



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/01.27.18.33-TDI

# ABSORÇÃO IONOSFÉRICA DO RUÍDO CÓSMICO UTILIZANDO DADOS DE RIÔMETROS DA REDE SARINET

Juliano Moro

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica  
Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Emília Correia,  
Clezio Marcos De Nardin, e Mangalathayil Ali Abdu, aprovada em 16 de fevereiro  
de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/393UJCB>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**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

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência e Tecnologia**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/01.27.18.33-TDI

# ABSORÇÃO IONOSFÉRICA DO RUÍDO CÓSMICO UTILIZANDO DADOS DE RIÔMETROS DA REDE SARINET

Juliano Moro

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica  
Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Emília Correia,  
Clezio Marcos De Nardin, e Mangalathayil Ali Abdu, aprovada em 16 de fevereiro  
de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/393UJCB>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Moro, Juliano.

M828a Absorção ionosférica do ruído cósmico utilizando dados de riômetros da rede SARINET / Juliano Moro. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxx+129 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/01.27.18.33-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Emília Correia, Clezio Marcos De Nardin, e Mangalathayil Ali Abdu.

1. Ionosfera. 2. Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS) . 3. Riômetros. 4. Rede SARINET. 5. Precipitação de Partículas. I.Título.

CDU 550.338.2 (8)

---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

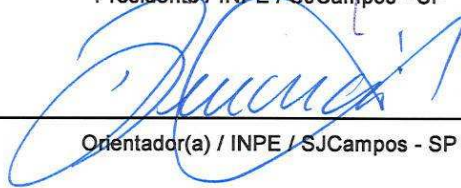
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente  
Solar-Terrestre

Dra. Inez Staciarini Batista



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Clezio Marcos De Nardin



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Mangalathayil Ali Abdu



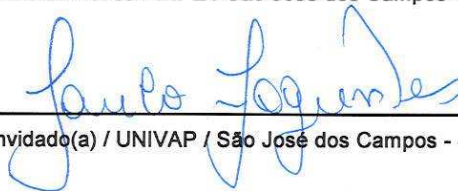
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. René Adalid Medrano-Balboa



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Paulo Roberto Fagundes



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Aluno (a): Juliano Moro

São José dos Campos, 16 de fevereiro de 2011



*“A Terra é o berço da humanidade, mas ninguém pode viver eternamente no berço”.*

KONSTANTIN TSIOLKOVSKI





*A meus pais Sili e Alcides*



## AGRADECIMENTOS

Inicio os agradecimentos com todo o amor e carinho à **minha família**. Principalmente à minha mãe **Sili**, meu pai **Alcides**, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida e pelo incentivo em continuar. Agradeço pelo total empenho em minha formação e devo a vocês todas as conquistas que eu alcançar. Agradeço de forma muito especial à minha namorada **Ana Lúcia**, uma pessoa que admiro muito. Muito obrigado pelo amor, compreensão, incentivo, carinho, envolvimento e por estar sempre do meu lado, mesmo quando estamos a aproximadamente 1000 km de distância.

Meu agradecimento especial aos **Drs. Emília Correia, Clezio Marcos De Nardin e Mangalathayil Ali Abdu**. Pelas valiosas orientações, ensinamentos, discussões e apoio para a realização deste trabalho de Dissertação.

Aos membros que gentilmente fizeram parte das bancas examinadoras da Proposta e Dissertação, meu agradecimento pela avaliação realizada e pelas sugestões.

Ao **Dr. Nelson Jorge Schuch**, uma pessoa à frente de seu tempo e um dos responsáveis por eu estar envolvido com este trabalho de Dissertação. Minha gratidão pelo seu apoio ao longo desse período que nos conhecemos. Nunca vou esquecer do dia 27 de janeiro de 2007 em que o conheci, fui aceito como aluno de Iniciação Científica e apresentado à Linha de Pesquisa Ionosfera. Muito obrigado pelas orientações e pelas valiosas conversas que me motivaram a seguir na carreira científica.

Agradeço ao Principal Investigador (P.I.) que criou a rede SARINET, **Prof. Dr. Kazuo Makita** da Universidade de Takushoku, Tóquio, Japão. Muito obrigado pelos ensinamentos, colaboração e pela oportunidade de acompanhá-lo até o Observatório Magnético de Trelew, em Trelew, Argentina, em março de 2008, para a instalação do riômetro convencional, cujos dados foram utilizados no trabalho de Dissertação.

Aos professores **Drs. Clezio, Polinaya, Eurico, Marcelo, Dutra, Odim, Alisson, Jonas, Inez e Renato**, com os quais tive a satisfação de ter sido aluno e através das aulas, compartilharam comigo suas experiências.

De forma especial, agradeço aos amigos **Caitano, Cassio, Cristiano, Lucas, Marcos e Rodrigo**, principalmente pelo companheirismo e momentos ímpares de descontração, sejam durante discussões filosóficas em uma mesa de bar, futebol na arena (ou posso dizer pólo aquático?), pizzas, corridas no parque, etc. É um prazer conviver com vocês. Agradeço aos amigos **Henrique, Marcelo e Vânia** por gentilmente me acolher quando vim para São José dos Campos. Agradeço também aos amigos **Alessandra, Aline, Ângela, Arian, Cláudia, Carlos, Daiki, Fábio, Karina, Lais, Laysa, Lílian, Marlos, Paulo, Pedro, Rafael L. C., Raquel, Ricardo, Valentin e Vandoir** e aos amigos do CRS/INPE: **Cláudio, Pietro e Tardelli**. Todos vocês, cada um de uma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e foram muito bons os momentos em que estive na companhia de vocês!

Agradeço ao ***National Geophysical Data Center (NGDC)*** pela disponibilização dos dados de índices geomagnéticos e dos dados de satélites que são utilizados no trabalho de Dissertação. Os dados da digissonda instalada na Unidade Regional de Cachoeira Paulista, em Cachoeira Paulista - SP, foram gentilmente fornecidos pela Divisão de Aeronomia (DAE) do INPE. Neste momento agradeço à **Maria Gorete Aquino** pela valiosa ajuda na redução dos dados da digissonda.

Por fim, agradeço ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** pelo suporte financeiro através do projeto n° 130497/2009-6, à **Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, pelo auxílio financeiro e pelas viagens a congressos nacionais e ao **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCT)** pela oportunidade de estudo e a utilização de suas instalações.

## RESUMO

A Dissertação de Mestrado apresenta os resultados da análise dos dados de três riômetros imageadores e um riômetro convencional da rede de riômetros da América do Sul (SARINET - *South American Riometer Network*) durante uma tempestade geomagnética classificada como moderada. Os riômetros imageadores estão instalados no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, Brasil ( $29^{\circ} 4' S$ ,  $53^{\circ} 1' O$ ), Punta Arenas, Chile ( $53^{\circ} S$ ,  $70^{\circ} 5' O$ ) e Concepción, Chile ( $36^{\circ} 5' S$ ,  $73^{\circ} O$ ). O riômetro convencional está instalado em Trelew, Argentina ( $43^{\circ} 1' S$ ,  $65^{\circ} 2' O$ ). Foi desenvolvida uma técnica considerada confiável para a determinação da Curva do Dia Quietado (QDC), necessária para o cálculo da absorção ionosférica do ruído cósmico (CNA - *Cosmic Noise Absorption*). A técnica baseia-se em utilizar um processo matemático para suavizar as curvas do ruído cósmico bem como utilizar apenas dados coletados em dias geomagneticamente calmos para a obtenção da QDC. A abordagem é apresentada e discutida através da análise estatística das diferenças entre a QDC calculada considerando o mês inteiro de dados sem a suavização em contraste com a calculada considerando apenas os dados suavizados coletados nos dias geomagneticamente calmos e sem interferências. A comparação entre os dados de riômetros obtidos nos diferentes locais durante a tempestade geomagnética mostrou que a CNA foi mais pronunciada em São Martinho da Serra (SMR), que é a estação da SARINET localizada na região central da Anomalia Magnética da América do Sul (também conhecida como Anomalia Magnética do Atlântico Sul) (AMAS). Os pronunciados valores da CNA obtidos em SMR são causados pelo aumento de ionização na baixa ionosfera que foi provavelmente produzido por partículas energéticas que precipitaram durante a tempestade geomagnética, como indicado pelo aumento do número de elétrons com energia em torno de 30 keV medidos pelo detector *Medium Energy Proton and Electron Detectors* (MEPED) a bordo do *Polar Operational Environmental Satellite* (POES).



# COSMIC NOISE ABSORPTION IN THE IONOSPHERE USING THE DATA FROM THE SOUTH AMERICAN RIOMETER NETWORK

## ABSTRACT

This Master Degree Dissertation presents the results of analysis of the data from three imaging riometers and a single beam riometer of South American Riometer Network (SARINET) during a geomagnetic storm classified as moderate. The imaging riometers are installed at the Southern Space Observatory, São Martinho da Serra, Brazil ( $29^{\circ} 4' S$ ,  $53^{\circ} 1' O$ ), Punta Arenas, Chile ( $53^{\circ} S$ ,  $70^{\circ} 5' O$ ) and Concepción, Chile ( $36^{\circ} 5' S$ ,  $73^{\circ} O$ ). The single beam riometer is installed at Trelew, Argentina ( $43^{\circ} 1' S$ ,  $65^{\circ} 2' O$ ). For this study an improved technique considered reliable for the determination of the Quiet Day Curve (QDC) needed to calculate the Cosmic Noise Absorption (CNA) was used. This technique uses a mathematical process to smooth the curves of cosmic noise, using data acquired during quiet days to obtain the QDC. This approach is presented and discussed the statistical analysis of differences between the QDC calculated considering the whole month of data with no digital filtering in contrast with the obtained considering only the filtered data collected during the geomagnetic quiet days. A comparison of the riometer data at the different sites obtained during a storm of moderate intensity showed that the (CNA) was more pronounced at São Martinho da Serra (SMR), which is the SARINET site located at the central region of the South American Magnetic Anomaly (also widely known as South Atlantic Magnetic Anomaly) (SAMA). This pronounced CNA arises from an enhanced ionization in the lower ionosphere that was probably produced by the energetic particles that precipitated during the geomagnetic storm, as indicated by an enhancement of the electrons with energy around 30 keV, measured by the Medium Energy Proton and Electron Detectors (MEPED) aboard the Polar Operational Environmental Satellite (POES).





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Representação esquemática do perfil da estrutura térmica da atmosfera em diferentes camadas. . . . .	4
2.2 Perfil de densidade eletrônica da ionosfera diurna mostrando as regiões da ionosfera e, para cada região, as principais fontes ionizantes e os principais íons. . . . .	5
2.3 Sistema de coordenadas adotado para ilustrar a obtenção da equação de Appleton-Hartree. . . . .	11
2.4 Variação com a altura da frequência de colisão dos elétrons $\nu$ , densidade eletrônica $N_e$ e o produto $N_e\nu$ , o qual é uma medida da absorção não-desviativa de uma onda de rádio que passa através da região ionosférica D e E. . . . .	17
3.1 Campo magnético principal gerado pela circulação de correntes na região entre o manto inferior e parte externa do núcleo da Terra. . . . .	22
3.2 Ilustração das direções e sentidos dos movimentos periódicos de uma partícula carregada aprisionada no campo magnético da Terra: (1) movimento ciclotrônico; (2) movimento de <i>bouncing</i> ; (3) movimento de <i>drift</i> em torno da Terra, com elétrons apresentando deriva para leste e prótons para oeste. . . . .	24
3.3 Distribuição da intensidade do campo magnético total, representada por isolinhas, para o globo terrestre utilizando o Modelo Magnético Mundial WMM2010-2015. O triângulo verde identifica a região do Observatório Espacial do Sul, no sul do Brasil, que apresenta um dos menores valores da intensidade do campo magnético total, aproximadamente 22,650 nT com taxa de decréscimo na razão de aproximadamente 26 nT/ano. As unidades para a intensidade do campo magnético total estão em nano-Tesla (nT). . . . .	30
3.4 Altitudes dos pontos de espelhamento para uma típica partícula em deriva em torno de $L = 1,8$ calculadas utilizando valores do campo geomagnético medido em 1975. No hemisfério norte a partícula é refletida em altitudes em torno de 1000 km. Porém no hemisfério sul a partícula é refletida em torno de 100 km de altitude. . . . .	31

3.5	Imagens da CNA durante a fase principal da tempestade geomagnética que ocorreu nos dias 22 e 23 de setembro de 1999, reprocessadas a partir dos dados do riômetro imageador instalado no OES. . . . .	34
3.6	Imagens da CNA durante a fase principal da tempestade do dia da Bastilha (14 de julho), que ocorreu no dia 15 de julho de 2000, reprocessadas a partir dos dados do riômetro imageador instalado no OES. . . . .	36
3.7	Distribuição geográfica da observação de saturações não realísticas pelo <i>Measurements of Pollution in the Troposphere</i> (MOPITT) a bordo do satélite Terra. . . . .	38
4.1	Exemplo da variação temporal do ruído cósmico observada no dia 30 de outubro de 2009. O perfil diário foi obtido com um riômetro convencional, operando em 38,2 MHz instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil. . . . .	40
4.2	Riômetro convencional instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil. . . . .	41
4.3	Projeção bidimensional a 100 km de altitude, dos feixes do IRIS a meia potência. . . . .	43
4.4	Diagrama de bloco de um típico riômetro imageador. . . . .	44
4.5	Riômetro imageador da rede SARINET instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil. . . . .	45
4.6	Mapa mostrando a localização das estações da rede SARINET. Em verde as estações que já foram instaladas e em vermelho as estações que estão planejadas para serem instaladas até o ano de 2012. . . . .	46
5.1	Esquema ilustrativo da relação entre os canais e as antenas na qual o sinal recebido foi enviado à placa de digitalização de um riômetro imageador constituído de uma matriz de 4 × 4 antenas. Em verde estão as antenas direcionadas ao zênite. . . . .	50
5.2	Ilustração do posicionamento da Terra em relação ao Sol e a uma estrela distante para a determinação da hora sideral local. . . . .	51
5.3	Fluxograma do programa utilizado para o cálculo da QDC. . . . .	54

5.4	Distribuição das ocorrências de tensões elétricas medidas pela antena N2E2 do riômetro imageador instalado no OES, considerando 31 dados coletados em março de 2010. . . . .	55
5.5	Distribuição das medidas de tensões elétricas do sinal do ruído cósmico para a antena N2E2 do riômetro imageador instalado no OES, no intervalo de 23 h 59 min às 00 h 00 min ST. . . . .	56
5.6	Exemplo da variação do ruído cósmico obtido com as 16 antenas do IRIS instalado no OES considerando 31 dados coletados no mês de março de 2010 (pontos em azul) e QDC (em vermelho). . . . .	57
5.7	Variação do índice planetário $K_p$ durante o mês de março de 2010. A linha verde delimita o valor de $K_p = 3$ . Os dados coletados nos períodos identificados pelos retângulos vermelhos foram descartados. . . . .	59
5.8	Exemplo de interferências eletromagnéticas no dado do ruído cósmico coletado no dia 06 de março de 2010 pelas 16 antenas do IRIS instaladas no OES. . . . .	60
5.9	Resultado da aplicação do processo matemático que eliminou as interferências eletromagnéticas no dado coletado no dia 06 de março de 2010 pelas 16 antenas do IRIS instaladas no OES. . . . .	62
5.10	Exemplo da variação do ruído cósmico obtido com as 16 antenas do IRIS instalado no OES, considerando dados sem interferências eletromagnéticas e coletados em dias quietos (em azul) de março de 2010 e QDC (em vermelho). . . . .	65
5.11	Diferenças entre QDCs calculadas a partir do método corrente e: (a) dados de riômetros coletados em dias quietos; (b) dados de riômetros suavizados; (c) dados de riômetros coletados em dias quietos e suavizados; e (d) os dois critérios de seleção de dados. . . . .	67
5.12	Diferenças entre QDCs calculadas a partir de dados coletados durante o mês de fevereiro de 2009 e março de 2010 pelas duas técnicas distintas. . . . .	69
5.13	Imagens da CNA calculadas a cada hora no dia 04 de fevereiro de 2009, utilizando (a) a técnica sugerida para estimar a QDC e (b) a QDC obtida pela corrente técnica. . . . .	71
5.14	Imagens da CNA calculadas a cada 15 min no dia 28 de março de 2010, utilizando (a) a técnica sugerida para estimar a QDC e (b) a QDC obtida pela corrente técnica. . . . .	73

5.15	Mapas de contorno do fluxo de elétrons em cada faixa de energia, obtidos a partir dos dados do satélite POES em $\approx 840$ km de altitude para todo o globo terrestre, em projeção cilíndrica. À esquerda: distribuição do fluxo de elétrons com energia $> 30$ keV (mapa (a)) e com energia $> 300$ keV (mapa (b)) obtido com o detector MEPED-0°. À direita: distribuição do fluxo de elétrons com energia $> 30$ keV (mapa (c)) e com energia $> 300$ keV (mapa (d)) obtido com o detector MEPED-90° . . . . .	76
6.1	Dados do plasma do vento solar e do campo magnético interplanetário para a tempestade geomagnética do dia 03 de setembro de 2008 e a evolução temporal dos índices geomagnéticos Kp e Dst para todo o mês de setembro de 2008. Do topo à base: magnitude do campo magnético interplanetário; componente $B_z$ ; velocidade do vento solar ( $V_p$ ); densidade de prótons ( $N_p$ ); índice Kp; e índice Dst. . . . .	78
6.2	Os pontos em azul correspondem à superposição dos dados do IRIS instalado no OES que foram coletados nos dias 12, 22 e 23 de setembro de 2008. As curvas em vermelho são as QDCs obtidas a partir dos dados. . .	81
6.3	Variação diária da CNA no período de 01 a 10 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2), do IRIS instalado no OES. . . . .	83
6.4	Continuação da anterior, porém para o período de 11 a 20 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2), do IRIS instalado no OES. . . . .	84
6.5	Continuação da anterior, porém para o período de 21 a 30 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2), do IRIS instalado no OES. . . . .	85
6.6	Localização dos sítios que contam com riômetros imageadores (identificados como IRIS) e convencional (identificado como 1 Canal) da rede SARINET utilizados na análise da tempestade geomagnética que iniciou no dia 03 de setembro de 2008. . . . .	87
6.7	Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do IRIS instalado no OES e índice geomagnético para o período de 02 a 06 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e). . . . .	89

6.8	Imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico a cada 2 h, entre os dias 03 e 06 de setembro de 2008, obtidas com dados do IRIS instalado no OES, em São Martinho da Serra, RS - Brasil. A intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada à direita. No detalhe abaixo é mostrada a orientação das imagens bem como a área de cada imagem a 100 km de altitude. . . . .	91
6.9	Em azul: variação diária dos parâmetros ionosféricos $f_0F2$ (em frequência), $f_tEs$ (em frequência) e $h'F2$ (em altura), obtidos da redução dos dados da digissonda instalada na Unidade Regional de Cachoeira Paulista, em Cachoeira Paulista, SP (22° 7' S, 45° 00' O), distante cerca de 1000 km do OES, durante o período de 02 a 06 de setembro de 2008. Em vermelho: variação diária dos parâmetros ionosféricos tomados como referência (ref) e obtidos dos dados coletados durante os dias 21, 22 e 23 de agosto de 2008 (dias quietos). As medidas da digissonda são realizadas a cada 15 min. . . . .	93
6.10	Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados das 16 antenas do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile, durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: QDCs para cada antena. . . . .	97
6.11	Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile e índice geomagnético para o período de 02 a 05 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e). . . . .	99
6.12	Imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico a cada 2h, entre os dias 03 e 05 de setembro de 2008, obtidas com os dados do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile. A intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada no canto inferior à direita das imagens bem como as direções geográficas. . . . .	100

6.13	Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados das 12 antenas do IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile, durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: QDCs para cada antena. . . . .	102
6.14	Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile e índice geomagnético para o período de 2 a 6 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e). . . . .	104
6.15	Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados do riômetro convencional instalado no Observatório Magnético de Trelew, em Trelew, Argentina durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: a QDC calculada. . . . .	106
6.16	Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do riômetro convencional instalado no Observatório Magnético de Trelew, em Trelew, Argentina e índice geomagnético. Do topo à base: em (a) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) a CNA correspondente e o índice Dst em (c). . . . .	107
6.17	Variação temporal da contagem de elétrons com energia $> 2$ MeV obtida com o satélite GOES-12, entre os dias 03 e 07 de setembro de 2008. Os inícios súbitos da tempestade geomagnética que ocorreram a $\approx 07$ UT e $\approx 18$ UT do dia 03 de setembro estão indicados pelos triângulos ao longo do eixo horizontal. . . . .	109
6.18	Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia $> 30$ keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,94. . . . .	111

6.19	Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia $> 300$ keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é - 0,37. . . . .	112
6.20	Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia $> 30$ keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é - 0,69. . . . .	112
6.21	O gráfico do fluxo integrado de elétrons com energia $> 300$ keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde é os valores máximos diários da CNA detectados após a aplicação da média corrida, para o IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis apresentadas é - 0,78. . . . .	113
6.22	Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia compreendida entre 30 e 300 keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,95. . .	114
6.23	Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia compreendida entre 30 e 300 keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,86. . .	114





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	–	<i>Analog-Digital Converter</i>
AMAS	–	Anomalia Magnética da América do Sul
CNA	–	Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico
CON	–	Concepción
DIS	–	Distúrbios Ionosféricos Súbitos
Dst	–	Índice de atividade magnética relacionado com a corrente anelar
EUV	–	Extremo Ultra Violeta
GOES	–	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
HF	–	<i>High Frequency</i>
HPBW	–	<i>Half-Power Beam-Width</i>
IGRF	–	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IMF	–	Campo Magnético Interplanetário
IRIS	–	<i>Imaging Riometer for Ionospheric Studies</i>
Kp	–	Índice de atividade magnética global
LF	–	<i>Low Frequency</i>
MEPED	–	<i>Medium Energy Proton and Electron Detectors</i>
MOPITT	–	<i>Measurements of Pollution in the Troposphere</i>
NOAA	–	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OES	–	Observatório Espacial do Sul
POES	–	<i>Polar Operational Environmental Satellite</i>
PAC	–	Punta Arenas
QDC	–	Curva do Dia Quietos
Riômetro	–	Do inglês <i>Riometer: Relative Ionospheric Opacity METER</i>
SARINET	–	<i>South American Riometer Network</i>
SCNA	–	<i>Sudden Cosmic Noise Absorption</i>
SEM	–	<i>Space Environment Monitor</i>
S.I.	–	Sistema Internacional de Unidades
SMR	–	São Martinho da Serra
ST	–	<i>Sidereal Time</i>
TED	–	<i>Total Energy Detector</i>
TRW	–	Trelew
UT	–	<i>Universal Time</i>
VLF	–	<i>Very Low Frequency</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	–	Constante astronômica
$A_t$	–	Absorção total de uma onda de rádio
$B$	–	Constante astronômica
$\vec{B}$	–	Vetor campo magnético
$B_0$	–	Módulo do campo magnético
$B_L$	–	Componentes longitudinal de $B_0$
$B_T$	–	Componentes transversais de $B_0$
$\vec{B}_m$	–	Campo magnético principal
$\vec{B}_c$	–	Campo magnético crustal
$\vec{B}_d$	–	Campo magnético induzido por correntes elétricas
$c$	–	Velocidade da luz no vácuo
$C$	–	Fator astronômico publicado anualmente
$d_n$	–	Dia Juliano
$D_{CA}$	–	Distância característica na qual $\vec{B}$ muda apreciavelmente
$e$	–	Carga do elétron
$E$	–	Campo elétrico da onda eletromagnética após passar pelo meio ionizado
$E_0$	–	Intensidade do campo elétrico original da onda eletromagnética
$E_s$	–	Camada E esporádica
$f$	–	Frequência da onda eletromagnética
$f_0F2$	–	Frequência crítica da onda ordinária da camada F2
$f_0Es$	–	Maior frequência da camada Es
$h'F2$	–	Altura virtual mínima da região F
$g$	–	Módulo da aceleração da gravidade
$\vec{g}$	–	Vetor aceleração da gravidade
$i$	–	Número imaginário
$IR_{pow}$	–	Dados do riômetro convertidos para volts
$IR_{raw}$	–	Dados digitalizados em formato binário
$J$	–	Segundo invariante adiabático - invariante longitudinal
$k$	–	Número de onda
$l$	–	Altura
$L$	–	Parâmetro de McIlwain
LON	–	Longitude geográfica
LST	–	<i>Local Sidereal Time</i>
$m$	–	Massa de repouso do elétron
$M_D$	–	Momento de dipolo da Terra
$n$	–	Índice de refração
$N_e$	–	Densidade eletrônica
$N_i$	–	Densidade numérica de um íon em particular

$N_n$	–	Densidade das partículas neutras
$P_L$	–	Taxa de perdas de íons
$P_P$	–	Taxa de produção de íons
$q$	–	Carga de uma partícula elétrica em particular
$r$	–	Distância radial ao centro da Terra
$\vec{r}$	–	Variação espacial de $\vec{B}$
$R_C$	–	Raio ciclotrônico
$S$	–	Espelho magnético
$ST$	–	<i>Sidereal Time</i>
$t$	–	Intervalo de tempo
$T$	–	Temperatura
$T_B$	–	Período de <i>bouncing</i>
$T_C$	–	Período ciclotrônico
$T_{CA}$	–	Tempo característico na qual $\vec{B}$ muda apreciavelmente
$T_D$	–	Período de <i>drift</i>
$TSG$	–	Hora sideral definida em Greenwich
$UT$	–	<i>Universal Time</i>
$v$	–	Velocidade de uma onda eletromagnética
$V_D$	–	Velocidade de deriva
$V_{GC}$	–	Velocidade de deriva devido ao gradiente e curvatura de $\vec{B}$
$V_{e,i}$	–	Velocidade eletrônica e iônica
$x$	–	Comprimento de uma coluna ionizada
$W$	–	Peso molecular de íons e partículas neutras
$\alpha$	–	<i>Pitch angle</i> de uma partícula
$\beta$	–	Mediana dos valores de tensão elétrica
$\epsilon_0$	–	Permissividade do vácuo
$\theta$	–	Ângulo medido entre a direção $x$ e $B_0$
$\kappa$	–	Coefficiente de absorção
$\lambda$	–	Comprimento de onda
$\mu$	–	Parte real do índice de refração
$\mu_m$	–	Primeiro invariante adiabático - momento magnético
$\nu$	–	Frequência de colisão entre elétron e partículas
$\nu_{ei}$	–	Frequência de colisão entre elétrons e íons
$\nu_{en}$	–	Frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras
$\nu_{in}$	–	Frequência de colisão entre íons e partículas neutras
$\xi$	–	Média dos valores de tensão elétrica
$\sigma$	–	Desvio padrão dos valores de tensão elétrica
$\varsigma$	–	Latitude magnética
$\phi$	–	Terceito invariante adiabático - invariante de fluxo
$\chi$	–	Parte imaginária do índice de refração

- $\omega$  – Frequência angular da onda eletromagnética
- $\omega_H$  – Girofrequência do elétron
- $\omega_L$  – Componente longitudinal de  $\omega_H$
- $\omega_P$  – Frequência angular do plasma
- $\omega_T$  – Componente transversal de  $\omega_H$



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 A IONOSFERA TERRESTRE</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 A Atmosfera . . . . .	3
2.2 A Ionosfera . . . . .	5
2.2.1 Região D . . . . .	6
2.2.2 Região E . . . . .	7
2.2.3 Região F . . . . .	7
2.3 Forçantes que Atuam na Baixa Ionosfera . . . . .	8
2.4 Propagação e Absorção de Ondas de Rádio na Ionosfera . . . . .	10
2.4.1 Propagação de Ondas em um Plasma Magnetizado . . . . .	10
2.4.2 Absorção Ionosférica de Ondas Eletromagnéticas . . . . .	15
2.4.3 Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico . . . . .	16
2.5 Frequências de Colisão de Elétrons com Partículas Neutras e Íons . . . . .	19
<b>3 A ANOMALIA MAGNÉTICA DA AMÉRICA DO SUL E A PRECIPITAÇÃO DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS</b> . . . . .	<b>21</b>
3.1 O Campo Geomagnético e o Movimento de Partículas Carregadas . . . . .	21
3.1.1 Movimento Ciclotrônico . . . . .	25
3.1.2 Movimento ao Longo da Linha de Campo . . . . .	26
3.1.3 Movimento de <i>Drift</i> . . . . .	27
3.2 Cinturões de Radiação de Van Allen . . . . .	28
3.3 Anomalia Magnética da América do Sul . . . . .	29
3.4 A Precipitação de Partículas Energéticas na AMAS . . . . .	32
<b>4 INSTRUMENTAÇÃO</b> . . . . .	<b>39</b>
4.1 Riômetros e a Rede de Riômetros da América do Sul . . . . .	39
4.1.1 Ruído Cósmico de Origem Galáctica . . . . .	39
4.1.2 Histórico e Descrição Básica do Riômetro . . . . .	40
4.1.3 A Rede de Riômetros da América do Sul . . . . .	45
4.2 <i>Medium Energy Proton and Electron Detector</i> a Bordo do POES . . . . .	48

<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS</b>	<b>49</b>
5.1	Metodologia de Análise de Dados dos Riômetros	49
5.1.1	Operação Básica do Riômetro Imageador	49
5.1.2	Conversão dos Dados de Riômetro para Escala de Tensão	50
5.1.3	Conversão de Hora Universal para Hora Sideral	51
5.1.4	Determinação da Curva do Dia Quietos	53
5.1.4.1	Técnica Corrente para Estimar a Curva do Dia Quietos	53
5.1.4.2	Técnica Sugerida para Estimar a Curva do Dia Quietos	58
5.1.4.3	Diferenças entre as Técnicas para o Cálculo da QDC	66
5.1.5	Geração de Mapas da Absorção em Forma de Imagem	74
5.2	Metodologia de Análise dos Dados do Instrumento MEPED	75
<b>6</b>	<b>RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DISCUSSÕES</b>	<b>77</b>
6.1	A Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008	77
6.2	Estudo da Variação da Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico Durante a Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008	80
6.2.1	Valores da CNA para os Períodos Calmos de Setembro	80
6.2.2	Valores da CNA Durante a Tempestade Geomagnética	87
6.2.2.1	CNA obtida em São Martinho da Serra (SMR)	88
6.2.2.2	CNA obtida em Punta Arenas (PAC)	96
6.2.2.3	CNA obtida em Concepción (CON)	101
6.2.2.4	CNA obtida em Trelew (TRW)	105
6.3	Análises do Fluxo de Elétrons de Alta Energia Durante a Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008	108
6.3.1	Análise dos Dados Obtidos do Satélite GOES	108
6.3.2	Análise dos Dados Obtidos do Satélite POES	110
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS</b>	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>121</b>



## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Rádios receptores instalados na superfície terrestre têm sido utilizados para estudar a absorção do ruído cósmico galáctico pela ionosfera desde 1953. A partir de trabalhos realizados por [Little e Leinbach \(1958\)](#), iniciou-se o uso do riômetro (do inglês *Riometer: Relative Ionospheric Opacity METER*) em estudos da absorção ionosférica do ruído cósmico. Tal estudo é possível pois se considera que o sinal captado pelo riômetro na ausência da ionosfera é constante, e qualquer alteração no sinal recebido é devido a variações na densidade eletrônica da ionosfera terrestre. As variações são geralmente atribuídas a: (1) variabilidade da radiação solar; (2) tempestades geomagnéticas; (3) precipitação de partículas energéticas; (4) ondas planetárias; e (5) ondas de gravidade.

A partir de 1999 uma rede de riômetros começou a ser implantada na América do Sul com a primeira instalação de riômetros no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra, RS - Brasil. Os riômetros instalados em 1999 no OES são os primeiros riômetros da rede SARINET (*South American Riometer Network*). A rede SARINET destina-se ao estudo dos efeitos aeronômicos da ionosfera na região da Anomalia Magnética da América do Sul (também conhecida como Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS), devido à precipitação de partículas dos cinturões de radiação.

Na Dissertação, utilizam-se dados de riômetros que compõem a rede SARINET para estudar um período de atividade geomagnética classificada como moderada. Para a análise da absorção do ruído cósmico pela ionosfera é necessário calcular uma curva que leva em consideração a mínima absorção ionosférica, chamada Curva do Dia Quiet (do inglês *Quiet Day Curve - QDC*). A QDC é obtida a partir dos dados da intensidade do ruído cósmico em função do tempo sideral e novos critérios são investigados para melhor determiná-la.

Visando uma compreensão maior dos fenômenos que ocorrem na baixa ionosfera (regiões D e E), que podem ser discutidos com os dados de riômetros, foi desenvolvido este projeto de pesquisa, cujos objetivos são:

- Encontrar um método confiável para a determinação da QDC;
- Analisar os dados de riômetros de estações da rede SARINET de interesse para o trabalho durante um período geomagneticamente perturbado; e

- Comparar os resultados com dados de satélites para identificar se a variação da absorção do ruído cósmico é devida a precipitação de partículas energéticas dos cinturões de radiação.

Para alcançar os objetivos propostos, no **Capítulo 2** é realizada uma revisão da teoria sobre os aspectos da ionosfera terrestre que são pertinentes à Dissertação. As regiões da ionosfera são discutidas bem como os forçantes que agem na baixa ionosfera. É realizada uma descrição do índice de refração complexo em um meio magneto-ionizado, levando em consideração a equação de Appleton-Hartree. Por fim, é revisada a teoria referente as frequências de colisão de elétrons com partículas neutras e íons.

No **Capítulo 3** apresenta-se a revisão da teoria relacionada ao campo geomagnético. A revisão inclui tópicos como o movimento de partículas carregadas, cinturões de radiação, AMAS, bem como os principais trabalhos realizados a respeito da precipitação de partículas energéticas na região da AMAS e os efeitos aeronômicos associados.

No **Capítulo 4** são descritos o riômetro, a rede SARINET e o instrumento *Medium Energy Proton and Electron Detector* (MEPED) a bordo do *Polar Operational Environmental Satellite* (POES).

O **Capítulo 5** apresenta a metodologia empregada para análise dos dados de riômetros e do instrumento MEPED.

No **Capítulo 6**, utilizando a técnica de determinação da QDC considerando os novos critérios, os resultados da análise de dados de riômetros são apresentados em termos da absorção ionosférica do ruído cósmico. As análises são realizadas de forma comparativa com informações de precipitação de partículas obtidas a partir de dados do instrumento MEPED, levando a uma discussão a respeito da energia dos elétrons precipitados na AMAS. Os resultados são discutidos em termos das condições observadas durante a tempestade magnética classificada como moderada que ocorreu em setembro de 2008 (durante o mínimo solar).

Finalmente, no **Capítulo 7** são sumarizadas as principais contribuições, as conclusões relacionadas com os estudos desenvolvidos no trabalho de Dissertação e algumas sugestões para futuros estudos.

## 2 A IONOSFERA TERRESTRE

O [Capítulo 2](#) descreve o cenário que é o objeto de estudo no trabalho de Dissertação de Mestrado - a ionosfera terrestre. Os forçantes que atuam na baixa ionosfera, a absorção de ondas de rádio na ionosfera e as frequências de colisão de elétrons com partículas neutras e elétrons com íons também são abordadas.

### 2.1 A Atmosfera

A atmosfera pode ser tratada como um fluido que envolve o planeta Terra. A pressão da atmosfera e a densidade de moléculas que constituem a atmosfera decaem exponencialmente com o aumento da altura devido a fatores como o perfil vertical de temperatura, a força de gravidade e a composição química. De acordo com a variação da temperatura com a altitude, pode-se classificar a atmosfera em camadas, a saber: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Com relação à composição química, ela é classificada como homosfera, que abrange as porções mais baixas do perfil de temperatura, e heterosfera, que cobre uma faixa de altura similar a da termosfera. Na troposfera, estratosfera e mesosfera a presença dos componentes químicos se mantém constante, em torno de 78% de nitrogênio molecular, 21% de oxigênio molecular, e em torno de 1% de argônio. Encontra-se ainda a presença de concentrações variáveis de gases como dióxido de carbono e vapor d'água. Acima de aproximadamente 200 km de altitude, o nitrogênio molecular e o oxigênio molecular deixam de ser os componentes majoritários e a concentração de átomos de oxigênio, hélio e hidrogênio aumenta à medida que aumenta a altitude ([RISHBETH; GARIOTT, 1969](#)). Na [Figura 2.1](#) pode-se verificar a nomenclatura da estrutura vertical da atmosfera, levando em consideração a temperatura. Descrições detalhadas sobre cada uma das classificações apresentadas podem ser encontradas em [Rishbeth e Gariott \(1969\)](#), [Hargreaves \(1992\)](#) e [Brasseur e Solomon \(2005\)](#).

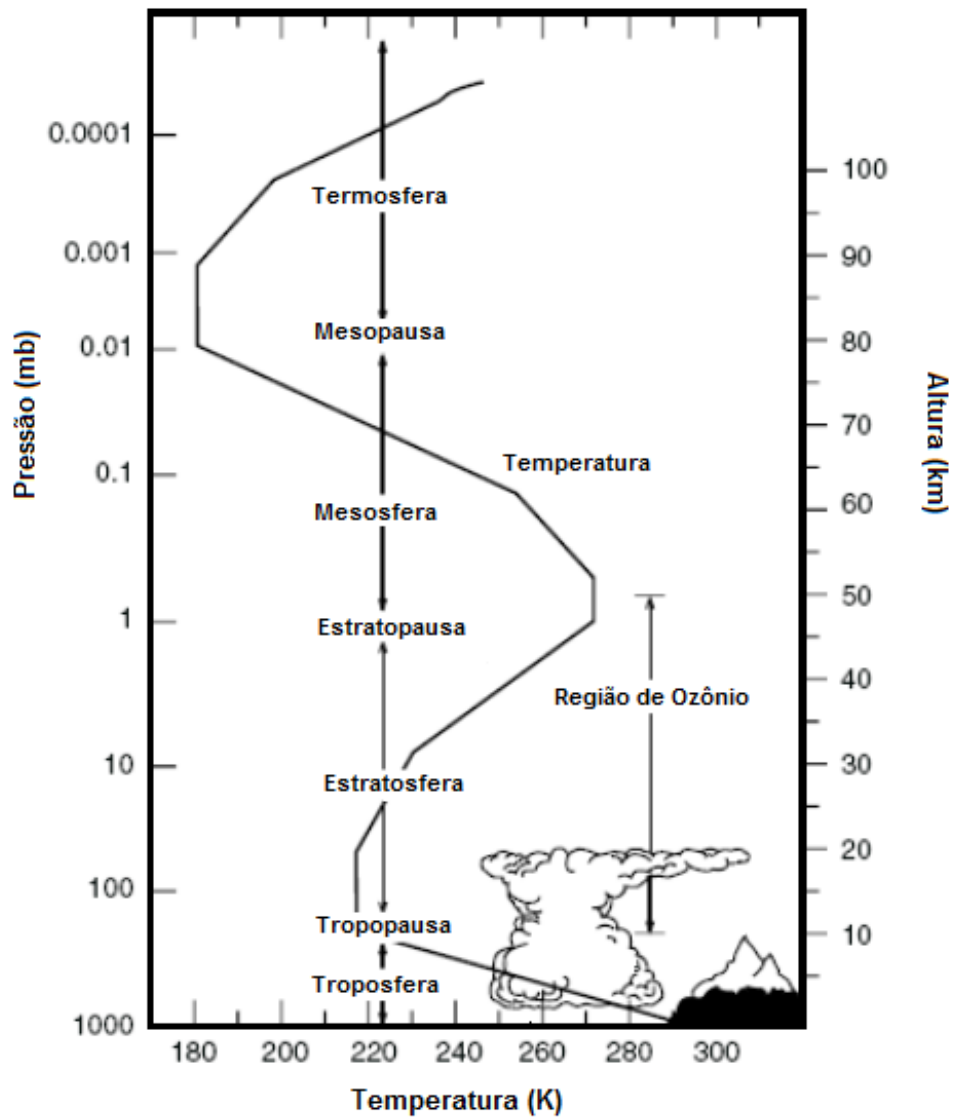


Figura 2.1 - Representação esquemática do perfil da estrutura térmica da atmosfera em diferentes camadas.  
 Fonte: Adaptada de Brasseur e Solomon (2005).

## 2.2 A Ionosfera

Para a formação da ionosfera são necessários basicamente dois ingredientes: a atmosfera neutra e uma fonte de ionização para os seus gases constituintes (KIVELSON; RUSSEL, 1995). Por exemplo, a incidência de fótons com energia maior que o potencial de ionização dos elementos neutros ocasiona a perda de elétron de sua camada de valência, tornando-os íons positivos e dando origem a elétrons livres. O processo é denominado de fotoionização. Nas regiões de altas latitudes e na região da AMAS há outro exemplo de processo de ionização que se pode citar. Nestas regiões o impacto de partículas energéticas de origem solar ou galáctica com energia cinética suficiente para exceder o potencial de ionização dos elementos neutros da atmosfera causa o chamado processo de ionização corpuscular. Uma ilustração do perfil da ionosfera diurna identificando as principais radiações ionizantes e os correspondentes íons criados é apresentada na Figura 2.2.

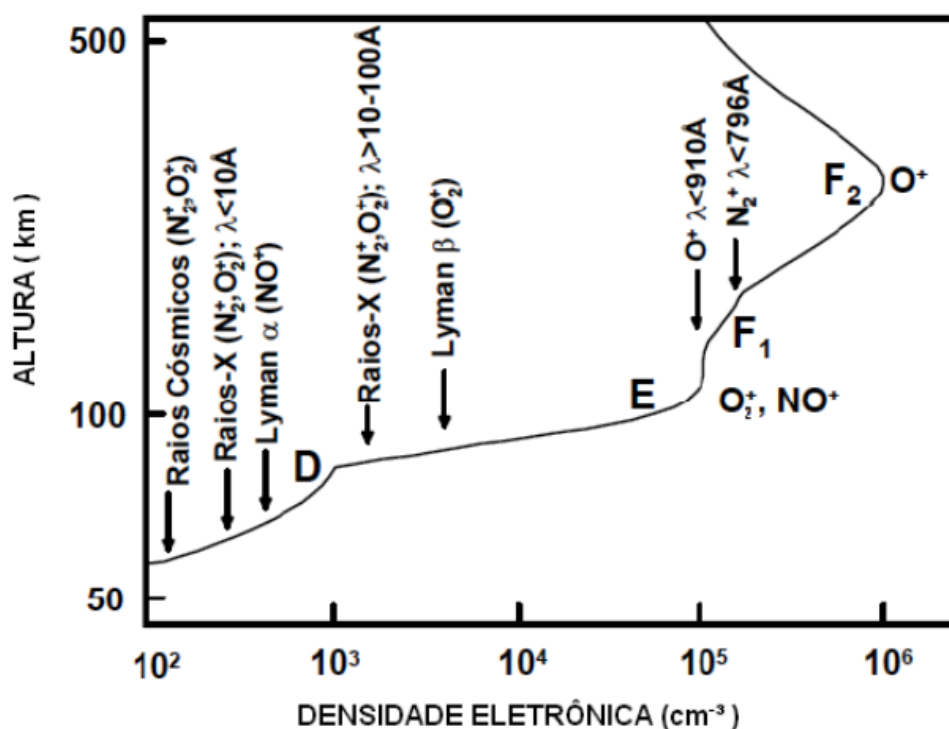


Figura 2.2 - Perfil de densidade eletrônica da ionosfera diurna mostrando as regiões da ionosfera e, para cada região, as principais fontes ionizantes e os principais íons.

Fonte: Adaptada de Banks e Kockarts (1973).

Uma vez ionizados, os íons e elétrons tendem a se recombinar e/ou reagir com outras espécies de gases para a produção de outros íons. Dessa forma se estabelece um equilíbrio dinâmico no qual a concentração líquida de elétrons livres depende da taxa relativa de produção ( $P_P$ ) e perda ( $P_L$ ) (HARGREAVES, 1992). A equação da continuidade que relaciona os efeitos desses processos que alteram a densidade eletrônica  $N_e$  e iônica  $N_i$  é dada pela Equação 2.1:

$$\frac{\partial [N_{e,i}]}{\partial t} = P_P - P_L - \nabla \cdot (\mathbf{V}_{e,i} [N_{e,i}]), \quad (2.1)$$

onde os sub-índices  $e$  e  $i$  representam elétrons e íons, respectivamente. O termo do divergente expressa a produção/perda dos elétrons pelo transporte, sendo  $\mathbf{V}$  a velocidade macroscópica total resultante da interação entre campos elétricos e do vento neutro com os íons e elétrons e  $t$  é a variável que se refere ao tempo. A fim de descrever os processos de ionização dominantes que ocorrem em diferentes alturas e os constituintes químicos, a ionosfera pode ser discutida em termos de cada região.

### 2.2.1 Região D

A região D da ionosfera é uma camada diurna que se forma devido a incidência da radiação solar. Ela é usualmente considerada como a porção mais baixa da ionosfera, estendendo-se abaixo de 90 km de altitude. A região D é a mais complexa da ionosfera sob o ponto de vista químico. Isso se deve basicamente a dois fatores. O primeiro é por ela estar sob uma alta pressão devido a coluna de ar. O segundo é que diversas fontes de ionização, além da fotoionização, contribuem para a produção iônica da região (HARGREAVES, 1992). Além da fonte de ionização por absorção da radiação solar que inclui a radiação Lyman- $\alpha$  e os Raios-X, outra fonte de ionização são os raios cósmicos, que é mais importante para a ionização dos elementos atmosféricos abaixo de aproximadamente 60 km. Através das interações fotoiônicas acima citadas com o oxigênio molecular ( $O_2$ ) e nitrogênio molecular ( $N_2$ ) surgem os íons  $O_2^+$  e  $N_2^+$ , respectivamente. Porém, somente a radiação Lyman- $\alpha$  ioniza o óxido nítrico (NO) formando o íon  $NO^+$ , que é uma espécie minoritária. Após o pôr-do-Sol a região D torna-se rarefeita devido a rápida recombinação de íons, o que a torna difícil de detectar. O estudo da região D geralmente é realizado utilizando sondagens por equipamentos que utilizam ondas de rádio na faixa de kHz ou foguetes (RISHBETH; GARIOTT, 1969).

### 2.2.2 Região E

Entre 90 e 150 km de altitude está localizada a região E da ionosfera. A região é caracterizada por apresentar importante sistema de correntes elétricas que inclui o Eletrojato Equatorial, uma forte corrente elétrica dirigida para leste durante o dia ao longo do equador magnético. A condutividade elétrica dessa região é bastante elevada. Conforme a [Figura 2.2](#) as radiações no espectro dos Raios-X provocam o surgimento dos íons  $N_2^+$  e  $O_2^+$ . O  $O_2^+$  também é produzido pela linha Lyman- $\beta$ . Contudo, após o início das reações químicas o íon  $NO^+$  domina junto com o íon  $O_2^+$ . Na faixa de altura da região E os meteoros são responsáveis por depositar íons metálicos, como  $Fe^+$ ,  $Mg^+$ ,  $Ca^+$  e  $Si^+$ , que são íons importantes na formação da camada E esporádica e podem ser perdidos através da neutralização mútua com íons negativos ([RISHBETH; GARIOTT, 1969](#)).

### 2.2.3 Região F

A região F é a porção superior da ionosfera e estende-se acima de 150 km de altitude e é subdividida em camadas chamadas de F1 e F2 e uma camada F3, observada ocasionalmente. A camada F1 tem início por volta de 150 km e se estende por aproximadamente 50 km. A espécie neutra molecular nesta região é o  $N_2$ . O  $NO^+$  domina até aproximadamente 150 km e o  $O^+$  domina em altitudes a partir de 150 km. A camada F2 estende-se de aproximadamente 200 km, onde a densidade eletrônica cresce com a altura, até um pico localizado entre 300 e 450 km (dependendo principalmente da latitude, entre outros fatores). Acima do pico da camada F2 a densidade diminui de forma praticamente exponencial. A fotoionização do oxigênio atômico (O) e do  $N_2$  na faixa espectral do Extremo Ultra Violeta (EUV) e dos Raios-X é a principal fonte de ionização desta camada ([RISHBETH; GARIOTT, 1969](#)). Nessa faixa de altitude a atmosfera é bem rarefeita e a recombinação dos íons ocorre de forma muito lenta após cessar a incidência da radiação solar. Estudos com simulação teórica no ano de 1995 mostraram a ocorrência de uma camada adicional que inicia nas primeiras horas da manhã, localizada acima do pico da camada F2, chamada de camada F3 ([BALAN; BAILEY, 1995](#)). Estudos posteriores realizados por [Batista et al. \(2002\)](#) na região de Fortaleza, mostraram alta ocorrência da camada F3 durante período de baixa atividade solar.

### 2.3 Forçantes que Atuam na Baixa Ionosfera

A baixa ionosfera é a região compreendida entre 60 e 100 km de altitude, a qual inclui a região D e parte da região E compreendendo a mesosfera e baixa termosfera. O estudo dessa região é importante para entender o acoplamento do sistema atmosfera neutra - ionosfera. A baixa ionosfera responde basicamente a dois forçantes: (1) de origem solar, e (2) relacionada com a atmosfera neutra. Os forçantes de origem solar podem ser subdivididos em duas categorias: a variabilidade de longo prazo da radiação solar ionizante, e a variabilidade de curta escala de tempo relacionada ao clima espacial. As forças ligadas a ondas na atmosfera neutra, principalmente ondas planetárias e de gravidade, agem de baixo para cima.

A variabilidade de longo prazo da radiação ionizante está relacionada com o ciclo solar de 11 anos, que altera o fluxo de Raios-X e EUV incidente na baixa ionosfera. Neste caso a baixa ionosfera responde a variações do fluxo de Raios-X que são menores quando o ciclo solar é mínimo e maiores quando o Sol está mais ativo. Os forçantes de curta escala de tempo relacionados ao clima espacial são um conjunto de fenômenos complexos e inter-relacionados. São causados pelo Sol (tempestades e sub-tempestades geomagnéticas), vento solar (prótons de origem solar) e fenômenos relacionados a partículas de alta energia (precipitação de elétrons relativísticos) (LASTOVICKA, 2009).

Tempestades geomagnéticas são eventos nos quais grande quantidade de energia é transferida do vento solar para dentro da magnetosfera terrestre (CAMPBELL, 1997; GONZALEZ et al., 1994). As partículas vindas do vento solar que se encontram aprisionadas no campo geomagnético derivam em torno da Terra com direções opostas para íons e elétrons, dando origem a uma separação de cargas e conseqüentemente a formação da corrente anelar (AKASOFU; CHAPMAN, 1972).

A principal característica de uma tempestade geomagnética é o decréscimo acentuado da componente horizontal H do campo geomagnético. Isso ocorre devido a corrente anelar produzir um campo magnético de direção oposta ao campo magnético intrínseco da Terra na região do Equador devido a um aumento da população de partículas na magnetosfera (KAMIDE et al., 1998). Em seguida a corrente de anel começa a se dissipar, reduzindo também o seu campo resultante e então o campo geomagnético retorna às suas condições normais pré-tempestade.



As tempestades geomagnéticas afetam substancialmente regiões de altas e médias latitudes e podem causar blecaute de comunicação em faixas de frequências abaixo do HF<sup>1</sup>. Entre seus efeitos estão a precipitação de elétrons com energia em torno de 10 a 300 keV em médias latitudes. Quando ocorrem tempestades geomagnéticas muito intensas pode haver precipitação de elétrons relativísticos e de prótons solares (energia entre 3 a 300 MeV) em latitudes aurorais (BAKER et al., 1986). Sub-tempestades são processos transientes iniciados no lado diurno da Terra em que uma quantidade significativa de energia, que é derivada da interação vento solar - magnetosfera, é depositada na região auroral e na magnetosfera (ROSTOKER et al., 1980).

As explosões solares aumentam o fluxo de Raios-X incidentes na baixa ionosfera, levando a um aumento da absorção das ondas de rádio devido ao aumento da densidade eletrônica, especialmente em médias e baixas latitudes. Os efeitos causados pelas explosões solares na baixa ionosfera são comumente chamados de Distúrbios Ionosféricos Súbitos (DIS), na qual um de seus efeitos está relacionado com um significativo aumento na absorção de ondas de rádio de origem cósmica conhecido como SCNA<sup>2</sup> que é observado por riômetros. O equipamento riômetro é o principal instrumento de coleta de dados utilizado na Dissertação e é descrito em maiores detalhes no Capítulo 4.

Com relação aos forçantes relacionados à atmosfera neutra, ressaltam-se as ondas planetárias. Elas são oscilações de escala planetária com períodos da ordem de dias, associadas principalmente à dissipação da energia solar sobre a Terra. Elas também podem ser atribuídas às variações na topografia, aquecimento diferencial entre continentes e oceanos e processos convectivos (BEER, 1974). As ondas planetárias vêm sendo estudadas através de dados de absorção de ondas de rádio nas faixas de frequências que cobrem do LF<sup>3</sup> ao HF.

O outro forçante relacionado à atmosfera neutra é causado por ondas de gravidade. Estas ondas têm origens atribuídas a eventos meteorológicos e/ou à orografia próxima da região onde são observadas. Depois de geradas, as ondas de gravidade se propagam através da estratosfera e mesosfera. Em consequência do deslocamento vertical da parcela de ar saindo da posição de equilíbrio, forças restauradoras como as forças de gravidade e empuxo irão reagir para que essa parcela

---

<sup>1</sup>Do inglês *High Frequency* - 3 a 30 MHz

<sup>2</sup>Do inglês *Sudden Cosmic Noise Absorption*

<sup>3</sup>Do inglês *Low Frequency* - 30 a 300 kHz

de ar tenda a retornar à sua posição original. Essas oscilações ocorrem tanto na direção vertical como na direção horizontal até transferirem toda a sua energia e momentum para a baixa ionosfera, alterando a estrutura térmica e a circulação geral nessa região (WRASSE et al., 2007).

Devido ao decréscimo exponencial da densidade atmosférica com a altitude, e em virtude da conservação do momento, as amplitudes das ondas de gravidade crescem à medida que se propagam para altitudes maiores. Dessa forma diversos efeitos como turbulência, misturas de constituintes, aceleração de fluxo médio de ventos, instabilidades dinâmicas e cisalhamentos são ocasionados na baixa ionosfera (BEER, 1974). Recentemente, Jarvis et al. (2003) e Moffat-Griffin et al. (2008) apresentaram técnicas para extrair parâmetros de ondas de gravidade a partir de dados de riômetros. Eles utilizaram um período em que um evento de onda de gravidade foi observado em imagens de um espectro-imageador, instalado nas proximidades do riômetro, e encontraram correlação entre os parâmetros obtidos pelos diferentes equipamentos.

## 2.4 Propagação e Absorção de Ondas de Rádio na Ionosfera

A Seção 2.4 apresenta a teoria básica da propagação e absorção de ondas eletromagnéticas em um plasma magnetizado, bem como a maneira usualmente utilizada por operadores de riômetros para o cálculo da absorção ionosférica do ruído cósmico (do inglês *Cosmic Noise Absorption* - CNA).

### 2.4.1 Propagação de Ondas em um Plasma Magnetizado

A velocidade das ondas eletromagnéticas depende da natureza do meio em que elas se propagam. Para uma onda eletromagnética no vácuo,  $v = c$ , onde  $v$  é a velocidade de propagação da onda e  $c$  é a velocidade da luz. Para qualquer outro meio, a velocidade será dada por  $v = c/n$  onde  $n$  é o índice de refração do meio em que a onda se propaga. Neste contexto, cabe salientar que o ruído cósmico é uma onda eletromagnética, ou seja, é uma configuração de campos elétrico e magnético que se propagam das rádio-fontes, passam pela ionosfera (meio ionizado) e chegam às antenas do riômetro na superfície terrestre. A velocidade de fase da onda eletromagnética é definida pela Equação 2.2:

$$v = \frac{\omega}{k}, \tag{2.2}$$

na qual  $\omega$  é a frequência angular e  $k$  é o número de onda. O número de onda é definido pela Equação 2.3:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = n\frac{\omega}{c}, \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda. Um sinal de rádio propagando-se na ionosfera é matematicamente descrito como uma onda cujo número de onda  $k$  é complexo (HARGREAVES, 1992).

A teoria dos processos físicos que envolvem a propagação de ondas eletromagnéticas em meios magneto-ionizados é conhecida como teoria magneto-iônica, a qual foi desenvolvida por Appleton em 1927. Com a adição do termo de polarização de Lorentz por Hartree em 1931, a equação do índice de refração complexo em um meio magneto-ionizado é conhecido como equação de Appleton-Hartree. Para ilustrar a obtenção da equação de Appleton-Hartree, considera-se o sistema de coordenadas mostrado na Figura 2.3, onde  $\vec{B}_0$  é a intensidade do campo magnético,  $\theta$  é o ângulo medido entre a direção x e  $\vec{B}_0$ ,  $B_L = B_0 \cos(\theta)$  é a componente longitudinal de  $\vec{B}_0$  e  $B_T = B_0 \sin(\theta)$  é a componente transversal de  $\vec{B}_0$ .

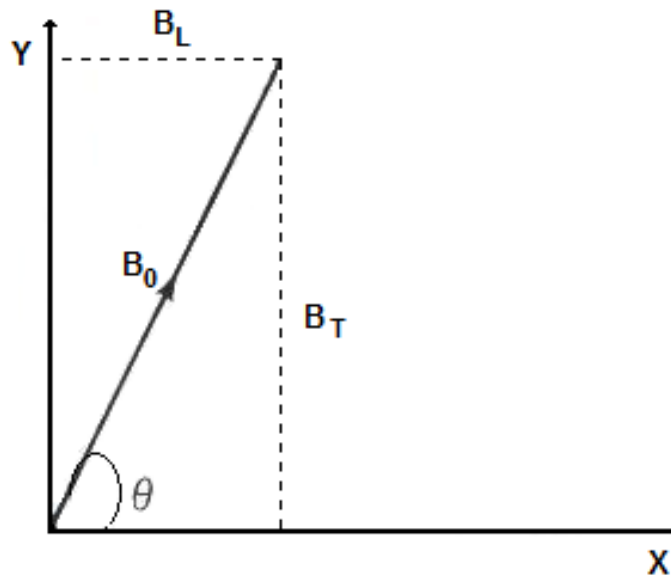


Figura 2.3 - Sistema de coordenadas adotado para ilustrar a obtenção da equação de Appleton-Hartree.

Em um meio magneto-ionizado, a frequência de plasma ( $\omega_P$ ) é definida pela Equação 2.4:

$$\omega_P = \frac{N_e e^2}{m \epsilon_0}, \quad (2.4)$$

em que  $N_e$  é a densidade eletrônica, “e” é a carga do elétron, “m” é a massa de repouso do elétron e  $\epsilon_0$  é a permissividade do vácuo. A girofrequência do elétron ( $\omega_H$ ) é definida pela Equação 2.5:

$$\omega_H = \frac{eB_0}{m}, \quad (2.5)$$

e pode ser separada em duas componentes em relação à direção do campo geomagnético: uma componente longitudinal ( $\omega_L$ ) e uma componente transversal ( $\omega_T$ ) definidas a seguir:

$$\omega_L = \frac{eB_L}{m} \quad (2.6)$$

$$\omega_T = \frac{eB_T}{m} \quad (2.7)$$

O índice de refração para ondas planas em um plasma homogêneo, com frequência de colisão entre elétrons e todas as outras partículas presentes no meio dada por  $\nu$ , é dada pela expressão de Appleton-Hartree (DAVIES, 1965):

$$n^2 = (\mu - i\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1-X-iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1-X-iZ)^2} + Y_L^2}}. \quad (2.8)$$

Na expressão de Appleton-Hartree,

- $\mu$  é a parte real e  $\chi$  é a parte imaginária do índice de refração;
- $i$  representa o número imaginário, onde  $i^2 = -1$ ;
- $X$  é uma relação entre a frequência de plasma ( $\omega_P$ ) e  $\omega$ , dada por:

$$X = \frac{\omega_P^2}{\omega^2} = \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}; \quad (2.9)$$

- $Y_L$  é a razão entre a componente longitudinal da girofrequência eletrônica ( $\omega_L$ ) e  $\omega$ , dada por:

$$Y_L = \frac{\omega_L}{\omega} = \frac{\omega_H \cos(\theta)}{\omega}; \quad (2.10)$$

- $Y_T$  é a razão entre  $\omega_T$  e  $\omega$ , dada por:

$$Y_T = \frac{\omega_T}{\omega} = \frac{\omega_H \sin(\theta)}{\omega}; \quad (2.11)$$

- $Z$  é a razão entre  $\nu$  e  $\omega$ , dada por:

$$Z = \frac{\nu}{\omega}. \quad (2.12)$$

Considerando inicialmente um plasma desmagnetizado ( $Y_T=Y_L=0$ ) e desprezando as colisões entre elétrons com outras partículas ( $\nu=0$ ), a [Equação 2.8](#) se reduz a:

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2}. \quad (2.13)$$

Substituindo  $\omega^2$  por  $4\pi^2 f^2$ , onde  $f$  é a frequência da onda eletromagnética, a [Equação 2.13](#) torna-se:

$$\mu^2 = 1 - A \frac{N_e}{f^2}, \quad (2.14)$$

onde  $\mu$  deve estar entre 0 e 1 e  $A$  é uma constante dado por:

$$A = \frac{e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m}. \quad (2.15)$$

Ressalta-se que para uma dada frequência, o índice de refração diminui com o aumento da densidade eletrônica. Na ionosfera, o aumento da densidade eletrônica com a altura faz com que  $\mu$  tenda a ficar com valores decrescentes a partir de 1 até anular-se em algum ponto do perfil vertical. Neste ponto a onda incidente é refletida, visto que nessa situação a sua frequência é igual a frequência do plasma. Dessa forma, a utilização da [Equação 2.14](#) permite determinar aproximadamente a densidade eletrônica do plasma na região onde a onda foi refletida. Substituindo na [Equação 2.14](#) os valores das constantes em unidades do Sistema Internacional (S.I.), encontra-se:

$$N_e \approx \frac{f^2}{80,6}. \quad (2.16)$$

Neste caso,  $f$  é atribuída em Hz e  $N_e$  em  $\text{m}^{-3}$ . Alternativamente, pode-se encontrar a mesma equação na forma  $N_e \approx 1,24 \times 10^4 f^2$ , onde  $f$  é atribuída em MHz e  $N_e$  em  $\text{cm}^{-3}$ .

Pelo exposto, o índice de refração sempre será real em um plasma não colisional e desmagnetizado. Entretanto, considerando um plasma colisional e magnetizado, o índice de refração sempre deve assumir valores complexos. Neste caso, a parte real descreve a propagação de fase da onda enquanto a parte imaginária descreve a atenuação pelo meio ionizado ([HINES, 1965](#)). Para demonstrar esta última afirmação, considera-se a seguinte equação para uma onda eletromagnética:

$$E = E_0 \exp i(\omega t - \frac{\omega n x}{c}). \quad (2.17)$$

Incluindo a definição do índice de refração na [Equação 2.17](#), encontra-se:

$$E = E_0 \exp(\frac{\omega \chi x}{c}) \exp i(\omega t - \frac{\omega \mu x}{c}), \quad (2.18)$$

na qual:  $E$  é o campo elétrico da onda após passar pelo meio ionizado,  $E_0$  é a intensidade do campo elétrico original,  $-\omega \chi/c$  é chamado de coeficiente de absorção ( $\kappa$ , em unidades de Nepers por metro) e  $x$  é o comprimento de uma coluna ionizada.

### 2.4.2 Absorção Ionosférica de Ondas Eletromagnéticas

Outra forma de entender o coeficiente de absorção ( $\kappa$ ) é como sendo uma medida do decaimento da amplitude por unidade de distância (DAVIES, 1965). Portanto se uma onda se propaga de  $l_2$  para  $l_1$  no meio ionizado a sua atenuação será dada por:

$$At_{l_1}^{l_2} = \exp\left(-\int_{l_1}^{l_2} \kappa dx\right). \quad (2.19)$$

A partir da Equação 2.19, verifica-se que dois tipos de absorção podem ocorrer: a absorção desviadora e a absorção não-desviadora. A absorção desviadora ocorre quando  $\mu$  tende a zero e o coeficiente de absorção resume-se a:

$$\kappa = \frac{\nu}{2c} \left( \frac{1}{\mu} - \mu \right). \quad (2.20)$$

O outro tipo de absorção, conhecida como absorção não-desviadora, ocorre quando  $\mu$  é aproximadamente unitário. Para demonstrar a existência dessa absorção, considera-se a absorção ionosférica de uma onda de rádio que se propaga ao longo do campo geomagnético. Neste caso  $Y_T = 0$  e a Equação 2.8 se torna:

$$n^2 = (\mu - i\chi)^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ \pm |Y_L|}. \quad (2.21)$$

Separando a Equação 2.21 em partes real e imaginária, tem-se:

$$(\mu^2 - 2i\mu\chi - \chi^2) = 1 - \frac{X(1 \pm |Y_L|)}{(1 \pm |Y_L|)^2 + Z^2} - i \frac{XZ}{(1 \pm |Y_L|)^2 + Z^2}. \quad (2.22)$$

Na Equação 2.22, a parte real é:

$$\mu^2 - \chi^2 = 1 - \frac{X(1 \pm |Y_L|)}{(1 \pm |Y_L|)^2 + Z^2}, \quad (2.23)$$

enquanto que a parte imaginária torna-se:

$$2\mu\chi = \frac{XZ}{(1 \pm |Y_L|)^2 + Z^2}. \quad (2.24)$$

Substituindo  $\chi$ ,  $X$ ,  $Z$ ,  $\omega_P$ , e  $Y_L$ , definidos anteriormente na [Equação 2.24](#), obtêm-se o coeficiente de absorção não-desviadora, dado por:

$$\kappa = \frac{e^2}{2m c\epsilon_0} \frac{1}{\mu} \frac{N_e\nu}{\nu^2 + (\omega \pm \omega_H \cos\theta)^2}. \quad (2.25)$$

Portanto, foram definidos: o índice de refração para um plasma não colisional e desmagnetizado, o índice de refração para o plasma colisional e magnetizado e as absorções desviadoras e não desviadoras. A seguir a maneira usualmente utilizada por operadores de riômetros para o cálculo da absorção ionosférica do ruído cósmico é apresentada com considerações de quais tipos de absorção são relevantes em médias e baixas latitudes, comparadas com altas latitudes.

### 2.4.3 Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico

O cálculo da absorção ionosférica do ruído cósmico (do inglês *Cosmic Noise Absorption* - CNA), determinado a partir de dados de riômetro é usualmente obtido pela razão entre dois sinais eletromagnéticos genéricos  $\Lambda$  e  $\Omega$  da forma:

$$CNA_{Np} = \log_e \frac{\Lambda}{\Omega}. \quad (2.26)$$

Neste caso a CNA é expressa em Nepers. Contudo, a forma mais usual é expressa em termos da relação de potências dada em dB, sendo que os logaritmos neperianos são substituídos pelo logaritmo na base 10, resultando na [Equação 2.27](#):

$$CNA_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\Lambda}{\Omega}. \quad (2.27)$$

O termo 10 que antecede o logaritmo é devido à consideração do sinal na forma de potência em contra partida ao equivalente sinal em Ampères.

Substituindo os valores de “m”, “c”, “e”, e  $\epsilon_0$ , usando unidades do Sistema Internacional de Unidades (S.I.) na [Equação 2.25](#), a absorção total ( $A_T$ ) de uma onda de



rádio atravessando uma coluna ionizada  $x$ , em dB, é dada pela Equação 2.28:

$$A_T = 4,6 \times 10^{-5} \int_{l_1}^{l_2} \frac{N_e \nu}{\nu^2 + (\omega \pm \omega_H \cos \theta)^2} dx. \quad (2.28)$$

Portanto, a absorção total dada pela Equação 2.28 é proporcional ao produto da densidade eletrônica  $N_e$  pela frequência de colisão entre elétrons e outras partículas presentes no meio, e os limites de integração envolvem uma coluna reta através da ionosfera. A Figura 2.4 apresenta um exemplo da variação da frequência de colisão ( $\nu$ ), densidade eletrônica ( $N_e$ ) e o produto  $N_e \nu$ . Nota-se que o produto dessas duas grandezas é diretamente proporcional a absorção total das ondas de rádio.

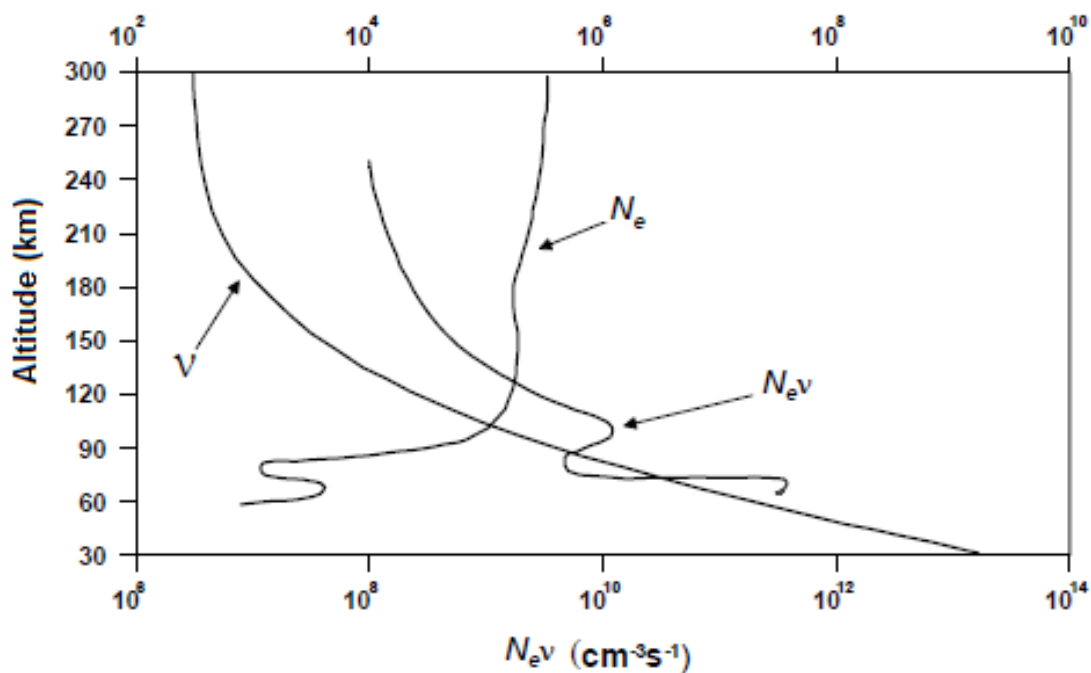


Figura 2.4 - Variação com a altura da frequência de colisão dos elétrons  $\nu$ , densidade eletrônica  $N_e$  e o produto  $N_e \nu$ , o qual é uma medida da absorção não-desviativa de uma onda de rádio que passa através da região ionosférica D e E.  
Fonte: Adaptada de Davies (1990).

De posse da Equação 2.28 e considerando os gráficos da Figura 2.4 verifica-se que as colisões entre elétrons e partículas neutras ( $\nu_{en}$ ) são relevantes para o cálculo da absorção do ruído cósmico em alturas que correspondem às regiões D e E ionosféricas.

Em contra partida, as colisões entre elétrons e íons ( $\nu_{ei}$ ) são mais importantes na região F da ionosfera. Como visto na [Figura 2.4](#), o produto de  $N_e\nu$  se maximiza em altitudes correspondentes às regiões D e E, onde  $\nu_{en}$  é mais importante. Lembrando da relação entre pressão e densidade, pode-se afirmar que a variação da densidade eletrônica da região D é detectada como variação na absorção do ruído cósmico recebido por riômetros, considerando que a pressão varie pouco ([HARRICH et al., 2000](#)).

A partir da análise da absorção relativa em cada uma das camadas ionosféricas, [Mitra e Shain \(1953\)](#) mostraram que a absorção total do ruído cósmico pode ser dividida em duas componentes. A primeira é atribuída à absorção na região D e a outra à região F. Algumas vezes a absorção do ruído cósmico na região F não é levada em consideração, pelo fato da frequência crítica da camada F2 ( $f_0F2$ ) ser de 5 a 10 vezes menor que a frequência de operação dos riômetros.

No entanto, [Ramanathan et al. \(1961\)](#), [Abdu et al. \(1967\)](#) e [Kressman \(1974\)](#) sugerem que a absorção na região F devida a  $\nu_{ei}$  pode ser tão significativa quanto a absorção que ocorre nas regiões D e E, quando  $f_0F2$  for maior que 7 MHz. Seus estudos foram baseados em medidas realizadas por riômetros e ionossondas instalados em sítios localizados em baixas latitudes geomagnéticas. Os resultados mostraram que a contribuição da região F na absorção total do ruído cósmico é proporcional a  $(f_0F2)^4$ , entre outros fatores.

Finalmente, considerando a relação do parâmetro  $(f_0F2)^4$  com a absorção do ruído cósmico, pode-se discutir a variação da absorção latitudinal. Sabe-se que  $f_0F2$  mostra um máximo em torno de  $15^\circ$  de latitude magnética e diminui aproximadamente pela metade entre  $15^\circ$  e  $60^\circ$  de latitude magnética. O decréscimo correspondente na absorção do ruído cósmico na região F é em torno de  $1/16$ . No entanto, essa variação latitudinal não ocorre na componente de absorção na região D. Portanto, a contribuição da atenuação total do ruído cósmico na região F é máxima em latitudes geomagnéticas perto de  $15^\circ$ , diminuindo rapidamente para altas latitudes geomagnéticas ([ABDU, 1966](#)). Nas regiões polares, as medidas realizadas com riômetros são dominadas pelas absorções na região D, decorrentes da precipitação de partículas energéticas ([ROSENBERG et al., 1993](#)).

## 2.5 Frequências de Colisão de Elétrons com Partículas Neutras e Íons

Dada a importância das frequências de colisão entre elétrons e partículas neutras discutidas na Seção 2.4, a variação dessa grandeza com a altura (e sua relação com a temperatura) é explorada com maiores detalhes nesta seção, especialmente pelo papel que desempenha na atenuação de ondas de rádio. Com relação às frequências colisionais entre elétrons-moléculas neutras ( $\nu_{en}$ ), elétrons-íons ( $\nu_{ei}$ ) e íons-moléculas neutras ( $\nu_{in}$ ), Chapman (1956) apresentou as seguintes equações:

$$\nu_{en} = 5,4 \times 10^{-10} N_n T^{1/2}, \quad (2.29)$$

$$\nu_{ei} = [34 + 4,18 \log_{10}(T^3/N_e)] N_e T^{-3/2}, \text{ e} \quad (2.30)$$

$$\nu_{in} = 2,6 \times 10^{-9} (N_e + N_n) W^{-1/2}. \quad (2.31)$$

Neste conjunto de equações, os sub-índices  $e$ ,  $i$ ,  $n$  denotam elétrons, íons e partículas neutras, respectivamente;  $W$  é o peso molecular de íons e partículas neutras (considerados iguais);  $T$  é a temperatura de todos os constituintes (consideradas iguais);  $N_e$  é a densidade eletrônica e  $N_n$  é a densidade das partículas neutras.

A partir das Equações 2.29 e 2.30 nota-se que  $\nu_{ei}$  é proporcional a  $T^{-3/2}$ , enquanto  $\nu_{en}$  é proporcional a  $T^{1/2}$ . Portanto, se a temperatura aumenta durante o dia, a frequência de colisão  $\nu_{ei}$  irá diminuir, enquanto que a frequência  $\nu_{en}$  irá aumentar. Os valores de  $\nu_{ei}$ ,  $\nu_{en}$  e  $\nu_{in}$  em época de mínima atividade solar foram estimados por Martyn (1959) como sendo:  $\nu_{ei} = 880 \text{ s}^{-1}$ ;  $\nu_{en} = 2300 \text{ s}^{-1}$ ; e  $\nu_{in} = 96 \text{ s}^{-1}$ , para a altura do pico de densidade eletrônica da camada F1 da ionosfera. Para 300 km de altura, os valores das frequências de colisão são:  $\nu_{ei} = 900 \text{ s}^{-1}$ ;  $\nu_{en} = 40 \text{ s}^{-1}$ ; e  $\nu_{in} = 1,1 \text{ s}^{-1}$ .

Como visto, nas alturas da camada F1 a frequência de colisão entre elétrons e partículas neutras ( $\nu_{en}$ ) é mais importante. Em contra partida, em alturas da camada F2 a frequência de colisão de elétrons com íons ( $\nu_{in}$ ) é predominante.



### 3 A ANOMALIA MAGNÉTICA DA AMÉRICA DO SUL E A PRECIPITAÇÃO DE PARTÍCULAS ENERGÉTICAS

No [Capítulo 3](#) são apresentados os conceitos e definições fundamentais para o entendimento da precipitação de partículas energéticas na região da AMAS e os seus efeitos na baixa ionosfera. Também são abordados os conceitos relacionados ao campo geomagnético, movimento de partículas energéticas e cinturões de radiação de Van Allen bem como uma revisão do atual conhecimento científico relacionado à precipitação de partículas energéticas na AMAS.

#### 3.1 O Campo Geomagnético e o Movimento de Partículas Carregadas

O campo geomagnético está exposto às partículas do vento solar que se aprisionam na região denominada de magnetosfera. Nesta região, os movimentos de partículas carregadas são dominados pela presença do campo magnético da Terra e as principais partículas energéticas presentes são prótons e elétrons. Em quantidade bem menor há partículas alfa e núcleos pesados.

O campo magnético da Terra é uma grandeza vetorial que varia no espaço ( $\vec{r}$ ) e no tempo ( $t$ ) e pode ser entendido como um campo magnético composto por diversos campos, cujas origens são diferentes: campo principal, campo crustal e o campo induzido por correntes.

- a) O campo principal ( $\vec{B}_m$ ) é gerado por correntes que circulam na parte externa do núcleo da Terra (veja [Equação 3.1](#)). É a componente dominante do campo geomagnético, representando mais de 95% da sua intensidade.
- b) O campo crustal ( $\vec{B}_c$ ), da crosta/manto da Terra, decorre das rochas magnetizadas. Ele varia espacialmente e pode ser considerado constante no tempo.
- c) O campo induzido por correntes ( $\vec{B}_d$ ) é devido a correntes que circulam na ionosfera e magnetosfera, incluindo correntes elétricas na crosta terrestre, variando no espaço e tempo ([MCLEAN et al., 2004](#)).

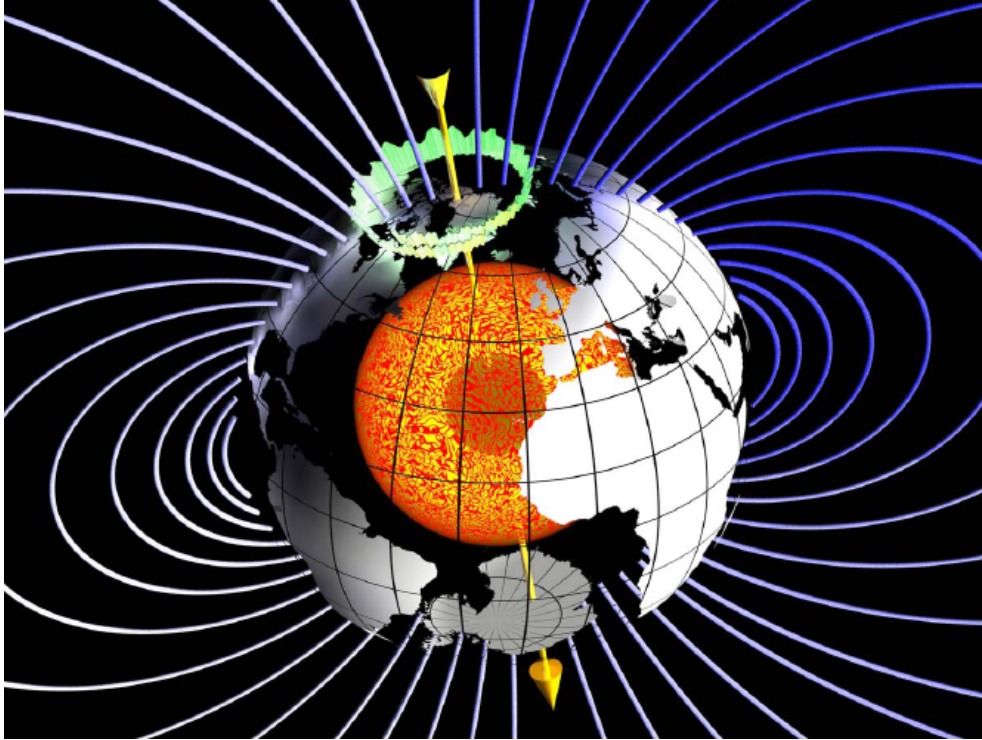


Figura 3.1 - Campo magnético principal gerado pela circulação de correntes na região entre o manto inferior e parte externa do núcleo da Terra.

Fonte: (MCLEAN et al., 2004).

Portanto, o campo geomagnético observado é a soma das contribuições:

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_m(\vec{r}, t) + \vec{B}_c(\vec{r}) + \vec{B}_d(\vec{r}, t). \quad (3.1)$$

Em uma primeira aproximação, o campo geomagnético pode ser representado como um campo dipolar, com o eixo de dipolo deslocado aproximadamente  $11,5^\circ$  do eixo de rotação da Terra. Pela teoria dipolar, a intensidade do campo magnético da Terra é dada por (HESS, 1968):

$$B(r, \varsigma) = \frac{M_D}{r^3} [1 + 3\text{sen}^2 \varsigma]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.2)$$

onde:  $B$  é a intensidade do campo geomagnético;  $r$  é a distância radial ao centro da Terra;  $\varsigma$  é a latitude magnética; e  $M_D$  é o momento de dipolo da Terra.

Para descrever o movimento de partículas energéticas confinadas no campo geomagnético, é geralmente utilizado o sistema B-L de coordenadas. Nesse sistema, o campo magnético na aproximação multipolar é, aproximadamente, equivalente a um campo dipolar (MCILWAIN, 1961). O sistema utiliza como unidades a intensidade do campo magnético ( $B$ ) e o parâmetro  $L$ , denominado parâmetro de McIlwain ou *shell parameter*. A definição do parâmetro de McIlwain pode ser encontrada em McIlwain (1961). O parâmetro representa a generalização da distância equatorial de uma linha de campo ao centro da Terra. Portanto, um par de valores  $B$  e  $L$  definem um anel ao redor do planeta Terra.

A equação geral que descreve o movimento de uma partícula carregada em relação a um dado referencial, em um campo magnético, em termos da força de Lorentz é (HESS, 1968):

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = q \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B} \right) + m\vec{g}, \quad (3.3)$$

onde  $q$  é a carga da partícula elétrica;  $m$  é a massa da partícula;  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico;  $\vec{B}$  é o vetor campo magnético; e  $\vec{g}$  é o vetor aceleração da gravidade.

Utilizando uma solução aproximada, é possível decompor o movimento de uma partícula em três componentes simples:

- a) movimento periódico da partícula em torno das linhas de campo (movimento ciclotrônico);
- b) movimento de ida e volta ao longo de uma linha de campo magnético (movimento de *bouncing*); e
- c) movimento periódico ao longo de uma superfície fechada, feita de linhas de campo magnético (movimento de *drift*).

Uma ilustração das direções e sentidos dos três movimentos possíveis das partículas carregadas aprisionadas no campo magnético da Terra descritos acima é apresentada na Figura 3.2.

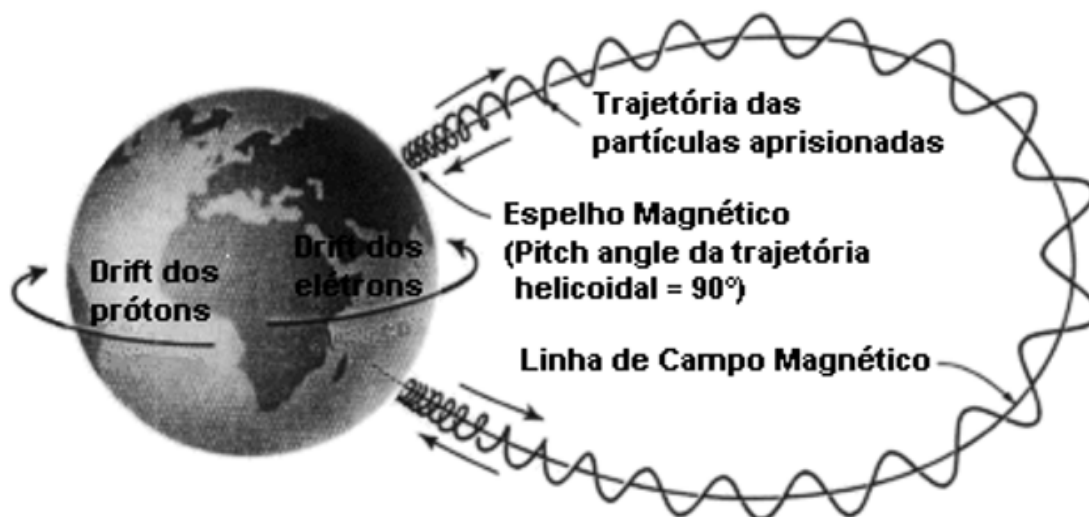


Figura 3.2 - Ilustração das direções e sentidos dos movimentos periódicos de uma partícula carregada aprisionada no campo magnético da Terra: (1) movimento ciclotrônico; (2) movimento de *bouncing*; (3) movimento de *drift* em torno da Terra, com elétrons apresentando deriva para leste e prótons para oeste. Fonte: Adaptada de Hess (1968).

O movimento ciclotrônico é representado pela trajetória espiralada da partícula em torno da linha de campo magnético representada à direita do globo na Figura 3.2, enquanto o movimento de *bouncing* é indicado pelas setas que mostram o trajeto das partículas oscilando entre os dois hemisférios. O movimento de *drift* está indicado pelas setas com sentido leste e oeste sobre o globo desenhado na Figura 3.2.

Se for possível definir um sistema de referência no qual uma partícula descreve uma órbita periódica perpendicular ao campo magnético, o movimento periódico da partícula em torno da linha de campo existe em qualquer instante de tempo. Quando este sistema de referência for encontrado, ele é chamado de sistema do centro de guia. Neste caso, o movimento das partículas carregadas pode ser considerado como a superposição de dois movimentos. O primeiro deles é o deslocamento do seu centro de guia ao longo da linha de campo magnético. O segundo movimento é o ciclotrônico.



### 3.1.1 Movimento Ciclotrônico

O movimento ciclotrônico, na aproximação do centro de guia, é um movimento de giro circular, perpendicular e ao redor da linha de campo magnético. Associado a este movimento define-se um período ciclotrônico  $T_C$  que é o intervalo de tempo gasto pela partícula para realizar uma volta completa em torno da linha de campo magnético. Também associado ao movimento ciclotrônico define-se um raio ciclotrônico  $R_C$ , que é a distância da partícula ao centro de guia. As grandezas  $T_C$  e  $R_C$  são dadas pelas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente:

$$T_C = 2\pi \frac{m}{qB}, \quad (3.4)$$

$$R_C = \frac{mV_{\perp}}{qB} = \frac{mV \operatorname{sen}\alpha}{qB}, \quad (3.5)$$

Nas Equações 3.4 e 3.5  $V_{\perp}$  é a componente da velocidade na direção perpendicular ao vetor campo magnético  $\vec{B}$  e  $\alpha$  é o ângulo entre  $\vec{V}$  e  $\vec{B}$ , conhecido como *pitch angle* da partícula.

Relacionado ao movimento ciclotrônico tem-se o momento magnético, o qual é o primeiro invariante adiabático e é definido como:

$$\mu_m = \frac{mV_{\perp}^2}{2B} \quad (3.6)$$

cujas condições são  $R_C \ll D_{CA}$  e  $T_C \ll T_{CA}$ .  $D_{CA}$  é a distância característica na qual o campo magnético muda apreciavelmente e  $T_{CA}$  é o tempo característico no qual o campo magnético muda apreciavelmente.

### 3.1.2 Movimento ao Longo da Linha de Campo

O *pitch angle* de uma partícula varia com a posição da partícula ao longo da linha de campo, de modo que a velocidade da partícula pode ser decomposta nas componentes paralela e perpendicular a linha de campo. Dessa forma, ao mesmo tempo em que a partícula descreve o movimento ciclotrônico, ela irá se mover ao longo da linha de campo magnético. Devido ao momento magnético ser constante, assim como a energia cinética da partícula, obtém-se da [Equação 3.6](#) que:

$$\frac{\text{sen}^2\alpha}{B} = \text{constante.} \quad (3.7)$$

Uma partícula que penetra em regiões onde  $\vec{B}$  está crescendo terá obrigatoriamente  $\text{sen}^2\alpha$  aumentado até o valor na qual  $\alpha = 90^\circ$ , mantendo a razão apresentada do lado esquerdo da [Equação 3.7](#) constante. No ponto em que  $\alpha = 90^\circ$ , a componente paralela a  $\vec{B}$  se anula e a partícula possui somente componente perpendicular da velocidade. Este ponto é chamado de espelho magnético ( $S_1$ ). A partir de  $S_1$  a energia cinética da partícula disponível na componente perpendicular da velocidade é devolvida para a componente longitudinal no sentido contrário. A partícula inicia o movimento de volta ao longo da linha de campo até encontrar um valor de  $\vec{B}$  que anule sua velocidade paralela no outro espelho magnético ( $S_2$ ). Os dois espelhos magnéticos são ditos pontos conjugados de reflexão. A partícula que apresenta essas condições é dita estar aprisionada no campo geomagnético e poderia ficar oscilando por um longo período de tempo se não ocorressem perdas de energia.

Para uma partícula confinada entre dois espelhos magnéticos, pode-se definir um período de *bouncing* ( $T_B$ ) como sendo o intervalo de tempo que uma partícula leva para transitar entre dois espelhos magnéticos e retornar ao primeiro. Considerando um sistema conservativo, a partícula deverá atingir este ponto com o mesmo vetor velocidade. Portanto:

$$T_B = 2 \int_{S_1}^{S_2} \frac{dl}{V_{\parallel}}. \quad (3.8)$$

Na Equação 3.8,  $S_1$  e  $S_2$  são as posições dos pontos de espelhamento na linha de campo magnético;  $l$  é o comprimento medido sobre a linha de campo magnético, a partir do equador; e  $V_{\parallel}$  é a componente paralela da velocidade da partícula. Para as condições do campo magnético terrestre o período de *bouncing* é sempre maior que o período ciclotrônico, tendo valores típicos em torno de segundos.

Associado ao movimento de *bouncing* tem-se um invariante adiabático denominado invariante longitudinal ou segundo invariante adiabático, o qual é identificado por  $J$  e é dado pela Equação 3.9:

$$J = 2 \int_{S_1}^{S_2} mV_{\parallel} dl. \quad (3.9)$$

Do mesmo modo que para o momento magnético, o invariante longitudinal será constante sob a condição que  $T_B \ll T_{CA}$  (descrito na Seção 3.1.2).

### 3.1.3 Movimento de *Drift*

O movimento de deriva é o terceiro movimento periódico das partículas associado com a presença do campo geomagnético. A velocidade de deriva das partículas é descrita da forma:

$$V_D = \frac{1}{e} \frac{\vec{F}_{\perp} \times \vec{B}}{B^2}, \quad (3.10)$$

onde  $F_{\perp}$  é a componente da força  $\vec{F}$  perpendicular a  $\vec{B}$ . As demais grandezas foram definidas anteriormente. Para o caso do campo geomagnético, haverá velocidade de deriva devida ao gradiente e à curvatura de  $\vec{B}$  ( $V_{GC}$ ), que é dada por (BITTENCOURT, 2004):

$$V_{GC} = -\frac{m(V_{\parallel}^2 + \frac{1}{2}V_{\perp}^2)(\frac{1}{2}\nabla B^2) \times \vec{B}}{qB^4}. \quad (3.11)$$

Em analogia aos outros dois movimentos é possível definir um período de *drift*, como sendo o intervalo de tempo necessário para que uma dada partícula dê uma volta completa ao redor da Terra. Este período é dado por:

$$T_D = \int \frac{dx}{V_D}. \quad (3.12)$$

Neste caso  $x$  representa o comprimento ao longo de uma linha fechada ao redor da Terra. Considerando as condições do campo geomagnético, o período de *drift* sempre será maior que o período de *bouncing*, tendo valores típicos em torno de horas.

Associado ao movimento de deriva do centro guia está o terceiro invariante adiabático, chamado de invariante de fluxo ( $\phi$ ). Para o invariante de fluxo ser um invariante adiabático ( $\phi$  constante) através do anel definido pelo par de valores B e L ao redor do planeta Terra, é necessário que  $T_D \ll T_{CA}$ .

### 3.2 Cinturões de Radiação de Van Allen

Os cinturões de radiação de Van Allen são essencialmente uma vasta região com partículas energéticas aprisionadas em torno do planeta Terra (MCDONALD; NAUGLE, 2008). A partir de investigações com sondas espaciais sabe-se que existem dois cinturões de radiação. O cinturão interno se estende de aproximadamente 1000 a 6000 km, em baixas latitudes. O cinturão externo se estende por mais de seis raios terrestres no plano equatorial (VAN ALLEN, J. A.; FRANK, 1959). As observações com as sondas espaciais demonstraram que os espectros de energia para os prótons e os elétrons são diferentes nos cinturões interno e externo (VAN ALLEN, J. A., 1959).

Segundo Pizzella et al. (1962), a fonte dominante de partículas energéticas nos cinturões de radiação é o vento solar. Outras fontes de menor importância são os raios cósmicos galácticos, mésons- $\mu$  produzindo elétrons e prótons solares. No cinturão interno, as partículas são principalmente dominadas por prótons com energia na faixa de 0,1 MeV e 40 MeV, enquanto que no cinturão externo a componente energética é praticamente formada por elétrons com energia na faixa de keV a MeV (KOSKINEN, 2008).

### 3.3 Anomalia Magnética da América do Sul

Dados obtidos a partir de magnetômetros distribuídos globalmente em observatórios magnéticos possibilitam a elaboração de cartas e modelos cada vez mais precisos do campo geomagnético e suas variações. O modelo de dipolo centrado apresenta uma representação simplificada do campo magnético da Terra. Contudo, o campo geomagnético real é uma estrutura bastante complexa que dá origem a uma série de anomalias na distribuição da intensidade do campo a baixas altitudes. Uma das anomalias conhecidas é a denominada Anomalia Magnética da América do Sul (também conhecida como Anomalia Magnética do Atlântico Sul) (AMAS). A AMAS tornou-se evidente em mapas magnéticos desde o início do século XX (CHAPMAN; BARTELS, 1940) e caracteriza-se pelo valor mínimo da componente total do campo geomagnético.

A componente total do campo geomagnético simulado com o modelo *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) para uma porção do globo terrestre utilizando parâmetros do ano de 2010 é apresentada na [Figura 3.3](#). Dentro dos limites da [Figura 3.3](#), o menor valor da intensidade total do campo geomagnético define a posição do centro da AMAS que atualmente está localizada no Paraguai. Em termos do parâmetro L, a AMAS está contida aproximadamente entre 1,12 e 1,25 no hemisfério sul.

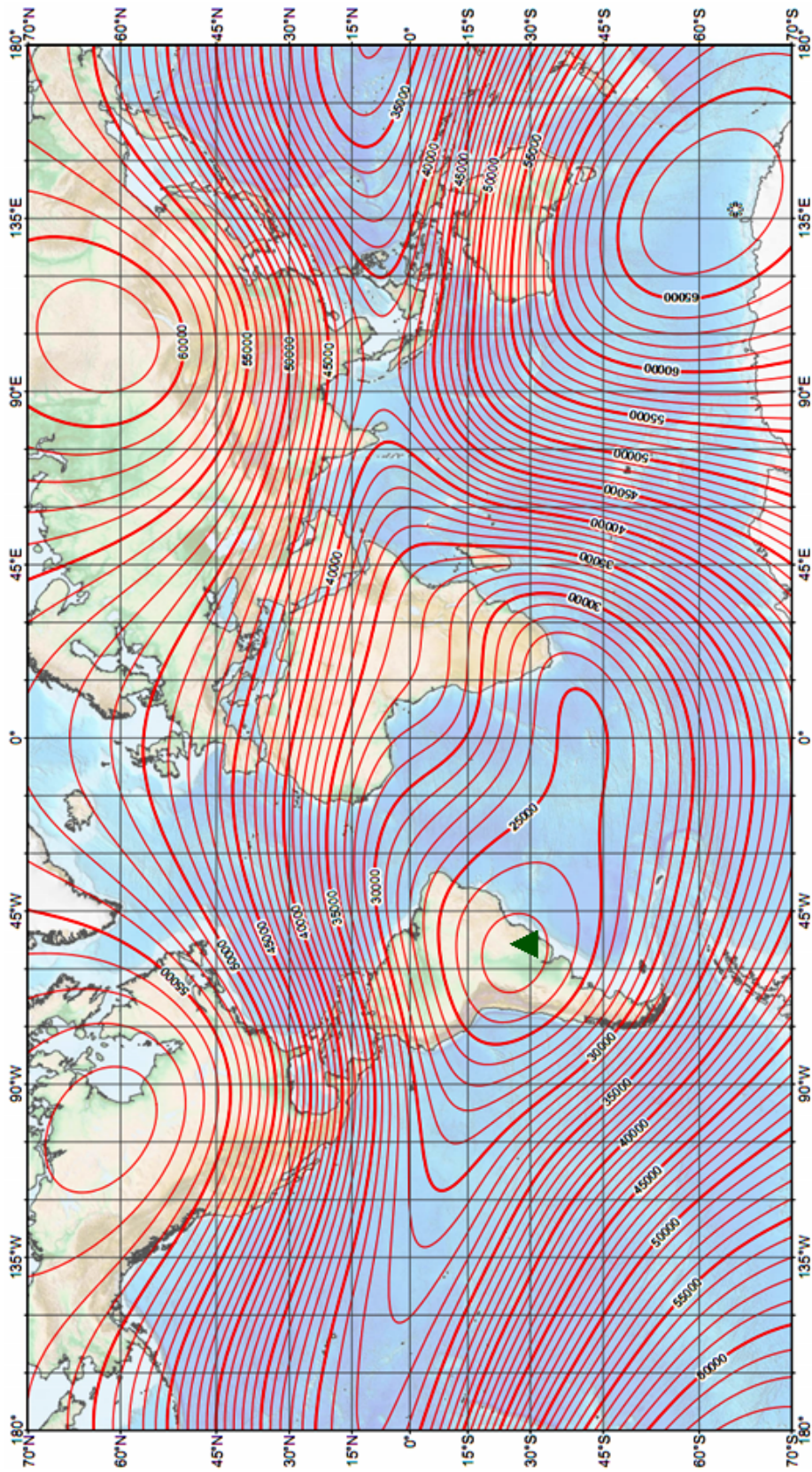


Figura 3.3 - Distribuição da intensidade do campo magnético total, representada por isolinhas, para o globo terrestre utilizando o Modelo Magnético Mundial WMM2010-2015. O triângulo verde identifica a região do Observatório Espacial do Sul, no sul do Brasil, que apresenta um dos menores valores da intensidade do campo magnético total, aproximadamente 22,650 nT com taxa de decréscimo na razão de aproximadamente 26 nT/ano. As unidades para a intensidade do campo magnético total estão em nanoTesla (nT).

Fonte: Adaptada de Maus et al. (2010).

Na região da AMAS as partículas energéticas têm pontos de espelhamento em altitudes menores, devido à baixa intensidade do campo geomagnético. Isso pode ser visto na Figura 3.4, a qual mostra um gráfico de altitude versus longitude das alturas do cone de perdas calculadas utilizando valores do campo geomagnético medido em 1975. No gráfico a linha horizontal mostra a altura do cone de perda para a região da AMAS no hemisfério sul. A linha contínua mostra a altitude do ponto de espelhamento da partícula durante o seu movimento de *bouncing* para o hemisfério sul, enquanto a linha tracejada oferece a mesma informação para a partícula no hemisfério norte. Ambas as linhas se referem ao movimento em torno de  $L = 1,8$ .

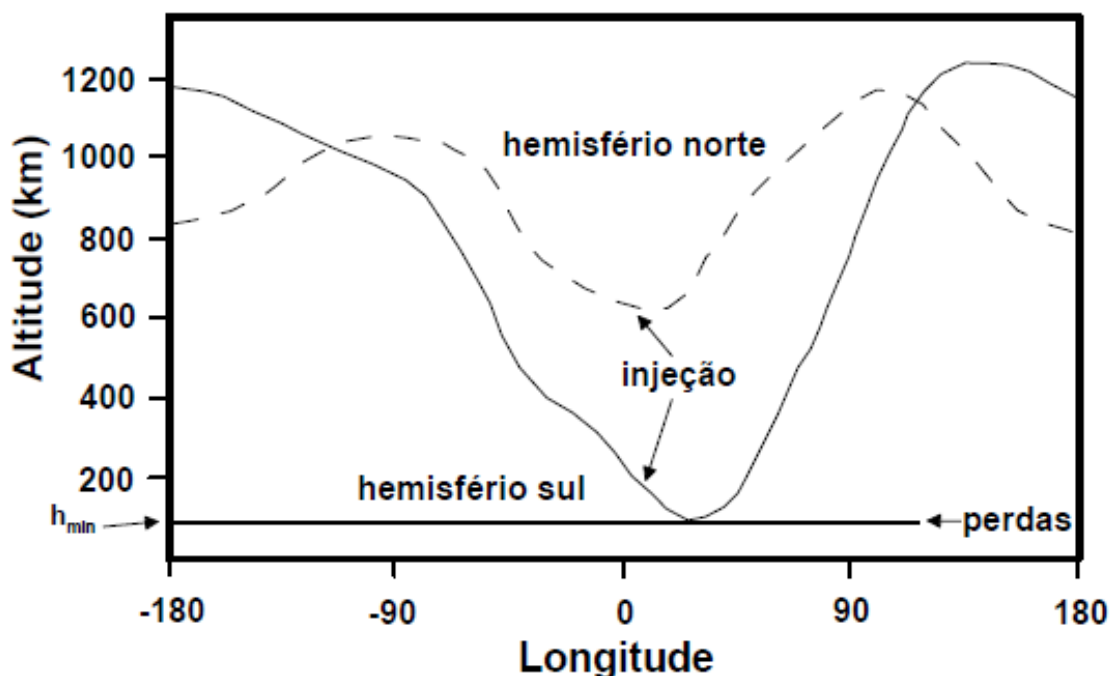


Figura 3.4 - Altitudes dos pontos de espelhamento para uma típica partícula em deriva em torno de  $L = 1,8$  calculadas utilizando valores do campo geomagnético medido em 1975. No hemisfério norte a partícula é refletida em altitudes em torno de 1000 km. Porém no hemisfério sul a partícula é refletida em torno de 100 km de altitude.

Fonte: Adaptada de Torr et al. (1975).

É importante salientar que conforme visto na [Figura 3.3](#), a posição central da AMAS está atualmente localizada em torno de 55° oeste. Porém, no ano de 1975 a posição central da AMAS estava a aproximadamente 30° leste. Assim, se as curvas apresentadas na [Figura 3.4](#) fossem recalculadas com os valores atuais do campo geomagnético, a posição longitudinal do mínimo na curva contínua da [Figura 3.4](#) estaria localizado em torno de 55° oeste.

Embora o ponto de espelhamento sempre se mantém em altitudes acima de 600 km no hemisfério norte (alturas onde a atmosfera é tênue), à medida que a partícula se desloca em direção a valores cada vez menores do campo geomagnético, suas alturas de espelhamento diminuem e chegam em torno de 100 km sobre a AMAS. A 100 km de altitude a densidade atmosférica é alta o suficiente para garantir a perda de energia dessas partículas por colisões, de modo que tais partículas são eficientemente removidas da magnetosfera, conduzindo a um aumento da precipitação de partículas na AMAS.

### 3.4 A Precipitação de Partículas Energéticas na AMAS

As primeiras evidências do aumento da precipitação de partículas energéticas na região da AMAS foram obtidas por medidas de instrumentos a bordo do satélite *Sputnik V* ([VERNOV et al., 1967](#)). A partir das medições, o interesse pela pesquisa relacionada na detecção da precipitação das partículas energéticas e os efeitos ionosféricos associados se intensificou.

[Abdu et al. \(1973\)](#) observaram aumento da ionização na região D da ionosfera devido à precipitação de partículas energéticas durante o início súbito de uma tempestade magnética intensa que ocorreu em agosto de 1972. Para tanto, eles utilizaram dados de um riômetro convencional operando em 30 MHz, instalado no Rádio Observatório de Itapetinga, Atibaia. No estudo foi detectada pela primeira vez uma deriva azimutal de aproximadamente 100 m/s das partículas que precipitaram. Os autores do trabalho inferiram que o movimento de deriva da distribuição espacial da absorção do ruído cósmico captada pelo riômetro está sujeito à deriva  $\vec{E} \times \vec{B}$ , além da deriva causada pelo gradiente de campo magnético na plasmasfera.

O fluxo de elétrons com energia de 40 keV foi estudado por [Torr et al. \(1975\)](#), utilizando dados obtidos a partir do satélite *Injun 3*. Eles estimaram teoricamente que o fluxo de elétrons precipitando em  $L = 2$  na região da AMAS chega a ser 35



vezes maior que a média do fluxo em  $L = 2$  no hemisfério norte. Segundo o estudo realizado, tal fato indicou que partículas com diferentes níveis energéticos depositam suas respectivas energias em diferentes alturas na atmosfera. No trabalho realizado por Gledhill (1976) foi considerado que elétrons com energia menor que 2 keV irão perder praticamente toda a sua energia na região F, enquanto aqueles com energia entre 2 keV e 40 keV perderão sua energia em alturas da região E e aqueles com energia maior que 40 keV terminarão por atingir alturas da região D.

No trabalho realizado por Abdu et al. (1981) foram analisados dados da velocidade de fase de ondas VLF<sup>1</sup> em 13,6 kHz transmitidas do Golfo Nuevo (43° S, 65° O), Argentina e captadas em Atibaia (23° S, 46° O), Brasil. No trabalho, a trajetória da onda eletromagnética ficou confinada dentro da AMAS. Os resultados mostraram que durante tempestades magnéticas houve avanços na velocidade de fase da onda VLF recebida em Atibaia. O resultado indicou que ocorreu um abaixamento do guia de onda superior (região D e E), onde a onda VLF é refletida. Entre suas conclusões, eles afirmaram que a diminuição em altura do guia de onda ocorreu devido ao aumento da ionização ionosférica devido à precipitação de partículas energéticas.

Uma revisão sobre os principais processos físicos relacionados com a precipitação de partículas energéticas foi publicada por Pinto Jr. e Gonzales (1989). Os processos físicos são: o espalhamento Coulomb, interações magnetosféricas onda-partícula, relâmpagos ou interações onda-partículas induzidas artificialmente, interações de ressonância de deriva e interações onda-partícula geradas por instabilidades no plasma.

Utilizando dados do riômetro imageador instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra - RS, Nishino et al. (2002) estudaram a evolução temporal da distribuição espacial da CNA durante a fase principal de uma intensa tempestade magnética ocorrida entre os dias 22 e 23 de setembro de 1999. Durante a tempestade geomagnética o índice Dst atingiu o valor mínimo de -164 nT. Os resultados do reprocessamento do mesmo conjunto de dados de Nishino et al. (2002) são apresentados nas imagens da CNA na Figura 3.5. Todas as imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico construídas a partir dos dados do riômetro imageador apresentadas na Dissertação possuem aproximadamente 330 km na direção norte-sul e leste-oeste e resolução espacial de  $20 \times 20$  km a 100 km de altitude. Na Figura 3.5, a intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada à direita da última imagem.

---

<sup>1</sup>Do inglês *Very Low Frequency* - 3 a 30 kHz

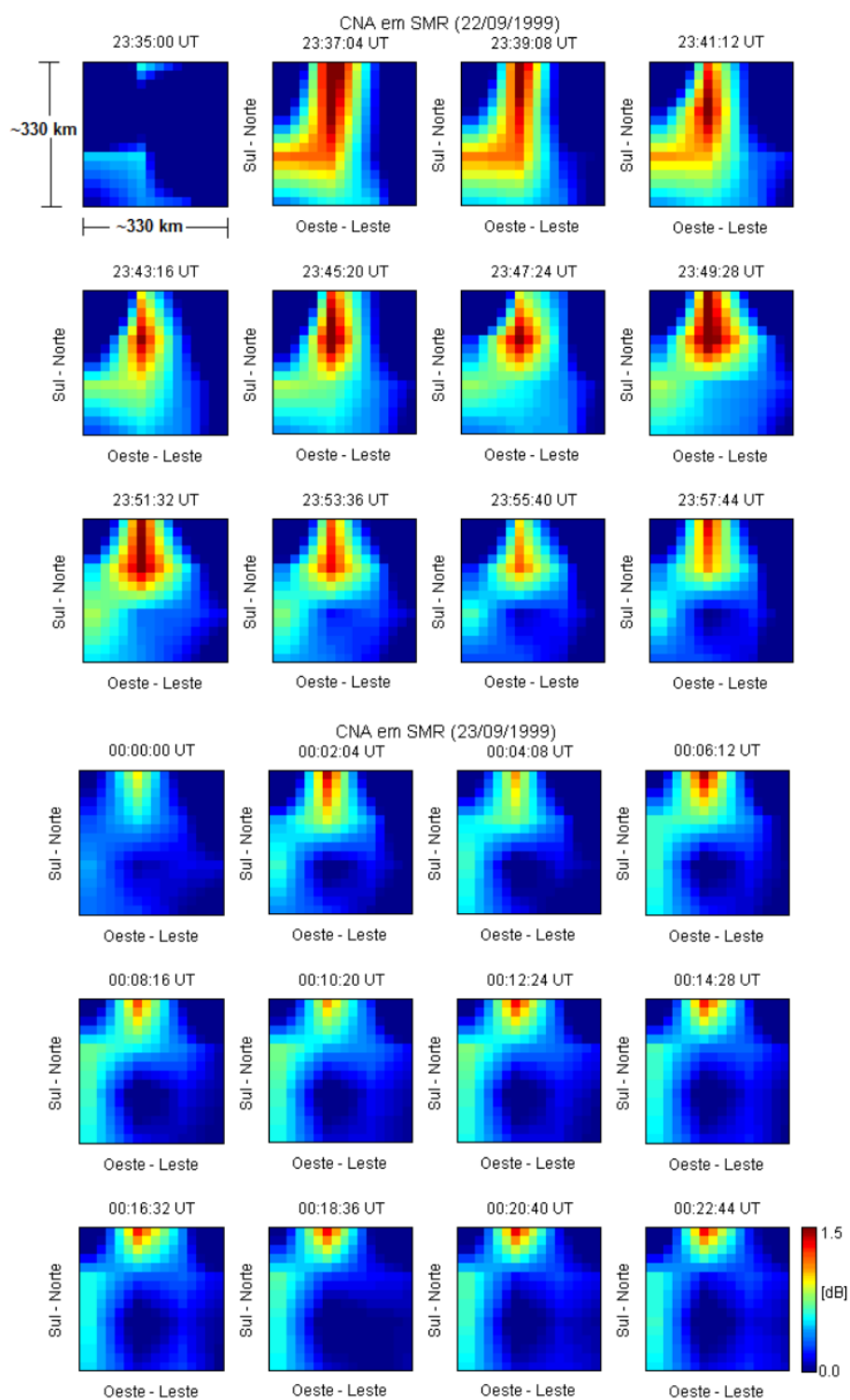


Figura 3.5 - Imagens da CNA durante a fase principal da tempestade geomagnética que ocorreu nos dias 22 e 23 de setembro de 1999, reprocessadas a partir dos dados do riômetro imageador instalado no OES.

Da [Figura 3.5](#) verifica-se que a distribuição espacial da CNA demonstra:

- a) uma estrutura laminar de absorção localizada ao norte do campo de visão do riômetro imageador, evidenciando uma extensão para sul e posterior recuo para norte; e
- b) uma estrutura alongada meridional e estreita longitudinalmente entre 100 e 150 km que está localizada do zênite para o sul do campo de visão do riômetro imageador.

As características da região de absorção foram interpretadas como sendo efeito da precipitação de elétrons energéticos na ionosfera da região da AMAS, associado com a ocorrência de sub-tempestades durante a intensa tempestade geomagnética de setembro de 1999. O cálculo da velocidade de deriva para leste da estrutura de absorção resultou em  $\approx 250$  m/s. Os elétrons precipitados foram estimados como tendo energia de  $\approx 20$  keV, supondo um campo elétrico de 1,8 mV/m. A comparação com dados de digissonda obtidos para os mesmos dias em que ocorreu a tempestade geomagnética mostrou que nenhum efeito da precipitação de elétrons energéticos foi detectado nos parâmetros ionosféricos analisados. Porém, a digissonda está instalada na Unidade Regional de Cachoeira Paulista, em Cachoeira Paulista - SP, distante aproximadamente 1000 km do OES, onde está instalado o riômetro imageador.

Utilizando dados do ruído cósmico do riômetro imageador e dados de satélites, [Nishino et al. \(2006\)](#) detectaram precipitação de prótons durante a tempestade do dia da Bastilha (14 de julho), que ocorreu em 15 e 16 de julho de 2000. Na fase principal da tempestade magnética, o índice Dst alcançou - 301 nT. Na tarde do dia 15 de julho foi observada fraca absorção nos dados coletados pelas 16 antenas do riômetro imageador. Na fase principal da tempestade, a absorção foi intensificada, mostrando uma estrutura de absorção com dimensões aproximadas de 150 km (largura latitudinal)  $\times$  330 km (largura longitudinal). Em seguida, a absorção foi intensificada e mostrou uma deriva para oeste de  $\approx 570$  m/s, como apresentadas nas imagens da [Figura 3.6](#), a qual foram obtidas através do reprocessamento do mesmo conjunto de dados obtidos do riômetro imageador instalado no OES.

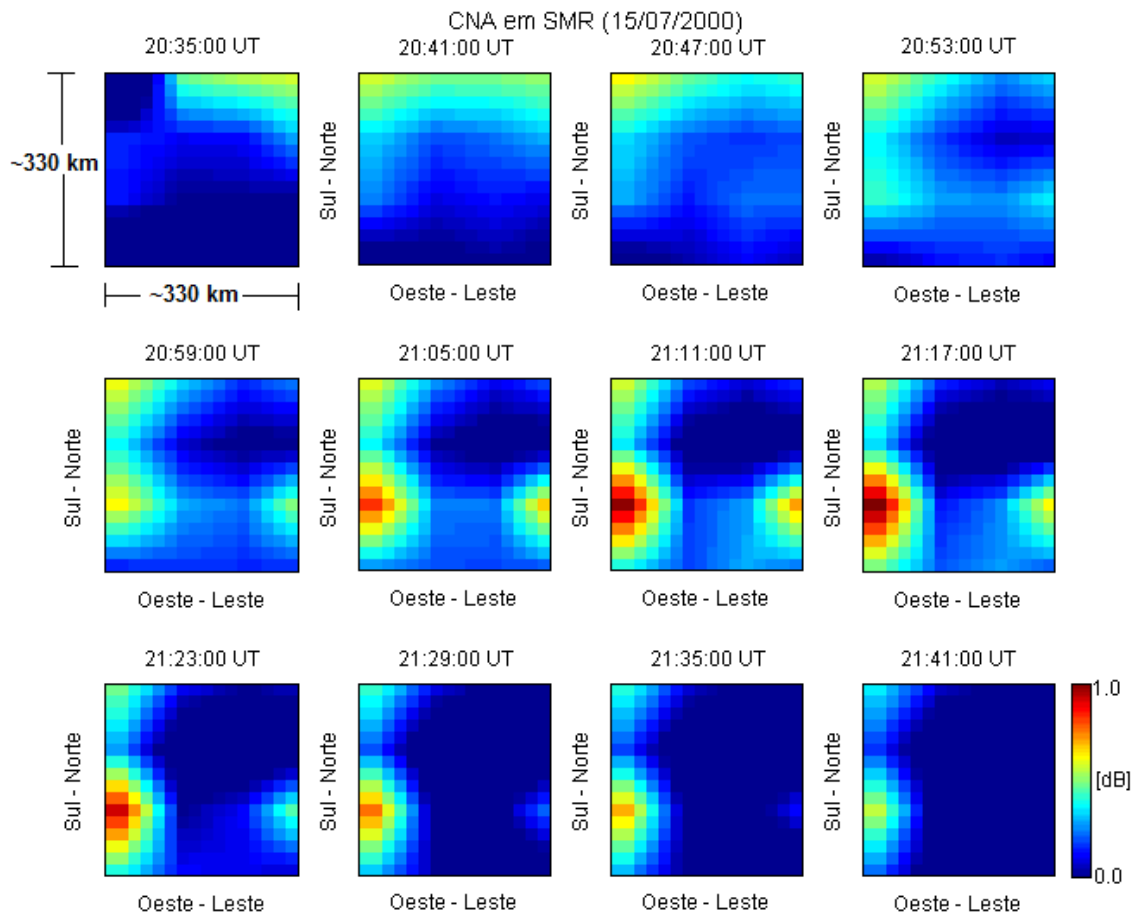


Figura 3.6 - Imagens da CNA durante a fase principal da tempestade do dia da Bastilha (14 de julho), que ocorreu no dia 15 de julho de 2000, reprocessadas a partir dos dados do riômetro imageador instalado no OES.

Dados de fluxos de partículas energéticas medidos com o satélite NOAA-15 ( $L = 6,6$ ) mostraram grande aumento de prótons de baixas energias (50 a 400 keV) e provavelmente elétrons (50 a 225 keV) durante a fase inicial da tempestade. Os dados obtidos pelo satélite NOAA-15 com órbita polar de aproximadamente 870 km de altitude mostraram aumentos no fluxo de partículas de baixas energias para dentro da região de  $L < 2$  durante a fase principal da tempestade geomagnética. Os resultados indicam que partículas de baixas energias localizadas no cinturão externo de radiação, associadas com a intensa tempestade geomagnética e sub-tempestades, foram transportadas para o cinturão de radiação interno através de processos convectivos devidos a campos elétricos induzidos durante o desenvolvimento da tempestade geomagnética. Deste modo Nishino et al. (2006) concluíram que as partículas precipitaram na ionosfera localizada na região da AMAS e a CNA foi causada pela precipitação de prótons com energia de 40 keV.

A região da AMAS apresenta características de baixas intensidades no campo magnético total e coincide com a região de intenso fluxo de partículas cósmicas. A AMAS atua como uma espécie de “janela” para a entrada de partículas energéticas (HEIRTZLER, 2002). Muitos problemas ocorrem com satélites e estações espaciais que orbitam a Terra na AMAS. Pode-se citar, como um exemplo, o problema detectado no *Measurements of Pollution in the Troposphere* (MOPITT), um dispositivo a bordo do satélite *Terra*. O MOPITT classifica saturações não realísticas (erros de medida) em suas medidas de duas formas: como “Evento Único de Aparelho” ou “Evento de Distúrbio Único” (NICHITIU et al., 2004). Na Figura 3.7 estão distribuídas as coordenadas geográfica onde estas saturações nas medições foram observadas pelo equipamento. A maior densidade de pontos coincide com a localização geográfica da AMAS. No caso considerado, 54% das saturações no equipamento ocorrem na região da AMAS, enquanto que apenas 26% ocorrem nas regiões polares. Os autores do trabalho atribuíram a origem da saturação medida no equipamento a duas fontes de partículas: partículas aprisionadas nos cinturões de radiação e eventos de partículas solares. A outra fração (cerca de 20%) foi atribuída pelos autores aos raios cósmicos.

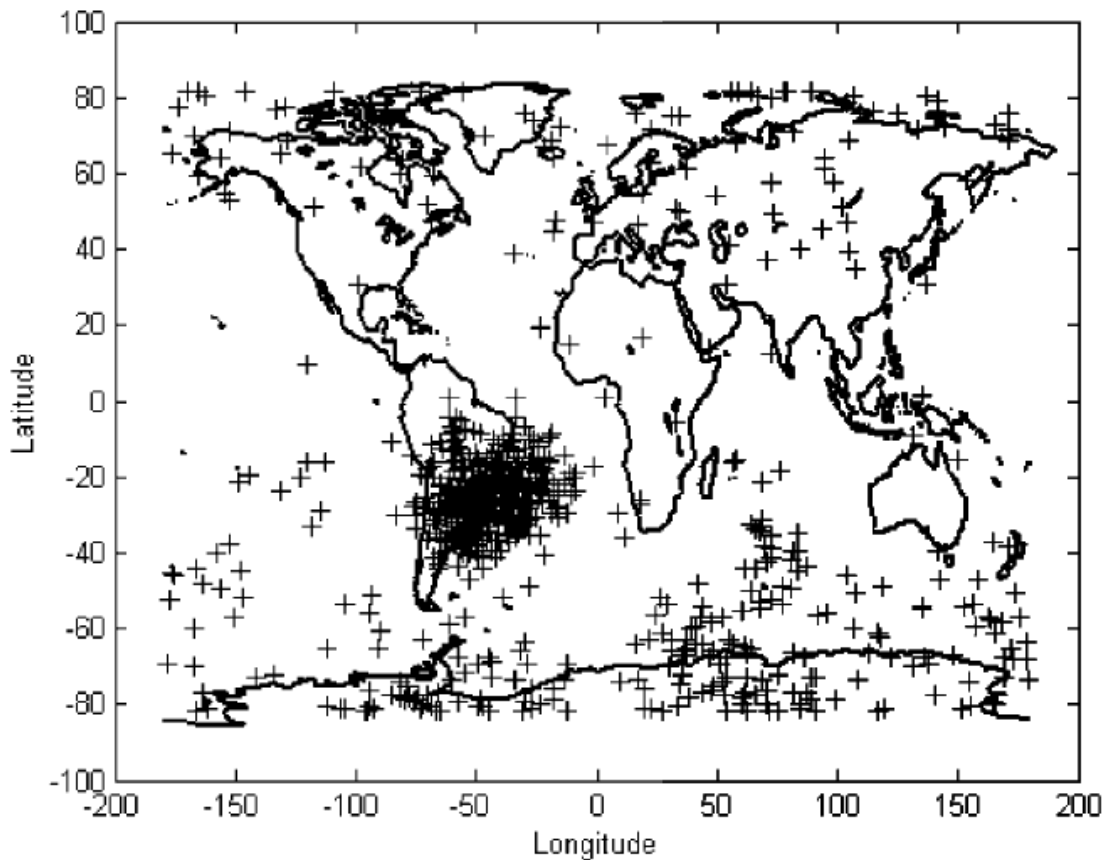


Figura 3.7 - Distribuição geográfica da observação de saturações não realísticas pelo *Measurements of Pollution in the Troposphere* (MOPITT) a bordo do satélite Terra.

Fonte: (NICHITIU et al., 2004).

Pelo exposto na [Seção 3.4](#), percebe-se que a precipitação de partículas energéticas na AMAS é um fenômeno estabelecido e que existem vários efeitos aeronômicos em termos do aumento da ionização das regiões D e E da ionosfera associados a precipitação. A faixa de energia das partículas energéticas é relativamente baixa, com elétrons tendo energia  $< 100$  keV e prótons com energia de alguns MeV (ABDU et al., 2005). O fato das partículas energéticas ionizarem a baixa ionosfera ocasiona uma absorção extra do ruído cósmico incidente sobre a superfície terrestre e detectado por riômetros. Assim, a amplitude do ruído cósmico captado pelo riômetro será menor quando for comparado com dias nos quais não foram registradas precipitações de partículas energéticas.

## 4 INSTRUMENTAÇÃO

No [Capítulo 4](#) são descritos os equipamentos cujos dados foram utilizados no trabalho de Dissertação de Mestrado. A análise da absorção ionosférica do ruído cósmico foi baseada em dados de riômetros. Além disso, foram utilizadas medidas da população de partículas energéticas dos cinturões de radiação obtidas com o experimento MEPED a bordo do satélite POES.

### 4.1 Riômetros e a Rede de Riômetros da América do Sul

Antes de iniciar a descrição básica dos riômetros, apresenta-se na [Subseção 4.1.1](#) uma breve discussão sobre o ruído cósmico galáctico, que é detectado pelo equipamento. Na [Subseção 4.1.2](#) apresenta-se o histórico do desenvolvimento dos riômetros convencionais até o riômetro imageador, bem como a rede de riômetros da América do Sul - rede SARINET na [Figura 4.6](#).

#### 4.1.1 Ruído Cósmico de Origem Galáctica

Após as primeiras detecções de ruído estático pelas antenas da *Bell Telephone Laboratories* por [Jansky \(1933\)](#), os trabalhos realizados por [Hey et al. \(1946\)](#) comprovaram a existência de fontes de ruído cósmico na constelação de Cygnus. Em seguida, [Ryle e Smith \(1948\)](#) encontraram uma nova e mais intensa fonte de ruído cósmico situado na constelação de Cassiopéia e outras pequenas fontes de menor intensidade que Cygnus. Hoje sabe-se que as fontes mais importantes de ruído cósmico provêm de Cassiopéia, Cygnus A e Júpiter.

Trabalhos realizados por [Pawsey e Hill \(1961\)](#) indicaram que a origem das ondas de rádio cósmicas inclui três distintos processos de emissão: (1) uma linha de emissão (21 cm) a partir do hidrogênio atômico interestelar, (2) uma emissão contínua composta de uma componente térmica de gás interestelar ionizado, e (3) uma emissão contínua composta de uma componente não-térmica (muito intensa em baixas frequências) devido à emissão síncrotron dos elétrons relativísticos espiralando em torno das linhas de campo magnético no espaço interestelar. Um exemplo da variação temporal do ruído cósmico gerado por estas fontes e detectado pelo riômetro convencional instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra, RS - Brasil, para o dia 30 de outubro de 2009, é apresentado na [Figura 4.1](#). A máxima amplitude em torno das 18 UT corresponde à passagem do centro galáctico pelo zênite do local de observação.

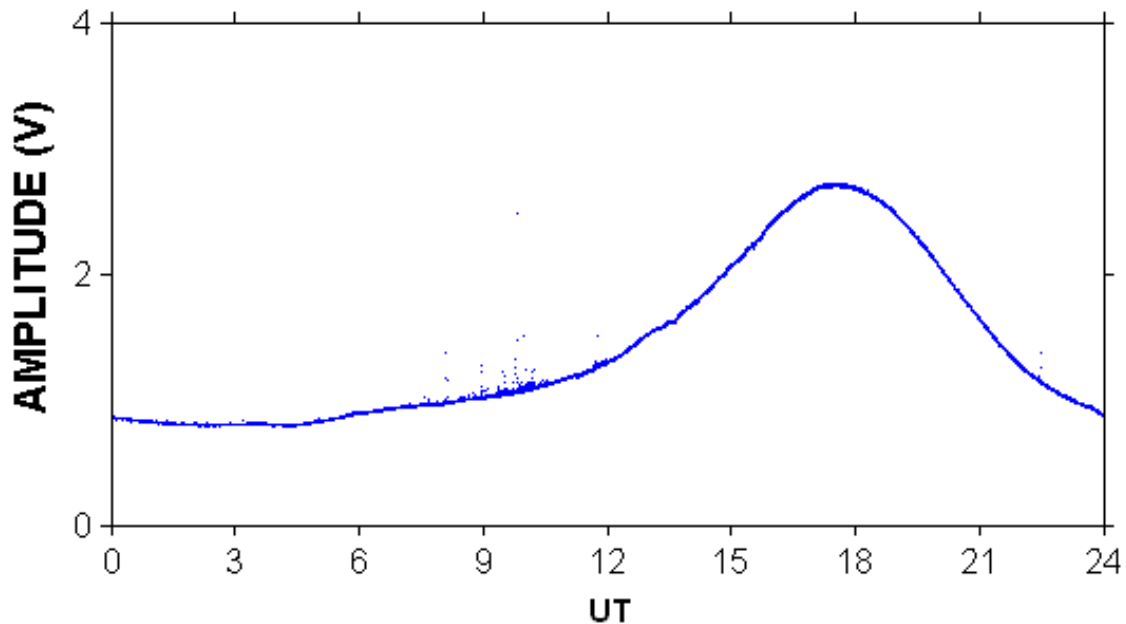


Figura 4.1 - Exemplo da variação temporal do ruído cósmico observada no dia 30 de outubro de 2009. O perfil diário foi obtido com um riômetro convencional, operando em 38,2 MHz instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil.

#### 4.1.2 Histórico e Descrição Básica do Riômetro

Rádios receptores instalados na superfície terrestre têm sido utilizados para estudar a atenuação do ruído cósmico galáctico pela ionosfera. Esses equipamentos entraram em operação nos primeiros anos da década de 50 e consistiam de um receptor conectado a uma antena e um sistema para medir a intensidade do ruído cósmico. [Little e Leinbach \(1959\)](#) desenvolveram o riômetro (do inglês *Riometer: Relative Ionospheric Opacity METER*) que utilizou uma técnica mais avançada para realizar medidas contínuas do ruído cósmico. A técnica é baseada no sistema “*servo loop*” que oferece alto nível de estabilidade e independência frente as possíveis variações das características dos equipamentos de rádio receptores.



Essencialmente, os riômetros captam energia de ondas eletromagnéticas na faixa de rádio (veja [Subseção 4.1.1](#)), em seguida é produzida uma tensão elétrica relativa à quantidade de energia recebida. A faixa de frequências usualmente utilizada pelos riômetros é de 20 a 50 MHz. Por exemplo, os riômetros convencionais da rede SARINET, que é apresentada na Dissertação, operam em 30 ou 38,2 MHz. A explicação reside no fato da absorção das ondas de rádio nessa faixa de frequências ser mais sensível às mudanças da densidade eletrônica das regiões D e E da ionosfera.

Todos os riômetros contam com pré-amplificadores e um computador que recebe e organiza os dados coletados. A título de ilustração, o riômetro convencional que está instalado no OES é mostrado na [Figura 4.2](#).



Figura 4.2 - Riômetro convencional instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil.

Uma tendência em riometria no final da década de 80 foi a utilização de vários feixes estreitos para analisar simultaneamente diferentes partes do céu. Trabalhos pioneiros nesta área incluem a investigação da estrutura dinâmica e espacial da precipitação de elétrons energéticos no oval auroral utilizando imagens da absorção do ruído cósmico na Antártica por [Detrick e Rosenberg \(1988\)](#). Para a investigação eles utilizaram o chamado *Imaging Riometer for Ionospheric Studies* (IRIS), o qual foi o primeiro riômetro imageador construído, tendo sido desenvolvido pela Universidade de Maryland, EUA.

O IRIS é basicamente constituído de uma matriz de  $N \times N$  antenas e tantos receptores quanto for  $N$ . Na SARINET os IRIS são constituídos por um conjunto de 16 antenas ( $N = 4$ ) e quatro rádio receptores operando em 38,2 MHz. Com a utilização desta matriz é possível gerar imagens de porções do céu sobre o riômetro imageador, a partir dos dados obtidos. Esta característica fica evidenciada quando se verifica a secção transversal do campo de visão dos riômetros, como no exemplo do IRIS instalado no OES, apresentado na [Figura 4.3](#).

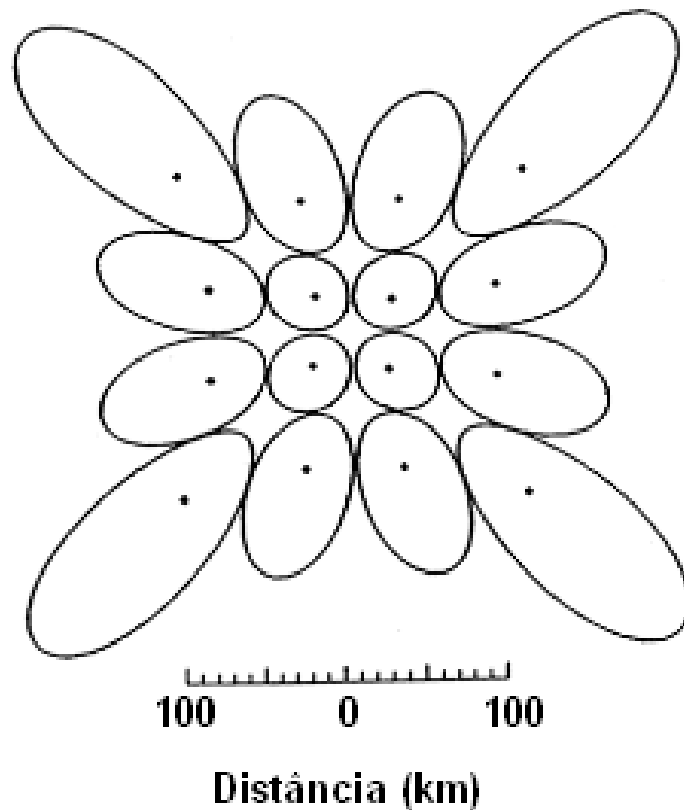


Figura 4.3 - Projeção bidimensional a 100 km de altitude, dos feixes do IRIS a meia potência.  
 Fonte: Adaptada de Nishino et al. (2002).

No exemplo da [Figura 4.3](#) é apresentada a projeção bidimensional da largura dos feixes a meia potência do IRIS. A 100 km de altitude a projeção cobre distância horizontal de aproximadamente 330 km nas direções norte-sul e leste-oeste.

Um diagrama de bloco de um riômetro imageador típico envolve, além das antenas e dos receptores, amplificadores, detectores de sinal, *scanners* de placa de aquisição do sinal, controladores de interface, sinal de sincronia de tempo e computadores para demonstração em tempo real e armazenamento de dados. Um exemplo ilustrativo do diagrama de bloco é apresentado na [Figura 4.4](#).

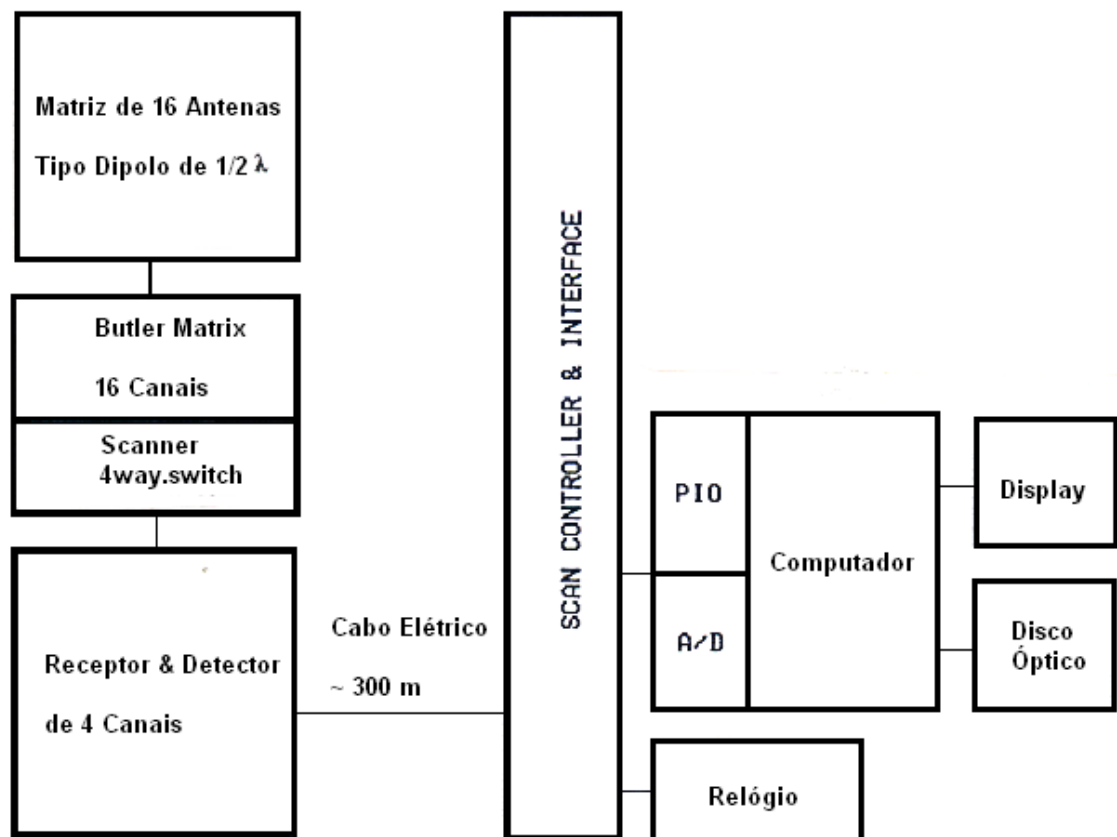


Figura 4.4 - Diagrama de bloco de um típico riômetro imageador.  
 Fonte: Adaptada de Nishino et al. (1993).

Os riômetros imageadores da rede SARINET em operação na América do Sul são todos idênticos entre si, operam em 38,2 MHz e detectam o ruído de rádio cósmico com um conjunto de antenas cuja abertura de feixe é  $22^\circ$ . Uma foto ilustrativa deste tipo de experimento, instalado no OES é apresentada na [Figura 4.5](#).

Os receptores devem ficar próximos às antenas e estão acondicionados numa caixa com temperatura controlada (vide caixa de madeira no centro das 16 antenas mostradas na foto da [Figura 4.5](#)).



Figura 4.5 - Riômetro imageador da rede SARINET instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT, 29° 4' S, 53° 8' O), em São Martinho da Serra, RS - Brasil.

#### 4.1.3 A Rede de Riômetros da América do Sul

A rede SARINET está sendo implantada na América do Sul, a qual possui vários riômetros convencionais e imageadores. Alguns deles já estão em operação em sítios estrategicamente localizados nas bordas e dentro da AMAS.

A rede SARINET é um projeto internacional criado e liderado pelo seu Principal Investigador (P.I.), Prof. Dr. Kazuo Makita, da Universidade de Takushoku, Tóquio, Japão e inclui a colaboração com várias instituições do Brasil, Chile e Argentina. Atualmente, a rede conta com cinco riômetros imageadores e 17 riômetros convencionais. O principal objetivo da rede SARINET é estudar os efeitos aeronômicos da ionosfera na região da AMAS, particularmente os produzidos pela precipitação de partículas dos cinturões de radiação.

As localizações geográficas dos sítios nos quais os riômetros da rede SARINET estão instalados são apresentadas no mapa da Figura 4.6.

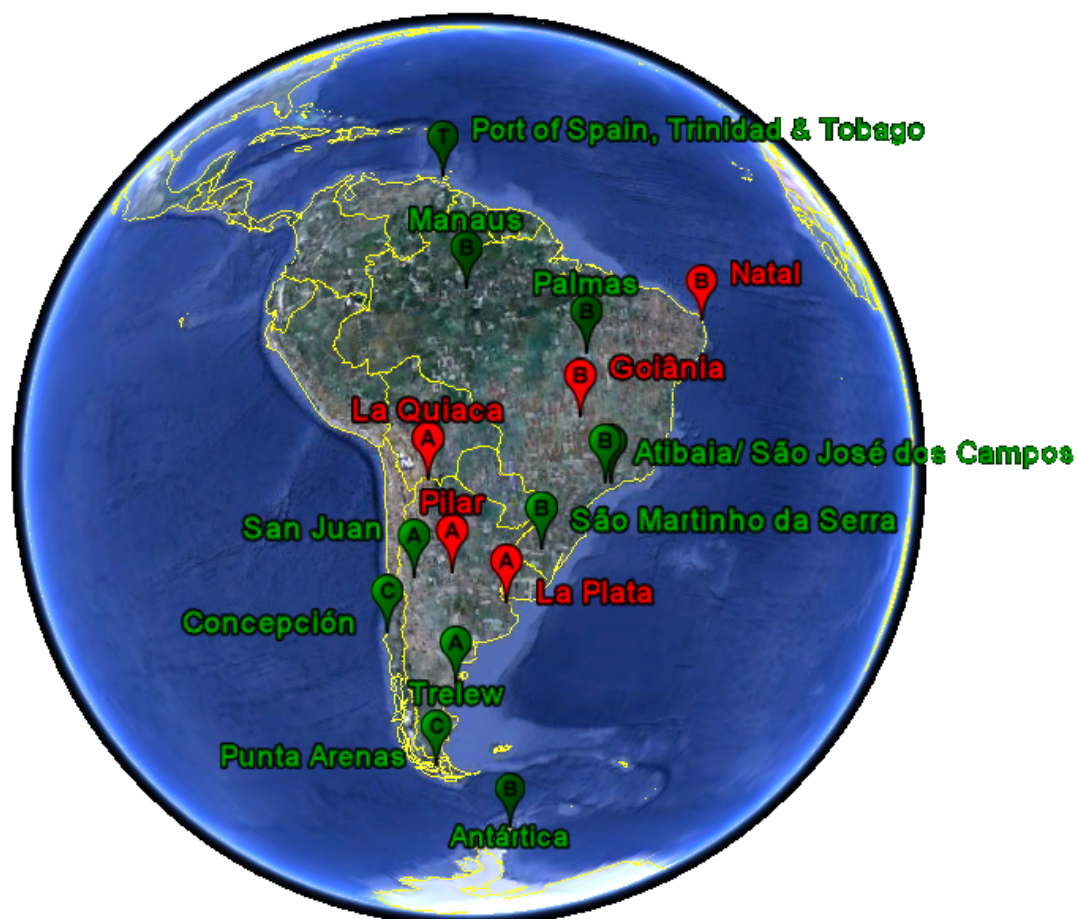


Figura 4.6 - Mapa mostrando a localização das estações da rede SARINET. Em verde as estações que já foram instaladas e em vermelho as estações que estão planejadas para serem instaladas até o ano de 2012.

Fonte: Comunicação privada com Dr. Kazuo Makita.

As coordenadas geográficas destes sítios bem como os tipos de riômetros instalados em cada sítio estão listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação dos sítios, coordenadas geográficas e tipo de riômetro das estações da rede SARINET

<b>Estação</b>	<b>Latitude/Longitude</b>	<b>Tipo de riômetro</b>
São Martinho da Serra (SMR) - Brasil	29° 04' S, 53° 08' O	IRIS / 1 Canal
Atibaia - Brasil	23° 11' S, 46° 03' O	1 Canal
São José dos Campos - Brasil	23° 00' S, 45° 15' O	IRIS / 1 Canal
Goiania - Brasil (em 2012)	17° 52' S, 51° 43' O	1 Canal
Palmas - Brasil	10° 17' S, 48° 20' O	1 Canal
Natal - Brasil (em 2012)	05° 50' S, 35° 12' O	1 Canal
Manaus - Brasil	03° 06' S, 59° 58' O	1 Canal
Estação Antártica Comandante Ferraz - Antártica	62° 04' S, 58° 23' O	1 Canal
Punta Arenas (PAC) - Chile	53° 07' S, 70° 53' O	IRIS / 1 Canal
Concepción (CON) - Chile	36° 50' S, 73° 01' O	IRIS / 1 Canal
Trelew (TRW) - Argentina	43° 15' S, 65° 22' O	IRIS / 1 Canal
La Plata - Argentina (em 2011)	34° 54' S, 57° 56' O	1 Canal
Pilar - Argentina (em 2010)	31° 40' S, 63° 53' O	1 Canal
San Juan - Argentina	31° 48' S, 69° 17' O	1 Canal
La Quiaca - Argentina (em 2011)	22° 06' S, 65° 36' O	1 Canal
Trinidad e Tobago	10° 38' N, 61° 26' O	1 Canal
Kakioka - Japão	36° 14' N, 140° 11' L	IRIS / 1 Canal

## 4.2 *Medium Energy Proton and Electron Detector* a Bordo do POES

Os satélites que compõem o programa *Polar Operational Environmental Satellite* (POES) possuem uma órbita polar com período de aproximadamente 100 min e estão equipados com instrumentos chamados *Space Environment Monitor* (SEM), que monitoram o fluxo de partículas energéticas próximo à Terra. O instrumento SEM-1 foi utilizado nos satélites desde 1978 até o satélite NOAA-14 (lançado em 1995). A partir do satélite NOAA-15 (lançado em 1998) o SEM-1 foi substituído pelo SEM-2, que possui os seguintes detectores:

- a) Detector Total de Energia (TED - do inglês *Total Energy Detector*), que mede o fluxo total de energia; e
- b) Detector de Elétrons e Prótons de Média Energia (MEPED - do inglês *Medium Energy Proton and Electron Detector*).

O detector MEPED inclui detectores de partículas energéticas. Dois detectores são utilizados para medir a intensidade de elétrons entre 30 keV a 2,5 MeV e outros dois medem a intensidade de prótons entre 30 e 6,9 MeV. O MEPED possui detectores de prótons omnidirecional entre 16 MeV e 140 MeV (EVANS et al., 2008).

Os dois detectores de elétrons e os dois detectores de prótons são montados aos pares. Cada par conta com um detector direcionado a  $0^\circ$  (MEPED- $0^\circ$ ) e  $90^\circ$  (MEPED- $90^\circ$ ) em relação ao eixo do satélite. O campo de visão de cada detector é de  $30^\circ$ . Os detectores são projetados para monitorar a intensidade de partículas energéticas nos cinturões de radiação da Terra e durante eventos de partículas solares. Os detectores de prótons omnidirecionais possuem campo de visão de  $\approx 180^\circ$  e são montados na parte do satélite que não está voltada para a Terra, monitorando assim as partículas incidentes sobre a atmosfera (Space Weather Prediction Center, 2001b; EVANS; GREER, 2004). Contudo, em virtude da sua órbita e do período para percorrê-la, são necessários quatro dias de observação para fazer interpolações dos dados obtidos e se montar mapas globais das partículas detectadas.

É importante ressaltar que para os propósitos do estudo para a Dissertação são utilizados e analisados os dados dos detectores de elétrons MEPED- $0^\circ$  e MEPED- $90^\circ$   $>30$  keV e  $>300$  keV. O número de prótons em qualquer faixa de energia permaneceu praticamente constante durante o período estudado.



## 5 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS

No [Capítulo 5](#) são apresentadas as metodologias de análise de dados dos principais equipamentos utilizados no trabalho de Dissertação de Mestrado, ou seja, os riômetros e o instrumento MEPED.

### 5.1 Metodologia de Análise de Dados dos Riômetros

A metodologia de análise de dados dos riômetros são descritos em termos do riômetro imageador instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra, RS - Brasil, uma vez que a diferença básica na operação e processamento deste em relação ao riômetro convencional é o número de canais envolvidos na coleta dos dados. Nestes termos, a [Seção 5.1](#) inicia com a descrição da operação básica dos riômetros que geram os dados brutos a serem processados. Em seguida, é discutida a conversão da escala binária usada na digitalização para a escala de tensão elétrica (em volts) do sinal coletado pelas antenas. Na sequência é mostrado o processo pelo qual a escala temporal universal é convertida para a escala temporal sideral e os motivos pelos quais o processamento é realizado. O processo seguinte envolve a determinação da Curva do Dia Quiet (QDC - do inglês *Quiet Day Curve*) e o método de geração dos mapas da absorção em forma de imagem.

#### 5.1.1 Operação Básica do Riômetro Imageador

Conforme mencionado no [Capítulo 4](#), um riômetro imageador é basicamente constituído de uma matriz de  $N \times N$  antenas e tantos receptores quanto for  $N$ . Como exemplo, considera-se um riômetro imageador com uma matriz de  $4 \times 4$  antenas e, portanto, quatro receptores. Os sinais das 16 antenas são detectados pelos quatro receptores (Ch1...Ch4) a cada segundo. Porém, a cada segundo, somente os sinais de um receptor é enviado à placa de digitalização instalada no sistema de aquisição de dados. Para cada receptor, a varredura dos sinais das antenas espaçadas na direção leste-oeste é realizada em quatro etapas, numeradas como Pas1...Pas4. Após quatro segundos, os quatro receptores enviam 16 sinais das antenas ao computador. Assim, os sinais de cada antena são digitalizados e os dados são guardados em arquivos diários com uma resolução temporal de quatro segundos. Um esquema ilustrando a relação entre os canais e as antenas na qual o sinal recebido foi enviado à placa de digitalização é mostrado na [Figura 5.1](#).

Devido às antenas N2E2, N2E3, N3E2 e N3E3 possuírem largura de feixe menor à meia potência, elas serão consideradas como direcionadas ao zênite e as análises da CNA serão realizadas a partir dos sinais captados por elas. Por outro lado, as demais antenas que possuem maiores projeções bidimensionais a 100 km de altitude podem conter maiores interferências devido à maior obliquidade.

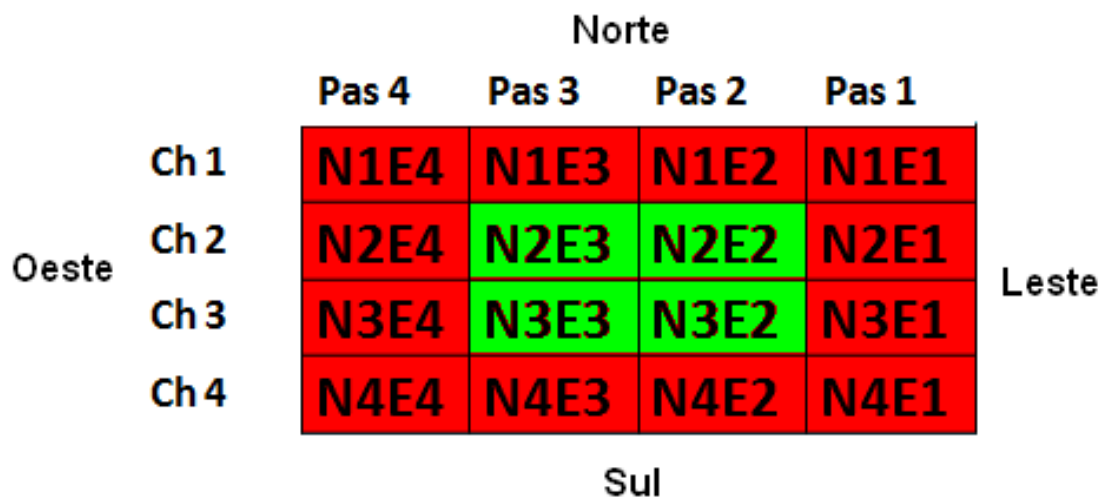


Figura 5.1 - Esquema ilustrativo da relação entre os canais e as antenas na qual o sinal recebido foi enviado à placa de digitalização de um riômetro imageador constituído de uma matriz de 4 × 4 antenas. Em verde estão as antenas direcionadas ao zênite.

### 5.1.2 Conversão dos Dados de Riômetro para Escala de Tensão

Os dados brutos são gravados em formato binário em uma escala entre 0 e 4095, oriunda do processo de digitalização, correspondente a um nível de tensão elétrica na faixa de 0 a 10 V. Portanto, o primeiro processamento dos dados tem a função de converter o sinal bruto gravado em binário para o seu correspondente nível de tensão. Para isso, utiliza-se a Equação 5.1 onde  $IRraw$  são os dados digitalizados em formato binário, de acordo com o conversor analógico-digital (ADC <sup>1</sup>) da placa de digitalização e  $IRpow$  são os dados convertidos para volts.

$$IRpow = \frac{IRraw}{4095} \times 10. \quad (5.1)$$

<sup>1</sup>Do inglês *Analogic Digital Converter*

### 5.1.3 Conversão de Hora Universal para Hora Sideral

Lembrando que as fontes mais importantes de ruído cósmico provêm da Cassiopéia e Cygnus A é importante determinar a hora sideral local (*LST* - do inglês *Local Sideral Time*) do sítio onde está instalado o riômetro. Deve-se compreender que as estrelas que são visíveis em uma determinada noite estão, em princípio, fixas na esfera celeste. A Terra ocupa o ponto central da esfera e as estrelas são consideradas equidistantes desse ponto. Portanto, considera-se uma estrela qualquer, distante do sistema solar como está sugerido na ilustração da [Figura 5.2](#).

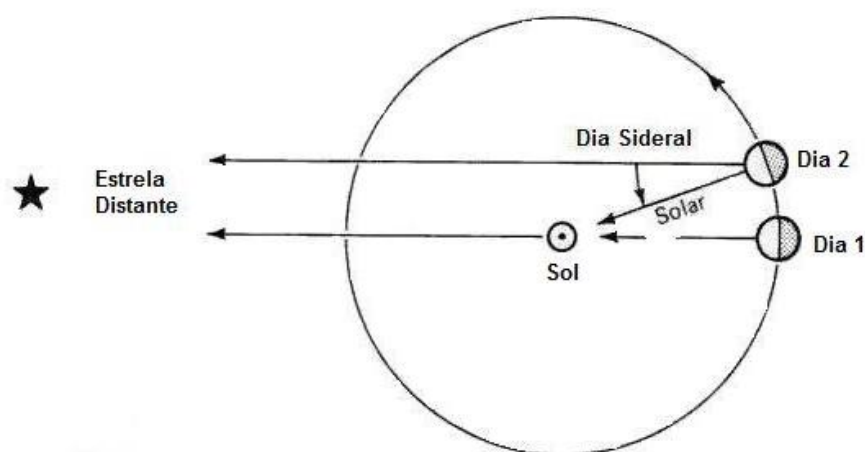


Figura 5.2 - Ilustração do posicionamento da Terra em relação ao Sol e a uma estrela distante para a determinação da hora sideral local.

Fonte: Adaptada de [Kaler \(2002\)](#).

Na ilustração, a Terra inicia o período de rotação em torno de seu eixo no Dia 1. Durante esse movimento o planeta se desloca ao mesmo tempo no espaço, na sua translação ao redor do Sol. Enquanto a Terra executa o movimento de rotação que é de oeste para leste em torno de seu próprio eixo, simultaneamente executa o movimento de translação em torno do Sol de oeste para leste. Dessa forma a Terra gira em torno de seu eixo na mesma direção do seu movimento de translação em torno do Sol. Após 23 h 56 min 04 s um ponto fixo sobre a Terra completou a rotação em relação à estrela distante. Contudo, somente na posição do Dia 2 é que este ponto tomado como referência completa a rotação em relação ao Sol.

Assim, primeiro a Terra efetua uma rotação completa com relação à estrela distante antes de completar uma rotação com relação ao Sol. Por isso, um dia sideral que toma como referência a configuração estelar, é cerca de 3 min 56 s mais curto que um dia solar, que toma o Sol como referência. Cada dia sideral possui divisão em horas, minutos e segundos. Ou seja, um dia sideral possui 24 h siderais, cada hora sideral possui 60 min siderais e cada minuto sideral possui 60 s siderais, exatamente como o dia solar.

A conversão da hora universal (UT - do inglês *Universal Time*) para hora sideral (ST - do inglês *Sidereal Time*) é obtida através da [Equação 5.2](#) (DUFFETT-SMITH, 1979).

$$ST = A \times UT + B \times d_n - C, \quad (5.2)$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes astronômicas,  $d_n$  é o número do dia Juliano correspondente ao dia da hora a ser convertida e  $C$  é um fator astronômico publicado anualmente. A constante  $A$  assume o valor de 1,002738, o qual corresponde à razão entre o número de segundos de um dia solar (86400) e o número de segundos de um dia sideral (86164), e a constante  $B$  assume o valor 0,065709.

A  $LST$  depende da longitude de observação e está relacionada com a  $ST$  pela [Equação 5.3](#):

$$LST = TSG + LON, \quad (5.3)$$

na qual  $TSG$  é a hora sideral definida em Greenwich e  $LON$  é a longitude geográfica do sítio onde as medidas do ruído cósmico são realizadas como, por exemplo, nas estações listadas na [Tabela 4.1](#).

#### 5.1.4 Determinação da Curva do Dia Quiet

Uma variedade de técnicas experimentais vem sendo utilizada para estudos da absorção de ondas de rádio pela ionosfera. Uma delas é a absorção ionosférica do ruído cósmico, a qual se denomina CNA. Para a análise da CNA é necessário calcular uma curva que leva em consideração a mínima absorção ionosférica, chamada Curva do Dia Quiet (do inglês *Quiet Day Curve* - QDC). A QDC é obtida a partir dos dados da intensidade do ruído cósmico em função do tempo sideral. Foram definidas diferentes metodologias para o seu cálculo (MITRA; SHAIN, 1953; LUSIGNAN, 1960; FREDRIKSEN; DYCE, 1960; STEIGER; WARWICK, 1961; HEISLER; HOWER, 1967; ARMSTRONG et al., 1977; KRISHNASWAMY et al., 1985; BRUM, 1999; TANAKA et al., 2007). No trabalho de Dissertação a QDC é calculada utilizando rotinas computacionais em linguagem Matlab<sup>TM</sup>, com base na técnica apresentada por Tanaka et al. (2007) e novos critérios são investigados para melhor determiná-la. Assim, no decorrer da Subseção 5.1.4 são descritas a técnica atual para estimar a QDC e a técnica utilizada para o cálculo da QDC no trabalho de Dissertação, que envolve novos critérios na seleção de dados.

##### 5.1.4.1 Técnica Corrente para Estimar a Curva do Dia Quiet

O fluxograma da Figura 5.3 mostra as etapas que são seguidas para o cálculo da QDC utilizando a técnica apresentada por Tanaka et al. (2007).

O programa é basicamente dividido em cinco blocos:

- definição do código da estação e sua longitude geográfica;
- leitura dos dados do riômetro (descrito na Seção 5.1.2);
- conversão de hora universal em hora sideral (descrito na Seção 5.1.3);
- aplicação de métodos estatísticos; e
- gravação da QDC em arquivo e obtenção do gráfico.

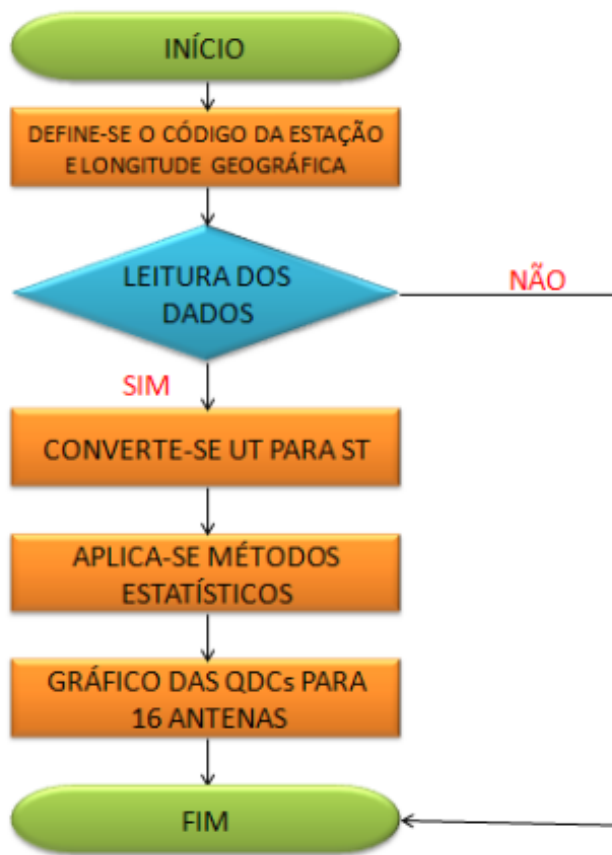


Figura 5.3 - Fluxograma do programa utilizado para o cálculo da QDC.

Para a aplicação de métodos estatísticos, os dados de riômetros são analisados a cada minuto sideral (1 dia = 1440 min). Para cada minuto se obtêm distribuições das tensões elétricas medidas pelo riômetro em cada antena. Por exemplo, se for considerado um dado de riômetro para o cálculo da QDC, cada minuto terá uma distribuição de 15 valores de tensão elétrica. Mas, se for considerado 30 dados para o cálculo da QDC, cada minuto terá 450 valores de tensão elétrica. A obtenção do valor da QDC a cada minuto considera análise estatística das tensões elétricas para obter médias, desvios-padrão e demais parâmetros estatísticos.

Como um exemplo da metodologia utilizada para o cálculo da QDC, considera-se 31 dados do IRIS coletados no mês de março de 2010. Por conveniência, é escolhida apenas a antena N2E2 para exemplificar o desenvolvimento do cálculo. Os valores da variação do ruído cósmico observado nos 31 dados em hora sideral, para a antena N2E2, estão sobrepostos na Figura 5.4.

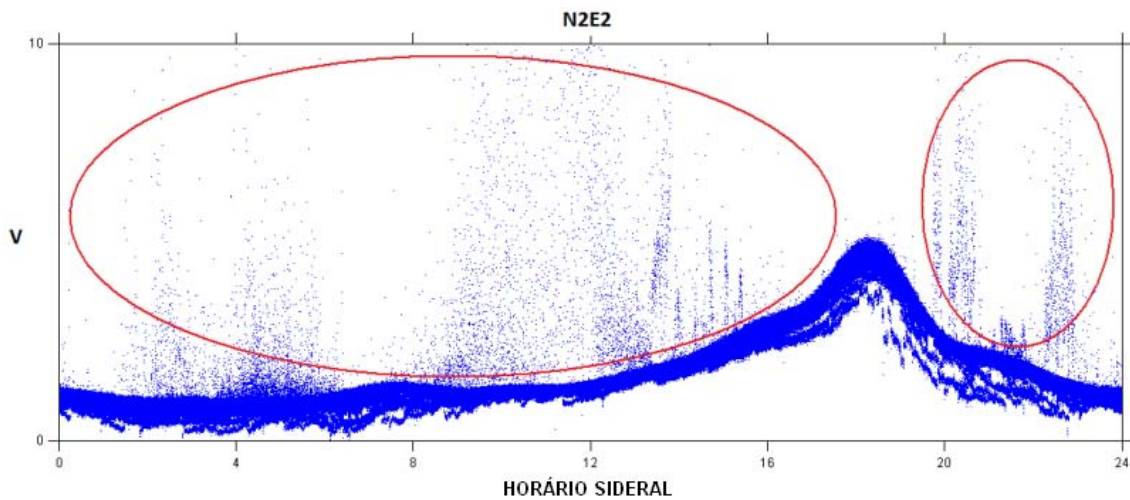


Figura 5.4 - Distribuição das ocorrências de tensões elétricas medidas pela antena N2E2 do riômetro imageador instalado no OES, considerando 31 dados coletados em março de 2010.

Os dados apresentam grande dispersão em certos horários devido a interferências locais (carros, aviões, entre outros) e/ou devido as condições climáticas (relâmpagos), como sinalizadas pelas duas elipses vermelhas.

A cada minuto sideral se obtém a média ( $\xi$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) dos valores das tensões elétricas. Em seguida é escolhida a faixa definida pela Equação 5.4 para encontrar o valor da tensão elétrica correspondente ao período quieto:

$$\Delta V = \xi \pm 3\sigma. \quad (5.4)$$

Dentro da faixa  $\Delta V$  estipulada é obtida uma distribuição de pontos de todos os dados para o cálculo da QDC. Dessa forma, obtêm-se uma distribuição das tensões elétricas medidas como mostrado no exemplo da Figura 5.5, para a antena N2E2, no minuto das 23 h 59 min ST às 00 h 00 min ST.

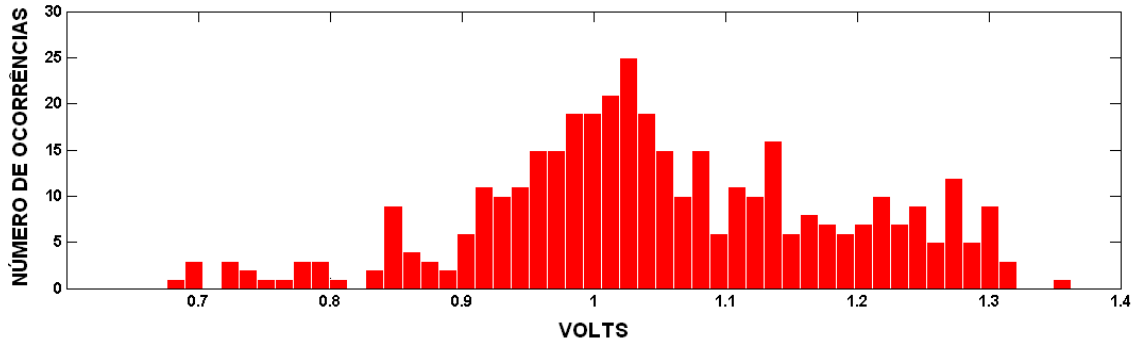


Figura 5.5 - Distribuição das medidas de tensões elétricas do sinal do ruído cósmico para a antena N2E2 do riômetro imageador instalado no OES, no intervalo de 23 h 59 min às 00 h 00 min ST.

Considerando a faixa  $\Delta V$  dada pela Equação 5.4, Tanaka et al. (2007) obtêm uma pré-QDC estimada a cada minuto sideral pela Equação 5.5, que considera o valor da QDC como sendo 80% do envelope dos dados com  $3\sigma$  (95% de certeza estatística para uma distribuição gaussiana) acima da média das medidas feitas naquele minuto.

$$QDC_{minuto} = (\xi + 3\sigma) \times 0,8 \quad (5.5)$$

Após o cálculo do valor “quieto” para cada minuto, finalmente a QDC é definida pela aplicação de uma média corrida de 30 pontos para suavizar a curva. O mesmo processo é realizado para as outras 15 antenas do riômetro imageador. O gráfico da QDC em horário sideral é apresentado na Figura 5.6 em vermelho, em azul estão sobrepostas as tensões elétricas medidas em cada um dos 31 dados coletados durante o mês de março de 2010. A Figura 5.6 mostra que os valores do ruído cósmico coletados neste mês tomado como exemplo apresentam rádio interferências que podem acabar afetando o cálculo da QDC. A seguir são abordados novos critérios para melhor determinar o cálculo da QDC, eliminando as interferências.



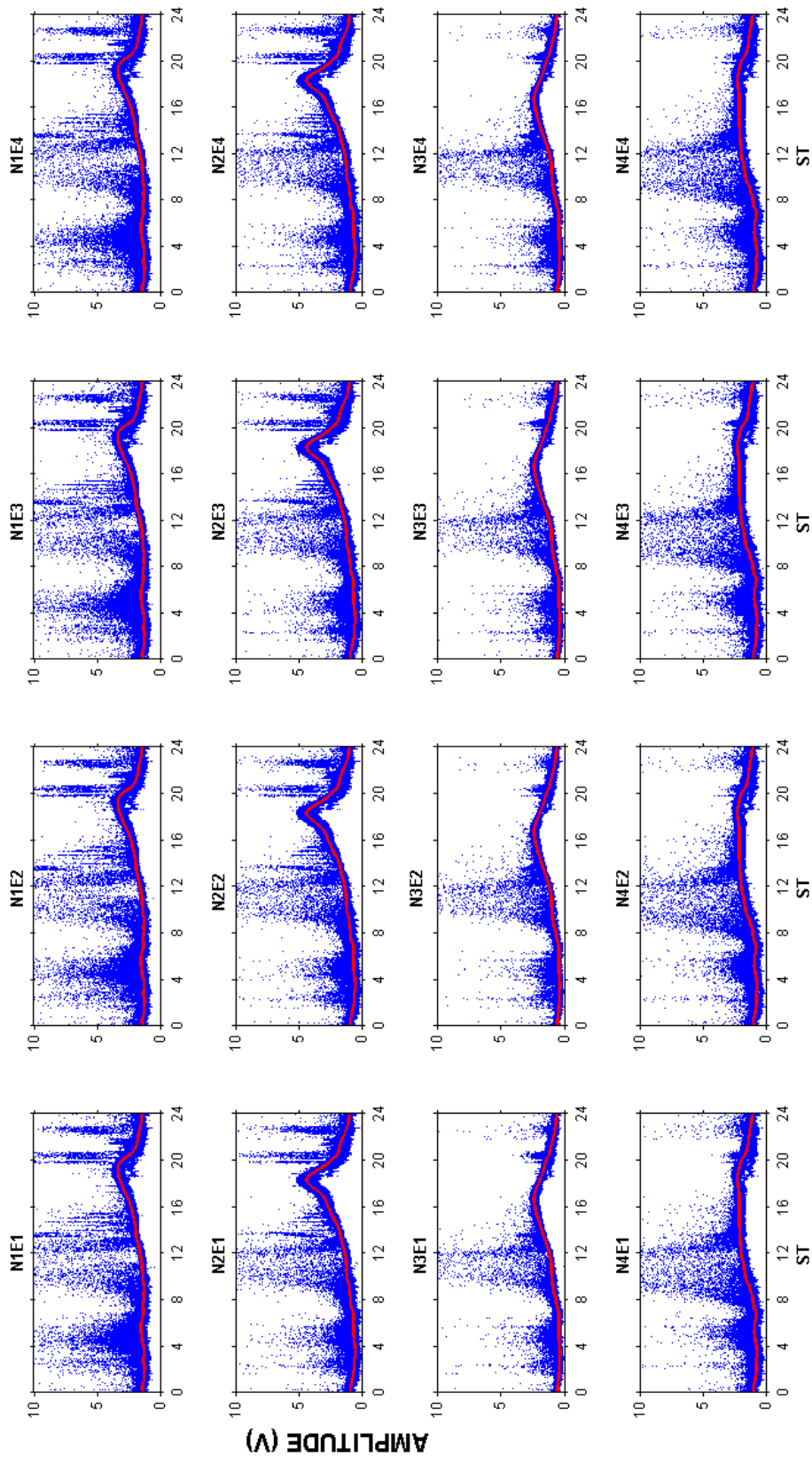


Figura 5.6 - Exemplo da variação do ruído cósmico obtido com as 16 antenas do IRIS instalado no OES considerando 31 dados coletados no mês de março de 2010 (pontos em azul) e QDC (em vermelho).

#### 5.1.4.2 Técnica Sugerida para Estimar a Curva do Dia Quietos

Há duas diferenças básicas entre a corrente técnica para estimar a QDC e a abordagem sugerida na Dissertação. Primeiramente será considerado para o cálculo da QDC somente dados de riômetros coletados por 24 h seguidas. Após, os dados são separados em dois subconjuntos de acordo com dois critérios, denominados critérios (a) e (b). O critério (a) considera os dados coletados em dias geomagneticamente quietos ( $K_p \leq 3$ ). O critério (b) abrange os dados identificados como tendo interferências eletromagnéticas que podem ser removidas por um processo matemático desenvolvido que suaviza as curvas do ruído cósmico.

O critério (a) baseia-se na classificação dos dados do IRIS de acordo com a atividade geomagnética. O índice  $K_p$  (ROSTOKER, 1972; WRENN et al., 1987) é utilizado para selecionar dados de riômetros coletados somente em dias quietos ( $K_p \leq 3$ ). Além deste critério, também é realizada a seleção de dados levando em consideração a possibilidade de contaminação de distúrbios magnéticos da mesma forma que foi realizada por Brum (1999) e Brum (2004). O autor desconsidera o dado de riômetro coletado no dia anterior e posterior a um dia que apresenta  $K_p > 3$ .

A variação do índice planetário  $K_p$  para o mês de março de 2010 é apresentada na Figura 5.7. A linha verde delimita o valor de  $K_p = 3$ . Os dados coletados em dias cujos valores do índice  $K_p$  for menor ou igual a três são utilizados para o cálculo da QDC, do contrário, os dados coletados nos dias nos quais os valores do índice  $K_p$  for maior que três são descartados, bem como os dados coletados no dia anterior e posterior. Os dados descartados foram coletados nos períodos identificados pelos retângulos em vermelho na Figura 5.7. No exemplo, os retângulos indicam que os dados coletados nos dias 9 a 13, e 16 a 18 foram excluídos do cálculo da QDC.

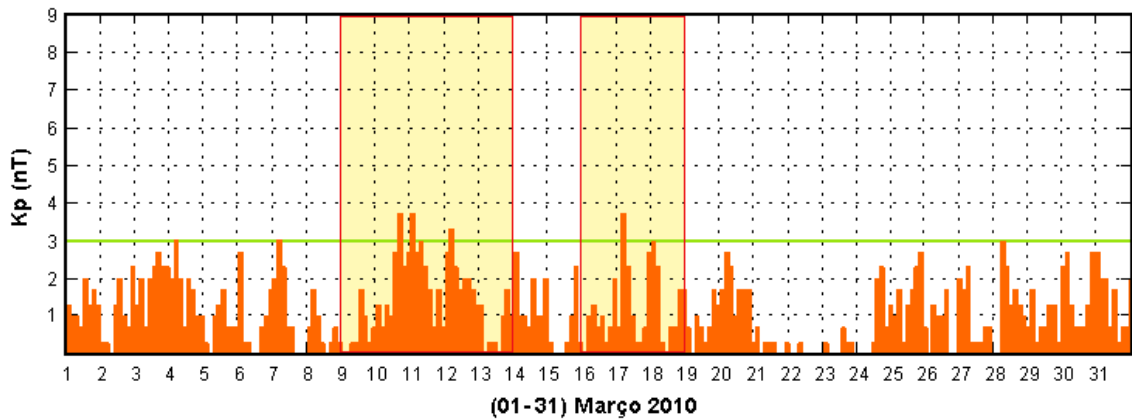


Figura 5.7 - Variação do índice planetário Kp durante o mês de março de 2010. A linha verde delimita o valor de  $Kp = 3$ . Os dados coletados nos períodos identificados pelos retângulos vermelhos foram descartados.

O critério (b) é utilizado numa tentativa de qualificar as interferências eletromagnéticas sobre as medidas do ruído cósmico. Os dados de ruído cósmico podem conter interferências eletromagnéticas que nos gráficos são caracterizadas por apresentar amplitudes maiores que a curva do ruído cósmico geralmente obtida, como exemplificado na [Figura 5.8](#) para o dado do IRIS coletado no dia 06 de março de 2010. As interferências eletromagnéticas (picos nas 16 curvas) alteram a medida real do ruído cósmico e podem impossibilitar o uso de um conjunto maior de dados no cálculo da QDC. Com intenção de agrupar maiores quantidades de dados de riômetros para o cálculo da QDC, incluindo aqueles dias que apresentam rádio interferências, foi desenvolvido um processo matemático que suaviza os efeitos das interferências no sinal do ruído cósmico.

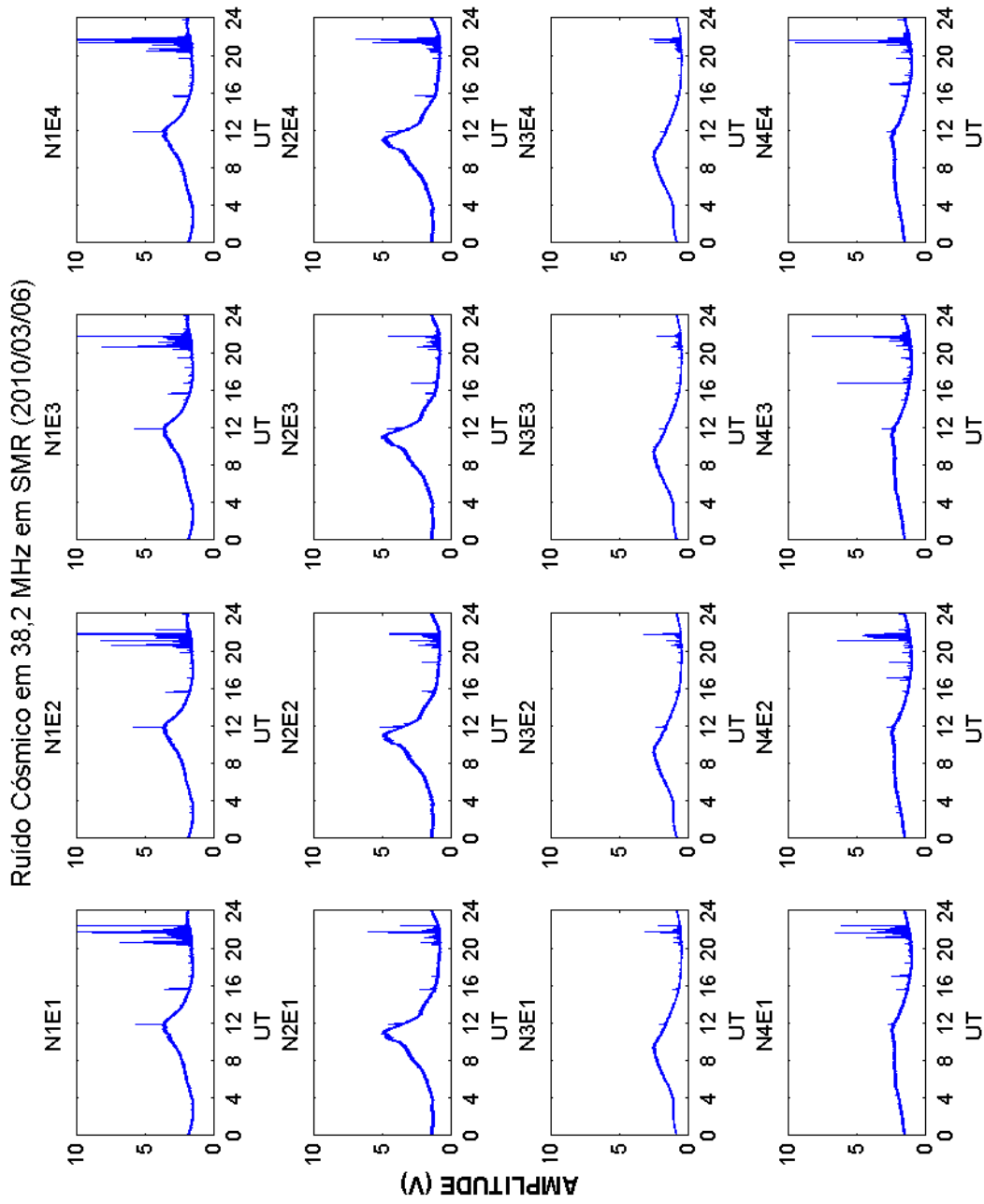


Figura 5.8 - Exemplo de interferências eletromagnéticas no dado do ruído cósmico coletado no dia 06 de março de 2010 pelas 16 antenas do IRIS instaladas no OES.

Para cada antena são analisados os níveis de tensão elétrica a cada intervalo de 10 min siderais antes da análise  $\xi \pm 3\sigma$  (Equação 5.4). Para todos os intervalos ao longo de um dia são agrupados os níveis de tensão obtidos dos dados coletados durante os dias quietos, conforme descrito pelo critério (a), e uma mediana ( $\beta$ ) para cada intervalo é calculada. Todos os valores de tensão elétrica são comparados com  $\beta$ . Se a diferença absoluta for maior que 0,15 V (valor empírico estabelecido durante as análises), o valor da tensão elétrica é rotulado como não válido e desconsiderado na análise de  $\xi \pm 3\sigma$ . Por outro lado, os valores que não ultrapassam 0,15 V substituem os picos (interferências eletromagnéticas) e são considerados como sendo os valores do ruído cósmico captados se não houvessem interferências. Para exemplificar o sucesso do método desenvolvido para eliminar as rádio interferências nos dados de riômetros, o resultado da aplicação da suavização no dado coletado no dia 06 de março de 2010 é apresentado na Figura 5.9.

Quando as interferências eletromagnéticas duram um intervalo de tempo menor que  $\approx 30$  min, o método de eliminação dos picos por suavização permite a inclusão dos dados coletados no dia no cálculo da QDC. Não há um limite de tempo bem estabelecido para utilizar a suavização e cada dado deve ser analisado individualmente. Por exemplo, a presença de rádio interferências com duração maior que 30 min pode ser utilizado caso elas não forem intensas. Entretanto, nos dados que possuem rádio interferências com duração de horas devem ser descartados, pois o processo de suavização falha.

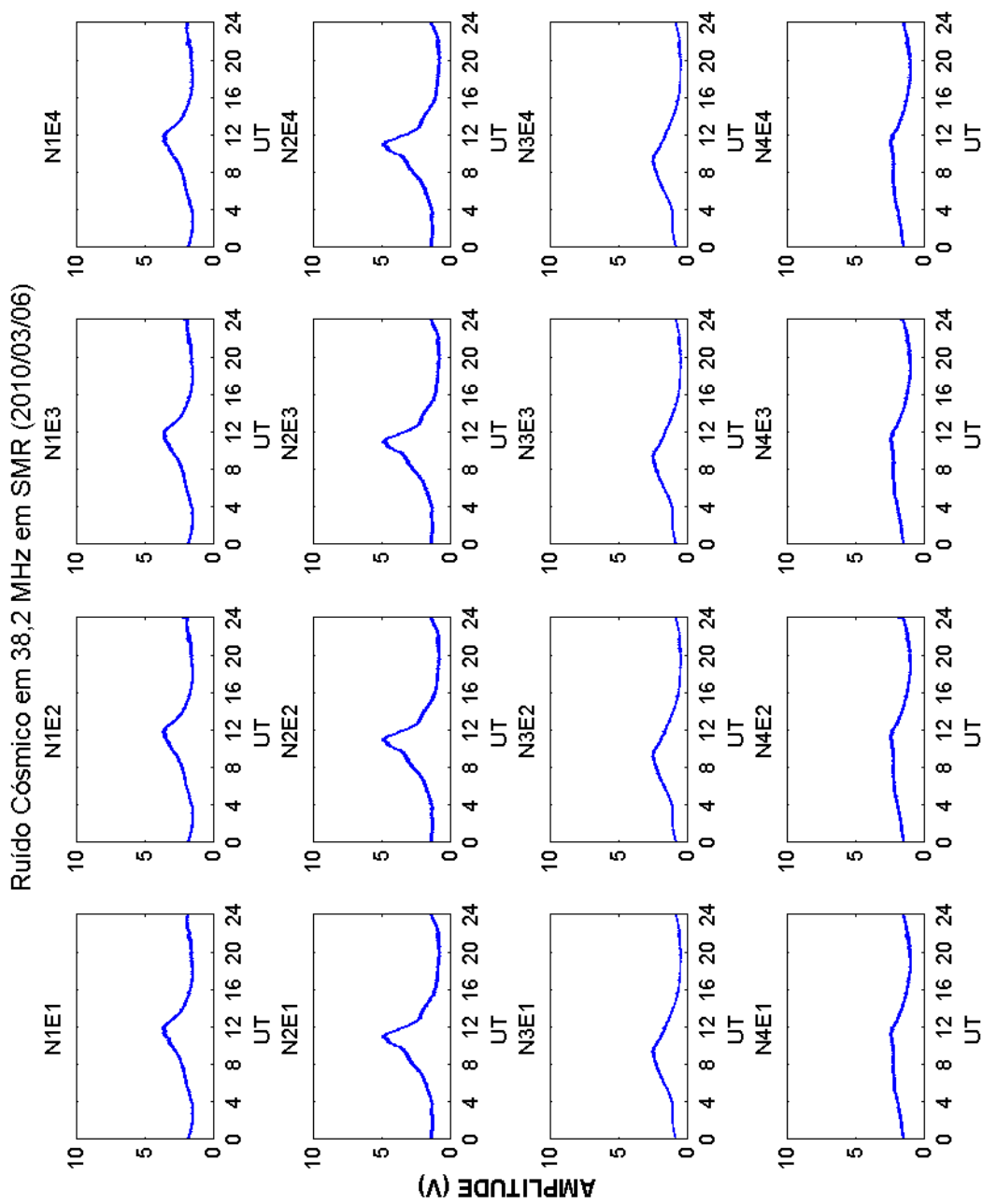


Figura 5.9 - Resultado da aplicação do processo matemático que eliminou as interferências eletromagnéticas no dado coletado no dia 06 de março de 2010 pelas 16 antenas do IRIS instaladas no OES.

Alguns métodos que visam a eliminação de pulsos que não fazem parte do sinal do ruído cósmico nos dados analógicos e digitais de riômetros também foram implementados por Brum (1999) e Brum (2004). Para o caso dos riômetros instalados na Estação Antártica Comandante Ferraz (68°S, 58° O) os dados analógicos vinham gravados em fita de papel gráfico utilizando um registrador potenciométrico de três canais. Os dados digitais estavam gravados em arquivos de três ou quatro horas com uma resolução de três segundos e continham pontos de calibração e marcação de hora, que são pulsos de amplitude conhecida, com intervalos não constantes. No trabalho realizado por Brum (1999) os impulsos eram eliminados pelo processo chamado Método das Médias Visuais. A calibração dos dados era executada através da média visual dos pontos de calibração. Assim, o Método das Médias Visuais permitia a visualização da curva antes de sua calibração, possibilitando a determinação das médias a partir da acuidade visual do operador. Uma vez determinadas as médias dos pontos de calibração, aplicava-se o processo de interpolação linear e a curva era determinada. Na eliminação dos pulsos presentes nos dados utilizados por Brum (2004) foi desenvolvido um método mais eficiente, chamado pelo autor de Método de Calibração Interativa. No método a eliminação dos pulsos se dava a partir da escolha da primeira marcação horária do dia e posteriormente havia a identificação automática das marcações subsequentes para um mesmo dia. Em seguida os registros indesejáveis eram substituídos por valores resultantes do processo de interpolação linear dos dois pontos escolhidos sobre a série temporal. As interferências remanescentes eram eliminadas individualmente utilizando o artifício de interpolação entre os pontos anteriores e posteriores ao pulso a ser eliminado.

Devido as diferenças entre os dados coletados pelos riômetros utilizados por Brum (1999) e Brum (2004) e os dados utilizados nesta Dissertação, não foi necessário a aplicação do Método das Médias Visuais e do Método de Calibração Interativa nos dados obtidos da rede SARINET. Dessa forma, foi necessário o desenvolvimento do processo descrito como critério (b) para a eliminação de pulsos oriundos de fontes que causam interferências nos dados adquiridos pelos riômetros SARINET.

Por fim, com os critérios (a) e (b) descritos acima e considerando o mês de março de 2010 como exemplo, a QDC calculada para os dados das 16 antenas do IRIS instalado no OES é apresentada na [Figura 5.10](#). Finalmente, pode-se apreciar graficamente a diferença entre as QDCs calculadas considerando todos os dados coletados em março de 2010 ([Figura 5.6](#)), em contraste com as QDCs calculadas considerando os dados que satisfazem os critérios (a) e (b) descritos acima ([Figura 5.10](#)). Ou seja, a [Figura 5.10](#) apresenta em vermelho as QDCs calculadas com 10 dados de riômetros coletados em março de 2010 (8 dados foram excluídos pelo critério (a) e 13 dados foram excluídos pelo critério (b), restando 10 dados de 31). A diferença básica entre a técnica apresentada por [Tanaka et al. \(2007\)](#) e a nova abordagem discutida aqui para o cálculo da QDC está em grande parte na remoção das interferências eletromagnéticas que estão presentes nos dados do IRIS.



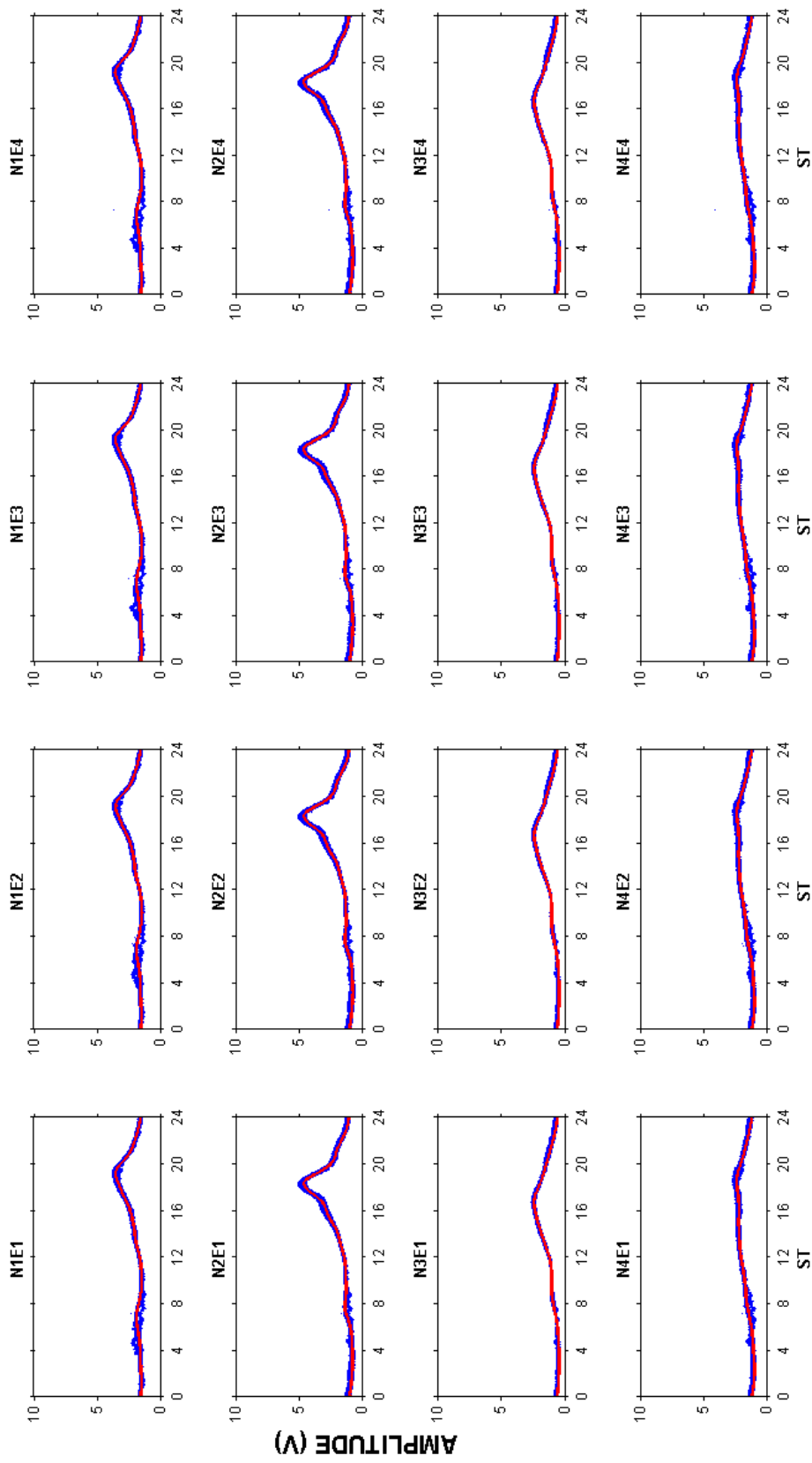
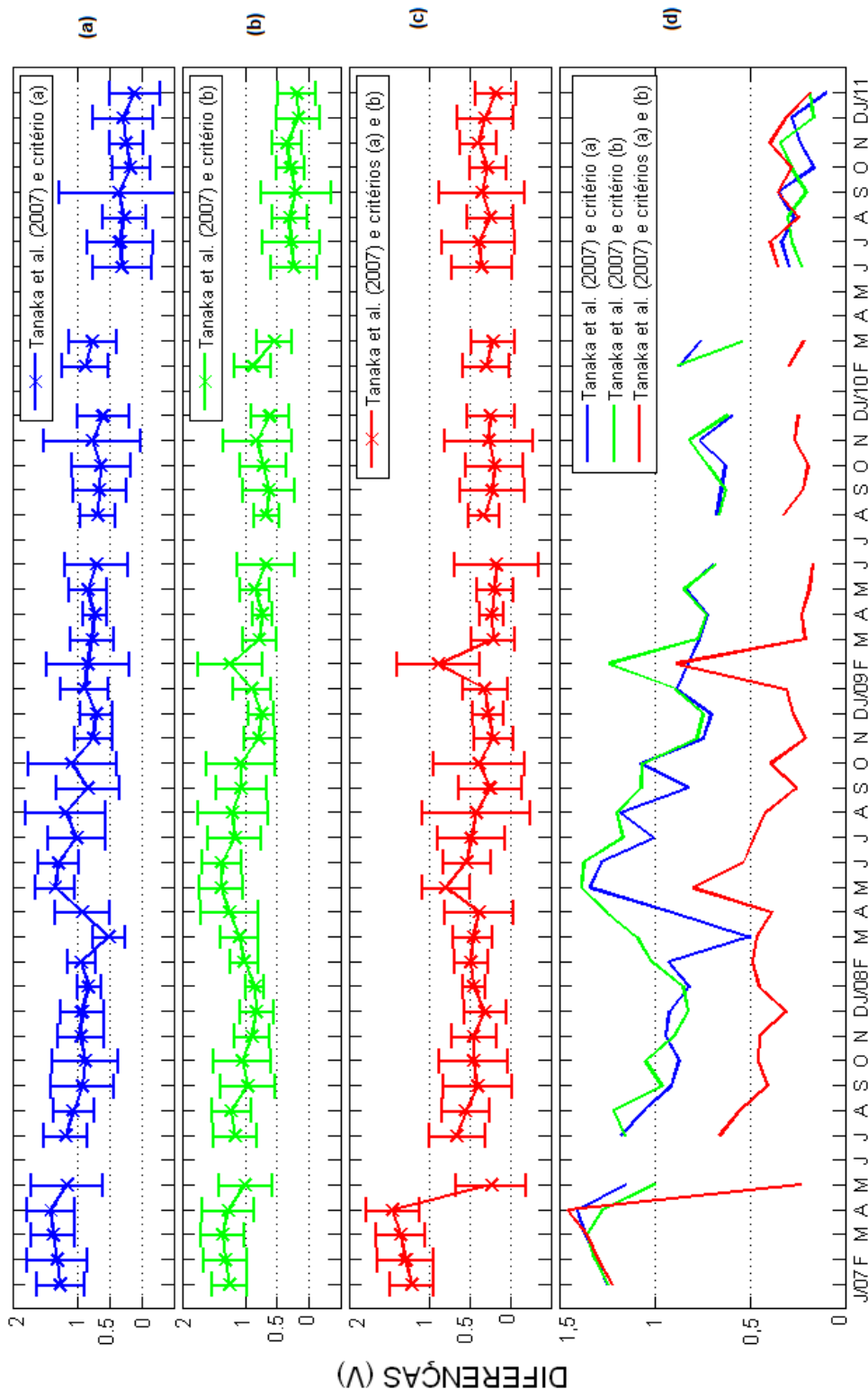


Figura 5.10 - Exemplo da variação do ruído cósmico obtido com as 16 antenas do IRIS instalado no OES, considerando dados sem interferências eletromagnéticas e coletados em dias quietos (em azul) e QDC (em vermelho).

### 5.1.4.3 Diferenças entre as Técnicas para o Cálculo da QDC

A [Figura 5.6](#) é um exemplo da variação diária do ruído cósmico extraído dos 31 dados coletados em março de 2010 (pontos em azul) pelo IRIS instalado no OES. Superposta em cada gráfico está a QDC (em vermelho) derivada para o mesmo período. A intenção no exemplo é apresentar a típica informação obtida do ruído cósmico e a presença de interferências eletromagnéticas que causam dispersão no sinal ao longo do dia, principalmente em torno das 04, 12 e 20 h ST. Um outro exemplo é apresentado nos gráficos da [Figura 5.10](#). Eles mostram o mesmo conjunto de dados na qual foi construída a [Figura 5.6](#) (em azul), mas seguindo dois critérios para seleção dos dados: critério (a) que é a classificação quanto a atividade geomagnética, e critério (b) que consiste na utilização de dados de riômetros que possuem interferências eletromagnéticas e que puderam ser removidas pelo processo matemático desenvolvido. As QDCs derivadas a partir da seleção de dados também estão superpostas nos gráficos da [Figura 5.10](#) (em vermelho). Deve-se notar que a dispersão nos dados foi drasticamente reduzida no último exemplo.

A partir dos dois exemplos foi calculado QDCs utilizando a técnica proposta por [Tanaka et al. \(2007\)](#) para o conjunto de dados adquiridos pelo IRIS instalado no OES, de jan. 2007 a jan. 2011 (em torno do último mínimo solar), totalizando 44 meses de dados e implicando em 44 QDCs mensais. Da mesma forma foi estimada 44 QDCs mensais utilizando a técnica descrita na Dissertação para o mesmo conjunto de dados. Posteriormente, foi tomada a diferença entre as QDCs obtidas pelas duas técnicas distintas para cada mês, conforme apresentado na [Figura 5.11](#). Cada ponto do gráfico é dado pela média das diferenças obtidas pelas antenas N2E2, N2E3, N3E2 e N3E3. Adicionalmente, foram calculadas QDCs utilizando somente um dos dois critérios sugeridos a fim de verificar o impacto de cada um na determinação das QDCs. As diferenças também foram calculadas e estão na [Figura 5.11](#). A [Figura 5.11\(a\)](#) mostra a evolução da média mensal das diferenças entre a técnica proposta por [Tanaka et al. \(2007\)](#) e considerando o critério (a). Na [Figura 5.11\(b\)](#) mostra a evolução da média mensal das diferenças entre a técnica proposta por [Tanaka et al. \(2007\)](#) e considerando o critério (b). Ainda na [Figura 5.11\(c\)](#) está a evolução da média mensal das diferenças entre a técnica proposta por [Tanaka et al. \(2007\)](#) e considerando os critérios (a) e (b). Por fim, na [Figura 5.11\(d\)](#) está as mesmas diferenças mostradas na [Figura 5.11\(c\)](#), porém sem os desvios-padrão.



Jan 2007 a Jan 2011

Figura 5.11 - Diferenças entre QDCs calculadas a partir do método corrente e: (a) dados de riômetros coletados em dias quietos; (b) dados de riômetros suavizados; (c) dados de riômetros coletados em dias quietos e suavizados; e (d) os dois critérios de seleção de dados.

Nos quatro primeiros meses do ano de 2007, a diferença entre as QDCs é  $> 1$  V em qualquer um dos critérios adotados. Durante o mês de maio de 2007 a utilização dos critérios (a) e (b) tomados individualmente para selecionar os dados apontam diferenças maiores que 1 V, porém quando os dois critérios são levados em consideração a diferença diminui para aproximadamente 0,3 V. Em julho e agosto de 2007 as diferenças são  $> 1,0$  V se for levado em conta os critérios (a) e (b) individualmente. Contudo, as diferenças são menores que 0,7 V se for considerado os dois critérios. Nos outros meses de 2007 as diferenças diminuem, pois o número de dados que satisfazem os dois critérios simultaneamente aumentaram. No ano de 2007, 59 dados de riômetros são selecionados segundo os critérios (a) e (b).

No caso das diferenças entre QDCs obtidas a partir dos dados coletados no ano de 2008, verifica-se que ao considerar os critérios (a) e (b) individualmente, ocorrem diferenças maiores que 1,0 V na maioria dos meses. Com os dois critérios de seleção de dados as diferenças são menores que 0,5 V, exceto no mês de maio que é próxima a 1,5 V (Figuras 5.11(a) e 5.11(b)). O número de dados coletados em dias geomagneticamente quietos e em que o processo matemático desenvolvido suavizou as interferências é 109 no ano de 2008.

Para o ano de 2009, 138 dados do IRIS satisfazem os dois critérios de seleção de dados para o cálculo da QDC. A redução das diferenças entre as QDCs mensais de 2009, que são menores que 0,4 V, são atribuídas a este fato. A mesma tendência continua para o restante dos meses de 2010 e 2011 mostrados na Figura 5.11. Assim, o período prolongado do mínimo solar, no qual os períodos geomagneticamente perturbados não foram frequentes, fez com que não ocorresse diferenças acentuadas entre as QDCs. Mesmo não havendo dados do IRIS coletados nos meses de janeiro, abril e maio, ainda há 78 dados que são classificados pelos dois critérios considerados.

A fim de investigar os casos extremos que ocorrem na Figura 5.11, apresenta-se a Figura 5.12 os meses fevereiro de 2009 e março de 2010 como exemplos das diferenças ocorridas entre as QDCs durante cada mês. Os eixos verticais correspondem as diferenças entre as QDCs e os eixos horizontais correspondem a ST. As barras de erro em cada gráfico representam os desvios-padrão a cada duas horas calculados a partir dos desvios-padrão obtidos em cada método de cálculo da QDC. Os números no canto superior direito de cada gráfico são a média absoluta das diferenças e a média absoluta dos desvios-padrão, respectivamente. As letras e números à direita de cada gráfico identificam a antena na qual a diferença entre as QDCs é determinada.

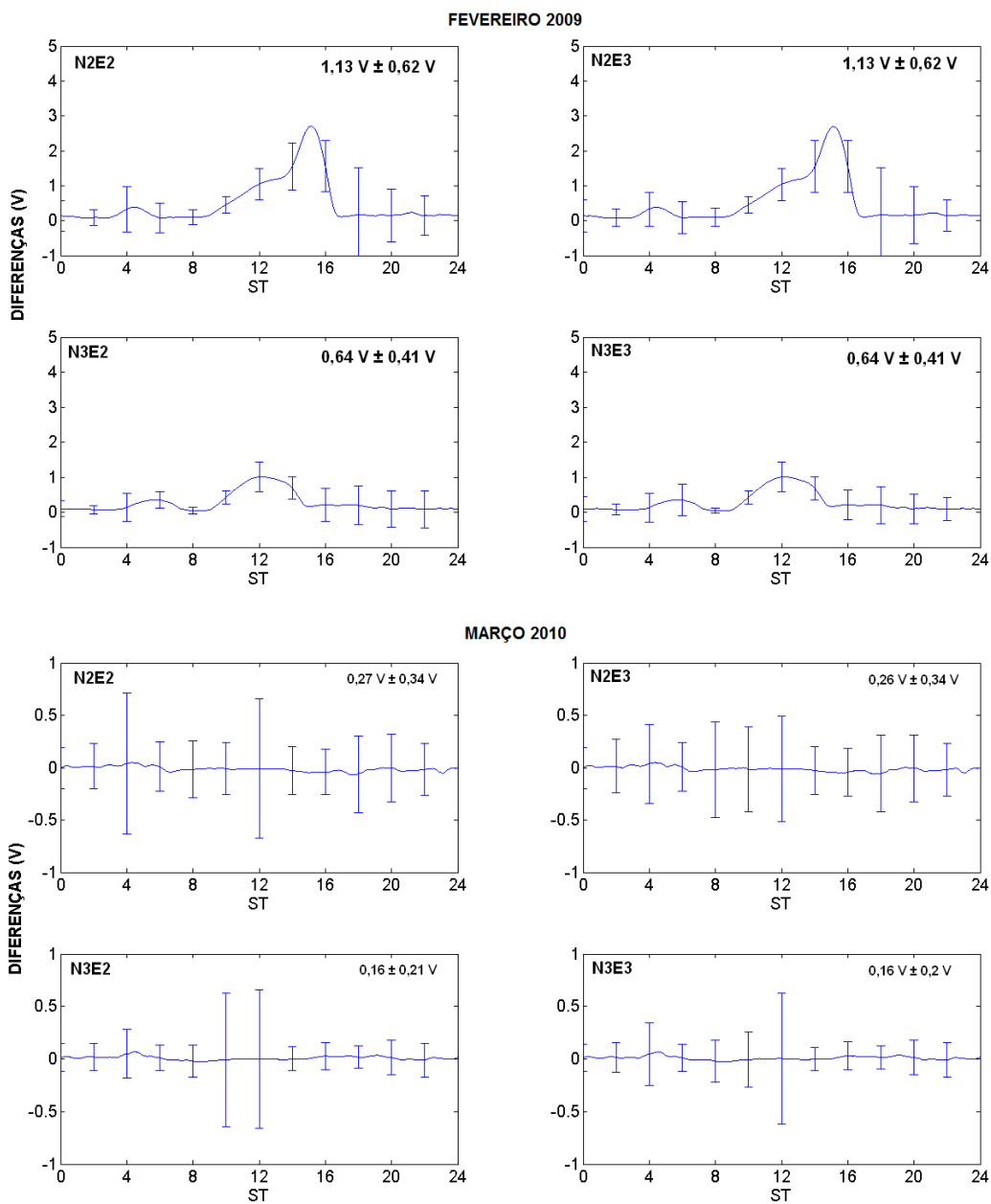


Figura 5.12 - Diferenças entre QDCs calculadas a partir de dados coletados durante o mês de fevereiro de 2009 e março de 2010 pelas duas técnicas distintas.

As diferenças entre os métodos para o cálculo da QDC são mais acentuadas em fevereiro de 2009 do que em março de 2010. Nas quatro antenas direcionadas ao zênite a diferença é aproximadamente 0,4 V entre 00 h ST e 16 h ST. Porém, aproximadamente 18 h ST as diferenças calculadas pelas duas técnicas alcançam 3,0 V nas antenas N2E2 e N2E3 e 1,2 V nas antenas N3E2 e N3E3. Para a QDC calculada com os dados do IRIS coletados em fevereiro de 2009 ressalta-se ser importante seguir dos critérios de seleção de dados apresentados, pois há grandes diferenças entre este e o método corrente. Com relação a março de 2010, verifica-se que as diferenças entre as QDCs são menores que 0,3 V nas quatro antenas. Porém, os desvios-padrão alcançam maiores valores, atingindo 0,34 V nas antenas N2E2 e N2E3.

Finalmente, a fim de verificar o impacto da nova abordagem para estimar a QDC no cálculo da CNA, foi gerado imagens da absorção utilizando a QDC estimada segundo os novos critérios de seleção de dados e utilizando a QDC derivada com a corrente técnica, como mostra a [Figura 5.13](#) (para 04 de fevereiro de 2009) e [Figura 5.14](#) (para 28 de março de 2010). Cada imagem corresponde a  $\approx 330 \times 330$  km no plano norte-sul e leste-oeste a 100 km de altitude. A resolução de cada imagem é 20 km<sup>2</sup>. A intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada ao lado da última imagem em uma escala de 0 a 0,5 dB. É importante mencionar que nestas análises as causas e implicações das absorções encontradas não serão discutidas.

Nas imagens da [Figura 5.13\(a\)](#) se observa máximos valores da CNA em torno de 0,4 dB, principalmente às 12, 14 e 16 UT. Para a obtenção destas imagens foram utilizadas 16 QDCs calculadas com dados que seguem os dois critérios de seleção dos dados. Por outro lado, verifica-se na [Figura 5.13\(b\)](#) que não foi detectado absorções em nenhuma das imagens entre as 12 e 23 UT. Neste caso, as imagens foram obtidas utilizando a QDC calculada pelo corrente método, ou seja, com dados sem discriminação quanto a atividade geomagnética e rádio interferências. Assim, verifica-se que as imagens da CNA obtidas no dia 04 de fevereiro de 2009 e calculadas com QDC estimada pelos dados do IRIS que foram classificados pelos dois critérios mostraram-se mais sensível na detecção das absorções ionosféricas do ruído cósmico.

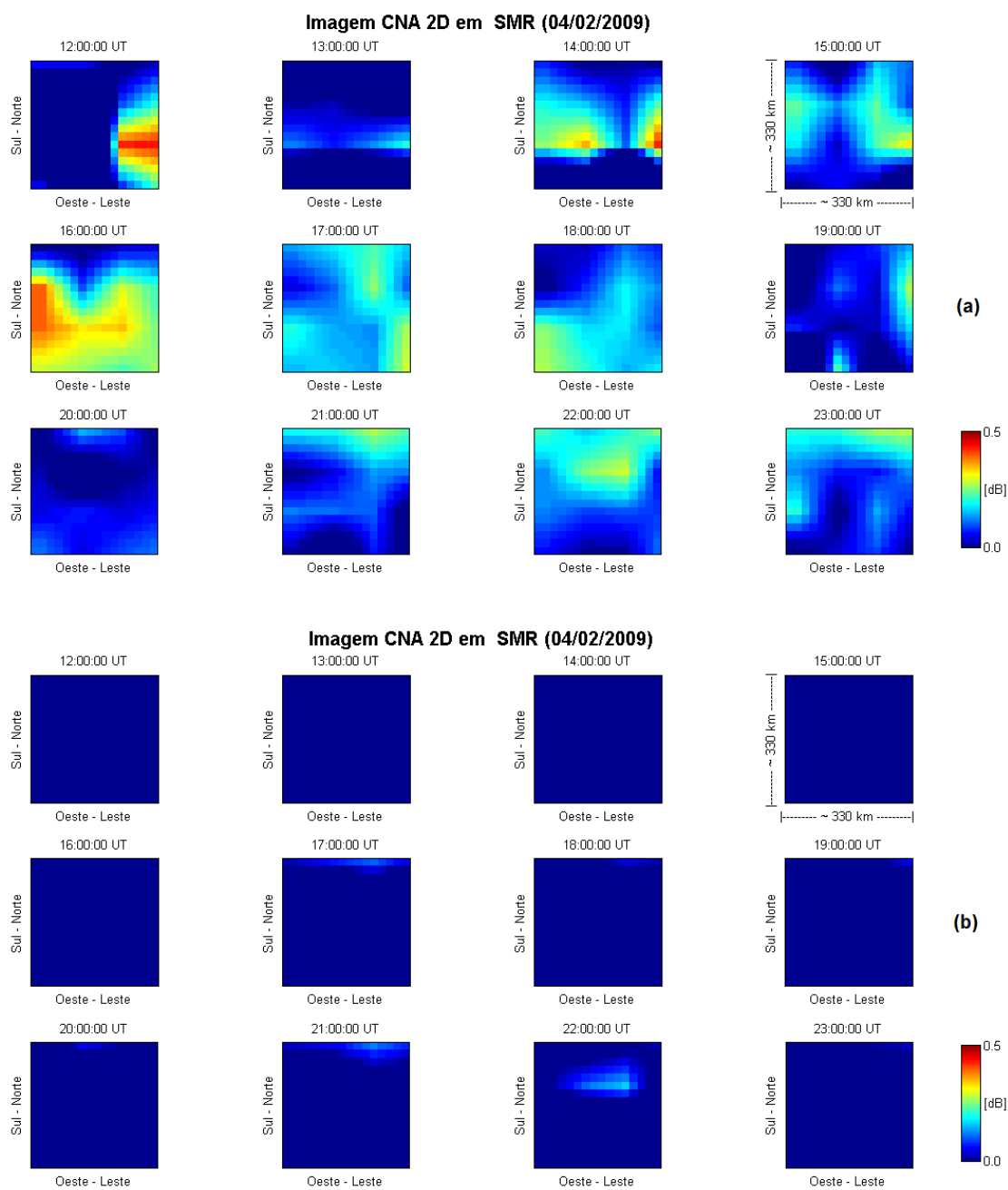


Figura 5.13 - Imagens da CNA calculadas a cada hora no dia 04 de fevereiro de 2009, utilizando (a) a técnica sugerida para estimar a QDC e (b) a QDC obtida pela corrente técnica.

A Figura 5.14 mostra as imagens da CNA no dia 28 de março de 2010 calculadas a partir das QDCs obtidas pelas diferentes técnicas. Nas imagens da Figura 5.14(a) observa-se máximos valores da CNA em torno de 0,4 dB, principalmente às 06 h 15 min, 06 h 45 min, 08 h 30 min e às 08 h 45 min UT. As imagens foram obtidas utilizando a QDC calculada com dados que seguem os dois critérios de seleção de dados discutidos na Dissertação. Porém, na Figura 5.14(b) verifica-se que as absorções são  $\approx 0,2$  dB para os mesmos horários, quando utilizou-se a QDC calculada pela corrente técnica. Além disso, as regiões correspondentes as absorções diminuíram. Portanto, as imagens da CNA calculadas com QDC obtida pelos dados de riômetros que foram classificados pelos dois critérios também mostraram-se mais sensível na detecção das absorções ionosféricas do ruído cósmico.

Como resultado do conjunto de análises e a partir da comparação entre as diferenças das QDCs, que foram calculadas com os dados coletados a cada mês, é possível afirmar que o número de dados coletados em dias classificados como geomagneticamente quietos frente ao número total de dados coletados durante o mês é um fator significativo na qualidade da QDC obtida. Ou seja, quanto maior o número de dados coletados durante os dias geomagneticamente quietos, menor espera-se que sejam as diferenças entre as QDCs calculadas pelas duas técnicas.

Um aspecto que não foi abordado no presente trabalho de Dissertação é a influência da presença de ondas planetárias ou ondas de gravidade durante as medições realizadas pelo IRIS instalado no OES. Contudo, teoriza-se que o cálculo da QDC poderia ser significativamente alterado no caso em que se utilizam poucos dados, visto que, embutidas na variação temporal, poderia estar uma componente devida a estas ondas.

Portanto, pode-se afirmar que o código computacional para o cálculo da QDC com o processo matemático que suaviza as rádio interferências teve bom desempenho. Nos casos em que há dados coletados com pouca perturbação magnética, ou seja, durante o mínimo solar e com poucas interferências eletromagnéticas, os resultados são mais precisos.



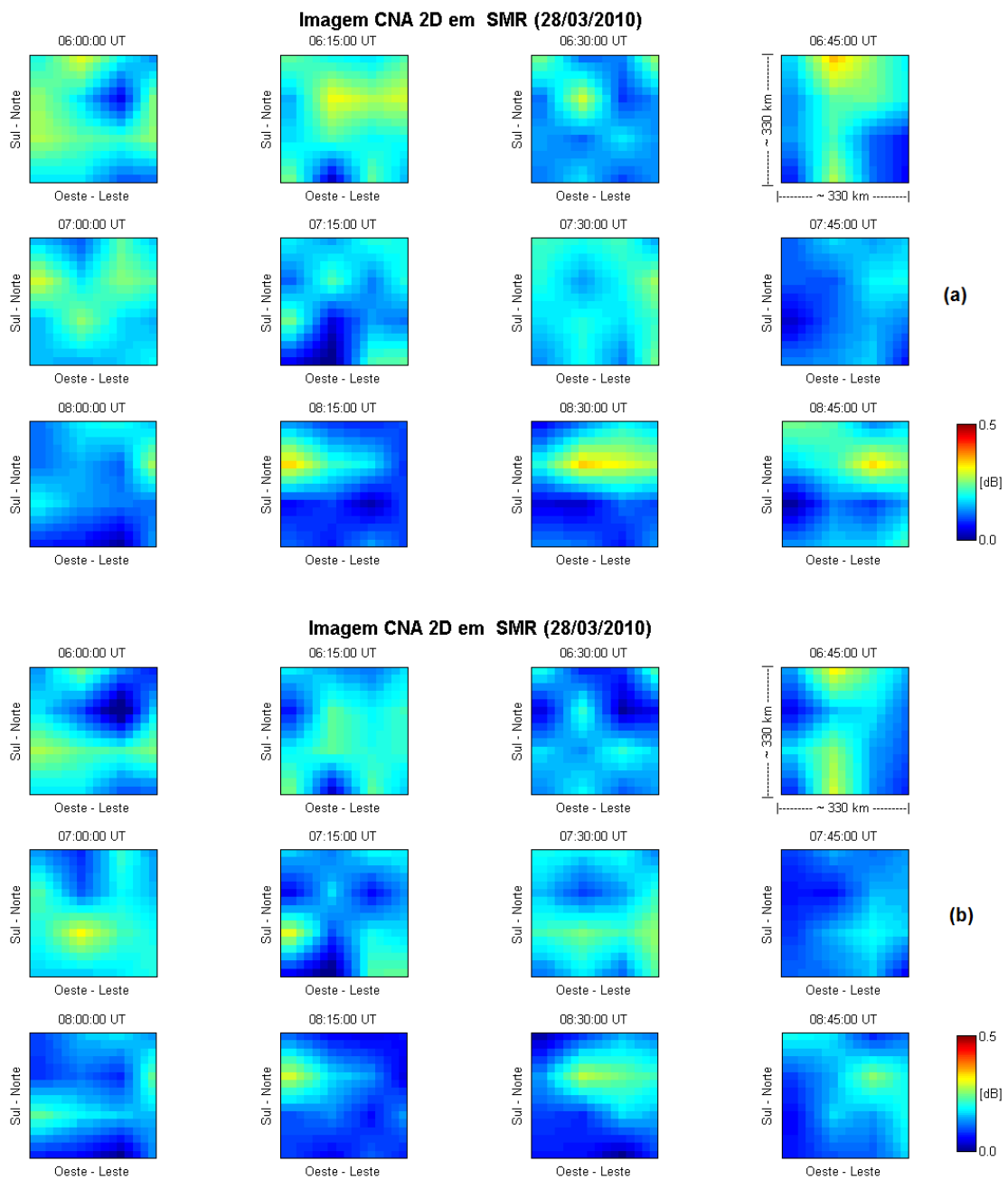


Figura 5.14 - Imagens da CNA calculadas a cada 15 min no dia 28 de março de 2010, utilizando (a) a técnica sugerida para estimar a QDC e (b) a QDC obtida pela corrente técnica.

Estudos da CNA e QDC também foram realizados por Brum (1999) utilizando dados de riômetros instalados na Estação Antártica Comandante Ferraz. Os dados foram obtidos de três antenas direcionais. Uma antena estava orientada para o zênite. As outras duas antenas estavam apontadas para o sul e para o oeste magnético, com ângulo zenital de  $40^\circ$ . Como foram analisados dados coletados entre 1987 e 1997, Brum (1999) utilizou três QDCs (uma para cada antena direcional) para os estudos da CNA. Cada QDC foi obtida de um dado de riômetro coletado em um dia classificado como quieto e próximo ao início do período de dados disponíveis em cada antena. Para a análise dos dados do riômetro conectado à antena vertical foi utilizada a curva obtida do dado coletado no dia 22 de abril de 1989. Para a análise dos dados do riômetro conectado à antena voltada para o sul foi utilizada a curva obtida do dado coletado no dia 14 de fevereiro de 1992. Enquanto que a curva obtida do dado coletado no dia 28 de julho de 1989 foi utilizado para a análise dos dados do riômetro conectado à antena voltada para o oeste. Um dos resultados apresentados por Brum (1999) foi que para determinar a absorção ionosférica do ruído cósmico de eventos localizados e de curta duração (de poucas horas a alguns dias), é mais apropriado usar na determinação da QDC dados coletados durante dias geomagneticamente quietos adjacentes ao período do evento. Isso se deve ao fato dos dados coletados durante dias quietos não serem constantes durante o ano e dependerem da atividade solar.

### 5.1.5 Geração de Mapas da Absorção em Forma de Imagem

O último passo para a análise da absorção ionosférica do ruído cósmico é a geração do mapa da absorção em forma de imagens. Utilizando a QDC obtida a partir dos critérios discutidos nas seções anteriores, o riômetro imageador permite a construção da distribuição espacial da absorção do ruído cósmico em uma área de  $330 \times 330$  km na direção norte-sul e leste-oeste a 100 km de altitude. Para a construção das imagens, os dados das  $4 \times 4$  antenas são convertidas para uma matriz de  $16 \times 16$  a fim de se obter imagens suavizadas da absorção. Utilizam-se no processo cálculos de interpolações e extrapolações disponíveis no próprio programa de análise de dados Matlab<sup>TM</sup>. As imagens da absorção têm uma resolução espacial de  $\approx 20$  km<sup>2</sup>, com relação à projeção na ionosfera a 100 km de altitude. Exemplos dos mapas da absorção em forma de imagem podem ser visualizados nas Figuras 3.5 e 3.6 da Seção 3.4 do Capítulo 3 da Dissertação.

## 5.2 Metodologia de Análise dos Dados do Instrumento MEPED

Os dados do satélite POES utilizados no trabalho de Dissertação foram obtidos na forma de mapas de contorno do número de partículas energéticas precipitadas em todo o globo terrestre, conforme mostrado na [Figura 5.15](#) e disponíveis em [Space Weather Prediction Center \(2001a\)](#). As imagens correspondentes aos mapas de contorno do número de partículas detectadas correspondem a quatro dias de observação do satélite. O lado esquerdo da [Figura 5.15](#) mostra dois mapas de contorno de fluxo de elétrons observados com o detector MEPED-0°. O mapa (a) corresponde à detecção de elétrons com energia  $> 30$  keV e o mapa (b) corresponde a detecção de elétrons com energia  $> 300$  keV. O lado direito da [Figura 5.15](#) apresenta o mapa de contorno do fluxo de elétrons observados com o detector MEPED-90°. O mapa (c) apresenta o número de elétrons detectados com energia  $> 30$  keV e no mapa (d) a contagem de elétrons com energia  $> 300$  keV.

Em cada mapa integrado é definida uma área que corresponde à projeção do ângulo de visada do IRIS instalado no OES, na altura da órbita média do satélite ( $\approx 840$  km) marcada pelo quadrado vermelho na [Figura 5.15](#). O segundo passo consiste na leitura e identificação da cor dos pixels dentro da área de interesse. Em cada área selecionada, a contagem de elétrons medidos pelo MEPED a bordo do satélite POES é representada por uma cor conforme mostrada na escala inferior de cada mapa. A análise de cada pixel de cor corresponde a um valor de 0 a 256. Portanto, através de rotinas desenvolvidas em Matlab<sup>TM</sup>, cada cor é transformada em um número correspondente na escala que, por sua vez, é diretamente proporcional à contagem dos elétrons. Finalmente, uma integral de área é realizada dentro do quadrado delimitado na imagem somando todos os valores correspondentes às cores dos pixels. Os valores são transformados em contagem de elétrons pela sua relação com a escala de cores.

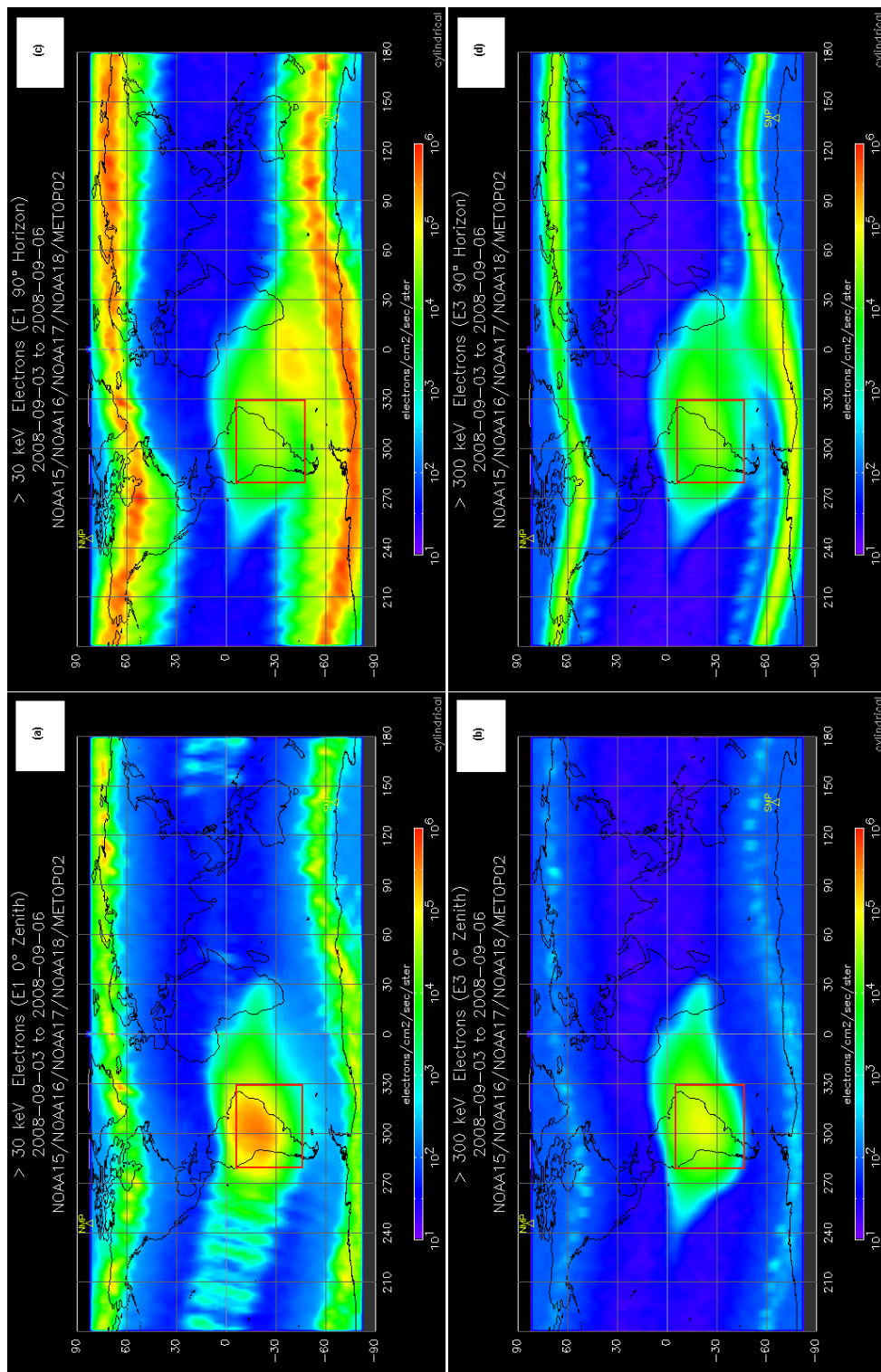


Figura 5.15 - Mapas de contorno do fluxo de elétrons em cada faixa de energia, obtidos a partir dos dados do satélite POES em  $\approx 840$  km de altitude para todo o globo terrestre, em projeção cilíndrica. À esquerda: distribuição do fluxo de elétrons com energia  $> 30$  keV (mapa (a)) e com energia  $> 300$  keV (mapa (b)) obtido com o detector MEPED-0°. À direita: distribuição do fluxo de elétrons com energia  $> 30$  keV (mapa (c)) e com energia  $> 300$  keV (mapa (d)) obtido com o detector MEPED-90°. Fonte: Adaptada de (Space Weather Prediction Center, 2001a).

## 6 RESULTADOS OBSERVACIONAIS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no trabalho de Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial do INPE/MCT são sumarizados no [Capítulo 6](#), divididos em três seções. A [Seção 6.1](#) apresenta a tempestade geomagnética estudada. A [Seção 6.2](#) diz respeito a análise da variação da absorção do ruído cósmico durante a tempestade geomagnética de setembro de 2008. A [Seção 6.3](#) apresenta a correlação entre a CNA obtida a partir dos dados do riômetro imageador instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra, RS - Brasil, com o fluxo integrado de elétrons obtido das medidas realizadas pelo instrumento MEPED, abordo do satélite POES.

### 6.1 A Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008

Entre 02 e 06 de setembro de 2008 ocorreu uma tempestade geomagnética, cujos dados do plasma do vento solar e do campo magnético interplanetário (do inglês *Interplanetary Magnetic Field* - IMF) são mostrados na [Figura 6.1](#), bem como a evolução dos índices Kp e Dst ao longo de todo o mês de setembro de 2008. Do topo à base da [Figura 6.1](#) são apresentados a magnitude do IMF e a componente  $B_z$ , a velocidade do vento solar ( $V_p$ ), densidade de prótons ( $N_p$ ), e os índices Kp e Dst. O IMF é tomado no sistema de coordenadas *Geocentric Solar Magnetospheric* (GSM), que considera que a direção-x está sobre a linha Terra-Sol com o lado positivo apontando para o Sol e o eixo-y aponta para o lado do anoitecer.

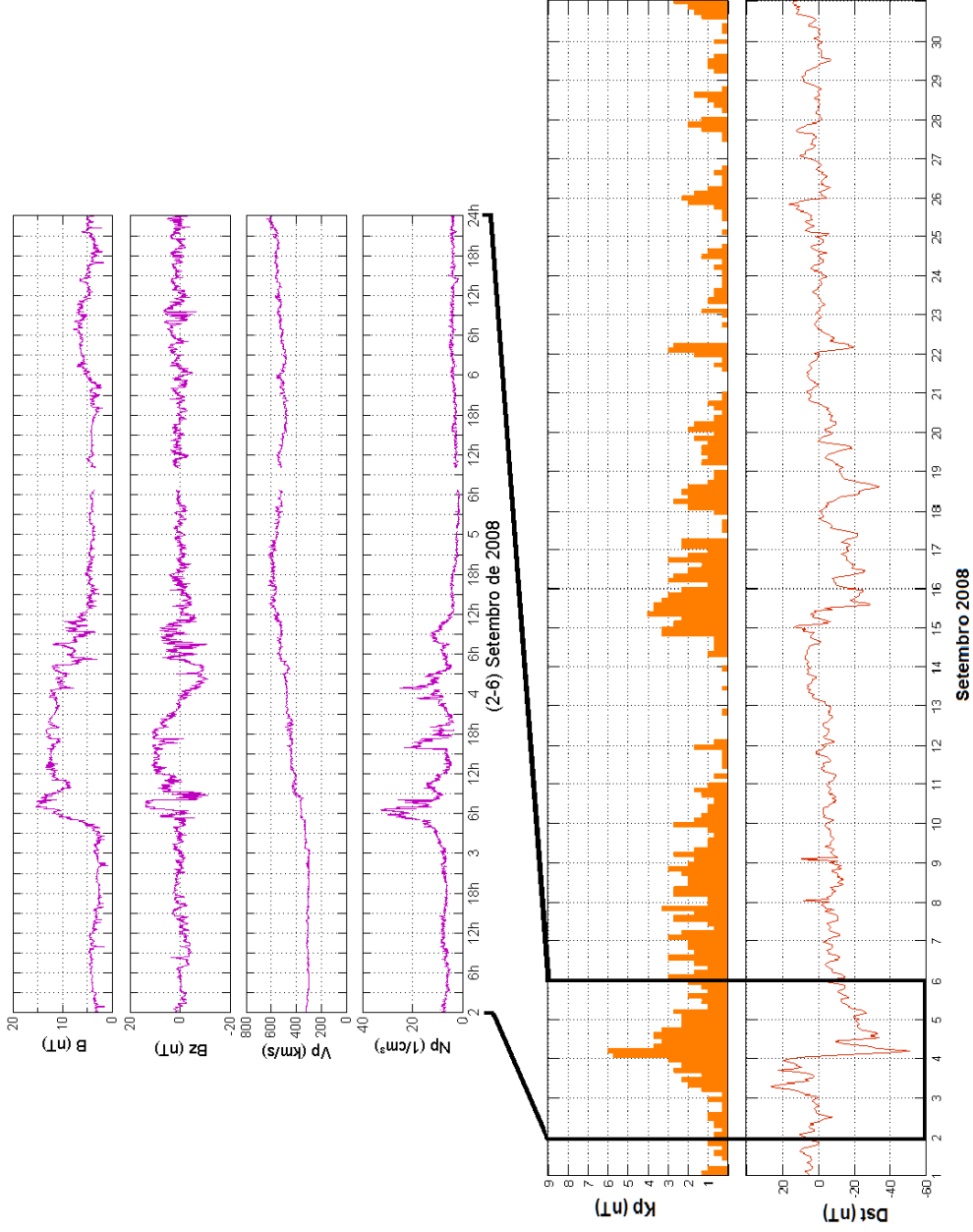


Figura 6.1 - Dados do plasma do vento solar e do campo magnético interplanetário para a tempestade geomagnética do dia 03 de setembro de 2008 e a evolução temporal dos índices geomagnéticos Kp e Dst para todo o mês de setembro de 2008. Do topo à base: magnitude do campo magnético interplanetário; componente  $B_z$ ; velocidade do vento solar ( $V_p$ ); densidade de prótons ( $N_p$ ); índice Kp; e índice Dst.

No dia 03 de setembro ocorreram dois inícios súbitos, caracterizados pelo aumento da pressão dinâmica (incidência de partículas) devida à incidência do vento solar que comprime a magnetosfera. O primeiro em torno das 07 UT e o segundo em torno das 18 UT. A intensidade do IMF aumentou após as 03 UT, até alcançar valores de  $\approx 15$  nT em torno das 07 UT. Nesse instante, a componente  $B_z$  apresentou valores de  $\approx 15$  nT, decaindo em seguida até alcançar valor mínimo de -11 nT às 09 UT. No mesmo instante a  $V_p$  aumentou para  $\approx 400$  km/s e a  $N_p$  foi  $\approx 30/\text{cm}^3$ . Durante os dois inícios súbitos, o valor do índice Dst subiu para aproximadamente 20 nT. Entre 17 e 18 UT do dia 03 de setembro, próximo ao horário em que ocorreu o segundo início súbito, a componente  $B_z$  excursionou para valores negativos. Durante o período considerado,  $V_p$  apresentou maiores valores e  $N_p$  foi de  $\approx 20/\text{cm}^3$ .

A fase principal da tempestade geomagnética, caracterizada pelo aumento da intensidade da corrente anelar, durou até as 04 UT do dia 04, quando o índice Dst atingiu o valor mínimo de -51 nT, fazendo com que a tempestade seja classificada como moderada (GONZALEZ et al., 1994). O índice Kp alcançou valor 06 no dia 04 quando se teve o mínimo do índice Dst. A componente  $B_z$  alcançou  $\approx -10$  nT às 04 UT e  $V_p$  apresentou valores de  $\approx 530$  km/s. A  $N_p$  foi 25 prótons/ $\text{cm}^3 \approx$  à 01 UT.

Após a fase principal ocorreu a fase de recuperação da tempestade geomagnética moderada, que foi caracterizada pela lenta recuperação da corrente anelar até retornar a valores típicos de períodos calmos. A partir das 12 UT do dia 04, todos os parâmetros apresentaram diminuições nos valores, com exceção da  $V_p$  que apresentou  $\approx 600$  km/s às 13 UT. Durante os dias 05 e 06 a magnitude do IMF oscilou em torno de 05 nT, a componente  $B_z$  variou entre  $\pm 04$  nT,  $V_p$  foi  $\approx 500$  km/s enquanto a  $N_p$  foi de  $\approx 5/\text{cm}^3$ .

## 6.2 Estudo da Variação da Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico Durante a Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008

Na [Seção 6.2](#) são primeiramente apresentadas as análises da CNA durante os períodos calmos do mês, a fim de verificar que as possíveis CNAs que por ventura viessem a serem detectadas durante a tempestade geomagnética fossem atribuídas exclusivamente aos processos físicos que ocorreram na ionosfera, descartando problemas instrumentais. Em seguida, serão discutidas as análises da CNA durante os períodos perturbados (02 - 06 de setembro).

### 6.2.1 Valores da CNA para os Períodos Calmos de Setembro

Para o cálculo da QDC foi utilizado dados de riômetros que seguem as regras discutidas na [Subseção 5.1.4](#) do [Capítulo 5](#). A partir da QDC calculada com dados coletados nos dias 12, 22 e 23 de setembro, é realizada a análise da variação da absorção ionosférica do ruído cósmico durante o mês de setembro de 2008. As 16 QDCs calculadas para o mês de setembro de 2008 utilizadas nas análises da CNA, correspondentes às antenas do IRIS instalado no OES, são apresentadas na [Figura 6.2](#).

Após a obtenção da QDC é possível calcular a CNA durante o período de interesse (veja [Subseção 2.4.3](#)). Uma forma prática de determinar a CNA em unidade deciBel (dB) é através da [Equação 6.1](#), onde  $\Lambda_{QDC}$  é a potência do sinal obtida da QDC e  $\Omega_{DIA}$  é a potência do sinal obtida do dia analisado.

$$CNA_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\Lambda_{QDC}}{\Omega_{DIA}}. \quad (6.1)$$

Os sinais obtidos de  $\Lambda_{QDC}$  e  $\Omega_{DIA}$  são proporcionais a potência do ruído cósmico medido. Como  $\Lambda_{QDC}$  depende dos critérios adotados na seleção dos dados, os valores da  $CNA_{dB}$  são relativos. Esse fato vai de encontro ao significado do acrônimo riômetro, que é tradução da palavra *riometer: relative ionospheric opacity meter*, ou seja, medida relativa da opacidade ionosférica.



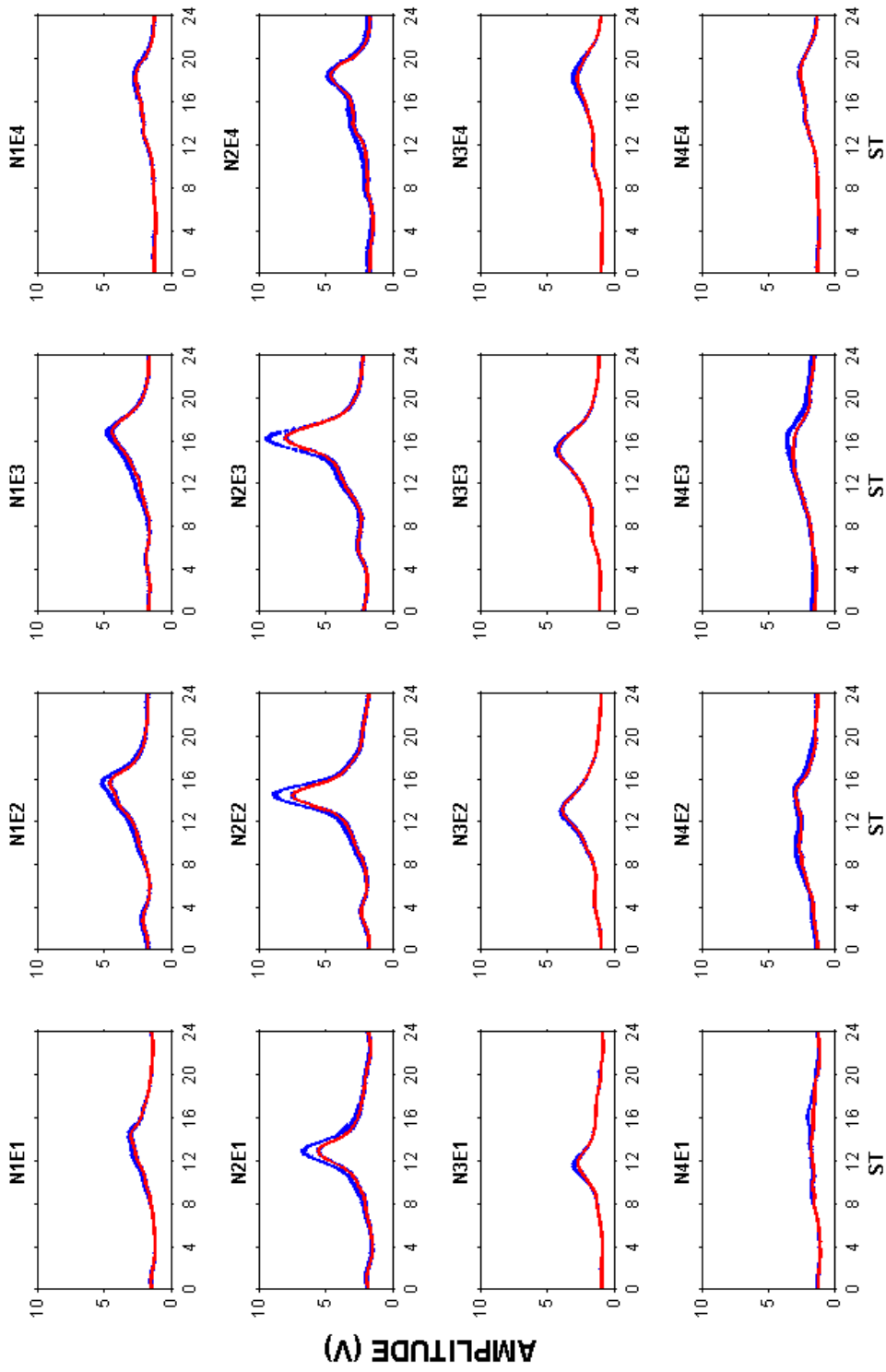


Figura 6.2 - Os pontos em azul correspondem à superposição dos dados do IRIS instalado no OES que foram coletados nos dias 12, 22 e 23 de setembro de 2008. As curvas em vermelho são as QDCs obtidas a partir dos dados.

Para garantir que as possíveis CNAs que por ventura viessem a serem detectadas durante a tempestade geomagnética fossem atribuídas exclusivamente aos processos físicos que ocorrem na ionosfera, descartando qualquer problema instrumental, a CNA foi calculada para todos os dias do mês de setembro de 2008. O cálculo da CNA cobre o período que incluiu a tempestade geomagnética, bem como os períodos calmos do mês, na qual não se deve obter valores significativos da CNA, mostrando a confiabilidade dos resultados. Como resultado, a variação diária da CNA ao longo dos dias do mês de setembro é apresentada nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5. Cada quadro mostra a variação diária da CNA calculada para um dia de dado. Os eixos verticais de cada quadro identificam as amplitudes (em dB) da CNA para o conjunto de antenas nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2). Ao longo dos eixos horizontais de cada quadro estão enumeradas as horas do dia em hora universal. Quando não há registro dos dados, o traço da CNA foi interrompido deixando um vazio no gráfico.

No presente estudo, somente os dados coletados pelas antenas direcionadas ao zênite foram levados em consideração (antenas N2E2, N2E3, N3E2 e N3E3). Os dados coletados pelas antenas situadas nas bordas da matriz de antenas possuem campo de visão cobrindo maior área do céu e, portanto sujeita a maiores interferências devido a obliquidade (veja Figura 4.3).

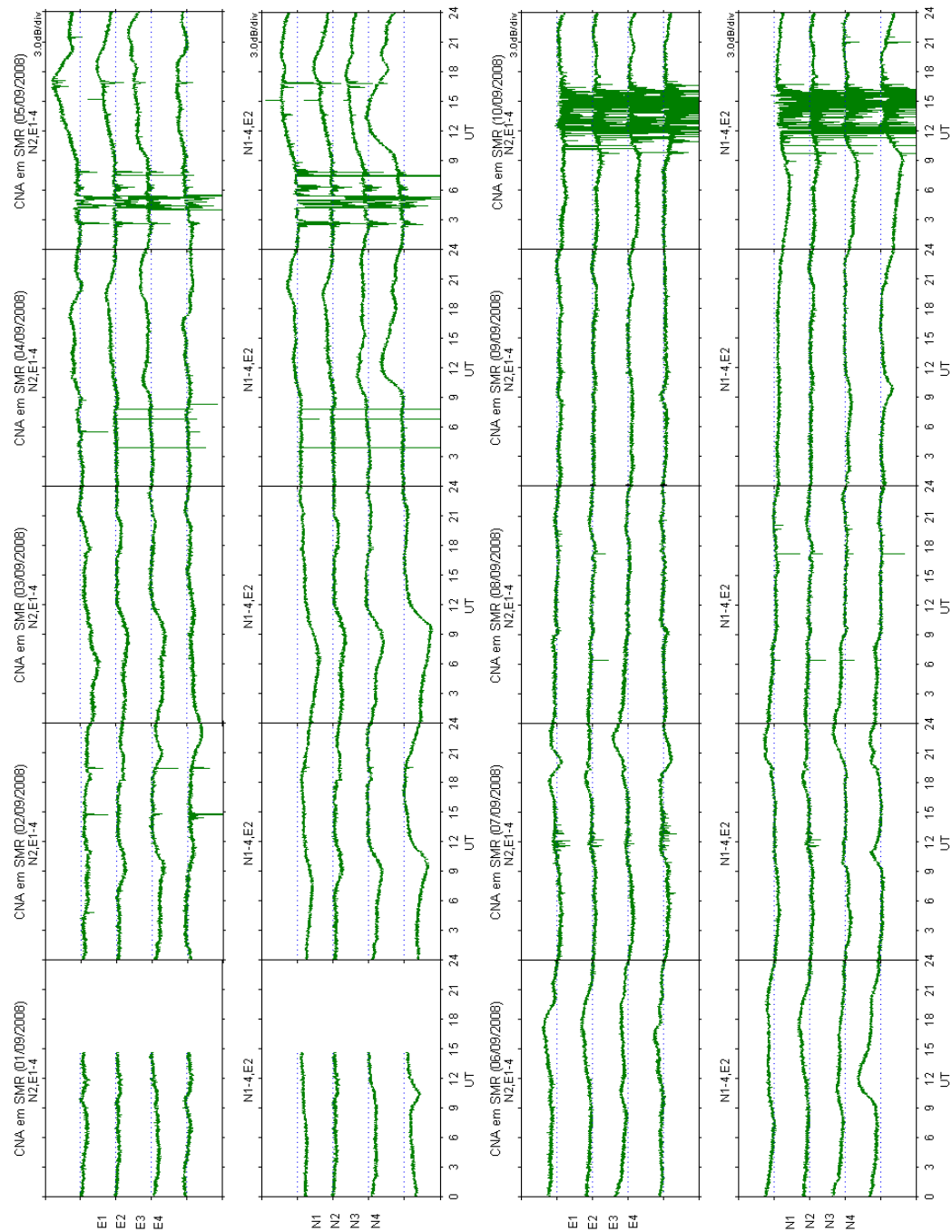


Figura 6.3 - Variação diária da CNA no período de 01 a 10 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (NI-4E2), do IRIS instalado no OES.

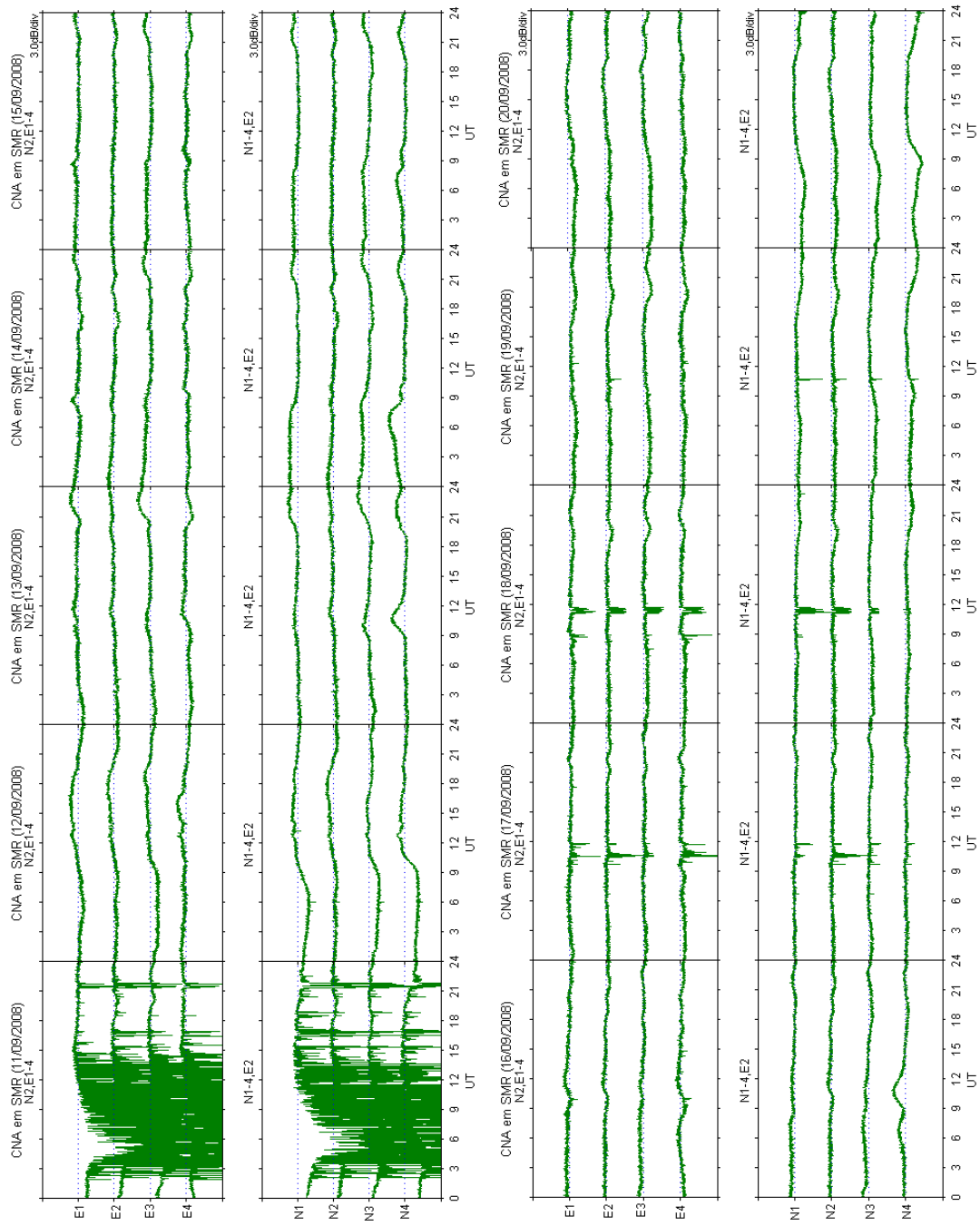


Figura 6.4 - Continuação da anterior, porém para o período de 11 a 20 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2), do IRIS instalado no OES.

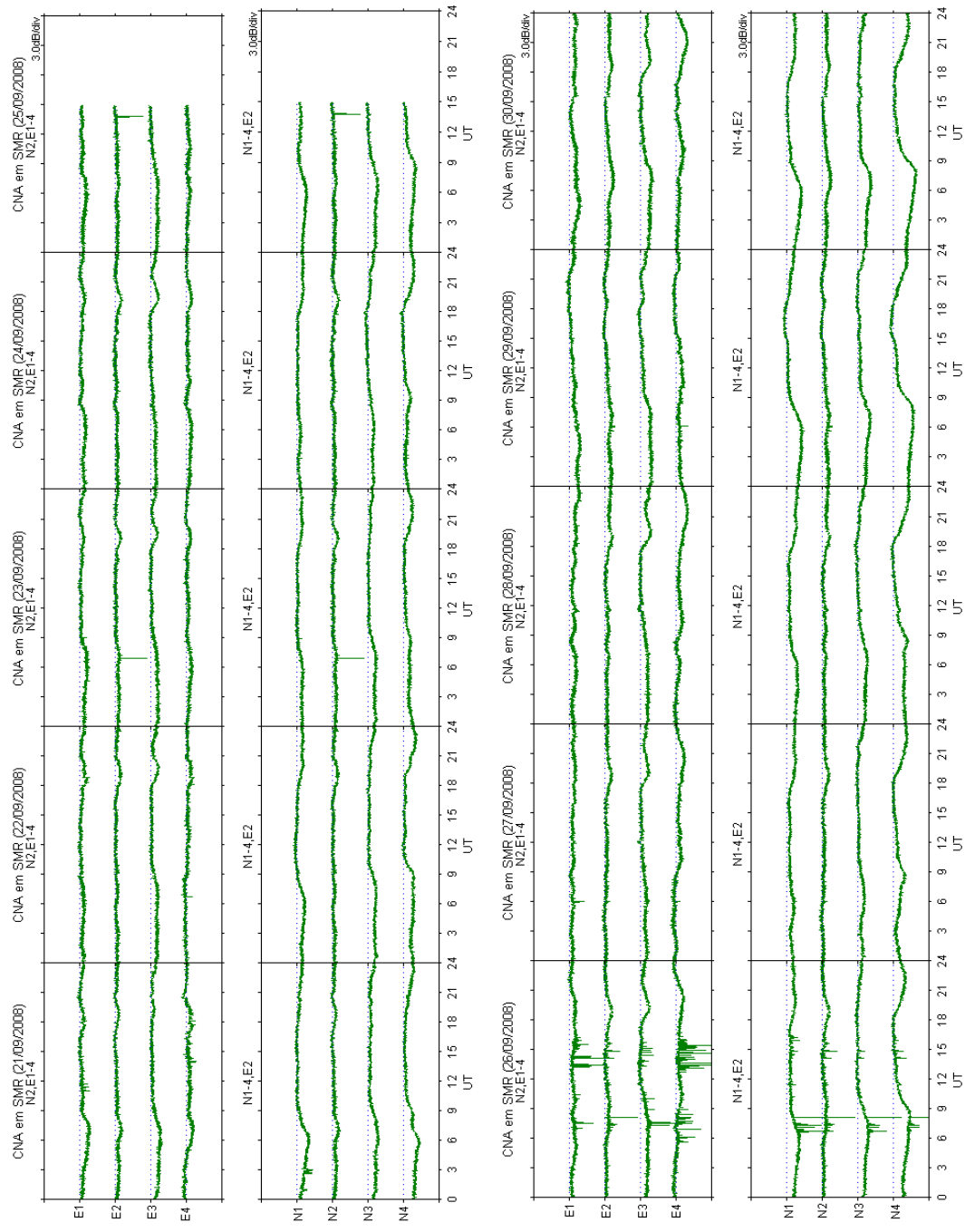


Figura 6.5 - Continuação da anterior, porém para o período de 21 a 30 de setembro de 2008, para o conjunto de antenas, nas direções leste-oeste (N2E1-4) e norte-sul (N1-4E2), do IRIS instalado no OES.

Conforme apresentado na [Figura 6.3](#), nos dias 01, 02 e até as 21 UT do dia 03 de setembro de 2008 os valores da CNA permaneceram abaixo de zero dB, indicando que não houve absorções. Após as 21 UT do dia 03 os valores da CNA aumentaram em todas as antenas. O aumento da CNA está de acordo com o início da tempestade geomagnética na qual o início súbito ocorreu  $\approx 18$  UT, como discutido na [Seção 6.2](#). Houve  $\approx 03$  h de diferença entre o segundo início súbito da tempestade geomagnética e os primeiros efeitos observados pelo IRIS. Os valores da CNA indicam que houve absorções até  $\approx$  o dia 07 de setembro. Durante o período de quatro dias, as maiores absorções foram observadas no dia 05. A seguir, os efeitos da CNA nos dados do IRIS instalado no OES durante a tempestade geomagnética serão abordados em maiores detalhes. Entre os dias 08 e 10 de setembro os valores da CNA diminuíram e alcançaram valores abaixo de zero dB. Ainda no dia 10 verifica-se valores expressivamente negativos entre as 12 e 16 UT, indicando a presença de rádio interferências no dado. As rádio interferências que são caracterizadas por apresentar picos nas curvas do ruído cósmico, no cálculo da CNA apresentam picos negativos devido a natureza logarítmica da [Equação 6.1](#). No cálculo da CNA optou-se por não utilizar o processo de suavização nos dados do IRIS, deixando-o apenas para o cálculo da QDC.

Rádio interferências intensas foram observadas no dado do IRIS coletado no dia 11 de setembro, como mostra a [Figura 6.4](#). No dia 12 fracas absorções ocorreram entre as 12 e 18 UT, e podem estar ligadas as absorções que ocorrem na região F da ionosfera ([MITRA; SHAIN, 1953](#); [ABDU et al., 1967](#); [NISHINO et al., 2002](#)). Algumas rádio interferências foram detectadas nos dados do IRIS coletados nos dias 17 e 18, como indicam os picos da CNA abaixo do nível zero dB. Com relação aos valores da CNA, em geral não foi observado valores significativos da CNA entre os dias 13 e 20 de setembro. Todas as absorções que ocorreram foram menores que 0,5 dB.

Entre os dias 21 e 30 de setembro a atividade geomagnética foi baixa. Ao longo de todo o período calmo o índice Dst permaneceu próximo de zero. Em alguns casos chegou até a excursionar para valores positivos, como pode ser visto na [Figura 6.1](#). No período, verifica-se que não houve nenhuma absorção, como pode ser visto na [Figura 6.5](#). Como não ocorreu nenhuma absorção durante os períodos calmos, confirma-se que os valores da CNA calculados a partir dos dados do IRIS podem, de fato, serem atribuídos as variabilidades dos processos físicos da ionosfera e que o instrumento não introduz nenhum tipo de erro instrumental.

### 6.2.2 Valores da CNA Durante a Tempestade Geomagnética

Na Subseção 6.2.2 são apresentados os resultados observacionais obtidos dos dados de riômetros instalados em diferentes sítios da América do Sul, identificados e localizados na Figura 6.6, durante a tempestade geomagnética que iniciou no dia 03 de setembro de 2008.

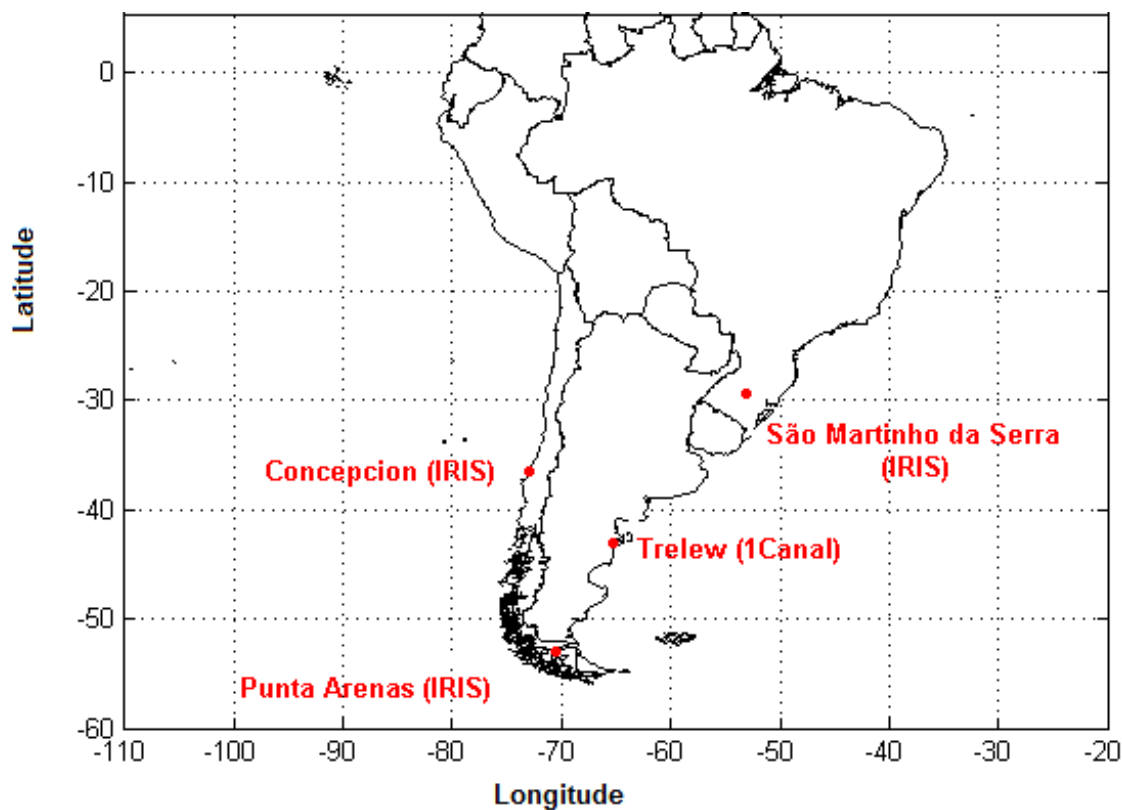


Figura 6.6 - Localização dos sítios que contam com riômetros imageadores (identificados como IRIS) e convencional (identificado como 1 Canal) da rede SARINET utilizados na análise da tempestade geomagnética que iniciou no dia 03 de setembro de 2008.

### 6.2.2.1 CNA obtida em São Martinho da Serra (SMR)

A QDC obtida com os dados coletados nos três dias quietos e sem interferências no mês de setembro de 2008, para as 16 antenas do IRIS instalado no OES, São Martinho da Serra, RS - Brasil, seguem os critérios apresentados na [Subseção 5.1.4](#) do [Capítulo 5](#) e é apresentada na [Figura 6.2](#).

Os resultados obtidos das análises dos dados, para o período geomagneticamente perturbado, são apresentados na [Figura 6.7](#). Cada gráfico, que corresponde ao período que cobre os dias 02 a 06 de setembro de 2008, mostra: em (a) a variação diária da potência do sinal do ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul, em escala de 0 a 10 V) junto com a QDC (em vermelho) para as antenas na direção norte-sul (N1-4E2); em (b) a CNA (em verde, em escala de 0 a 3 dB) para as antenas N1-4E2; em (c) e (d) são apresentados os mesmos parâmetros que em (a) e (b), porém para as antenas na direção leste-oeste (N2E1-4); e em (e) apresenta-se a variação temporal do índice Dst dado em nanoTesla. Como realizado na [Subseção 6.2.1](#), foram considerados os valores máximos da absorção detectados pelas antenas centradas no zênite.

Durante o dia 02 a CNA apresentou apenas valores negativos indicando que não houve absorção ionosférica em nenhuma das antenas. Em torno das 21 UT do dia 03 foi detectada uma absorção  $< 0,5$  dB que se estendeu até as 09 UT do dia 04. Em seguida o valor da absorção aumentou gradativamente até o restante do dia alcançando o valor máximo de 1,5 dB. No dia 05 foram detectadas as maiores absorções durante o período, que foi de  $\approx 2,5$  dB nas antenas direcionadas ao zênite. Com relação ao dia 06 ocorreram algumas absorções com valor máximo de  $\approx 1$  dB até as 03 UT. Após esse horário a amplitude do ruído cósmico praticamente alcança a mesma amplitude da QDC, indicando que as absorções diminuíram.



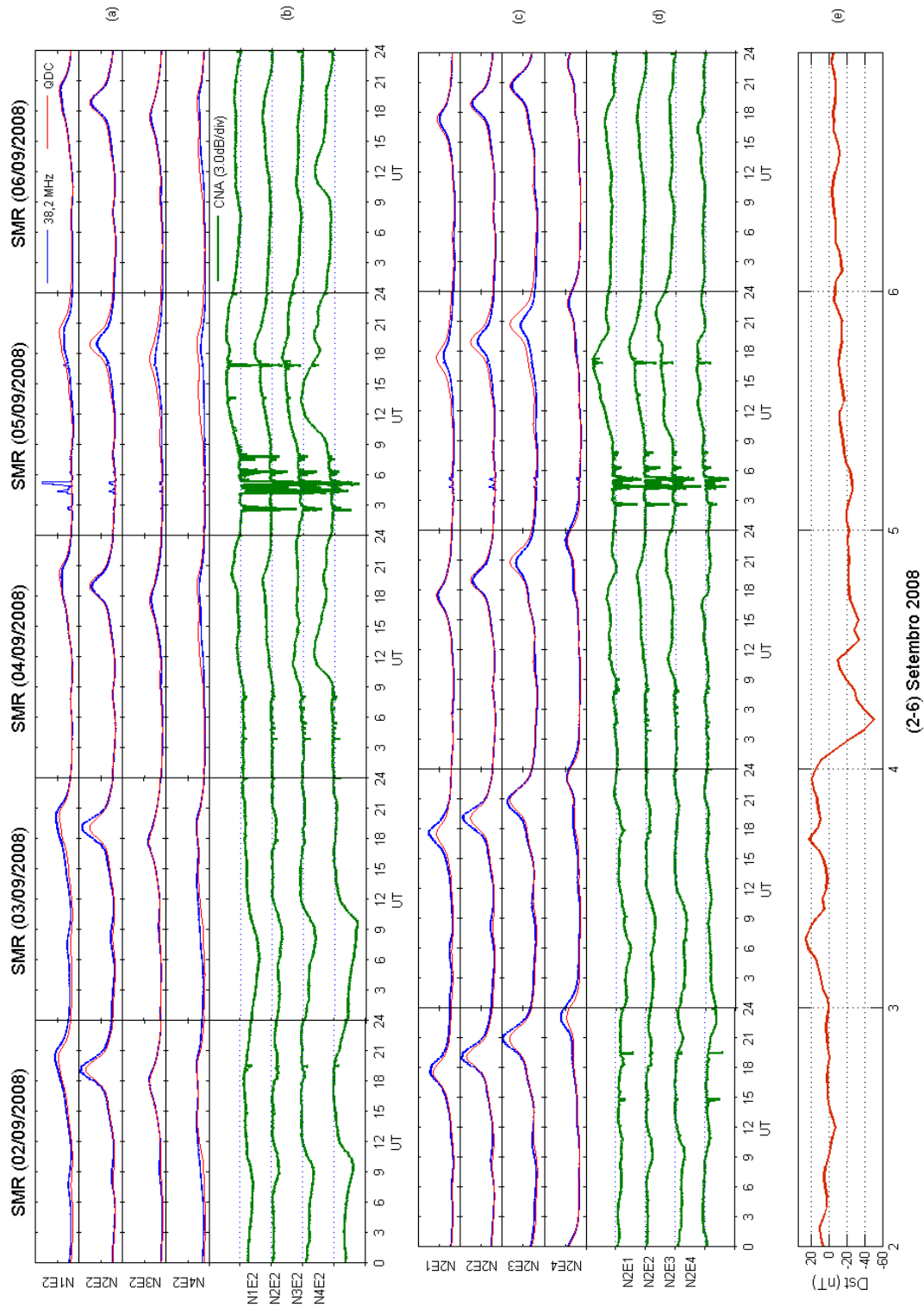


Figura 6.7 - Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do IRIS instalado no OES e índice geomagnético para o período de 02 a 06 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e).

Os mapas da CNA em forma de imagens para o período analisado foram obtidos a cada 02 h entre 03 e 06 de setembro de 2008, como se apresenta na [Figura 6.8](#). A primeira imagem do dia 03 corresponde às 00 UT e seguindo da esquerda para a direita, a última imagem corresponde às 22 UT. O dia 02 não foi incluído nas sequências de imagens por não apresentar nenhuma absorção. Cada pequena imagem apresenta o norte geográfico para cima (direção do Equador), e leste à direita, como mostra o detalhe abaixo das imagens. Cada imagem corresponde a  $\approx 330$  km na direção norte-sul e leste-oeste a 100 km de altitude. A intensidade da absorção é representada pela barra de cor (0 - 3 dB) ao lado direito da [Figura 6.8](#).

As absorções diagramadas na [Figura 6.8](#) durante o dia 03 são da ordem de  $\approx 0,5$  dB até as 08 UT do dia 04. Entre as 10 e 14 UT do mesmo dia, o valor da CNA é  $\approx 1,5$  dB. Após esse horário há uma diminuição gradual da CNA, porém o nível de absorção do ruído cósmico flutua em torno de 0,5 dB até as 06 UT do dia 05. Em seguida é observado um aumento da CNA a partir das antenas localizadas ao sul do campo de antenas, em torno das 10 UT, com máxima intensificação às 14 UT. A absorção atinge 2,5 dB de intensidade, onde é desprezada a região de saturação visto compreender a antena N4E2, que está localizada na borda do campo de antenas. A estrutura de absorção com  $\approx 250$  km de elongação na direção leste-oeste e  $\approx 150$  km na direção norte-sul deslocou-se para a direção nordeste, conforme visto a partir das  $\approx 14$  UT. Em seguida, a estrutura deslocou-se para fora do campo de visão das antenas. No dia 06 ainda verifica-se alguns períodos com absorções (por exemplo, entre 10 e 12 UT) que também ocorrem durante a fase de recuperação da tempestade geomagnética, como mostrado pelo índice Dst na [Figura 6.7](#).

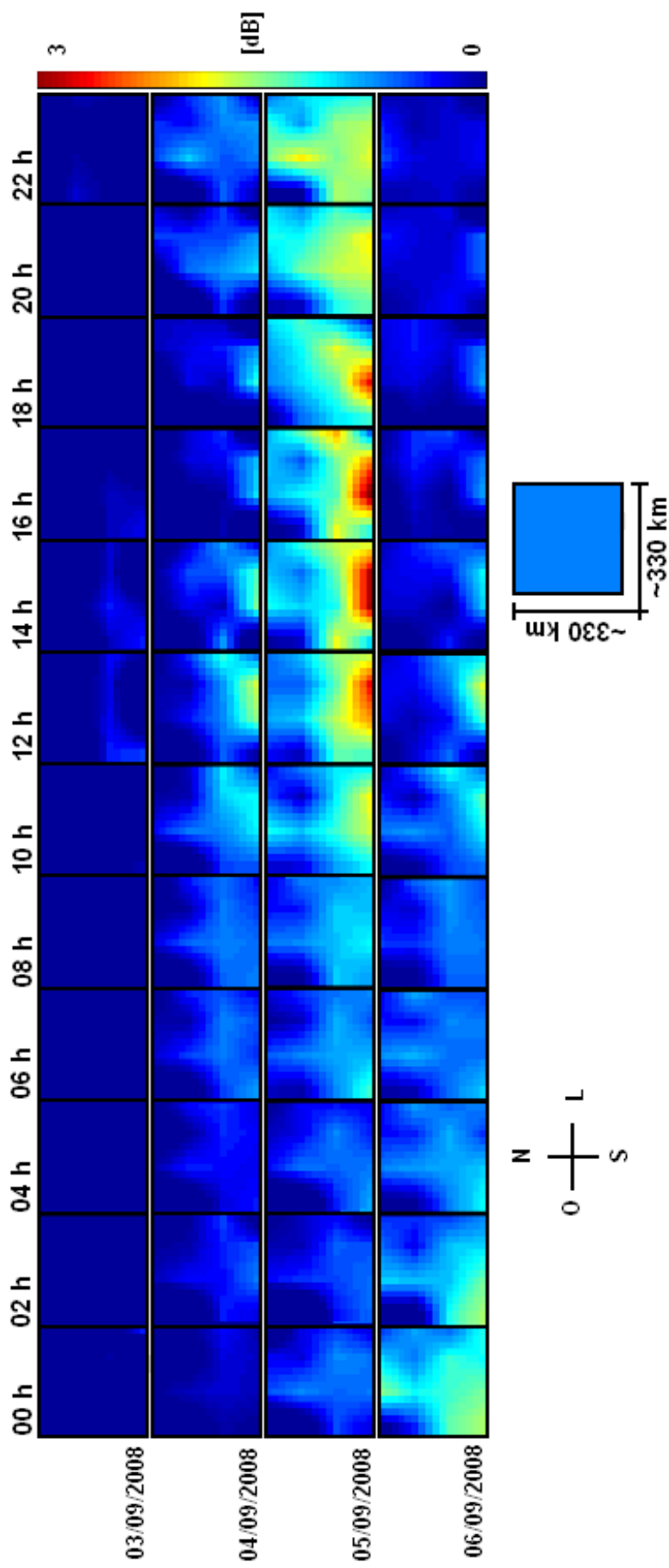


Figura 6.8 - Imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico a cada 2 h, entre os dias 03 e 06 de setembro de 2008, obtidas com dados do IRIS instalado no OES, em São Martinho da Serra, RS - Brasil. A intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada à direita. No detalhe abaixo é mostrada a orientação a orientação das imagens bem como a área de cada imagem a 100 km de altitude.

Os parâmetros ionosféricos durante o período perturbado de 03 a 06 de setembro de 2008 foram obtidos dos dados medidos com a digissonda instalada na Unidade Regional de Cachoeira Paulista, em Cachoeira Paulista, SP (22° 7' S, 45° 00' O). Verificou-se a variação temporal dos seguintes parâmetros:  $f_0F2$  que é a frequência crítica no pico da região F;  $f_tEs$  que representa a frequência máxima para qual se observa o eco da camada Es; e  $h'F2$  que é a altura virtual mínima do traço ordinário da camada estável mais alta na região F ionosférica.

A inspeção da variação do parâmetro  $f_0F2$  durante o período perturbado é necessária devido a relação da  $f_0F2$  com a componente da absorção do ruído cósmico na região F da ionosfera (MITRA; SHAIN, 1953; RAMANATHAN et al., 1961; ABDU et al., 1967; KRESSMAN, 1974), como foi discutido na Subseção 2.4.3 do Capítulo 2. Com a análise do parâmetro  $f_tEs$  pode-se verificar a formação da camada E esporádica durante o período da tempestade. A presença da camada E esporádica durante a noite é uma evidência da precipitação de partículas energéticas (BATISTA; ABDU, 1977; KIRKWOOD, 1997; KIRKWOOD; NILSSON, 2000). Por fim, a altura da camada F2 durante o período perturbado é obtido pela variação do parâmetro  $h'F2$ .

A variação diária dos parâmetros ionosféricos descritos acima, entre os dias 02 e 06 de setembro, são apresentados em azul na Figura 6.9. Em vermelho estão as médias dos parâmetros ionosféricos tomados como referência (ref), obtidos dos dados coletados nos dias 21, 22 e 23 de agosto de 2008 e classificados como geomagneticamente quietos. Nos painéis referentes aos parâmetros  $f_0F2$  e  $f_tEs$ , o eixo vertical refere-se à frequência (em MHz) em que ocorreu a reflexão da onda eletromagnética emitida pela digissonda na ionosfera. No painel referente ao parâmetro  $h'F2$ , o eixo vertical corresponde à altura virtual mínima (em km) do traço ordinário da camada estável mais alta na região F. Ao longo dos eixos horizontais estão as horas do dia em escala UT.

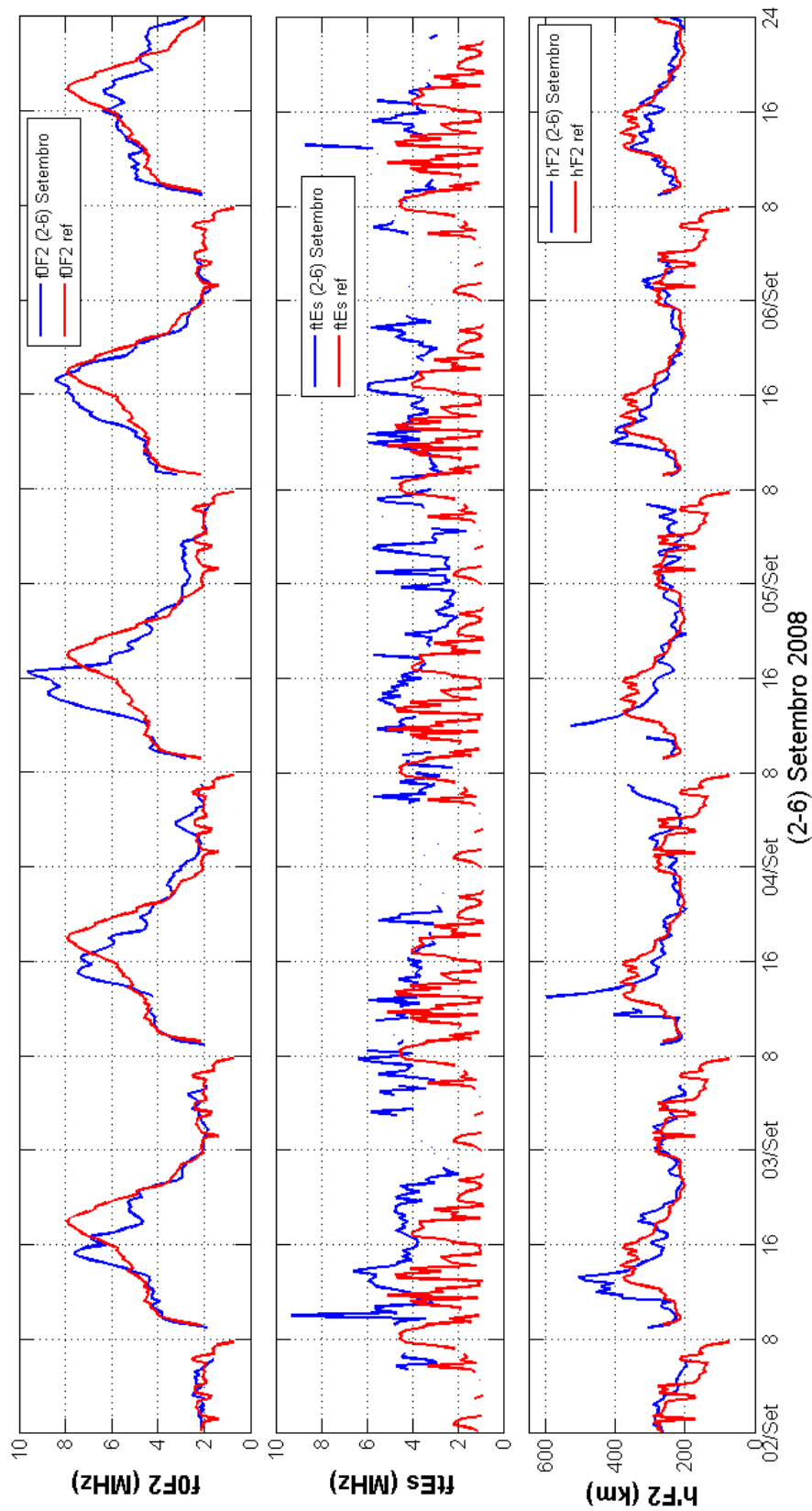


Figura 6.9 - Em azul: variação diária dos parâmetros ionosféricos  $f_0F2$  (em frequência),  $fE_s$  (em frequência) e  $h'F2$  (em altura), obtidos da redução dos dados da digissonda instalada na Unidade Regional de Cachoeira Paulista, em Cachoeira Paulista, SP ( $22^\circ 7' S$ ,  $45^\circ 00' O$ ), distante cerca de 1000 km do OES, durante o período de 02 a 06 de setembro de 2008. Em vermelho: variação diária dos parâmetros ionosféricos tomados como referência (ref) e obtidos dos dados coletados durante os dias 21, 22 e 23 de agosto de 2008 (dias quietos). As medidas da digissonda são realizadas a cada 15 min.

Com base na evolução temporal dos parâmetros ionosféricos apresentados na Figura 6.9, observa-se que:

- Independente da curva obtida dos dados coletados nos dias em estudo ou dos dados coletados nos dias tomados como referência, o parâmetro  $f_0F2$  aumenta entre as 14 e 18 UT. No entanto, a maior diferença entre as curvas em azul e vermelho foi observada em torno das 16 UT do dia 04 de setembro. O parâmetro  $f_0F2$  chegou a  $\approx 10$  MHz. Em consequência, ocorrem aumentos nos valores da CNA mostrados na Figura 6.7 indicando as absorções que comumente ocorrem na região F em baixas latitudes (MITRA; SHAIN, 1953; ABDU et al., 1967). Nishino et al. (2002) e Nishino et al. (2006) reportaram leves absorções ionosféricas do ruído cósmico na região de São Martinho da Serra, durante os períodos da tarde até o início da noite, identificando-as como absorções que ocorrem na região F em baixas latitudes. Durante os dias 05 e 06 de setembro o parâmetro  $f_0F2$  diminui e apresenta valores iguais ou até mesmo menores que os obtidos dos dias de referência.
- Durante o dia 02, geomagneticamente quieto, o parâmetro  $f_tEs$  mostra que a camada esporádica foi detectada a partir das 05 UT. No dia seguinte, os primeiros registros ocorrem em torno das 04 UT. No entanto, no dia 05 ocorreu a presença de camadas esporádicas praticamente em todo o dia. Entre as 15 e 17 UT do dia 05 ocorreu um pico em frequência que alcançou 06 MHz com duração de  $\approx 03$  h. Todos os valores das frequências do parâmetro  $f_tEs$  obtidos dos dados coletados durante os dias quietos foram mais baixos.

Evidências de precipitação de partículas energéticas durante a fase de recuperação de tempestades geomagnéticas já foram observadas por Batista e Abdu (1977), em que foi utilizando dados de ionossonda instalada em Cachoeira Paulista. No trabalho foram detectados aumentos nos parâmetros  $f_tEs$  e  $f_bEs$  (frequência de bloqueio) entre um e três dias após tempestades magnéticas ocorridas em 1973 e 1975. Recentemente, Resende (2010) apresentou resultados dos estudos do comportamento dos parâmetros de frequência  $f_tEs$  e  $f_bEs$  da camada Es da ionosfera equatorial durante os períodos perturbados do ciclo solar 23 (1998-2006) com dados de digissonda instalada em São Luís-MA. Na maioria dos casos estudados, foi observado

uma redução de frequência parâmetro  $f_iE_s$  que ocorreu durante a fase de recuperação das tempestades magnéticas. Além disso, foram observados picos no parâmetro  $f_bE_s$  que também ocorreram na fase de recuperação das tempestades magnéticas.

- No que tange a análise do parâmetro  $h'F_2$ , a característica mais importante observada foi a presença de picos em altura, que no dia 03 alcançou 600 km e no dia 04 de setembro alcançou 500 km, ambos próximo às 12 UT. Nos dias 02, 05 e 06, os valores do parâmetro  $h'F_2$  são  $\leq 500$  km. Porém, a partir dos valores obtidos a partir da média dos dados coletados durante os dias quietos verifica-se que o parâmetro  $h'F_2$  sempre foi  $\leq 400$  km. O aumento detectado na altura mínima da região F durante os dias 03 e 04 de setembro pode ser atribuído a propagação de ondas na região F, como foi apresentado na [Seção 2.3 do Capítulo 2](#). Por exemplo, as ondas planetárias e os processos interativos que as envolvem desempenham papel importante nas variabilidades diárias da região F que podem ser observadas na corrente do eletrojato equatorial, no campo elétrico zonal e na deriva do plasma (ABDU et al., 2006).

### 6.2.2.2 CNA obtida em Punta Arenas (PAC)

Na Seção 6.2.2.2 é apresentada a análise das absorções do ruído cósmico medidas com o IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile. A cidade de Punta Arenas, Chile, está localizada ao sudoeste de São Martinho da Serra, RS-Brasil, a  $\approx 3100$  km de distância. A intensidade do campo magnético total na região de Punta Arenas encontra-se em torno de 32000 nT (ver Figura 3.3).

A QDC obtida com os dados observados nos três dias quietos e sem interferência do mês de setembro de 2008, para as 16 antenas do IRIS de PAC, Chile, segue os critérios apresentados na Subsubseção 5.1.4.2 e é apresentada na Figura 6.10. A partir de gráficos do ruído cósmico obtidos dos dados coletados no mês de agosto, setembro e outubro (não mostrados na Dissertação), verifica-se que as antenas N1E3, N1E4, N2E1 e N2E2 apresentam problema possivelmente de origem instrumental. As amplitudes do ruído cósmico detectadas pelas antenas são menores que as amplitudes detectadas pelas outras 12 antenas. Este fato fica claro quando se observa a máxima amplitude devido a passagem do centro galáctico pelo zênite de observação. Além disso, o sinal captado pelas antenas difere das demais antenas no decorrer do período em que foi realizada a inspeção. Portanto, para os dados de PAC não são considerados os sinais recebidos por estas antenas.



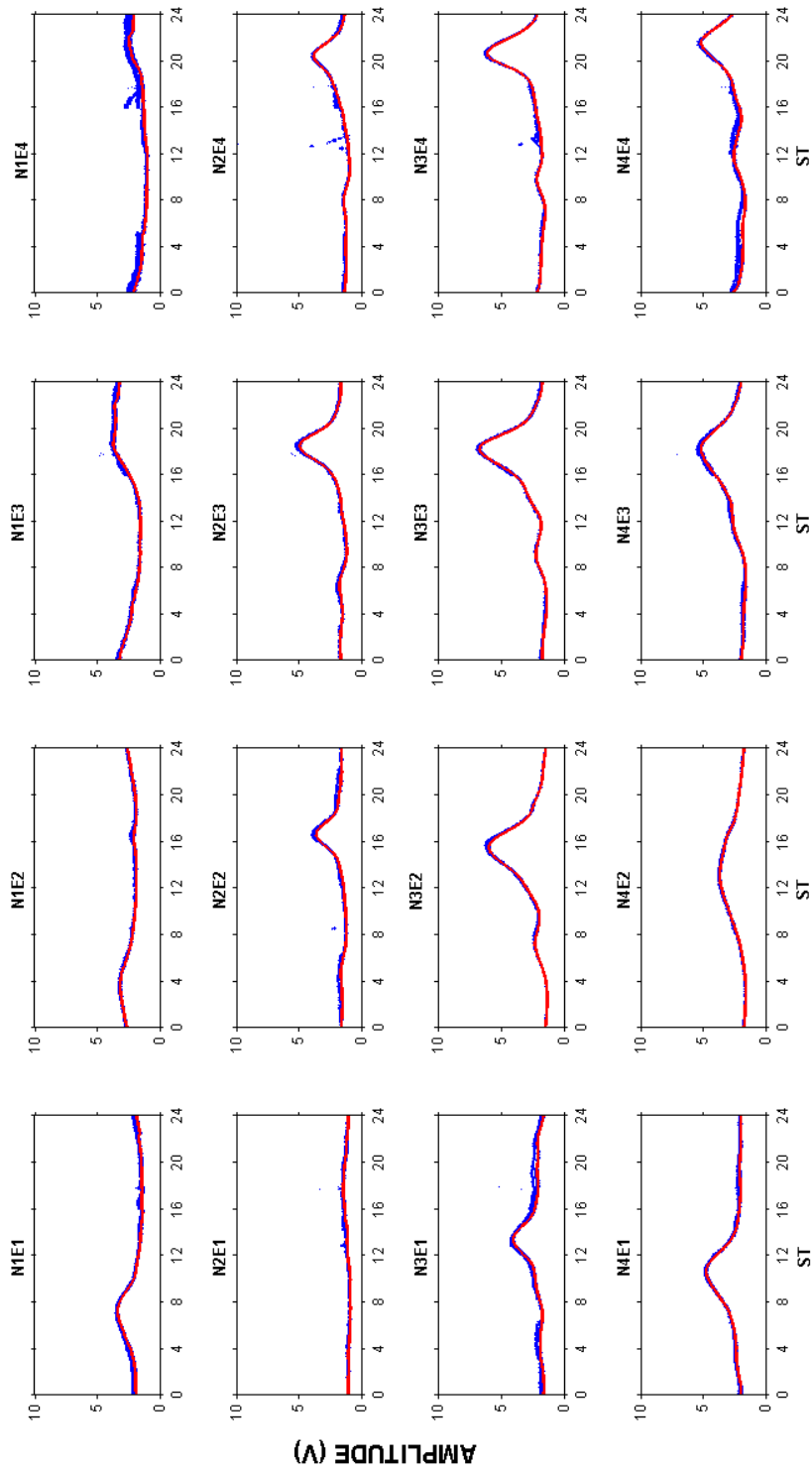


Figura 6.10 - Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados das 16 antenas do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile, durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: QDCs para cada antena.

Os resultados das análises obtidas a partir dos dados do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, para o período geomagneticamente perturbado, são apresentados na [Figura 6.11](#). Do topo à base são apresentadas: a variação diária da potência do sinal do ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul, em escala de 0 a 10 V) junto com a QDC (em vermelho) para as antenas na direção norte-sul (N1-4E2) indicado por (a); em (b) está a CNA (em verde, em escala de 0 a 3 dB) para as antenas N1-4E2; em (c) e (d) são apresentadas as mesmas informações que em (a) e (b), porém para as antenas na direção leste-oeste (N2E3-4); e em (e) apresenta-se a variação temporal do índice Dst obtido entre os dias 02 e 05. Como realizado anteriormente, são considerados os valores máximos das absorções detectados pelas antenas centradas no zênite.

Como resultado da análise dos dados do IRIS instalado em PAC, conclui-se que no dia 02 não foi observada nenhuma absorção nas antenas consideradas na análise da CNA. As absorções começaram a ocorrer durante o início da tempestade (dia 03), e atingiu a maior intensidade no dia 05 (0,8 dB) após a fase principal, que ocorreu no dia 04.

Os mapas da CNA, em forma de imagens durante o período estudado são apresentados na [Figura 6.12](#). Em todos os dias, nas imagens que iniciam às 04 UT, às 06 UT e às 08 UT, há a presença de alguns pontos mais claros, indicando níveis mais altos de absorção. Especula-se que esses níveis de absorção são problemas instrumentais das antenas N1E3 e N1E4. Nas imagens da absorção ionosférica, não foi possível identificar qualquer movimento de deriva da estrutura de absorção.

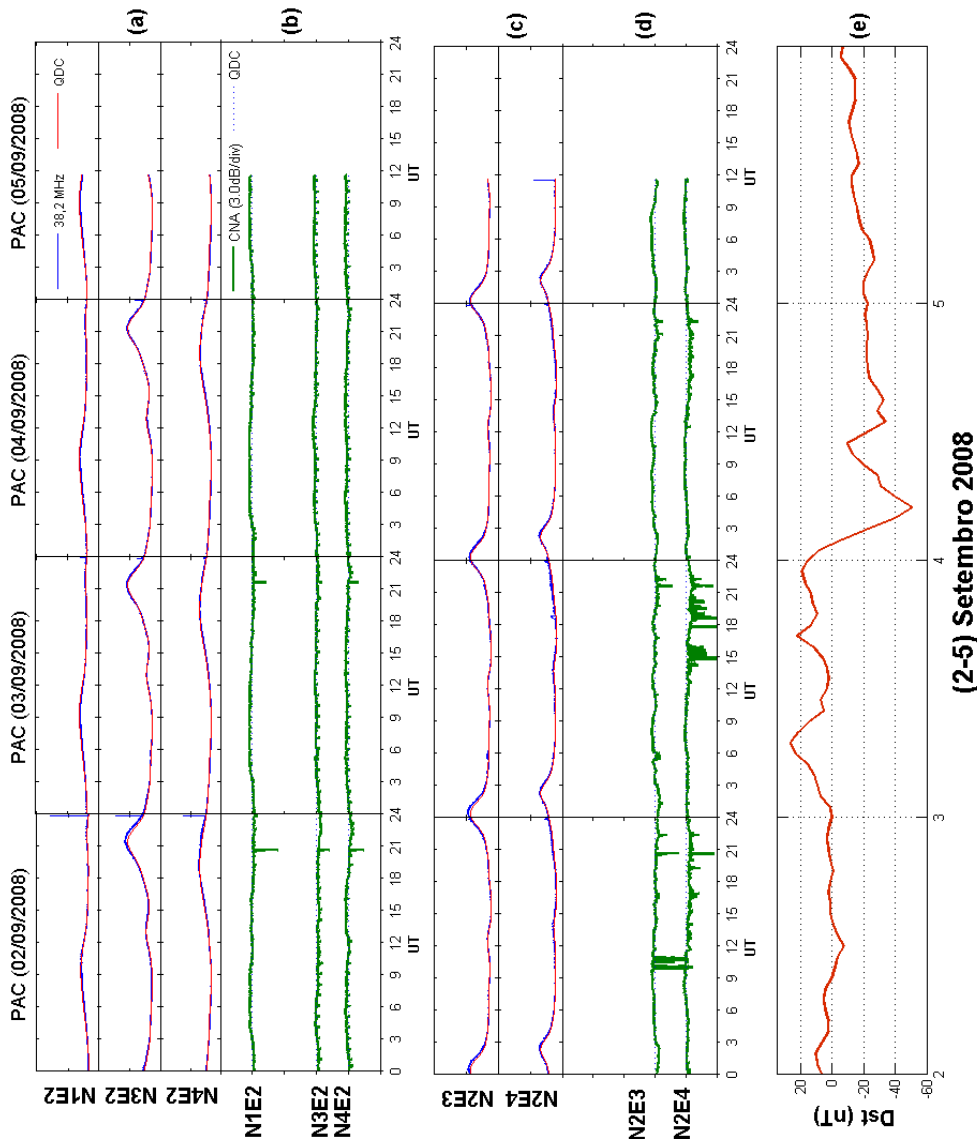


Figura 6.11 - Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico de IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile e índice geomagnético para o período de 02 a 05 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e).

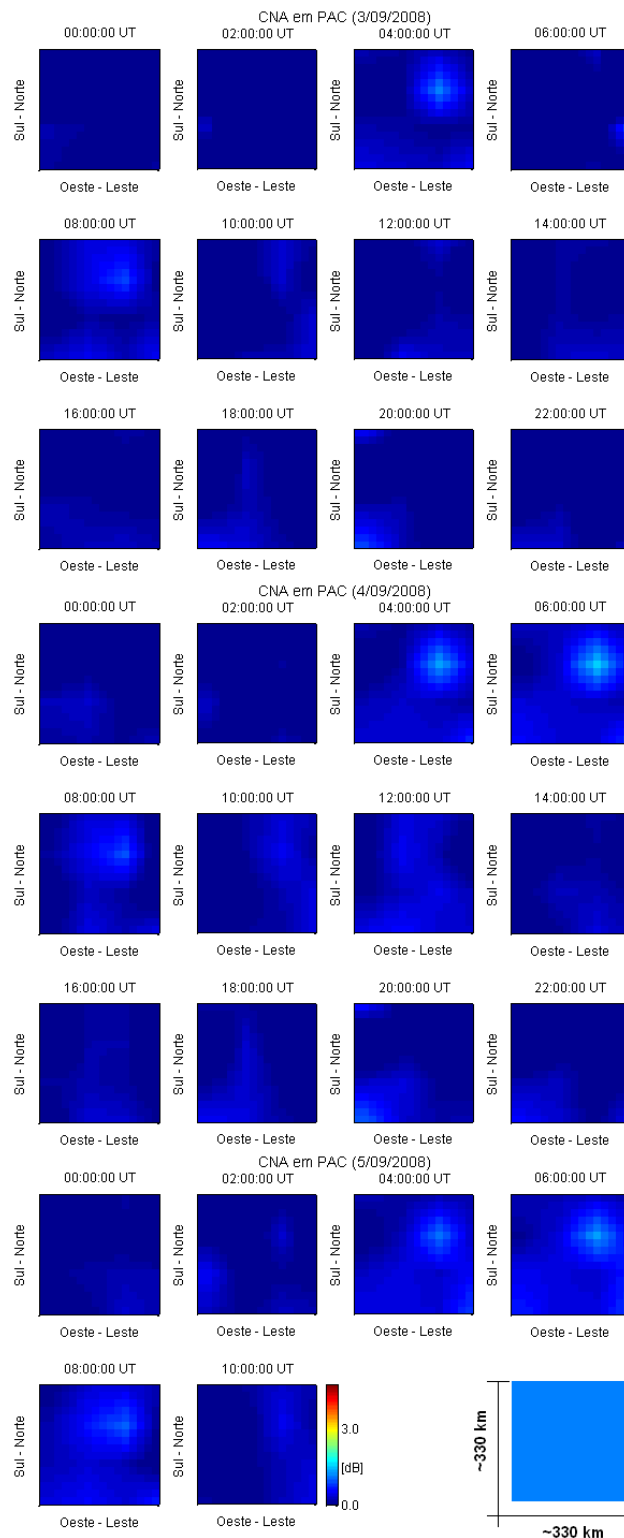


Figura 6.12 - Imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico a cada 2h, entre os dias 03 e 05 de setembro de 2008, obtidas com os dados do IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile. A intensidade da absorção é representada pela barra de cores localizada no canto inferior à direita das imagens bem como as direções geográficas.

### **6.2.2.3 CNA obtida em Concepción (CON)**

Na Seção 6.2.2.3 é apresentada a análise das absorções do ruído cósmico medidas com o IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile. A cidade de Concepción, Chile, está localizada a sudoeste de São Martinho da Serra, RS - Brasil, a  $\approx 2000$  km de distância. A intensidade do campo magnético total na região de Concepción é  $\approx 25000$  nT (ver Figura 3.3).

A QDC obtida com os dados observados nos três dias quietos e sem interferência do mês de setembro de 2008, para 12 das 16 antenas do IRIS instalado em CON, segue os critérios apresentados na Subseção 5.1.4 e é apresentada na Figura 6.13. As antenas N4E1-4 não operaram durante o período estudado, portanto não houve recepção do ruído cósmico.

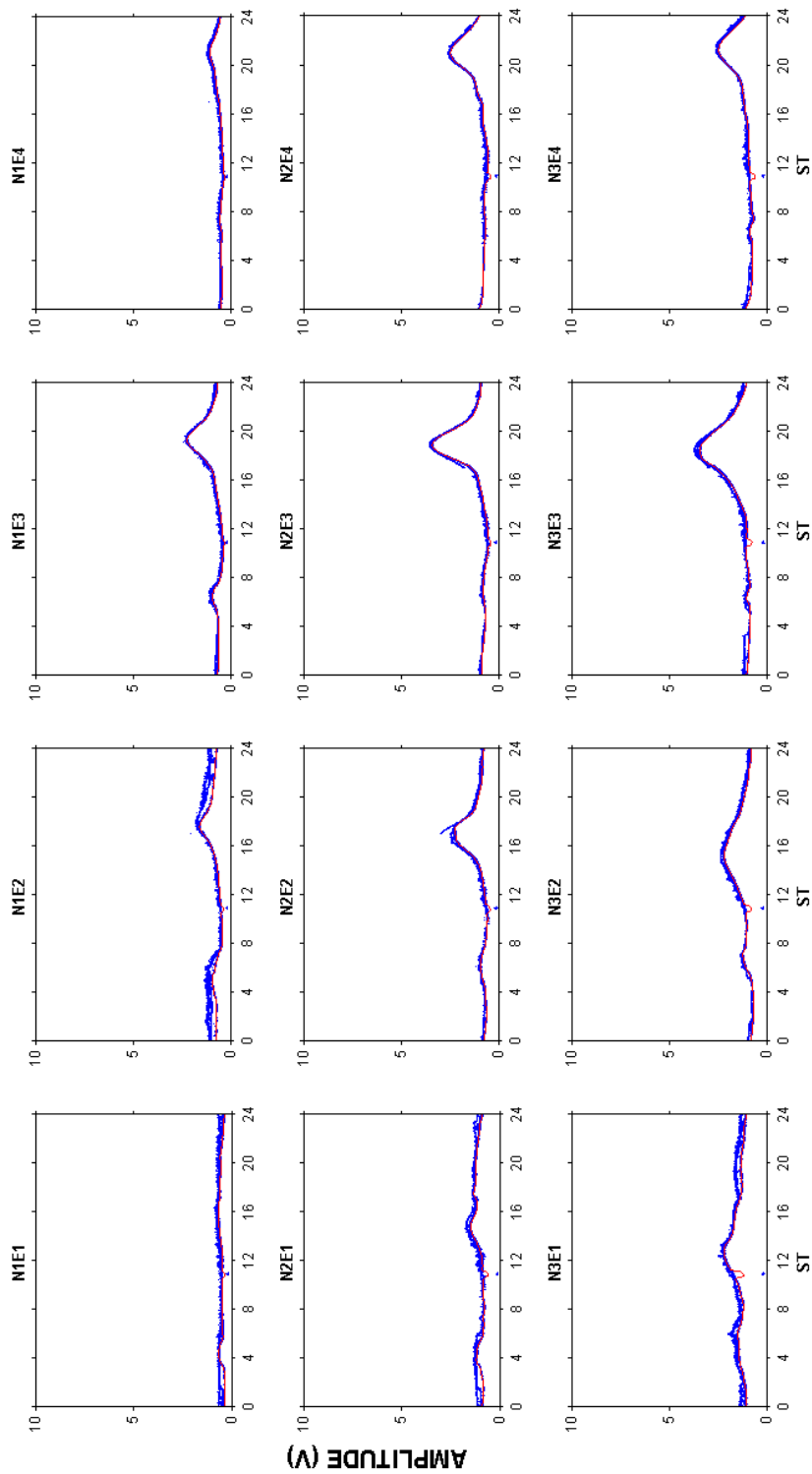


Figura 6.13 - Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados das 12 antenas do IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile, durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: QDCs para cada antena.

Os resultados das análises obtidos a partir dos dados do IRIS instalado na Universidade de Concepción, para o período geomagneticamente perturbado, são apresentados na [Figura 6.14](#), onde: a variação diária da potência do sinal do ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul, em escala de 0 a 10 V) junto com a QDC (em vermelho) para as antenas na direção norte-sul (N1-3E2) é indicado por (a); em (b) é apresentada a CNA (em verde, em escala de 0 a 3 dB) para as antenas N1-3E2; em (c) e (d) são apresentadas as mesmas informações que em (a) e (b), porém para as antenas na direção leste-oeste (N2E1-4); e em (e) apresenta-se a variação temporal do índice Dst, obtido entre os dias 02 e 06. Como realizado anteriormente, são considerados os valores máximos da absorção detectados pelas antenas centradas no zênite.

Como resultado da análise dos dados do IRIS instalado em CON, conclui-se que durante o período de análise houve comportamento atípico na recepção em 38,2 MHz do ruído cósmico para todos os dias entre as 00 e 15 UT, provavelmente devido à rádio interferência local. Os períodos estão sinalizados pelos retângulos em preto na [Figura 6.14](#) e não são considerados nas análises. No dia 02, às 16 h 30 min UT, o IRIS não operou, voltando a operar normalmente às 00 UT do dia 03.

Da análise dos dados do IRIS instalado em CON verifica-se que não ocorreram absorções ionosféricas do ruído cósmico durante o período da tempestade geomagnética de 03 a 06 de setembro de 2008. Como as antenas N4E1-4 não operaram durante o período estudado, optou-se por não apresentar as imagens da absorção ionosférica do ruído cósmico. Do contrário, 1/4 de cada imagem permaneceria na cor branca devido a ausência de sinal em quatro das 16 antenas, além de que não houve absorções detectadas em CON.

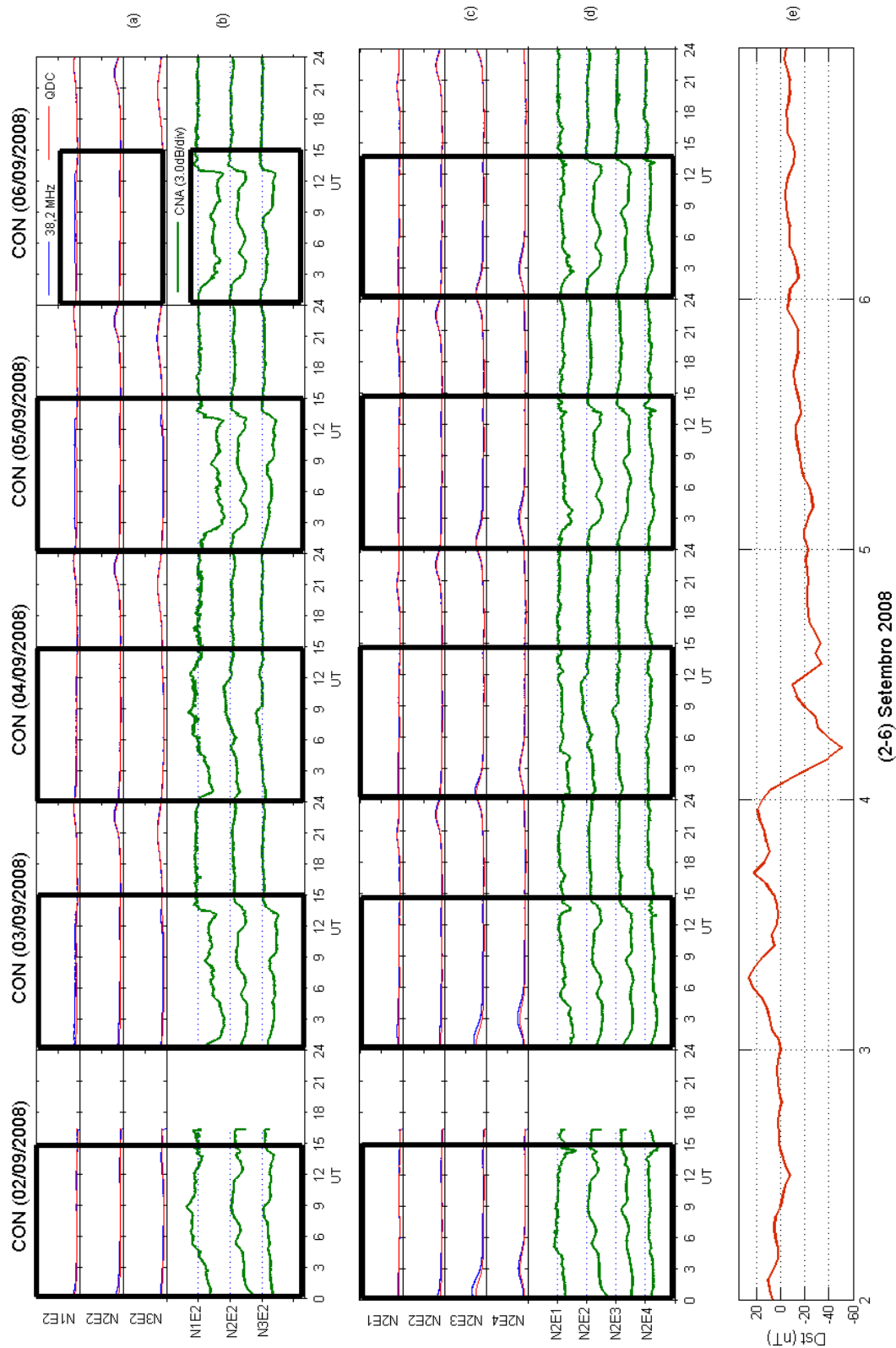


Figura 6.14 - Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile e índice geomagnético para o período de 2 a 6 de setembro de 2008. Do topo à base: em (a) e (c) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) e (d) a CNA correspondente e o índice Dst em (e).



#### 6.2.2.4 CNA obtida em Trelew (TRW)

Na Seção 6.2.2.4 é apresentada a análise das absorções do ruído cósmico medidas com o riômetro convencional (1 Canal) instalado no Observatório Magnético de Trelew da Universidade de La Plata, em Trelew, Argentina. A cidade de Trelew está localizada a  $\approx 1900$  km a sudoeste de São Martinho da Serra, RS - Brasil. A intensidade do campo magnético total na região de Trelew é  $\approx 25000$  nT (ver Figura 3.3).

A QDC obtida com os dados que seguem os critérios apresentados na Subseção 5.1.4 e é apresentada na Figura 6.15.

Os resultados das análises obtidos dos dados do riômetro convencional instalado em TRW para o período geomagneticamente perturbado, são apresentados na Figura 6.16, onde: em (a) os dados referentes ao ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul, em escala de 0 a 10 V) e QDC (em vermelho); no painel (b) os valores encontrados para a CNA (em verde, em escala de 0 a 3 dB); e em (c) o índice Dst.

Como resultado da análise dos dados do riômetro convencional identificam-se claramente fracas absorções,  $\approx 0,4$  dB entre os dias 02 e 04 de setembro. Porém durante o dia 04 as absorções duraram até  $\approx 21$  UT, um intervalo de tempo maior quando comparado com os dois dias anteriores. No dia 05, foram observadas fracas absorções,  $\approx 0,2$  dB entre as 09 e 12 UT. No decorrer do próximo dia, foram detectadas algumas absorções em horários próximos às 12 UT e às 18 UT.

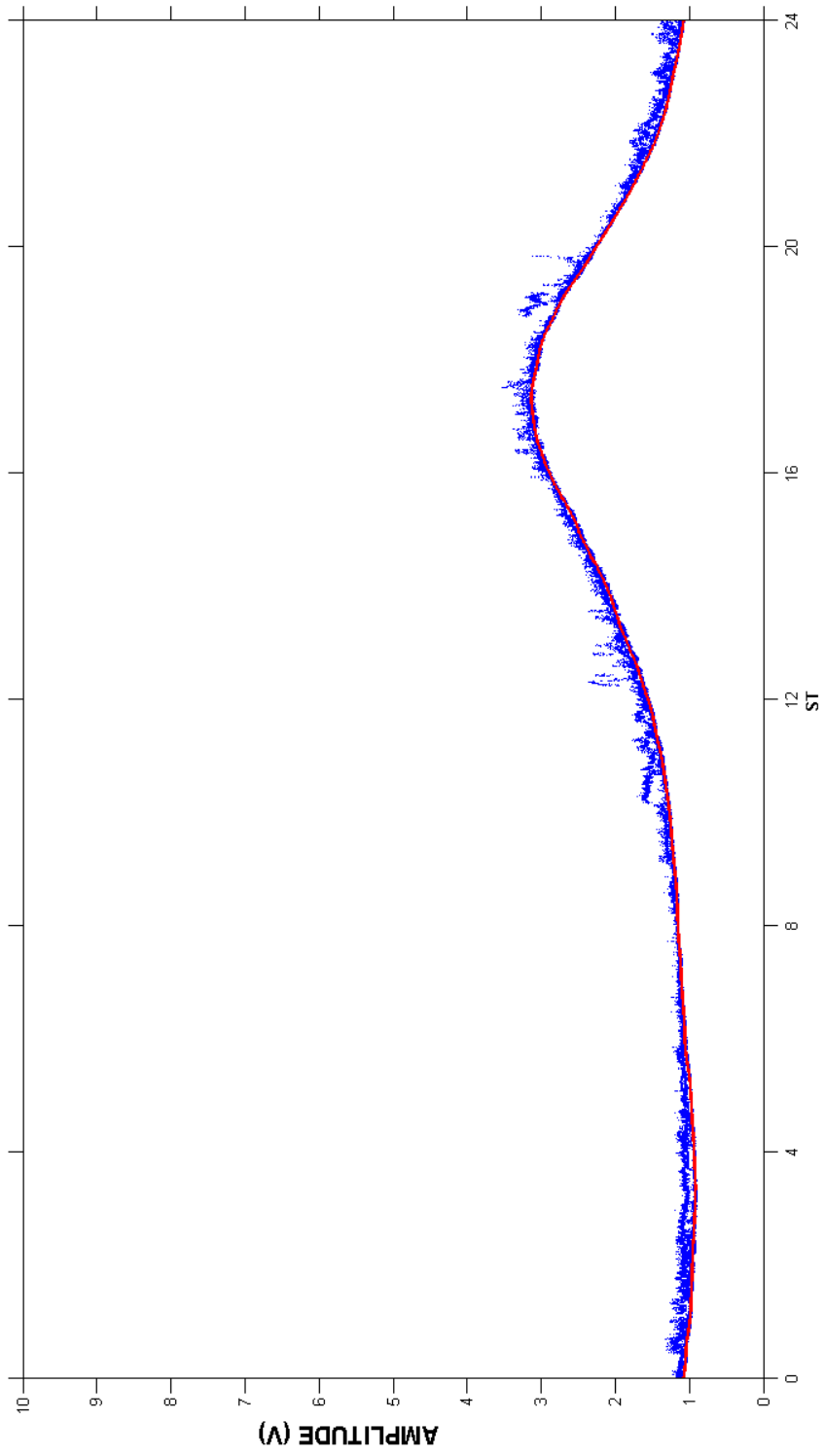


Figura 6.15 - Em azul: superposição da variação do ruído cósmico obtidas com dados do riômetro convencional instalado no Observatório Magnético de Trelew, em Trelew, Argentina durante o mês de setembro de 2008, considerando dados coletados em dias geomagneticamente quietos e sem interferências. Em vermelho: a QDC calculada.

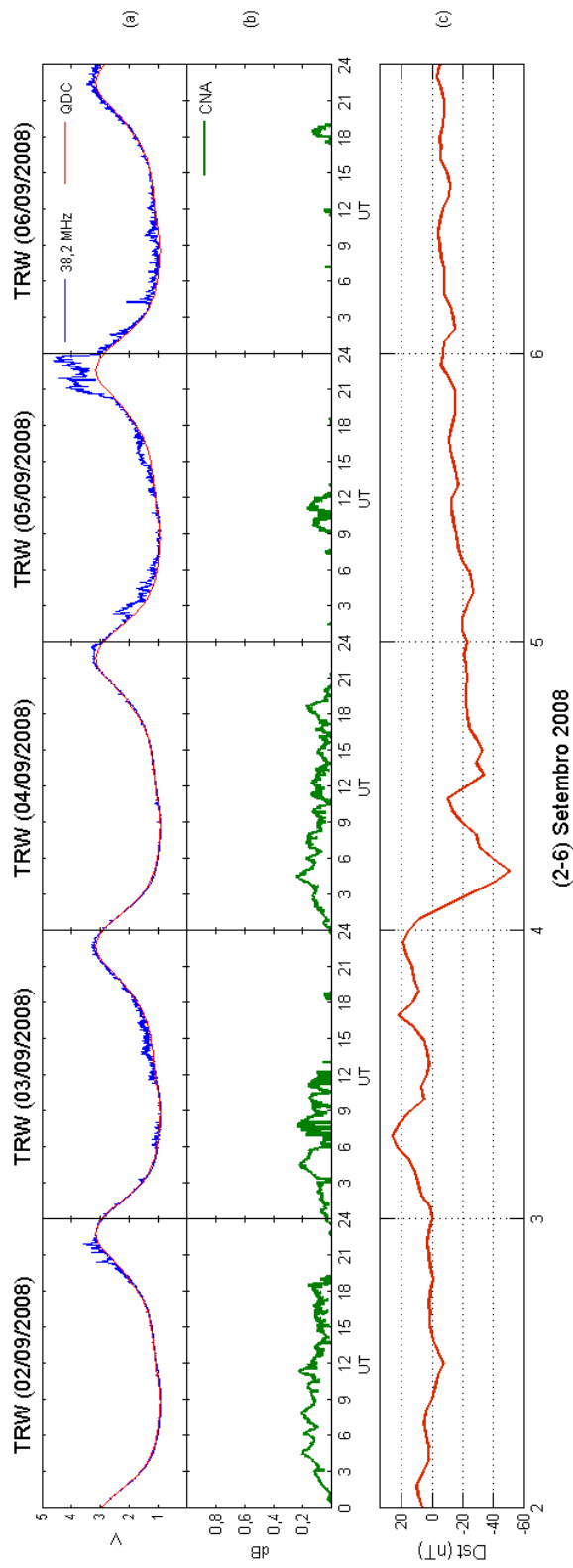


Figura 6.16 - Variações temporais obtidas dos dados de ruído cósmico do riômetro convencional instalado no Observatório Magnético de Trelew, em Trelew, Argentina e índice geomagnético. Do topo à base: em (a) o ruído cósmico em 38,2 MHz (em azul) juntamente com a QDC (em vermelho) calculada considerando apenas dias sem interferências e dias geomagneticamente quietos. Em (b) a CNA correspondente e o índice Dst em (c).

### 6.3 Análises do Fluxo de Elétrons de Alta Energia Durante a Tempestade Geomagnética de Setembro de 2008

Na [Seção 6.3](#) são apresentados os resultados com dados obtidos pelos detectores de partículas a bordo da carga útil de satélites para o período de atividade geomagnética de setembro de 2008. São utilizados dados provenientes dos satélites GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e do POES (*Polar Operational Environmental Satellite*).

#### 6.3.1 Análise dos Dados Obtidos do Satélite GOES

Os dados dos detectores de elétrons a bordo do satélite GOES-12 operado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) indicam que houve variações no fluxo de elétrons com energia  $> 2$  MeV na região da órbita do satélite durante o período analisado, de 03 a 07 de setembro de 2008, cujos máximos foram nos dias 05 e 06 ([Figura 6.17](#)). No gráfico da [Figura 6.17](#) o eixo vertical identifica a contagem do número de elétrons com energia  $> 2$  MeV, enquanto que ao longo do eixo horizontal encontram-se enumerados os dias 03 a 07 de setembro de 2008. Os triângulos marcados no eixo horizontal indicam os inícios súbitos da tempestade magnética, que ocorreram em torno das  $\approx 07$  UT e  $\approx 18$  UT do dia 03 de setembro.

Durante os dias 05 e 06 o fluxo de elétrons com energia  $> 2$  MeV foi aproximadamente três vezes maior quando comparado com os dias geomagneticamente quietos. Este fato indica que durante os dias 05 e 06 houve maior probabilidade de precipitação de elétrons, estando de acordo com as máximas absorções ionosféricas do ruído cósmico observadas nos mesmos dias. Contudo, as informações obtidas pelo satélite GOES-12 relacionadas com as partículas detectadas não estão diretamente relacionadas com as partículas que realmente precipitam na região da AMAS. O satélite GOES estima a população de partículas existentes na região da órbita do satélite, em  $\approx 35800$  km de altitude. O número de partículas energéticas que se encontravam no cone de perdas na região da AMAS pode ser obtido dos dados do detector MEPED a bordo do satélite POES.

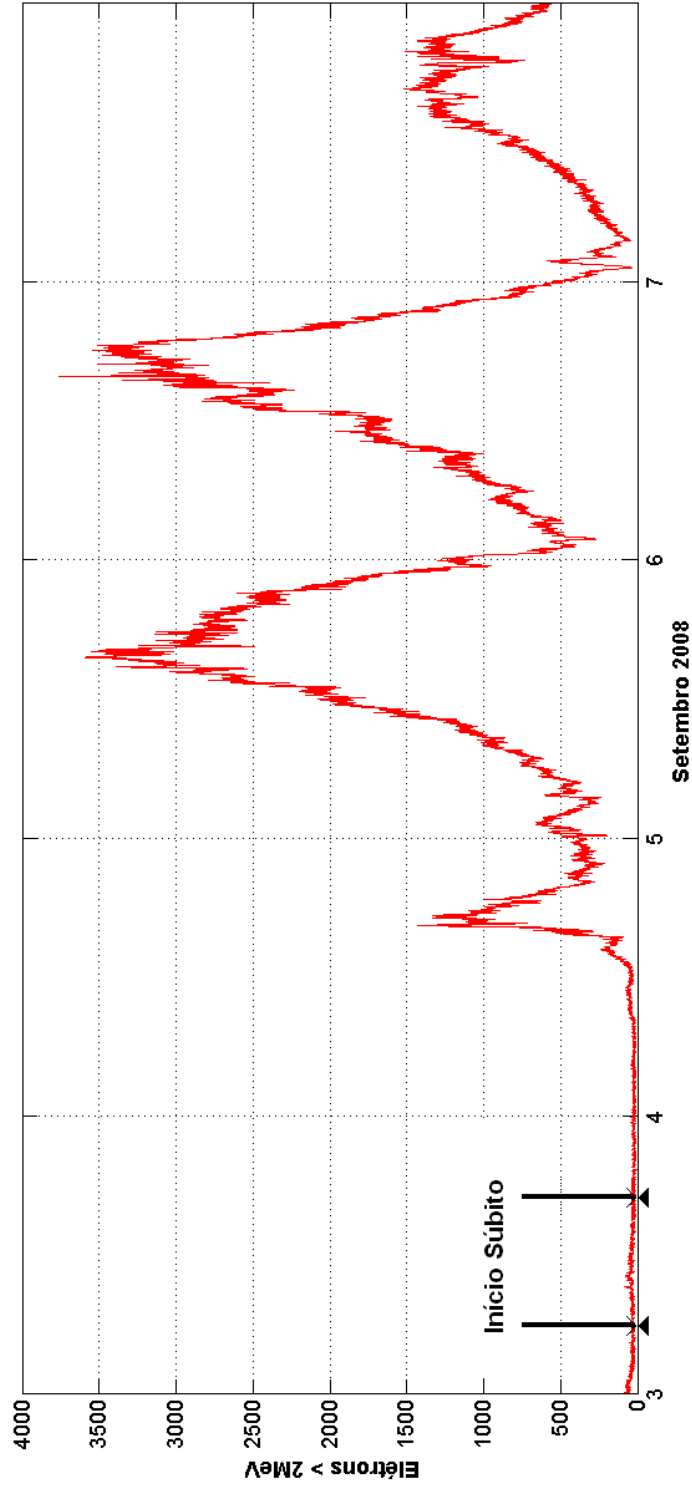


Figura 6.17 - Variação temporal da contagem de elétrons com energia  $> 2$  MeV obtida com o satélite GOES-12, entre os dias 03 e 07 de setembro de 2008. Os inícios súbitos da tempestade geomagnética que ocorreram a  $\approx 07$  UT e  $\approx 18$  UT do dia 03 de setembro estão indicados pelos triângulos ao longo do eixo horizontal.

### 6.3.2 Análise dos Dados Obtidos do Satélite POES

Como descrito no [Capítulo 4](#), em virtude da órbita do satélite POES e do período para percorrê-la, são necessários quatro dias de observação para se aplicar o processo de interpolação nos dados para a elaboração de mapas estatísticos da energia das partículas, semelhantes aos que são apresentados na [Figura 5.15](#). De posse dos mapas do fluxo das partículas sobre a AMAS entre os dias 29 de agosto e 10 de setembro, foram obtidos fluxos integrados de elétrons dentro da área que representa a projeção do IRIS instalado no OES na altura da órbita do satélite (quadrados vermelhos na [Figura 5.15](#)). A partir da metodologia descrita na [Seção 5.2 do Capítulo 5](#) é possível obter os valores diários do fluxo de elétrons para um determinado dia. Por exemplo, o valor do fluxo de elétrons para o dia 30 de agosto de 2008 foi calculado com o mapa integrado do fluxo de partículas obtido entre os dias 28 e 31 de agosto. O fluxo de elétrons para o dia 31 de agosto de 2008 foi obtido com o mapa integrado do fluxo de partículas observadas pelo MEPED entre os dias 29 de agosto e 01 de setembro, e assim sucessivamente.

As distribuições dos fluxos integrados obtidos para cada mapa foram comparadas com os valores máximos da CNA medidos, a cada dia, com o sistema IRIS instalado no OES. Os resultados são apresentados nas [Figuras 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23](#). Está sendo considerado os fluxos de elétrons nas diferentes faixas de energia e nas zonas de aprisionamento e precipitação (função do detector MEPED do satélite POES). A comparação da variação integrada do fluxo de partículas sobre a AMAS e o valor máximo da absorção do ruído cósmico a cada dia, após a aplicação de uma média corrida bem como o coeficiente de correlação que se refere ao coeficiente de Pearson também é apresentado.

As Figuras 6.18 e 6.19 mostram a distribuição do fluxo de elétrons detectados pelo detector MEPED-0° do satélite POES em duas faixas de energia,  $> 30$  keV e  $> 300$  keV, respectivamente. Os valores máximos da CNA detectados entre os dias 01 e 08 são mostrados em verde.

Os coeficientes de correlação linear entre as duas variáveis são 0,94 para os dados do fluxo de elétrons com energia  $> 30$  keV e - 0,37 para os dados do fluxo de elétrons com energia  $> 300$  keV. Nota-se que existe alta correlação entre o fluxo de elétrons detectados com energia  $> 30$  keV e as medidas da CNA obtidas a partir dos dados do IRIS instalado no OES.

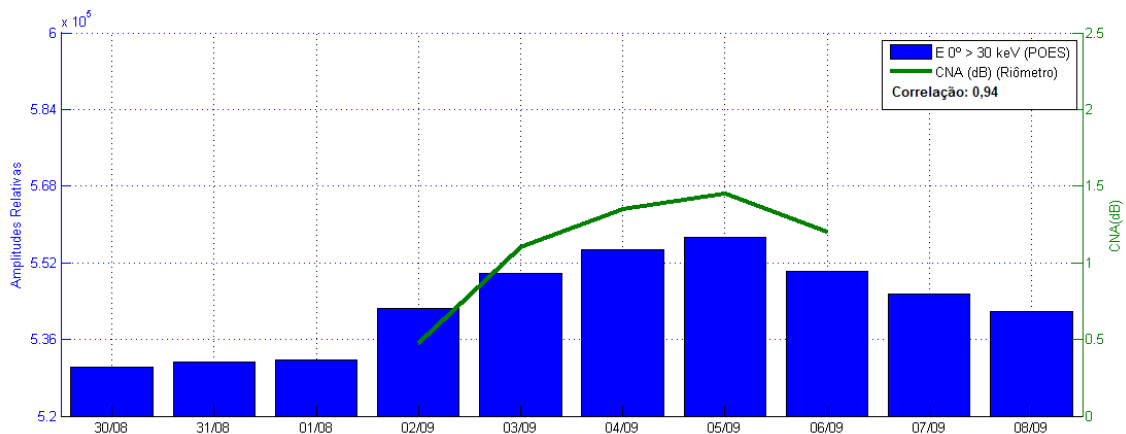


Figura 6.18 - Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia  $> 30$  keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,94.

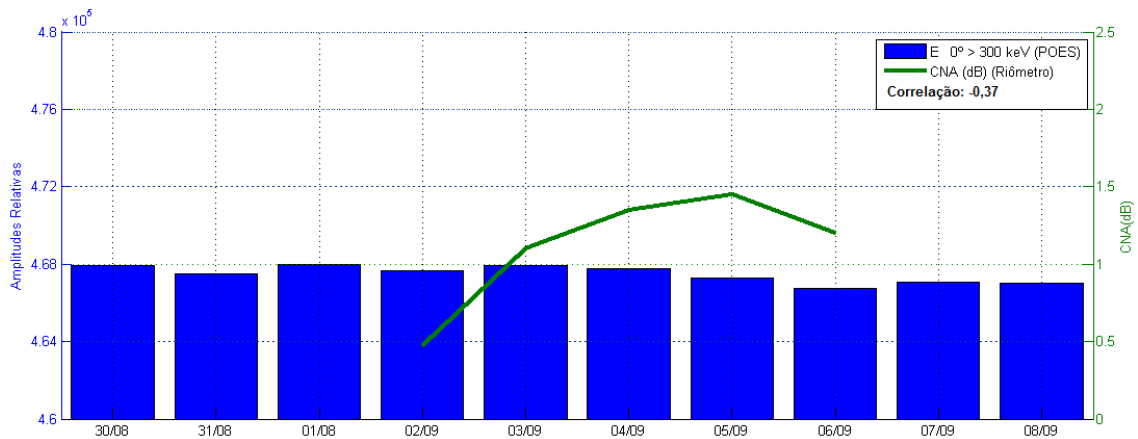


Figura 6.19 - Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia  $> 300$  keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é - 0,37.

Os valores obtidos após a aplicação da média corrida do número de elétrons detectados a cada quatro dias pelo detector MEPED-90° do satélite POES na faixa de energia  $> 30$  keV e  $> 300$  keV, são apresentados nas Figuras 6.20 e 6.21, respectivamente. A curva em verde representa os valores máximos da CNA detectados entre os dias 01 e 08.

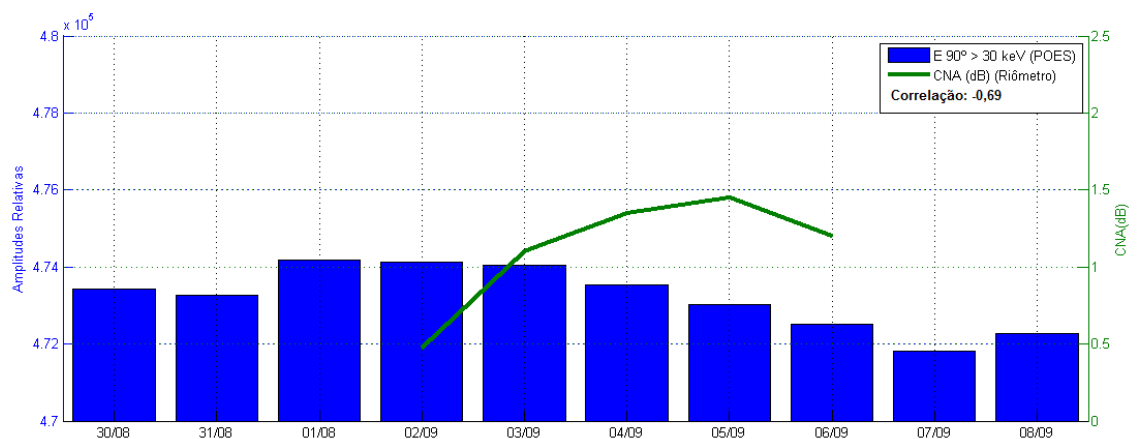


Figura 6.20 - Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia  $> 30$  keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é - 0,69.



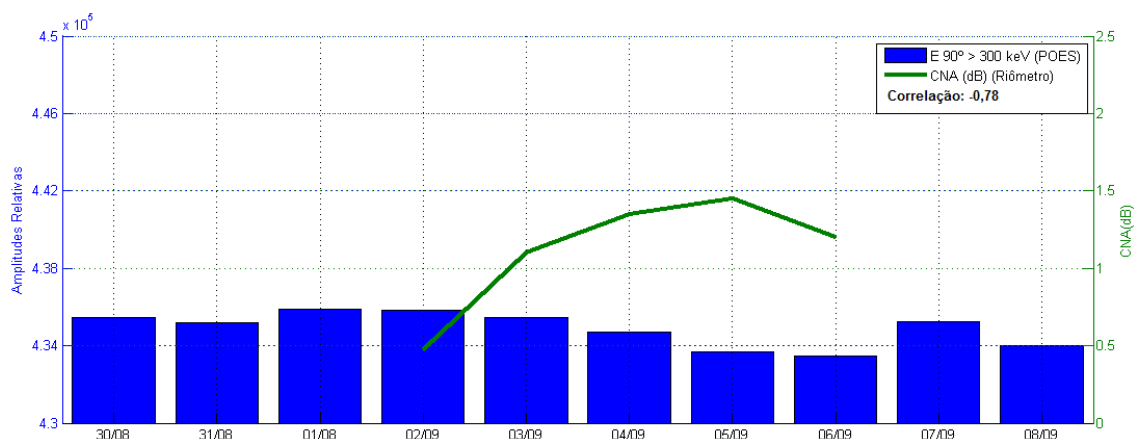


Figura 6.21 - O gráfico do fluxo integrado de elétrons com energia > 300 keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde é os valores máximos diários da CNA detectados após a aplicação da média corrida, para o IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis apresentadas é - 0,78.

O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é - 0,59 para os dados do fluxo de elétrons com energia > 30 keV e - 0,78 para os dados do fluxo de elétrons com energia > 300 keV.

O fluxo de elétrons com energia compreendida entre 30 keV e 300 keV foi obtido através da subtração dos fluxos medidos em cada faixa de energia. Dessa forma, os gráficos das distribuições do fluxo de elétrons detectados nesta faixa de energia com relação aos detectores MEPED-0° e MEPED-90° do satélite POES são apresentados nas Figuras 6.22 e 6.23, respectivamente. Os gráficos das distribuições das Figuras 6.22 e 6.23 mostram também a curva da média corrida aplicada nos valores máximos da CNA entre os dias 01 e 08 de setembro.

Da análise dos resultados conclui-se que existe alta correlação (0,95) entre o fluxo de elétrons detectados com energia entre 30 e 300 keV medido pelo detector MEPED-0° do satélite POES e as medidas da CNA obtidas a partir dos dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as medidas da CNA e o fluxo de elétrons detectados com energia compreendida entre 30 e 300 keV, com o detector MEPED-90° do satélite POES é 0,86, ressaltando alta correlação.

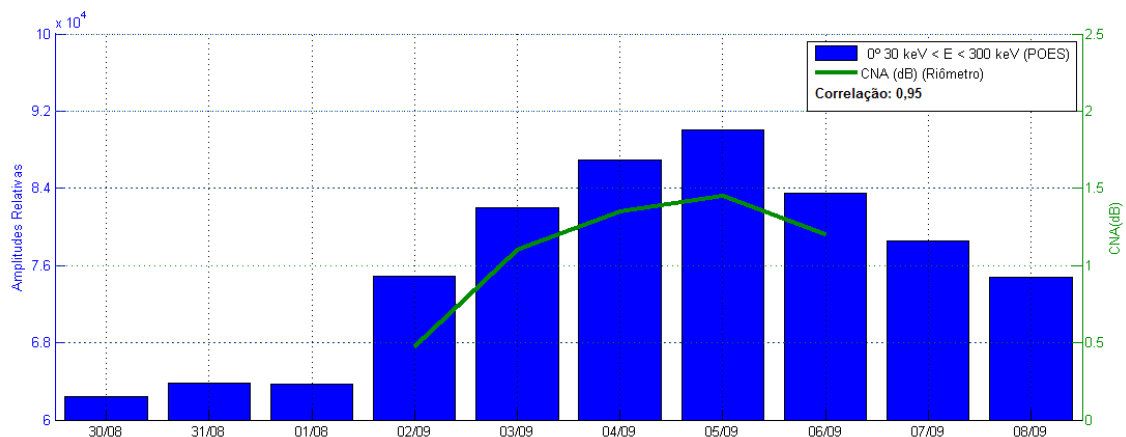


Figura 6.22 - Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia compreendida entre 30 e 300 keV detectados na AMAS com o detector MEPED-0°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,95.

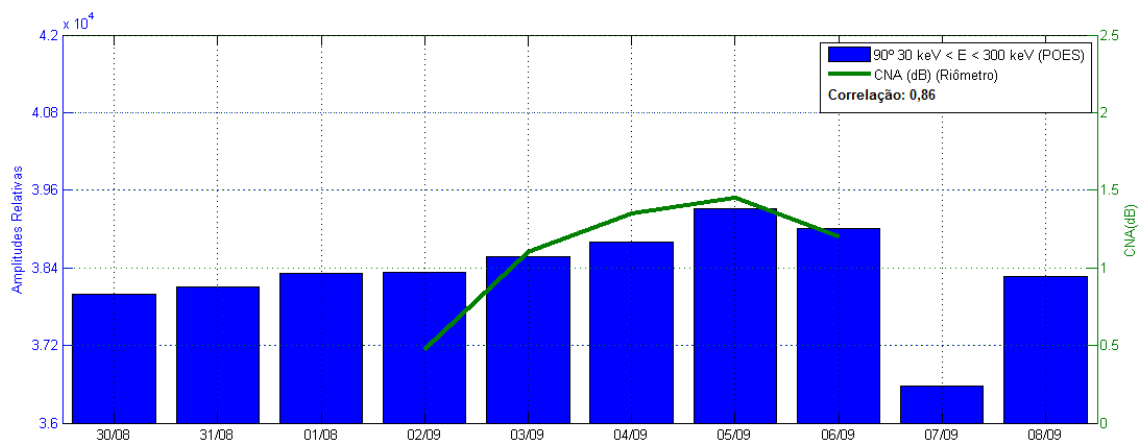


Figura 6.23 - Distribuição do fluxo integrado de elétrons com energia compreendida entre 30 e 300 keV detectados na AMAS com o detector MEPED-90°. A curva em verde representa os valores máximos diários da CNA, detectados após a aplicação da média corrida, para os dados do IRIS instalado no OES. O coeficiente de correlação linear entre as duas variáveis é 0,86.

De acordo com as altas correlações encontradas entre a CNA calculada com dados do IRIS instalado no OES e o fluxo de elétrons medido pelo MEPED, há evidências de que elétrons com energia de  $\approx 30$  keV precipitaram durante o dia 05 e 06 de setembro de 2008, durante a fase de recuperação da tempestade geomagnética. A causa da precipitação de elétrons encontrada pode ter sido devido as sucessivas incursões da componente  $B_z$  do IMF durante o dia 05 de setembro. Como também foi visto na [Subseção 6.3.1](#), durante o dia 05 o fluxo de elétrons com energia  $> 2$  MeV foi aproximadamente três vezes maior quando comparado com os dias anteriores. A população de elétrons existentes na região da órbita do satélite, em  $\approx 35800$  km de altitude, podem ter precipitado na ionosfera localizado sobre a região de São Martinho da Serra, que está próxima a região central da AMAS e caracterizada pela baixa intensidade do campo geomagnético.



## 7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

As principais contribuições da pesquisa realizada no presente trabalho de Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial no INPE/MCT, utilizando dados obtidos de riômetros convencionais e imageadores da rede SARINET, e do MEPED a bordo do satélite POES, são listadas a seguir.

- a) Desenvolvimento de um processo matemático que suaviza os dados do ruído cósmico obtidos de riômetros, para eliminar rádio interferências. Portanto, permitindo a utilização de maior número de dados para o cálculo da QDC.
- b) Aprimoramento da metodologia utilizada para o cálculo da QDC. Com o procedimento, foram realizados estudos das diferenças entre QDCs obtidas a cada mês (entre janeiro de 2007 e janeiro de 2011), calculadas utilizando duas metodologias diferentes: (i) o método corrente que considera os dados mensais sem discriminação, e (ii) os dados coletados em dias quietos ( $K_p \leq 3$ ) e fazendo-se uso da suavização dos dados de ruído cósmico.
- c) Realização de uma análise comparativa entre dados de três riômetros imageadores e um riômetro convencional instalados em coordenadas geográficas estratégicas em relação à Anomalia Magnética da América do Sul - AMAS, na América do Sul, durante período geomagneticamente perturbado. A análise foi efetuada com dados observados durante uma tempestade geomagnética classificada como moderada, que ocorreu em setembro de 2008 (durante período de mínimo solar).
- d) Identificação da possível causa das absorções ionosféricas do ruído cósmico. As absorções mais intensas aconteceram no sul do Brasil, na região de São Martinho da Serra, RS, em associação ao aumento no fluxo de elétrons energéticos na região da AMAS.

Como principais conclusões da pesquisa, que se encontram devidamente correlacionadas com as discussões apresentadas nos respectivos capítulos, ressaltam-se que:

O processo matemático desenvolvido para suavizar os dados de ruído cósmico, eliminando dados de rádio interferências indesejados, mostrou-se necessário para qualificar e garantir cálculos mais precisos da QDC.

A análise mensal das diferenças entre QDCs calculadas a partir das duas técnicas distintas revelou que:

- Quando as interferências eletromagnéticas não são muito intensas, a utilização da suavização das curvas permite a inclusão de mais dias de observação no cálculo da QDC.
- O número de dias geomagneticamente quietos frente ao número total de dias observados é um fator significativo na qualidade da QDC calculada. Quanto maior o número de dados coletados durante os dias geomagneticamente quietos, mais bem representativa torna-se a QDC.
- A utilização dos critérios de seleção de dados sugeridos na Dissertação mostraram-se úteis para o cálculo da QDC. A sensibilidade da detecção das absorções ionosféricas do ruído cósmico foram maiores nas imagens construídas com tais QDCs.
- Apesar de não abordar na Dissertação a influência da presença de ondas planetárias ou de onda de gravidade durante as medições realizadas pelos riômetros imageadores, teoriza-se que o cálculo da QDC poderia ser significativamente alterado no caso em que são utilizados dados coletados em poucos dias de observações, visto que, neste caso, a variação temporal do ruído cósmico poderá ter componentes devidas aos efeitos de tais ondas.

Os dados do ruído cósmico e CNA dos riômetros conectados às antenas direcionadas ao zênite possuem um comportamento semelhante. Porém, diferem quando comparados com os dados das antenas localizadas nas bordas da matriz de antenas. Isso provavelmente ocorre devido ao fato de que as antenas das bordas possuem maior área de rastreio. Assim, sugere-se que para a análise da CNA, é preferível utilizar antenas direcionadas ao zênite. No caso dos riômetros imageadores da rede SARINET, que possuem 16 antenas do tipo dipolo, as antenas direcionadas ao zênite são: N2E2, N2E3, N3E2 e N3E3.

Com o objetivo de garantir a qualidade e confiabilidade dos resultados, foram analisados os valores calculados da CNA para todos os dias do mês de setembro de 2008 para o riômetro imageador instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE - MCT), em São Martinho da Serra, RS - Brasil. Ao longo de todo o período calmo, onde o índice Dst permaneceu muito próximo de zero, verifica-se que não houve absorção. Durante os períodos geomagneticamente perturbados foram observadas pequenas flutuações da CNA, porém nenhuma foi tão expressiva quanto as que foram detectadas durante o dia 5 de setembro. Fatos que confirmam que as absorções observadas podem ser atribuídas às perturbações que ocorreram na ionosfera local.

Análises dos valores da CNA detectados pelo riômetro imageador instalado no OES, ressaltam as seguintes características:

- Durante o dia 02, período geomagneticamente quieto, não foi observado nenhuma absorção do ruído cósmico.
- Em torno das 21 UT do dia 03 até as 09 UT do dia 04 foi detectado uma pequena absorção. Após esse horário, a absorção aumentou gradativamente durante o período restante do dia alcançando o valor máximo de 1,5 dB.
- Durante a fase de recuperação da tempestade geomagnética que ocorreu no dia 05 de setembro, foi observada a maior absorção (2,5 dB).
- No dia 06 ocorreram absorções com valor máximo de  $\approx 1$  dB até as 03 UT. Após este horário, a amplitude do ruído cósmico praticamente alcança a mesma amplitude da QDC e as absorções diminuíram gradativamente.

Análises do período perturbado utilizando dados do riômetro IRIS instalado na Universidade de Magalhães, em Punta Arenas, Chile, mostraram leves absorções com máximo de 0,7 dB ocorrido no dia 04 de setembro, durante a fase principal da tempestade. Quanto às medidas efetuadas com o riômetro IRIS instalado na Universidade de Concepción, em Concepción, Chile, verificou-se que as absorções foram fracas e ocorreram durante a fase principal da tempestade geomagnética. Com relação às medidas efetuadas com o riômetro convencional instalado no Observatório Magnético de Trelew da Universidade de La Plata, Trelew, Argentina, foram observadas absorções menores que  $\approx 0,4$  dB em todos os dias analisados.

Com base na análise geral dos resultados obtidos atribuí-se o efeito da absorção ionosférica do ruído cósmico no dia 05 de setembro de 2008, com maior efeito observado no IRIS instalado no OES, a precipitação de elétrons com energia próxima a 30 keV. Os mapas da absorção para o dia 05 de setembro de 2008 revelou que a estrutura de absorção tinha  $\approx 250$  km de alongação na direção leste-oeste e  $\approx 150$  km na direção norte-sul. A região de absorção o apresentou um deslocamento na direção nordeste, claramente compatível com os resultados obtidos anteriormente em pesquisas similares publicadas por [Abdu et al. \(1973\)](#) e [Nishino et al. \(2002\)](#).

Ressalta-se que o trabalho de Dissertação mostra o potencial que a rede SARINET propicia para o estudo da precipitação de partículas energéticas na ionosfera localizada na grande região da AMAS. Este fato permite sugerir tópicos de pesquisa considerados promissores para serem explorados em trabalhos futuros. São eles:

- a) Calcular uma QDC com base em dados coletados por um período mínimo de um ano, considerando e analisando medidas durante horários locais noturnos. Dessa forma, espera-se obter uma QDC otimizada para todo o ano visando realizar estudos de variações da absorção do ruído cósmico em longos períodos.
- b) A partir da expansão da rede SARINET será possível mapear em grande escala a região de precipitação de elétrons dentro e fora da região da AMAS, durante períodos perturbados.
- c) Estudar os efeitos e relevâncias da contribuição da incidência de ondas de gravidade e de ondas planetárias nos dados de riômetros. Como comentado, a densidade eletrônica da ionosfera pode ser influenciada pelas passagens dessas ondas. Por consequência, possibilitará estudos aprofundados em que poderão ser utilizados dados de riômetro complementando os dados obtidos com espectro-imageadores, para a detecção de ondas de gravidade.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A. **Galactic radio noise attenuation in the ionosphere**. 147 p. Ph.D. Thesis — The Gujarat University, Ahmedabad, Índia, 1966. 18
- ABDU, M. A.; ANANTHAKRISHNAN, S.; COUTINHO, E. F.; KRISHNAN, B. A.; REIS, E. M. da S. Azimuthal drift and precipitation of electrons into the South Atlantic Geomagnetic Anomaly during an SC Magnetic storm. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, p. 5830–5836, 1973. 32, 120
- 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 electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics**, v. 67, p. 1643–1657, dez. 2005. 38
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; PIAZZA, L. R.; MASSAMBANI, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic Anomaly - evidence from VLF phase measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p. 7533–7542, set. 1981. 33
- ABDU, M. A.; DEGAONKAR, S. S.; RAMANATHAN, K. R. Attenuation of galactic radio noise at 25 Mhz and 21.3 Mhz in the ionosphere over Ahmedabad during 1957-1964. **Journal of Geophysical Research**, v. 72, p. 1547–1554, mar. 1967. 18, 86, 92, 94
- ABDU, M. A.; RAMKUMAR, T. K.; BATISTA, I. S.; BRUM, C. G. M.; TAKAHASHI, H.; REINISCH, B. W.; SOBRAL, J. H. A. Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere ionosphere system, and mesosphere- E- and F-region coupling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, p. 509–522, fev. 2006. 95
- AKASOFU, S. I.; CHAPMAN, S. **Solar terrestrial physics**. Clarendon: Oxford, 1972. 8
- ARMSTRONG, R. J.; BERKEY, F. T.; MELBYE, T. The day to night absorption ratio in auroral zone riometer measurements. **Planet Space Science**, v. 25, p. 1193–1198, dez. 1977. 53
- BAKER, D. N.; KLEBESADEL, R. W.; HIGBIE, P. R.; BLAKE, J. B. Highly relativistic electrons in the Earth's outer magnetosphere. I - Lifetimes and

- temporal history 1979-1984. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, p. 4265–4276, abr. 1986. 9
- BALAN, N.; BAILEY, G. J. Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 21421–21432, nov. 1995. 7
- BANKS, P. M.; KOCKARTS, G. **Aeronomy**: Part A. New York: Academic Press, 1973. 5
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A. Magnetic storm associated delayed sporadic E enhancements in the Brazilian Geomagnetic Anomaly. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, p. 4777–4783, out. 1977. 92, 94
- BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J.; SOUZA, J. Long term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza, Brazil. **Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1409–1412, 2002. 7
- BEER, T. **Atmospheric waves**. London: Adam Hilger, 1974. 9, 10
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. New York: Springer-Verlag, 2004. 27
- BRASSEUR, G.; SOLOMAN, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Bolder: Springer, 2005. 3, 4
- BRUM, C. G. M. **A importância do “dia quieto” na absorção ionosférica da camada D da ionosfera e sua aplicação para os dados de riômetro da estação antártica Comandante Ferraz**. 109 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999-05-31 1999. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/06.08.11.17>>. Acesso em: 16 mar. 2010. 53, 58, 63, 74
- BRUM, C. G. M. **Variabilidade da absorção de ruído cósmico via riômetro e modelagem numérica do processos associados**. 297 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004-05-28 2004. Disponível em:  
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/08.04.16.30>>. Acesso em: 29 out. 2010. 58, 63

- CAMPBELL, W. H. **Introduction to geomagnetic fields**. New York: Cambridge University Press, 1997. 8
- CHAPMAN, S. The electrical conductivity of the ionosphere: a review. **Nuova Cimento**, v. 4, 1956. 19
- CHAPMAN, S.; BARTELS, J. **Geomagnetism**. 2. ed. Oxford: University Press, 1940. 29
- DAVIES, K. **Ionospheric radio propagation**. New York: Dover Publications, 1965. 12, 15
- \_\_\_\_\_. **Ionospheric radio**. London: Peter Peregrinus, 1990. 17
- DETRICK, D. L.; ROSENBERG, T. J. An imaging riometer for ionospheric studies (IRIS). **Antarctic Journal of the United States**, v. 23, n. 5, jan. 1988. 42
- DUFFETT-SMITH, P. E. **Practical astronomy**. Cambridge: Cambridge University Press, 1979. 129 p. 52
- EVANS, D.; GARRETT, H.; JUN, I.; EVANS, R.; CHOW, J. Long-term observations of the trapped high-energy proton population ( $L < 4$ ) by the NOAA Polar Orbiting Environmental Satellites (POES). **Advances in Space Research**, v. 41, p. 1261–1268, 2008. 48
- EVANS, D. S.; GREER, M. **Polar orbiting environmental satellite space experiment monitor-2: instrument description and archive data documentation**. 325 Broadway, Boulder CO 80305, USA: NOAA Space Weather Prediction Center, NOAA Technical Memorandum version 1.3, 2004. 04 de novembro de 2010. Disponível em:  
<[http://poes.ngdc.noaa.gov/docs/sem2\\_docs/2006/SEM2v2.0.pdf](http://poes.ngdc.noaa.gov/docs/sem2_docs/2006/SEM2v2.0.pdf)>. 48
- FREDRIKSEN, A.; DYCE, R. B. Ionospheric absorption investigations at Hawaii and Johnston Island. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, p. 1177–1181, abr. 1960. 53
- GLEDHILL, J. A. Aeronomic effects of the South Atlantic Anomaly. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 14, p. 173–187, maio 1976. 33

GONZALEZ, W.; JOSELYN, J.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.; VASYLIUNAS, V. What is a magnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 5771–5792, 1994. 8, 79

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: an introduction to geospace - the science of the upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. New York: Cambridge University Press, 1992. 3, 6, 11

HARRICH, M.; FRIEDRICH, M.; MARPLE, S. R.; TORKAR, K. M. The background absorption at high latitudes. **Advances in Radio Science**, p. 325–327, 2000. 18

HEIRTZLER, J. The future of the South Atlantic Anomaly and implications for radiation damage in space. **Journal of Atmospheric, Solar and Terrestrial Physics**, v. 64, p. 1701–1708, nov. 2002. 37

HEISLER, R.; HOWER, G. L. Riometer quiet day curves. **Journal of Geophysical Research**, v. 72, nov. 1967. 53

HESS, W. N. **The radiation belt and magnetosphere**. Texas: Blaisdell Publishing Company, 1968. 22, 23, 24

HEY, J. S.; PARSONS, S. J.; PHILLIPS, J. W. Fluctuation in cosmic radiation at radio-frequencies. **Nature**, v. 158, p. 234, ago. 1946. 39

HINES, C. O. **Physics of the Earth's upper atmosphere**. London: Prentice-Hall, 1965. 14

Jansky, K. G. (Ed.). **Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin**, v. 21, n. 10. Santa Fe: Proceedings of the IRE, 1933. 39

JARVIS, M. J.; HIBBINS, R. E.; TAYLOR, M. J.; ROSENBERG, T. J. Utilizing riometry to observe gravity waves in the sunlit mesosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 19, p. 1–4, out. 2003. 10

KALER, J. B. **The ever-changing sky**: a guide to the celestial sphere. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 51

KAMIDE, Y.; YOKOYAMA, N.; GONZALEZ, W.; TSURUTANI, B. T.; DAGLIS, I. A.; BREKKE, A.; MASUDA, S. Two-step development of geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 6917–6922, abr. 1998. 8

KIRKWOOD, S. Thin ion layers in the high-latitude lower ionosphere. **Advances in Space Research**, v. 19, p. 149–158, maio 1997. 92

KIRKWOOD, S.; NILSSON, H. High-latitude sporadic-E and other thin layers - the role of magnetospheric electric fields. **Space Science Reviews**, v. 91, p. 579–613, fev. 2000. 92

KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. **Introduction on space physics**. New York: Cambridge University Press, 1995. 5

KOSKINEN, H. **Lectures in advanced space physics**. University of Helsinki, Department of Physics, Finland: University of Helsinki, 2008. Disponível em: <<http://www.ava.fmi.fi/~rijarvin/asp2008/asp2008/>>. Acesso em: 07 outubro 2010. 28

KRESSMAN, R. I. **Riometer studies at South Georgia**. Br. Antarct. Surv. Bull., 1974. 15-23 p. 18, 92

KRISHNASWAMY, S.; DETRICK, D. L.; ROSENBERG, T. The inflection point method of determining riometer quiet day curves. **Radio Science**, v. 20, n. 20, p. 123–136, 1985. 53

LASTOVICKA, J. Lower ionosphere response to external forcing: a brief review. **Advances in Space Research**, v. 43, p. 1–14, jan. 2009. 8

LITTLE, C. G.; LEINBACH, H. Some measurements of high-latitude ionospheric absorption using extraterrestrial radio waves. **Proceedings of the IRE**, v. 72, nov. 1958. 1

\_\_\_\_\_. The riometer - a device for the continuous measurement of ionospheric absorption. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 4, p. 204–218, nov. 1959. 40

LUSIGNAN, B. Cosmic noise absorption measurements at Stanford, California, and Pullman, Washington. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, p. 3895–3902, dez. 1960. 53

MARTYN, D. F. The normal F region of the ionosphere. **Proc. I.R.E.**, v. 4, 1959. 19

MAUS, S.; MACMILLAN, S.; MCLEAN, S.; HAMILTON, B.; THOMSON, A.; NAIR, M.; ROLLINS, C. **US/UK World Magnetic Model for 2010-2015**. 2010. Disponível em: <[http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010\\_Report.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_Report.pdf)>. Acesso em: 09 janeiro 2011. 30

MCDONALD, F.; NAUGLE, J. E. Discovering Earth's Radiation Belts: remembering Explorer 1 and 3. **EOS Transactions**, v. 89, p. 361–363, set. 2008. 28

MCILWAIN, C. E. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, p. 3681–3691, nov. 1961. 23

MCLEAN, S.; MACMILLAN, S.; MAUS, S.; LESUR, V.; THOMSON, A.; DATER, D. **US/UK World Magnetic Model for 2005-2010**. 2004. Disponível em: <[http://www.geomag.us/info/Smaus/Doc/WMM\\_2005.pdf](http://www.geomag.us/info/Smaus/Doc/WMM_2005.pdf)>. Acesso em: 05 outubro 2010. 21, 22

MITRA, A. P.; SHAIN, C. A. The measurement of ionospheric absorption using observation of 18.3 Mc/s cosmic radio noise. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 4, p. 204–218, 1953. 18, 53, 86, 92, 94

MOFFAT-GRIFFIN, T.; HIBBINS, R. E.; NIELSEN, K.; JARVIS, M. J.; TAYLOR, M. J. Observing mesospheric gravity waves with an imaging riometer. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 70, p. 1327–1335, jul. 2008. 10

NICHITIU, F.; DRUMMOND, J. R.; ZOU, J.; DESCHAMBAULT, R. Solar particle events seen by the mopitt instrument. **AGU Spring Meeting Abstracts**, p. A9, maio 2004. 37, 38

NISHINO, M.; MAKITA, K.; YUMOTO, K.; RODRIGUES, F. S.; SCHUCH, N. J.; ABDU, M. A. Unusual ionospheric absorption characterizing energetic electron precipitation into the South Atlantic Magnetic Anomaly. **Earth, Planets, and Space**, v. 54, p. 907–916, set. 2002. 33, 43, 86, 94, 120

NISHINO, M.; MAKITA, K.; YUMOTO, K.; MIYOSHI, Y.; SCHUCH, N. J.; ABDU, M. A. Energetic particle precipitation in the Brazilian geomagnetic

anomaly during the "Bastille Day Storm" of July 2000. **Earth, Planets, and Space**, v. 58, p. 607–616, maio 2006. 35, 37, 94

NISHINO, M.; TANAKA, Y.; OGUTI, T.; YAMAGISHI, H.; HOLTET, J. A. Initial observations results with imager riometer at NY-Alesud (L = 16). **NIPR Symp. Upper Atmosphere Physics**, v. 6, p. 47–61, 1993. 44

PAWSEY, J. L.; HILL, E. R. Cosmic radio waves and their interpretation. **Reports on Progress in Physics**, v. 24, p. 46, 1961. 39

PINTO JR., O.; GONZALES, W. D. Energetic electron precipitation at the South Atlantic Magnetic Anomaly - A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 51, p. 351–365, maio 1989. 33

PIZZELLA, G.; LAUGHLIN, C. D.; O'BRIEN, B. J. Note on the Electron Energy Spectrum in the Inner Van Allen Belt. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, p. 3281–3287, ago. 1962. 28

RAMANATHAN, K. R.; BHONSLE, R. V.; DEGAONKAR, S. S. Effect of electron-ion collisions in the F region of the ionosphere on the absorption of cosmic radio noise at 25 Mc/s at Ahmedabad: Changes in absorption associated with magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, p. 2763–2771, set. 1961. 18, 92

RESENDE, L. C. A. **Estudo do comportamento dos parâmetros de frequência das camadas E-esporádicas na região equatorial durante períodos perturbados**. 170 p. Dissertação de Mestrado — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, Brasil, 2010. 94

RISHBETH, H.; GARIOTT, O. G. **Introduction to ionospheric physics**. New York: Academic Press, 1969. 331p. 3, 6, 7

ROSENBERG, T. J.; WANG, Z.; RODGER, A. S.; DUDENEY, J. R.; BAKER, K. B. Imaging riometer and HF radar measurements of drifting F region electron density structures in the polar cap. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, p. 7757–7764, maio 1993. 18

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 10, p. 935–950, 1972. 58

ROSTOKER, G.; AKASOFU, S.-I.; FOSTER, J.; GREENWALD, R. A.; LUI, A. T. Y.; KAMIDE, Y.; KAWASAKI, K.; MCPHERRON, R. L.; RUSSELL, C. T. Magnetospheric substorms - definition and signatures. **Journal Of Geophysical Research**, v. 85, p. 1663–1668, abr. 1980. 9

RYLE, M.; SMITH, F. G. A new intense source of radio-frequency radiation in the constellation of Cassiopeia. **Nature**, v. 162, p. 462–463, set. 1948. 39

Space Weather Prediction Center. **Space environment monitor**. 325 Broadway, Boulder CO 80305, USA: NOAA Space Weather Prediction Center, 2001.

Disponível em: <<http://satdat.ngdc.noaa.gov/.../>>. Acesso em: 04 outubro 2010. 75, 76

\_\_\_\_\_. **The NOAA POES (TIROS) medium energy proton and electron detector**. 325 Broadway, Boulder CO 80305, USA: Space Weather Prediction Center (SWPC), 2001. Disponível em:

<<http://www.swpc.noaa.gov/pmap/PoesSem.html>>. Acesso em: 04 novembro 2010. 48

STEIGER, W. R.; WARWICK, J. W. Observations of cosmic radio noise at 18 mc/s in Hawaii. **Journal Of Geophysical Research**, v. 66, p. 57–66, jan. 1961. 53

TANAKA, Y.; MAKITA, K.; NISHINO, M.; OOKAWA, T. Development of data analysis program for imaging riometer by using MATLAB. **Bulletin of science and engineering, Takushoku University**, Takushoku University, v. 10, n. 1, p. 61, 2007. 53, 56, 64, 66

TORR, D. G.; WALKER, J. C. G.; HOFFMAN, R. A.; TORR, M. R. Particle precipitation in the South Atlantic geomagnetic anomaly. **Planetary and Space Science**, v. 23, p. 15–26, jan. 1975. 31, 32

VAN ALLEN, J. A. The geomagnetically trapped corpuscular radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, p. 1683–1689, nov. 1959. 28

VAN ALLEN, J. A.; FRANK, L. A. Radiation around the Earth to a radial distance of 107,400 km. **Nature**, v. 183, p. 430–434, fev. 1959. 28

VERNOV, S. N.; GORCHAKOV, E. V.; SHAVRIN, P. I.; SHARVINA, K. N. Radiation belts in the region of the South-Atlantic Magnetic Anomaly. **Space Science Reviews**, v. 7, p. 490–533, nov. 1967. 32



WRASSE, C. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; LIMA, L. M.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; FECHINE, J. Determinação dos parâmetros de ondas de gravidade através da análise espectral de imagens de aeroluminescência. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 3, 2007. 10

WRENN, G. L.; RODGER, A. S.; RISHBETH, H. Geomagnetic storms in the Antarctic F-Region. I. Diurnal and seasonal patterns for main phase effects. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 49, n. 9, p. 901–913, 1987. 58



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

### **Teses e Dissertações (TDI)**

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

### **Manuais Técnicos (MAN)**

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

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

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

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

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

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

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

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

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

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

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

### **Pré-publicações (PRE)**

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