



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15377TDI/1396

ESTUDO DA ANOMALIA EQUATORIAL DE IONIZAÇÃO

Erica Monteiro Diogo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Jonas Rodrigues de Souza e Inez Staciarini Batista, aprovada
em 29 de agosto de 2008.

Registro do documento original:

<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/10.10.15.10>

INPE
São José dos Campos
2008

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**Presidente:**

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15377TDI/1396

ESTUDO DA ANOMALIA EQUATORIAL DE IONIZAÇÃO

Erica Monteiro Diogo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelos Drs. Jonas Rodrigues de Souza e Inez Staciarini Batista, aprovada
em 29 de agosto de 2008.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/10.10.15.10>>

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D621e Diogo, Erica Monteiro.

Estudo da anomalia equatorial de ionização / Erica Monteiro Diogo. – São José dos Campos: INPE, 2008.

100p. ; (INPE-15377TDI/1396)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

1. Anomalia equatorial. 2. Modelagem ionosférica. 3. Ionosfera. 4. Variação secular. I. Título.

CDU 551.510.413.5

Copyright © 2008 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, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 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, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, 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.

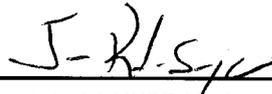
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Geofísica Espacial

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Jonas Rodrigues de Souza



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Inez Staciarini Batista



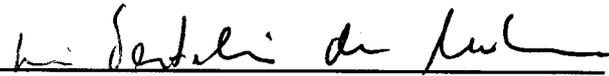
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Mangalathayil Ali Abdu



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Rui Tertuliano de Medeiros



Convidado(a) / UFRN / Natal - RN

Aluno (a): Érica Monteiro Diogo

São José dos Campos, 29 de agosto de 2008

“When you lose small mind you free your life.”

Aerials, System of a Down.

A meus pais Angela e Maurício, e a meus irmãos Ulisses e Regina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Dr. Jonas Rodrigues de Souza e à Dra. Inez Staciarini Batista pela orientação e pelo apoio.

Aos membros da Banca Examinadora: Dr. Mangalathayil Ali Abdu, Dr. Rui Tertuliano Medeiros e Dr. Severino Dutra, pelas críticas e sugestões que enriqueceram este trabalho.

À Maria Goreti dos Santos Aquino, responsável pela redução dos dados, pela atenção, disponibilidade e paciência. Aos alunos de Iniciação Científica, Ângela Machado dos Santos, Roberta de Cássia Ferreira Porto e Everaldo Marcos Gonçalves, pela redução do banco de dados utilizado neste trabalho.

Aos colegas do curso, pela convivência. Aos companheiros de sala pela companhia e ajuda.

Às amigas Karleyne Medeiros Gomes da Silva e Larissa Carlos de Oliveira Santos, pela amizade sem horários e restrições. Aos amigos Antônio Carlos Varela Saraiva e Wivaldo Dantas de Asevedo Júnior, pela amizade, companhia e pelo suporte técnico. Ao Anderson de Carvalho Chaves, pelo apoio e presença na última etapa. Sem vocês o caminho teria sido muito mais solitário e difícil.

A meus pais, por tudo que eles representam para mim. Ao Ulisses e à Regina, por estarem sempre comigo.

RESUMO

Neste trabalho é usado um modelo teórico para estudar a influência da variação secular do equador geomagnético, da deriva vertical eletromagnética e dos ventos neutros sobre o desenvolvimento e manutenção da Anomalia Equatorial de Ionização, para o período de 1973 a 2006. O modelo ionosférico utilizado foi o SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) e os resultados são representativos de condições geomagneticamente calmas. Dados da frequência crítica da região F (f_oF_2) e a sua altura correspondente (h_mF_2) também foram analisados para estudar os efeitos da variação secular sobre a ionosfera de baixas latitudes. Observou-se, através dos resultados da modelagem, que a deriva vertical eletromagnética é responsável por intensificar o efeito fonte, aumentando a intensidade das cristas e a distância entre elas. Com relação à ação dos ventos, observou-se que ele causa assimetrias na Anomalia Equatorial de Ionização. O estudo da influência da variação secular mostrou que a Anomalia Equatorial de Ionização está sofrendo um deslocamento, em coordenadas geográficas, para o norte, acompanhando o equador geomagnético. Tal deslocamento tem sido de $0,16^\circ$ por ano para atividade solar baixa, e de $0,17^\circ$ por ano para atividade solar alta, conforme resultados do SUPIM. Os dados de f_oF_2 registrados em Cachoeira Paulista têm revelado que tal deslocamento está causando um decréscimo na densidade do plasma nesta região. Os resultados do modelo, para atividade solar baixa, confirmam essa tendência, mas mostraram uma tendência contrária para o período de atividade solar alta. Neste estudo, os resultados de h_mF_2 e f_oF_2 calculados pelo modelo foram comparados com dados registrados em Cachoeira Paulista e verificou-se que as melhores concordâncias ocorreram nos períodos de atividade solar baixa.

EQUATORIAL IONIZATION ANOMALY STUDY

ABSTRACT

In this work, we use a theoretical model to study the influence of the secular variation of the geomagnetic equator, electromagnetic drift and neutral wind on the development and maintenance of the Equatorial Ionization Anomaly, between 1973 and 2006. The ionospheric model used here is the SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) and all results are representative of geomagnetically quiet conditions. Experimental data for the F-region critical frequency (f_oF_2) and peak height (h_mF_2) observed over Cachoeira Paulista ($22,5^\circ$ S; 45° W) have also been analyzed to study the effects of the secular variation on the low-latitude ionosphere. The simulation results have shown that the vertical drift is responsible for the fountain effect intensification, which increases the Anomaly crests as well as the distance between them. It was observed that winds cause asymmetry on the Equatorial Anomaly peaks. The study of the secular variation showed that the Equatorial Ionization Anomaly is shifting northward, following the geomagnetic equator at a rate of $0,16^\circ$ per year, for solar minimum, and $0,17^\circ$ per year, for solar maximum, as obtained from SUPIM results. Such a movement may explain the f_oF_2 decrease tendency observed on the Cachoeira Paulista data analyzed in this study. This tendency is confirmed by the model results for solar minimum, but the same does not happen for the solar maximum conditions. The comparative study between calculated values of f_oF_2 and h_mF_2 and the observations over Cachoeira Paulista has shown that the best agreement occur for solar minimum conditions.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
1 INTRODUÇÃO	23
2 O MODELO SUPIM	29
2.1 Equações utilizadas pelo modelo	30
2.2 Parâmetros de entrada do modelo	35
2.2.1 Fluxo solar EUV	35
2.2.2 Atmosfera neutra	35
2.2.3 Vento neutro	36
2.2.4 Velocidade de deriva vertical eletromagnética.....	36
2.3 Parâmetros de saída do modelo.....	36
3 DADOS EXPERIMENTAIS	39
3.1 A ionossonda	39
3.2 Metodologia	42
3.2.1 Dados de foF2 e hmF2 para os anos escolhidos.....	43
3.2.2 Dados de foF2 para o período de 1973 a 2006	50
4 MODELAGEM	53
4.1 Efeitos da deriva vertical eletromagnética sobre a Anomalia Equatorial de Ionização.....	53
4.2 Efeitos dos ventos neutros sobre a Anomalia Equatorial de Ionização.....	59
4.3 Efeitos da variação secular sobre a Anomalia Equatorial de Ionização.....	67
5 COMPARAÇÕES ENTRE DADOS E MODELAGEM	79
6 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Elementos do campo geomagnético: componentes X, Y e Z; declinação; inclinação; intensidades horizontal e total.....	25
1.2 – Aspecto do equador geomagnético sobre o setor brasileiro para os anos de 1978, 1984, 1990, 1996, 2002 e 2006.....	27
2.1 – Geometria para a linha de campo de um dipolo magnético. Fonte: DE PAULA (1987); SOUZA (1997).	31
2.2 – Modelagem para as 1600 LT: a) distribuição latitudinal da frequência de plasma; e b) da temperatura eletrônica.....	37
2.3 – Modelagem da distribuição dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local para Cachoeira Paulista, para o dia 21 de setembro de 2006..	38
3.1 – a) Ionograma gerado a partir dos dados obtidos pela digissonda 256, localizada na estação de Cachoeira Paulista, para o dia 21 de setembro de 2006, às 1600 LT (1900 UT); b) parâmetros hmF2 e foF2 em função da hora local, obtidos a partir de dados da ionossonda digital localizada em Cachoeira Paulista para o dia 21 de setembro de 2006.	41
3.2 – Ciclos solares a que pertencem os dados utilizados neste trabalho. As linhas verticais vermelhas marcam os anos de atividade solar baixa e as azuis, os anos de atividade solar alta.	44
3.3 – Superposição dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista, para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996 e c) 2006.	46
3.4 – Superposição dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista, para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989 e c) 2002.	47
3.5 – Médias dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista para: a) atividade solar alta; e b) atividade solar baixa.....	49
3.6 – Dados de foF2 para as 1800 LT, obtidos em Cachoeira Paulista, no período de 1973 a 2006, para os grupos de: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. O ajuste linear para cada um dos grupos é dado pela curva em azul.....	51

4.1 – Modelos D1 e D2 para deriva vertical eletromagnética. Aqui os valores negativos indicam deriva vertical eletromagnética para baixo e os positivos, para cima.	54
4.2 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma, às 2000 LT, para o dia 21 de setembro de 2002, usando: a) modelo D1; e b) modelo D2.....	56
4.3 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma, às 2000 LT, para o dia 21 de setembro de 2006, usando: a) modelo D1; e b) modelo D2.....	58
4.4 – Distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002, nos horários de: a) 0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.	61
4.5 – Distribuição latitudinal de plasma para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.....	62
4.6 – Distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro para a modelagem do dia 21 de setembro de 2006, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.....	65
4.7 – Distribuição latitudinal de plasma para a modelagem do dia 21 de setembro de 2006, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.....	66
4.8 – Deriva vertical eletromagnética sobre o equador geomagnético. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.....	69
4.9 – Vento efetivo sobre Cachoeira Paulista em 250 km de altitude. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.....	70
4.10 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 1800 LT para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.	71
4.11 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 1800 LT para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.	72
4.12 – Distribuição latitudinal do parâmetro foF2 fornecida pelo modelo SUPIM para a modelagem cujos parâmetros foram fixados, às 1800 LT: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.....	74

4.13 – Latitude geográfica do maior valor apresentado pelo parâmetro foF2, para os anos deste estudo, às 1800 LT; e do equador geomagnético para o meridiano de Cachoeira Paulista.	75
4.14 – Modelagem para a variação da intensidade do parâmetro foF2 para Cachoeira Paulista, às 1800 LT, para atividade solar baixa (azul) e atividade solar alta (vermelho).....	77
5.1 – Comparação entre modelagem e média dos dados para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006.	80
5.2 – Comparação entre modelagem e média dos dados para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002.	82
5.3 – Deriva vertical eletromagnética sobre o equador geomagnético. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.....	84
5.4 – Vento efetivo sobre Cachoeira Paulista em 250 km de altitude. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.....	85
5.5 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 18 00 LT para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.	86
5.6 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 18 00 LT para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.	87
5.7 – Distribuição latitudinal do parâmetro foF2 fornecida pelo modelo SUPIM para a modelagem que utilizou parâmetros de entrada médios, às 1800 LT: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.	89
5.8 – Variação da intensidade do parâmetro foF2 para Cachoeira Paulista (dados e modelagem), às 1800 LT; e seus respectivos ajustes lineares para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AE-E	Atmosphere Explorer E Satellite
EUV	Extremo Ultravioleta
EUVAC	Solar EUV Flux Model for Aeronomic Calculations
HWM93	Horizontal Wind Model 93
IGRF	International Geomagnetic Field Reference
NGDC	National Geophysical Data Center
NRLMSISE-00	Naval Research Laboratory Mass-Spectrometer Incoherent Scatter
SUPIM	Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model

1 INTRODUÇÃO

A ionosfera é a região da atmosfera que contém íons e elétrons livres, sendo ionizada em grande parte pela radiação solar, cuja absorção é maior na região compreendida entre $\pm 30^\circ$ de latitude, centrada no equador, do que em outras regiões de latitudes maiores (ABDU, 2005). Seria esperado então que no equador a densidade de ionização fosse maior, mas constatou-se que isto não ocorre. Pelo contrário, foi observado que, durante o dia, nesta região há uma baixa densidade de ionização, causada basicamente por processos de transporte que elevam o plasma, retirando-o do setor equatorial e levando-o para latitudes geomagnéticas maiores, tanto no hemisfério sul quanto no hemisfério norte. Este fenômeno, conhecido como Anomalia Equatorial de Ionização ou Anomalia de Appleton, conforme já mencionado, é caracterizado pela distribuição latitudinal anômala da densidade de ionização observada em baixas latitudes e vem sendo objeto de estudos teóricos e experimentais desde o relato de Appleton em 1946 (SASTRI, 1990).

A Anomalia Equatorial de Ionização tem origem na deriva vertical eletromagnética, causada pela interação entre o plasma ionosférico e os campos elétricos direcionados para leste existentes na ionosfera equatorial diurna, na presença do campo geomagnético. Estes campos elétricos são induzidos na região E da ionosfera pela ação dos ventos de maré e na região F pelos ventos termosféricos, que fazem com que elétrons e íons se movimentem através das linhas de campo geomagnético (RISHBETH, 1971), que sobre o equador geomagnético são praticamente horizontais. Nas proximidades da região equatorial, as linhas de campo conectam as regiões ionosféricas E e F, mapeando o campo elétrico de uma região para a outra. Na região F, os campos elétricos ionosféricos, na presença do campo geomagnético, provocam uma deriva vertical, dada por $(\vec{E} \times \vec{B})/B^2$ e direcionada para cima durante o dia, que eleva o plasma, retirando-o de altitudes menores e jogando-o para altitudes maiores. Nestas altitudes, sob a ação da gravidade e de gradientes de pressão, o plasma ionosférico flui ao longo das linhas de campo geomagnético,

cuja condutividade é alta, sendo depositado em latitudes maiores e altitudes menores nos dois hemisférios, formando as chamadas cristas da Anomalia Equatorial de Ionização, localizadas em torno de $\pm 14^\circ$ de latitude geomagnética (SOUZA, 1997). Esta elevação do plasma ionosférico seguida do depósito em latitudes geomagnéticas maiores é denominada Efeito Fonte e é responsável pelo desenvolvimento diurno da Anomalia Equatorial de Ionização.

A Anomalia Equatorial de Ionização tem sido objeto de vários estudos, realizados por autores como Hanson e Moffett (1966), Sterling et al. (1969), Anderson (1973a, b) e Sastri (1990). Estes trabalhos enfocam os mecanismos físicos responsáveis pela formação e manutenção da Anomalia Equatorial de Ionização e a influência dos seguintes fatores: ventos termosféricos trans-equatoriais, responsáveis por assimetrias das cristas; atividade solar; atividade geomagnética; estação do ano; campos elétricos ionosféricos e campo geomagnético. No entanto, não foi realizado ainda um estudo que quantificasse a influência da variação secular do campo geomagnético sobre a Anomalia Equatorial de Ionização, que será descrita neste trabalho.

Um dos elementos responsáveis pelo desenvolvimento da Anomalia Equatorial de Ionização, o campo geomagnético, possui uma configuração especial sobre o setor brasileiro. Este campo apresenta quatro contribuições, associadas a: correntes elétricas presentes no núcleo externo, ao material magnético presente na crosta terrestre, a correntes elétricas externas, como por exemplo, as correntes S_q , as Chapman-Ferraro e as de anel; além das que são induzidas no solo. A contribuição interna do campo geomagnético é matematicamente expressa por uma expansão em harmônicos esféricos, caracterizada por vários multipolos que, em conjunto, representam o campo principal.

Para falar sobre esta configuração é necessário expor alguns conceitos básicos que caracterizam o campo geomagnético, geralmente representado por um dipolo cujo eixo é deslocado do centro geográfico da Terra e inclinado em

relação ao seu eixo de rotação. A caracterização do campo geomagnético pode ser feita através de suas componentes cartesianas X , Y e Z ; além dos quatro elementos abaixo, mostrados na Figura 1.1 (PARKINSON, 1983):

- a) declinação (D): ângulo entre o norte geográfico e a componente horizontal do campo, sendo positiva do norte para o leste;
- b) inclinação (I): ângulo entre a direção do campo e a horizontal, sendo positivo da horizontal para baixo;
- c) intensidade horizontal (H): magnitude da componente horizontal do campo;
- d) intensidade total (F ou B): magnitude do vetor campo.

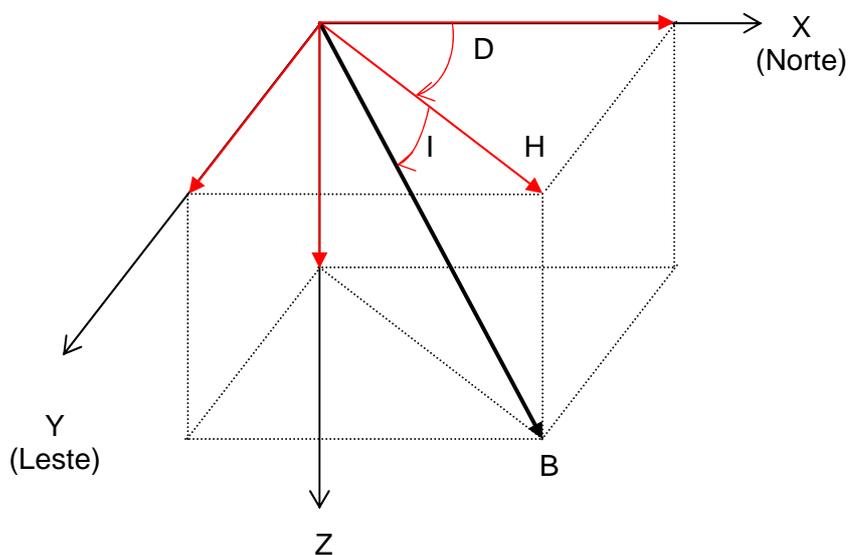


Figura 1.1 – Elementos do campo geomagnético: componentes X , Y e Z ; declinação; inclinação; intensidades horizontal e total.

Alguns destes elementos definem conceitos e regiões terrestres importantes para o desenvolvimento deste trabalho. O campo geomagnético, assim como seus elementos, apresenta uma variação temporal denominada variação secular, que é separada observacionalmente de outras mudanças mais rápidas de origem principalmente externa, sendo definida como a variação obtida considerando-se médias anuais (PARKINSON, 1983). Sua origem é atribuída aos movimentos convectivos do plasma existente na região entre o manto e o núcleo terrestre, que geram variações no campo geomagnético. Nos locais onde a componente vertical (Z) e a inclinação (I) são nulas, define-se a linha denominada equador geomagnético, que não coincide com o equador geográfico (RANGARAJAN e BARRETO, 2000).

Há também uma região da superfície terrestre onde a intensidade total do campo geomagnético (F) apresenta o menor valor, definindo o centro da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, atualmente localizada na parte Sul do Brasil. Conjuntamente com esta anomalia do campo geomagnético, a região brasileira apresenta um alto valor da declinação magnética e um aspecto peculiar do equador geomagnético, mostrado na Figura 1.2, que cruza o equador geográfico, afastando-se do mesmo na costa oeste da América do Sul (ABDU et al., 2005).

No setor brasileiro, a ação da variação secular faz com que a posição geográfica do equador geomagnético venha mudando ao longo dos anos (RANGARAJAN e BARRETO, 2000). ABDU et al. (1996) observaram, em Fortaleza, que os tipos de camada E esporádica apresentam tendência de longo termo, associada à mudança na posição do Eletrojato Equatorial, que acompanha o equador geomagnético. Além do Eletrojato Equatorial, esta mudança na posição geográfica do equador geomagnético também afeta a localização da Anomalia Equatorial de Ionização.

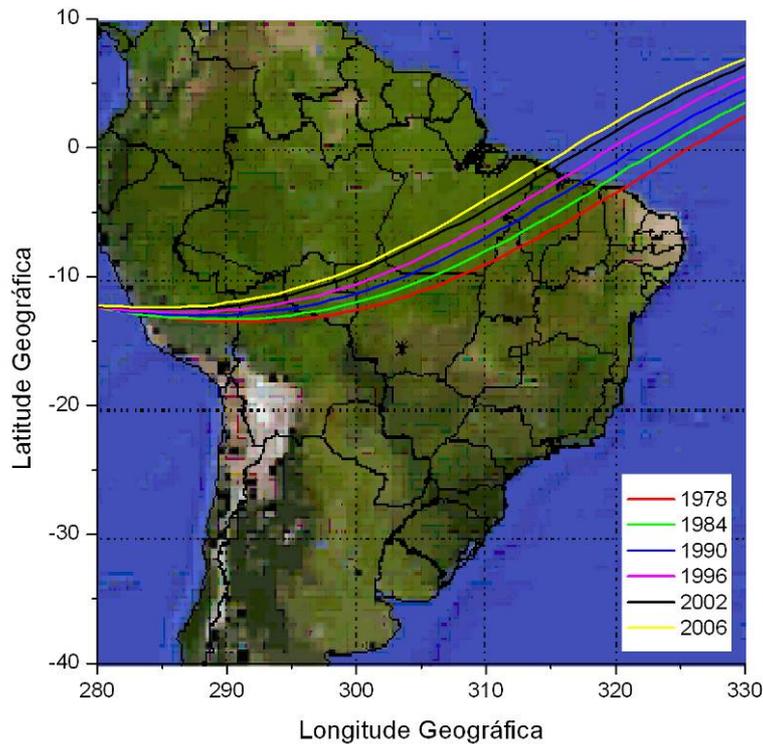


Figura 1.2 – Aspecto do equador geomagnético sobre o setor brasileiro para os anos de 1978, 1984, 1990, 1996, 2002 e 2006.

Uma das ferramentas utilizadas na investigação de fenômenos como a Anomalia Equatorial de Ionização é a modelagem ionosférica, que tem exercido um papel importante no estudo dos mecanismos e processos que governam a atmosfera superior. Vários modelos têm sido desenvolvidos desde a década de 70 na tentativa de conciliar estes processos físicos e químicos que ocorrem na ionosfera de baixas, médias e altas latitudes (SOUZA, 1997).

O modelo a ser utilizado para a realização deste estudo da Anomalia Equatorial de Ionização é o SUPIM (*Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model*), um modelo matemático que foi desenvolvido pelo pesquisador Graham John Bailey na Universidade de Sheffield, Inglaterra (BAILEY et al., 1997). Este modelo resolve as equações da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia dependentes do tempo, ao longo das linhas de campo magnético com

o objetivo de obter as densidades, os fluxos e as temperaturas dos elétrons e dos sete íons: O^+ , H^+ , He^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ e N^+ (SANTOS, 2005).

Neste trabalho será estudada de forma qualitativa a influência da variação secular sobre a posição geográfica da Anomalia Equatorial de Ionização e será verificado se esta influência pode ser observada nos dados experimentais da frequência crítica da região F, obtidos entre os anos de 1973 e 2006 pela ionossonda localizada em Cachoeira Paulista (SP). No Capítulo 2 será feita uma breve descrição do modelo SUPIM, no Capítulo 3 serão apresentados os dados experimentais, no Capítulo 4 serão expostos os resultados da modelagem, no Capítulo 5 serão apresentadas as comparações entre dados experimentais e modelagem e no Capítulo 6 serão expostas as conclusões deste trabalho.

2 O MODELO SUPIM

O modelo SUPIM (*Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model*) é um modelo matemático que foi desenvolvido pelo pesquisador Graham John Bailey, da Universidade de Sheffield (Inglaterra) e suas simulações podem ser aplicadas a regiões onde as linhas de campo geomagnético são fechadas. Neste modelo, as equações da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia são resolvidas ao longo das linhas de campo magnético para obter as densidades, os fluxos ao longo das linhas de campo e as temperaturas para os elétrons e os íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ e N^+ (SANTOS, 2005). São considerados no modelo: a produção de ionização por radiação EUV (extremo ultravioleta), a perda e produção de íons através de reações químicas entre íons e gases neutros, as colisões entre íons e entre íons e constituintes neutros, os ventos termosféricos, a deriva vertical eletromagnética, a condução térmica e o aquecimento fotoeletrônico e por fricção (BAILEY et al., 1997).

As equações são resolvidas utilizando-se como ponto de referência o centro do dipolo excêntrico que representa o campo geomagnético, definido matematicamente pelos oito termos não-nulos da expansão harmônica esférica do potencial escalar geomagnético, onde os coeficientes são fornecidos pelo modelo de campo geomagnético IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) (MAUS et al., 2005). Tais soluções são obtidas ao longo das linhas de campo geomagnético, em altitudes a partir de 90 km nos dois hemisférios conjugados, fornecendo resultados que apresentam distribuição em altitude e latitude.

A deriva vertical que o plasma ionosférico sofre faz com que ele esteja associado a diferentes linhas de campo magnético em diferentes horas do dia. Assim, para gerar dados referentes às 24 horas do dia, as equações são resolvidas ao longo das diferentes linhas de campo magnético, dentro de uma faixa pré-determinada de latitude e altitude (BAILEY et al., 1997).

2.1 Equações utilizadas pelo modelo

O modelo SUPIM resolve um sistema composto pelas equações da continuidade dependente do tempo, do movimento e do equilíbrio de energia que têm como referência as linhas de campo magnético. A Equação da continuidade para um íon é dada por:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i) = P_i - L_i; \quad (2.1)$$

onde t é o tempo e N_i , V_i , P_i , e L_i são a concentração, a velocidade, a taxa de produção e de perda do íon em questão, respectivamente. Após decompor o movimento em componentes perpendicular e paralela ao campo magnético, fazendo a velocidade $\vec{V}_i = \vec{V}_i'' + \vec{V}_{dc}$, onde \vec{V}_{dc} é a resultante da soma entre a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ e a de co-rotação, temos que (SOUZA, 1997):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} + \vec{V}_{dc} \cdot \vec{\nabla} N_i + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i'') &= P_i - L_i - N_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{dc} \quad \Rightarrow \\ \frac{dN_i}{dt} + \vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i'') &= P_i - L_i - N_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{dc} \quad . \end{aligned} \quad (2.2)$$

A geometria de uma linha de campo é mostrada na Figura 2.1, onde:

r é a distância radial até um ponto qualquer da linha de campo;

r_{eq} é a distância equatorial e radial da linha de campo;

θ é a co-latitudo;

\hat{r} é o vetor unitário na direção de r ;

$\hat{\theta}$ é o vetor unitário de θ ;

\hat{n} é o vetor unitário normal à linha de campo;

$\hat{t} = (\text{sen}I)\hat{r} + (\text{cos}I)\hat{\theta}$ é o vetor unitário tangente à linha de campo geomagnético; e

I é a inclinação magnética (ângulo entre o campo geomagnético e a superfície terrestre).

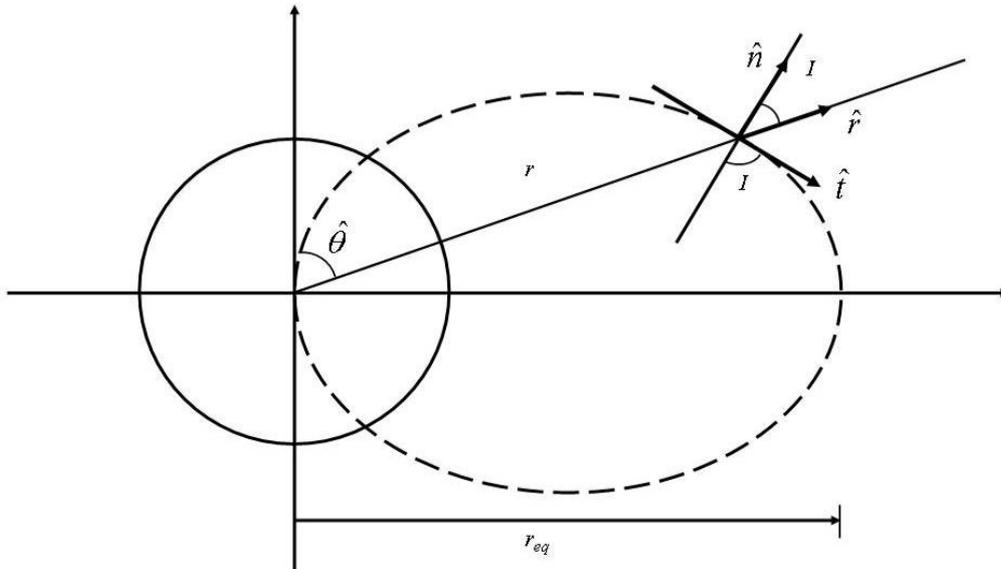


Figura 2.1 – Geometria para a linha de campo de um dipolo magnético.

A partir destas informações pode-se calcular $\vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i'')$ (ver DE PAULA, 1987; BAILEY e SELLEK, 1990; SOUZA, 1997):

$$\vec{\nabla} \cdot (N_i \vec{V}_i'') = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s} [AN_i V_i''], \quad (2.3)$$

onde A é a área da seção transversal do tubo de fluxo magnético e s é a distância ao longo da linha de campo. Substituindo a Equação (2.3) na Equação (2.1.2), temos:

$$\frac{dN_i}{dt} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s} (AN_i V_i'') = P_i - L_i - N_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{dc} \quad (2.4)$$

O termo de produção P_i para um íon na Equação (2.4) é dado pela equação abaixo (BAILEY e SELLEK, 1990; SOUZA, 1997):

$$P_i = \sum_{\lambda} \Phi(\lambda) \sigma_i(\lambda) N_i \exp\left(-\sum_j \sigma_j(\lambda) N_j H_j Ch_j(\chi)\right); \quad (2.5)$$

onde:

$\Phi(\lambda)$ é a intensidade da radiação do fluxo solar EUV;

$\sigma_i(\lambda)$ é a seção transversal de foto-ionização do i-ésimo constituinte neutro;

N_i é a concentração do i-ésimo constituinte neutro;

$\sigma_j(\lambda)$ é a seção transversal de foto-absorção do j-ésimo constituinte neutro;

N_j é a concentração do j-ésimo constituinte neutro;

H_j é a altura de escala do j-ésimo constituinte neutro;

$Ch_j(\chi)$ é a função de Chapman do j-ésimo constituinte neutro; e

χ é o ângulo zenital solar.

O termo de perda L_i para um íon na Equação (2.4) é (SOUZA, 1997):

$$L_i = \beta_i N_i; \quad (2.6)$$

onde β_i é o coeficiente de perda, determinado a partir das reações químicas mais importantes que acontecem na ionosfera.

A equação do movimento considera as forças que atuam no plasma ionosférico: a força devido ao gradiente de pressão, a gravitacional, a elétrica, a magnética e a colisional. Levando em consideração apenas o movimento ao longo das linhas de campo geomagnético, que a ionosfera está em estado estacionário e é composta pelos íons i , j e k , teremos para o i -ésimo íon (se $i = O^+$, então $j = He^+$ e $k = H^+$) (BAILEY e BALAN, 1996):

$$0 = -g \sin I - \frac{kT_i}{m_i N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \left[\beta_i^* \frac{\partial T_i}{\partial s} - \beta_{ij}^* \frac{\partial T_j}{\partial s} - \beta_{ik}^* \frac{\partial T_k}{\partial s} \right] \\ - \left[\nu_{ij} (1 - \Delta_{ij}) - R_{ijk} + R_{ikj} \right] (V_i^{\parallel} - V_j^{\parallel}) - \left[\nu_{ik} (1 - \Delta_{ik}) - R_{ikj} + R_{ijk} \right] (V_i^{\parallel} - V_k^{\parallel}) \\ - \sum_m \nu_{im} (V_i^{\parallel} - V_m^{\parallel}) - \sum_n \nu_{in} (V_i^{\parallel} - u_{\theta} \cos D \cos I + u_{\phi} \sin D \cos I); \quad (2.7)$$

onde

g é a aceleração da gravidade;

T_i e T_e são as temperaturas do íon e dos elétrons, respectivamente; k é a constante de Boltzmann;

m_i é a massa do íon;

N_e é a concentração eletrônica;

ν_{ij} é a frequência de colisão entre o i -ésimo e o j -ésimo íon;

ν_{ik} é a frequência de colisão entre o i -ésimo e o k -ésimo íon;

ν_{im} é a frequência de colisão entre o i -ésimo íon e o m -ésimo íon molecular;

u_{θ} é a componente meridional, em coordenadas geográficas, da velocidade do vento neutro (positiva do norte para o sul);

u_ϕ é a componente zonal, em coordenadas geográficas, da velocidade do vento neutro (positiva do oeste para o leste) ;

β_i^* , β_{ij}^* e β_{ik}^* são os coeficientes de difusão térmica do íon i ;

\sum_m é feito sobre os íons moleculares e \sum_n , sobre os gases neutros; e

Δ_{ij} , Δ_{ik} , R_{ijk} , R_{ikj} são definidos no trabalho de QUEGAN et al. (1981).

Para $i = N_2^+$, O_2^+ , N^+ e NO^+ temos (BAILEY e BALAN, 1996; SANTOS, 2005):

$$0 = -g \operatorname{sen} I - \frac{kT_i}{m_i N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial s} - \sum_{j \neq i} \nu_{ij} (V_i^\parallel - V_j^\parallel) - \sum_n \nu_{in} (V_i^\parallel - u_\theta \cos D \cos I + u_\phi \operatorname{sen} D \cos I). \quad (2.8)$$

Supondo que o plasma está distribuído ao longo das linhas de campo, temos que a equação do equilíbrio de energia para o i -ésimo constituinte é dada por (BAILEY e SELLEK, 1990):

$$\frac{3}{2} k N_i \frac{DT_i}{Dt} = Q_i - k N_i T_i \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_i + \vec{\nabla} \cdot (\kappa_i \vec{\nabla} T_i) + F_{in}; \quad (2.9)$$

onde Q_i é a soma das taxas de aquecimento por colisões, \vec{V}_i a velocidade, κ_i é

a condutividade térmica, $\frac{DT_i}{Dt}$ é dado por:

$$\frac{DT_i}{Dt} = \frac{\partial T_i}{\partial t} + \vec{V}_i \cdot \vec{\nabla} T_i \quad (2.10)$$

e F_{in} é dado por:

$$F_{in} = \sum_n \frac{m_i m_n}{m_i + m_n} \nu_{in} N_i \left[(V_i^\parallel - U \cos I)^2 + (V^\perp - U \operatorname{sen} I)^2 + (V^\phi)^2 \right]. \quad (2.11)$$

2.2 Parâmetros de entrada do modelo

Serão expostos aqui os principais parâmetros de entrada utilizados pelo modelo SUPIM: o fluxo solar, a atmosfera neutra, o vento neutro e a velocidade de deriva vertical eletromagnética.

2.2.1 Fluxo solar EUV

A versão do modelo SUPIM utilizada neste trabalho adota dois modelos de fluxo solar. Para a radiação que ioniza principalmente a região F é usado o modelo EUVAC (RICHARDS et. al., 1994), que fornece o fluxo EUV para 37 grupos de comprimentos de onda compreendidos entre 50 e 1050 Å, não incluindo as faixas de raios-X e de Lyman- α (1216 Å), extremamente importantes para a região E. Para incluir estes comprimentos de onda, utiliza-se o modelo SOLAR 2000 (TOBISKA et al., 2000), que também fornece o índice F10.7 e seu valor médio para 81 dias.

2.2.2 Atmosfera neutra

A atmosfera neutra é obtida a partir do modelo NRLMSISE-00 (PICONE et al., 2002). Este modelo fornece a temperatura do gás neutro e as densidades numéricas dos componentes He, O, N₂, O₂, Ar, H, e N. Já a densidade numérica do óxido nítrico (NO) é calculada a partir de uma relação empírica (MITRA, 1968):

$$N(NO) = 0,4 \exp\left(-\frac{3700}{T_n}\right) N(O_2) + 5,0 \times 10^{-7} N(O). \quad (2.1)$$

2.2.3 Vento neutro

A versão do modelo SUPIM adotada neste trabalho utiliza o modelo empírico HWM93 (*Horizontal Wind Model*) (HEDIN et al., 1995) para obter o comportamento dos ventos neutros. É importante lembrar que a altura da camada F e as assimetrias da distribuição de plasma alinhada ao campo, ou seja, no meridiano magnético são influenciadas pelos ventos neutros. Como a velocidade do vento neutro é pouco conhecida globalmente, os estudos ionosféricos através de modelos utilizam formulações empíricas das medidas (BAILEY et al., 1997).

2.2.4 Velocidade de deriva vertical eletromagnética

As velocidades de deriva vertical eletromagnética diurnas e noturnas variam de um dia para o outro, de acordo com as estações do ano e com o ciclo solar (BAILEY et al., 1997). Para obter esta velocidade utiliza-se o modelo empírico de deriva vertical eletromagnética proposto por Scherliess e Fejer (1999), baseado em dados obtidos pelo satélite AE-E e pelo radar de Jicamarca. Este modelo incorpora variações da velocidade de deriva vertical eletromagnética relativas à hora local, longitude, estação do ano e ao ciclo solar.

2.3 Parâmetros de saída do modelo

O modelo SUPIM fornece como parâmetros de saída as concentrações e temperaturas dos íons O^+ , He^+ , H^+ , N^+ , N_2^+ , O_2^+ e NO^+ e dos elétrons, além do fluxo de plasma ao longo das linhas de campo geomagnético (BAILEY et al., 1997; SOUZA, 1997; SANTOS, 2005). As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram alguns dos resultados que podem ser obtidos através do modelo SUPIM.

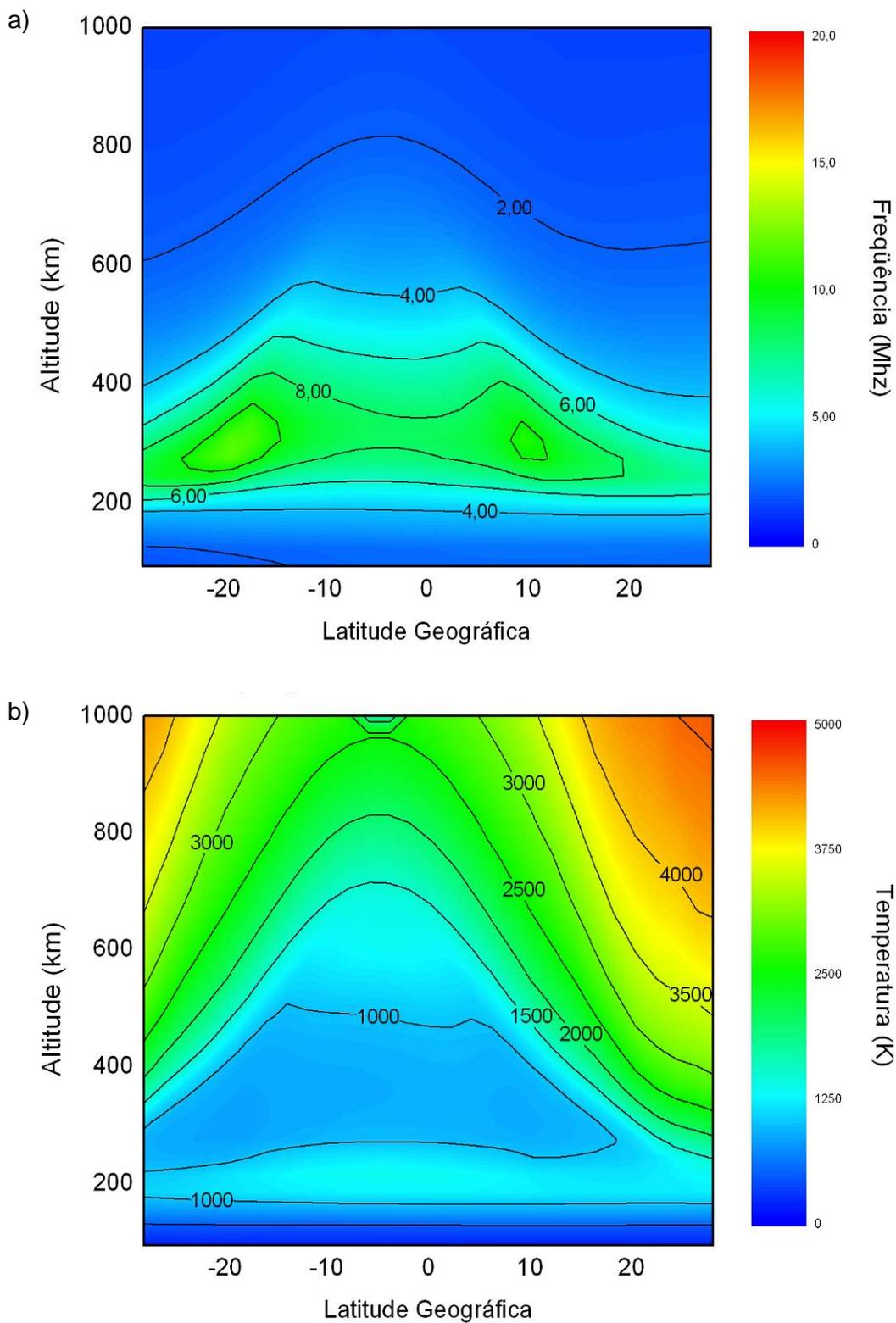


Figura 2.2 – Modelagem para as 1600 LT: a) distribuição latitudinal da frequência de plasma; e b) da temperatura eletrônica.

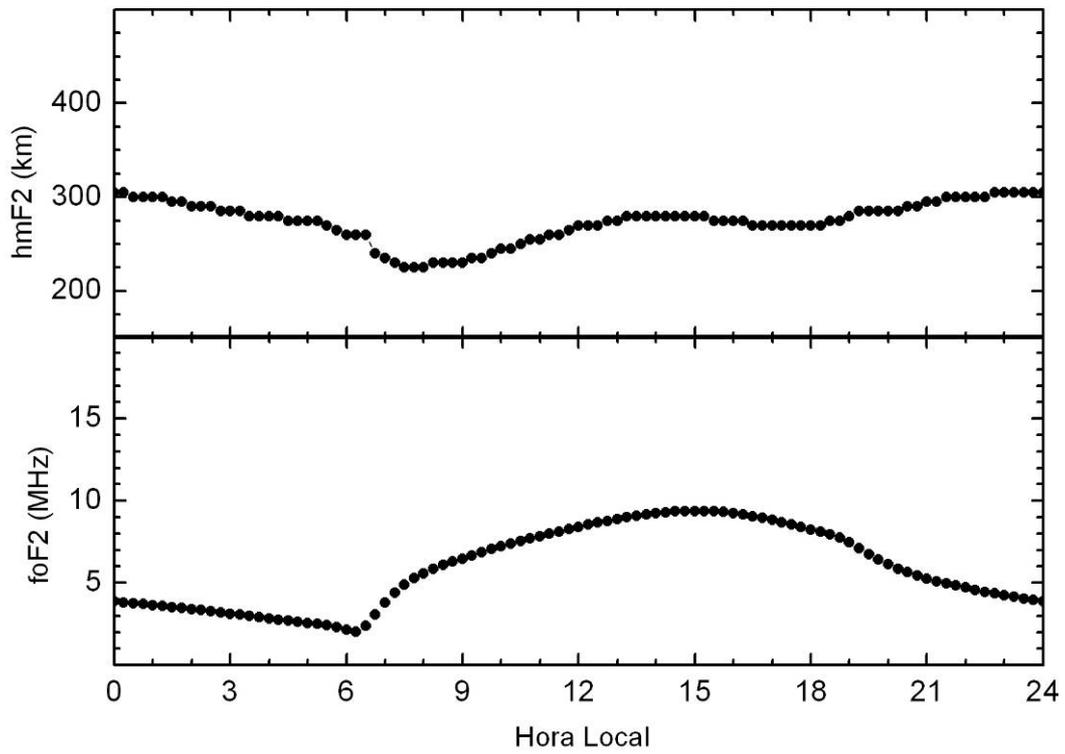


Figura 2.3 – Modelagem da distribuição dos parâmetros $foF2$ e $hmF2$ em função da hora local para Cachoeira Paulista, para o dia 21 de setembro de 2006.

3 DADOS EXPERIMENTAIS

Neste Capítulo será feita uma breve descrição da ionossonda, da metodologia utilizada para a escolha dos dias estudados neste trabalho e dos dados experimentais que serão comparados com os resultados do modelo SUPIM.

3.1 A ionossonda

As técnicas experimentais usadas para o estudo da ionosfera são baseadas, em sua maioria, na propagação de ondas de rádio e podem ser divididas em três tipos:

- a) as ondas de rádios são totalmente refletidas dentro do meio;
- b) a onda pode passar através do meio e emergir alterada; e
- c) a maior parte da energia passa através do meio, mas uma pequena fração é espalhada ou parcialmente refletida por estruturas irregulares.

Para o primeiro e o terceiro itens citados é preciso transmitir e receber o sinal acima ou abaixo da ionosfera, para o segundo é necessário que se tenha uma fonte ou um receptor acima da ionosfera (HARGREAVES, 1992). Neste estudo serão utilizados dados obtidos a partir de ionossondas, que pertencem ao primeiro grupo de técnicas citadas anteriormente.

A ionossonda é um dos instrumentos mais utilizados para medir os parâmetros ionosféricos, sendo composta por um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética numa faixa de frequência que varia de 1 a 25 MHz, em seqüência (KIRCHHOFF, 1991). O pulso emitido verticalmente é refletido pela ionosfera, retornando ao sistema da ionossonda. A partir do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso, cuja frequência f é conhecida, obtém-se a altura virtual $h'(f)$ onde o sinal foi refletido (HARGREAVES, 1992).

As ionossondas digitais são radares com capacidade de análise em tempo real. A digissonda 256, instalada em Cachoeira Paulista (SP), foi desenvolvida pela Universidade de Lowell, Massachussets (UMLCAR), possui um transmissor com 10 kW de potência de pico, cobrindo a faixa de frequência que vai de 0,5 a 30 MHz; uma antena transmissora; um arranjo de antenas receptoras e um computador acoplado, onde são gravados os dados. São medidos os seguintes parâmetros ionosféricos: amplitude, fase, altura, frequência, deslocamento Doppler, espalhamento Doppler, ângulo de chegada e polarização da onda (REINISCH et al., 1989).

A digissonda 256 opera em modos diferentes. Um destes é o modo ionograma, em que a sonda emite pulsos cuja frequência varia com incrementos de 5, 10, 25, 50, 100 ou 200 kHz dentro do intervalo citado anteriormente. Os ionogramas produzidos pela digissonda 256 (Figura 3.1a) podem ter 128 ou 256 intervalos de altura, sondando a faixa compreendida entre 60 e 1400 km.

A partir dos ionogramas pode-se obter informações sobre parâmetros ionosféricos, como a altura do pico da região F (h_mF_2) e a frequência crítica da região F (f_oF_2), mostrados na Figura 3.1b.

Neste trabalho serão utilizados dados experimentais da frequência crítica da região F (f_oF_2) e sua altura correspondente (h_mF_2), obtidos por ionossondas analógicas para o período de 1973 a 1989 e por ionossondas digitais a partir de 1990 até o ano de 2006, localizada na estação de Cachoeira Paulista (23,2° S; 45,8° W).

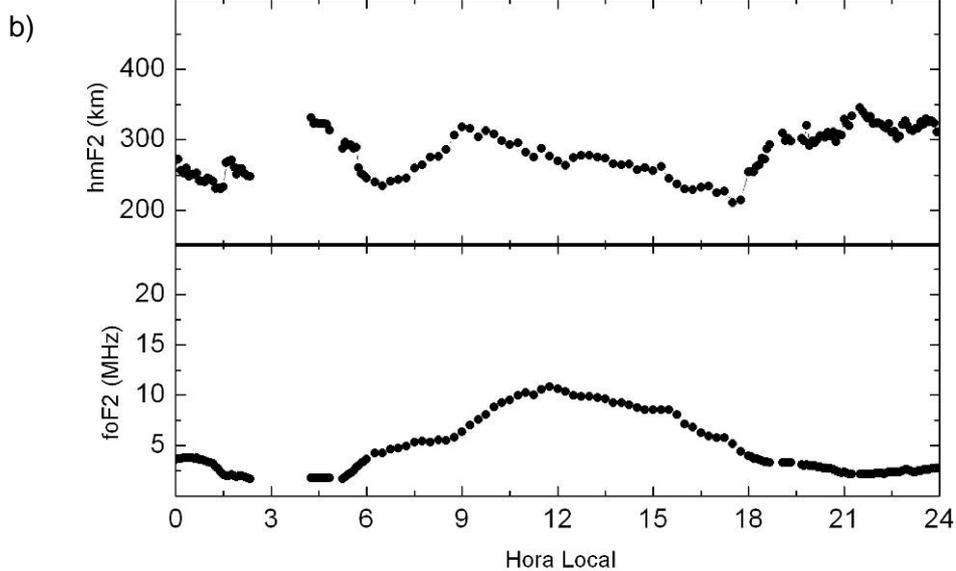
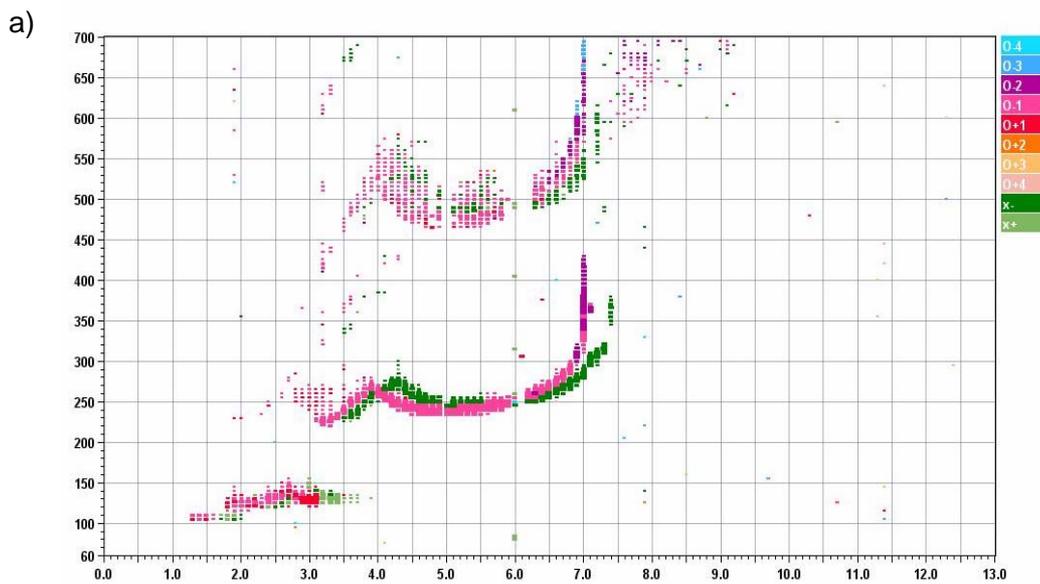


Figura 3.1 – a) Ionograma gerado a partir dos dados obtidos pela digisonda 256, localizada na estação de Cachoeira Paulista, para o dia 21 de setembro de 2006, às 1600 LT (1900 UT); b) parâmetros hmF2 e foF2 em função da hora local, obtidos a partir de dados da ionossonda digital localizada em Cachoeira Paulista para o dia 21 de setembro de 2006.

3.2 Metodologia

Os dados de ionossonda que serão apresentados aqui foram obtidos na estação de Cachoeira Paulista, para o período de 1973 a 2006. Para escolher quais seriam os dados utilizados neste estudo, fixaram-se parâmetros como a estação do ano e as atividades solar e geomagnética, com o objetivo de evidenciar os efeitos causados pela variação secular do campo geomagnético.

Foi realizado um levantamento dos dados e concluiu-se que os meses que tinham a maior quantidade de dados eram os de setembro e outubro, os quais foram escolhidos para o estudo. Em seguida, observou-se a atividade geomagnética. Durante tempestades magnéticas as correntes ionosféricas causam perturbações no campo geomagnético. Para quantificar estas perturbações são utilizados os índices D_{ST} (*Disturbance Storm Time Index*), AE (*Auroral Electrojet Index*), A_p e K_p (*Planetary Magnetic Disturbance Index*), entre outros. Neste trabalho a classificação para a atividade geomagnética é feita através do índice K_p , que vem sendo usado desde o início do século XX (CAMPBELL, 2001). Os valores de K_p são obtidos em observatórios a cada intervalo de 3 horas e são expressos em valores entre 0 e 9. Estes valores são divididos em terços, simbolizados pelos sinais $+$, 0 e $-$ (MAYAUD, 1980). Assim, para o valor 2, por exemplo, temos 2_0 (correspondente ao valor 1,666), 2_0 (correspondente ao valor 2) e 2_+ (correspondente ao valor 2,333). Como foi citado acima, escolheu-se para este trabalho os dias mais calmos dos meses de setembro ou outubro para cada ano, cuja soma dos oito valores de K_p para o dia é menor do que 24. Os índices A_p e K_p utilizados aqui foram retirados do site NGDC (2007).

O terceiro critério empregado foi a atividade solar, relativa ao ciclo das manchas solares, que dura em média onze anos, podendo variar entre nove e quatorze anos (HARGREAVES, 1992). Para classificar a atividade solar existem vários métodos, um deles é o número de Wolf, que utiliza a equação abaixo para estimar o número de manchas solares R_z (BENESTAD, 2006):

$$R_z = k(10g + f); \quad (3.1)$$

onde f é o número total de manchas solares, g é o número de grupos de manchas solares e k é um fator de escala que depende do método de observação. Outro indicador da atividade solar também usado é o índice $F10.7$, que fornece o fluxo de emissão solar no comprimento de onda de 10,7 cm, é expresso em unidades de 10^{-22} W/m²-Hz e está relacionado ao número de manchas solares (HARGREAVES, 1992). Aqui foi utilizado o índice $F10.7$ fornecido pelo site NGDC (2007).

Neste trabalho foram utilizados dois bancos de dados. O primeiro, exposto na seção 3.2.1, é composto pelos dados referentes aos anos para os quais foi realizada a modelagem e serão utilizados na comparação com os resultados da mesma, para determinar qual o melhor horário a ser estudado. O segundo banco de dados, que será exposto na seção 3.2.2, será utilizado para verificar se o parâmetro foF2 apresenta o comportamento previsto pela modelagem.

3.2.1 Dados de foF2 e hmF2 para os anos escolhidos

Este primeiro banco de dados que será apresentado aqui é composto por dados de hmF2 e foF2 para as 24 horas dos dias escolhidos. Após aplicar os critérios de sazonalidade (relativo ao mês) e atividade geomagnética, foi aplicado a estes dados o critério de atividade solar.

Assim, foram obtidos dois grupos: um de atividade solar baixa, que contém os dias cujo $F10.7$ tem valor entre 68,0 e 73,0; e um de atividade solar alta, que contém os dias cujo $F10.7$ tem valor entre 150,0 e 180,0. Para o grupo de atividade solar baixa foram escolhidos então os anos de 1986, 1996 e 2006; e para o de atividade solar alta, os anos de 1978, 1989 e 2002. Na Figura 3.2 pode-se ver que os anos escolhidos estão distribuídos em três ciclos solares, envolvendo três décadas.

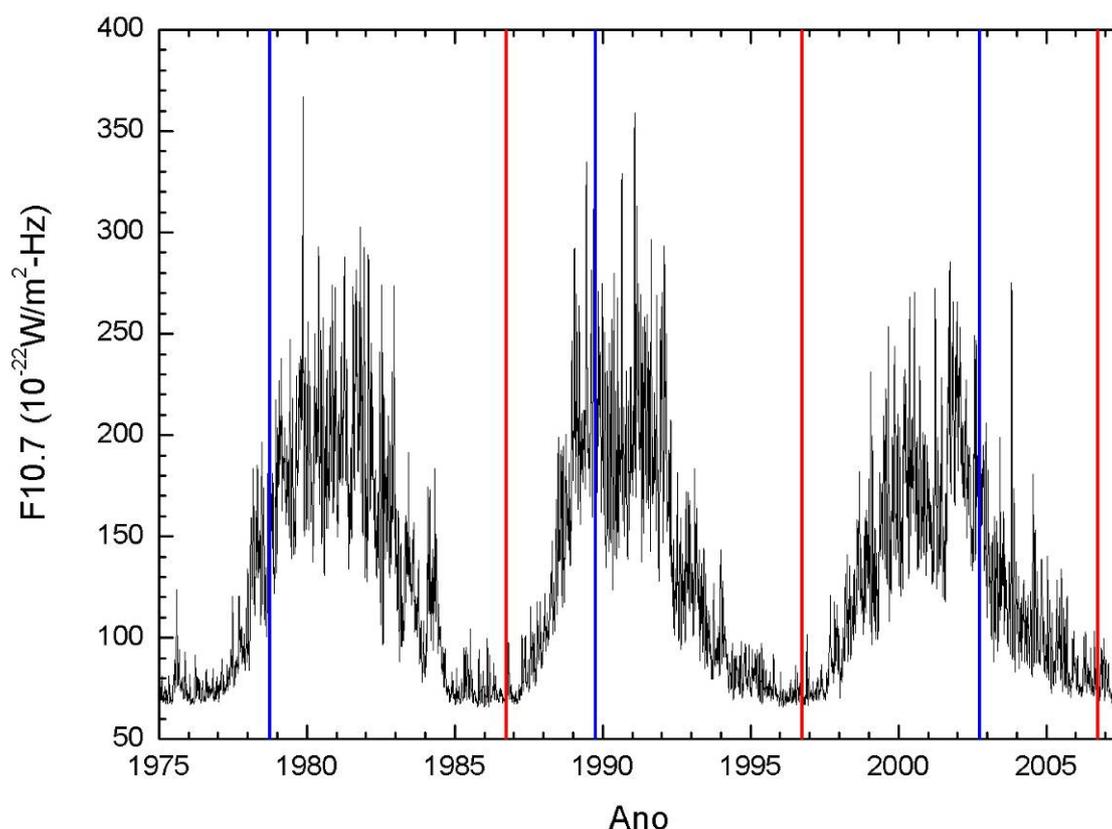


Figura 3.2 – Ciclos solares a que pertencem os dados utilizados neste trabalho. As linhas verticais vermelhas marcam os anos de atividade solar baixa e as azuis, os anos de atividade solar alta.

Para cada um dos anos foram selecionados os três dias mais calmos do mês de setembro ou de outubro, cujo valor do índice $F10.7$ estivesse contido nos intervalos já mencionados anteriormente. Foram avaliadas a frequência crítica da região F ($foF2$) e a altura correspondente a esta frequência ($hmF2$). Também foram feitas as médias aritméticas destes parâmetros para os três dias escolhidos de cada ano, que serão comparadas com os resultados do modelo SUPIM para o estudo dos efeitos da variação secular. A Tabela 3.1 fornece informações sobre os dados selecionados e as Figuras 3.3 e 3.4 mostram os dados dos grupos de atividade solar baixa e atividade solar alta, respectivamente.

Tabela 3.1 – Informações sobre os dias escolhidos para o estudo.

Dia	ΣK_p	A_p	F10.7
15/09/1978	5 ₊	3	152,6
18/09/1978	5 _.	3	169,3
19/09/1978	2 ₀	2	168,8
09/09/1986	11 ₊	6	69,4
10/09/1986	12	6	69,3
22/09/1986	8 _.	4	68,3
20/09/1989	12 ₊	6	173,1
23/09/1989	9 ₀		157,5
25/09/1989	10 _.	5	166,8
05/09/1996	13 _.	6	71,4
06/09/1996	11 ₊	5	70,8
30/09/1996	8 ₀	4	69,7
11/10/2002	13 ₊	6	178,0
12/10/2002	12 ₊	6	179,7
13/10/2002	11 ₀	5	178,3
20/09/2006	7 _.	3	71,5
21/09/2006	5 ₀	3	72,0
27/09/2006	6 ₀	3	72,4

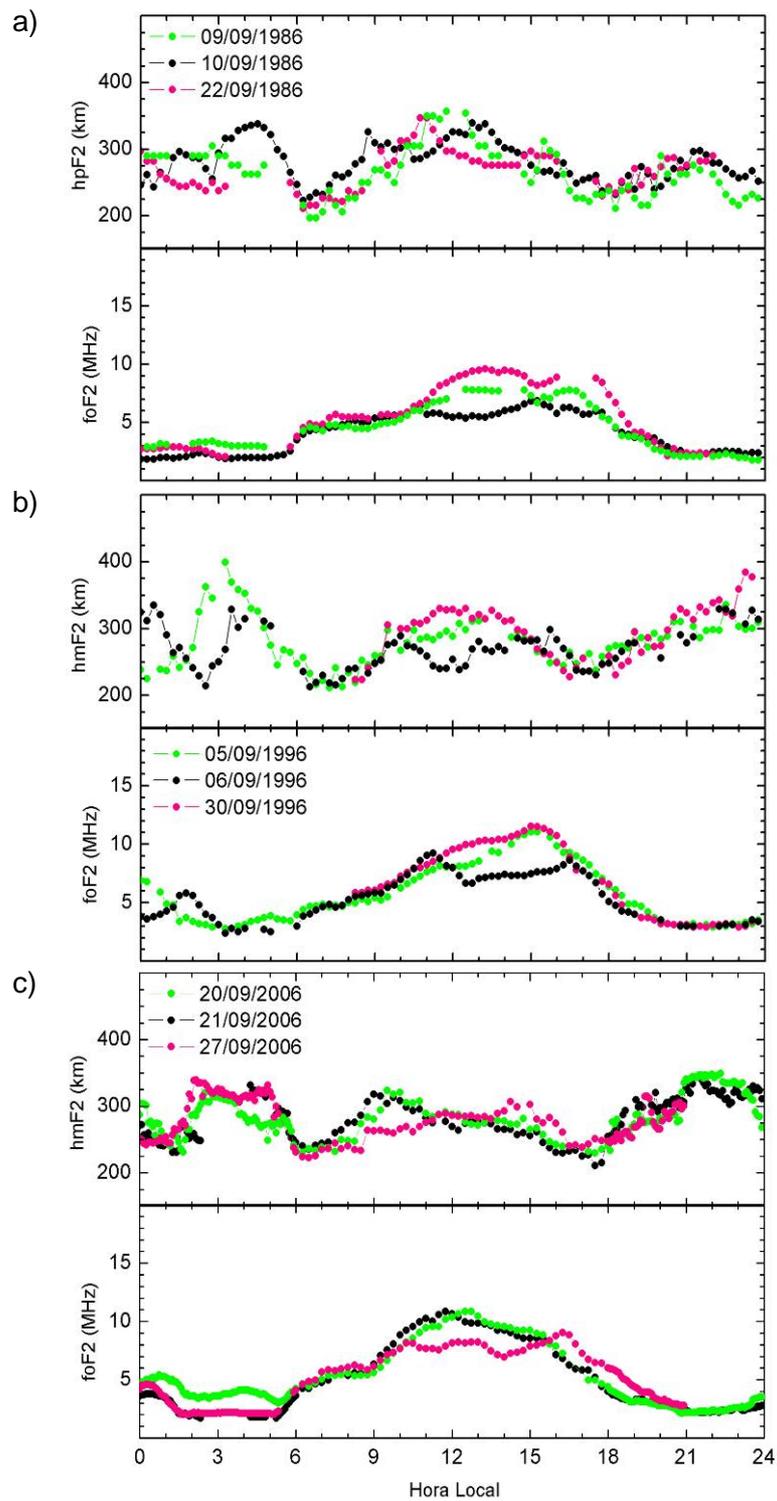


Figura 3.3 – Superposição dos parâmetros $foF2$ e $hmF2$ em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista, para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996 e c) 2006.

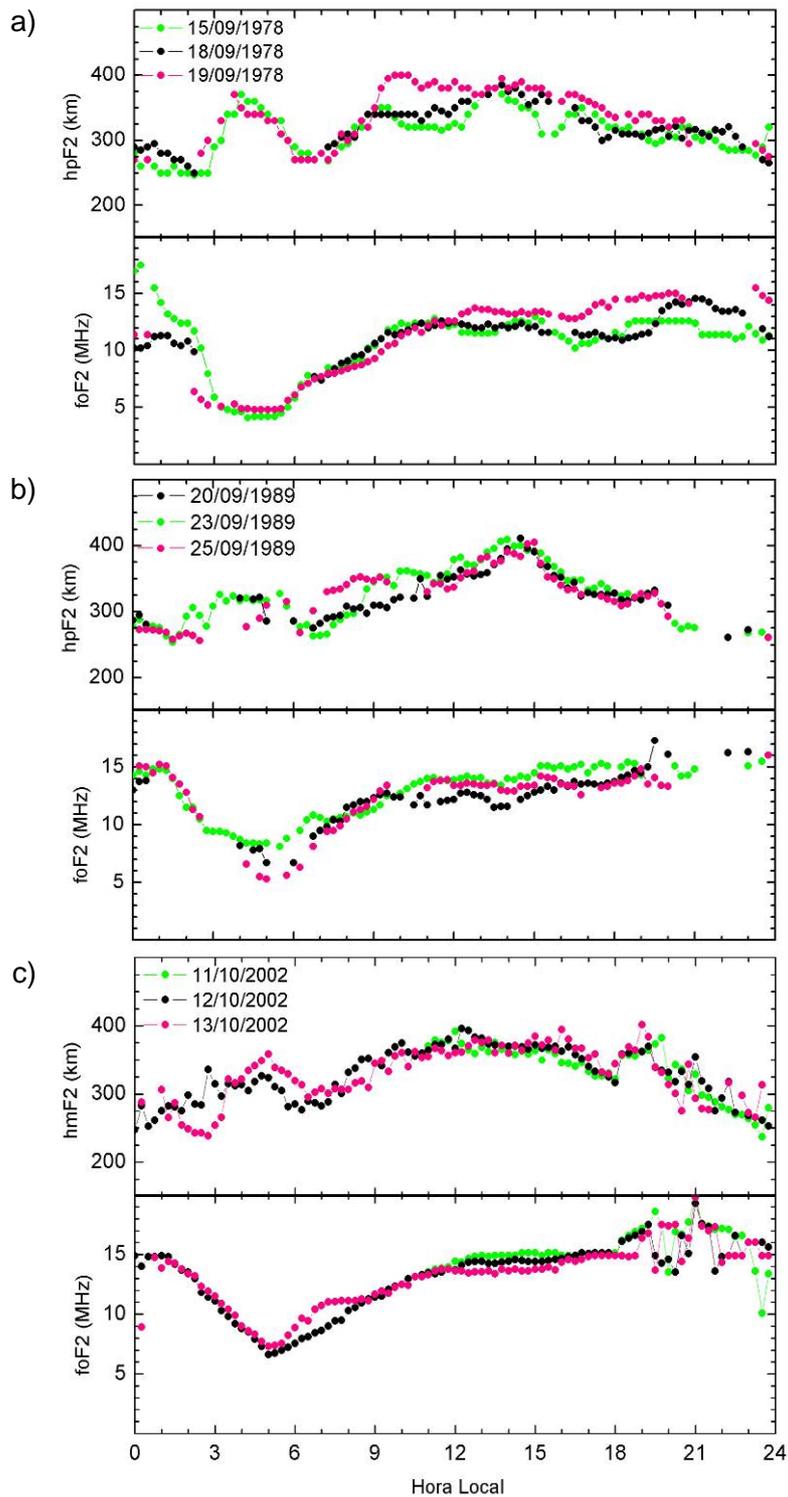


Figura 3.4 – Superposição dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista, para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989 e c) 2002.

Para os anos de atividade solar baixa, pode-se notar que o parâmetro foF2 apresenta uma variação dia-a-dia que é mais intensa entre 1000 LT e 1800 LT. Já o parâmetro hmF2 sofre grandes variações durante o dia, mas é possível observar similaridade entre os dias apresentados.

Pode-se observar que, para atividade solar alta, o parâmetro foF2 apresenta comportamento similar para os três anos, tendo um decréscimo em seu valor entre os horários de 0000 LT e 0500 LT, e aumentando a partir deste horário. Para os anos de 1978 e 1989 não há dados de hmF2, mas de hpF2, que pode ser considerado uma aproximação para o hmF2. Concluiu-se que há uma variabilidade dia-dia para os parâmetros observados, sendo mais explícita para o foF2, tanto para atividade solar alta quanto para atividade solar baixa, principalmente a partir das 1800 LT.

A Figura 3.5 mostra as médias aritméticas dos três dias escolhidos para os dois grupos de dados que serão utilizadas para estudar os efeitos da variação secular do campo geomagnético sobre a ionosfera de baixas latitudes através de comparações com os resultados do modelo SUPIM, conforme será apresentado no Capítulo 5.

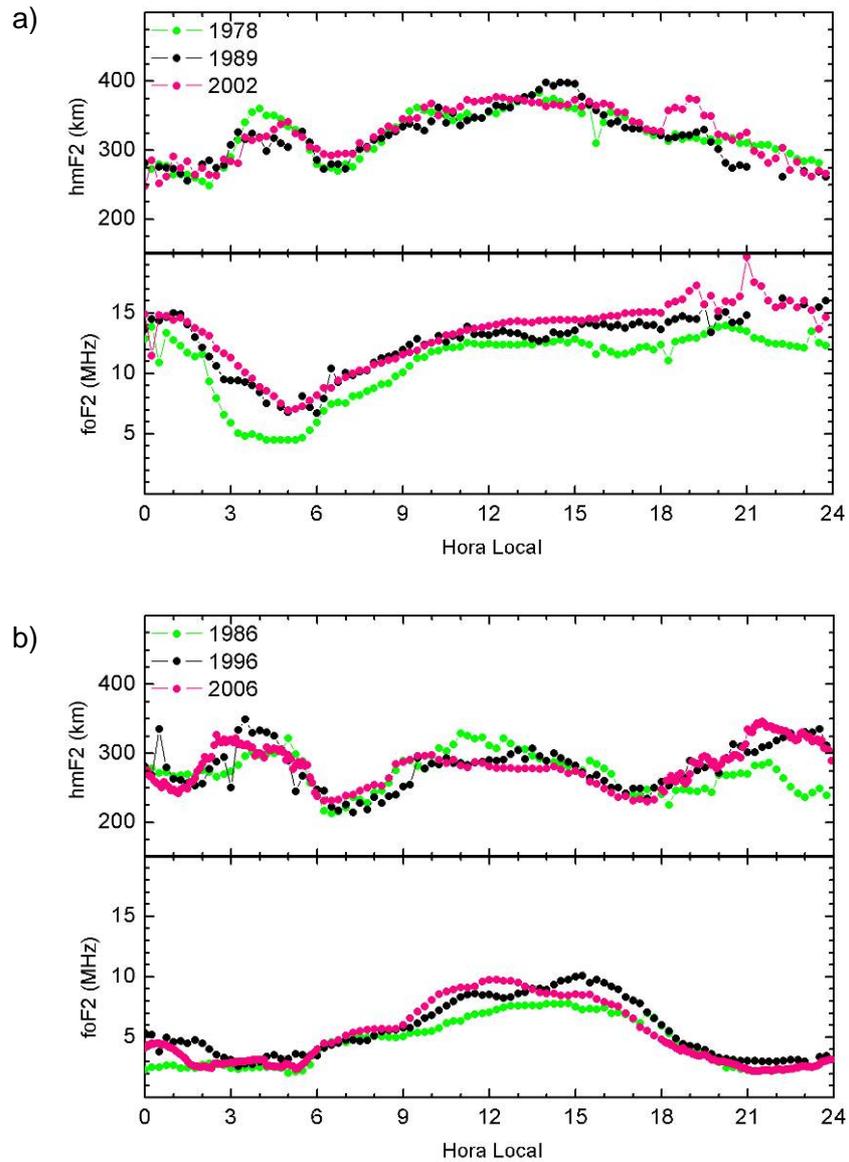


Figura 3.5 – Médias dos parâmetros foF2 e hmF2 em função da hora local, registrados em Cachoeira Paulista para: a) atividade solar alta; e b) atividade solar baixa.

3.2.2 Dados de foF2 para o período de 1973 a 2006

O segundo banco de dados utilizado neste trabalho é composto pelos dados referentes ao parâmetro foF2, para o horário de 1800 LT, pertencentes aos anos de 1973 a 2006. Neste caso, o critério de sazonalidade foi ampliado, passando a incluir os meses de março e abril. Então foi aplicado o critério de atividade geomagnética descrito anteriormente.

Ao aplicar o critério de atividade solar, foram obtidos novamente dois grupos, que abrangem uma faixa mais extensa do índice $F10.7$ do que as obtidas para os dois grupos do primeiro banco de dados. Assim, tem-se o primeiro grupo, de atividade solar baixa, que contém os dias cujo índice $F10.7$ está compreendido entre 60 e 110; e o segundo grupo, de atividade solar alta, que contém os dias cujo índice $F10.7$ tem o valor compreendido entre 160 e 210. A Figura 3.6 mostra os dados para os dois grupos deste banco de dados.

É possível observar que os dois grupos apresentados aqui abrangem uma parte maior do intervalo de anos pertencente aos três ciclos solares apresentados na Figura 3.2, enquanto o banco de dados apresentado na Seção anterior utiliza apenas dados de anos específicos.

O ajuste linear obtido para os dois grupos apresenta um comportamento decrescente, sendo mais evidente para o grupo de atividade solar baixa do que para o grupo de atividade solar alta. A equação da reta utilizada no ajuste linear é:

$$f_0F2(t) = At + B; \quad (3.2)$$

onde o parâmetro foF2 é uma função do tempo, neste caso expresso em anos. Assim, na tabela 3.2 tem-se os valores dos coeficientes A e B para os grupos de atividade solar baixa e de atividade alta e na Figura 3.6, os dados e seus respectivos ajustes lineares.

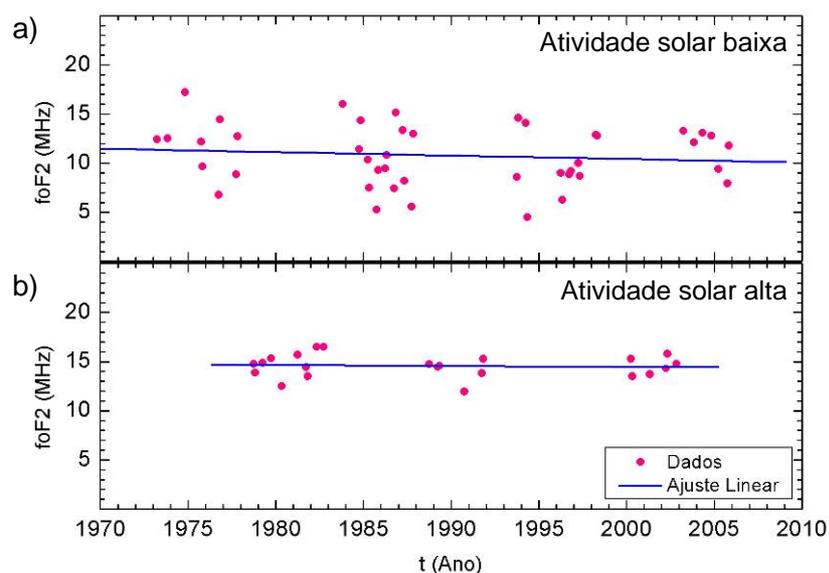


Figura 3.6 – Dados de foF2 para as 1800 LT, obtidos em Cachoeira Paulista, no período de 1973 a 2006, para os grupos de: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. O ajuste linear para cada um dos grupos é dado pela curva em azul.

O comportamento decrescente observado pode ser associado à influência exercida pela variação secular do equador geomagnético sobre a Anomalia Equatorial de Ionização. Tal influência faz com que a Anomalia Equatorial de Ionização apresente um deslocamento em coordenadas geográficas ao longo dos anos, o que gera mudança no valor do parâmetro foF2 no caso de Cachoeira Paulista, já que a crista sul da Anomalia Equatorial de Ionização está deixando a região, como será visto no Capítulo 4.

Tabela 3.2 – Coeficientes da reta utilizada no ajuste dos dados.

Coeficientes	Atividade Solar Baixa	Atividade Solar Alta
A (MHz/ano)	-0,03	-0,01
B (MHz)	79,92	33,85

4 MODELAGEM

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da modelagem. Primeiramente serão expostos os resultados relativos aos estudos dos efeitos causados pela deriva vertical eletromagnética e pelos ventos neutros sobre a Anomalia Equatorial de Ionização. Em seguida, serão apresentados os resultados da modelagem cujos parâmetros de entrada foram fixados com o objetivo de evidenciar os efeitos da variação secular sobre a Anomalia Equatorial de Ionização.

4.1 Efeitos da deriva vertical eletromagnética sobre a Anomalia Equatorial de Ionização

Um dos fatores importantes para o comportamento da ionosfera equatorial e de baixas latitudes é a deriva vertical eletromagnética (SOUZA et al., 2000), que origina o Efeito Fonte, influenciando assim o desenvolvimento da Anomalia Equatorial de Ionização. Nesta Seção será apresentado o estudo teórico realizado a partir dos resultados do modelo SUPIM sobre os efeitos da deriva vertical eletromagnética sobre a Anomalia Equatorial de Ionização.

Para realizar este estudo, utilizaram-se dois modelos diferentes para a deriva vertical eletromagnética:

- a) Modelo D1: utiliza valores de deriva vertical eletromagnética obtidos para o dia 21 de setembro de 2002, que pertence a um período de atividade solar alta;
- b) Modelo D2: utiliza valores de deriva vertical eletromagnética calculados para o dia 21 de setembro de 2006, que pertence a um período de atividade solar baixa.

A Figura 4.1 mostra a velocidade de deriva vertical eletromagnética para os dois modelos utilizados, em função da hora local, sobre o equador geomagnético.

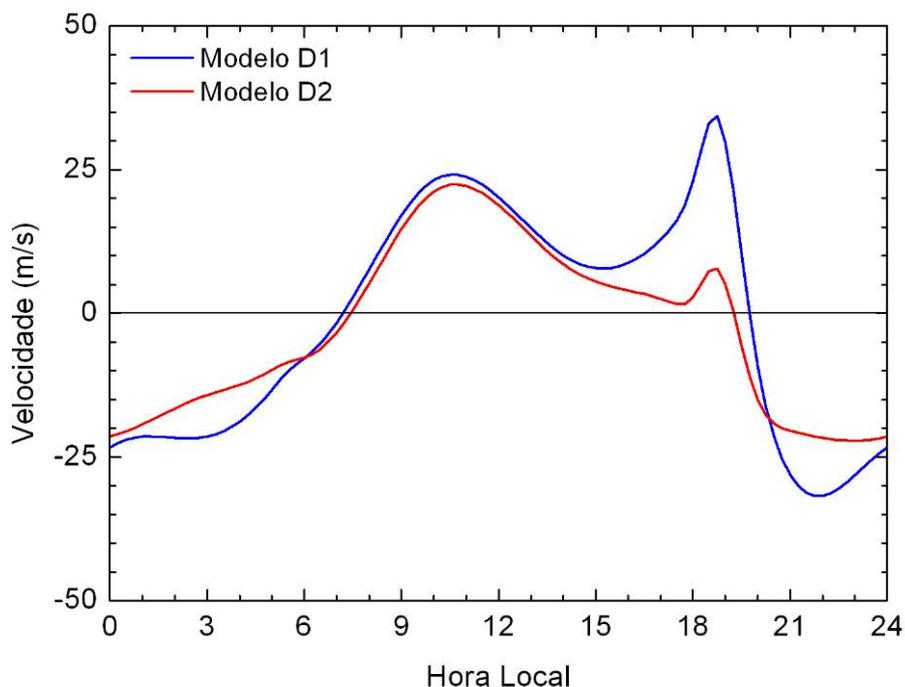


Figura 4.1 – Modelos D1 e D2 para deriva vertical eletromagnética. Aqui os valores negativos indicam deriva vertical eletromagnética para baixo e os positivos, para cima.

Como pode ser observado, a intensidade da deriva vertical eletromagnética mostrada na Figura 4.1 apresenta comportamento similar para os dois modelos entre os horários de 0600 LT e 1400 LT, sendo intensificada para cima a partir deste horário para o modelo D1. Entre 2030 LT e 0600 LT o modelo D1 apresenta uma intensificação para baixo com relação ao modelo D2. Foram utilizados os dois modelos de deriva vertical eletromagnética para que se pudesse observar como a mudança na intensidade da deriva vertical eletromagnética influencia na manutenção da Anomalia Equatorial de Ionização.

Foram feitas duas modelagens para o dia 21 de setembro de 2002: a primeira utilizou o modelo D1 e a segunda, o modelo D2. O mesmo procedimento foi realizado para o dia 21 de setembro de 2006. Os resultados para as duas modelagens do dia 21 de setembro de 2002 e 21 de setembro de 2006, às 2000 LT são apresentados na Figura 4.2 e 4.3, respectivamente.

Nos resultados mostrados na Figura 4.2a nota-se claramente a presença das duas cristas (norte e sul), sendo que a crista norte apresenta maior intensidade. Nota-se também que a região entre as duas cristas, denominada calha da Anomalia Equatorial de Ionização, está fortemente definida. Além disso, a Anomalia Equatorial de Ionização atinge grandes altitudes e abrange um amplo intervalo de latitude. Já na Figura 4.2b pode-se ver que a Anomalia Equatorial de Ionização exibe apenas uma das duas cristas e que a sua intensidade é menor do que a observada na Figura 4.2a, além de uma extensa região contínua, delimitada pela isolinha de 12 MHz, indicando baixa variação latitudinal da frequência. Não há formação muito bem delimitada da calha e a Anomalia Equatorial de Ionização atinge altitudes menores, tendo sua extensão em latitude reduzida com relação à Figura 4.2a.

Observa-se, ao comparar as Figuras 4.2a e 4.2b, que o aumento na intensidade da deriva eletromagnética intensifica apenas a frequência da região interna às cristas, não alterando as frequências externas às cristas, apresentadas pela Anomalia Equatorial de Ionização como um todo.

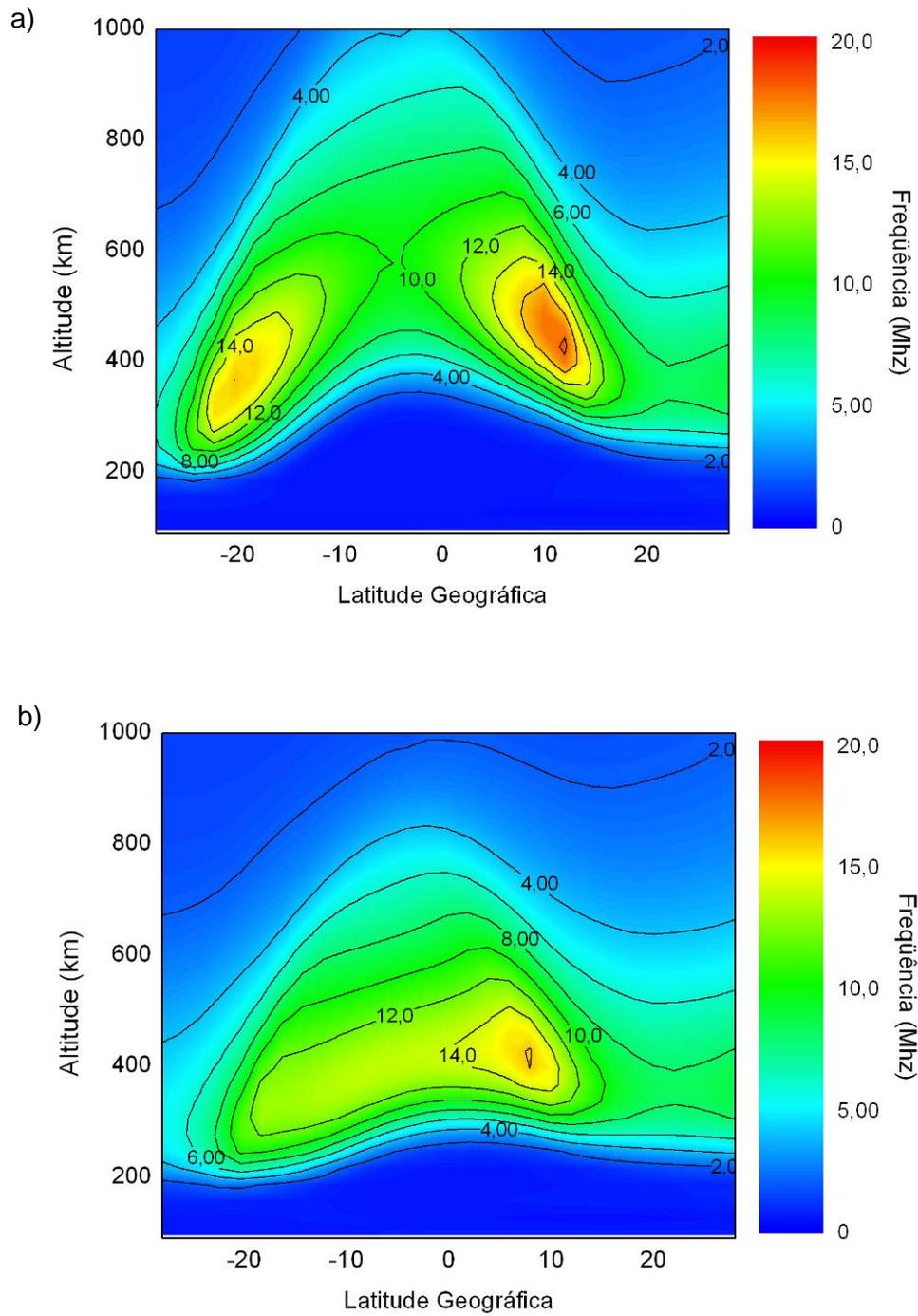


Figura 4.2 – Distribuição latitudinal da freqüência de plasma, às 2000 LT, para o dia 21 de setembro de 2002, usando: a) modelo D1; e b) modelo D2.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados da simulação para o dia 21 de setembro de 2006, às 2000 LT, usando os modelos de deriva D1 e D2. Pode-se observar as mesmas características da Figura 4.3, porém, por tratar-se de um dia de atividade solar baixa, as frequências apresentam valores menores.

Os resultados mostram que, conforme esperado, o aumento na intensidade da deriva vertical eletromagnética intensifica o Efeito Fonte, fazendo com que o plasma atinja maiores altitudes e latitudes. Como consequência disso, ocorre um aumento do depósito de plasma nas regiões das cristas, tornando a região da calha mais acentuada. O inverso ocorre quando a intensidade da deriva vertical eletromagnética diminui: o efeito fonte é menos intenso, fazendo com que o plasma atinja menores altitudes e se deposite em latitudes mais próximas do equador geomagnético, fazendo com que a calha não se forme.

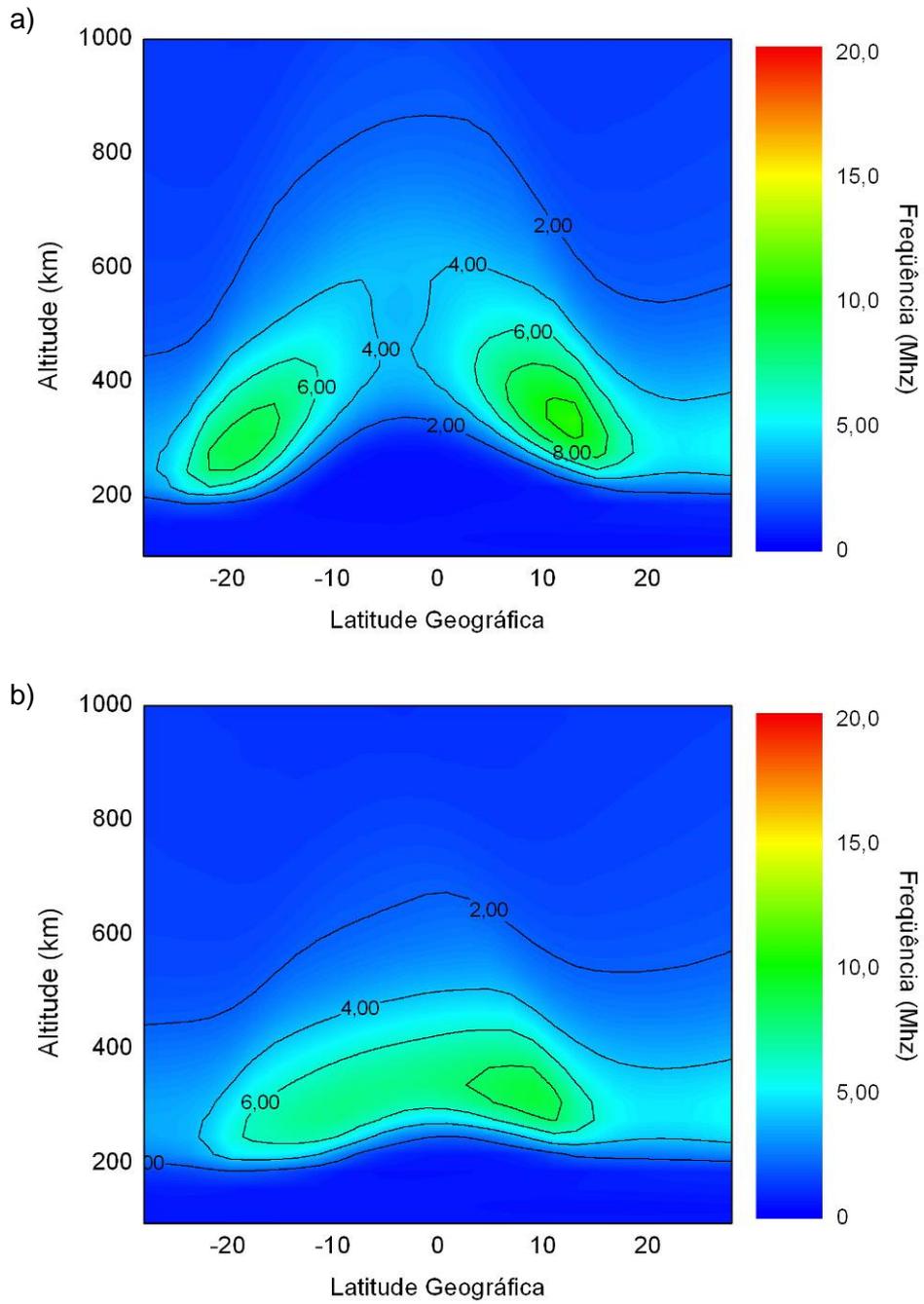


Figura 4.3 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma, às 2000 LT, para o dia 21 de setembro de 2006, usando: a) modelo D1; e b) modelo D2.

4.2 Efeitos dos ventos neutros sobre a Anomalia Equatorial de Ionização

Os ventos termosféricos podem gerar movimento do plasma ao longo do meridiano magnético, contribuindo para um desenvolvimento assimétrico da Anomalia Equatorial de Ionização (SOUZA et al., 2000). Nesta Seção será apresentado um estudo realizado a partir dos resultados do modelo SUPIM sobre os efeitos causados pelos ventos neutros na distribuição latitudinal da frequência de plasma da ionosfera de baixas e médias latitudes.

Neste estudo foram realizadas duas modelagens, similares ao caso da deriva vertical eletromagnética: a primeira, para o dia 21 de setembro de 2002; e a segunda, para o dia 21 de setembro de 2006. O primeiro pertence a um ano de atividade solar alta e o segundo, a um ano de atividade solar baixa.

Será utilizada aqui a distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro para os horários de 0000 LT, 0600 LT, 0800 LT, 1200 LT, 1500 LT, 1700 LT, 1900 LT e 2100 LT. Para verificar os efeitos causados pelo vento neutro sobre a Anomalia Equatorial de Ionização serão utilizadas também as distribuições latitudinais da frequência de plasma para os horários citados acima. Na Figura 4.4 tem-se a distribuição latitudinal da velocidade do vento obtida para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002, em função da altitude para os horários citados; e na Figura 4.5, a distribuição latitudinal da frequência de plasma, nos mesmos horários.

Tomando como referência a altitude de 300 km, onde o vento exerce importante papel na formação da Anomalia Equatorial de Ionização, nota-se que o vento neutro apresenta velocidade negativa (isto é, sopra para o sul) às 0000 LT, sendo de -45 m/s para a latitude de 20° e -15 m/s para a latitude de -20° . Às 0600 LT, o vento passa a ter velocidade positiva (para o norte), apresentando velocidade nula em 20° e intensidade de 15 m/s em -20° . Às 0800 LT, a velocidade do vento é positiva, apresentando intensidade em torno de 15 m/s. Para o horário de 1200 LT a velocidade é positiva no hemisfério norte, tendo seu maior valor em torno de 37,5 m/s, enquanto no hemisfério sul

apresenta valores negativos, compreendidos entre -12 e -15 m/s. Entre 1500 e 1700 LT, o vento continua com sentidos opostos em latitudes maiores. Entre 1900 e 2100 LT o vento apresenta velocidade negativa nos dois hemisférios, sendo mais intensa no sul às 1900 LT.

Na Figura 4.5 observa-se as distribuições latitudinais da frequência de plasma para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002 para os mesmos horários já apresentados na Figura 4.4. Às 0000 LT pode-se ver que a Anomalia Equatorial de Ionização ainda existe. Também observa-se apenas a presença da crista norte. Entre 0600 e 0800 LT não há formação da Anomalia Equatorial de Ionização. Para o horário de 1200 LT pode-se ver que a Anomalia Equatorial de Ionização já está bem desenvolvida, apresentando agora as duas cristas (delimitadas pelas isolinhas de 14 MHz), sendo que a crista norte tem menor extensão em latitude do que a crista sul.

Às 1500 LT observa-se que a crista norte diminuiu sua extensão em latitude e que a crista sul apresenta maior intensidade, além de se estender até altitudes próximas de 500 km. Às 1700 LT as cristas se apresentam menos intensas, sendo que a crista sul teve sua extensão em latitude e altitude reduzida. Às 1900 LT a crista sul apresenta menor intensidade de frequência, estendendo-se entre 300 e 500 km de altitude; já a crista norte tem sua intensidade mantida, estendendo-se agora entre 300 e 600 km de altitude. Às 2100 LT observa-se uma grande redução na intensidade da crista sul, além da redução de suas dimensões (em altitude e latitude). Neste horário a crista norte também apresenta redução em sua extensão em altitude, mas sua intensidade aumenta bastante.

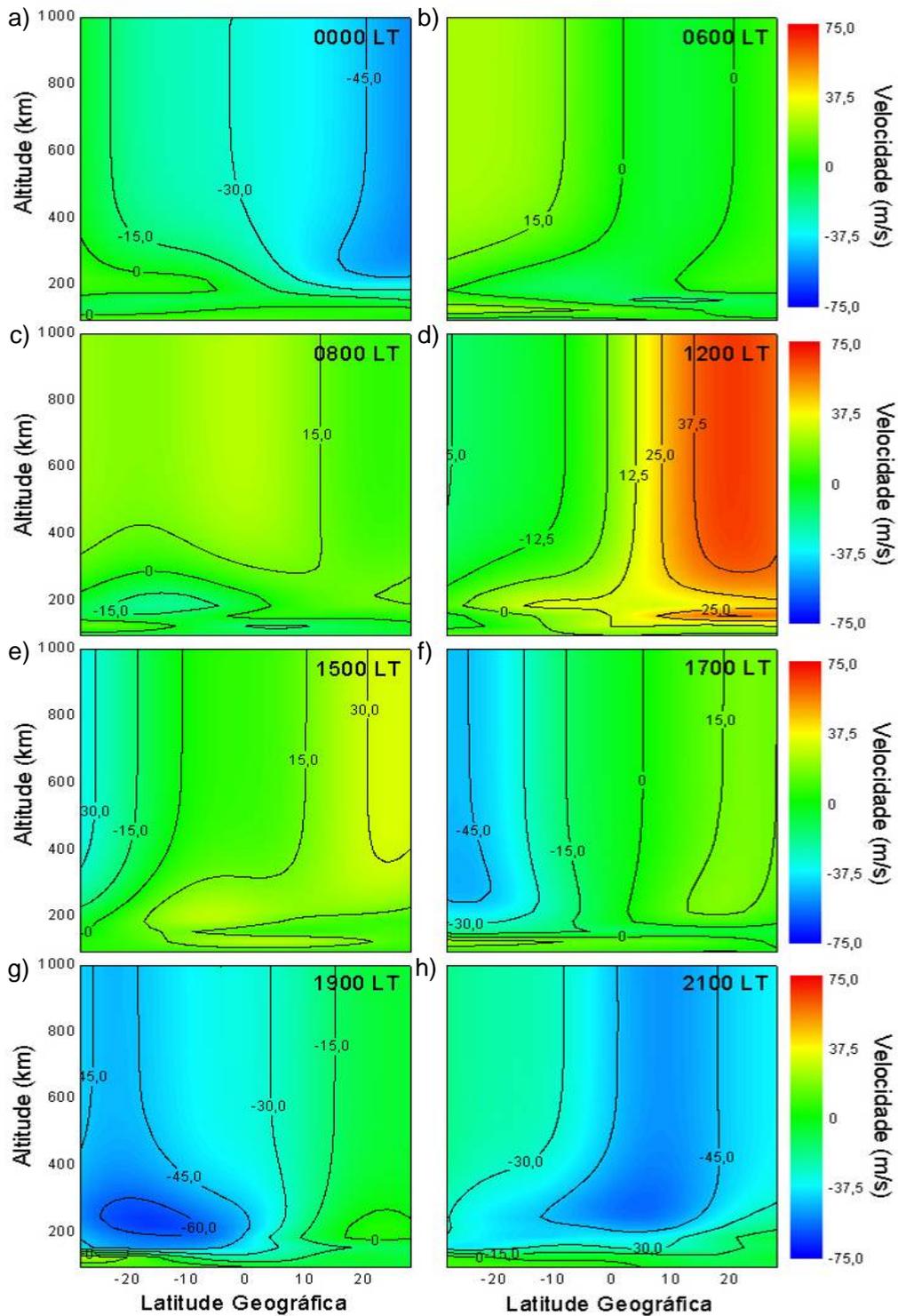


Figura 4.4 – Distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002, nos horários de: a) 0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.

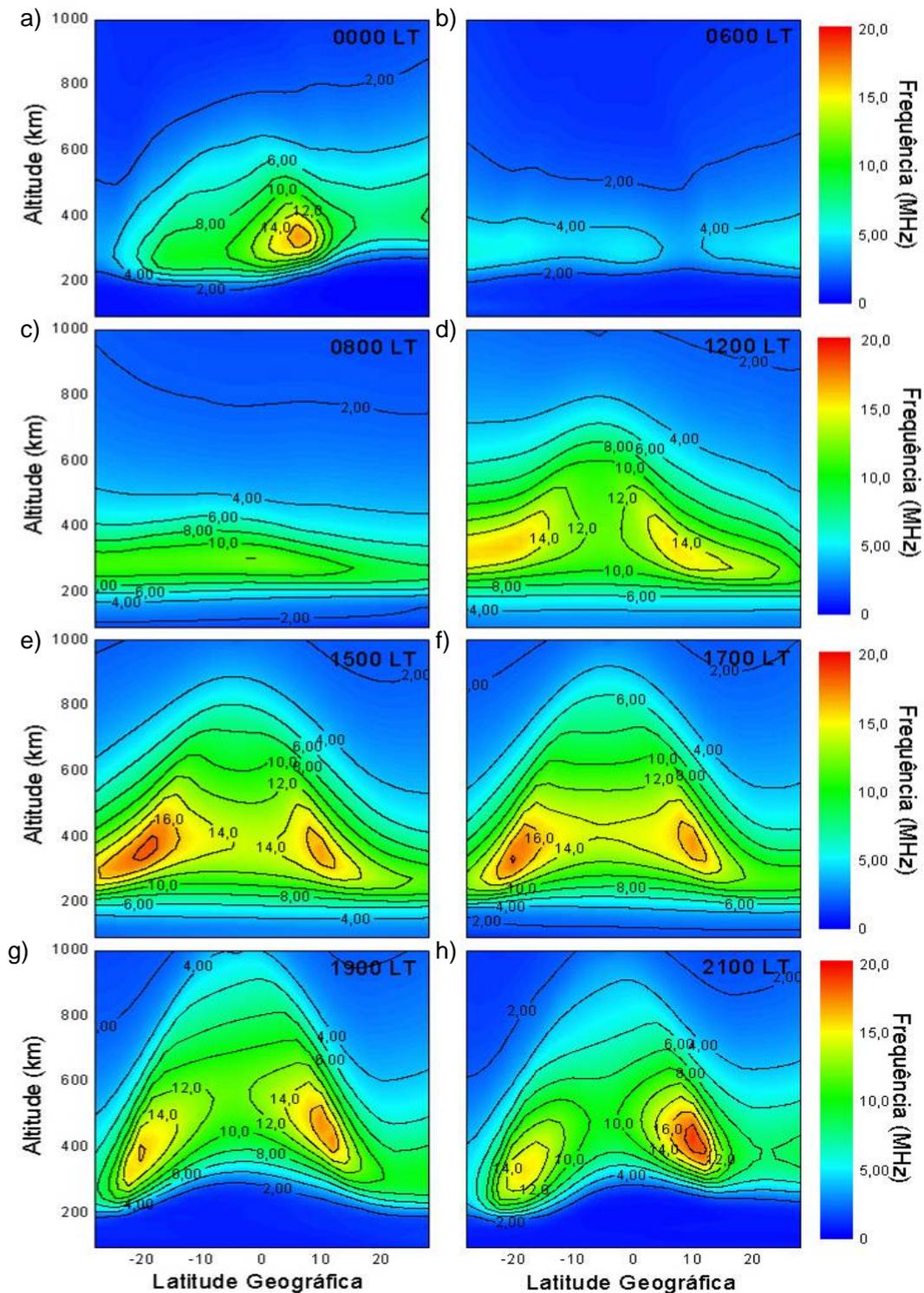


Figura 4.5 – Distribuição latitudinal de plasma para a modelagem do dia 21 de setembro de 2002, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.

Como já foi dito, a ação dos ventos é responsável por causar assimetrias na estrutura da Anomalia Equatorial de Ionização. Além do transporte inter-hemisférico de plasma, também ocorrem efeitos devido à ação conjunta dos ventos e dos processos de recombinação. Por exemplo, um vento trans-equatorial soprando para o sul causará elevação do plasma no hemisfério norte e abaixamento no hemisfério sul. Conseqüentemente o plasma do hemisfério norte estará em altitudes onde a recombinação é menor, enquanto no hemisfério sul estará em altitudes menores, onde há mais recombinação. Portanto, a densidade e a altitude da crista no hemisfério norte serão maiores do que a observada para a crista do hemisfério sul.

Também podem ocorrer efeitos relativos, ou seja, no caso de ventos divergentes (que sopram do equador para os pólos): no hemisfério onde o vento é mais forte, o abaixamento e o decréscimo de plasma serão maiores do que no hemisfério oposto; resultando em abaixamento de um lado e elevação no outro. Todos estes efeitos são claramente vistos na Figura 4.5. Nestes casos observa-se também que esta ação não surte efeito imediatamente. São necessárias algumas horas para que haja uma resposta da ionosfera à ação destes ventos. Por exemplo, pode-se ver na Figura 4.5 que após 1500 LT o vento inverte sua distribuição latitudinal, ou seja, torna-se mais intenso e negativo no hemisfério sul, porém, os efeitos do abaixamento (levantamento) e decréscimo (aumento) de plasma no hemisfério sul (hemisfério norte) são vistos apenas a partir das 1900 LT.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 tem-se a distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro e da freqüência de plasma, respectivamente, para a modelagem do dia 21 de setembro de 2006. Observa-se na Figura 4.6 que, principalmente no que diz respeito ao sentido, os ventos apresentam características semelhantes ao caso de atividade solar alta, conforme esperado, pois se trata da mesma estação do ano. Conseqüentemente, a resposta ionosférica à ação dos ventos também é semelhante, exceto para a dissipação da crista sul, que aqui ocorre muito mais cedo, em torno de 1900 LT. Isto pode ser causado pelo baixo valor

da deriva vertical eletromagnética do pico pré-inversão e também pelo baixo valor da densidade do plasma durante o período de atividade solar baixa.

De fato, constata-se que, para ambos os casos de atividade solar e, após as 1800 LT, o vento direcionado para o sul transportou o plasma ao longo das linhas de campo geomagnético, elevando-o no hemisfério norte e abaixando-o no hemisfério sul. Dessa forma, como houve maior recombinação no hemisfério sul, a crista desapareceu mais rápido neste hemisfério do que no hemisfério norte.

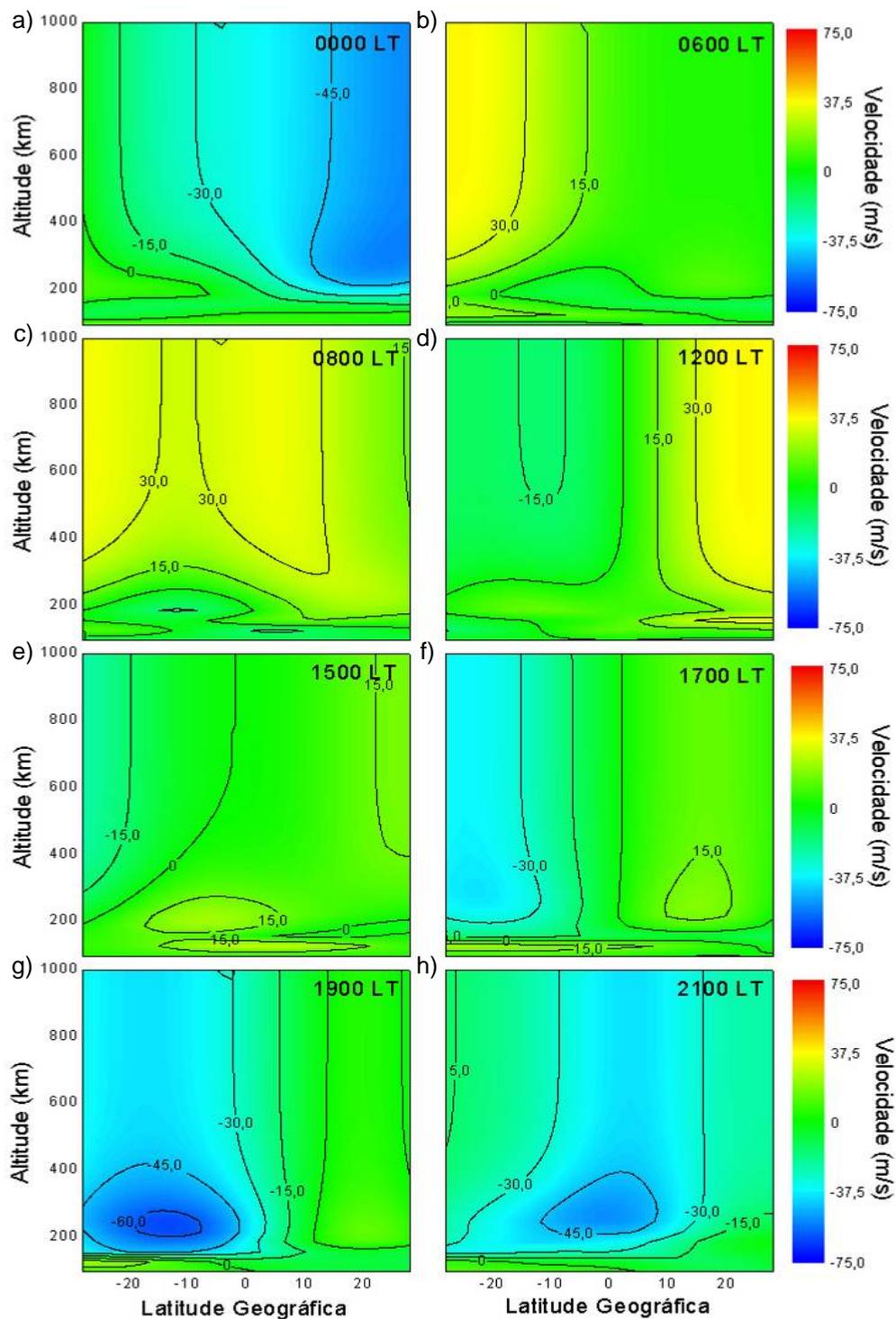


Figura 4.6 – Distribuição latitudinal da velocidade do vento neutro para a modelagem do dia 21 de setembro de 2006, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.

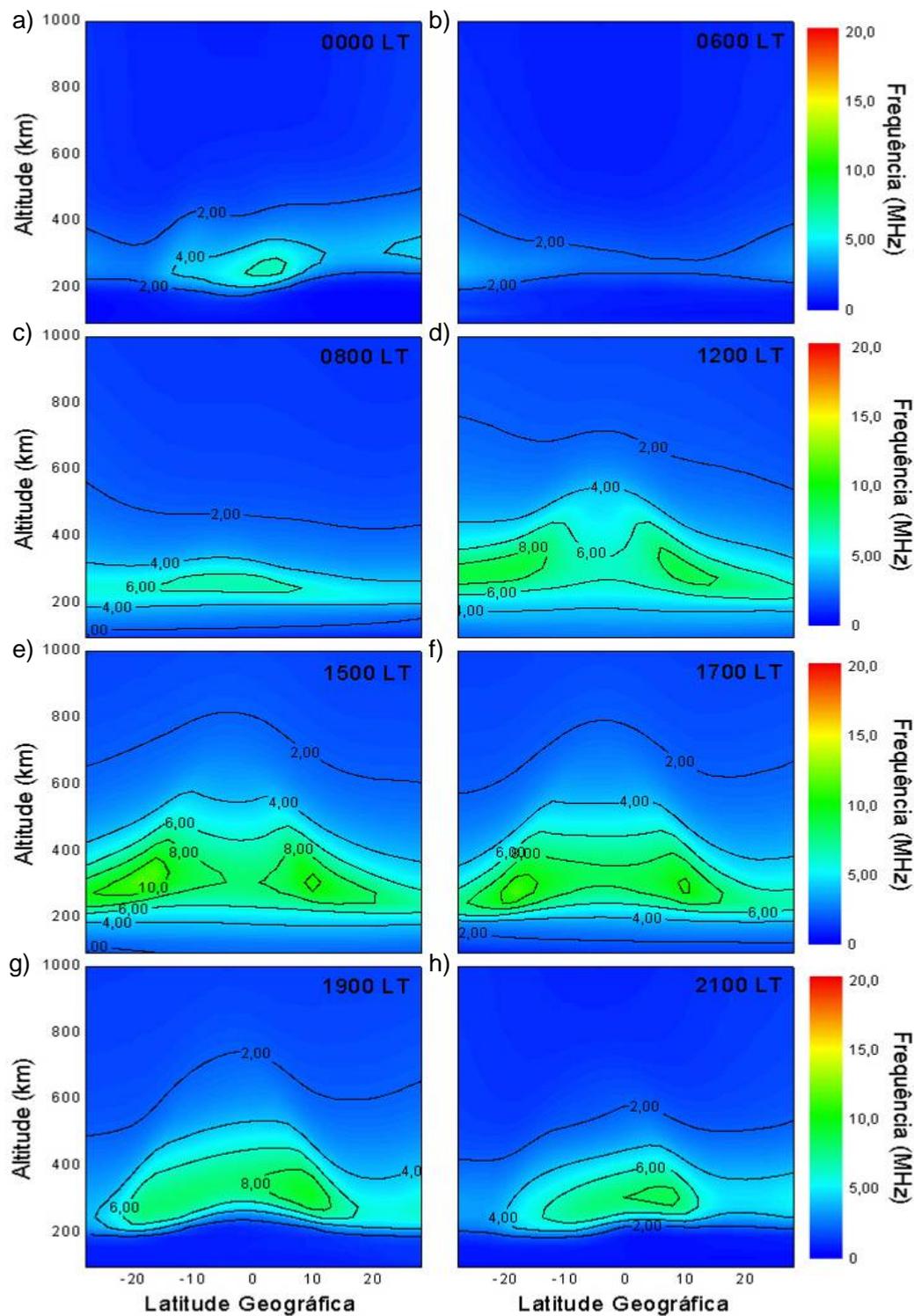


Figura 4.7 – Distribuição latitudinal de plasma para a modelagem do dia 21 de setembro de 2006, para os horários de: a).0000 LT; b) 0600 LT; c) 0800 LT; d) 1200 LT; e) 1500 LT; f) 1700 LT; g) 1900 LT; e h) 2100 LT.

4.3 Efeitos da variação secular sobre a Anomalia Equatorial de Ionização

Nesta Seção serão apresentados os resultados do estudo dos efeitos da variação secular sobre a Anomalia Equatorial de Ionização, obtidos a partir do modelo SUPIM. Como foi descrito no Capítulo 3, dias específicos com características pré-determinadas foram selecionados. Entre estes dias, escolheu-se para ser modelado o dia classificado como o mais calmo. Abaixo serão apresentados os estudos teóricos baseados nas modelagens realizadas.

A motivação inicial deste trabalho foi verificar como a Anomalia Equatorial de Ionização respondia à variação secular do equador geomagnético. Para este estudo foi necessário modificar o formato padrão de saída dos resultados do modelo SUPIM de coordenadas geomagnéticas para coordenadas geográficas. Assim seria possível visualizar se os resultados do modelo mostrariam algum deslocamento da Anomalia Equatorial de Ionização em coordenadas geográficas ao longo dos anos.

Além de fixar os parâmetros já citados no Capítulo 3, foi necessário fazer o mesmo com relação aos ventos e à deriva vertical eletromagnética, fornecidos pelos modelos citados no Capítulo 2, com o objetivo de controlar o maior número possível de parâmetros, evitando assim que eles pudessem causar os efeitos já descritos nas seções anteriores, sobrepondo-se aos efeitos causados pela ação da variação secular.

Na verdade, ao seguir estes critérios, notou-se que havia uma variação significativa na deriva vertical eletromagnética e nos ventos neutros, devido à dependência destes com o fluxo solar e com o dia juliano. Como os dias escolhidos para a modelagem de atividade solar baixa apresentavam valores de $F10.7$ muito próximos, estes foram mantidos na modelagem. Fixou-se apenas o dia juliano utilizado na modelagem, pois o modelo de ventos apresentou uma forte dependência deste parâmetro. Já para o grupo de atividade solar alta, foi necessário fixar também os índices $F10.7$ e A_p , calculando-se uma média a partir dos valores dos três dias escolhidos para a

modelagem. Também foi necessário fixar o dia juliano, pelo mesmo motivo citado anteriormente. Assim, tem-se na Figura 4.8 as derivas verticais eletromagnéticas sobre o equador e na Figura 4.9, o vento efetivo sobre Cachoeira Paulista, que é a projeção dos ventos zonal e meridional geográficos sobre o meridiano geomagnético, para as modelagens realizadas.

Após fixar os parâmetros de entrada utilizados pelo modelo SUPIM, realizou-se a modelagem para os dois grupos de atividade solar. Neste estudo foram utilizados dois resultados fornecidos pelo modelo SUPIM para o horário de 1800 LT. A primeira forma de visualização dos resultados é mostrada nas Figuras 4.10 e 4.11: a distribuição latitudinal da frequência de plasma para os anos de atividade solar baixa e alta, respectivamente, para o horário escolhido.

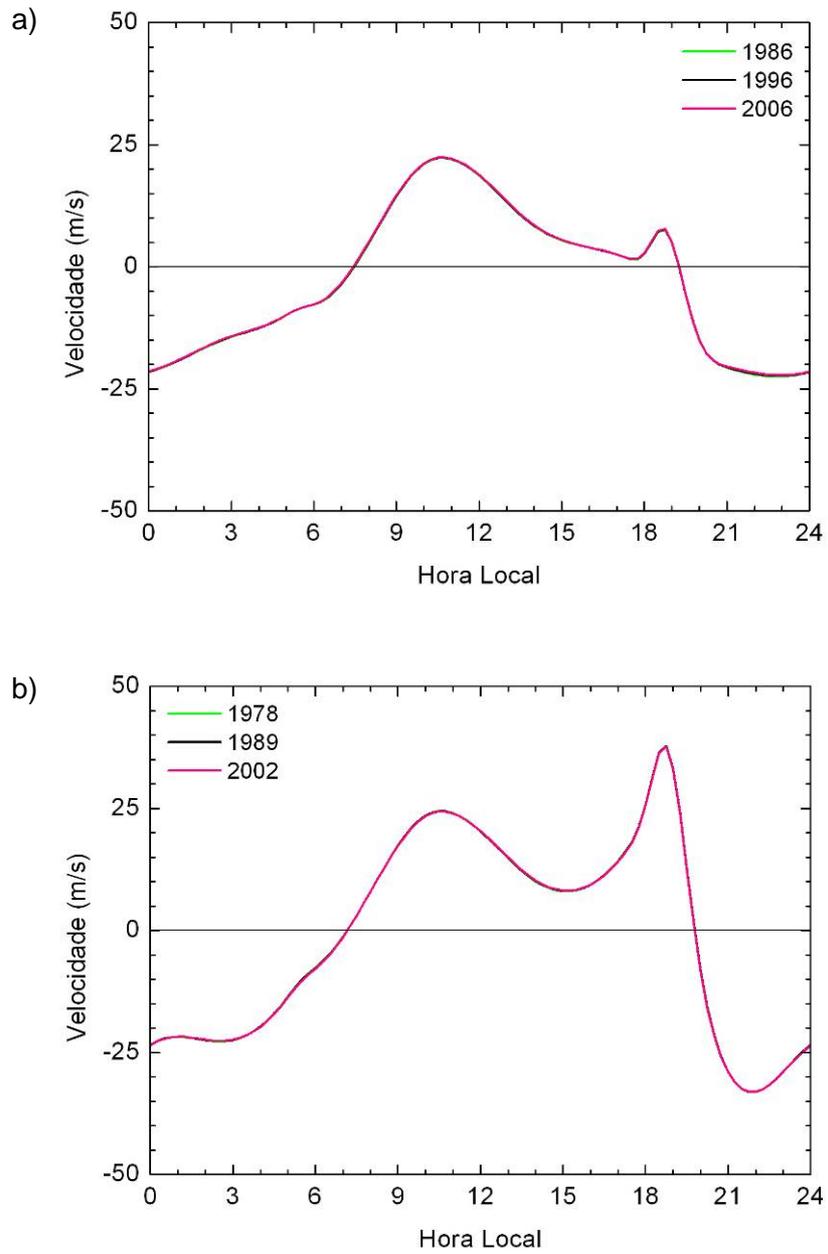


Figura 4.8 – Deriva vertical eletromagnética sobre o equador geomagnético. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.

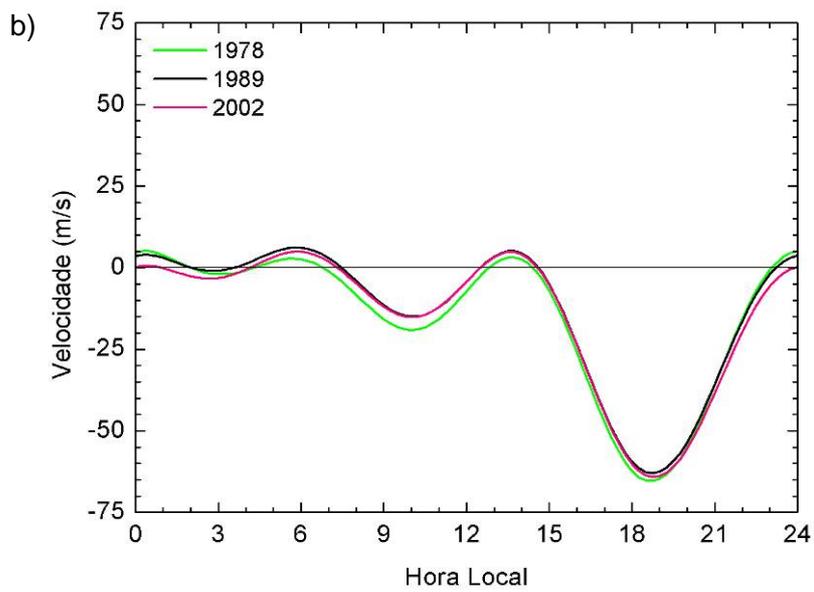
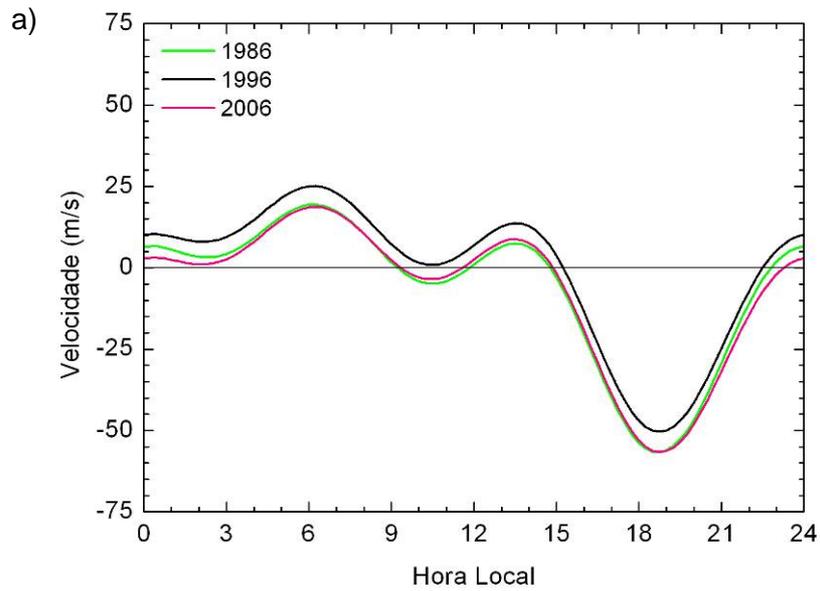


Figura 4.9 – Vento efetivo sobre Cachoeira Paulista em 250 km de altitude. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.

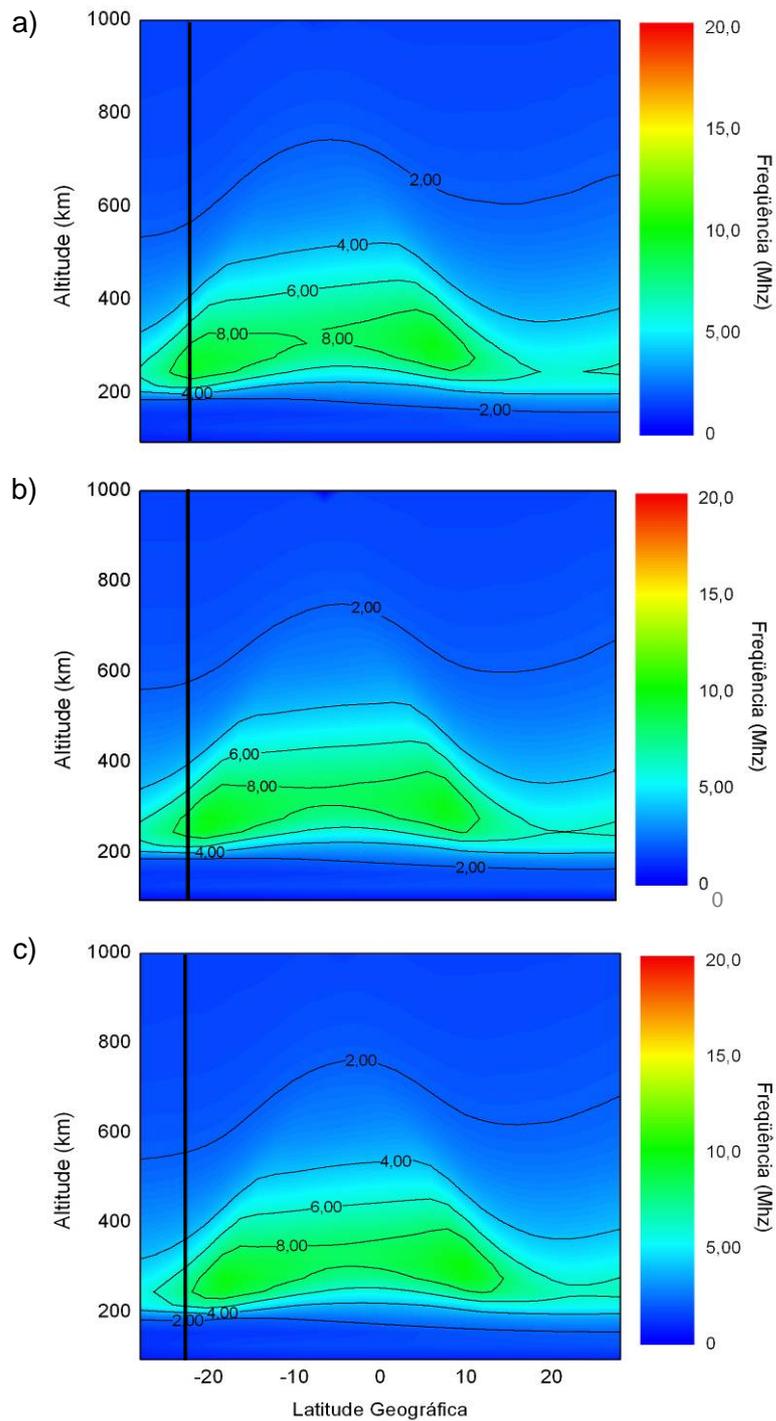


Figura 4.10 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 1800 LT para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

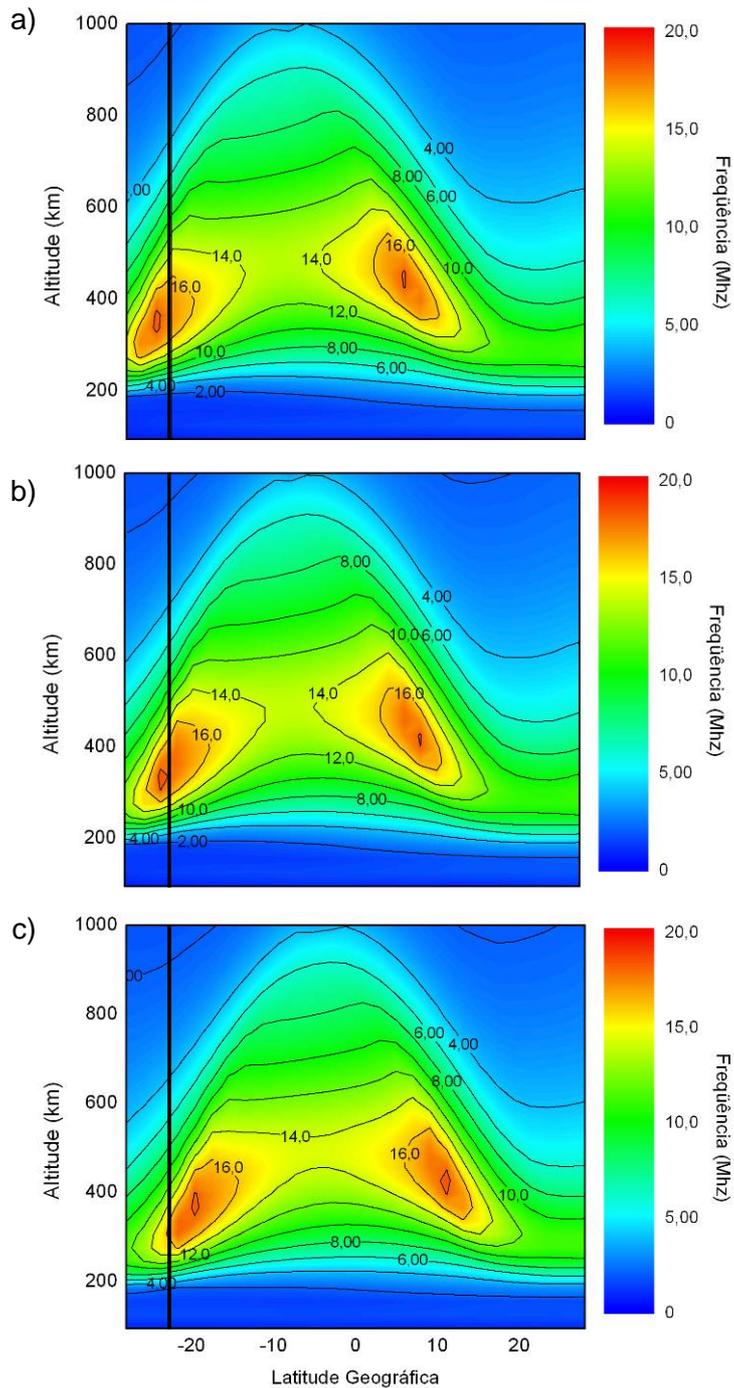


Figura 4.11 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 1800 LT para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

Nota-se na Figura 4.10a, referente ao ano de 1986, que a linha vertical que marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista atravessa o bloco delimitado pela isolinha de 8 MHz, a qual delimita a crista sul da Anomalia Equatorial de Ionização. Na Figura 4.10b, para o ano de 1996, Cachoeira Paulista está no limite inferior deste bloco, ou seja, ao sul da crista e na Figura 4.10c, observa-se que Cachoeira Paulista está mais ao sul, já posicionada fora do bloco que delimita a crista Sul.

O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 4.11, para os anos de atividade solar alta. Em 1978 (Figura 4.11a), Cachoeira Paulista está posicionada ao norte do centro do bloco delimitado pela isolinha de 16 MHz que define a crista sul da Anomalia Equatorial de Ionização. Na Figura 4.11b, para o ano de 1989, Cachoeira Paulista continua posicionada dentro do bloco pertencente à crista sul, mas ainda está ao norte do centro do bloco. Já na Figura 4.11c, para 2002, Cachoeira Paulista está deixando a região delimitada por esta isolinha que define a crista sul. Pode-se ver de forma clara, para ambos os grupos de atividade solar, que a modelagem mostra um deslocamento para o norte das cristas da Anomalia Equatorial de Ionização, acompanhando o deslocamento do equador geomagnético, causado pela variação secular.

Apesar desta forma de visualização dos resultados mostrar o deslocamento da Anomalia Equatorial de Ionização ao longo dos anos, não é possível realizar uma análise mais objetiva dos efeitos causados pela variação secular. Utilizou-se então o segundo resultado fornecido pelo modelo SUPIM: a distribuição latitudinal do parâmetro foF2 para o horário de 1800 LT, mostrada na Figura 4.12.

Nela observa-se também que a modelagem para a distribuição latitudinal do parâmetro foF2 dos dois grupos de atividade solar aponta um deslocamento da Anomalia Equatorial de Ionização como um todo para o norte, ao longo dos anos, fazendo com que os picos formados pelas cristas localizem-se em latitudes geográficas diferentes para os anos modelados.

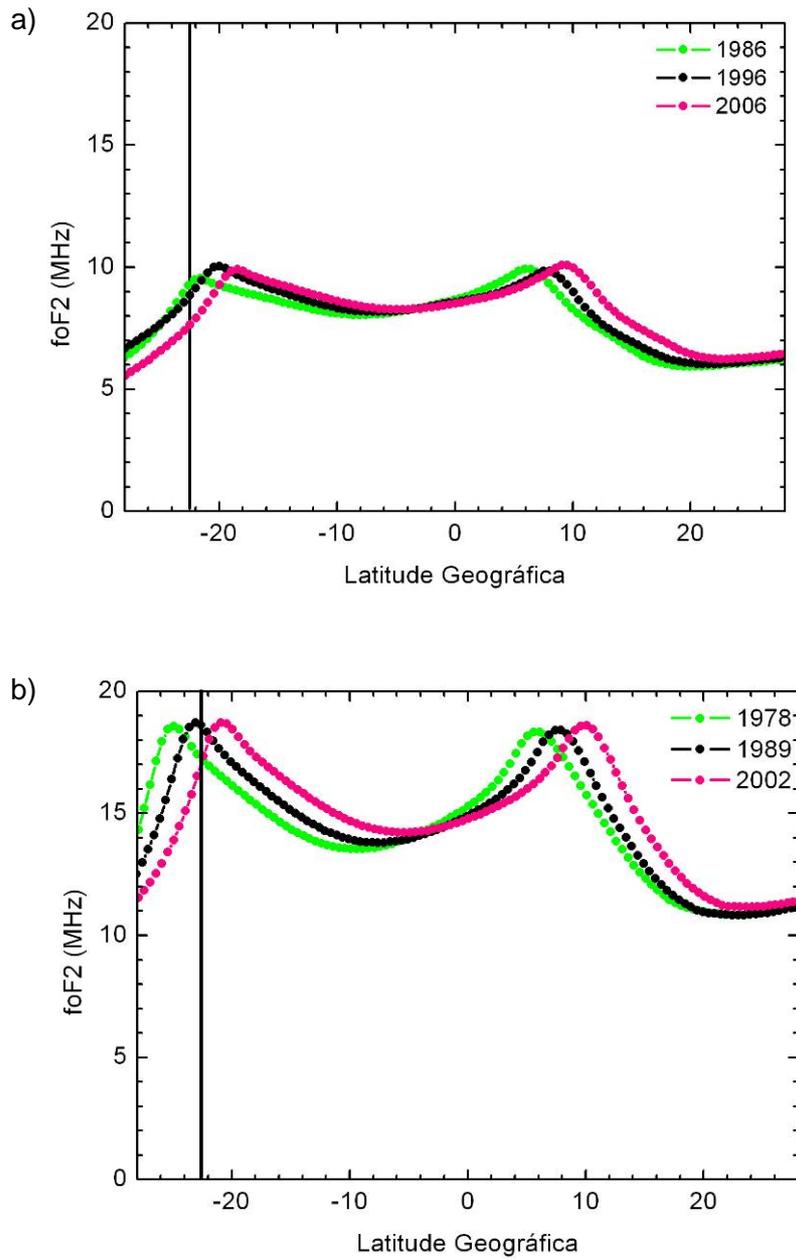


Figura 4.12 – Distribuição latitudinal do parâmetro foF2 fornecida pelo modelo SUPIM para a modelagem cujos parâmetros foram fixados, às 1800 LT: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

A Figura 4.13 mostra a latitude geográfica do maior valor do foF2 obtido para o pico relativo à crista sul, para cada um dos anos escolhidos para este estudo (em preto e vermelho); e a posição geográfica do equador geomagnético para o meridiano de Cachoeira Paulista (em azul). No caso da latitude geográfica para o equador geomagnético, as posições foram obtidas através do modelo IGRF, considerando-se o meridiano de Cachoeira Paulista para os anos do estudo.

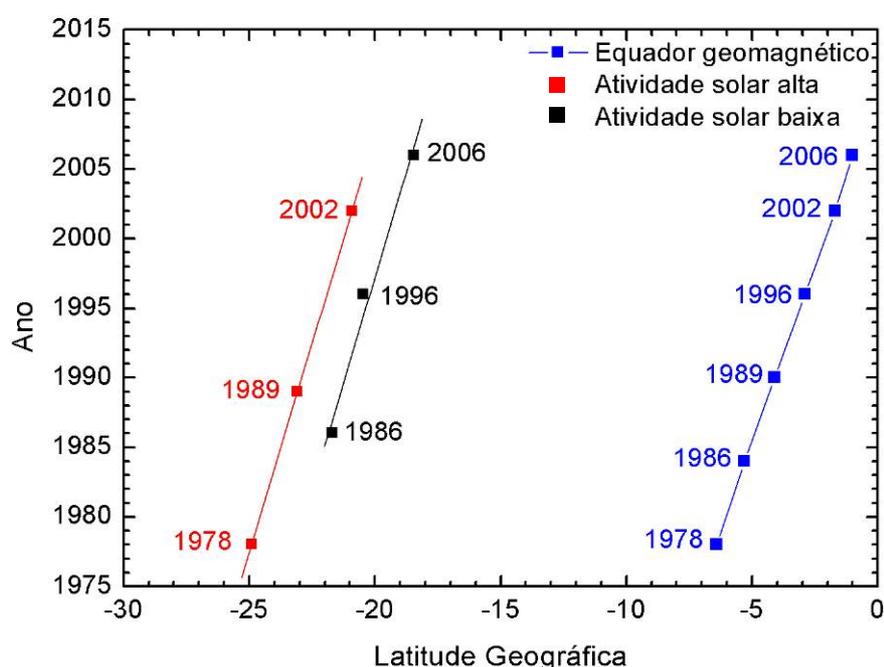


Figura 4.13 – Latitude geográfica do maior valor apresentado pelo parâmetro foF2, para os anos deste estudo, às 1800 LT; e do equador geomagnético para o meridiano de Cachoeira Paulista.

Observou-se na Figura 4.13 que, ao comparar os anos de atividade solar baixa entre si, há um deslocamento para o norte, apresentado também pelos anos de atividade solar alta. Nota-se que a posição da crista da Anomalia Equatorial de Ionização nos anos de 1986, 1996 e 2006 parece recuar, aproximando-se mais do equador geográfico, em relação a 1978, 1989 e 2002. Isto ocorre porque a deriva vertical eletromagnética é mais intensa nos anos de atividade solar alta

do que nos anos de atividade solar baixa, como pode ser visto na Figura 4.8. Este aumento na intensidade da deriva vertical eletromagnética aumenta a distância entre as cristas, fazendo com que a posição da crista sul, em anos de atividade solar alta, seja deslocada mais para o sul em comparação com os anos de atividade solar baixa. Considerando o deslocamento total para o grupo de atividade solar baixa, observou-se que a taxa de deslocamento da modelagem para a crista sul da Anomalia Equatorial de Ionização é de $0,16^\circ/\text{ano}$; e para o grupo de atividade solar alta, é de $0,17^\circ/\text{ano}$. Nota-se que os valores obtidos na modelagem são próximos ao obtido para o equador geomagnético, que é de $0,19^\circ/\text{ano}$.

A Figura 4.14 mostra a variação da intensidade do parâmetro foF2 para Cachoeira Paulista, às 1800 LT, para os seis anos modelados. Observa-se, para o grupo de atividade solar baixa (azul), que a modelagem para o horário de 1800 LT apresenta um comportamento quase linear decrescente a partir de 1986, e para o grupo de atividade solar alta (vermelho) a modelagem não apresenta o mesmo comportamento quase linear observado para o grupo de atividade solar baixa.

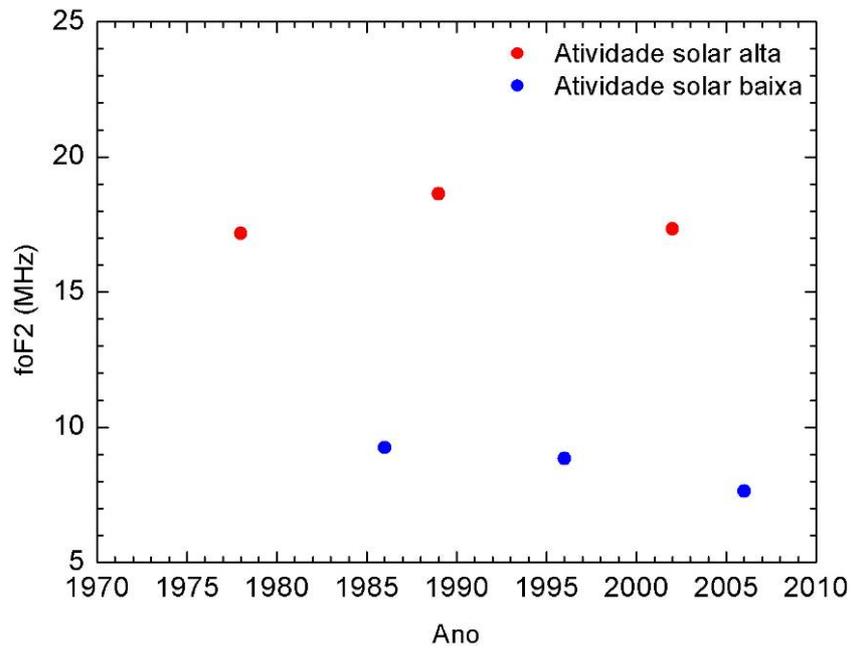


Figura 4.14 – Modelagem para a variação da intensidade do parâmetro foF2 para Cachoeira Paulista, às 1800 LT, para atividade solar baixa (azul) e atividade solar alta (vermelho).

5 COMPARAÇÕES ENTRE DADOS E MODELAGEM

Constatou-se, através dos resultados da modelagem apresentados na Seção 4.3, que a Anomalia Equatorial de Ionização vem sofrendo deslocamento em coordenadas geográficas ao longo dos anos, causado pela ação da variação secular sobre o equador geomagnético. Aqui serão apresentados os resultados da modelagem que foi realizada utilizando como parâmetros de entrada os valores médios dos dias e dos índices relativos a estes dias, fornecidos na Tabela 3.1. Os resultados desta modelagem serão comparados com as médias já apresentadas na Seção 3.2.1, para verificar a concordância entre a modelagem e as médias dos dados, determinando assim o melhor horário para estudar os efeitos da variação secular. Também será verificado neste Capítulo se a tendência mostrada pela modelagem está de acordo com o comportamento apresentado pelos ajustes lineares dos dados da seção 3.2.2.

Pode-se ver nas Figuras 5.1 e 5.2 as comparações entre a modelagem realizada com os parâmetros médios para os dois grupos de atividade solar utilizados na seção 4.3 e as médias dos dados apresentadas na seção 3.2.1. Como pode ser observado na Figura 5.1, para o grupo de atividade solar baixa, os resultados fornecidos pela modelagem reproduzem a tendência apresentada pelas médias dos parâmetros foF2 e hmF2. Para o ano de 1986 (Figura 5.1a) a modelagem superestimou o valor do foF2 a partir de 0800 LT. Para o ano de 1996 (Figura 5.1b), a modelagem subestimou o valor do hmF2 entre 1800 LT e 0500 LT. Para o ano de 2006 (Figura 5.1c), o valor do hmF2 também é subestimado pela modelagem entre 1800 LT e 0500 LT. Já o parâmetro foF2 tem seu valor superestimado entre 1300 LT e 2100 LT.

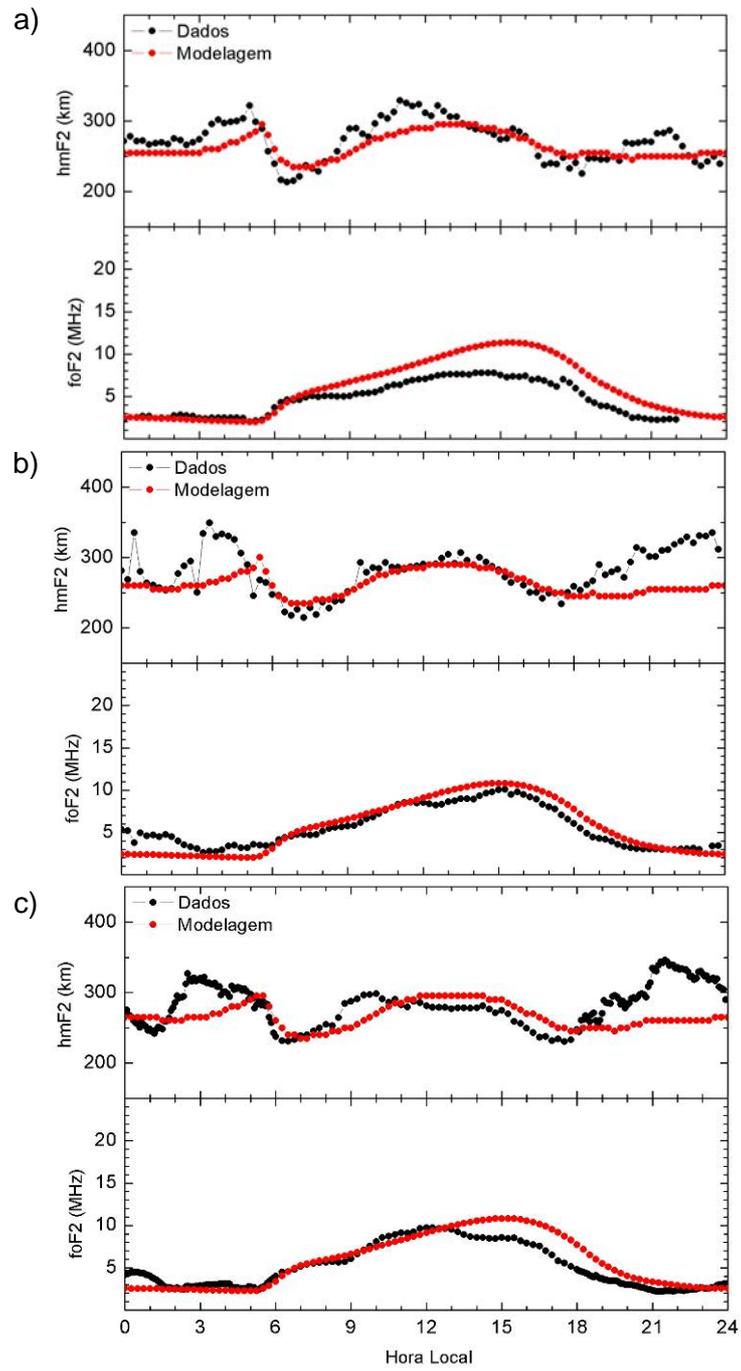


Figura 5.1 – Comparação entre modelagem e média dos dados para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006.

Na Figura 5.2, que mostra a mesma comparação para atividade solar alta, pode-se ver que, de um modo geral, a tendência apresentada pela média dos dados é reproduzida pela modelagem para os três anos, mas não há uma boa concordância. Para 1978 (Figura 5.2a), a modelagem subestima o valor do hmF2 entre 0300 LT e 0500 LT e superestima entre 1630 LT e 2100 LT. Já o parâmetro foF2 tem seu valor superestimado entre 0630 LT e 2230 LT, e subestimado entre 2230 LT e 0230 LT, apresentando boa concordância com a média apenas entre 0230 LT e 0600 LT. Para 1989 (Figura 5.2b), a modelagem do parâmetro hmF2 subestima a média entre 1330 LT e 1700 LT, superestimando desde este horário até as 0200 LT. Entre 0500 LT e 1200 LT há boa concordância entre média e modelagem. Já para o foF2 há boa concordância entre 0600 LT e 0900 LT, seu valor é subestimado pela modelagem entre 2100 LT e 0600 LT e é superestimado entre 0900 e 2100 LT. Para 2002 (Figura 5.2c), a modelagem subestimou a média para o foF2 entre 2100 LT e 0600 LT e superestimou entre 0600 LT e 2100 LT. Já para o hmF2, a modelagem apresentou boa concordância durante todo o dia.

Observa-se também que a modelagem apresenta uma maior diferença entre os valores mínimos e máximos do que as médias, conforme pode ser visto na Figura 5.2. Esta figura também mostra que os valores do parâmetro foF2 apresentados pelas médias após as 2100 LT mantêm-se altos, mostrando que a Anomalia Equatorial de Ionização continua ativa, enquanto a modelagem apresenta um decréscimo para estes horários. Após as comparações concluiu-se que há melhor concordância para o grupo de atividade solar baixa do que para o de atividade solar alta.

Para o grupo de atividade solar alta, no caso do parâmetro foF2, não foi possível encontrar um intervalo ou até mesmo um horário onde houvesse boa concordância entre média e modelagem para os três anos.

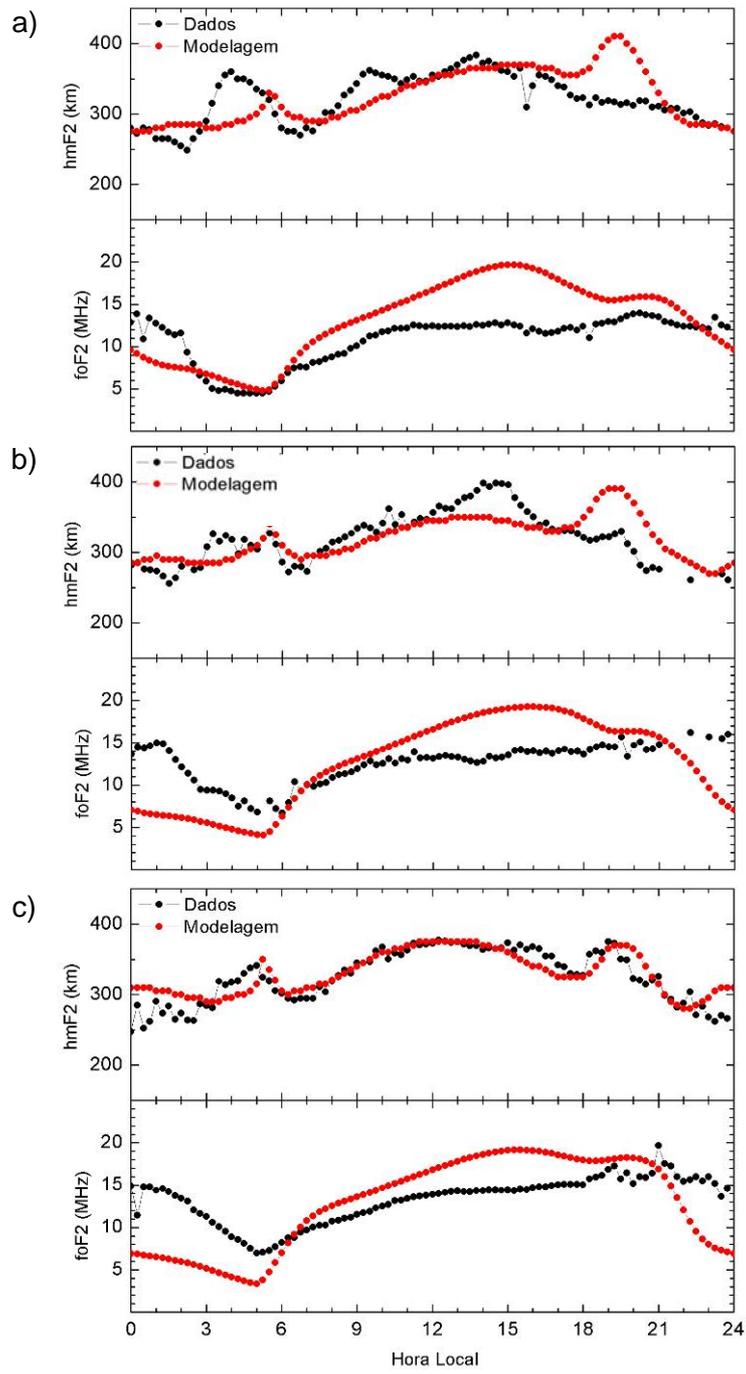


Figura 5.2 – Comparação entre modelagem e média dos dados para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002.

Outro fator que foi levado em conta para escolher o horário em que seriam estudados os efeitos da variação secular foi o desenvolvimento da Anomalia Equatorial de Ionização. Entre 0600 LT e 0830 LT a Anomalia Equatorial de Ionização ainda não se desenvolveu, tornando este horário inválido para o estudo. Foi necessário então definir um horário onde a modelagem reproduzisse pelo menos a tendência apresentada pelos dados e já houvesse um bom desenvolvimento da Anomalia Equatorial de Ionização. Assim, o horário que atendeu aos critérios citados foi o de 1800 LT.

Conforme foi dito anteriormente, esta modelagem não teve seus parâmetros fixados como a que foi realizada na Seção 4.3. Na Figura 5.3, tem-se a deriva vertical eletromagnética sobre o equador geomagnético utilizada nesta modelagem para os dois grupos de atividade solar. Observa-se que as curvas se sobrepõem, assim como na Figura 4.7, mas para o grupo de atividade solar alta há uma diferença na intensidade entre os horários de 1800 LT e 1900 LT, se comparamos os anos de 1978 e 1989 com o ano de 2002.

Na Figura 5.4a, pode-se ver que o comportamento do vento efetivo para os dias de atividade solar baixa modelados é similar, sendo que o ano de 2006 é o que mais difere dos demais. Na Figura 5.4b, a modelagem para os três anos apresenta comportamento similar, mas a intensidade é diferente, sobretudo para o ano de 2002. Esta diferença na intensidade do vento efetivo, que é a projeção dos ventos zonal e meridional geográficos sobre o meridiano geomagnético, para cada ano, pode gerar assimetrias na Anomalia Equatorial de Ionização, dificultando a análise dos resultados da modelagem e a comparação desta com a média dos dados, no que diz respeito aos efeitos separados da variação secular.

As duas formas de visualização dos resultados do modelo SUPIM utilizadas na Seção 4.3 serão novamente usadas aqui. A primeira, mostrada nas Figuras 5.5 e 5.6, fornece a distribuição latitudinal da frequência de plasma para os anos de atividade solar baixa e alta, respectivamente, para o horário de 1800 LT.

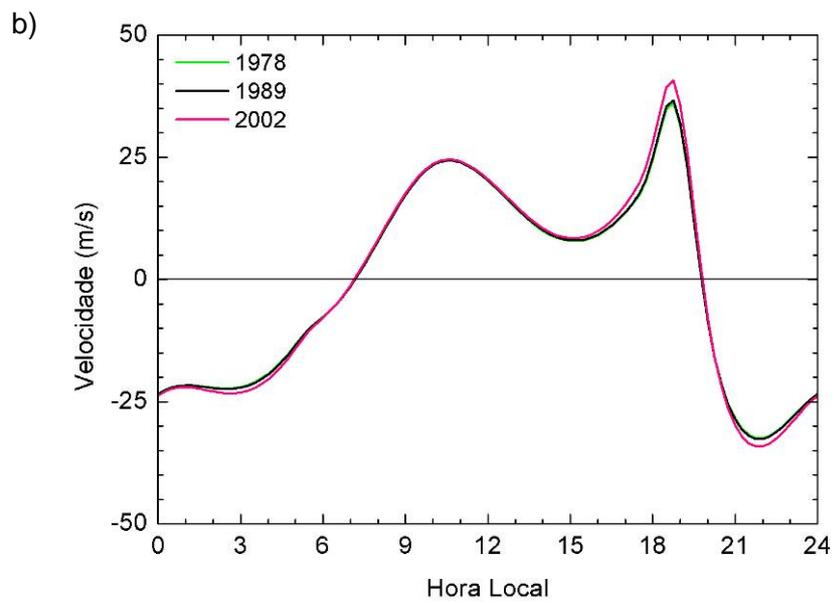
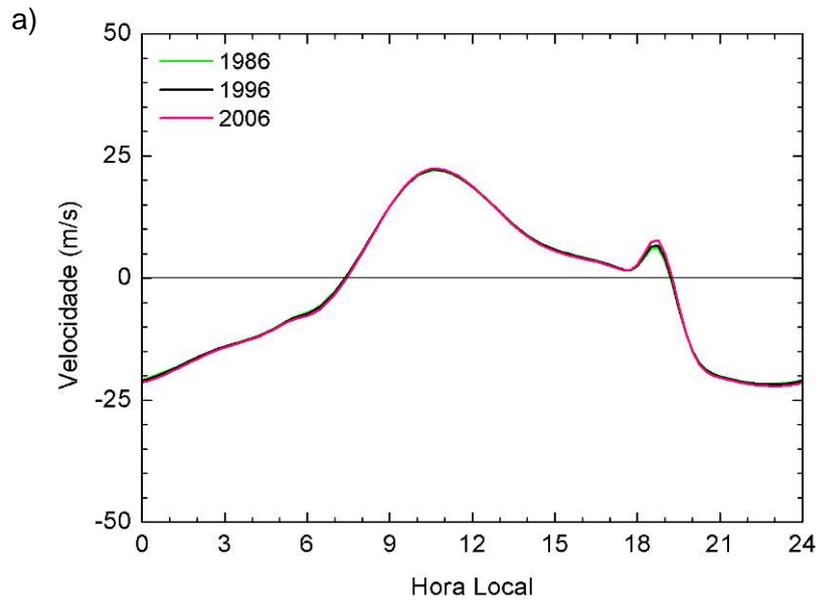


Figura 5.3 – Deriva vertical eletromagnética sobre o equador geomagnético. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.

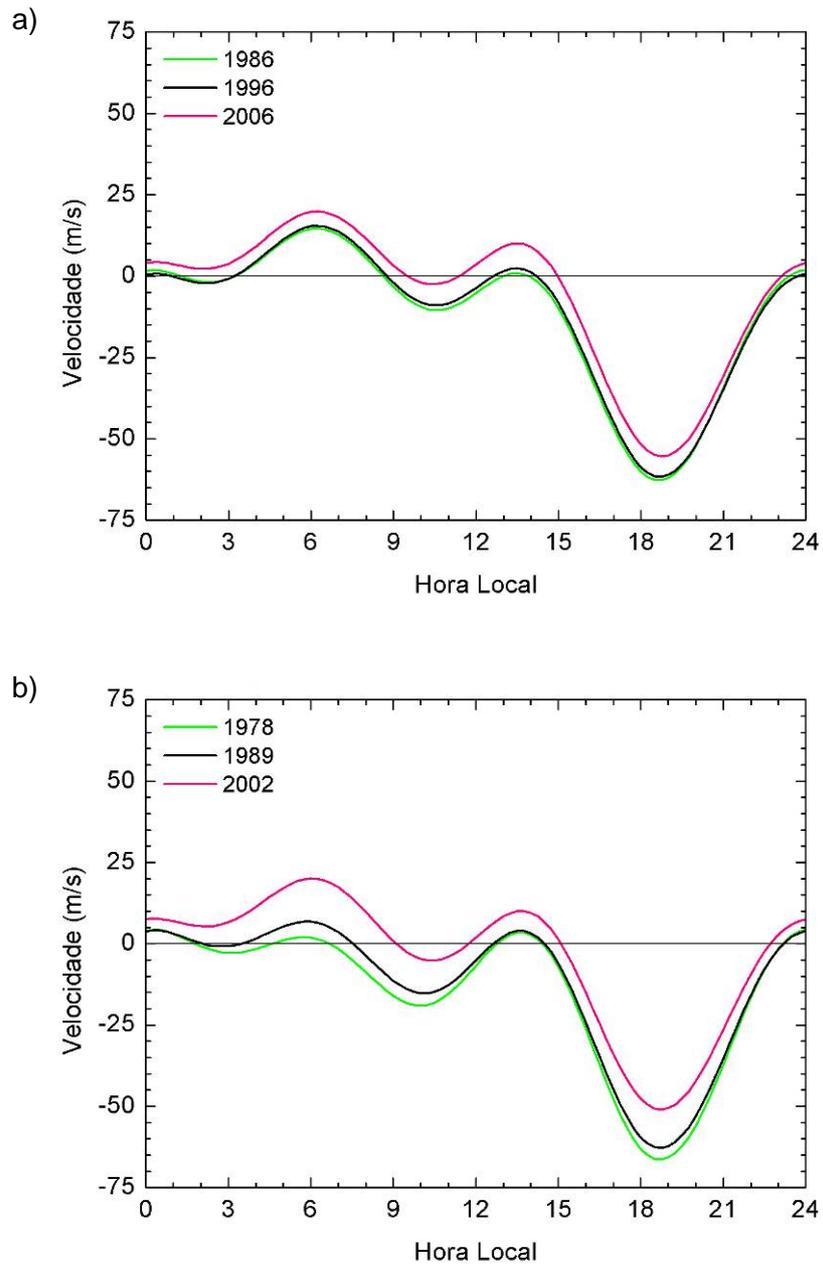


Figura 5.4 – Vento efetivo sobre Cachoeira Paulista em 250 km de altitude. Modelagem para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.

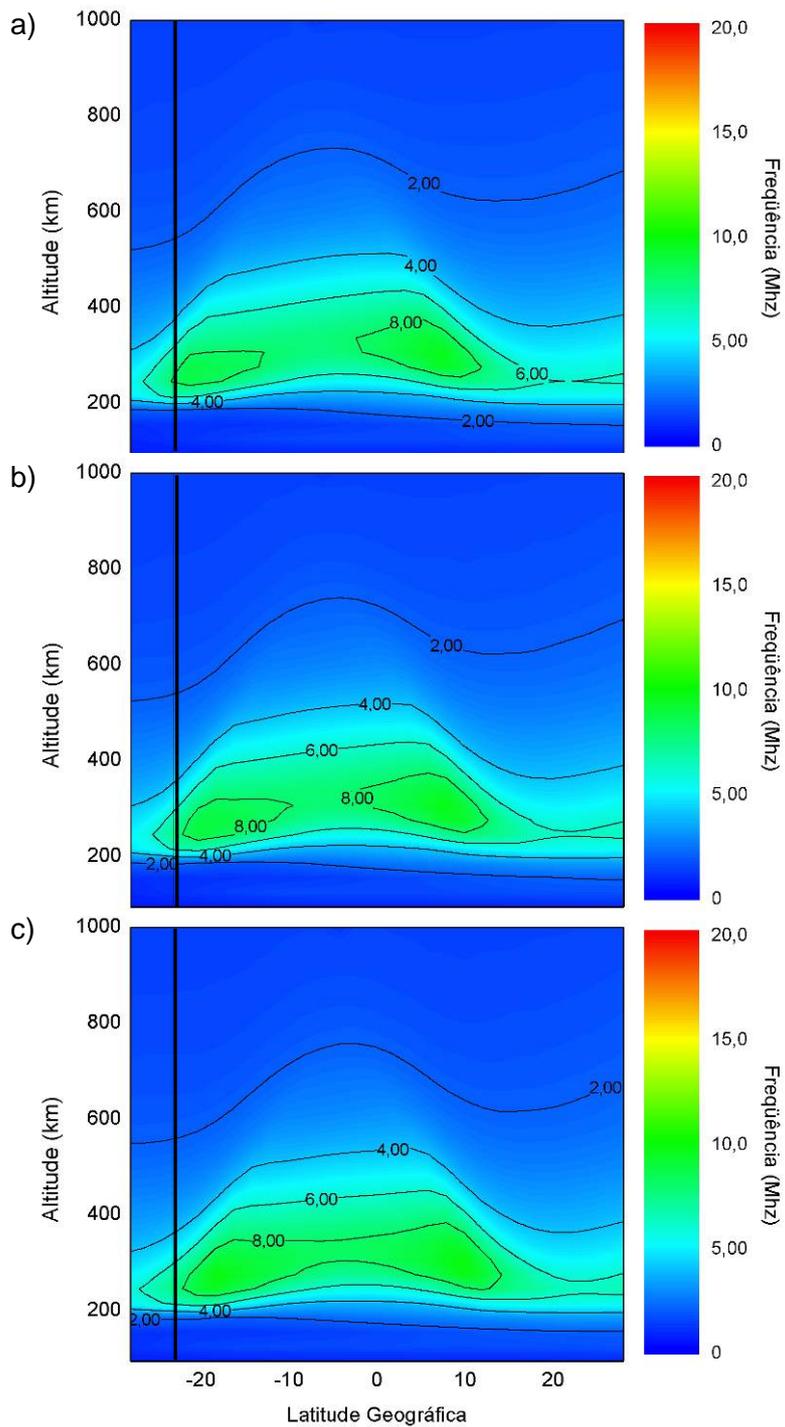


Figura 5.5 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 18 00 LT para atividade solar baixa: a) 1986; b) 1996; e c) 2006. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

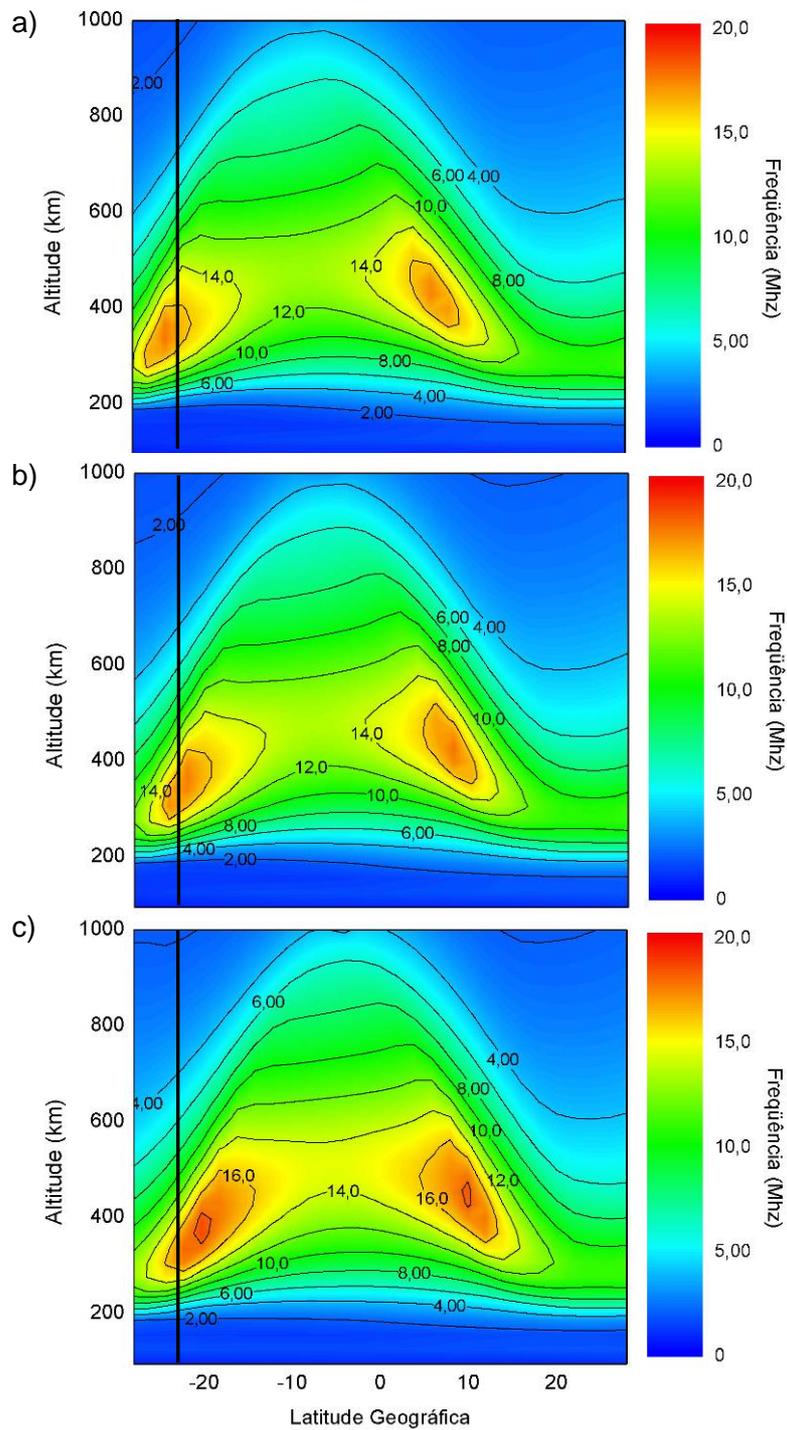


Figura 5.6 – Distribuição latitudinal da frequência de plasma em coordenadas geográficas às 18 00 LT para atividade solar alta: a) 1978; b) 1989; e c) 2002. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

Ao comparar as Figuras 4.10 e 5.5, para o grupo de atividade solar baixa, observa-se que não há diferenças significativas entre elas. Para o grupo de atividade solar alta, a modelagem para os anos de 1978 (Figura 5.6a) e 1989 (Figura 5.6b) apresenta cristas de dimensões menores (altitude e latitude), além da extensão em altitude da Anomalia Equatorial de Ionização como um todo ser menor, se comparada à modelagem mostrada na Figura 4.11. Já para o ano de 2002, a modelagem apresentada na Figura 4.11c apresenta cristas menos extensas em altitude em latitude, do que as observadas na Figura 5.6c.

A segunda forma de visualização dos resultados do modelo SUPIM pode ser vista na Figura 5.7, onde se observa que a modelagem para a distribuição latitudinal do parâmetro foF2 aponta um deslocamento para o norte ao longo dos anos, fazendo com que os picos formados pelas cristas da Anomalia Equatorial de Ionização localizem-se em latitudes geográficas diferentes. Os valores das frequências mostradas na Figura 5.7a, se comparadas com aquelas da Figura 4.12a são diferentes. O mesmo pode ser observado em relação às Figuras 4.12b e 5.7b. Isto ocorre porque a última modelagem apresentada não teve seus parâmetros fixados, permitindo que os efeitos causados pela deriva vertical eletromagnética, pela ação dos ventos neutros e pela ação da variação secular sejam expostos conjuntamente.

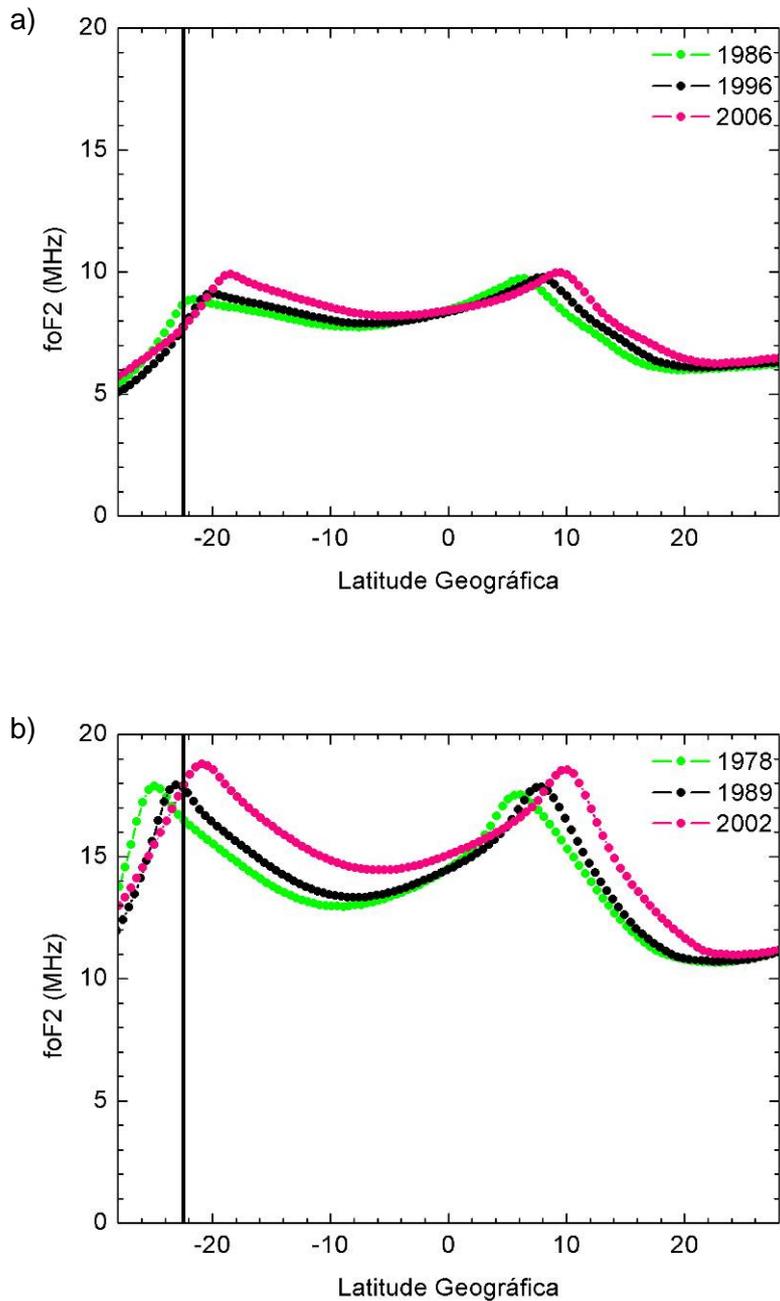


Figura 5.7 – Distribuição latitudinal do parâmetro foF2 fornecida pelo modelo SUPIM para a modelagem que utilizou parâmetros de entrada médios, às 1800 LT: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta. A linha vertical marca a latitude geográfica de Cachoeira Paulista.

A Figura 5.8 apresenta os valores do parâmetro foF2 obtidos sobre Cachoeira Paulista a partir dos resultados apresentados na Figura 5.7 e os dados, conforme mencionados na Seção 3.2.2, para os dois grupos de atividade solar (baixa e alta), além de seus respectivos ajustes lineares.

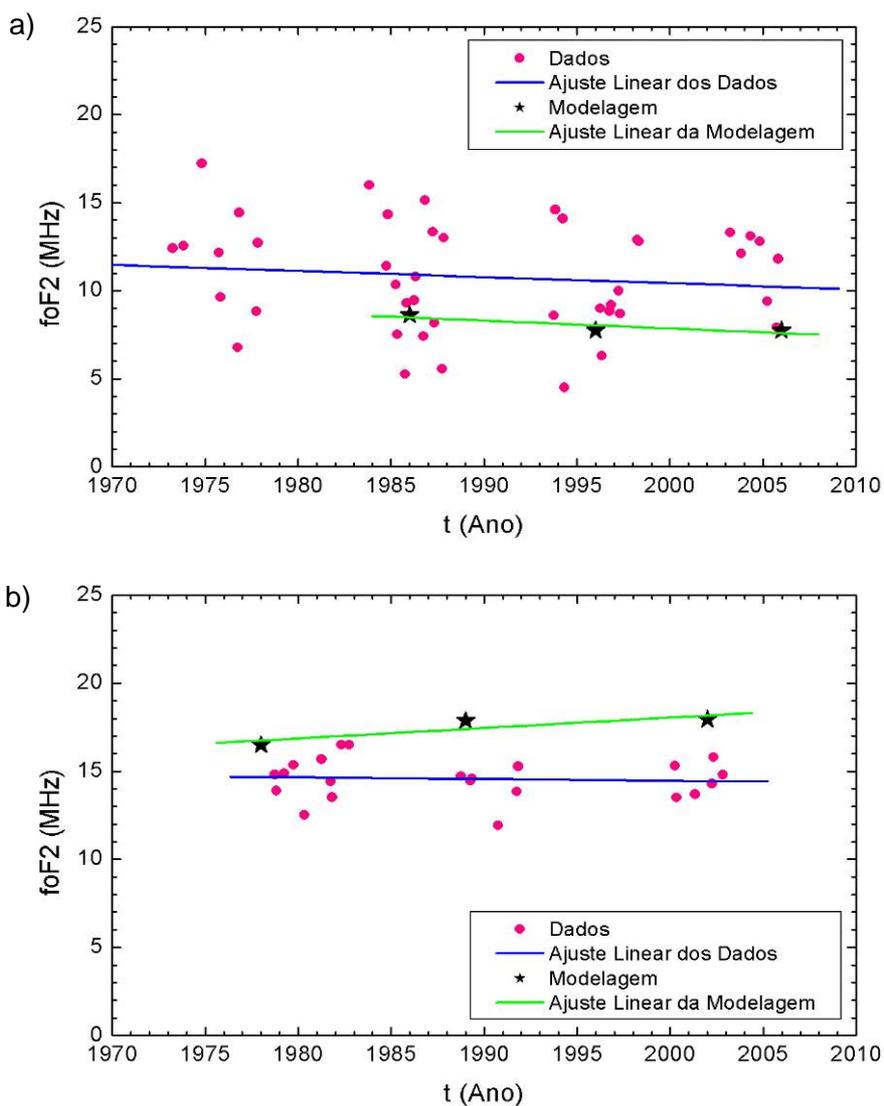


Figura 5.8 – Variação da intensidade do parâmetro foF2 para Cachoeira Paulista (dados e modelagem), às 1800 LT; e seus respectivos ajustes lineares para: a) atividade solar baixa; e b) atividade solar alta.

A equação da reta utilizada para os ajustes lineares exibidos na Figura 5.8 é dada pela Equação 3.2, e os coeficientes A e B estão expostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Coeficientes da reta utilizada no ajuste dos dados e dos resultados da modelagem.

Coeficientes	Atividade Solar Baixa		Atividade Solar Alta	
	Dados	Modelagem	Dados	Modelagem
A (MHz/ano)	-0,03	-0,04	-0,01	0,06
B (MHz)	79,92	96,26	33,85	-100,34

Observou-se que, no caso do grupo de atividade solar baixa (Figura 5.8a), o ajuste linear obtido para os dados de foF2 exibe o mesmo comportamento linear decrescente que o observado para o ajuste linear dos resultados da modelagem. Já no caso do grupo de atividade solar alta, observou-se que o comportamento exibido pelo ajuste linear dos dados apresenta um comportamento linear decrescente, enquanto o ajuste linear dos resultados da modelagem apresenta um comportamento linear crescente, discordando da tendência apresentada pelos dados.

Assim, nota-se que a tendência apresentada pelo resultado da modelagem é observada apenas para o grupo de atividade solar baixa, como seria esperado, pois se concluiu anteriormente que havia maior concordância entre dados e modelagem para este grupo.

A discordância entre a tendência apresentada pelo comportamento dos dados e dos resultados da modelagem pode estar ligada à grande variação observada para o índice F10.7 dos anos comparados e à imprecisão dos valores dos ventos termosféricos fornecidos pelo modelo HWM93 (TITHERIDGE, 1995; SOUZA, 1997; SOUZA et al., 2000).

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados os efeitos causados pela ação da variação secular do equador geomagnético, da deriva vertical eletromagnética e dos ventos neutros sobre a formação e manutenção da Anomalia Equatorial de Ionização. As principais conclusões são listadas a seguir.

Os dados de foF2 registrados em Cachoeira Paulista às 1800 LT apresentaram comportamento linear decrescente com o passar dos anos para os dois grupos de atividade solar (baixa e alta), dando um indício de que a crista sul da Anomalia Equatorial de Ionização está se afastando da região de Cachoeira Paulista.

Observou-se que o aumento na intensidade da deriva vertical eletromagnética, que é dependente da atividade solar, causa uma intensificação do Efeito Fonte, fazendo com que uma maior quantidade de plasma seja retirada da região equatorial, definindo assim a região da calha. Neste caso, o plasma é transportado para altitudes maiores, então flui ao longo das linhas de campo geomagnético, sendo depositado também em latitudes maiores. Portanto, a deriva vertical eletromagnética tem papel preponderante na determinação da extensão da Anomalia Equatorial de Ionização, tanto em altitude como em latitude, definindo as localizações das cristas e a profundidade da calha, de acordo com sua intensidade.

O vento neutro é responsável pelo transporte de plasma entre os hemisférios, ao longo das linhas de campo geomagnético. Porém, ao soprar de um hemisfério para o outro, causa a elevação do plasma em um hemisfério e abaixamento do plasma no outro. Foi constatado que no hemisfério onde ocorreu o abaixamento do plasma, houve a ação dos processos de recombinações, que são intensos em altitudes menores, causando destruição de uma das cristas da Anomalia Equatorial de Ionização. Esta dinâmica também é responsável por gerar assimetrias na estrutura da Anomalia Equatorial de Ionização. No caso da existência de ventos divergentes, ou seja,

soprando para os pólos, também ocorrem assimetrias. Na verdade, a destruição de uma das cristas é mais rápida no hemisfério onde o vento apresenta maior intensidade. Foi observado também que a resposta da ionosfera à ação dos ventos neutros não é imediata, levando algumas horas para ser observada.

O estudo da influência da variação secular sobre a ionosfera brasileira usando o modelo SUPIM mostrou que a Anomalia Equatorial de Ionização vem sofrendo um deslocamento para o norte ao longo dos anos, acompanhando o que ocorre com o equador geomagnético. Tal deslocamento apresenta uma taxa de $0,16^\circ$ por ano para atividade solar baixa e $0,17^\circ$ por ano para atividade solar alta.

De um modo geral, as variações diurnas de foF2 e hmF2 calculadas pelo modelo SUPIM para Cachoeira Paulista apresentam boa concordância com os correspondentes valores observados. Porém, para o caso de atividade solar alta, a concordância entre os valores modelados e os dados não é tão boa quanto para o caso de atividade solar baixa. Foi constatado, também para atividade solar alta, que a modelagem não reproduz o alto valor de foF2 observado nos dados após as 2100 LT, que é um indício de que a Anomalia Equatorial de Ionização ainda está ativa.

Os valores de foF2 calculados às 1800 LT para Cachoeira Paulista, para vários anos representativos do grupo de atividade solar baixa, exibiram a mesma tendência, linear decrescente, daquela apresentada pelos dados, indicando que o parâmetro foF2 vem diminuindo os seus valores com o passar dos anos. Isto é um indício do deslocamento da Anomalia Equatorial de Ionização, já que a crista sul, antes localizada sobre Cachoeira Paulista, agora está deixando esta região, causando mudanças na distribuição latitudinal da densidade do plasma e, portanto, na intensidade do parâmetro foF2. Já para o grupo de atividade solar alta, a modelagem apresentou tendência linear crescente, que é oposta àquela revelada pelos dados. Um dos fatores que pode estar desvirtuando a tendência desta modelagem é a imprecisão dos ventos

termosféricos fornecidos pelo modelo HWM93 e a sensibilidade do modelo SUPIM ao índice F10.7, utilizado como parâmetro de entrada das modelagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; MURALIKRISHNA, P.; SOBRAL, J. H. A. Long term trends in sporadic E layers and electric fields over Fortaleza, Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 7, p. 757-760, 1996.

ABDU, M. A. Equatorial ionosphere-thermosphere system: electrodynamics and irregularities. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, 771-787, 2005.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. South atlantic magnetic ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere. **Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics**, v. 67, n. 17-18, p. 1643-1657, 2005.

ANDERSON, D. N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly – I. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 3, p. 409-419, 1973a.

ANDERSON, D. N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly – II. Results in the American and Asian sectors. **Planetary and Space Science**, v. 21, n. 3, p. 421-442, 1973b.

BAILEY, G.J.; BALAN, N.; SU, Y.Z. The Sheffield University Ionosphere-Plasmasphere Model – A Review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 59, n. 13, p. 1541-1552, 1997.

BAILEY, G. J.; BALAN, N. A Low-latitude Ionosphere-plasmasphere Model. In: SCHUNK, R. M (ed.). **Solar-terrestrial Energy Program: Handbook of Ionospheric Models**, p. 173-206, 1996.

BAILEY, G. J.; SELLEK, R. A mathematical model of the Earth's plasmasphere and its application in a study of He⁺ at L=3. **Annales Geophysicae**, v. 8, n. 3, p. 171-190, 1990.

BENESTAD, R. E. **Solar activity and Earth's climate**. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2006. 316 p.

CAMPBELL, W. H. **Earth magnetism: A guided tour through magnetic fields**. Massachussets, USA: Harcourt/Academic Press, 2001. 151 p.

DE PAULA, E. R. **Resposta da região F ionosférica às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil**. 210 p. (INPE-4106-TDL/259). Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 1987.

HANSON, W. B.; MOFFETT, R. J. Ionization transport effects in the equatorial F region. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 23, p. 5559-5572, 1966.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. Cambridge, England: Cambridge University, 1992. 420 p.

HEDIN, A. E.; FLEMING, E. L.; MANSON, A. H.; SCHMIDLIN, F. J.; AVERY, S. K.; CLARK, R. R.; FRANKE, S. J.; FRASER, G. J.; TSUDA, T.; VIAL, F.; VINCENT, R. A.. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 13, p. 1421-1447, 1995.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo, SP: Nova Stella, 1991. 149 p.

MAUS, S.; MACMILLAN, S.; CHERNOVA, T.; CHOI, S.; DATER, D.; GOLOVKOV, V.; LESUR, V.; LOWES, F.; LÜHR, H.; MAI, W.; McLEAN, S.; OLSEN, N.; ROTHER, M.; SABAKA, T.; THOMSON, A.; ZVEREVA, T. The 10th generation international geomagnetic reference field. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 151, p. 320-322, Março de 2005.

MAYAUD, P. N. **Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices**. WASHINGTON, D.C.: AGU, 1980. 154 p., 77876 cm. (GEOPHYSICAL MONOGRAPH, 22). ISBN 0-87590-022-4.

MITRA, A. P. A review of D-region processes in non-polar latitudes. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 30, p. 1065-1114, 1968.

NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER. **Solar Radio Data via FTP from NGDC**. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsolarradio.html>. Acesso em: 01 Agosto 2007.

PARKINSON, W. D. **Introduction to geomagnetism**. Edinburgh, Scotland: Scottish Academic, 1983. 433p. ISBN 7073 0292 7.

PICONE, J. M.; HEDIN, A. E.; DROB, D. P. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. A12, p. 1468, 2002.

QUEGAN, S.; BAILEY, G. J.; MOFFETT, R. J. Diffusion coefficients for three major ions in the topside ionosphere. **Planetary and Space Sciences**, v. 29, n. 8, p. 851-867, 1981.

RANGARAJAN, G. K.; BARRETO, L. M. Secular change in the location of the magnetic dip equator in the twentieth century. **Geofísica Internacional**, v. 39, n. 4, p. 323-336, 2000.

REINISCH, B. W.; BIBL, K.; KITROSSER, D. F.; SALES, G. S.; TANG, J. S.; ZHANG, Z.; BULLET, T. W.; RALLS, J. A. **The digisonde 256 ionospheric sounder**. Publicação em Wits Handbook #2, Nov/1989.

RICHARDS, P. G.; FENNELLY, J. A.; TORR, D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A5, p. 8981-8992, Maio de 1994.

RISHBETH, H. The F-Layer Dynamo. **Planetary and Space Science**, v. 19, p. 263 - 267, 1971.

SANTOS, P. M. T. **Estudo da dinâmica do sistema termosfera - ionosfera por modelo teórico e observações experimentais**. 2005-02-25. 134 p. (INPE-13270-TDI/1032). Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

SASTRI, J. H. Equatorial anomaly in F-region – A review. **Indian Journal of Radio & Space Physics**, v. 19, p. 225-240, Agosto de 1990.

SCHERLIESS, L.; FEJER, B. G. Radar and satellite global equatorial F region vertical drift model. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. A4, p. 6829-6842, Abril de 1999.

SOUZA, J. R. **Modelagem ionosférica em baixas latitudes no Brasil**. 182 p. (INPE-6395-TDI/611). Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 1997.

SOUZA, J. R.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; BAILEY, G. J. Determination of vertical plasma drift and meridional wind using the Sheffield University Plasmasphere Ionosphere Model and ionospheric data at equatorial and low latitudes in Brazil: summer solar minimum and maximum conditions. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. A6, p. 12.813-12.821, Junho de 2000.

STERLING, D. L.; HANSON, W. B.; MOFFETT, R. J.; BAXTER, R. G. Influence of electromagnetic drifts and neutral air winds on some features of the F₂ region. **Radio Science**, v. 4, n. 11, p. 1005-1023, 1969.

TITHERIDGE, W. K. Winds in the ionosphere – A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n. 14, p. 1681-1714, Fev. 1995.

TOBISKA, W. K.; WOODS, T.; EPARVIER, F.; VIREECK, R.; FLOYD, L.; BOUWER, D.; ROTTMAN, G.; WHITE, O. R. The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool. **Journal of Atmospheric and Solar – terrestrial Physics**, v. 62, p. 1233-1250, 2000.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

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

Programas de Computador (PDC)

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

Pré-publicações (PRE)

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