao logaritmo do excesso do fluxo de raios-X para o canal XS e canal XL. Segundo este critério foram selecionados os eventos em raios-X que produziram $\Delta\Phi > 3\sigma$.

Ao comparar os valores mínimos de fluxo necessário para produzir uma resposta ionosférica, da Tabela 4.1 observamos que o trajeto NAU – PLO é o menos sensível para ambos os canais GOES. Isto é importante porque um dos

fatores que afeta a sensibilidade de detecção de explosões solares de um trajeto de propagação é o comprimento do trajeto iluminado. Observamos também que o número de eventos registrados no trajeto NAA – PLO é comparativamente menor do que nos outros trajetos de propagação devido a que alguns destes eventos aconteceram durante os dias de manutenção da estação transmissora NAA, por isso que não puderam ser registradas neste trajeto.

A Figura 4.2 mostra que em todos os trajetos de propagação há dois regimes de comportamento bem diferenciados, que destacamos com uma linha vermelha na Figura 4.2. Para ambos os canais de raios-X identificamos que eventos solares com excessos de raios-X superiores à 10^{-6} Wm^{-2} para o canal XL, e 10^{-7} Wm^{-2} para o canal XS apresentam uma correlação linear bem definida com os avanços de fase, enquanto que para os valores de excesso de raios-X inferiores à esses valores para ambos os canais GOES observamos uma relação linear, mas com uma pendente menos inclinada, sugerindo um comportamento exponencial.

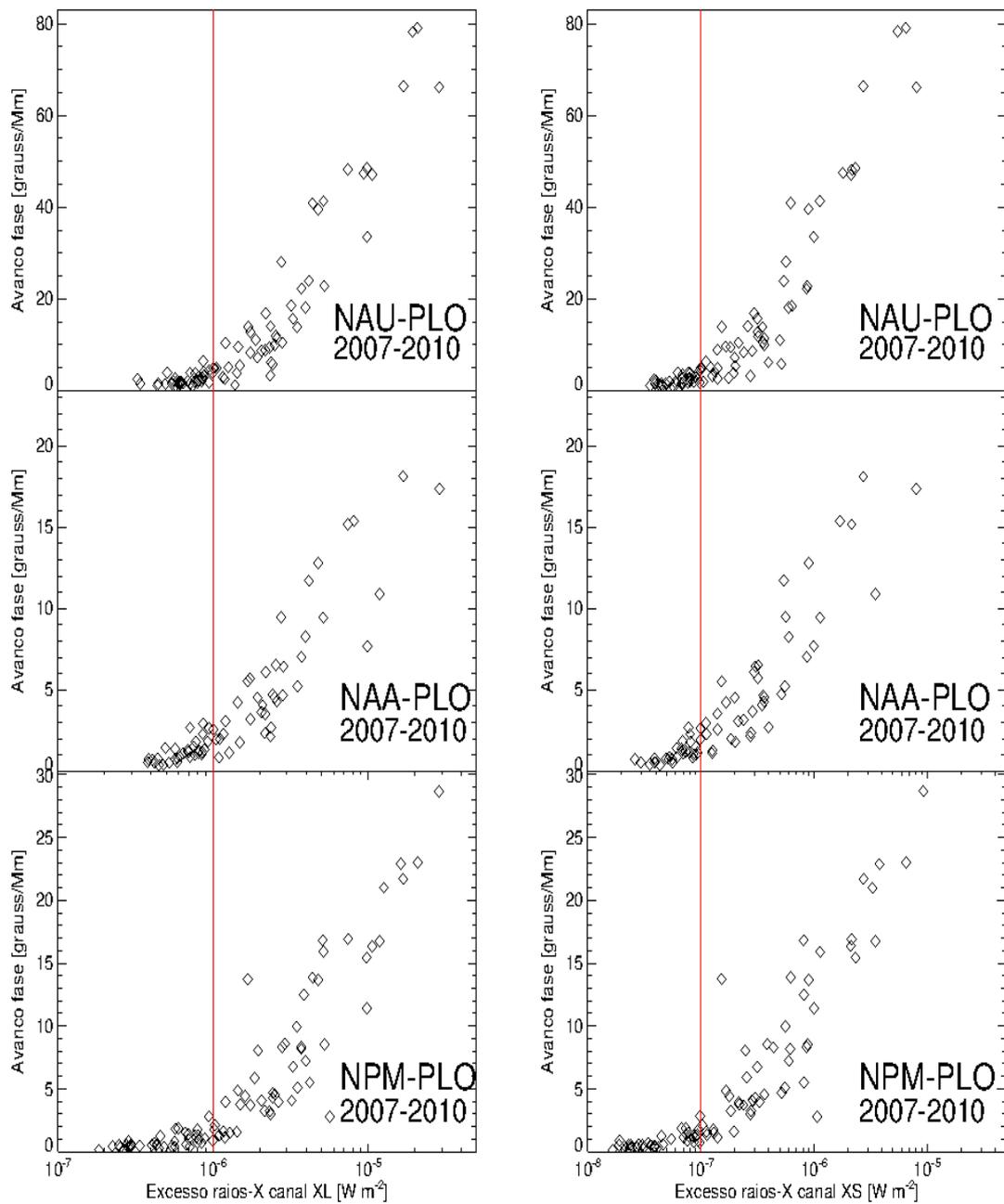


Figura 4.2 - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e o excesso do fluxo de raios-X para cada canal de energia GOES: XL (a) e XS (b) para o período 2007 – 2010.

Outro fato significativo da Figura 4.2 são os elevados valores normalizados de intensidade dos SPAs registrados em NAU – PLO, considerando que trata-se no trajeto de propagação VLF mais curto. Para eliminar o efeito da frequência entre as estações transmissoras utilizadas consideramos o avanço de fase em microssegundos em vez de graus utilizando a seguinte equação.

$$\Delta\Phi_{VLF} = \Delta t_{VLF} \times 3600 \times f_{VLF} \times 10^{-6} \quad (4.1)$$

onde $\Delta\Phi_{VLF}$ representa a diferença de fase observada em uma estação receptora de VLF, f_{VLF} a frequência da estação transmissora de VLF e Δt_{VLF} é o avanço de fase medido em microssegundos produzido pela explosão solar observada na estação transmissora de VLF.

Na Figura 4.3 apresentamos o avanço de fase em microssegundos para cada um dos trajetos analisados. A figura mostra que os valores de avanço de fase do trajeto de propagação de NAU – PLO ainda continuam sendo comparativamente maiores aos observados pelo trajeto de propagação de VLF NAA – PLO.

A seguir comparamos a correlação entre a fluência dos eventos em raios-X na faixa de 0,5 – 2 Å e os avanços de fase normalizados pelo trajeto iluminado para os três trajetos de propagação analisados para os períodos 2007-2010, como mostrado na Figura 4.4. A correlação entre os avanços de fase normalizados com o logaritmo da fluência mostra o mesmo comportamento observado com a correlação do excesso de raios-X. Neste caso temos diferentes tendências em relação as fluências. Para fluências maiores que 10^{-6} Jm⁻² a resposta ionosférica é linear, enquanto que valores inferiores mantém uma variação linear mais uniforme comparada com o regime previamente discutido.

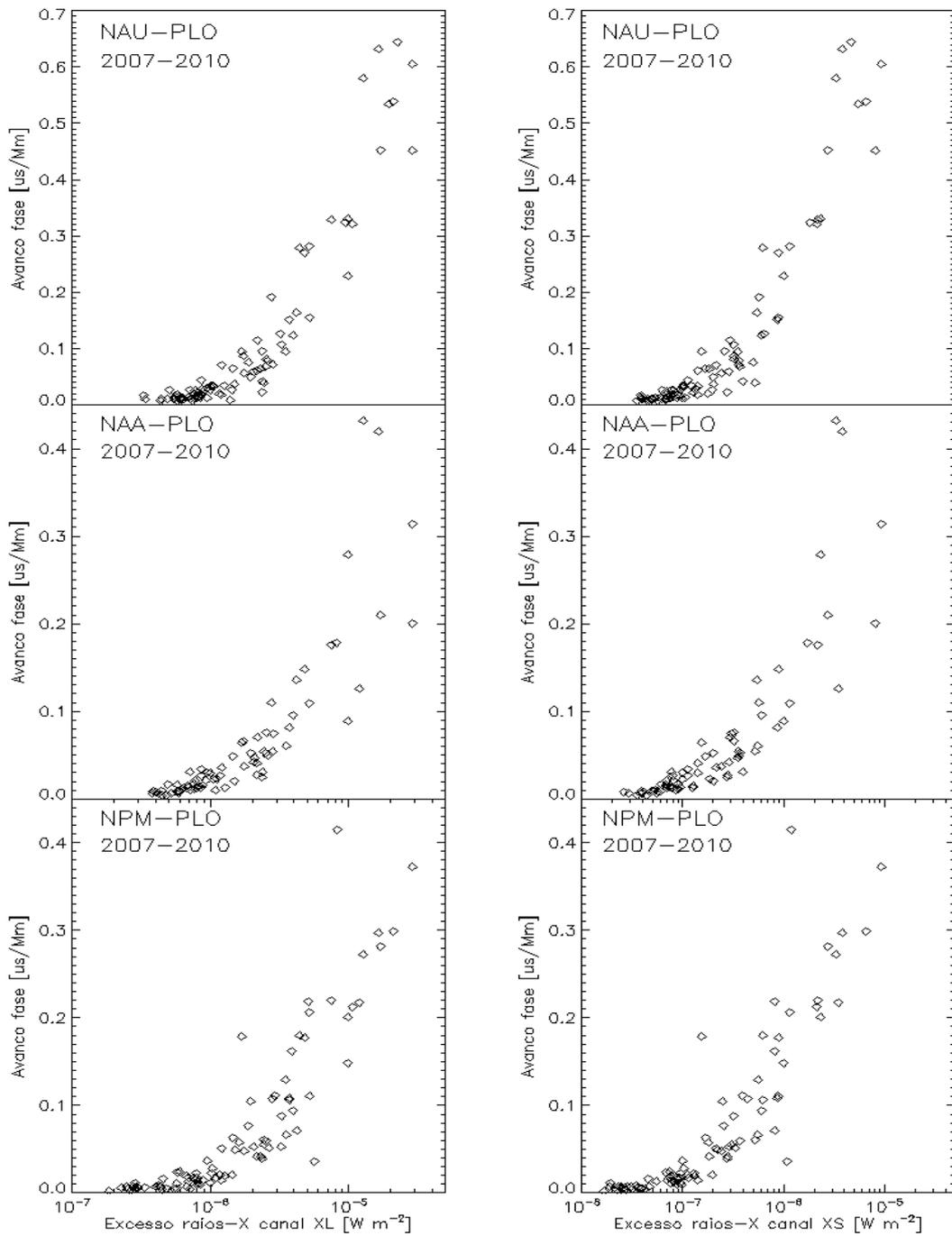


Figura 4.3 - Idem da Figura 4.2, com avanço de fase medido em microssegundos.

Contemplando os resultados das três últimas figuras em conjunto podemos asseverar que a baixa ionosfera exibe um comportamento de variação da intensidade do SPA com a intensidade do evento em raios-X do tipo

exponencial, quando consideramos os efeitos de eventos fracos de classe GOES abaixo de C1.0.

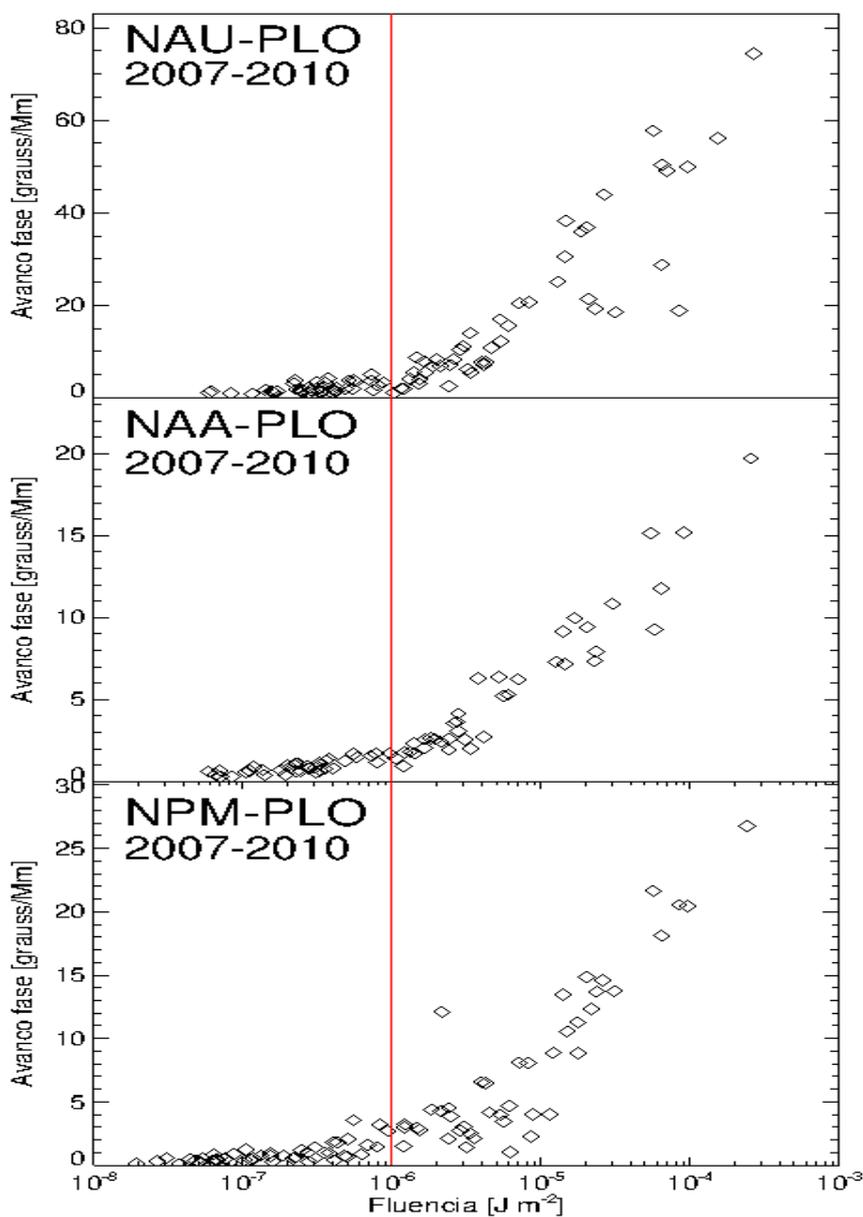


Figura 4.4. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e a fluência calculada entre 0,5 e 2 Å para o período 2007 – 2010.

4.2. Estudo estatístico da resposta ionosférica em função da atividade do ciclo solar 24 (2011)

O período 2011 caracterizou-se pelo aumento da atividade solar, elevando significativamente o número de eventos registrados pela rede SAVNET. O número de eventos significativos que produziram SPAs em cada um dos trajetos de propagação VLF, assim como a intensidade mínima detectável para cada um dos canais GOES em raios-X está na Tabela 4.3.

Para este período em particular verificamos que há uma diminuição na sensibilidade da baixa ionosfera em detectar transientes solares no canal XL. Isto deve-se à que o incremento da atividade solar vem acompanhado com um aumento da radiação de Lyman- α , o que produz um abaixamento da base da ionosfera (MCRAE; THOMPSON, 2000; PACINI; RAULIN, 2006, RAULIN et al. 2010).

Tabela 4.2 - Valores mínimos de fluxo de raios-X dos canais GOES XL e XS para os trajetos de propagação VLF de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM – PLO correspondente ao período 2011.

Trajeto de Propagação.	Número de eventos	Mínimo valor fluxo raios-X (canal XL)	Mínimo valor fluxo raios-X (canal XS)
NAU – PLO	179	$6,1 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$1,84 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
NAA – PLO	243	$4,7 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$2,04 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
NPM – PLO	313	$4,2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$	$1,10 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$

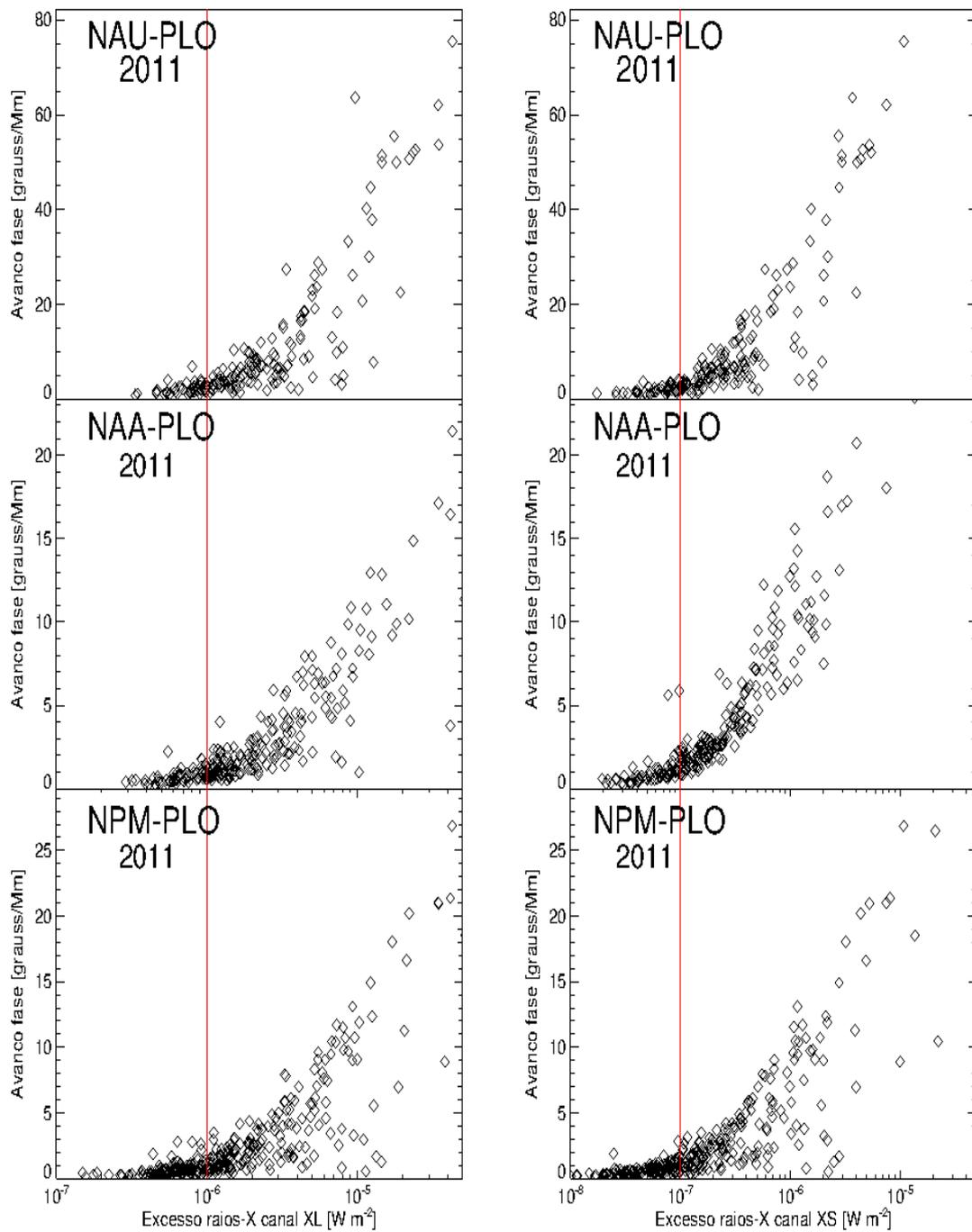


Figura 4.5. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU – PLO, NAA – PLO e NPM e o fluxo raios-X na faixa de 0,5 a 2 Å para os eventos solares ocorridos em 2011.

Na Figura 4.5 mostramos a correlação dos avanços de fase normalizada pelo trajeto iluminado com o logaritmo do fluxo de pico dos eventos em raios-X para o período 2011. A figura mostra que há uma maior dispersão para eventos solares intensos, especialmente no trajeto de propagação NPM – PLO, comparada como o período de baixa atividade solar. Isto se deve ao aumento no número de eventos detectados em condições onde elevados valores de ângulo zenital permitem apenas detectar eventos solares acima da classe M. Para o caso particular do trajeto NPM – PLO incluímos dentro de nossa base de dados observações que aconteceram entre as 00 UT e as 02 UT, período que este trajeto de propagação ainda está iluminado devido que possui uma maior componente leste-oeste.

A pesar da diminuição na sensibilidade de detecção de eventos solares a tendência observada na correlação entre os avanços de fase e o logaritmo dos excessos de fluxo de raios-X é linear para eventos maiores que 10^{-6} Wm^{-2} para o canal XL e 10^{-7} Wm^{-2} para o canal XS, e incluindo os eventos mais fracos temos a tendência exponencial (Figura 4.5).

Identificamos também que os valores de avanço de fase para o trajeto NAU – PLO continuam sendo maiores aos esperados, considerando que é o menor dos trajetos de propagação VLF utilizados. Na Figura 4.6 apresentamos a correspondente correlação de nossas observações normalizada tanto pela distancia do trajeto iluminado considerando os avanços de fase em microssegundos para cada um dos trajetos durante o período 2011.

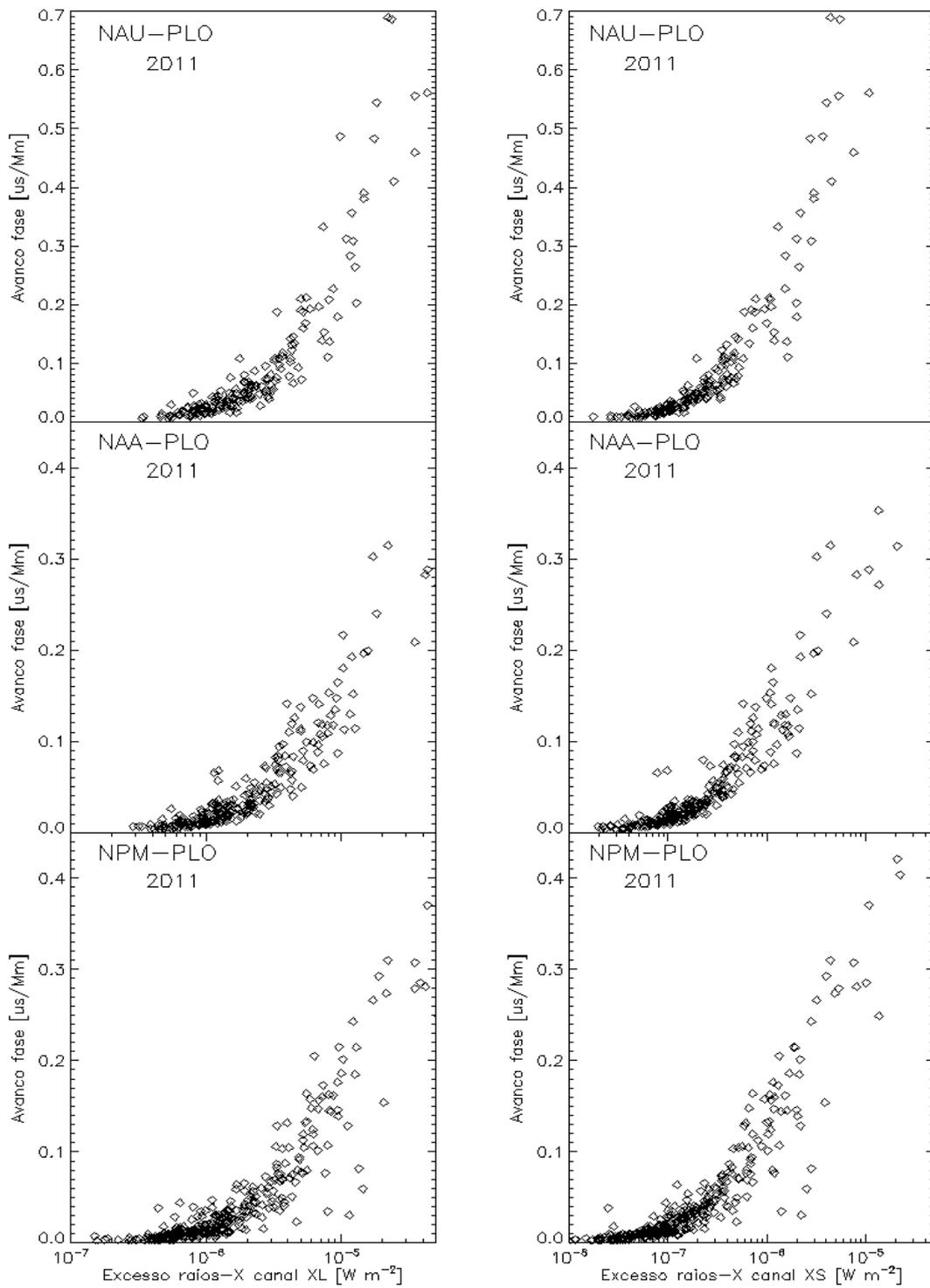


Figura 4.6 - Idem da Figura 4.5, com avanço de fase medido em microssegundos.

A seguir comparamos a correlação entre a fluência dos eventos em raios-X na faixa de 0,5 – 2 Å e os avanços de fase normalizados para os três trajetos de propagação para o período 2011 (Figura 4.7). A correlação mostra também a tendência exponencial ao se considerar os eventos solares fracos.

Finalmente podemos mencionar que apesar de ter uma diminuição da sensibilidade de detecção de eventos solares durante este período de atividade, conseguimos identificar os dois regimes bem diferenciados para eventos fracos e fortes tanto nas correlações entre o logaritmo do excesso de fluxo de raios-X, assim como a fluência solar para 0,5 – 2 Å.

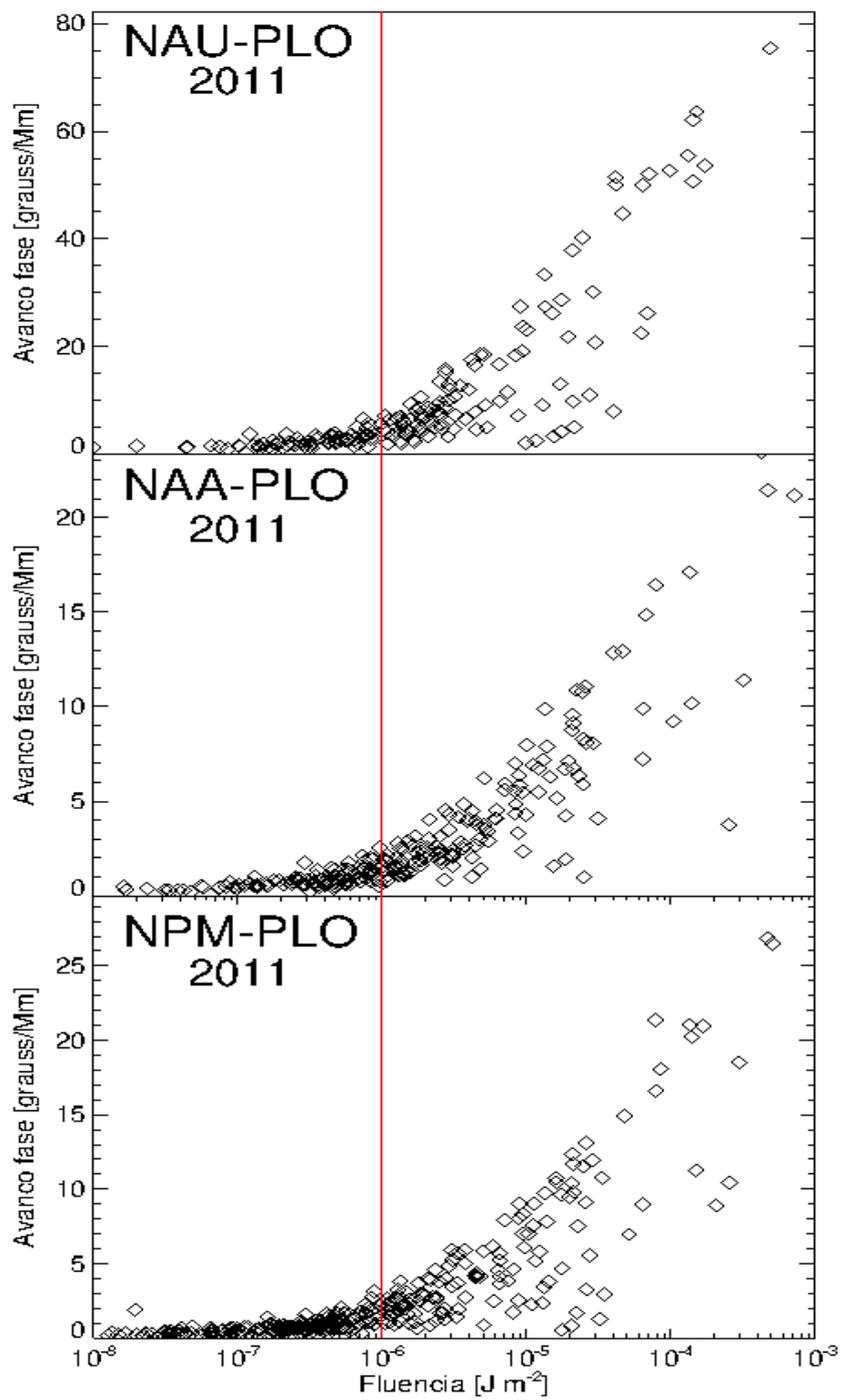


Figura 4.7. - Correlação entre o avanço de fase normalizado pelo trajeto iluminado de NAU-PLO, NAA-PLO e NPM-PLO e a fluência calculada entre 0,5 e 2 Å para o período 2011.

4.3. Condições de propagação do trajeto VLF de NAU – PLO

Como mencionamos na seção 4.1, o trajeto de propagação de VLF NAU – PLO mostra um excesso nos avanços de fase maior do que o esperado quando comparado com outros trajetos de propagação utilizados neste estudo. Outra característica observada nesse trajeto de propagação, e que discutiremos nesta seção, são aumentos e quedas da amplitude do sinal VLF durante a ocorrência de explosões solares. Na bibliografia consultada até ao momento não achamos nenhuma referência para esta particularidade e que foi observada nos sinais provenientes da estação transmissora de NAU.

A Figura 4.8a e 4.8b mostra o fluxo de raios-X e o perfil de avanço de fase do trajeto de propagação VLF NAU – PLO para o dia 19 de janeiro de 2010, identificando os SPAs produzidos para cada um dos eventos solares ocorridos entre as 1300 UT e 2400 UT. A Figura 4.8c compara o perfil de amplitude calmo correspondente ao dia 15 de janeiro de 2010 com o perfil de amplitude do dia perturbado, onde identificamos claramente quedas de amplitude produzidas durante as explosões solares, cuja diferenciação entre os dois perfis esta na Figura 4.8d.

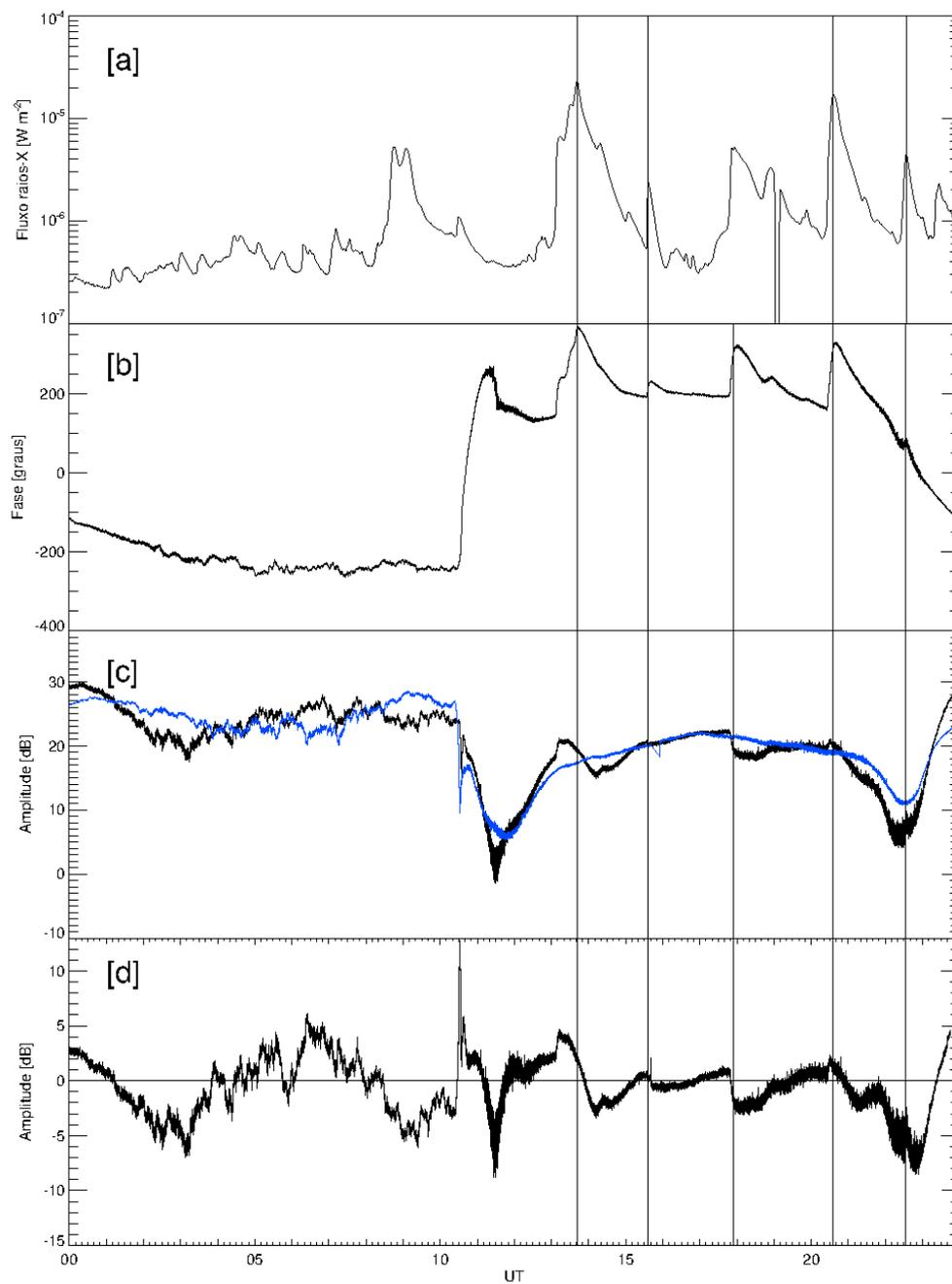


Figura 4.8 - (a) Fluxo de raios-X na faixa de 1 – 8 Å do dia 19 de janeiro de 2010; (b) perfil de avanço de fase para o trajeto de propagação VLF NAU – PLO para esse dia; (c) comparação do perfil de amplitude do dia calmo (linha azul) e do dia perturbado (linha preta) e; (d) perfil da diferença de amplitude.

Para evidenciar melhor estas quedas de amplitude e o excesso de avanço de fase registrado no trajeto de propagação NAU – PLO comparamos os perfis de fase e amplitude deste trajeto com os de NAA – PLO, para o dia 19 de janeiro de 2010 entre as 1530 UT e 2300 UT, o resultado é mostrado na Figura 4.9. Para o trajeto VLF de NAU – PLO observamos que para o evento classe GOES M2.1 que surge a partir das 1730 UT a amplitude responde inicialmente com um leve incremento de 1 dB antes do máximo da variação de fase, caindo em seguida e ficando cerca de 4 dB abaixo do nível não perturbado durante o período de recuperação do SPA. Em contraste o comportamento da amplitude para o trajeto VLF de NAA – PLO mostra que a variação da amplitude está sempre acima do dia calmo, acompanhando a evolução temporal do SPA.

Os elevados valores de fase assim como as quedas de amplitude observados no trajeto NAU - PLO seriam uma consequência da frequência da transmissora (40.75 kHz), que está dentro do domínio das ondas de baixa frequência (LF, 30 - 300 kHz). O sinal da estação transmissora da estação de NAU se reflete a altitudes correspondentes com a base da região E, em vez da região D, o que produz um maior abaixamento nas sinais de fase do trajeto NAU - PLO quando acontece uma explosão solar. As mudanças de amplitude observadas poderiam ser uma consequência da menor concentração eletrônica na região de reflexão do trajeto NAU - PLO, a menor condutividade e absorção das ondas de VLF.

Vale mencionar que devido a semelhança do perfil perturbado da fase e da amplitude durante as explosões solares, como registradas em distintos trajetos de propagação VLF com as estações transmissoras de NAA e NPM tem permitido que em determinadas publicações (Mc RAE; THOMSON (2004), THOMSON et al., 2005; ZIGMAN et al., 2007) se utilizem os avanços da amplitude, em vez dos SPAs, para efetuar correlações com o pico do fluxo de raios-X e simulações a partir do programa LWPC quando se calculam os parâmetros de Wait: a altura de referência, h_o , e o gradiente de condutividade,

β . Isso é devido a que os perfis de amplitude são mais simples de simular do que os perfis da fase. O particular comportamento do perfil da amplitude do trajeto VLF de NAU – PLO limitariam o uso dessa metodologia para estudar os efeitos das explosões solares na baixa ionosfera.

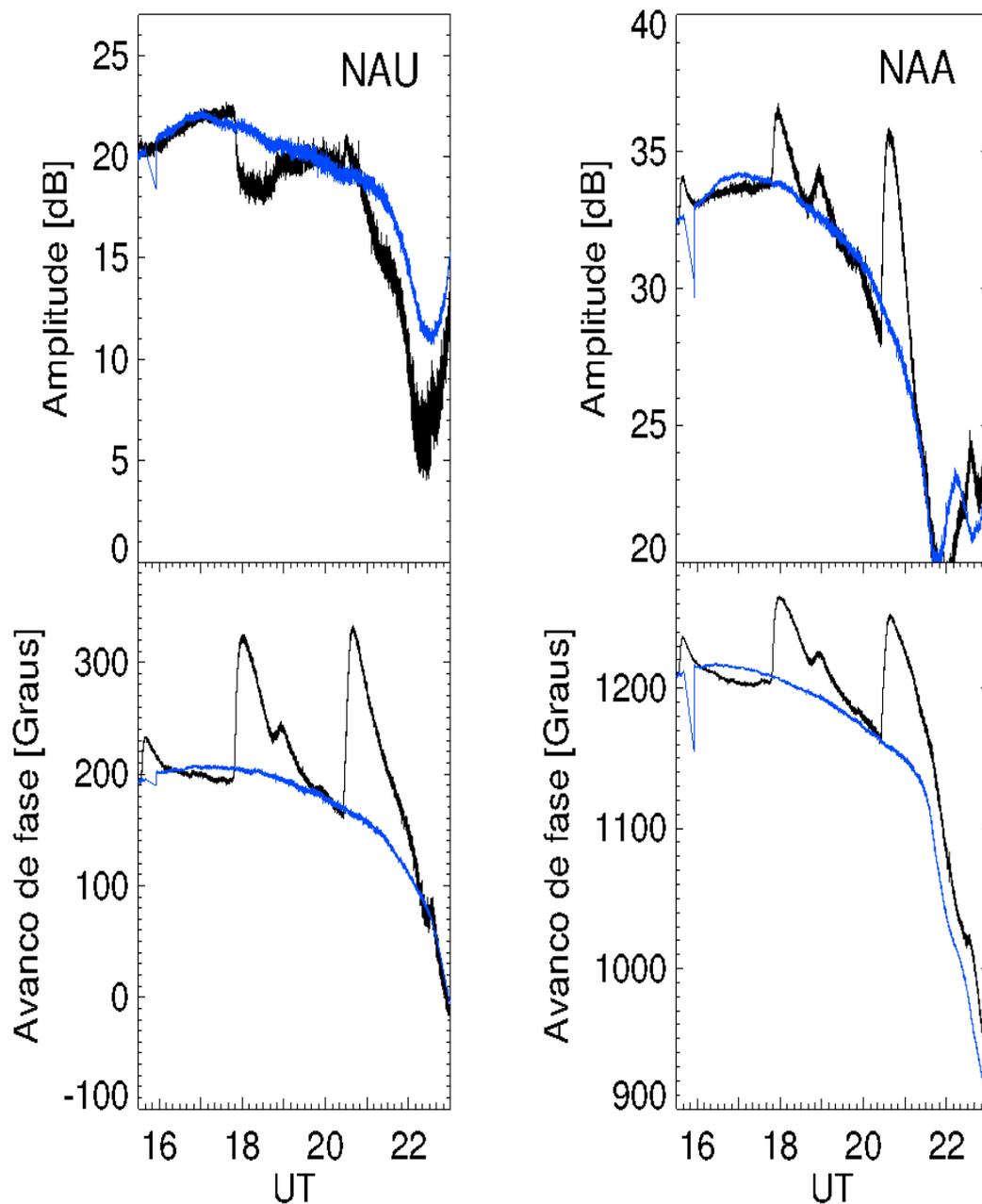


Figura 4.9 - Perfis de amplitude e fase observados não perturbado (linha azul) e perturbados (linha preta) dos trajetos de NAU – PLO (lado esquerdo) e NAA – PLO (lado direito).

4.4. Mudanças do tempo de relaxamento ao longo do ciclo solar

O tempo de relaxamento, Δt_{rel} (Mitra, 1974), é o tempo requerido pelos processos de recombinação e ionização da região D para recuperar o equilíbrio devido ao incremento do fluxo de raios-X durante uma explosão solar (ZIGMAN et al. 2007). Uma dedução matemática deste parâmetro é mostrada no trabalho de Zigman et al. 2007, que é definido como:

$$\Delta t_{rel} = \frac{1}{2\alpha_{eff} N_e(I_{max})} \quad (4.2)$$

Onde α_{eff} é o coeficiente de recombinação efetiva e $N_e(I_{max})$ a concentração eletrônica no instante em que o fluxo de raios-X atinge seu máximo. A Figura 4.10 mostra os perfis de avanço de fase para o trajeto VLF de NPM – PLO (linha azul) e do fluxo de raios-X (linha preta).

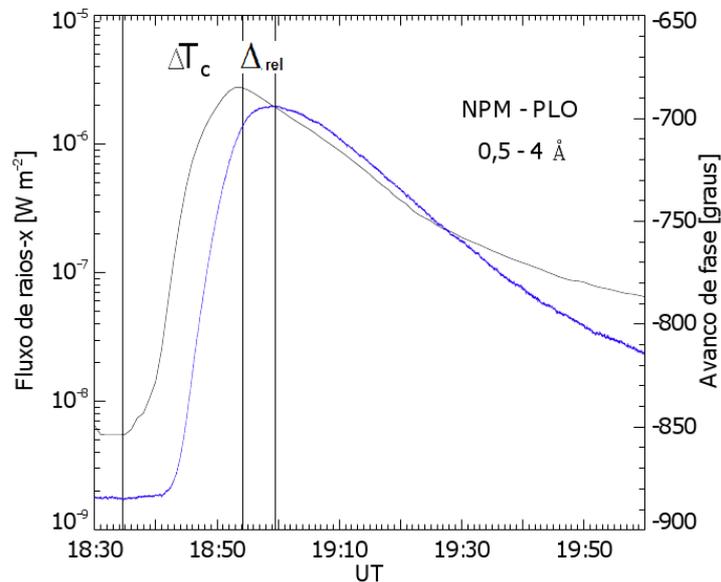


Figura 4.10 - Definição observacionalmente do tempo de relaxamento, Δt_{rel} , e do tempo de crescimento, ΔT_c .

A partir dos gráfico foram definidos tanto Δt_{rel} como o atraso temporal entre picos do fluxo de raios-X e do máximo do SPA, e ΔT_c , como o tempo entre o início e o máximo da explosão solar em raios-X para cada evento selecionado.

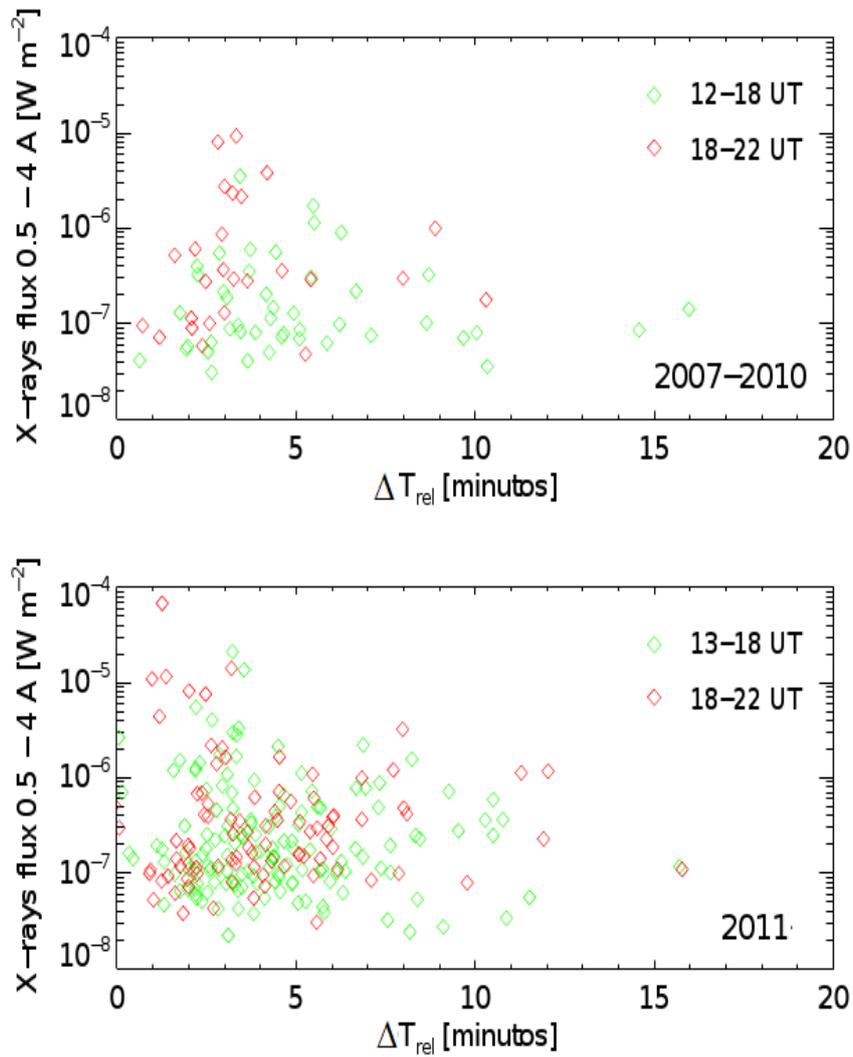


Figura 4.11 - Correlação entre o tempo de relaxamento, Δt_{rel} , e o logaritmo do pico do fluxo de raios-X para o canal GOES 0,5 – 4 Å para condições do amanhecer e do entardecer para períodos de mínimo (2007 - 2010) e subida de máximo (2011).

Utilizamos nossas observações do trajeto de propagação NAA – PLO para determinar se as mudanças do ciclo de atividade solar, assim como as condições de iluminação podem exercer algum tipo de influencia no Δt_{rel} . Na Figura 4.11 mostramos a correlação entre o tempo de relaxamento e o pico do fluxo de raios-X para os anos 2007 – 2010 (que corresponde ao mínimo do ciclo solar 23) e 2011 (começo do ciclo solar 24) para o trajeto de propagação NAA – PLO. Em ambas as figuras identificaram-se observações efetuadas em condições matinais locais, que acontecem entre as 12-15 UT (diamantes verdes) e as condições ao entardecer que correspondem entre as 18-22 UT (diamantes vermelhos).

Ambas as correlações não mostram mudanças do tempo de relaxamento devido às condições de iluminação, assim como da atividade solar. Apreciamos também que, independentemente da intensidade do excesso de raios-X, a maior parte dos eventos possuem tempos de relaxamento entre os 2 e 8 minutos.

De forma similar efetuamos uma correlação entre a fluência solar entre 0,5 – 2,0 Å e o tempo de relaxamento, correspondente aos períodos de mínimo de atividade do ciclo solar 23 e do começo do máximo de atividade do ciclo solar 24 (Figura 4.12). O resultado da correlação é similar ao obtido na Figura 4.11, onde observamos que a maior parte dos eventos agrupa-se em torno da faixa temporal de 2 – 8 minutos para ambos períodos de atividade solar, além de que tanto a intensidade do evento solar assim como o instante em que acontece não são parâmetros que modifiquem esse comportamento.

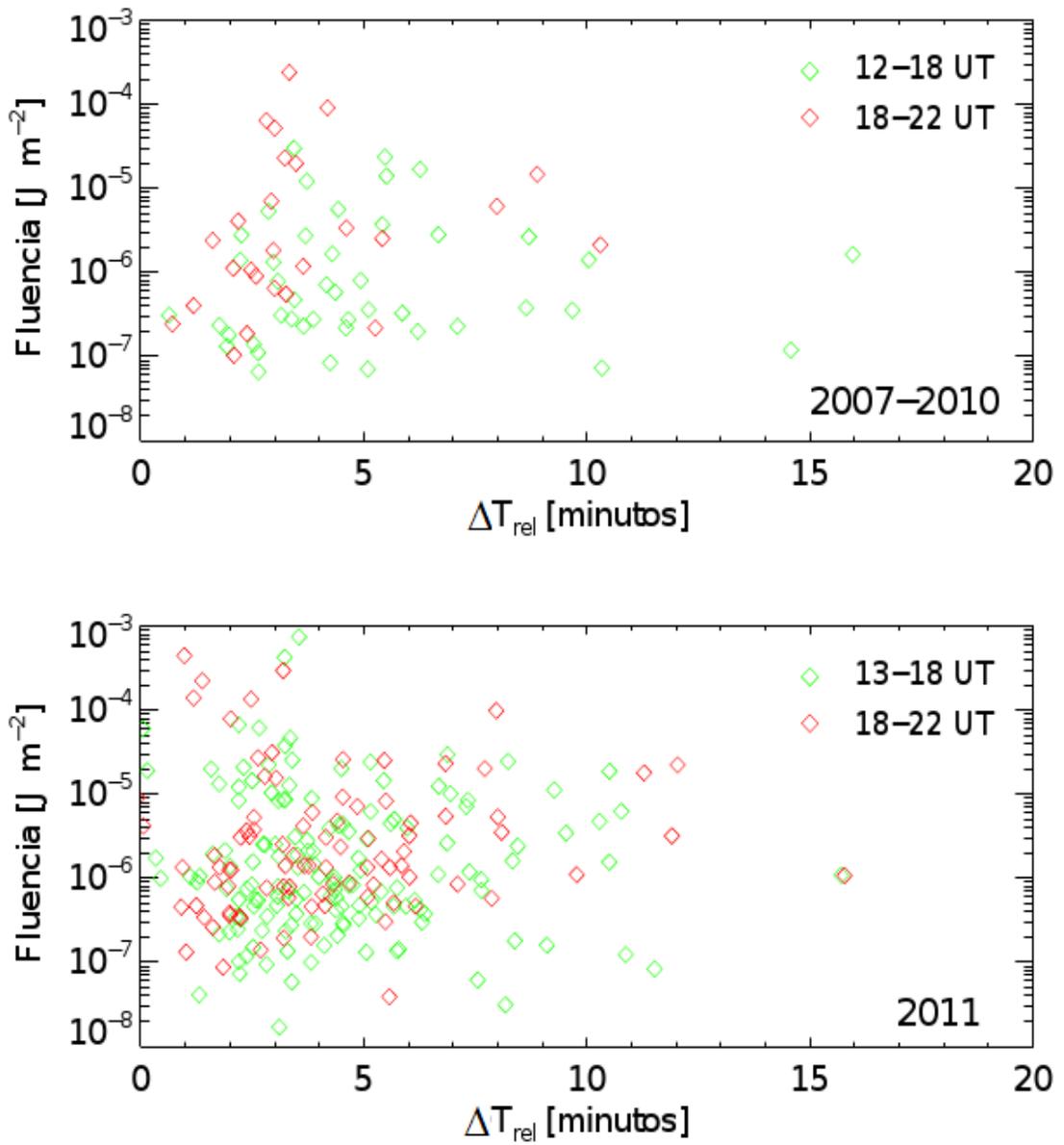


Figura 4.12 - Correlação entre a fluência solar entre 0,5 – 2 Å e o tempo de relaxamento, Δt_{rel} , para condições matinais e no entardecer.

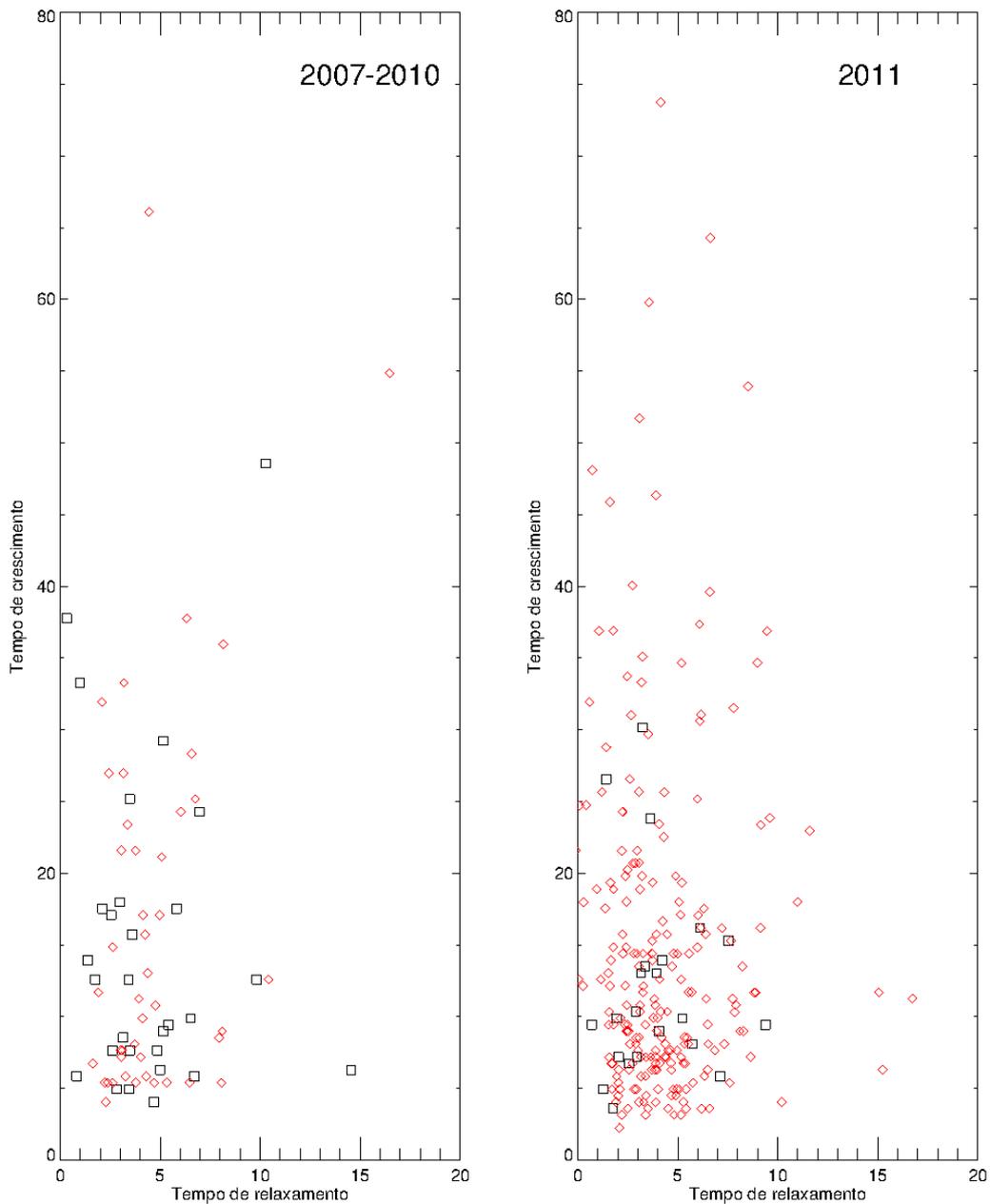


Figura 4.13 - Correlação entre o tempo de crescimento e o tempo de relaxamento durante máximo e mínimo de atividade solar. Os quadros pretos correspondem a eventos fracos, enquanto que os eventos intensos são representados por diamantes vermelhos.

Posteriormente efetuamos uma correlação entre os tempos de crescimento, ΔT_c , e os tempos de relaxamento, Δt_{rel} , para ambos os períodos de atividade solar. A correlação é apresentada na Figura 4.13, onde os quadrados pretos

representam eventos solares com excessos de fluxo de raios-X menores à 10^{-6} Wm^{-2} no canal GOES XL, enquanto que os diamantes vermelhos representam eventos solares com excessos de fluxo de raios-X maiores aos 10^{-6} Wm^{-2} . Observamos que em ambos os gráficos, e independentemente de sua intensidade, à maioria dos eventos possuem tempos de relaxamento entre os 2 e 8 minutos, os que são associados com tempos de crescimento de entre 5 a 20 minutos.

Os resultados obtidos das Figuras 4.11 até 4.13 são particularmente importantes porque, tal como sugere a equação 4.2, o tempo de relaxamento depende do coeficiente de recombinação assim como a concentração eletrônica no instante em que o SPA atinge seu máximo. Para o caso dos eventos solares fortes, o coeficiente de recombinação tende a diminuir quanto mais intensa é a explosão solar, assim como há um incremento na produção eletrônica, explicando a tendência linear que observamos para esse tipo de eventos.

Para o caso de eventos solares fracos, o coeficiente de recombinação apenas é modificado, pelo que os processos de perda da baixa ionosfera resultam ser comparáveis com os processos de produção associados à eventos solares fracos, que é responsável do comportamento exponencial mostrado nas seções 4.1 e 4.2.

5 DISCUSSÃO

Estudamos a sensibilidade da ionosfera para detecção de eventos solares, a relação entre a intensidade dos SPAs com o logaritmo do excesso de fluxo de raios-X e da fluência solar desde o período de mínimo (2007 - 2010) até o aumento da atividade solar (2011).

Efetuamos medidas dos tempos de crescimento de cada um dos eventos solares, para o canal XL, que produziram um significativo SPA, assim como seus tempos de relaxamento. A finalidade era avaliar as possíveis mudanças do tempo de relaxamento durante diferentes estágios do ciclo de atividade solar e das condições de iluminação.

De forma particular o trajeto de propagação VLF NAU – PLO mostrou avanços de fase significativamente maiores aos esperados por ser trajeto de propagação curto.

5.1. Mudanças nas condições de propagação devidas a explosões solares durante o ciclo de atividade solar.

Independentemente do método utilizado para caracterizar o comportamento da baixa ionosfera, a sua resposta aos transientes solares pode se dividir em dois tipos de regimes: o regime superior corresponde aos eventos solares com valores de pico de fluxo de raios-X maiores aos 10^{-6} Wm^{-2} para o canal XL e 10^{-7} Wm^{-2} para o canal XS, a correlação entre a intensidade máxima do SPA e o logaritmo do excesso de fluxo de raios-X para ambos os canais é linear como mostraram prévias publicações (KAUFMANN; PAES DE BARROS, 1969; MURAOKA et al., 1977; PANT, 1993; KAUFMANN et al., 2002). Para o caso da fluência, identificamos o regime superior para eventos solares com valores de fluência superiores aos 10^{-6} J m^{-2} . Estes valores limite, tanto para o fluxo de raios-X e a fluência, permanecem fixos em ambos períodos de atividade solar.

Portanto os resultados apresentados sugerem que a correlação entre os avanços de fase e o logaritmo do pico do fluxo em raios-X apresenta uma tendência exponencial ao se incluir os eventos solares fracos (menores que classe GOES C1). Este resultado é similar ao obtido por Oshio (1975).

6 CONCLUSÃO

O estudo estatístico que efetuamos para os dois períodos de atividade solar mostra que há uma diminuição da sensibilidade de detecção de eventos solares fracos conforme a atividade solar aumenta, o que está de acordo com os trabalhos de McRae e Thompson (2000) e Pacini e Raulin (2006). Assim para o trajeto mais sensível utilizado neste estudo (NPM – PLO) observamos que o limite de detecção passa de B3.0 (anos 2007 – 2010) para B4.2 (ano 2011).

Para ambos os canais de energia GOES (em 10^{-6} W m^{-2} na faixa de 1 – 8 Å, e 10^{-7} W m^{-2} na faixa 0.5 – 4 Å) mostramos que acima deste limite a intensidade dos SPAs apresenta uma relação linear com o logaritmo do excesso de fluxo de raios-X o que concorda com trabalhos anteriores [KAUFMANN; PAES DE (BARROS, 1969; MURAOKA et al., 1977; PANT, 1993; ZIGMAN et al., 2007)]. Incluindo eventos com intensidade de pico abaixo desse limite a tendência é exponencial, como sugerido anteriormente por Oshio (1975) ao considerar eventos fracos. Portanto, incluindo na análise eventos solares fracos, a correlação dos avanços de fase, tanto com o logaritmo do pico do excesso do fluxo de raios-X assim como da fluência solar mostra uma tendência exponencial. A visão geral de nossas observações permite afirmar que a resposta da baixa ionosfera as explosões solares é exponencial.

As observações do trajeto NAU – PLO mostraram tanto aumentos como decréscimos da amplitude do sinal de VLF, assim como maiores valores de avanços de fase associados aos efeitos de explosões solares. Uma provável explicação que podemos dar para as mudanças observadas na amplitude dos sinais de VLF neste trajeto é o aumento da atenuação do sinal conforme acontece o abaixamento da altura de referencia, h_0 . A normalização em microssegundos dos dados observacionais não foi suficiente para explicar como os avanços de fase registrados no trajeto NAU – PLO tem magnitudes

acima do esperado, mas estas não entram em contradição com os resultados discutidos nos outros trajetos de propagação.

Analizamos o tempo de relaxamento, Δt_{rel} a partir da correlação deste parâmetro com o logaritmo do pico do fluxo de raios-X e a fluência, considerando a possível influência das condições de iluminação entre o amanhecer e anoitecer assim como a provável influencia do ciclo solar neste parâmetro. Utilizando o trajeto de propagação NAA – PLO, que é um trajeto de propagação norte-sul, concluímos que o valor de Δt_{rel} não é afetado pelas condições de iluminação e pelo ciclo de atividade solar. Não efetuamos uma comparação para um trajeto leste-oeste devido à interferência modal (que no caso do trajeto NPM – PLO acontece entre as 11:00 UT e as 15:00 UT), fato que limita uma adequada comparação dos efeitos da iluminação solar no mesmo trajeto.

Não podemos deixar de comentar que a maior parte dos eventos solares possuem tempos de relaxamento entre os 2 até 8 minutos, fator que não é influenciado tanto pela intensidade do evento, assim como o tempo de crescimento. Este resultado evidencia que durante a formação do SPA, os processos de perda eletrônica são comparáveis com os processos de ionização no caso explosões solares fracas. Os processos de perda se tornam desprezíveis quando a explosão solar é intensa, o que é reproduzido na correlação linear para eventos solares com picos de fluxo maiores à 10^{-6} W m^{-2} na faixa de 1 – 8 Å, e 10^{-7} W m^{-2} na faixa 0.5 – 4 Å.

Como perspectivas futuras propomos usar as simulações do LWPC tanto para simular os perfis de fase e amplitude do trajeto NAU - PLO para apoiar as nossas conclusões discutidas em capítulos prévios , assim como determinar o coeficiente de recombinação, como foi feito por Zigman et al. (2007), focando nos eventos solares fracos. Durante o trabalho utilizamos o modelo de Thomas

et al. 1985 para calcular o espectro solar e obter a fluência na faixa de 0,5 a 2 Å, mas atualmente contamos com modelos coronais que incluem linhas de emissão que deverão ser utilizados tanto para aprimorar os nossos cálculos de fluência solar, bem como a taxa de produção dos raios-X solares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. South Atlantic Magnetic Anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamical effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 67, p. 1643-1657, 2005.
- ANANTHAKRISHAN, S; ABDU, M. A.; PIAZZA, L. R. D-region recombination coefficients and the short wavelength x-ray flux during a solar flare. **Planet Space Science**, v. 21, p. 367-375, 1973.
- BALACHANDRA, A. C. A new technique for estimating D-region effective recombination coefficients under different solar flare conditions. **Astrophysics and Space Science**, v 185, p. 153-164, 1991.
- BILITZA, D. International Reference Ionosphere 2000: examples of improvements and new features. **Advanced Space Research**, v. 69, n 3, p. 757 – 767, 2003.
- BRASSEUR, G. P.; SOLOMON, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Springer, 2005.
- COMARMOND, J. M. **Contribution a l'étude de la basse ionosphère par des mesures de phase et d'amplitude d'ondes électromagnétiques a très basse fréquence**. Thèse de doctorat d'état es sciences physiques, Université Pierre et Marie Curie, Julho 1977.
- CLIVERD M. A.; RODGER, C. J.; ULICH, T; SEPPÄLÄ, A.; TURUNEN, E.; BOTMAN, A.; THOMSON, N. R. Modeling a large solar proton events in the southern polar atmosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 110, A09307, doi:10.1029/2004JA0109222, 2005.
- DANILOV, A. D. **Chemistry of the ionosphere**. New York: Plenum Press, 1970.
- DERMIKOL, M. K. **VLF remote sensing of the ambient and modified lower ionosphere**. Dissertation submitted to the department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, November 1999.

GARCIA, H. A. Temperature and emission measure from GOES soft x-rays measurements. **Solar Physics**, v. 154, p. 275-308, 1994.

KAUFMANN, P.; PAES DE BARROS, M. H. Some relations between solar X-ray burst and SPAs produced on VLF propagation in the lower ionosphere. **Solar Physics**, v. 9, p. 479-486, 1969.

KAUFMANN, P.; PIAZZA, L. R.; FERNANDEZ, J. H.; SILVA, M. R. Solar flares not producing sudden phase advances. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. A8, DOI 10.1029, 2002.

MARQUES, A. A. P. **Dependência das propriedades da região-D ionosférica com o ciclo de atividade solar.** 2006. 121 p. (INPE-15173-TDI/1290). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/10.02.11.55>>. Acesso em: 28 jul. 2015.

McRAE, W. M.; THOMSON, N. R. VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 62, p. 609-618, 2000.

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

MITRA, A. P. **Ionospheric effects of solar flares.** Boston: D. Reidel Publishing Company, 1974. Astrophysics and Space Science Library, v. 46., 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.

NINA, A.; CADEZ, V.; SRÉCKOVIC, V. A.; SULIC, D. The influence of solar spectral lines on electron concentration in terrestrial ionosphere. **Baltic Astronomy**, v. 20, p. 609-612, 2011.

NICOLET, M.; A. C. AIKIN. The formation of the D region of the ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 65, p. 1469-1483, 1960. doi:10.1029/JZ06i005p01469.

OHSIO, M. **Ionospheric D-region disturbances caused by solar X-ray flares**. Tokio, Japan Radio Res. Lab., Minist. Of Posts and Telecommun , 1978.

PACINI, A. A.; RAULIN, J-P. Solar X-ray flares and ionospheric sudden phase anomalies relationship: a solar cycle phase dependence. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, A09301, 2006.

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

KAUFMANN, P.; MENDES, A. M. Relative changes on lower ionosphere conductivity gradients during SID events. **Journal of Geophysical Research, Space Physics**, v. 73, n. 7, April 1, 1968.

RAULIN, J.-P.; DAVID, P. C. M.; HADANO, R.; SARAIVA, A. C. V.; CORREIA, E.; KAUFMANN, P. The South America VLF NETwork (SAVNET). **Earth, Moon and Planets**, n. 104, p. 247 – 261, 2009a. doi 10.1007/s11038-008-9269-4.

RAULIN, J.-P.; DAVID, P. C. M.; HADANO, R.; SARAIVA, A. C. V.; CORREIA, E.; KAUFMANN, P. The South America VLF NETwork (SAVNET): Development, installation status, first results. **Geofísica Internacional**, n. 48, n. 3, p. 253 – 261, 2009b.

RAULIN, J.-P.; BERTONI, F. C. P.; GAVILÁN, H. R.; DAY, W. G.; RODRIGUEZ, R.; FERNANDEZ, G.; CORREIA, E.; KAUFMANN, P.; PACINI, A.; STEKEL, T. R. C.; LIMA, W. L. C.; SCHUCH, N. J.; FAGUNDES, P. R.; HADANO, R. Solar flare detection sensitivity using the South America VLF Network (SAVNET). **Journal Geophysical Research**, v. 115, A07301, 2010. doi:10.1029/2009JA015154.

RIVERO G. H. **Estudo das propriedades da região C ionosférica utilizando a rede SAVNET**. 2009. 102 p. (INPE-16613-TDI/1591). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em:<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/36CACPE>>. Acesso em: 28 jul. 2015.

TAUBENHEIM, J. Meteorological control of the D region. **Space Science Reviews**, v. 34, p. 397 – 411, 1983.

THOMAS, R. J.; STARR, R.; CRANNELL, C. J. Expressions to determine temperatures and emission measures for solar X-ray events from GOES measurements. **Solar Physics**, v. 95, p. 323-329, 1985.

THOMSON, N. R.; RODGER, C. J.; CLIVERD, M. A. Large solar flares and their ionospheric D-region enhancements. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 110, p. 6306, +. 2005.

TOHMATSU, T. **Compendium of aeronomy**. Kluwer Academic Publishers, 1990.

WAIT, J.; SPIES, K. **Characteristics of the Earth – ionosphere waveguide for VLF radio waves**. NBS Technical Note, 300, 1964.

WATT, A. D. **V.L.F Radio Engineering**. Pergamon Press inc., 1967.

ZHANG, D. H.; XIAO, Z.; ZHANG, Q. The correlation of flare's location on solar disc and the sudden increase of total electron content. **Chin. Sci. Bull.**, v. 47, p. 82-85, 2002. doi:10.1360/02tb9017.

ZIGMAN, V.; GRUBOR, D.; SULIC, D. D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, p. 778-792, 2007.