

INPE-6395-TDI/611

MODELAGEM IONOSFÉRICA EM BAIXAS LATITUDES NO BRASIL

Jonas Rodrigues de Souza

**Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Mangalathayil Ali Abdu e Inez Staciarini Batista,
aprovada em maio de 1997.**

**INPE
São José dos Campos
Maio de 1997**

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

INPE-6395-TDI/611

MODELAGEM IONOSFÉRICA EM BAIXAS LATITUDES NO BRASIL

Jonas Rodrigues de Souza

**Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Mangalathayil Ali Abdu e Inez Staciarini Batista,
aprovada em maio de 1997.**

**INPE
São José dos Campos
Maio de 1997**

523.4-853(81)

SOUZA, J.R. de

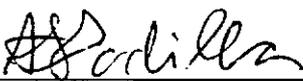
Modelagem ionosférica em baixas latitudes no
Brasil / J.R. de Souza.- São José dos Campos: INPE,
1997.

182 p. - (INPE-6395-TDI/611)

1. Ionosfera. 2. Deriva ionosférica. 3. Região
F2. 4. Velocidade do vento. 5. Modelos atmosféricos.
6. Regiões tropicais. 7. Radiação ultra-violeta. I.
Título.

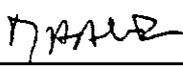
Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de Doutor em Ciência Espacial

Dr. Antônio Lopes Padilha



Presidente

Dr. Mangalathayil Ali Abdu



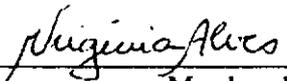
Orientador

Dra. Inez Staciarini Batista



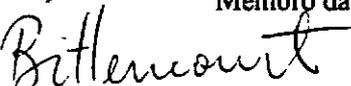
Orientadora

Dra. Maria Virginia Alves



Membro da Banca

Dr. José Augusto Bittencourt



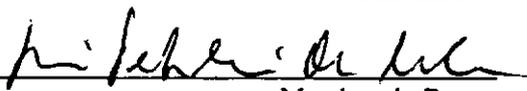
Membro da Banca

Dr. Victor Hugo Rios



Membro da Banca
- Convidado -

Dr. Rui Tertuliano de Medeiros



Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Jonas Rodrigues de Souza

São José dos Campos, 27 de maio de 1997

**À minha adorável
esposa Cida e a todos
da minha família**

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos orientadores Dr. Mangalatayil Ali Abdu e Dra. Inez Staciarini Batista por suas eficientes assistências e incentivos em todas as fases deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, Dra. Maria Virgínia Alves, Dr. Rui Tertuliano de Medeiros, Dr. Victor Hugo Rios, Dr. Antônio Lopes Padilha e Dr. José Augusto Bittencourt pelas críticas e sugestões durante a fase preliminar e a fase final deste trabalho.

Ao grupo de física da ionosfera da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pelo apoio e disponibilidade às discussões.

Ao Dr. Graham John Bailey, pesquisador da Universidade de Sheffield - Inglaterra, por fornecer seu modelo ionosférico e dar assistência na implementação deste modelo em nossos computadores.

Ao Dr. Eurico Rodrigues de Paula pela sua orientação e apoio no início deste trabalho.

Às amigas Maria Goreti dos Santos Aquino e Lúcia de Almeida Terra Limiro pelo auxílio na redução e análise dos dados de ionossonda.

Ao vereador-PT Vicente Cândido da Silva e à Dra. Maria Amália Guedes Grijo das Neves Cândido pelo inestimável apoio e incentivo nas diversas fases deste trabalho.

A todos os colegas e amigos que contribuíram diretamente ou indiretamente na realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, o modelo ionosférico SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) é utilizado para calcular os parâmetros ionosféricos foF2 e hmF2, e os resultados do modelo são comparados com dados de ionossondas registrados em Huancayo, Peru, em Fortaleza e em Cachoeira Paulista, Brasil. Os parâmetros de entrada do SUPIM, tais como, fluxo solar EUV (Extremo Ultra-Violeta), campos elétricos e ventos termosféricos são então ajustados para que os resultados do modelo concordem com as observações. O estudo para Huancayo, o qual é feito para equinócio de atividade solar máxima, mostra que o fluxo solar EUV fornecido pelo modelo desenvolvido por Tobiska (1991) superestima o valor deste parâmetro em 40% e destaca a importância do uso das derivas da mesma época que os dados ionosféricos a serem estudados por modelagens. A parte mais importante deste trabalho é um estudo da região F ionosférica na região do Brasil usando o modelo SUPIM e dados de h'F, foF2 e hmF2 registrados simultaneamente em Fortaleza e em Cachoeira Paulista. Neste estudo são calculados a deriva equatorial $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, o fluxo solar EUV, foF2, hmF2 e ventos termosféricos meridionais. Estes parâmetros são calculados para períodos geomagneticamente calmos e para atividade solar mínima e máxima. Para cada nível de atividade solar é analisado o comportamento da região F durante verão e inverno. O fluxo solar EUV, produzido pelo modelo do Tobiska (1991), apresenta resultados inconsistentes apenas para verão de atividade solar mínima, com valores subestimados em 25%. São incluídos os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul sobre a ionosfera de Cachoeira Paulista no código do modelo SUPIM e os resultados mostram que estes efeitos apresentam variações sazonais, sendo desprezíveis durante inverno. Em Fortaleza, os parâmetros foF2 e hmF2 apresentam sensíveis variações devido às mudanças da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Mas, entre 07:00-15:00 horas, o parâmetro hmF2 também é fortemente controlado pela combinação de ventos e deriva. Em Cachoeira Paulista, os ventos locais controlam hmF2. Também sobre essa estação, constatamos que foF2 apresenta dependência significativa dos ventos no seu ponto conjugado. É apresentado um estudo comparativo entre os ventos calculados neste trabalho (ventos ajustados), os ventos do modelo HWM90, os ventos calculados por Medeiros (1995) e os dados de ventos obtidos pelo método de interferometria de Fabry-Perot. Os resultados mostram boa concordância dos ventos ajustados com os dados observados em Cachoeira Paulista e também mostram boa concordância com os resultados de Medeiros (1995) durante a tarde e à noite, exceto, durante inverno de atividade solar mínima. Analisando as variações de foF2 com a latitude e com a hora local constatamos que a intensidade máxima do pico da Anomalia Equatorial forma-se mais cedo no hemisfério de inverno do que no hemisfério de verão.

IONOSPHERIC MODELLING AT LOW LATITUDES IN THE BRAZIL

ABSTRACT

In this work, the ionospheric model SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) is used to calculate the ionospheric parameters foF2 and hmF2, and the model results are compared with ionosonde data recorded at Huancayo, Peru, at Fortaleza and Cachoeira Paulista, in Brazil. The SUPIM input parameters, such as, solar EUV fluxes, electric fields and thermospheric winds are adjusted in order to get good agreement between model results and observations. The study for Huancayo data for solar maximum conditions shows that the value of the solar EUV flux calculated using model of Tobiska (1991) is overestimated by 40%. It also shows the importance of using $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift at the same epoch as of ionospheric data in modelling study. Most important part of this work is a study of the ionospheric F region over Brazil using SUPIM and h'F, foF2 and hmF2 data recorded simultaneously at Fortaleza and at Cachoeira Paulista. In this study, equatorial $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift, foF2, hmF2 and meridional thermospheric winds are calculated for geomagnetically calm periods and also for minimum and maximum solar activity conditions. For each solar activity level the F region behaviour during summer and winter is examined. The solar EUV flux using Tobiska (1991) model shows inconsistent result only for summer of minimum solar activity, indicating an underestimate of his flux values by 25%. The South Atlantic Anomaly effects in the ionosphere over Cachoeira Paulista are also taken into account in the SUPIM code, and the results indicate a seasonal variation with negligible effect during the winter. At Fortaleza, the parameter foF2 and hmF2 show sensitive variation due to changes in $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift. But, between 07:00-15:00 LT, the parameter hmF2 is also strongly controlled by combination of the winds and drifts. At Cachoeira Paulista, the local winds control hmF2. Also we verify that foF2 at this station shows significant dependence on the winds at magnetic conjugated point of Cachoeira Paulista. Comparative study of the calculated winds in this work (adjusted winds), the HWM90 model winds, the calculated winds by Medeiros (1995) and the winds data recorded by Fabry-Perot interferometer at Cachoeira Paulista is also done. The results show good agreement of the adjusted winds with the observed data and also show good agreement with the model of Medeiros (1995) during the evening and the night, except, during the winter of minimum solar activity. Analysing foF2 variation with the latitude and with the local time we verify that the Equatorial Anomaly peak reaches maximum intensity earlier in the winter hemisphere than in the summer hemisphere.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxv
LISTA DE SIGLAS.....	xxvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - TEORIA USADA NAS MODELAGENS IONOSFÉRICAS..	9
2.1 - Introdução.....	9
2.2 - A equação da continuidade.....	10
2.2.1 - Taxa de produção e de perda.....	13
2.3 - A equação do movimento e difusão dos íons.....	15
2.4 - A equação do equilíbrio de energia para os íons e elétrons.....	17
2.5 - Solução das equações.....	17
2.5.1 - Transformação das coordenadas.....	18
CAPÍTULO 3 - A ANOMALIA EQUATORIAL E A ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL.....	21
3.1 - Introdução.....	21
3.2 - O dínamo da região F.....	22
3.3 - O dínamo de região E.....	24
3.4 - Derivas da região F equatorial.....	26
3.5 - A anomalia equatorial.....	29
3.6 - A anomalia do atlântico sul.....	31

CAPÍTULO 4 - O MODELO SUPIM E SIMULAÇÕES DE hmF2 E foF2 SOBRE HUANCAYO.....	35
4.1 - Introdução.....	35
4.2 - O modelo SUPIM.....	35
4.2.1 - Parâmetro de saída e de entrada do SUPIM.....	36
4.3 - Simulações de hmF2 e foF2 sobre Huancayo.....	40
CAPÍTULO 5 - DADOS EXPERIMENTAIS E MUDANÇAS NOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO SUPIM.....	49
5.1 - Introdução.....	49
5.2 - Dados experimentais.....	49
5.3 - Mudanças nos parâmetros de entrada do SUPIM.....	58
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
6.1 - Introdução.....	65
6.2 - Simulações de foF2 e hmF2 para verão de atividade solar mínima em Fortaleza e em Cachoeira Paulista.....	65
6.2.1 - Efeitos da anomalia do atlântico sul sobre foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista.....	74
6.2.2 - Efeitos das mudanças dos ventos sobre foF2 e hmF2 simulados em Cachoeira Paulista e em Fortaleza.....	82
6.3 - Simulações de foF2 e hmF2 para verão de atividade solar máxima em Fortaleza e em Cachoeira Paulista.....	101
6.3.1 - Efeitos da anomalia do atlântico sul sobre foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista.....	105
6.3.2 - Efeitos das mudanças dos ventos sobre foF2 e hmF2 simulados em Cachoeira Paulista e em Fortaleza.....	105

6.4 - Simulações de foF2 e hmF2 para inverno de atividade solar mínima em Fortaleza e em Cachoeira Paulista.....	117
6.4.1 - Efeitos das mudanças dos ventos sobre foF2 e hmF2 simulados em Cachoeira Paulista e em Fortaleza.....	120
6.5 - Simulações de foF2 e hmF2 para inverno de atividade solar máxima em Fortaleza e em Cachoeira Paulista.....	128
6.5.1 - Efeitos das mudanças dos ventos sobre foF2 e hmF2 simulados em Cachoeira Paulista e em Fortaleza.....	132
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Posições das estações de coleta de dados, usados neste trabalho, e diferenças entre as coordenadas geográficas e magnéticas sobre a território brasileiro.....	7
2.1 - Geometria de uma linha de campo dipolar usada para definir o vetor unitário paralelo a B	11
3.1 - Eletrodinâmica da região F equatorial, onde supomos que a densidade e condutividade ionosférica estão distribuídas em camadas e submetidas a um vento neutro zonal constante.....	23
3.2 - Ilustração do eletrojato equatorial, considerando a região E como uma camada fina e submetida a um campo elétrico.....	25
3.3 - Derivas vertical e zonal registradas pelo radar de Jicamarca durante equinócio de atividade solar máxima. FONTE: Fejer et al. (1991).....	27
3.4 - Modelo simplificado do pico pré-inversão da região F, onde foi considerado um vento uniforme nesta região. FONTE: Farley et al. (1986).....	28
3.5 - Apresentação artística da formação da Anomalia Equatorial e localização do eletrojato equatorial sobre a América do Sul.....	30
3.6 - Contornos do logaritmo de base dez da concentração eletrônica ionosférica ($\log_{10} N_e$) mostrando a Anomalia Equatorial.....	31
3.7 - Contornos de iso-intensidades do campo geomagnético total calculado pelo IGRF95.....	33
4.1 - Valores médios de F10.7 e faixas indicadoras dos períodos onde existe dados da radiação Lyman- α (faixas amarelas) e da radiação EUV (faixas azuis).....	37
4.2 - Espectro do fluxo solar EUV calculado pelo modelo EUV91 durante verão de 1986.....	38

4.3 - Superposição da variação diurna de hmF2 e de foF2 sobre Huancayo, para setembro de 1979.....	41
4.4 - Derivas verticais $E \times B$ usadas nas simulações de foF2 e hmF2 sobre Huancayo e uma comparação entre os parâmetros ionosféricos simulados e observados.....	43
4.5 - Perfis da densidade eletrônica calculados pelo SUPIM sobre Huancayo durante equinócio de atividade solar máxima.....	46
4.6 - Resultados do SUPIM usando diferentes métodos para calcular a frequência de colisão entre O^+ e O. Estes resultados são comparados com observações.....	48
5.1 - Superposições das variações diurnas de h'F, hmF2, foF2 e Kp para verão de atividade solar mínima. Dados registrados em Fortaleza.....	51
5.2 - Superposições dos dados de hmF2, foF2 e Kp para verão de atividade solar mínima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.....	52
5.3 - Superposições das variações diurnas de h'F, hmF2, foF2 e Kp usadas para representar verão de atividade solar máxima. Dados registrados em Fortaleza.....	53
5.4 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp usadas para representar verão de atividade solar máxima. Dados de Cachoeira Paulista..	54
5.5 - Superposições das variações diurnas de h'F, hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar mínima. Dados registrados em Fortaleza.....	55
5.6 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar mínima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.....	56
5.7 - Superposições das variações diurnas de h'F, hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar máxima. Dados registrados em Fortaleza.....	57
5.8 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar máxima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.....	58
5.9 - Procedimento dos ajustes dos parâmetros de entrada do modelo SUPIM.....	60

5.10 - Variação diurna da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ sobre Fortaleza prevista pelo modelo de Medeiros (1995) e ajustada para ser usada no modelo SUPIM.....	63
6.1 - (a) Derivas eletromagnéticas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, (b) vento ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza. Efeitos das derivas e do fluxo solar EUV, durante verão de atividade solar mínima.....	67
6.2 - Efeitos das mudanças no modelo de deriva MDA sobre foF2 e hmF2 de Fortaleza. (a) Derivas eletromagnéticas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, (b) vento ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2.....	69
6.3 - Derivas eletromagnéticas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das derivas e do fluxo solar EUV.....	73
6.4 - Deriva eletromagnética $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos da Anomalia do Atlântico Sul.....	77
6.5 - Taxa de produção devido a elétrons monoenergéticos de vários níveis de energia. Fonte: Rees (1963).....	80
6.6 - Deriva eletromagnética $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações do vento local.....	83
6.7 - Variações latitudinais dos ventos termosféricos em 300 km e foF2 ao longo do meridiano magnético de Cachoeira Paulista.....	85

6.8 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos local e do setor conjugado.....	86
6.9 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos local e do setor conjugado.....	89
6.10 - Ilustração qualitativa dos efeitos dos ventos e dos campos elétrico e geomagnético sobre a ionosfera de Cachoeira Paulista e de Fortaleza.....	93
6.11 - Comparação entre o vento calculado neste trabalho (vento ajustado) e o vento obtido por Medeiros (1995) para verão de atividade solar mínima em Cachoeira Paulista.....	95
6.12 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.....	96
6.13 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.....	97
6.14 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.....	98
6.15 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para verão de atividade solar mínima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.....	100

6.16 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças da deriva eletromagnética $E \times B$	102
6.17 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$	104
6.18 - Deriva eletromagnética $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos da Anomalia do Atlântico Sul.....	106
6.19 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.....	108
6.20 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos..	109
6.21 - Comparação entre o vento ajustado, o vento de Medeiros (1995), o vento do modelo HWM90 e o vento observado. Verão de atividade solar máxima.....	111
6.22 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas para verão de atividade solar máxima.....	112
6.23 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de verão de atividade solar máxima.....	113

6.24 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de verão de atividade solar máxima.....	114
6.25 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para verão de atividade solar máxima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.....	116
6.26 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$	118
6.27 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$	119
6.28 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos.....	121
6.29 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos	122
6.30 - Comparação entre o vento ajustado e o vento obtido por Medeiros (1995) para inverno de atividade solar mínima em Cachoeira Paulista.....	124
6.31 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Caso de inverno de atividade solar mínima.....	125
6.32 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de inverno de atividade solar mínima.....	126

6.33 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de inverno de atividade solar mínima.....	127
6.34 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para inverno de atividade solar mínima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.....	129
6.35 - Derivas eletromagnéticas, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$	130
6.36 - Derivas eletromagnéticas, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva.....	131
6.37 - Deriva eletromagnética, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.....	133
6.38 - Deriva eletromagnética, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.....	134
6.39 - Comparação entre o vento ajustado, vento obtido por Medeiros (1995), o vento do modelo HWM90 e o vento observado em Cachoeira Paulista para inverno de atividade solar máxima.....	136
6.40 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Inverno de atividade solar máxima.....	138
6.41 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de inverno de atividade solar máxima.....	139

6.42 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de inverno de atividade solar máxima.....	140
6.43 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para inverno de atividade solar máxima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.....	141

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Reações químicas e suas taxas.....	14
4.1 - Comprimentos de ondas da radiação EUV divididos em 37 grupos.....	39

LISTA DE SIGLAS

AAS	Anomalia do Atlântico Sul
CET	Conteúdo Eletrônico Total
CP	Cachoeira Paulista
EUV	Extremo Ultra-Violeta
euvt	extremo ultra-violeta produzido por Tobiska (1990)
FAIM	Fully Analytic Ionospheric Model
FZ	Fortaleza
GPS	Global Positioning System
HWM	Horizontal Wind Model
ICED	Ionospheric Conductivity and Electron Density
IRI	International Reference Ionosphere Model
IGRF	International Geomagnetic Reference Field
MDA	Modelo de Deriva Ajustado
MDB	Modelo de Deriva obtido pelo método de Batista et al. (1996)
MDJ	Modelo de Deriva obtido pelo radar de Jicamarca
MDHA1	Modelo de Deriva para Huancayo Ajuste 1
MSIS	Mass Spectrometer and Incoherent Scatter
MVA	Modelo de Vento Ajustado
MVASC	Modelo de Vento Ajustado no Setor Conjugado
MVH	Modelo de Vento fornecido pelo modelo do Hedin et al. (1991)
MVHSC	Modelo de Vento fornecido pelo modelo do Hedin et al. (1991) no Setor Conjugado
SLIM	Semi-Empirical Low Latitude Ionospheric Model
SUPIM	Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
VMM	Vento Meridional Magnético

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os modelos ionosféricos têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento do nosso entendimento dos processos físicos e químicos da atmosfera superior da Terra. Através das modelagens tem sido mais fácil entender a eletrodinâmica da ionosfera, analisando os efeitos dos ventos termosféricos, dos campos elétricos e da atmosfera neutra no plasma desta região. Por outro lado, o conhecimento da física da ionosfera é importante para se estabelecer a sua influência nas propagações de ondas eletromagnéticas ionosféricas e trans-ionosféricas, ou seja, nas telecomunicações. Uma aplicação muito promissora, entre várias, é o estudo do efeito da ionosfera no sistema Global Positioning System (GPS), o qual permite via recepção de sinais de satélites em Very High Frequency (VHF) ou Ultra High Frequency (UHF) a localização de determinado objeto no espaço ou na superfície da Terra dentro de uma certa resolução, que depende da recepção e do conhecimento da ionosfera. Este sistema GPS já é muito utilizado em navegação aérea e marítima.

Desde antes de 1970 muitos modelos ionosféricos, simples e sofisticados, têm sido desenvolvidos e aplicados para explicar uma extensa variedade de fenômenos ionosféricos. Existem três tipos de modelagem ionosférica que são identificados como:

i) *Modelos empíricos* - Nestes modelos, funções empíricas são derivadas a partir de observações ionosféricas globais para calcular a frequência crítica da região F e sua altura, variação da densidade de ionização e da densidade eletrônica com a altura, parâmetros estes que podem ser obtidos em função da hora local, da estação do ano e do número de manchas solares.

ii) *Modelos matemáticos* - Os modelos matemáticos calculam a distribuição global da ionização usando apenas as leis da física, produzindo informações similares às dos modelos empíricos.

iii) *Modelos semi-empíricos* - Estes modelos são construídos através da combinação dos modelos matemático e empírico. Neste caso, nas regiões da Terra onde não existem dados experimentais, particularmente sobre os oceanos, as informações dos modelos matemáticos são usadas para complementar a representação empírica.

Existem vários modelos empíricos e semi-empíricos que podem ser usados para estudar a ionosfera da Terra. Os mais conhecidos são: o Semi-Empirical Low Latitude Ionospheric Model (SLIM), o International Reference Ionosphere Model (IRI), o Bent model, o Ionospheric Conductivity and Electron Density (ICED), o Penn State Model, o Fully Analytic Ionospheric Model (FAIM) e o Hybrid Model. Uma descrição geral sobre cada um destes modelos está no trabalho de Brown et al. (1991). Estes autores também fazem uma comparação entre os dados de foF2 (frequência do pico da região F ionosférica) e conteúdo eletrônico total ionosférico (CET) previstos por estes modelos e valores observados. Os resultados da comparação mostraram que, embora a maioria dos modelos representem muito bem os dados de foF2, nenhum deles representa bem o CET. Isto é causado provavelmente por uma representação imprecisa do perfil da densidade eletrônica na parte do topo da ionosfera calculada por cada modelo (Brown et al., 1991).

Os primeiros modelos matemáticos para a ionosfera foram desenvolvidos na década de 1960. Depois deste período vários modelos têm sido desenvolvidos e a maioria apresenta contribuições adicionais com a finalidade de tornar seus resultados mais precisos. Atualmente, os modelos matemáticos mais precisos são aqueles que resolvem o sistema de equações composto pelas equações da continuidade, movimento e equilíbrio de energia. A solução deste sistema de equações deve ser feita para os íons mais importantes da ionosfera e também para os elétrons, fornecendo suas

concentrações e temperaturas. Outro fator importantíssimo para tornar os modelos matemáticos mais sofisticados é a consideração do campo geomagnético como um dipolo excêntrico. Ainda neste capítulo, vamos mostrar a evolução deste tipo de modelagem ionosférica, detalhando apenas as suas principais características.

A distribuição do plasma na região F ionosférica de baixas latitudes é fortemente dependente da deriva eletromagnética $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ (deriva vertical) e da velocidade do vento neutro, as quais contribuem para a formação da Anomalia Equatorial. Uma breve descrição deste fenômeno será dada no Capítulo 3. Já é bem conhecido que os picos da anomalia e suas posições latitudinais aumentam com o aumento da deriva vertical na região do equador (Hanson e Moffett, 1966; Sterling et al., 1969; Anderson, 1973a,b) e que as assimetrias da anomalia em torno do equador magnético são uma consequência da velocidade do vento neutro da região F na direção dos meridianos magnéticos (Anderson, 1973a,b; Bittencourt e Tinsley, 1976). Tanto a velocidade de deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ como a velocidade do vento neutro paralela aos meridianos magnéticos, são dependentes da configuração do campo geomagnético e do ângulo de declinação magnética (Batista et al., 1986; Rishbeth, 1972). Todos estes parâmetros são indispensáveis no desenvolvimento das modelagens ionosféricas e serão discutidos nos próximos capítulos.

A maior parte dos estudos teóricos da ionosfera e plasmasfera da Terra, publicados anteriormente, consideram o campo geomagnético como um dipolo centrado, ou seja, um campo dipolar cujo eixo é alinhado e centrado com o eixo de rotação da Terra (Sterling et al., 1969; Young et al., 1980; De Paula, 1987; Bailey e Sellek, 1990). Então, as diferenças longitudinais na Anomalia Equatorial que podem ser causadas pelas diferenças longitudinais na configuração do campo geomagnético não podem ser investigadas com o uso destes modelos. A representação mais real do campo geomagnético é a que usa um dipolo excêntrico, ou seja, um campo dipolar com eixo inclinado e deslocado com relação ao eixo de rotação da Terra (Bailey et al., 1993).

Um dos primeiros modelos teóricos a ser desenvolvido foi o modelo de Hanson e Moffett (1966). Este modelo assumiu a equação da continuidade independente do tempo e o campo geomagnético foi considerado como o campo de um dipolo centrado. Também foi considerado um único processo de perda do íon O^+ . O modelo de Hanson e Moffett produz valores apenas das concentrações do íon O^+ e dos elétrons ao meio-dia. Estas considerações também foram seguidas por Sterling et al. (1969), Anderson (1973a,b), Chan e Walker (1984) e De Paula (1987), mas eles introduziram a dependência com o tempo na equação da continuidade e todos consideraram dois processos de perdas do íon O^+ , exceto Chan e Walker (1984) que usaram cinco. Mais tarde, Chan e Walker incluíram os íons N_2^+ , O_2^+ e NO^+ na modelagem (Walker e Chan, 1989). Anderson (1973a,b) no desenvolvimento do seu modelo usou os potenciais de Euler para descrever o campo geomagnético. Com isso, este modelo tornou-se mais preciso do que os modelos que consideram o campo geomagnético como um dipolo centrado, pois foram incluídas as diferenças longitudinais deste campo.

Bonelli (1995) construiu um modelo ionosférico auto-consistente, em que a equação da continuidade para os elétrons e a equação do vento (Heelis et al., 1974) são resolvidas simultaneamente e em forma explícita. Este modelo considera o campo geomagnético igual ao campo de um dipolo centrado.

Bittencourt (1975, 1996) desenvolveu um modelo ionosférico de baixas latitudes adotando o campo geomagnético similar ao campo de um dipolo inclinado em relação ao eixo de rotação da Terra. Este modelo calcula as concentrações para os íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ e para os elétrons.

Wells (1988) apresentou um modelo onde as equações da continuidade, do movimento e da energia são acopladas para que sejam calculadas as concentrações dos íons O^+ , H^+ e dos elétrons. A equação da energia foi usada para calcular as temperaturas dos íons O^+ , H^+ e dos elétrons. Entretanto, todos os modelos

citados anteriormente consideram as temperaturas dos íons iguais à temperatura da atmosfera neutra. Wells considerou o campo geomagnético igual ao campo de um dipolo centrado. Bailey e Sellek (1990) desenvolveram um modelo semelhante ao modelo de Wells, mas incluíram os íons He^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ . Watanabe et al. (1995), baseando-se no modelo do Bailey, também construíram um modelo ionosférico com as mesmas características do modelo de Wells.

Os modelos teóricos mais completos e mais conhecidos foram desenvolvidos por Sojka e Schunk (1985), Roble et al. (1987) e Fuller-Rowell et al. (1987). Apesar destes modelos apresentarem condições de serem mais precisos, pois consideram o campo geomagnético como o campo de um dipolo excêntrico e incluem no mínimo cinco íons, eles possuem algumas restrições, tais como: tanto o modelo de Sojka e Schunk como o modelo de Fuller-Rowell et al. são auto-consistentes apenas para altas latitudes. Para baixas latitudes eles incorporam os modelos de Sterling et al. (1969) e de Chiu (1975), respectivamente. O modelo de Chiu é empírico e usa dados de foF2 registrados em várias estações, durante épocas diferentes, para calcular a densidade eletrônica ionosférica. O modelo de Roble et al. (1987) resolve a equação da continuidade apenas para o íon O^+ . Os outros íons (NO^+ , O_2^+ , N_2^+ e N^+) são obtidos usando os valores de O^+ e assumindo a condição de equilíbrio fotoquímico.

Bailey et al. (1993) desenvolveu um modelo ionosférico de baixas latitudes. Este modelo é chamado de SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) e considera um dipolo excêntrico para representar o campo geomagnético e usa o acoplamento entre as equações da continuidade, movimento e equilíbrio de energia para calcular as distribuições das densidades e das temperaturas dos íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ e dos elétrons, em função da altura. De acordo com o que foi mencionado anteriormente, o modelo SUPIM apresenta todas as características de um modelo extremamente sofisticado. Com isso os resultados deste modelo tornam-se bastante precisos. É importante mencionar que o SUPIM será usado no desenvolvimento deste trabalho.

O principal objetivo deste trabalho é determinar os parâmetros ionosféricos como deriva vertical, ventos termosféricos, frequência crítica (f_oF2) e altura da região F (h_mF2) sobre regiões brasileiras. Estes parâmetros são calculados através do modelo SUPIM e baseando-se em dados experimentais. Os parâmetros são calculados para atividade solar mínima e máxima sobre as estações de Fortaleza (4° S, 38° O) e Cachoeira Paulista (22.5° S, 45° O). Para cada período de atividade solar fizemos um estudo do comportamento da ionosfera durante verão e inverno. É importante enfatizar que os ventos, f_oF2 e h_mF2 foram calculados simultaneamente sobre Fortaleza e Cachoeira Paulista.

A Figura 1.1 mostra as localizações das estações de Fortaleza e Cachoeira Paulista sobre o território brasileiro e também mostra a diferença entre as coordenadas geográficas e magnéticas. As coordenadas magnéticas foram calculadas pelo modelo de campo geomagnético IGRF90 (International Geomagnetic Reference Field).

Sabemos que a ionosfera sobre Cachoeira Paulista é significativamente afetada pelos efeitos da Anomalia Geomagnética Brasileira ou também chamada de Anomalia do Atlântico Sul (Batista, 1975). Com a finalidade de tornar mais precisa a representação dos parâmetros ionosféricos sobre a estação de Cachoeira Paulista incluímos os efeitos da Anomalia Geomagnética Brasileira nos cálculos efetuados pelo modelo SUPIM. Com isso, também neste trabalho estudaremos os efeitos desta anomalia sobre os dados de f_oF2 registrados em Cachoeira Paulista.

No Capítulo 2 apresentaremos a teoria usada nas modelagens ionosféricas, descrevendo as equações e mostrando as características físicas para o desenvolvimento de uma modelagem ionosférica.

No Capítulo 3 falaremos sobre a Anomalia Equatorial e Anomalia do Atlântico Sul. Estas anomalias exercem grande influência sobre a ionosfera brasileira.



Fig. 1.1 - Posições das estações de coleta de dados, usados neste trabalho, e diferenças entre as coordenadas geográficas e magnéticas sobre a território brasileiro.

No Capítulo 4 vamos apresentar o modelo SUPIM e mostrar resultados de simulações de $hmF2$ e de $foF2$ efetuados com o SUPIM para a estação de Huancayo, Peru.

No Capítulo 5 será mostrado os dados experimentais e a forma como eles foram selecionados. Também neste capítulo será definido os critérios para se fazer mudanças dos parâmetros de entrada do modelo SUPIM usadas no desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 6 apresentaremos e discutiremos todos os resultados deste estudo sobre a ionosfera de baixas latitudes no Brasil.

Finalmente, no Capítulo 7 destacaremos as principais conclusões encontradas no desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2

TEORIA USADA NAS MODELAGENS IONOSFÉRICAS

2.1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos modelos ionosféricos, os mais recentes, consiste na resolução de um sistema de equações composto pelas equações da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia. Esse sistema de equações é resolvido separadamente para os íons mais importantes da composição do plasma ionosférico, tais como: os íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ . O ponto de referência usado no desenvolvimento das modelagens é o centro do dipolo que representa o campo geomagnético e os cálculos são efetuados ao longo das linhas de força deste campo. Portanto, os resultados saem distribuídos tanto em latitude como em altura e isso permite fazer valiosos estudos ionosféricos bem como entender a formação da Anomalia Equatorial.

Como foi visto no Capítulo 1, existem vários modelos publicados. Todos eles seguem a mesma técnica mencionada acima, ou seja, os cálculos são efetuados ao longo das linhas de campo e também oferecem detalhes sobre o tratamento matemático para as soluções das equações (Sterling et al., 1969; Anderson, 1973a,b; Bittencourt, 1975; De Paula, 1987; Bailey and Sellek, 1990; Bailey et al., 1993; Souza, 1993). Neste capítulo vamos apenas descrever as equações e as características físicas para o desenvolvimento de uma modelagem ionosférica.

2.2 - A EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A equação da continuidade para o i -ésimo íon é dada por

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

onde t é o tempo, N_i , \mathbf{V}_i , P_i e L_i são concentração, velocidade, produção e perda do íon i , respectivamente. Decompondo o movimento do íon nas componentes paralela e perpendicular ao campo geomagnético podemos fazer $\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_i^{\parallel} + \mathbf{V}_{dc}$, onde \mathbf{V}_i^{\parallel} é a velocidade do íon paralela ao campo e \mathbf{V}_{dc} é a resultante da soma entre a velocidade de deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ e a velocidade de corotação, e com isso temos

$$\frac{dN_i}{dt} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}) = P_i - L_i - N_i \nabla \cdot \mathbf{V}_{dc} \quad (2.2)$$

onde

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{\partial N_i}{\partial t} + \mathbf{V}_{dc} \cdot \nabla N_i.$$

A divergência do fluxo paralelo ao campo magnético ($N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}$) é dada por (De Paula, 1987):

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}) &= \nabla \cdot [(N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}) \hat{\mathbf{t}}] \\ &= \hat{\mathbf{t}} \cdot \nabla (N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}) + N_i \mathbf{V}_i^{\parallel} \nabla \cdot \hat{\mathbf{t}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde $\hat{\mathbf{t}}$ ($\hat{\mathbf{t}} = \sin I \hat{\mathbf{r}} + \cos I \hat{\theta}$) é o vetor unitário tangente ao campo geomagnético (\mathbf{B}) como mostra a Figura 2.1. A Figura 2.1 mostra a geometria de uma linha de campo magnético dipolar. Também nesta figura temos que: r é a distância radial, r_{eq} é a distância equatorial e radial da linha de campo, θ é a colatitude, g é a aceleração da gravidade, $\hat{\mathbf{r}}$ é

o vetor unitário de r , $\hat{\theta}$ é o vetor unitário de θ , \hat{n} o vetor unitário normal à linha de campo e I é a inclinação magnética. A inclinação magnética é o ângulo entre o campo geomagnético e a superfície da Terra.

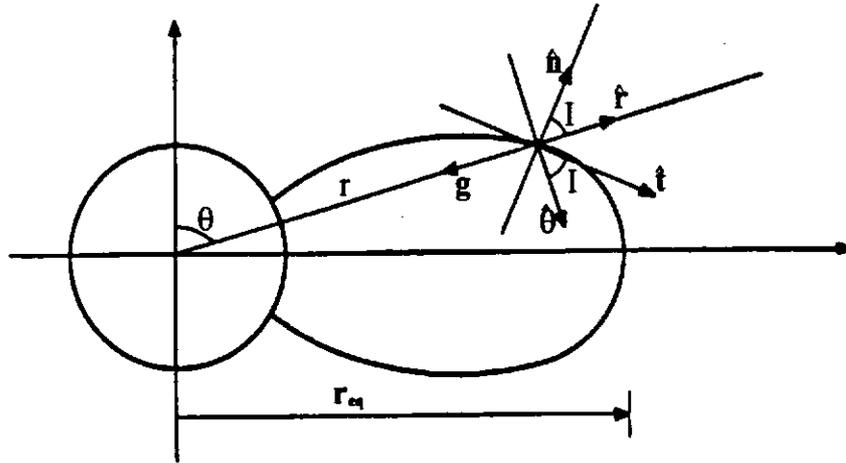


Fig. 2.1 - Geometria de uma linha de campo dipolar usada para definir o vetor unitário paralelo a \mathbf{B} .

Observando a Figura 2.1 e usando a equação do campo geomagnético, considerando um dipolo centrado, podemos ver que (veja, por exemplo, De Paula, 1987; Bailey e Sellek, 1990)

$$\sin I = \frac{B_r}{B} = \frac{2 \cos \theta}{\sigma}, \quad \cos I = \frac{B_\theta}{B} = \frac{\sin \theta}{\sigma}$$

onde $\sigma = (1 + 3 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$. Com esses resultados ($\sin I$, $\cos I$) e calculando $\hat{t} \cdot \nabla$, $\nabla \cdot \hat{t}$ para serem substituídos em (2.3) temos

$$\nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i^{\parallel}) = \frac{1}{A} \frac{\partial A N_i V_i^{\parallel}}{\partial s}, \quad (2.4)$$

onde:

$$A = \frac{r^3}{(1 + 3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{e} \quad \frac{\partial}{\partial s} = \sin I \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\cos I}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}.$$

A é a área da seção transversal do tubo de fluxo magnético (Bailey e Sellek, 1990) e s é a distância ao longo da linha de campo. Finalmente substituindo (2.4) em (2.2) a equação da continuidade torna-se da seguinte forma:

$$\frac{dN_i}{dt} + \frac{1}{A} \frac{\partial AN_i V_i^{\parallel}}{\partial s} = P_i - L_i - N_i \nabla \cdot \mathbf{V}_{dc} \quad (2.5)$$

Para determinar o divergente de \mathbf{V}_{dc} ($\nabla \cdot \mathbf{V}_{dc}$) usa-se a equação que representa a linha de campo magnético ($r = r_{eq} \sin^2 \theta$) e faz-se $\mathbf{V}_{dc} = \mathbf{V}^{\perp} + \mathbf{V}^{\phi}$, onde \mathbf{V}^{\perp} e \mathbf{V}^{ϕ} são as componentes zenital e zonal de \mathbf{V}_{dc} , respectivamente. Os resultados são (De Paula, 1987; Bailey e Sellek, 1990):

$$\mathbf{V}^{\perp} = \frac{V_{eq}^{\perp} \sin^3 \theta}{\sigma^2} (\sin \theta \hat{r} - 2 \cos \theta \hat{\theta}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}^{\perp} = \frac{\partial V_{eq}^{\perp}}{\partial r_{eq}} + \frac{4V_{eq}^{\perp} (6\cos^6 \theta - 3\cos^4 \theta - 4\cos^2 \theta + 1)}{r_{eq} \sin^2 \theta (1 + 3\cos^2 \theta)^2}. \quad (2.7)$$

V_{eq}^{\perp} é a velocidade de deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ sobre o equador magnético. A componente zonal (\mathbf{V}^{ϕ}) e o seu divergente são calculados através das seguintes equações (Bailey e Sellek, 1990):

$$\mathbf{V}^{\phi} = V_{eq}^{\phi} \sin^3 \theta \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}^{\phi} = \frac{1}{r_{eq}} \frac{\partial V_{eq}^{\phi}}{\partial \phi}, \quad (2.9)$$

onde V_{eq}^{ϕ} é o valor equatorial de V^{ϕ} .

2.2.1 - TAXA DE PRODUÇÃO E DE PERDA

A taxa de produção do i -ésimo íon (P_i) por fotoionização do i -ésimo constituinte neutro é dada por

$$P_i = \sum_{\lambda} \Phi(\lambda) \sigma_i(\lambda) n_i \exp\left(-\sum_j \sigma_j(\lambda) n_j H_j \text{Ch}_j(\chi)\right) \quad (2.10)$$

onde:

$\Phi(\lambda)$ = intensidade da radiação do fluxo solar EUV,

$\sigma_i(\lambda)$ = seção transversal de fotoionização do i -ésimo constituinte neutro,

n_i = concentração do i -ésimo constituinte neutro,

$\sigma_j(\lambda)$ = seção transversal de fotoabsorção do j -ésimo constituinte neutro,

n_j = concentração do j -ésimo constituinte neutro,

H_j = altura de escala do j -ésimo constituinte neutro,

$\text{Ch}_j(\chi)$ = função de Chapman do j -ésimo constituinte neutro,

χ = ângulo zenital solar.

\sum_{λ} é o somatório sobre a faixa de comprimentos de onda da radiação ionizante

\sum_j é o somatório sobre os constituintes neutros.

Um dos mais importantes processos de perda dos íons ionosféricos ocorre através das reações químicas. Esse tipo de perda pode ser determinada usando a seguinte equação (Banks e Kockarts, 1973)

$$L_i = \beta_i N_i \quad (2.11)$$

onde β_i é chamado de coeficiente de perda, o qual é determinado a partir de uma seleção das reações mais importantes que ocorrem na ionosfera. A Tabela 2.1 mostra um

exemplo destas reações usadas numa modelagem ionosférica desenvolvida por Bailey e Sellek (1990).

TABELA 2.1 - REAÇÕES QUÍMICAS E SUAS TAXAS

Reação	Taxa de Reação ($\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$)	Referência
$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	$1,533 \times 10^{-12} - 5,920 \times 10^{-13} \frac{T(\text{O}^+)}{300}$ $+ 8,600 \times 10^{-14} \left(\frac{T(\text{O}^+)}{300} \right)^2$ $300 \leq T(\text{O}^+) \leq 1700 \text{ K}$	Torr e Torr (1979)
	$2,730 \times 10^{-12} - 1,155 \times 10^{-12} \frac{T(\text{O}^+)}{300}$ $+ 1,483 \times 10^{-13} \left(\frac{T(\text{O}^+)}{300} \right)^2$ $1700 < T(\text{O}^+)$	Torr e Torr (1979)
$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{O}$	$2,82 \times 10^{-11} - 7,74 \times 10^{-12} \frac{T(\text{O}^+)}{300}$ $+ 1,073 \times 10^{-12} \left(\frac{T(\text{O}^+)}{300} \right)^2$ $- 5,17 \times 10^{-14} \left(\frac{T(\text{O}^+)}{300} \right)^3$ $+ 9,65 \times 10^{-16} \left(\frac{T(\text{O}^+)}{300} \right)^4$	Torr e Torr (1979)
$\text{O}^+ + \text{H} \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}$	$2,50 \times 10^{-11} T_n^{0,5}$	Raitt et al., (1975)
$\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}$	$\frac{8}{9} \times 2,5 \times 10^{-11} T^{0,5}(\text{H}^+)$	Raitt et al., (1975)
$\text{He}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{N}_2^+$ $\rightarrow \text{He} + \text{N}^+ + \text{N}$	$1,20 \times 10^{-9}$	Ferguson (1973, citado por Bailey e Sellek, 1990)
$\text{He}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}^+ + \text{O}$	$1,10 \times 10^{-9}$	Ferguson (1973, citado por Bailey e Sellek, 1990)
$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$	$1,40 \times 10^{-10} \left(\frac{300}{T(\text{O}^+)} \right)^{0,44}$	Torr e Torr (1979)
$\text{O}_2^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$1,60 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e} \right)^{0,55}$	Torr e Torr (1979)
$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{O}_2$	$4,40 \times 10^{-10}$	Torr e Torr (1979)
$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$4,20 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e} \right)^{0,85}$	Torr e Torr (1979)

FONTE: Bailey e Sellek (1990), p. 175.

2.3 - A EQUAÇÃO DO MOVIMENTO E DIFUSÃO DOS ÍONS

A equação do movimento para o i -ésimo íon, levando em consideração que o transporte do plasma ionosférico ocorre apenas ao longo das linhas do campo geomagnético e que a ionosfera se encontra em estado estacionário e é composta pelos íons i , j e k , é dada por (Quegan et al., 1981)

$$\begin{aligned}
 0 = & -g \operatorname{sen} I - \frac{kT_i}{m_i N_i} \frac{\partial N_i}{\partial s} - \frac{kT_e}{m_i N_e} \frac{\partial N_e}{\partial s} \\
 & - \frac{k}{m_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial s} - \frac{k}{m_i} \left[\beta_i^* \frac{\partial T_i}{\partial s} - \beta_{ij}^* \frac{\partial T_j}{\partial s} - \beta_{ik}^* \frac{\partial T_k}{\partial s} \right] \\
 & - \left[\nu_{ij}(1 - \Delta_{ij}) - R_{ijk} + R_{ikj} \right] (V_i^{\parallel} - V_j^{\parallel}) \\
 & - \left[\nu_{ik}(1 - \Delta_{ik}) - R_{ikj} + R_{ijk} \right] (V_i^{\parallel} - V_k^{\parallel}) \\
 & - \nu_m (V_i^{\parallel} - U \cos I)
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

onde g é a aceleração devido a gravidade, T_i e T_e são as temperaturas dos íons e dos elétrons, respectivamente, k é a constante de Boltzmann, m_i é a massa do íon, $N_e = \sum_i N_i$ é a concentração eletrônica, ν_{ij} a frequência de colisão entre o i -ésimo e o j -ésimo íon, ν_m a soma das frequências de colisões entre o i -ésimo íon e as partículas neutras, U é a componente meridional da velocidade do vento neutro. As expressões para os coeficientes de difusão térmica do íon- i (β_i^* , β_{ij}^* , β_{ik}^*) e para Δ_{ij} , Δ_{ik} , R_{ijk} , R_{ikj} , bem como todo o procedimento para a dedução da equação acima são apresentados no trabalho de Quegan et al. (1981).

Como pode ser visto, no desenvolvimento da equação do movimento foram considerados apenas três íons: i , j e k . Portanto, quando se deseja incluir mais íons nas modelagens, tem sido comum fazer a seguinte combinação: se os íons considerados são O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ e NO^+ temos

- i) quando $i = O^+$ então $j = H^+$ e $k = He^+$
- ii) quando $i = H^+$ então $j = O^+$ e $k = He^+$
- iii) quando $i = He^+$ ou um íon molecular então $j = O^+$ e $k = H^+$.

A equação de difusão para os íons (difusão ao longo das linhas de campo geomagnético) é determinada usando a equação (2.12) e fazendo $N_e = \sum_i N_i$ (neutralidade de cargas). Então, temos (Bailey e Sellek, 1990)

$$N_i V_i^{\parallel} = -R_i \frac{\partial N_i}{\partial s} - S_i N_i \quad (2.13)$$

onde

$$R_i = \frac{\frac{k}{m_i} \left(T_i + T_e \frac{N_i}{N_e} \right)}{(v_{ij}(1 - \Delta_{ij}) + v_{ik}(1 - \Delta_{ik}) + v_{im})}$$

$$S_i = \left(g \sin I + \frac{k T_e}{m_i N_e} \sum_{j \neq i} \frac{\partial N_j}{\partial s} + \frac{k}{m_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial s} + \frac{k}{m_i} \left[\beta_i^* \frac{\partial T_i}{\partial s} - \beta_{ij}^* \frac{\partial T_j}{\partial s} - \beta_{ik}^* \frac{\partial T_k}{\partial s} \right] \right. \\ \left. - \left[v_{ij}(1 - \Delta_{ij}) - R_{ijk} + R_{ikj} \right] V_i^{\parallel} - \left[v_{ik}(1 - \Delta_{ik}) - R_{ikj} + R_{ijk} \right] V_k^{\parallel} \right. \\ \left. - v_{im} U \cos I \right) / (v_{ij}(1 - \Delta_{ij}) + v_{ik}(1 - \Delta_{ik}) + v_{im}).$$

2.4 - A EQUAÇÃO DO EQUILÍBRIO DE ENERGIA PARA ÍONS E ELÉTRONS

A equação do equilíbrio de energia do plasma, também considerando que este plasma está distribuído ao longo das linhas de campo, é representada por (Bailey et al., 1993)

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} k N_i \left(\frac{dT_i}{dt} + V_i^{\parallel} \frac{\partial T_i}{\partial s} \right) = Q_i - k N_i T_i \left(\frac{1}{A} \frac{\partial A V_i^{\parallel}}{\partial s} + \nabla \cdot \mathbf{V}_{dc} \right) \\ + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial s} \left(A \kappa_i \frac{\partial T_i}{\partial s} \right) + F_m. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Nesta equação, o índice i é igual a íons e elétrons, Q_i é a soma das taxas de aquecimentos por colisões (Bailey e Sellek, 1990), κ_i é a condutividade térmica (Banks e Kockarts, 1973) e

$$F_m = \sum_n \frac{m_i m_n}{m_i + m_n} v_{in} N_i \left[(V_i^{\parallel} - U \cos I)^2 + (V^{\perp} - U \sin I)^2 + (V^{\phi})^2 \right] \quad (2.15)$$

onde \sum_n é o somatório sobre os constituintes neutros e m_n é a massa do n -ésimo elemento neutro.

2.5 - SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES

As equações da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia são resolvidas numericamente ao longo das linhas de campo magnético, partindo de uma altitude base (h_b) num dos hemisférios até uma altitude similar no hemisfério conjugado. Nestas altitudes bases, as concentrações dos íons podem ser obtidas da condição de equilíbrio químico, $N_i = P_i / \beta_i$ onde β_i é o coeficiente de perda do i -ésimo íon, e as temperaturas dos íons e elétrons são obtidas da condição $Q_i = 0$. Estas

condições geralmente são adotadas como condições iniciais e de contornos nos desenvolvimentos das modelagens.

2.5.1 - TRANSFORMAÇÃO DAS COORDENADAS

Para facilitar as soluções das equações, normalmente é feita uma transformação de coordenadas. Kendall (1962) desenvolveu o sistema de coordenadas (p, q, t) , o qual é válido para um campo magnético dipolar, e é particularmente vantajoso na presença da deriva eletromagnética. Este sistema é definido por

$$p = \frac{r}{r_0 \sin^2 \theta} \quad (2.16)$$

$$q = \frac{r_0^2 \cos \theta}{r^2} \quad (2.17)$$

onde r_0 é o raio de Terra. Para um campo magnético dipolar temos (Bailey e Sellek, 1990):

$$\frac{\partial}{\partial s} = -\frac{2(1+3\cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}}{r_0} \left(\frac{r_0}{R}\right)^3 \frac{\partial}{\partial q} = \eta \frac{\partial}{\partial q} \quad (2.18)$$

Aplicando esta transformação sobre as equações da continuidade, difusão e equilíbrio de energia ((2.5), (2.13), (2.14)) obtemos

$$\frac{dN_i}{dt} = P_i - \alpha_i N_i - \eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{N_i V_i^{\parallel}}{\eta} \right) \quad (2.19)$$

$$N_i V_i^{\parallel} = -\eta R_i \frac{\partial N_i}{\partial q} - S_i N_i \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}kN_i \left(\frac{dT_i}{dt} + V_i^{\parallel} \eta \frac{\partial T_i}{\partial q} \right) = Q_i - kN_i T_i \left[\eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{V_i^{\parallel}}{\eta} \right) + \nabla \cdot \mathbf{V}_{dc} \right] \\ + \eta^2 \frac{\partial}{\partial q} \left(k_i \frac{\partial T_i}{\partial q} \right) + F_{in} \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde, $\alpha_i = \beta_i + \nabla \cdot \mathbf{V}_{dc}$.

A coordenada q , para um incremento constante Δq , proporciona soluções com mais pontos em altas altitudes da linha de campo do que nas altitudes da região F. Entretanto, experimentos numéricos têm mostrado que, para se obter uma solução numérica mais precisa, os pontos devem ficar mais juntos nas altitudes da região F e nas altitudes maiores podem ficar mais separados, proporcionando pequeno efeito sobre a precisão. Então, para superar este problema, mais uma transformação deve ser feita, onde a coordenada q é substituída por (Sterling et al., 1969)

$$x = \frac{\sinh(\Gamma q)}{\sinh(\Gamma q_{\max})} \quad (2.22)$$

onde,

$$q_{\max} = \left(\frac{r_0}{h_b} \right)^2 \left(1 - \frac{h_b}{pr_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Γ = parâmetro de distribuição de pontos

h_b = altitude mais baixa ao longo da linha de campo.

CAPÍTULO 3

A ANOMALIA EQUATORIAL E A ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo vamos descrever duas anomalias que influenciam a ionosfera da região brasileira. A Anomalia Equatorial surge devido às interações dos campos elétricos com o campo geomagnético na ionosfera equatorial. Já a Anomalia do Atlântico Sul caracteriza-se por um valor mínimo na intensidade total do campo geomagnético que se estende sobre parte da costa brasileira e sobre o Atlântico Sul.

Antes de descrever o que é a Anomalia Equatorial é necessário explicar os mecanismos de geração e variação dos campos elétricos e derivas de plasma ionosférico de baixas latitudes. Estes parâmetros são essenciais para o entendimento da formação da Anomalia Equatorial, a qual é gerada através dos efeitos do sistema eletrodinâmico da ionosfera terrestre. Em adição, as derivas ionosféricas são parâmetros indispensáveis nas modelagens da termosfera, da ionosfera e da protonosfera. Os campos elétricos ionosféricos globais e as correntes são resultantes da ação dos dínamos ionosféricos e magnetosféricos.

Em médias e baixas latitudes, e durante períodos geomagneticamente calmos, as derivas de plasma ionosférico são produzidas devido a presença de campos elétricos gerados pelos dínamos das regiões E e F da ionosfera. Durante períodos perturbados, campos elétricos ionosféricos de baixas latitudes podem ser significativamente afetados por processos que perturbam os dínamos ionosféricos (Fejer et al., 1991).

Em seguida serão discutidos os dinamos ionosféricos e apresentados alguns aspectos teóricos e experimentais do movimento do plasma ionosférico de baixas latitudes. Também será discutido o acoplamento elétrico das regiões E e F da ionosfera equatorial, o qual é responsável por variações no campo elétrico ao amanhecer e ao entardecer.

3.2 - O DÍNAMO DA REGIÃO F

O aquecimento da termosfera, o qual é causado pela absorção da radiação solar, produz gradientes horizontais de pressão que, por sua vez, dão origem aos ventos termosféricos. Esses ventos induzem movimentos às partículas carregadas da região F da ionosfera. Então, surge a deriva dos íons e elétrons ao longo das linhas de campo geomagnético com intensidade igual à componente do vento na direção do campo. Por outro lado, existe um movimento bem menos intenso na direção perpendicular tanto ao vento como ao campo, cuja velocidade é dada por:

$$\mathbf{V} = \frac{\nu\omega}{\nu^2 + \omega^2} \frac{\mathbf{U} \times \mathbf{B}}{\mathbf{B}}, \quad (3.1)$$

onde:

\mathbf{V} é a velocidade das partículas carregadas (íons ou elétrons),

\mathbf{U} é a velocidade do vento neutro,

\mathbf{B} é o campo magnético da Terra,

ν é a frequência de colisão entre partículas neutras e carregadas e

$\omega = q\mathbf{B}/m$ é a girofrequência das partículas,

q e m são carga e massa das partículas, respectivamente.

Devido à dependência com a carga q (positiva ou negativa), é fácil perceber que os íons se movem no sentido $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$ e os elétrons se movem em sentido

contrário, criando assim uma corrente elétrica (\mathbf{J}). Para um melhor entendimento podemos observar essa corrente, de forma ilustrativa, na Figura 3.1. Esta figura representa a eletrodinâmica da região F equatorial, onde considera-se essa região como uma camada fina e que, dentro dela existe uma condutividade constante igual a σ_p e igual a zero nas outras partes. Também considera-se um vento zonal constante por todas as partes. Desde que a corrente fora da camada seja nula, as cargas se acumulam nas duas fronteiras da camada dando origem ao campo elétrico de polarização (\mathbf{E}) da região F. O campo elétrico de polarização da região F só existe durante a noite e é bem menor do que o campo elétrico gerado na região E, mas é muito importante em situações peculiares como as que ocorrem durante o amanhecer e o entardecer. Maiores detalhes sobre o campo elétrico de polarização da região F serão apresentados na Seção 3.4.

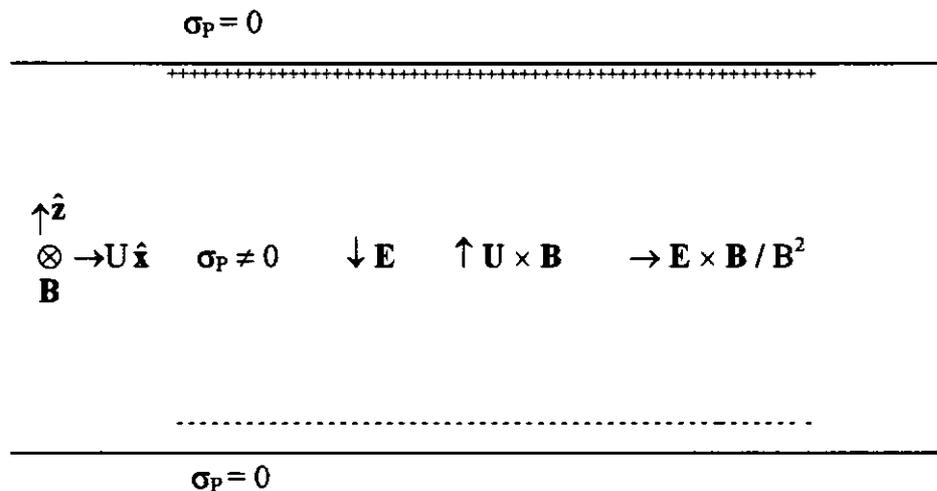


Fig. 3.1 - Eletrodinâmica da região F equatorial, onde supomos que a densidade e condutividade ionosférica estão distribuídas em camadas e submetidas a um vento neutro zonal constante.

3.3 - O DÍNAMO DA REGIÃO E

Os campos elétricos gerados na ionosfera durante o dia são devidos, principalmente, aos ventos da região E. Nessa região os ventos são produzidos por oscilações de marés da atmosfera. Entretanto, as marés atmosféricas são geradas principalmente por aquecimento solar na estratosfera e troposfera. Na estratosfera o aquecimento é devido a absorção da radiação solar pela camada de ozônio e na troposfera é devido a absorção desta radiação pelo vapor d'água. As oscilações de marés originadas nestas regiões se propagam para cima atingindo a região E ionosférica (Kelley, 1989).

Na região E da ionosfera, durante o dia, a condutividade é alta e o campo elétrico não pode ser considerado como sendo inteiramente gerado por ventos locais conforme foi suposto no dínamo da região F. Isso pode ser entendido da seguinte forma: o campo elétrico produzido pelos ventos de marés é global e ele produzirá um sistema de corrente global dada por

$$\mathbf{J}_v = \sigma(\mathbf{r}, t) \cdot [\mathbf{U}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{B}]. \quad (3.2)$$

Como ambos, condutividade ($\sigma(\mathbf{r}, t)$) e ventos ($\mathbf{U}(\mathbf{r}, t)$), dependem de \mathbf{r} , a corrente \mathbf{J} , não precisa (em geral) ter divergência nula ($\nabla \cdot \mathbf{J}_v \neq 0$). Quando isso ocorre, um campo elétrico $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ deve surgir tal que a divergência da corrente total seja zero, isto é,

$$\nabla \cdot [\sigma \cdot (\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{U}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{B})] = 0. \quad (3.3)$$

Numa primeira aproximação, para se entender melhor a física do dínamo da região E, vamos considerar a região E como sendo uma camada condutora fina, tal como ilustrada na Figura 3.2. A camada está sujeita a um campo elétrico zonal constante. Esse campo $E_x \hat{x}$ é gerado por ventos de marés. Pelo fato dos elétrons

apresentarem maior mobilidade em relação aos íons, a ação de $E_x \hat{x} \times \mathbf{B}$ produz uma corrente que é conhecida como corrente Hall ($J_H = \sigma_H E_x$). Essa corrente não pode fluir através da camada e as cargas são acumuladas nas suas fronteiras (veja Figura 3.2). As cargas acumuladas, por sua vez, dão origem a um campo elétrico para cima ($E_z \hat{z}$). No caso deste modelo, a corrente vertical não pode fluir e como considera-se a situação em estado estacionário, então surge uma corrente para cancelar a corrente Hall, devido a $E_z \hat{z}$ que é chamada de corrente Pedersen ($J_P = \sigma_P E_z$). Isso implica que

$$\sigma_H E_x = \sigma_P E_z.$$

Assim,

$$E_z = \frac{\sigma_H}{\sigma_P} E_x. \tag{3.4}$$

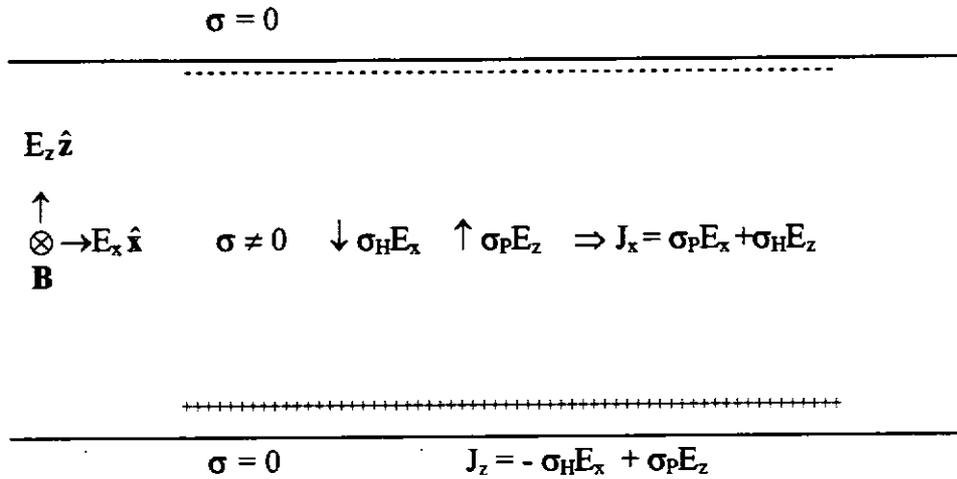


Fig. 3.2 - Ilustração do eletrojato equatorial, considerando a região E como uma camada fina e submetida a um campo elétrico.

A corrente zonal é calculada somando-se a corrente produzida por $E_z \hat{z} \times \mathbf{B}$ (corrente Hall) com a corrente devido a $E_x \hat{x}$ (corrente Pedersen). Portanto temos:

$$J_x = \sigma_H E_z + \sigma_P E_x. \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação (3.4) em (3.5) fica

$$J_x = \left(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_P^2} + 1 \right) \sigma_P E_x = \sigma_c E_x, \quad (3.6)$$

onde σ_c é conhecida como condutividade Cowling.

A Equação (3.6) mostra que a condutividade zonal é aumentada por um fator de $1 + \sigma_H^2 / \sigma_P^2$ (fator condutividade Cowling) e isto proporciona uma intensificação da corrente na direção zonal. Na verdade, apenas sobre o equador geomagnético temos uma condição igual a que foi adotada por este modelo, ou seja, o campo elétrico zonal é perpendicular ao campo geomagnético. Esta condição é fundamental para a corrente atingir sua intensificação máxima. Portanto, sobre o equador geomagnético existe uma forte corrente elétrica e ela é chamada de eletrojato equatorial.

3.4 - DERIVAS DA REGIÃO F EQUATORIAL

Os campos elétricos ionosféricos, cujas origens foram explicadas anteriormente, são extremamente importantes no movimento do plasma da região F em baixas latitudes. Neste setor o transporte de plasma perpendicular ao campo geomagnético é controlado pela deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. O campo elétrico da região F é menor do que o campo da região E e além disso, durante o dia, ele pode ser descarregado por correntes que fluem ao longo das linhas de campo geomagnético, que funcionam como ótimos condutores, fechando circuitos na região E (Rishbeth, 1971; Heelis et al., 1974; Batista, 1986). Por outro lado, já que ao longo das linhas de campo temos alta condutividade, elas podem ser consideradas como linhas equipotenciais e, com isso, os campos elétricos da região E podem ser mapeados para a região F praticamente sem

atenuação (Farley, 1960). Desta forma, durante o dia o plasma se move para o oeste e para cima devido às ações dos campos de polarização (na direção vertical) e do campo zonal, respectivamente. À noite, devido à inversão da direção do vento, as derivas de plasma fluem para leste e para baixo.

A Figura 3.3 mostra exemplos das derivas zonal e vertical da região F ionosférica sobre Jicamarca (Fejer et al., 1991). Como pode ser visto, se considerarmos as direções positivas para leste e para cima, podemos dizer que a deriva zonal é negativa durante o dia e positiva à noite e a deriva vertical é positiva durante o dia e inverte à noite.

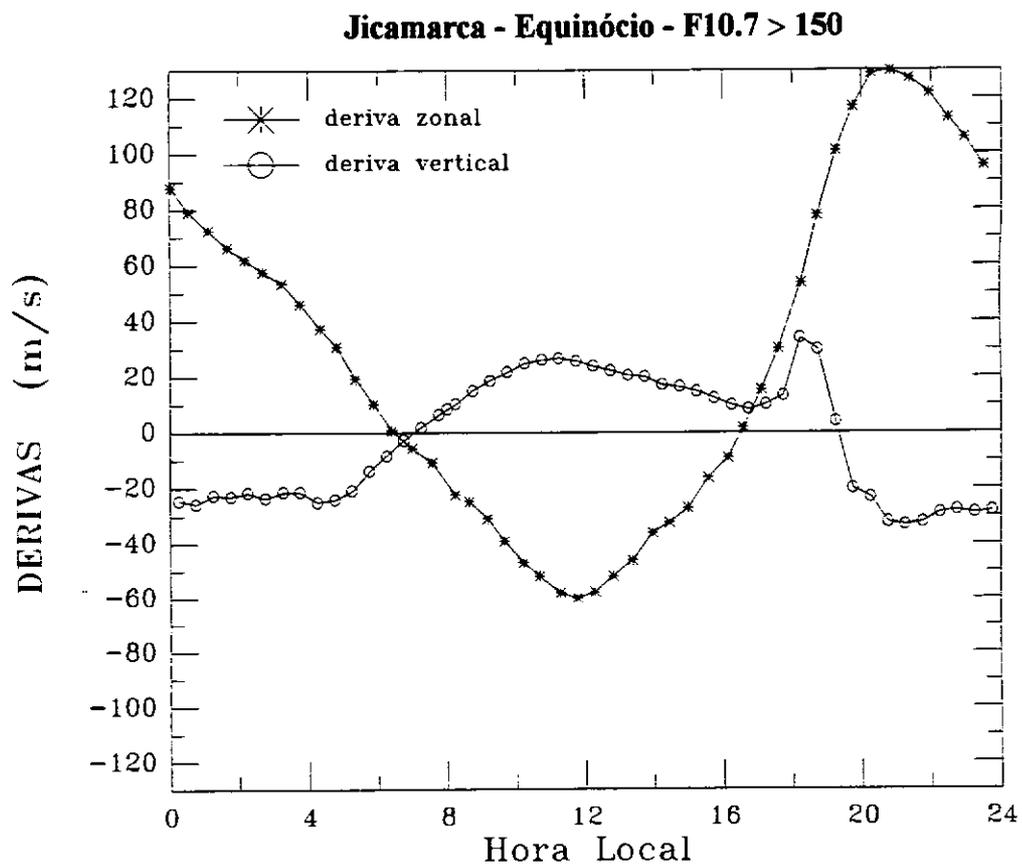


Fig. 3.3 - Derivas vertical e zonal registradas pelo radar de Jicamarca durante equinócio de atividade solar máxima.

FONTE: Fejer et al. (1991), p. 13902.

A deriva vertical apresenta um máximo antes da inversão (antes de atingir valores negativos) em torno das 18:00 horas, conhecido como pico pré-inversão, e sua característica pode ser vista na Figura 3.3. A explicação para este aumento da deriva neste horário pode ser facilmente entendida, observando a Figura 3.4. Próximo ao terminadouro solar, ainda do lado iluminado pelo sol, o dínamo da região F gera o campo E_z que em torno das 18:00 já não é pequeno. Este campo é mapeado para a região E com sentido apontando para o equador (E_y). O campo E_y , na presença do campo geomagnético, dá origem a uma corrente Hall (J_{yx}) na direção oeste. Mas como no lado da noite a condutividade é baixa, surge um acúmulo de cargas negativas no terminadouro criando um campo E_x e conseqüentemente uma corrente J_{xx} para cancelar J_{yx} . Este campo E_x é mapeado de volta para a região F produzindo o aumento da deriva vertical e logo depois decresce rapidamente, pois acontece a inversão do campo quando chega a noite.

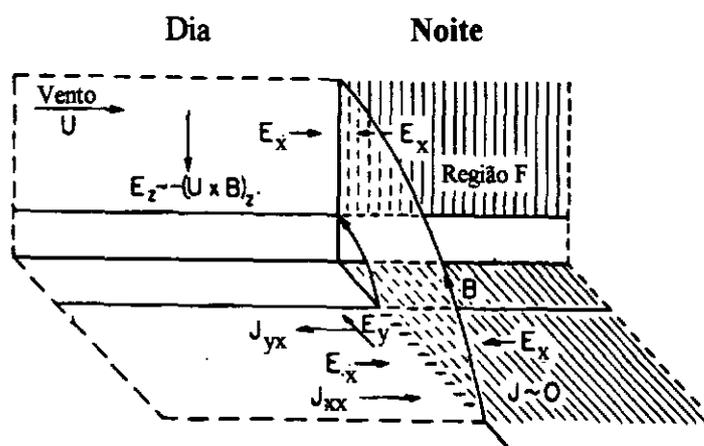


Fig. 3.4 - Modelo simplificado do pico pré-inversão da região F, onde foi considerado um vento uniforme nesta região.

FONTE: Farley et al. (1986), p. 13726.

3.5 - A ANOMALIA EQUATORIAL

Na ionosfera de baixas latitudes existe um interessante e importante fenômeno devido aos efeitos da eletrodinâmica equatorial. Na região equatorial ionosférica, durante o dia, era esperado a existência de maior concentração de partículas ionizadas em relação aos locais de latitudes mais afastadas, pois no setor equatorial existe a maior incidência de fótons solares por unidade de área. Na verdade na região equatorial, ou seja, nas latitudes em torno do equador geomagnético existe baixa concentração de plasma. Portanto temos uma anomalia, a qual é conhecida como Anomalia Equatorial ou Anomalia de Appleton. A formação da Anomalia Equatorial pode ser entendida da seguinte forma: conforme foi visto nas seções anteriores, o campo elétrico equatorial e zonal cria a deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. Acontece que, durante o dia, esta deriva eleva o plasma para altas altitudes e, devido à ação da força da gravidade e da força gerada por gradiente de pressão, estas partículas fluem ao longo das linhas de campo, movendo-se tanto no sentido do pólo sul como para o pólo norte, descrevendo trajetórias semelhantes às que são mostradas na Figura 3.5. Como podemos ver, as partículas saem da região equatorial e, ao fluírem ao longo das linhas de campo, atingem altitudes onde a difusão é baixa e, conseqüentemente, há um acúmulo de plasma em latitudes mais altas tanto do hemisfério norte, como do hemisfério sul. Portanto, ao observarmos uma variação latitudinal da densidade eletrônica ionosférica, nos horários onde a deriva vertical for positiva e com intensidade adequada, podemos ver que a densidade na região F ionosférica sobre o equador é mais baixa do que nas latitudes em torno de $\pm 14^\circ$. A Figura 3.5 é uma concepção artística que mostra a formação da Anomalia Equatorial ao longo de um meridiano magnético que passa sobre o Brasil e também mostra a posição do eletrojato equatorial sobre a América do Sul.

A Figura 3.6 mostra uma outra ilustração da Anomalia Equatorial. Nesta figura temos contornos da concentração eletrônica com variação latitudinal (latitudes magnéticas) ao longo do meridiano magnético que passa sobre Fortaleza. Estes resultados foram calculados às 16:00 horas (hora local) pelo modelo SUPIM. Conforme

mostra a figura, a anomalia neste horário encontra-se bem desenvolvida com picos em latitudes conjugadas de $\pm 13^\circ$.

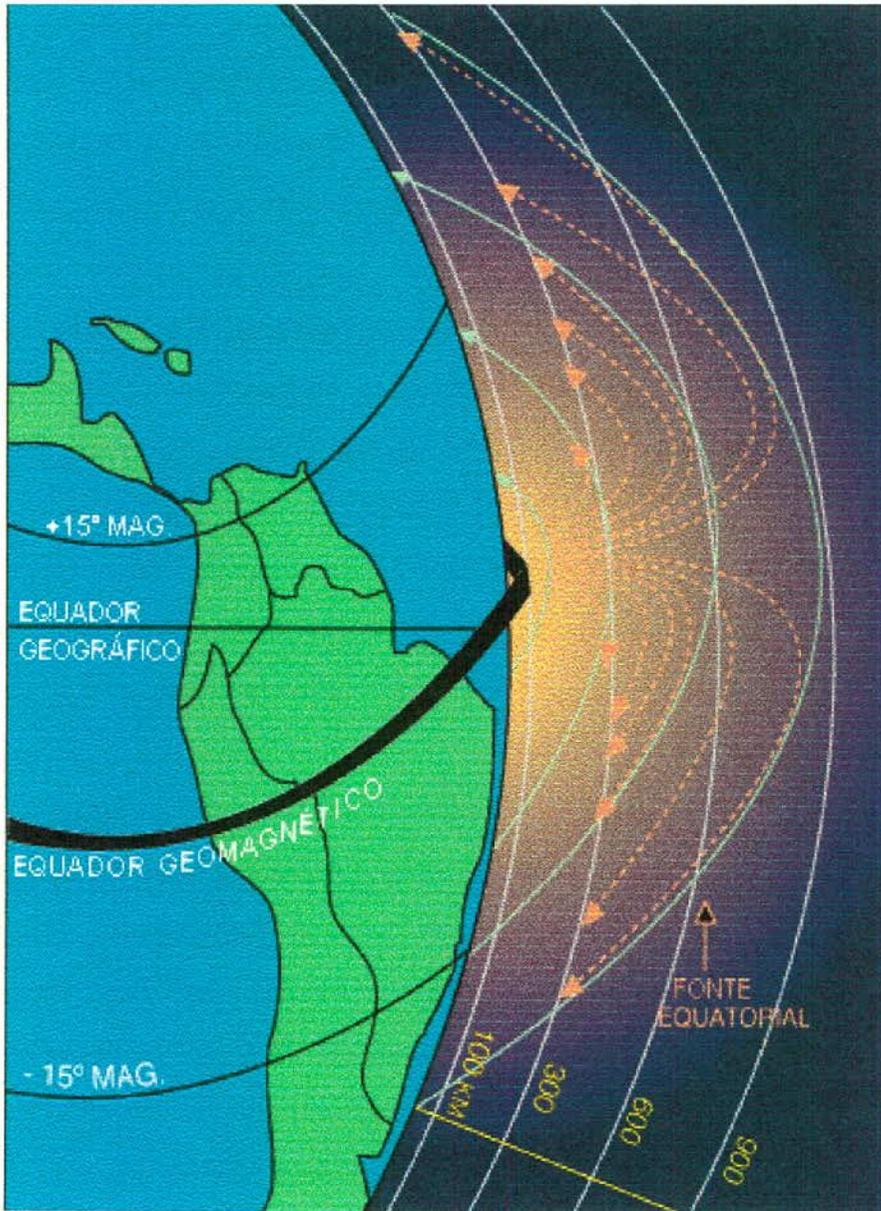


Fig. 3.5 - Apresentação artística da formação da Anomalia Equatorial e localização do eletrojato equatorial sobre a América do Sul.

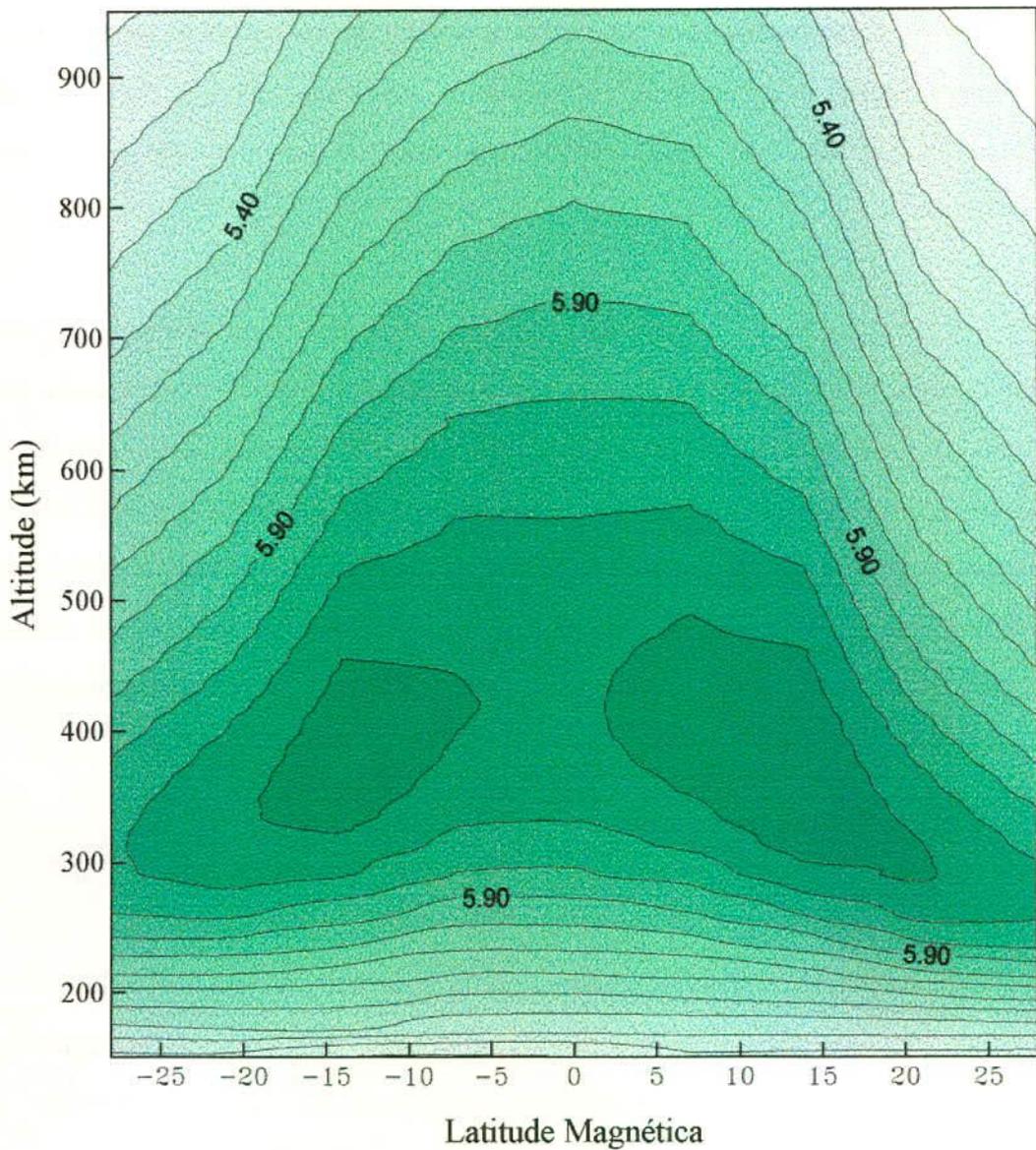


Fig. 3.6 - Contornos do logaritmo de base dez da concentração eletrônica ionosférica ($\log_{10} N_e$) mostrando a Anomalia Equatorial.

3.6 - A ANOMALIA DO ATLÂNTICO SUL

O campo geomagnético apresenta uma estrutura bastante complexa que dá origem a intensidades não esperadas em diversas partes do planeta. Com isso, surge um grande número de anomalias geomagnéticas. Conforme foi mencionado no início deste capítulo, a anomalia na intensidade do campo geomagnético sobre a costa

leste do Brasil caracteriza-se por apresentar um valor baixo na componente total do campo nesta região. Na Figura 3.7 podemos ver, de forma clara, a presença desta anomalia. Na verdade, esta figura mostra contornos de iso-intensidades do campo geomagnético.

Devido a esse valor mínimo no campo geomagnético, partículas energéticas que ficam aprisionadas ao campo se precipitam mais facilmente neste setor em torno da costa leste do Brasil. A explicação para isso está baseada no fato de que partículas aprisionadas a um campo magnético possuem pontos de reflexão que dependem da intensidade do campo. Na região da anomalia, as partículas aprisionadas precisariam descer até altitudes mais baixas para atingir seus pontos de reflexão. Entretanto, estas partículas não conseguem atingir os pontos de reflexão, pois colidem com a atmosfera.

Vários estudos têm detectado precipitações de partículas carregadas, de forma intensa, na região da Anomalia do Atlântico Sul. No início dos anos 60 os satélites soviéticos, orbitando a Terra com altitudes em torno de 300 km, detectaram irregularidades na distribuição da radiação em várias regiões geográficas. E foi constatado um aumento na intensidade da radiação no setor da anomalia. Em altitudes atingidas por balões também foi comprovada a existência de um aumento do fluxo de raio-x de baixa energia na região da anomalia (Ghielmetti et al., 1964).

Existem outros estudos sobre os efeitos da precipitação de partículas energéticas na ionosfera imersa na Anomalia do Atlântico Sul (Abdu et al., 1973, 1981a; Batista, 1975; Abdu e Batista, 1977). O trabalho de Batista (1975) mostra um estudo detalhado do comportamento da região E ionosférica devido à precipitação de partículas na anomalia. Este estudo usa dados de ionosondas registrados em São José dos Campos e em Cachoeira Paulista onde a anomalia está presente.

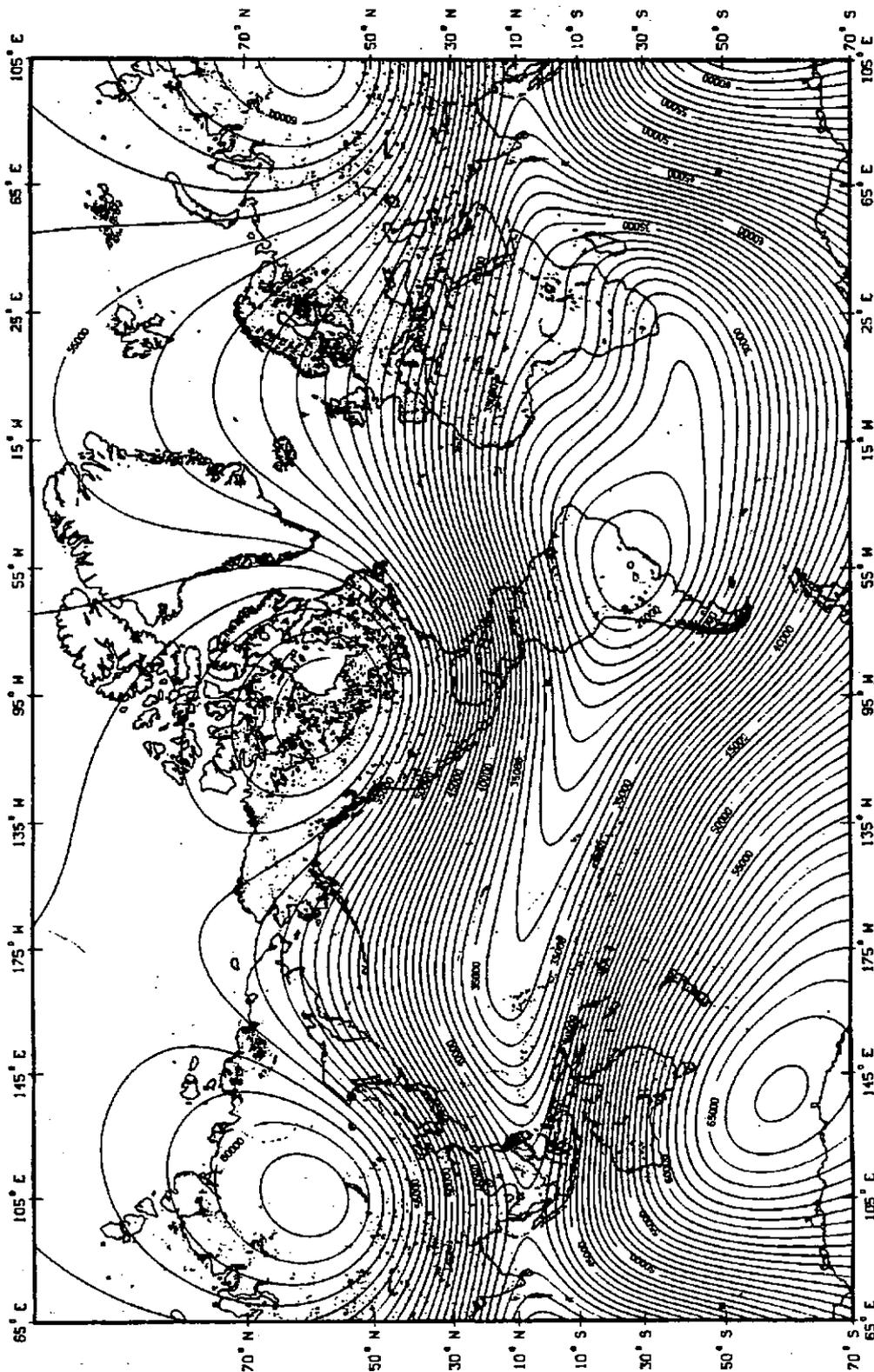


Fig. 3.7 - Contornos de iso-intensidades do campo geomagnético total calculado pelo IGRF95 (valores em nT)

No Capítulo 6 deste trabalho vamos apresentar evidências do aumento da densidade de elétrons da região F ionosférica sobre Cachoeira Paulista, devido à influência das partículas energéticas precipitadas na anomalia.

CAPÍTULO 4

O MODELO SUPIM E SIMULAÇÕES DE hmF2 E foF2 SOBRE HUANCAYO

4.1 - INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos deste trabalho é calcular e estudar os parâmetros ionosféricos mais importantes sobre regiões do Brasil, tais como: frequência crítica (foF2) e altura (hmF2) do pico da região F, deriva vertical $E \times B$ e ventos termosféricos, usando o modelo SUPIM. Diante da importância do SUPIM neste trabalho, decidimos fazer sua apresentação e testar seus resultados para uma região equatorial. O teste será através de uma comparação entre os valores de hmF2 e foF2 modelados e os dados observados em Huancayo, Peru (12° S, 75° O).

O modelo SUPIM tem sido usado para estudar as regiões equatoriais, veja por exemplo os trabalhos de Bailey et al. (1993) e Balan e Bailey (1995, 1996), mas nenhum dos estudos faz uma análise dos parâmetros hmF2 e foF2 com relação as mudanças nos parâmetros de entrada como: fluxo solar EUV, ventos e derivas. Já que este estudo faz parte da proposta deste trabalho, é importante testar o SUPIM enfatizando essa abordagem.

4.2 - O MODELO SUPIM

O modelo SUPIM foi desenvolvido pelo pesquisador Graham John Bailey da Universidade de Sheffield, Inglaterra. Nas primeiras versões (Bailey, 1983), este modelo era classificado como um modelo simples, pois considerava o campo geomagnético como o campo de um dipolo centrado e alinhado com o eixo de rotação da Terra e usava as equações da continuidade e do movimento apenas para os íons O^+ e H^+ . Depois de algumas atualizações (Bailey e Sellek, 1990; Bailey et al., 1993), este modelo encontra-se bem sofisticado. Agora, o SUPIM considera o campo geomagnético

como o campo produzido por um dipolo excêntrico e resolve, de forma acoplada, as equações da continuidade, do movimento e do equilíbrio de energia para os elétrons e para os íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ e NO^+ .

4.2.1 - PARÂMETROS DE SAÍDA E DE ENTRADA DO SUPIM

Este modelo fornece, como saída, as concentrações e temperaturas dos elétrons e dos íons O^+ , He^+ , H^+ , N_2^+ , O_2^+ e NO^+ , respectivamente. Outro parâmetro fornecido pelo SUPIM é o fluxo de plasma ao longo das linhas do campo geomagnético. As entradas paramétricas deste modelo são: o índice magnético A_p , fluxo solar EUV (calculado pelo modelo EUV91 - Tobiska, 1991), concentrações e temperaturas das partículas neutras (obtidos através do modelo MSIS-86 - Hedin, 1987), ventos neutros (através do modelo de ventos termosféricos HWM90 - Hedin et al., 1991) e deriva vertical $E \times B$. Todos esses modelos, usados para calcular os parâmetros de entrada do SUPIM, são modelos empíricos e ainda nessa seção vamos fazer uma breve discussão sobre a precisão de alguns desses modelos.

O modelo EUV91 consiste na aplicação da técnica de Regressão Linear Múltipla para obter o fluxo EUV (Tobiska, 1991). Os dados usados na construção deste modelo são: radiação Lyman- α (1216 Å), F10.7 e EUV (140-1050 Å). A Figura 4.1a mostra os valores médios de F10.7 (média corrida de 81 dias) e também mostra faixas amarelas indicando os períodos onde existem dados de Lyman- α . Já a Figura 4.1b repete os valores médios F10.7 e apresenta faixas com a cor azul indicadoras dos períodos de dados do fluxo solar EUV. É bastante conhecido que, praticamente não existe falha nos dados de F10.7 desde a década de 1940. Isso pode ser visto na Figura 4.1a, apesar desta figura mostrar valores médios de F10.7 e também apresentar informações apenas entre 1962-1989.

Conforme mostra a Figura 4.1a, os dados de Lyman- α usados na construção do modelo de fluxo solar EUV foram registrados em 1967-1969 e 1975-1989. Os dados de EUV foram registrados nos seguintes períodos: 1967-1969, 1972, 1977-1980, 1982-1983 e 1988-1989. De acordo com essas informações podemos ver que, entre 1962-1989 existem falhas tanto nos dados de Lyman- α como nos dados de EUV. Para superar essas falhas foram usadas interpolações e, conforme mencionamos anteriormente, isso pode provocar resultados imprecisos.

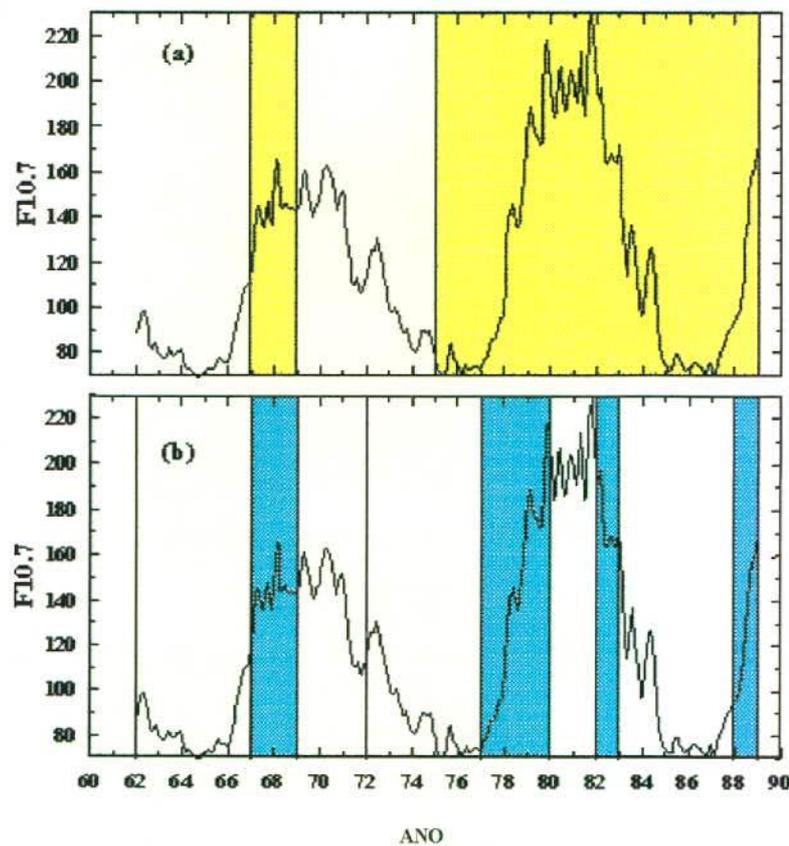


Fig. 4.1 - Valores médios de F10.7 e faixas indicadoras dos períodos onde existe dados da radiação Lyman- α (faixas amarelas) e da radiação EUV (faixas azuis).

Um exemplo de que podem acontecer previsões imprecisas pelo modelo EUV91 é mostrado na Figura 4.2, onde podemos ver um valor negativo num dos grupos do espectro do fluxo EUV produzido por este modelo. Nessa figura temos dados

do fluxo EUV dividido em 37 grupos de comprimentos de onda (λ) tais como definidos na Tabela 4.1 (Tobiska, 1991). Os dados foram obtidos executando o modelo de fluxo EUV para o verão de 1986.

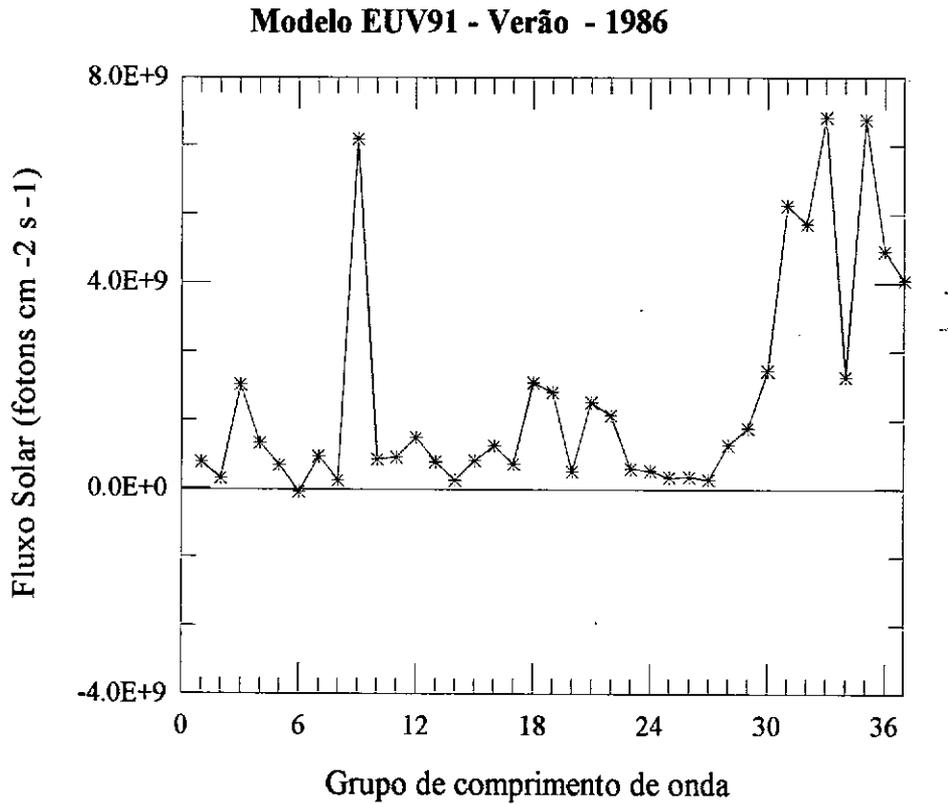


Fig.4.2 - Espectro do fluxo solar EUV calculado pelo modelo EUV91 durante verão de 1986.

Conforme já foi mencionado, o modelo de vento HWM90 também é um modelo empírico e de acordo com Titheridge (1995) o conjunto de dados usado no desenvolvimento deste modelo tem maior representatividade durante a noite do que durante o dia e também existem mais registros feitos no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Devido a esse fato Titheridge comenta que os resultados dos ventos médios calculados através de HWM90 são aceitáveis durante a noite, um pouco piores durante o dia e sua confiabilidade diminui muito no hemisfério sul.

**TABELA 4.1 - COMPRIMENTOS DE ONDA DA RADIAÇÃO EUV DIVIDIDOS
EM 37 GRUPOS**

Grupos de λ	λ (Å)
1	50-100
2	100-150
3	150-200
4	200-250
5	256,3
6	284.15
7	250-300
8	303.81
9	303.78
10	300-350
11	368.07
12	350-400
13	400-450
14	465.12
15	450-500
16	500-550
17	554.37
18	584.33
19	550-600
20	609.76
21	629.73
22	600.650
23	650-700
24	703.31
25	700-750
26	765.15
27	770.41
28	789.36
29	750-800
30	800-850
31	850-900
32	900-950
33	977.62
34	950-1000
35	1025.72
36	1031.91
37	1000-1050

4.3 - SIMULAÇÕES DE hmF2 E foF2 SOBRE HUANCAYO

Apesar da proposta deste trabalho ser a de trabalhar com dados de Fortaleza e Cachoeira Paulista, começamos por executar o SUPIM para Huancayo. Essa decisão foi tomada devido a possibilidade de utilizar no SUPIM um modelo de campo elétrico baseado nos resultados de medidas feitas pelo radar de Jicamarca ($11,95^\circ$ S, 75° O) e os parâmetros ionosféricos, a serem modelados, obtidos pela ionossonda de Huancayo localizada bem próximo de Jicamarca. A importância deste estudo para Huancayo surge pela oportunidade de verificar a validade do modelo SUPIM para uma estação equatorial, enfatizando um novo tipo de abordagem conforme mencionamos no início deste capítulo, e a partir de então estender seu uso às estações brasileiras situadas em regiões equatoriais e em baixas latitudes.

A idéia inicial era apenas verificar como os resultados do SUPIM se comportavam para baixas latitudes, mas surgiram resultados interessantes e, junto com isso, a necessidade de uma discussão mais elaborada. As derivas verticais $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ usadas nestas simulações foram obtidas pelo modelo de Fejer et al. (1991) e seguindo um método desenvolvido por Batista et al. (1996). Esse método, em torno do pico pré-inversão, calcula a deriva usando a variação da altura da base da camada F ionosférica com o tempo e nos outros horários usa a deriva obtida pelo radar de Jicamarca (Fejer et al., 1991). Este método, que usa os dados da altura da base da camada F ionosférica ($h'F$) para calcular a deriva, foi desenvolvido por Abdu et al. (1981b), mas um estudo detalhado, mostrando que este método precisa levar em consideração os efeitos das recombinações para altitudes abaixo de 300 km, foi apresentado por Bittencourt e Abdu (1981). Os dados de $h'F$, usados neste trabalho, também foram obtidos por meio de uma ionossonda.

Na verdade, esse estudo para Huancayo será feito através de uma comparação entre os dados observados de foF2 e hmF2 e os valores calculados pelo SUPIM.

A Figura 4.3 mostra uma superposição dos dados de hmF2 e foF2 registrados sobre Huancayo. Estes dados foram lidos de ionogramas e para fazer a conversão das alturas virtuais, obtidas dos ionogramas, para alturas reais usamos a técnica do fator M3000 (Piggott e Rawer, 1978). Os dados foram selecionados apenas para dias geomagneticamente calmos ($\Sigma Kp < 24$) e foram registrados em setembro de 1979. Utilizaremos esses dados para fazer a média representativa de equinócio durante atividade solar máxima.

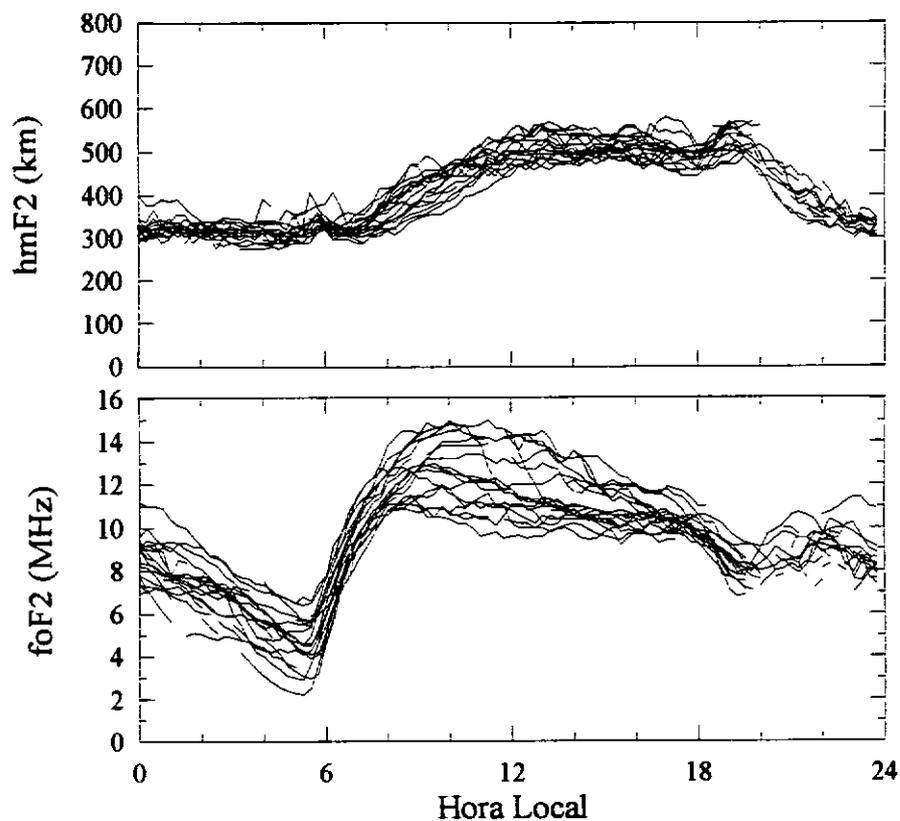


Fig. 4.3 - Superposição da variação diurna de hmF2 e de foF2 sobre Huancayo, para setembro de 1979.

Para analisar os resultados do SUPIM sobre Huancayo, foram efetuados três cálculos:

- 1) O SUPIM foi executado usando o modelo de deriva $E \times B$ registrada pelo radar de Jicamarca (MDJ) (Fejer et al., 1991) e considerando o fluxo solar EUV dado pelo modelo EUV94 (versão atualizada de EUV91), o qual será representado por 'euvt'.
- 2) O modelo de deriva MDJ foi mantido e 'euvt' foi reduzido em 40% ($euvt*0,60$)
- 3) Executamos o SUPIM com o modelo de deriva ajustado (MDHA1) e com $euvt*0,60$.

A Figura 4.4 apresenta modelos da deriva $E \times B$ e comparações entre valores de hmF2 e foF2 modelados pelo SUPIM e os dados observados. Na figura do topo, a curva com círculos apresenta a variação diurna da deriva MDJ e a curva com triângulos mostra o modelo de deriva MDHA1. Em torno do pico pré-inversão (das 16:00 às 20:00 horas) as derivas ajustadas foram obtidas usando o método de Abdu et al. (1981b) e, nos outros horários, seguindo as características da deriva registrada pelo radar de Jicamarca. Nos quadros do meio e da parte inferior da Figura 4.4, temos os resultados de hmF2 e foF2 calculados com o SUPIM (curvas com círculos e triângulos) e os valores médios de foF2 e hmF2 (curvas com bolinhas).

A decisão de se fazer uma redução em 40% no fluxo EUV usado nestas simulações, foi feita com base nos resultados de foF2 calculados pelo SUPIM e nos dados observados. Primeiro constatamos que os resultados de foF2 fornecidos pelo modelo SUPIM, usando o fluxo EUV normal, estavam superestimados em relação aos dados observados mesmo nos horários em que os resultados de hmF2 concordavam com os dados. Por causa disso, e pelo fato da estação de Huancayo estar situada muito próxima do equador geomagnético, não podemos dizer que as discordâncias entre os resultados de foF2 e os dados são causadas pelas derivas ou por ventos termosféricos. Então, a única explicação para essas discordâncias só pode ser dada através do fluxo solar EUV. Depois que fizemos vários testes com o SUPIM, constatamos que os

melhores resultados foram encontrados ao reduzir 40% os valores do fluxo EUV fornecidos pelo modelo EUV94.

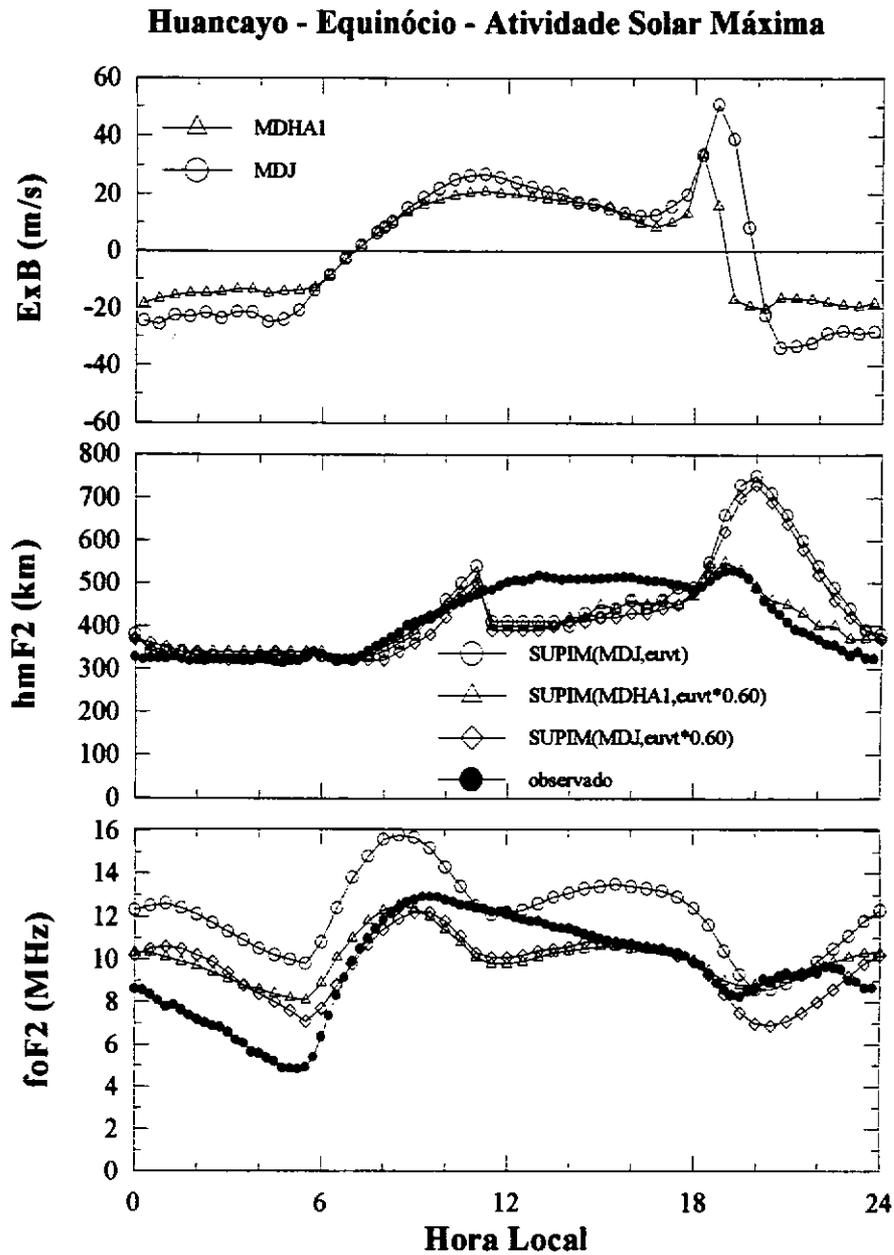


Fig. 4.4 - Derivas verticais $E \times B$ usadas nas simulações de $foF2$ e $hmF2$ sobre Huancayo e uma comparação entre os parâmetros ionosféricos simulados e observados.

Na parte inferior da Figura 4.4 podemos ver os resultados de foF2 calculados pelo modelo SUPIM. A curva com círculos representa os dados simulados com a deriva MDJ e fluxo 'euvt'; as curvas com losângulos e triângulos mostram resultados das simulações usando derivas e fluxos como sendo MDJ, 'euvt'*0,60 e MDHA1 e 'euvt'*0,60, respectivamente. Conforme podemos ver nesta figura e de acordo com o que foi mencionado no parágrafo anterior, os valores simulados de foF2 com o fluxo do modelo EUV94 reduzido de 40% produz resultados satisfatórios quando comparados com os dados observados e levando em consideração a variabilidade dos dados como mostra a Figura 4.3. Esse resultado indica que o modelo EUV94 pode estar superestimando os valores do fluxo solar para equinócio de atividade solar máxima.

O modelo EUV94 é empírico e sabemos que nos períodos onde não existem dados este modelo calcula o fluxo solar usando interpolações ou extrapolações e isso pode proporcionar imprecisões nos resultados. Apesar do modelo EUV94 ser uma versão atualizada de EUV91, constatamos apenas diferenças mínimas entre os seus resultados para setembro de 1979. Também é importante esclarecer que essa versão atualizada apresenta o mesmo problema da versão anterior: durante verão de atividade solar mínima (verão - 1986) o fluxo da radiação EUV para um determinado comprimento de onda apresenta valores negativos, como mostrado na Figura 4.2.

Analisando os resultados de hmF2 podemos ver uma ótima concordância com os dados observados entre 00:00 e 11:00 horas, conforme mostra a Figura 4.4. Logo em seguida, às 11:30, temos uma queda acentuada nos valores de hmF2 modelados. A explicação para este fato é baseada no processo de formação da camada F3 da ionosfera (Balan e Bailey, 1995,1996). A deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ de manhã produz movimento no plasma para o topo da ionosfera e este efeito, combinado com a ação dos ventos termosféricos, quando se aproxima de 11:00 horas, gera a camada F3 em torno do equador magnético.

De acordo com os resultados do SUPIM, depois das 11:00 horas o pico da camada F3 torna-se menor do que o pico da camada F2 e desta forma os valores modelados de hmF2 passam a ser calculados na camada mais baixa, a camada F2 e, por isso, apresentam uma mudança brusca. Isso pode ser visto na Figura 4.5 a qual mostra perfis da densidade eletrônica calculados sobre Huancayo às 08:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00 e 14:00 horas, respectivamente. Os dados observados não mostram essa queda brusca em hmF2. Entretanto, baseando-se no fato de que, neste horário, a altura da região F ionosférica sofre forte influência dos resultados das combinações de ventos termosféricos com deriva (Balan e Bailey, 1995, 1996), acreditamos que uma combinação perfeita de vento e deriva pode explicar essa discordância entre hmF2 observado e calculado. Esta conclusão também é baseada nos resultados de Bailey et al. (1993). Este trabalho, bem como os trabalhos de Balan e Bailey (1995,1996), apenas sugerem mudanças no modelo de vento usado pelo SUPIM para explicar os seus resultados. No Capítulo 6, seguindo as sugestões destes trabalhos, iremos investigar e calcular não apenas os ventos e derivas, mas também as suas influências sobre hmF2 e foF2 em latitudes equatoriais e em baixas latitudes.

Pode-se observar na Figura 4.4 que os resultados, tanto de foF2 como de hmF2, obtidos com o uso da deriva MDJ apresentam grandes discordâncias com os dados observados e principalmente entre os valores de hmF2 no horário do pico pré-inversão. Já os resultados modelados com a deriva MDHA1 mostram melhor concordância com as observações. Neste caso, a deriva MDHA1 foi obtida pelo método de Batista et al. (1996) e, conforme mencionamos anteriormente, esse método usa a variação da altura da base da camada F ionosférica com o tempo ($\Delta h'F/\Delta t$) para calcular a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ em torno do pico pré-inversão e nos outros horários usa dados de deriva registrados pelo radar de Jicamarca. Outro fato, é que a deriva MDHA1 foi calculada usando os mesmos ionogramas que forneceram os dados de hmF2 e foF2, ou seja, todos de uma mesma época. Já os dados da deriva MDJ, apesar de apresentarem boa precisão por serem resultados de medidas de radar, não são da mesma época que os dados de foF2 e de hmF2. Na verdade, a deriva MDJ foi obtida através da média de dados

registrados durante atividade solar máxima nos meses de março, abril, setembro e outubro entre os anos 1968-1988 e publicada por Fejer et al. (1991) como uma deriva representativa de equinócio de atividade solar máxima. Dessa forma, acreditamos que o fato da deriva MDJ não ser da mesma época que os dados de hmF2 e foF2 explica algumas discrepâncias observadas entre os resultados modelados com essa deriva e as observações. É importante mencionar que os resultados de uma simulação feita por Bailey et al. (1993), usando o SUPIM com dados de deriva da mesma época que os dados de hmF2, também mostraram boa concordância.

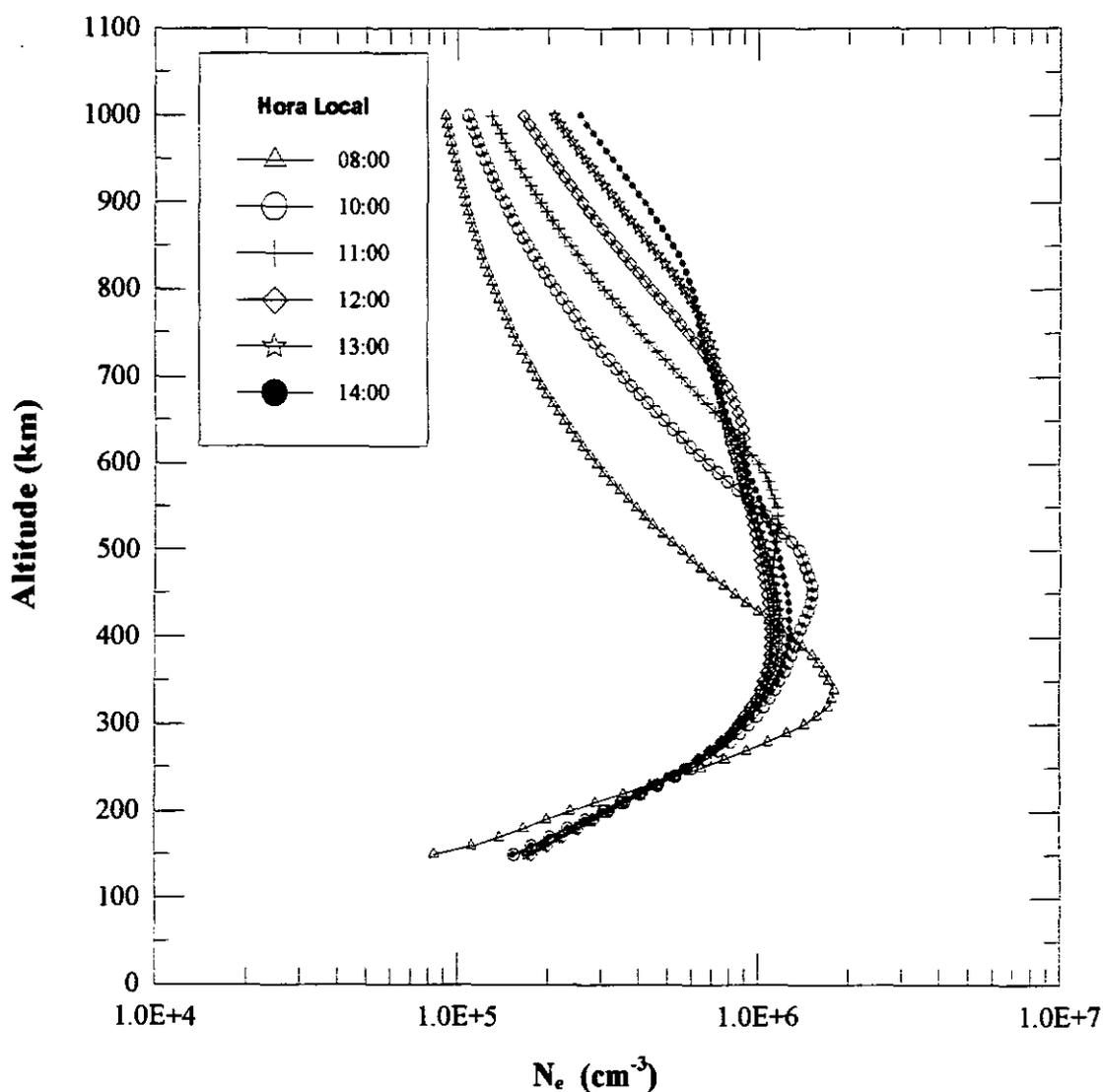


Fig. 4.5 - Perfis da densidade eletrônica calculados pelo SUPIM sobre Huancayo durante equinócio de atividade solar máxima.

O entedimento desta modelagem de hmF2 e foF2 sobre Huancayo serviu não apenas para descobrir a importância dos parâmetros de entrada, como deriva vertical e fluxo solar EUV, mas também como base para definirmos a metodologia usada neste trabalho, a qual será apresentada no próximo capítulo. Outro fato importante foi a escolha do método de Raitt et al. (1975) usado para calcular ν_{O^+-O} .

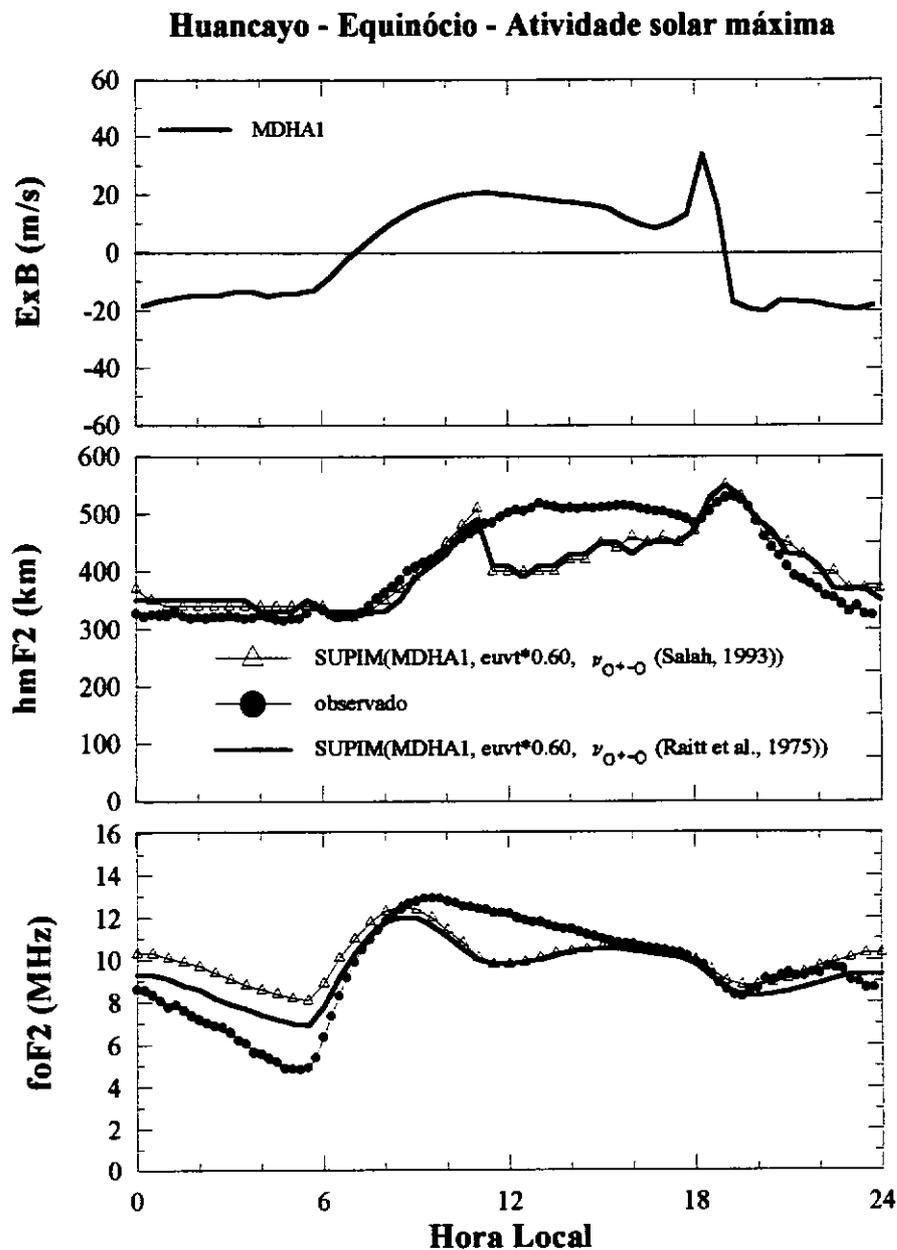


Fig. 4.6 - Resultados do SUPIM usando diferentes métodos para calcular a frequência de colisão entre O^+ e O . Estes resultados são comparados com observações.

CAPÍTULO 5

DADOS EXPERIMENTAIS E MUDANÇAS NOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO MODELO SUPIM

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo vamos fazer uma apresentação de todos os dados experimentais usados neste trabalho e definir métodos para ajustar ou calcular os principais parâmetros de entrada do modelo SUPIM. Conforme foi visto no capítulo 4, ajustando alguns parâmetros de entrada do modelo SUPIM podemos produzir bons resultados com este modelo. Os parâmetros de entrada que vamos ajustar são: fluxo solar EUV, ventos neutros e derivas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

5.2 - DADOS EXPERIMENTAIS

Na primeira etapa deste trabalho vamos usar dados de h'F (altura da base da camada F), hmF2 e foF2 registrados em Fortaleza e também hmF2 e foF2 registrados em Cachoeira Paulista. Foram escolhidos dados de dias geomagneticamente calmos ($\Sigma Kp < 24$) e registrados simultaneamente em Fortaleza e em Cachoeira Paulista entre 1985-1991. Todos os dados de h'F, foF2 e hmF2 foram obtidos a partir da redução de ionogramas produzidos por ionosondas. Porém, a altura do pico da camada F ionosférica, lida diretamente do ionograma, não é real. Então, para torná-la real usamos o programa POLAN (Titheridge, 1985). A nossa idéia é usar o modelo SUPIM para calcular a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ sobre Fortaleza, baseando-se nos dados ionosféricos dessa estação, e em seguida utilizar essa deriva de Fortaleza como uma das entradas paramétricas do modelo para simular os parâmetros ionosféricos tanto para Fortaleza como para Cachoeira Paulista. Esta metodologia baseia-se no fato que a ionosfera equatorial (na região do equador magnético e nas proximidades) é controlada, principalmente, pela deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ao passo que a ionosfera da região de baixas latitudes

sofre forte influência dos ventos termosféricos. Neste trabalho, os dados observados de Fortaleza são considerados adequadamente representativos do equador magnético e os de Cachoeira Paulista, da região de baixas latitudes.

Tendo em vista a intenção de fazer um estudo do comportamento da ionosfera com a atividade solar decidimos trabalhar com médias de dados registrados durante atividade solar mínima e máxima. Foram utilizados dez dias de dados para fazer a representação média de cada nível de atividade solar, exceto inverno de atividade solar máxima em que usamos cinco dias. Para cada nível de atividade solar os dados foram agrupados de acordo com as estações do ano (verão e inverno). Com isso, também vamos discutir a variação sazonal sobre os dados ionosféricos.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram dados de Fortaleza e de Cachoeira Paulista, respectivamente. Cada figura mostra uma superposição de dez dias de dados. A Figura 5.1 apresenta dados de $h'F$, $hmF2$, $foF2$ e Kp . A Figura 5.2, com os dados de Cachoeira Paulista, não mostra os valores de $h'F$, pois este parâmetro será usado apenas para calcular a deriva equatorial $E \times B$. Todos esses parâmetros foram registrados simultaneamente nos meses de dezembro de 1985 e janeiro de 1986. A atividade solar durante este período era mínima e fazendo a média do fluxo solar em 10,7 cm ($\overline{F10,7}$), usando os dados registrados nos mesmos dias em que foram medidos os parâmetros ionosféricos, encontramos um valor de 72,8 ($\overline{F10,7} = 72,8$). Portanto, ao fazer a média desses dados de $h'F$, $foF2$ e $hmF2$ teremos uma representação de verão de atividade solar mínima.

As Figuras 5.3 e 5.4 são idênticas às Figuras 5.1 e 5.2, mas os dados são de atividade solar máxima e foram registrados nos meses de novembro de 1988 e dezembro de 1991. O fluxo $F10,7$ durante os dias de coleta de dados apresentou um valor médio de 169,4 ($\overline{F10,7} = 169,7$). Com isso, temos uma representação de verão de atividade solar máxima. Essas apresentações com superposições dos dados são de

grande importância para constatar a variabilidade dia a dia destes parâmetros ionosféricos.

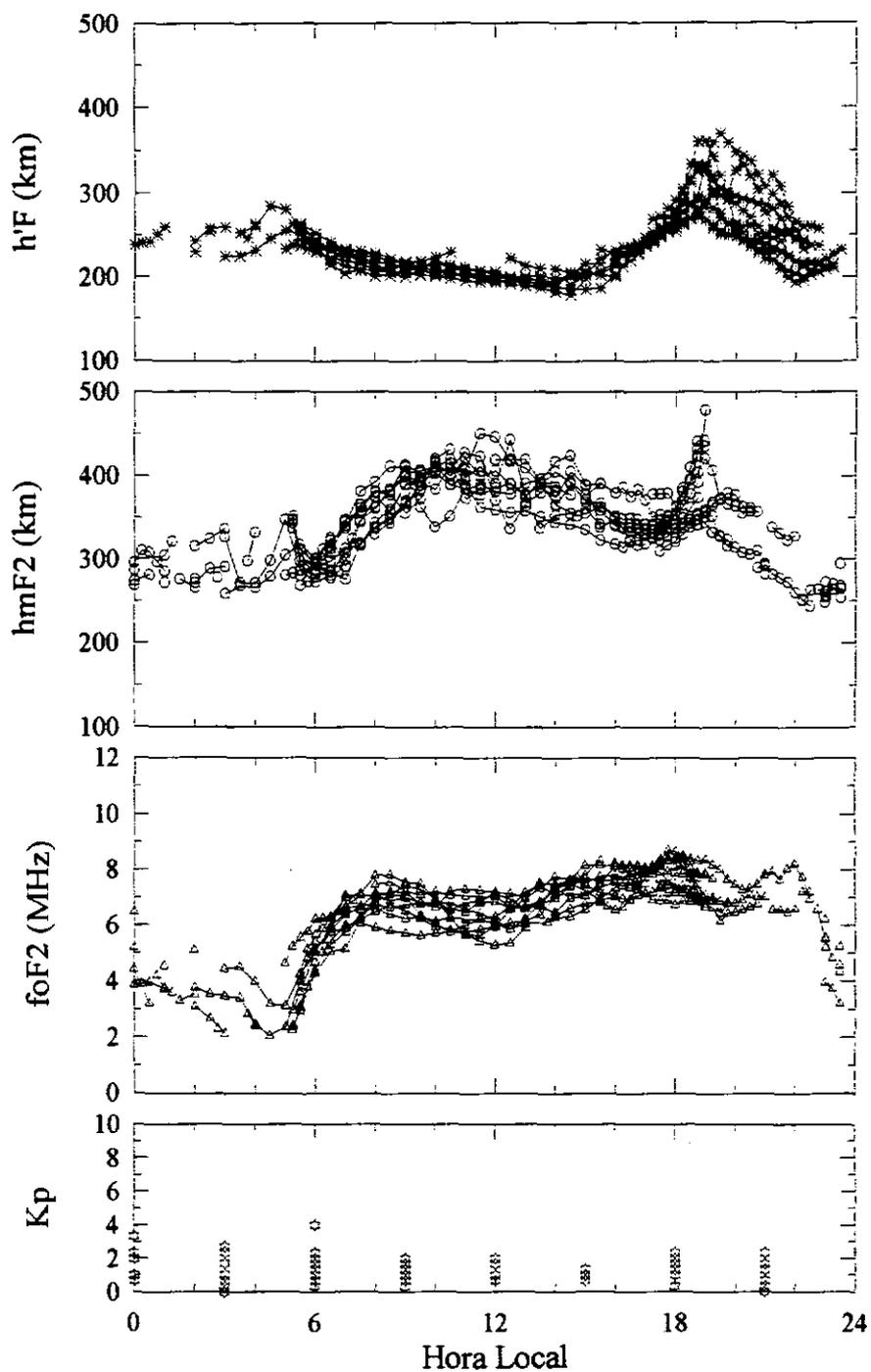


Fig. 5.1 - Superposições das variações diurnas de $h'F$, $hmF2$, $foF2$ e Kp para verão de atividade solar mínima. Dados registrados em Fortaleza.

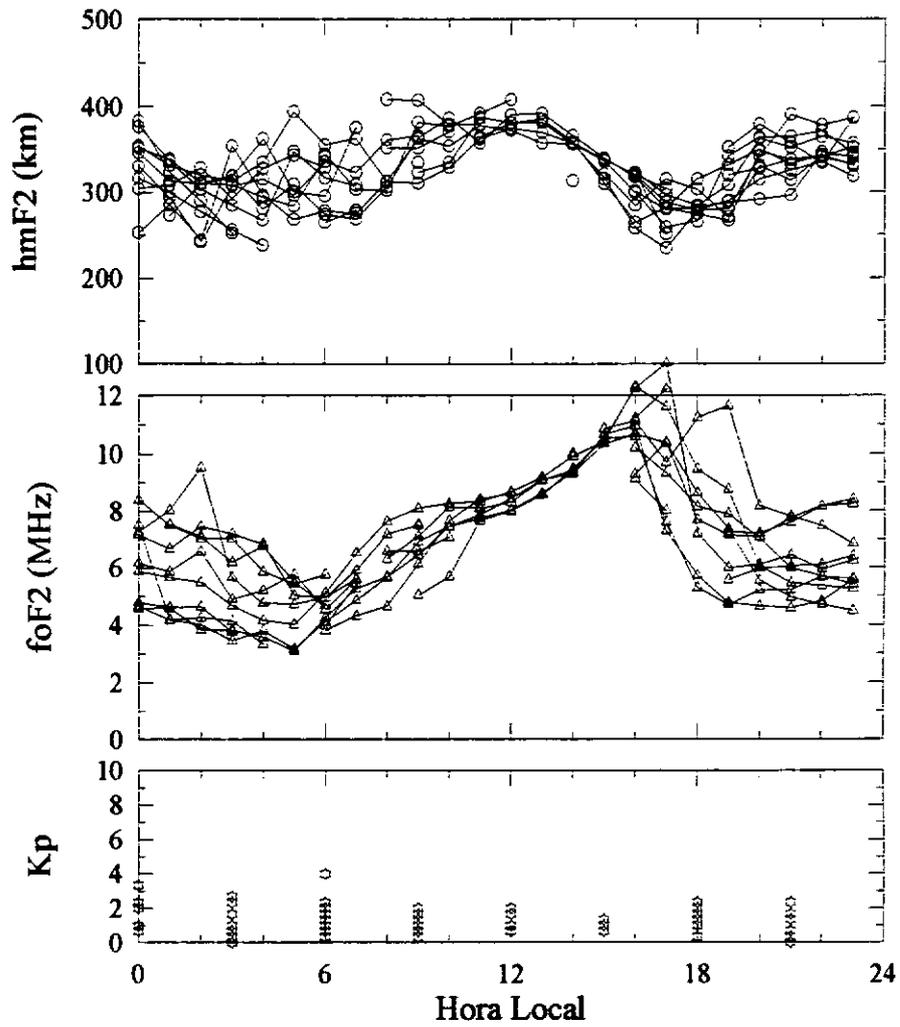


Fig. 5.2 - Superposições dos dados de $hmF2$, $foF2$ e Kp para verão de atividade solar mínima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.

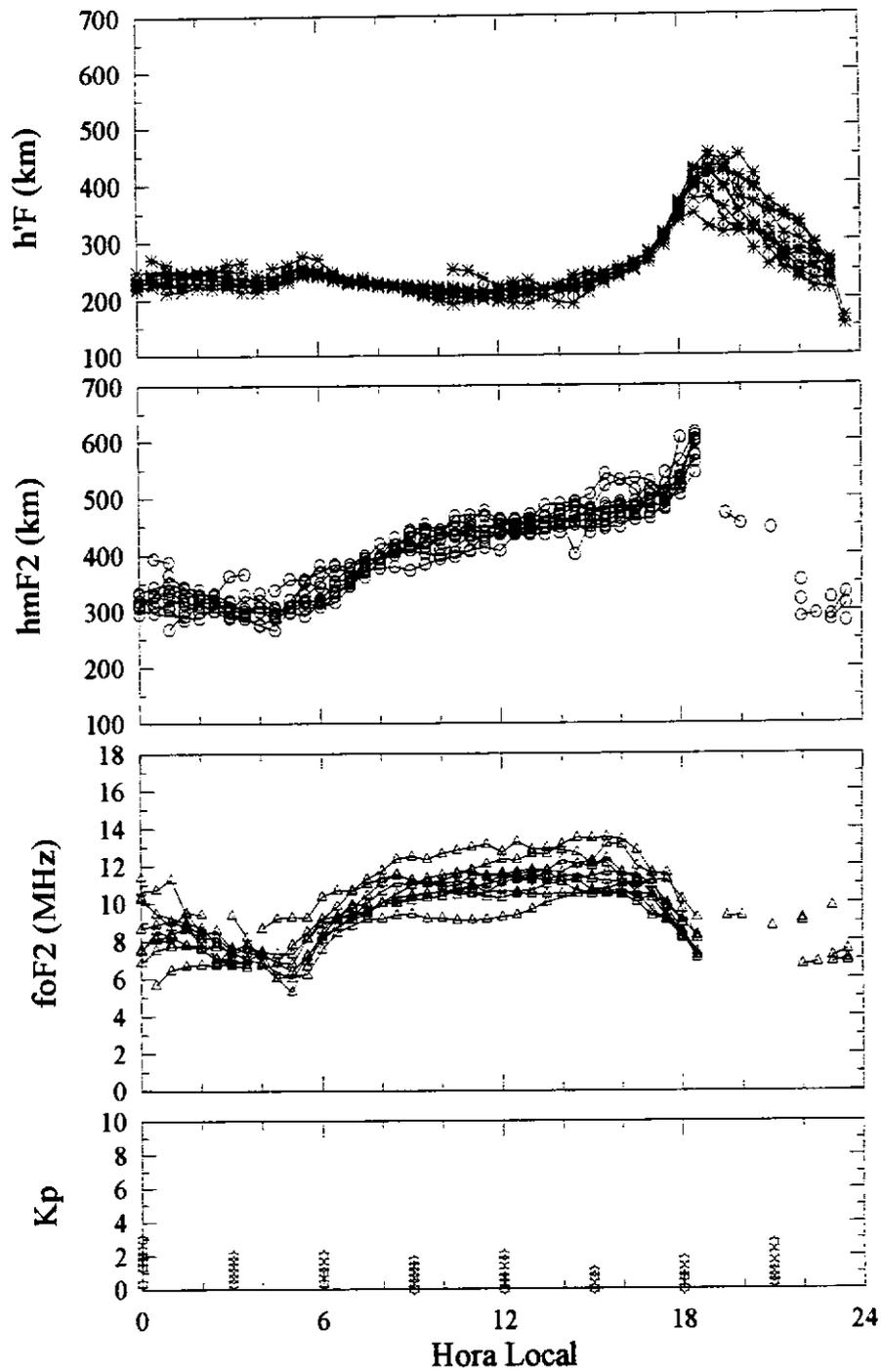


Fig. 5.3 - Superposições das variações diurnas de $h'F$, $hmF2$, $foF2$ e Kp usadas para representar verão de atividade solar máxima. Dados registrados em Fortaleza.

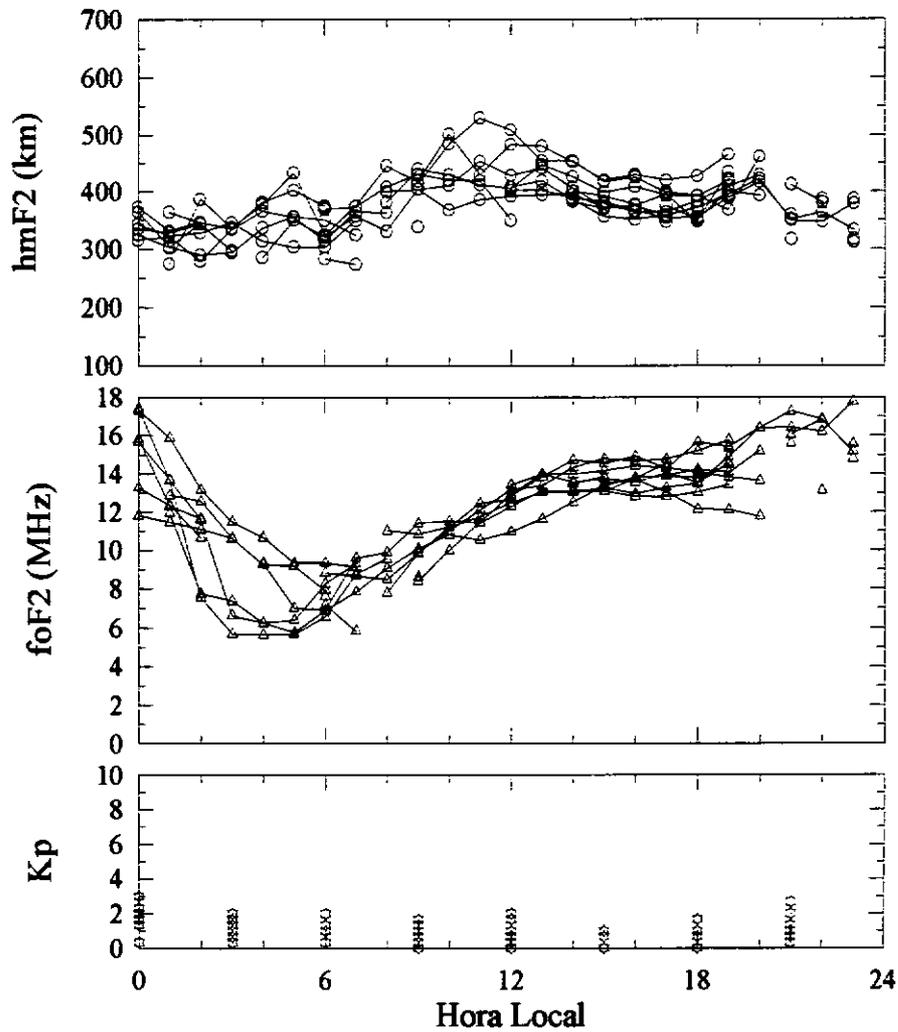


Fig. 5.4 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp usadas para representar verão de atividade solar máxima. Dados de Cachoeira Paulista.

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram dados de inverno de atividade solar mínima ($\overline{F10,7} = 71,8$) registrados em Fortaleza e Cachoeira Paulista, respectivamente. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam também dados de Fortaleza e de Cachoeira Paulista, porém, eles foram selecionados para representar inverno de atividade solar máxima ($\overline{F10,7} = 155,0$). Tanto a Figura 5.7 como a Figura 5.8 mostram uma superposição de 5 dias de dados, já nas Figuras 5.5 e 5.6 temos 10 dias de dados. Os dados de inverno de atividade mínima foram registrados entre junho-julho de 1986 e os dados de inverno de atividade solar máxima foram registrados em maio de 1989.

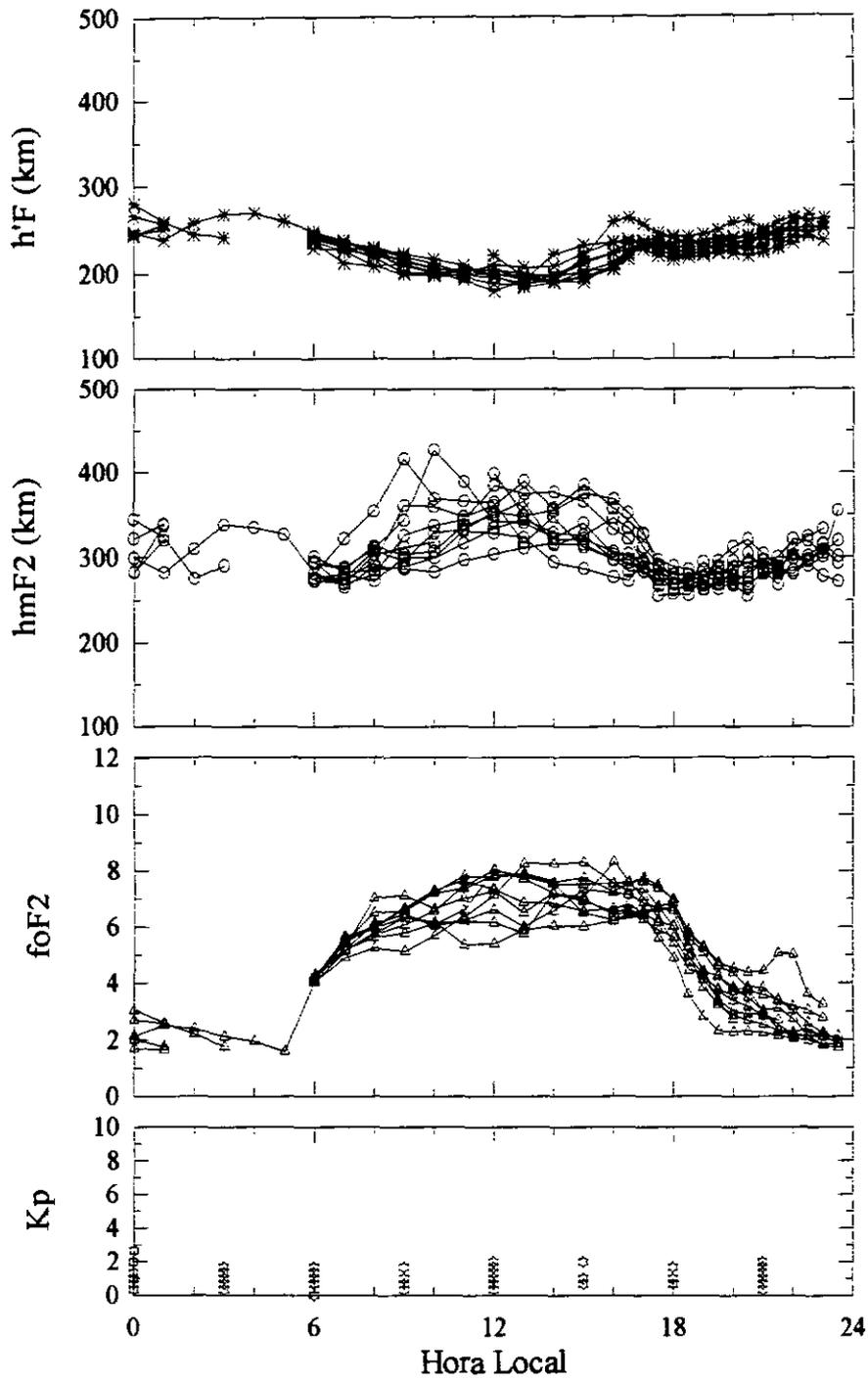


Fig. 5.5 - Superposições das variações diurnas de $h'F$, $hmF2$, $foF2$ e Kp para inverno de atividade solar mínima. Dados registrados em Fortaleza.

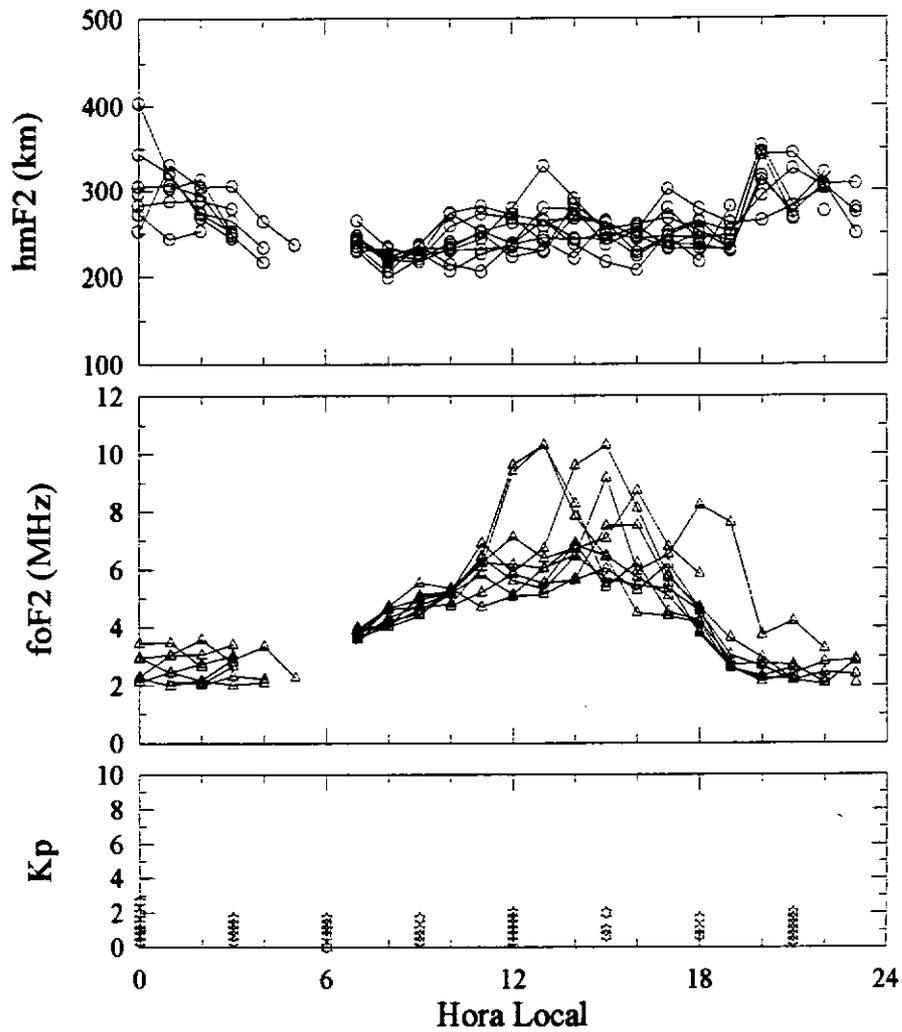


Fig. 5.6 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar mínima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.

Com o objetivo de mostrar que estamos trabalhando apenas com dias calmos, no que diz respeito a atividade geomagnética, também apresentamos uma superposição da variação diurna do índice geomagnético Kp, conforme foi mostrado em todas as Figuras de 5.1 a 5.8.

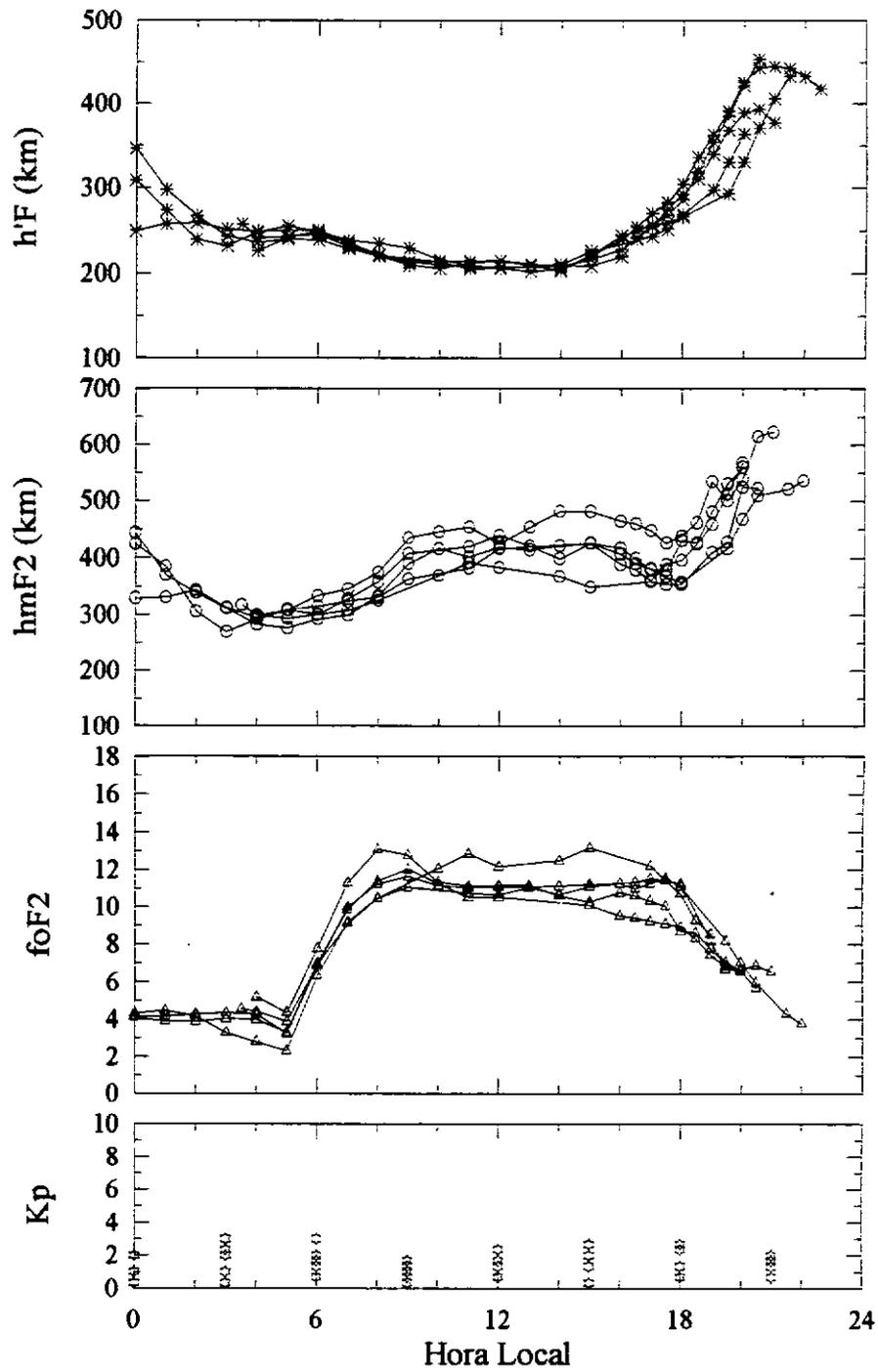


Fig. 5.7 - Superposições das variações diurnas de $h'F$, $hmF2$, $foF2$ e Kp para inverno de atividade solar máxima. Dados registrados em Fortaleza.

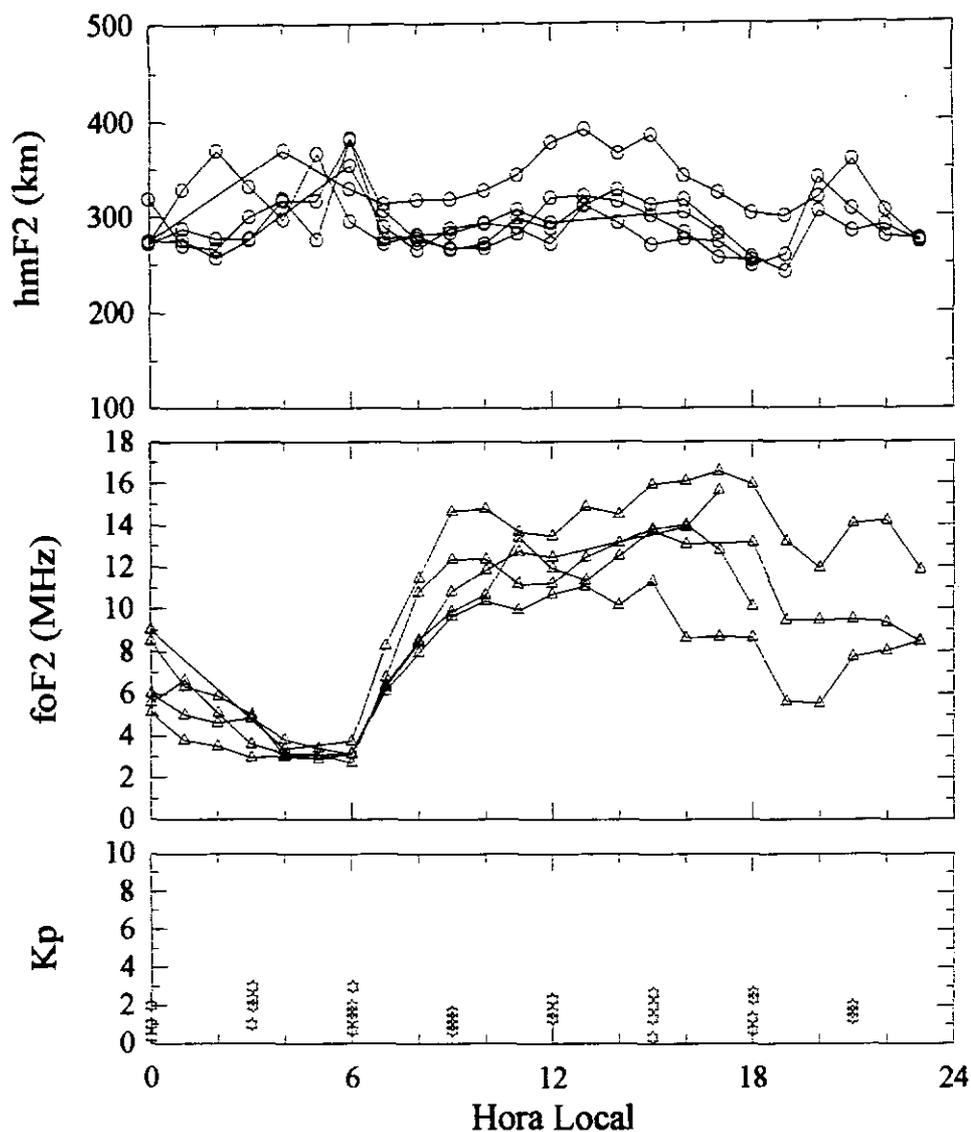


Fig. 5.8 - Superposições das variações diurnas de hmF2, foF2 e Kp para inverno de atividade solar máxima. Dados registrados em Cachoeira Paulista.

5.3 - MUDANÇAS NOS PARÂMETROS DE ENTRADA DO SUPIM

Uma das grandes vantagens dos modelos de simulação computacional é podermos avaliar a resposta das grandezas simuladas às variações nos parâmetros de entrada dos modelos. Então, a idéia é descobrir os parâmetros de entrada do SUPIM que estão influenciando de forma negativa sobre os parâmetros simulados e tentar ajustá-los até conseguir bons resultados, ou seja, minimizar a diferença entre os

valores modelados e os dados observados. Um exemplo sobre o procedimento destes ajustes é o que foi feito no capítulo anterior, onde constatamos que o fluxo solar EUV fornecido pelo modelo EUV94 ao ser usado pelo SUPIM proporcionou resultados de foF2 superestimados para a estação de Huancayo. Então, reduzindo este fluxo em 40% os resultados simulados se aproximaram dos dados observados. Basendo-se nas simulações de Huancayo, apresentadas no capítulo anterior, e analisando os resultados de simulações para Fortaleza e Cachoeira Paulista concluímos que era necessário ajustar outros parâmetros, além de fluxo solar EUV, tais como: ventos neutros e derivas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

A Figura 5.9 mostra um fluxograma ilustrando, de forma geral, todo o procedimento usado para ajustar os parâmetros de entrada do modelo SUPIM. Conforme podemos ver neste fluxograma, a nossa idéia é a seguinte: como ponto de partida usa-se o vento do modelo HWM90, a deriva obtida pelo método de Batista et al. (1996) (MDB) e o fluxo EUV do modelo EUV94. Então, executa-se o SUPIM com estes parâmetros para calcular variações diurnas de hmF2 e foF2 sobre Fortaleza. Comparam-se estes resultados com os dados observados e, se em determinada hora não existir boa concordância, modificam-se estes parâmetros iniciais até que os resultados modelados atinjam uma boa concordância com os dados experimentais. De fato, no momento que esta concordância for satisfatória teremos calculados os ventos, a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, hmF2 e foF2 sobre a estação de Fortaleza e também será determinado o fluxo EUV.

Tendo estabelecido o padrão diurno da deriva equatorial, corrigido o fluxo EUV e os ventos de Fortaleza (latitude magnética $\cong -3^\circ$ no período de 1985-1991), a próxima etapa, conforme mostra o fluxograma, é fazer os ajustes nos parâmetros de entrada que afetam os resultados das simulações para Cachoeira Paulista (latitude magnética $\cong -15^\circ$ no período de 1985-1991). De fato, isso será feito se houver necessidade. Entretanto, já que estamos fazendo um estudo simultâneo da ionosfera de Fortaleza e de Cachoeira Paulista, os parâmetros ajustados de Fortaleza serão mantidos.

Por causa disso, fica faltando apenas ajustar os ventos e incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul no setor de Cachoeira Paulista.

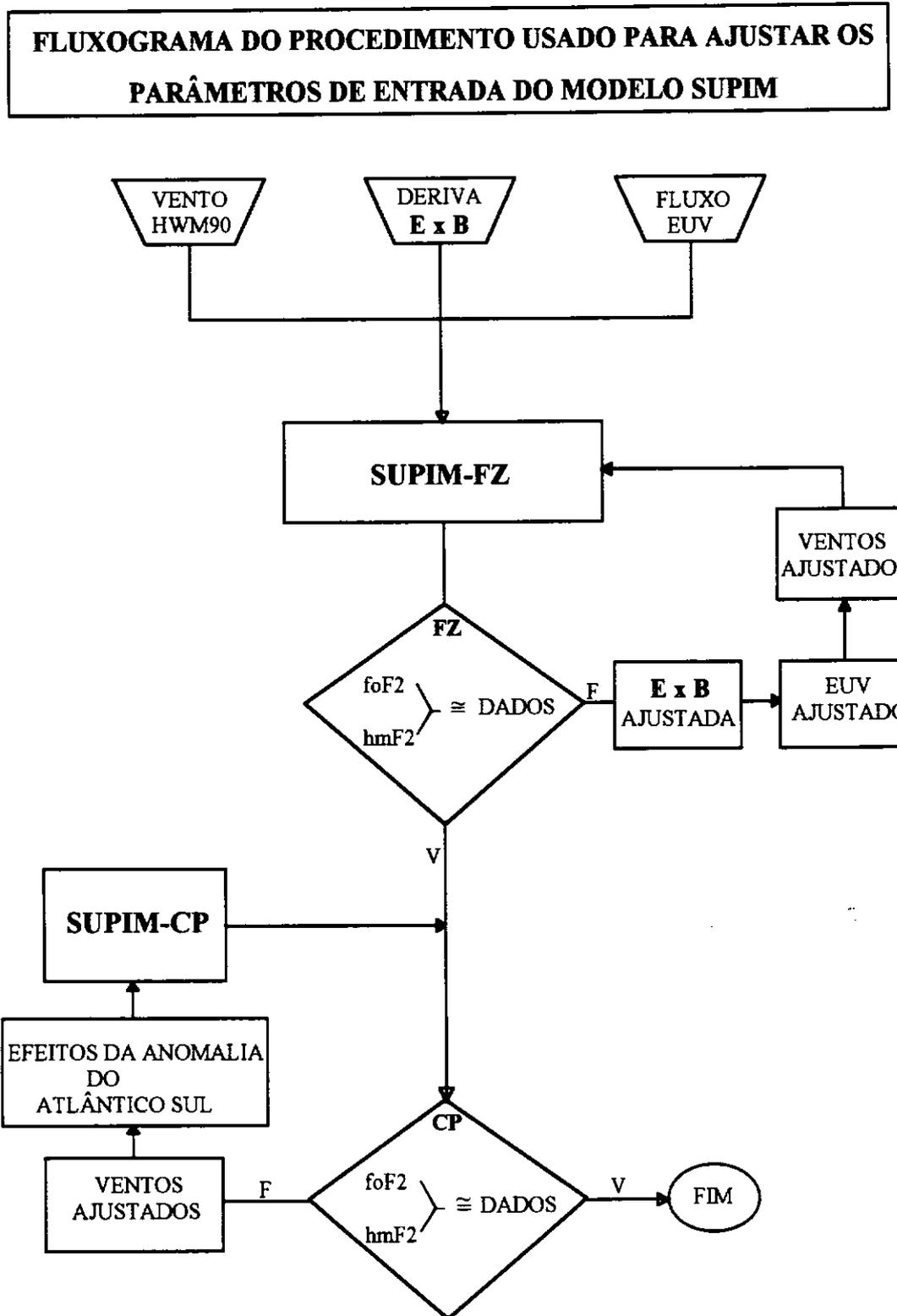


Fig. 5.9 - Procedimento dos ajustes dos parâmetros de entrada do modelo SUPIM.

O procedimento para ajustar os ventos e incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul sobre Cachoeira Paulista é semelhante ao procedimento dos ajustes dos parâmetros de entrada das simulações para Fortaleza, ou seja, depois que executar o SUPIM, incluindo os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul e com o vento inicial, observam-se os horários onde existem discordâncias entre hmF2 e foF2 modelados e dados observados. Constatando isso, fazem-se as mudanças nos ventos e executa-se o SUPIM até que ele produza bons resultados.

É importante esclarecer que o SUPIM também considera variações verticais tanto na deriva como no vento neutro. No caso do vento, além das variações verticais, estão incluídas variações latitudinais e longitudinais. Para introduzir os ajustes no vento foi necessário fazer algumas aproximações. O SUPIM calcula todos os seus parâmetros ao longo das linhas de campo geomagnético e cada ponto considerado sobre a linha de campo possui altitude, latitude e longitude diferente. Então para descobrir os efeitos dos ventos sobre os valores de hmF2 e foF2 calculados sobre Cachoeira Paulista, adotamos que as variações dos ventos que causam mudanças em hmF2 e foF2, bem como em toda a distribuição vertical do plasma ionosférico, seguem as mesmas características do vento calculado pelo modelo HWM90 em 300 km de altitude. Com isso, os ajustes feitos nos ventos não provocam mudanças nas variações verticais dos ventos obtidos pelo modelo HWM90. Por exemplo, se em determinada hora local descobrimos que é necessário adicionar/subtrair um valor para ajustar o vento inicial (vento obtido em 300 km) esse ajuste será feito em todas as altitudes. Outra consideração foi adotada para que tanto a região de Fortaleza como a região de Cachoeira Paulista sintam os efeitos dos ventos modificados. O SUPIM usa coordenadas magnéticas nos seus cálculos, então pegamos uma faixa de latitude magnética de -2° a -9° para representar o setor de Fortaleza e uma faixa de -14° a 24° para o setor Cachoeira Paulista e o vento passou a ser ajustado apenas dentro destas faixas. Para evitar variações bruscas do vento ajustado nas extremidades das faixas de latitude fizemos uma suavização linear, ou seja, o vento ajustado decai linearmente com a variação de latitude à medida que se afasta de cada faixa de latitude magnética até atingir o valor produzido

pelo HWM90. Entre a faixa de latitude do setor de Fortaleza e a faixa do setor de Cachoeira Paulista a linearização foi feita interpolando os ventos ajustados de Fortaleza com os ventos de Cachoeira Paulista.

O modelo SUPIM considera a variação vertical das derivas $E \times B$ da seguinte forma: para altitudes abaixo de 600 km as derivas se mantêm fixas e os seus valores são representativos das derivas medidas ou calculadas em torno de 300 km de altitude. Em 2500 km de altitude é considerado uma deriva padrão, ou seja, uma deriva fixa obtida através de medidas feitas em Arecibo. A deriva acima de 4000 km é igual a zero e nos intervalos de altitudes entre 600-2500 km e 2500-4000 km a deriva é calculada por uma interpolação linear, onde os dados para fazer a interpolação são estes mencionados anteriormente. Um detalhe extremamente importante que deve ser levado em consideração durante os ajustes das derivas é a necessidade de manter sempre igual a zero o resultado da integração do perfil diurno da deriva, ou seja, a área total formada pelo perfil da deriva, como mostra a Figura 5.10, deve ser mantida igual a zero antes de ser usada pelo modelo SUPIM. Portanto, sempre que for feita uma mudança na deriva esta condição precisa ser devidamente verificada. Se a condição de área total nula não for obedecida teremos problemas de convergência nas equações do modelo SUPIM.

A Figura 5.10 mostra um exemplo de deriva ajustada e serve para chamar a atenção sobre o cuidado que devemos ter ao fazer mudanças na deriva que vai ser usada no modelo SUPIM.

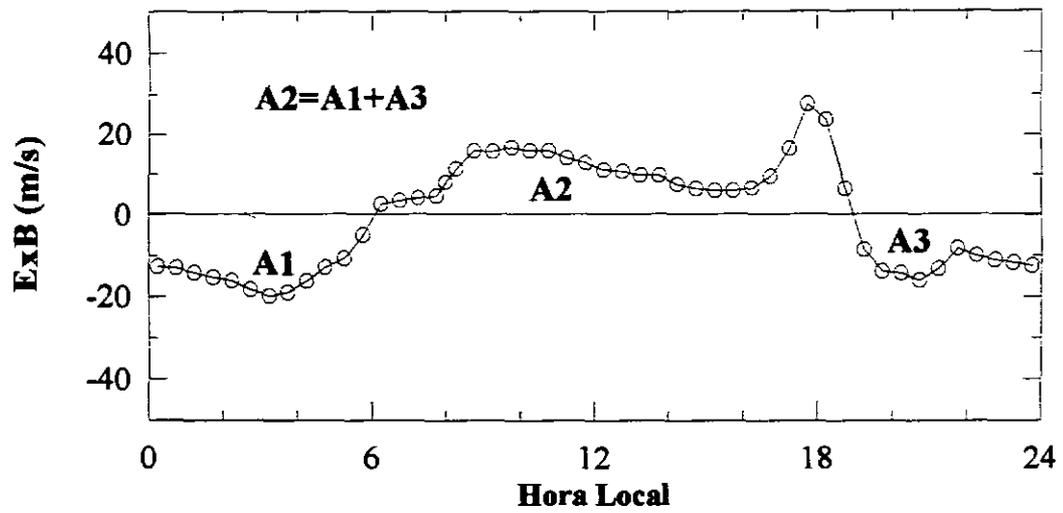


Fig. 5.10 - Variação diurna da deriva $E \times B$ sobre Fortaleza prevista pelo modelo de Medeiros (1995) e ajustada para ser usada no modelo SUPIM.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo vamos apresentar e discutir os resultados das simulações de foF2 e hmF2, feitas com o SUPIM para verão de atividade solar mínima, verão de atividade solar máxima, inverno de atividade solar mínima e inverno de atividade solar máxima.

6.2 - SIMULAÇÕES DE foF2 E hmF2 PARA VERÃO DE ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA EM FORTALEZA E EM CACHOEIRA PAULISTA

A Figura 6.1 mostra na sequência (a), (b), (c) e (d) os perfis diurnos das derivas eletromagnéticas $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ventos neutros e também, dados e resultados de foF2 e hmF2 sobre Fortaleza. A deriva calculada pelo método de Batista et al. (1996) vamos chamá-la de MDB e a deriva ajustada vamos nomeá-la de MDA. Conforme podemos ver na Figura 6.1a, entre 17:00 e 20:00 horas, a curva da deriva MDB se conecta com a curva com bolinhas e barras de erro. Isso acontece porque neste horário, segundo o método de Batista, a deriva é calculada fazendo a média das variações de h'F por tempo ($\Delta h'F/\Delta t$). Decidimos então, destacar as derivas calculadas com este método e como tínhamos os dados de h'F disponíveis, calculamos os desvios. Nos outros horários, este método usa valores das derivas calculadas por Fejer et al. (1991) e assim não foi possível calcular os desvios padrões.

Os ventos neutros calculados pelo modelo HWM90 sobre Fortaleza, também mostrados na Figura 6.1b, serão chamados de MVH-FZ e sempre que forem mostrados neste trabalho serão ventos calculados em 300 km, como explicamos no capítulo anterior. Os ventos calculados por HWM90 são fornecidos em coordenadas

geográficas, uma componente é meridional e a outra zonal. Já que o SUPIM calcula seus parâmetros ao longo das linhas de campo, projetamos estas componentes ao longo das linhas para obter os ventos paralelos ao meridiano magnético (VMM). As mudanças dos ventos, quando estivermos estudando os efeitos das suas variações sobre foF2 e hmF2, serão sempre realizadas sobre os ventos VMM.

Nas Figuras 6.1c,d temos os valores médios de foF2 e hmF2 registrados em Fortaleza. As barras de erros mostram os desvios padrões sobre estas médias. Temos também, junto com os valores médios de foF2 e hmF2, os resultados de duas execuções do SUPIM. As curvas com círculos (Fig. 6.1c,d) mostram os resultados de foF2 e hmF2 calculados pelo SUPIM, onde foi considerado fluxo solar EUV igual aos valores dados pelo modelo EUV94 (euvt), deriva e ventos iguais a MDB e MVH-FZ respectivamente. Sendo euvt, MDB e MVH-FZ as variáveis em destaques usadas no SUPIM podemos simplificar essa descrição com a seguinte função:

$$\text{SUPIM}(\text{euvt}, \text{MDB}, \text{MVH-FZ}).$$

Já as curvas com losângulos mostram os resultados modelados usando também o vento MVH-FZ, mas tanto o fluxo solar como a deriva foram mudados. Neste caso temos,

$$\text{SUPIM}(\text{euvt} * 1,25, \text{MDA}, \text{MVH-FZ}),$$

onde $\text{euvt} * 1,25$ significa que o fluxo solar EUV fornecido pelo modelo EUV94 foi aumentado em 25% e MDA é a deriva mostrada na Figura 6.1a.

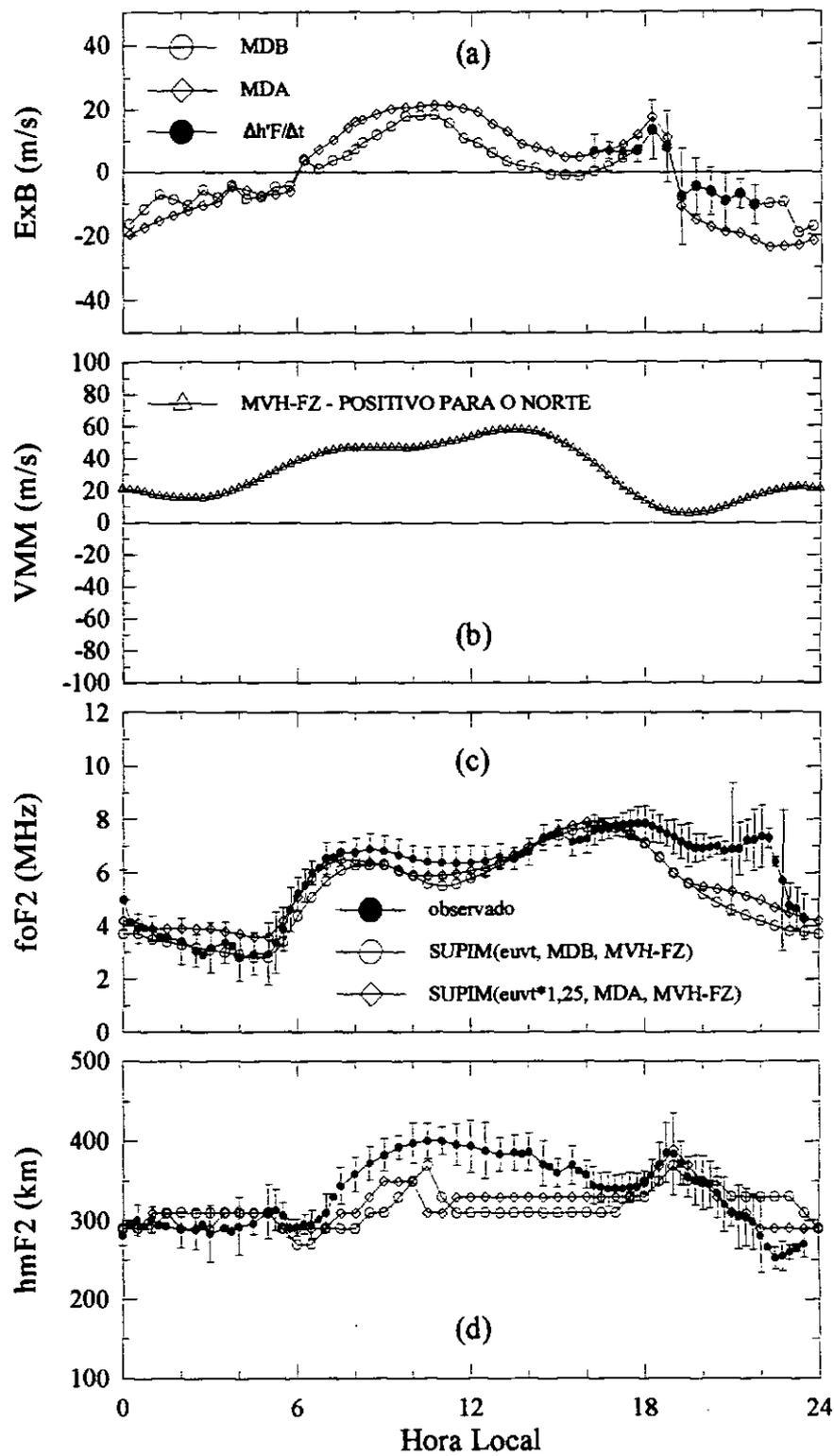


Fig. 6.1 - (a) Derivas eletromagnéticas $E \times B$, (b) vento ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza. Efeitos das derivas e do fluxo solar EUV, durante verão de atividade solar mínima.

Comparando o primeiro resultado do SUPIM, SUPIM(euvt, MDB, MVH-FZ), com os dados observados podemos ver que os valores de foF2 modelados apresentam uma boa concordância, mostrando discordância apenas entre 18:00 e 24:00 horas, mas neste horário a representatividade dos dados é muito baixa como pode ser visto na Figura 5.1 e por isso não podemos afirmar que os resultados modelados estão corretos ou incorretos. Essa falta de dados entre 19:00-24:00 horas é causada pelo fenômeno de espalhamento da região F (Spread-F). Os resultados de hmF2 obtidos pelo SUPIM(euvt, MDB, MVH-FZ) não mostram boa concordância entre os intervalos 07:00-16:00 e 21:00-24:00 horas.

Com o objetivo de melhorar os resultados do SUPIM sobre Fortaleza, fizemos mudanças no fluxo solar e na deriva produzindo os resultados com SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVH-FZ). Estas mudanças foram efetuadas fazendo pequenas variações, tanto no fluxo dado por EUV94 como na deriva MDB, até conseguir os melhores resultados de foF2 e hmF2 quando comparados com os dados observados. Para fazer estas mudanças seguimos os mesmos critérios definidos na simulação de Huancayo (Capítulo 4).

Como podemos ver nas Figuras 6.1c e 6.1d (curvas com losângulos) foi possível melhorar a concordância entre dados de foF2 observados e os resultados do SUPIM fazendo correções no fluxo solar e na deriva. Mas nos resultados de hmF2 ainda continua uma discordância entre 07:00 e 16:00 horas, onde é constatado que os valores de hmF2 modelados estão inferiores aos dados observados. Na verdade, foram feitas várias tentativas para melhorar a concordância de hmF2 modelado com os dados observados. No princípio achávamos que aumentando os valores da deriva MDA das 07:00 às 16:00 horas, conseqüentemente teríamos um aumento de hmF2. Entretanto, fazendo uma simulação incluindo esses ajustes em MDA (MDA1) observamos uma queda nos valores de foF2 e os valores de hmF2 não aumentaram, conforme pode ser visto nas Figuras 6.2c,d.

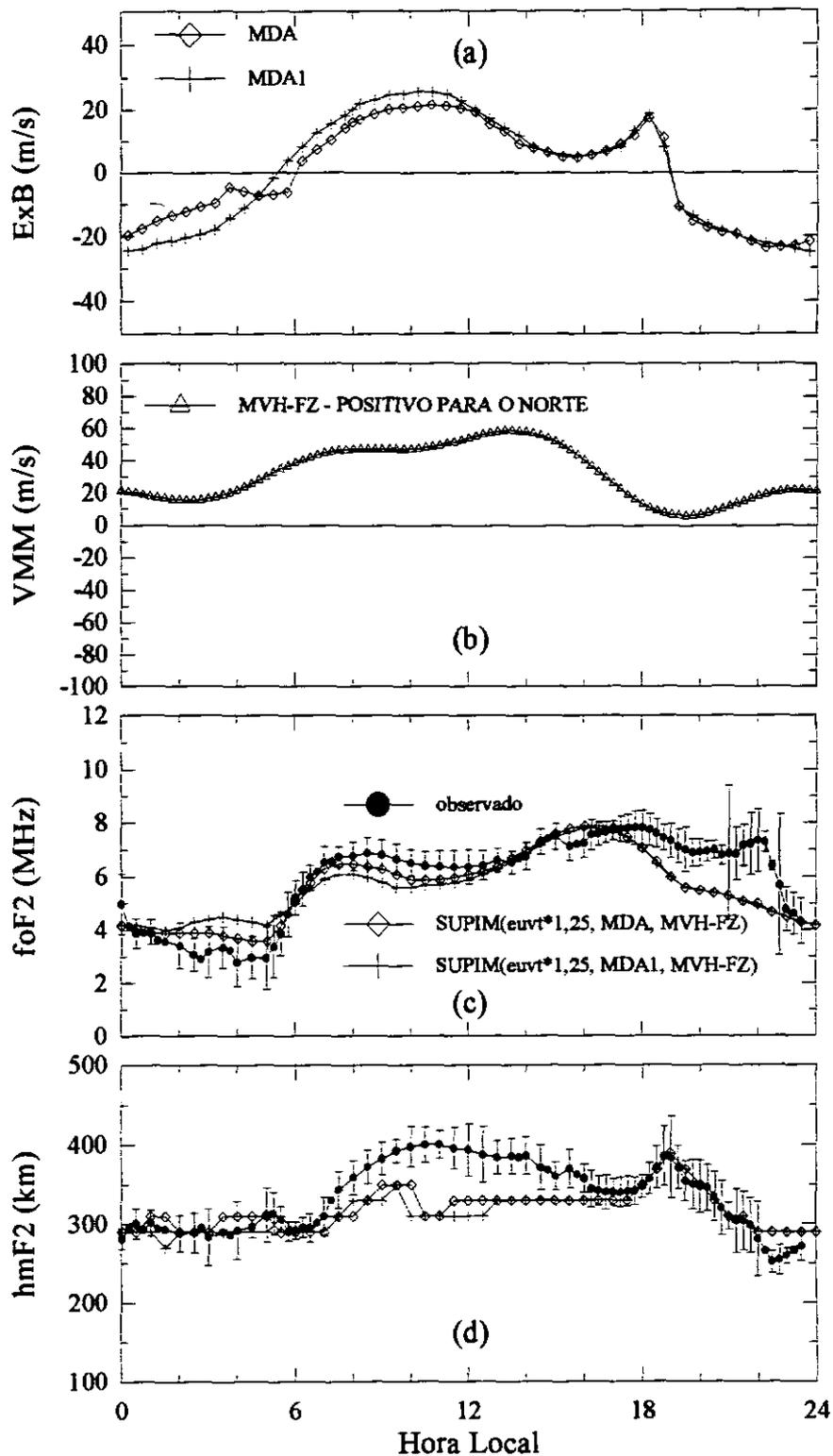


Fig. 6.2 - Efeitos das mudanças no modelo de deriva MDA sobre foF2 e hmF2 de Fortaleza, durante verão de atividade solar mínima. (a) Derivas eletromagnéticas $E \times B$, (b) vento ao longo do meridiano magnético, (c) e (d) dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2.

Observando a Figura 6.2 podemos constatar que aumentando a deriva MDA, no horário entre 07:00-16:00 horas, foi necessário diminuir os valores desta deriva entre 00:00-06:00 horas (veja modelo de deriva MDA1 na Figura 6.2a), pois a área total formada pela deriva deve ser nula ($A_T = 0$). A mudança da deriva MDA entre 00:00-06:00 horas também afetou foF2, provocando um aumento em relação aos valores observados e também em relação aos resultados produzidos com a deriva MDA, como podemos ver na Figura 6.2c.

Observando os resultados de foF2 e hmF2 produzidos com o uso da deriva MDA (Figuras 6.1c,d) constatamos que mais de 50% dos valores diurnos destes parâmetros atingem ótima concordância com os dados observados. Então, assumindo que a deriva MDA está correta nos horários onde foF2 e hmF2 atingem concordância com os dados, e levando em consideração que a área total do perfil diurno das derivas deve ser zero, e ainda considerando que pequenos ajustes na deriva MDA provocou discordâncias não apenas em hmF2, mas também em foF2, podemos concluir que o modelo de deriva MDA é o mais adequado para representar a variação diurna da deriva $E \times B$ para verão de atividade solar mínima sobre Fortaleza.

A conclusão de que a deriva MDA está satisfatória para os propósitos deste trabalho, pode ser entendida com mais clareza da seguinte forma: primeiro é importante lembrar que a proposta era fazer ajustes na deriva até encontrar bons resultados de foF2 e de hmF2 sobre Fortaleza, usando o modelo SUPIM. Com o modelo de deriva MDA, conseguimos bons resultados para foF2 e para hmF2 apenas em alguns horários, mas é fácil entender que esse modelo de deriva atingiu dimensões satisfatórias. Assumindo que mais de 50% do perfil diurno de MDA está correto, então, mais de 50% da área total também está correta e não apenas em tamanho, mas também em geometria. Entretanto, já que a área total das derivas deve ser nula, podemos garantir que o restante da área formada pelo modelo de deriva MDA, pelo menos no que diz respeito ao tamanho, está correto. Sobre a geometria, no momento que introduzimos mudanças na deriva MDA e isso trouxe uma discordância nos resultados de foF2 (Figura

6.2c), temos uma indicação de que a geometria da área formada pelo perfil da deriva MDA, mesmo nos horários onde os resultados de hmF2 não concordam com os dados observados, também está correta. Portanto, acreditamos que existe outro parâmetro ionosférico interferindo no controle da altura da região F2 (hmF2) e por isso não conseguimos boa concordância nos resultados de hmF2. Provavelmente, o parâmetro ionosférico do qual estamos falando seja o vento meridional.

Sabemos que, pelo menos em torno das 11:00 horas, uma combinação de vento com a deriva $E \times B$ em regiões equatoriais pode não apenas produzir um intenso aumento na altura da região F ionosférica bem como a formação de uma camada extra, ou seja, a camada F3 (Balan e Bailey, 1995; Bailey et al., 1996). Portanto, achamos que uma combinação adequada de ventos com a deriva pode melhorar os resultados de hmF2 entre 07:00-16:00 horas e baseando nisso vamos ajustar o vento meridional sobre Fortaleza, isto é, fazer mudanças no vento produzido pelo modelo HWM90 para tentar superar as discordâncias dos resultados de hmF2.

Antes de iniciarmos os ajustes do vento meridional sobre Fortaleza, vamos analisar hmF2 e foF2 calculado pelo SUPIM sobre a estação de Cachoeira Paulista, pois a proposta deste trabalho é estudar o comportamento ionosférico em Fortaleza e em Cachoeira Paulista, simultaneamente. Desta forma, precisamos analisar os resultados de cada etapa para descobrir o que está acontecendo sobre cada estação.

Conforme mencionamos no Capítulo 5, o fato de trabalharmos com dados simultâneos de Fortaleza e Cachoeira Paulista, nos permite usar os valores ajustados, tanto da deriva de Fortaleza (MDA) como do fluxo solar EUV para simular os parâmetros ionosféricos de Cachoeira Paulista.

Para estudar os efeitos das variações da deriva sobre os parâmetros foF2 e hmF2 de Cachoeira Paulista, da mesma forma que foi feito para Fortaleza, executamos o SUPIM para Cachoeira Paulista de duas maneiras:

a) SUPIM(euvt, MDB, MVH-CP)

b) SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVH-CP).

Na Figura 6.3 temos os resultados destas simulações juntos com os dados observados. Também neste caso, as barras de erros nos dados observados mostram os desvios padrões. Observando a Figura 6.3c podemos ver que, tanto os resultados de foF2 modelados com a condição a) como os resultados da condição b) estão abaixo do que era esperado. Sabemos que Cachoeira Paulista está situada na região da Anomalia do Atlântico Sul e devido a isso, neste setor, existe uma contribuição extra de ionização por partículas além da gerada por fotoionização. De fato, na região desta anomalia, partículas energéticas se precipitam na ionosfera produzindo um aumento na ionização (Batista, 1975; Abdu e Batista, 1977). O SUPIM não inclui esta produção de ionização, portanto isso pode ser uma das causas das diferenças entre os dados observados e os resultados modelados. Uma das tarefas deste trabalho será a de incluir no SUPIM esta produção e isso será discutido na próxima seção.

Através dos resultados do SUPIM mostrados na Figura 6.3c, podemos constatar que as diferenças entre foF2 modelado com SUPIM(euvt, MDB, MVH-CP) e SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVH-CP) são causadas basicamente pelo aumento do fluxo EUV, pois ao aumentar o fluxo, foF2 responde com um aumento quase na mesma proporção durante todos as horas do dia, enquanto nos horários onde introduzimos grandes alterações na deriva (veja Figura 6.3a), nestes mesmos horários não se percebem mudanças significativas superpostas aos efeitos do fluxo.

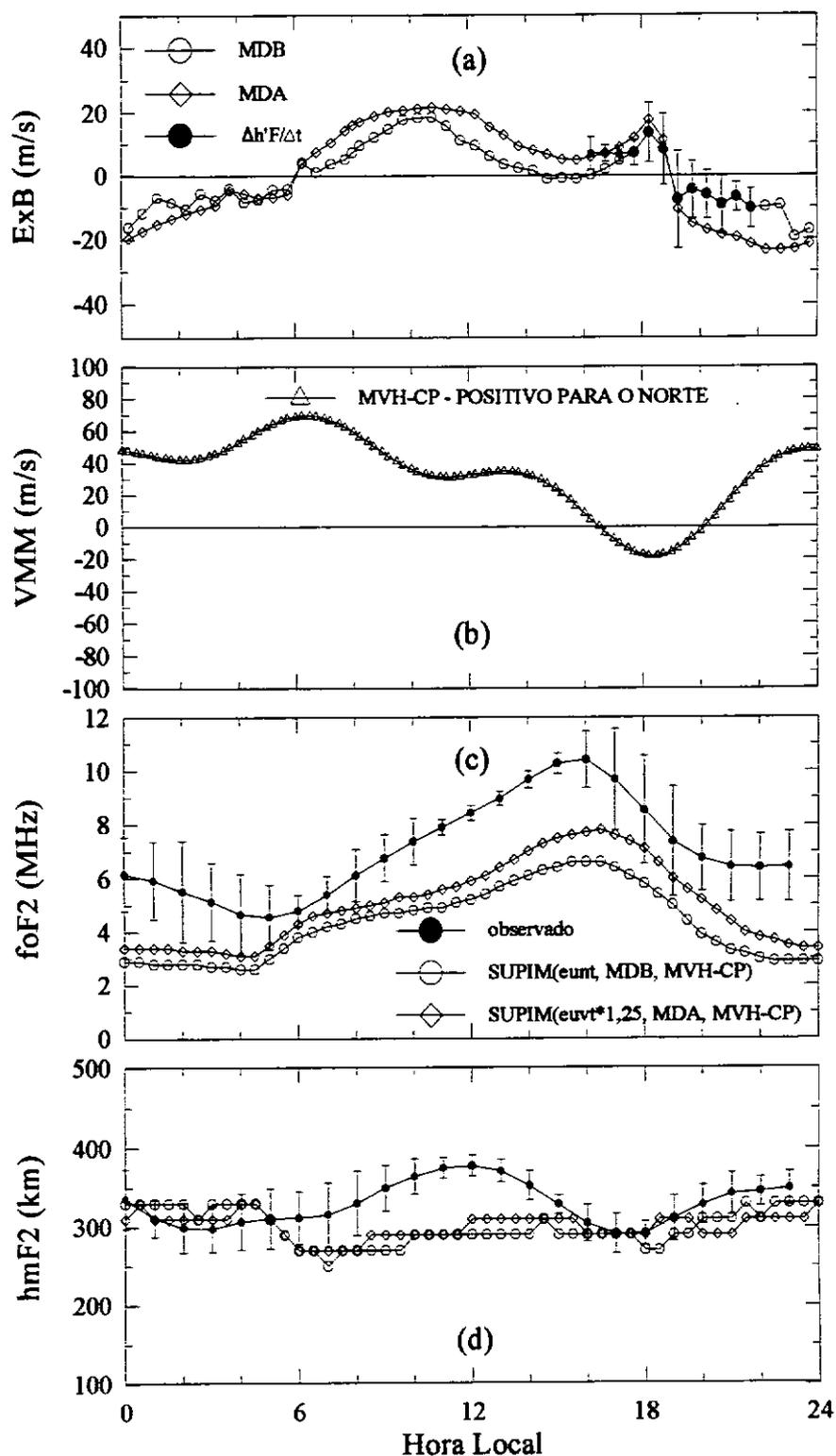


Fig. 6.3 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de $foF2$ e $hmF2$ em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das derivas e do fluxo solar EUV.

A Figura 6.3d apresenta os resultados de hmF2 simulados com as condições (a) e (b) e conforme está mostrado as diferenças entre os resultados destas simulações não são significativas. Isso significa que este parâmetro sobre Cachoeira Paulista, durante verão de atividade solar mínima, não é sensível às mudanças da deriva. Cachoeira Paulista se encontra bastante afastada do equador magnético e também está situada num local onde os ângulos de inclinação e declinação magnética são bastante expressivos. Por causa de tudo isso os ventos passam a desempenhar um papel dominante no controle de subida ou descida da camada F ionosférica, pois estes ventos ao movimentar o plasma, farão as partículas ionizadas seguir a geometria das linhas de campo geomagnético. Então, sobre Cachoeira Paulista, se os ventos sopram para o norte esperamos uma subida das camadas ionosféricas e se os ventos sopram para o sul esperamos que as camadas abaixem. Comparando os resultados modelados de hmF2 com os dados observados podemos ver que os resultados das duas simulações estão subestimando hmF2 entre 06:00 e 15:00 horas e também entre 20:00 e 24 horas. Como nestas duas simulações foi mantido o vento MVH-CP, então sugerimos uma correção deste modelo de vento para superar os problemas de hmF2 sobre Cachoeira Paulista. Na seção 6.2.2 vamos estudar os efeitos dos ventos sobre hmF2 e sobre foF2 em Cachoeira Paulista e em Fortaleza, para tentar corrigir os ventos produzidos pelo modelo HWM90 e determinar bons resultados tanto de foF2 como de hmF2.

6.2.1 - EFEITOS DA ANOMALIA DO ATLÂNTICO SUL SOBRE foF2 E hmF2 EM CACHOEIRA PAULISTA

Para estudar os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul sobre a ionosfera de Cachoeira Paulista desenvolvemos um método que usa cálculos teóricos da taxa de produção por fotoionização e dados de foF2 e hmF2. A idéia é incluir uma produção de ionização extra sobre a região de Cachoeira Paulista que seja equivalente à produção devida à precipitação de partículas. Na verdade, trata-se de um artifício simplificado e de fácil implementação na modelagem sem grandes alterações no código computacional do modelo SUPIM.

A variação diurna da taxa de produção causada por fotoionização é controlada pela variação do ângulo χ , o qual é definido como o ângulo zenital solar, ou seja, o ângulo entre a direção zenital e o direção do fluxo solar (Sol-Terra). Em torno do meio dia χ atinge seu valor mínimo e por isso a produção por fotoionização neste horário chega a um valor máximo. Durante a noite χ torna-se maior do que 90° e a produção por radiação solar desaparece. Para calcular a produção de ionização equivalente à produção devida à Anomalia do Atlântico Sul (P_{AAS}) fixamos χ com o valor de $12,8^\circ$ ($\chi_f = 12,8^\circ$ - coordenada magnética). Usando a equação da taxa de produção por fotoionização (2.10) com $\chi = \chi_f$, encontramos uma taxa de produção, a qual vamos chamá-la de P_{χ_f} . Apenas uma fração de P_{χ_f} será adicionada a taxa de produção total ($P_T = \sum_i P_i$) e essa fração será ajustada baseando-se nos dados de foF2 e hmF2. Tudo isso pode ser facilmente entendido pela seguinte equação:

$$P_{AAS} = \alpha P_{\chi_f} \quad (6.1)$$

onde α será encontrado baseando-se nos dados de foF2 e hmF2. Sabemos que a taxa de produção total (P_T) é calculada apenas durante o dia, entretanto, a taxa de produção devido a Anomalia do Atlântico Sul (P_{AAS}) será levada em consideração tanto de dia como de noite, pois as partículas se precipitam constantemente. A escolha de $\chi_f = 12,8^\circ$ foi arbitrária entre a faixa de 0° e 90° . Este método, conforme foi apresentado, faz um ajuste na taxa de produção por fotoionização para calcular P_{AAS} e esse ajuste é controlado pelo fator α , então, podemos usar qualquer valor de χ entre 0° - 90° , pois ao escolher o ângulo o resultado final vai depender apenas do fator α .

Através dos resultados do SUPIM apresentados na Figura 6.3 podemos constatar que de manhã, entre 00:00-05:30, e à tarde, entre 15:00-19:00 horas, os resultados de hmF2 apresentam concordância com os dados experimentais, com isso podemos supor que nestes horários o vento local, ou seja, o vento sobre Cachoeira Paulista produzido por HWM90 apresenta um comportamento real. Então, as diferenças

entre os valores de foF2 modelados e experimentais, nestes horários são causadas apenas pelos efeitos das precipitações de partículas na região da Anomalia do Atlântico Sul. Portanto, ajustando $P\chi_f$, ou seja, descobrindo um valor para o coeficiente α de tal forma que $P_T + \alpha P\chi_f$ proporcione resultados de foF2 com boa concordância com os dados, pelo menos nos horários em que hmF2 também concorda, teremos encontrado a taxa de produção devido a Anomalia (P_{AAS}). Seguindo este procedimento, encontramos que os melhores resultados de foF2 foram alcançados quando adicionamos 15% de $P\chi_f$ à taxa de produção total. Assim, podemos representar a produção devida aos efeitos da Anomalia, para esse período de verão de atividade solar mínima, por $P_{AAS} = 0,15P\chi_f$. Para este período em estudo, isto é, verão de 1985, Cachoeira Paulista estava situada em torno de -15° de latitude magnética. Então, decidimos que essa taxa de produção extra (P_{AAS}) será incluída apenas na faixa de latitude magnética entre -15° e -20° . Para evitar descontinuidade na taxa de produção global ($P_T + 0,15P\chi_f$) foi feita uma interpolação linear nas bordas dessa faixa de latitude, onde interligamos os seguintes pontos: $P_T(-12^\circ)$ com $(P_T(-15^\circ) + P_{AAS})$ e $(P_T(-20^\circ) + P_{AAS})$ com $P_T(-26^\circ)$. Vários testes foram feitos para definir essa faixa e o critério adotado foi a escolha de uma faixa, na qual incluindo os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul, não provocasse variações significativas nos resultados de foF2 de Fortaleza.

A Figura 6.4 mostra os resultados de duas simulações feitas com o SUPIM. Uma com os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul (SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVH-CP, AAS)) e a outra sem estes efeitos (SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVH-CP)). O resultado sem os efeitos da Anomalia são iguais aos mostrados na Figura 6.3. Conforme podemos ver na Figura 6.4c, os resultados de foF2 atingiram concordância com os dados apenas entre 03:00- 08:00 horas. De acordo com o que foi discutido anteriormente, nos horários em que hmF2 modelado concordava com os dados, era esperado que a discordância entre foF2 calculado e foF2 experimental desaparecesse quando fosse incluído o efeito da Anomalia do Atlântico Sul. Porém, no horário entre 15:00-18:00 horas, hmF2 apresenta boa concordância com os dados observados e foF2 continua inferior aos dados observados.

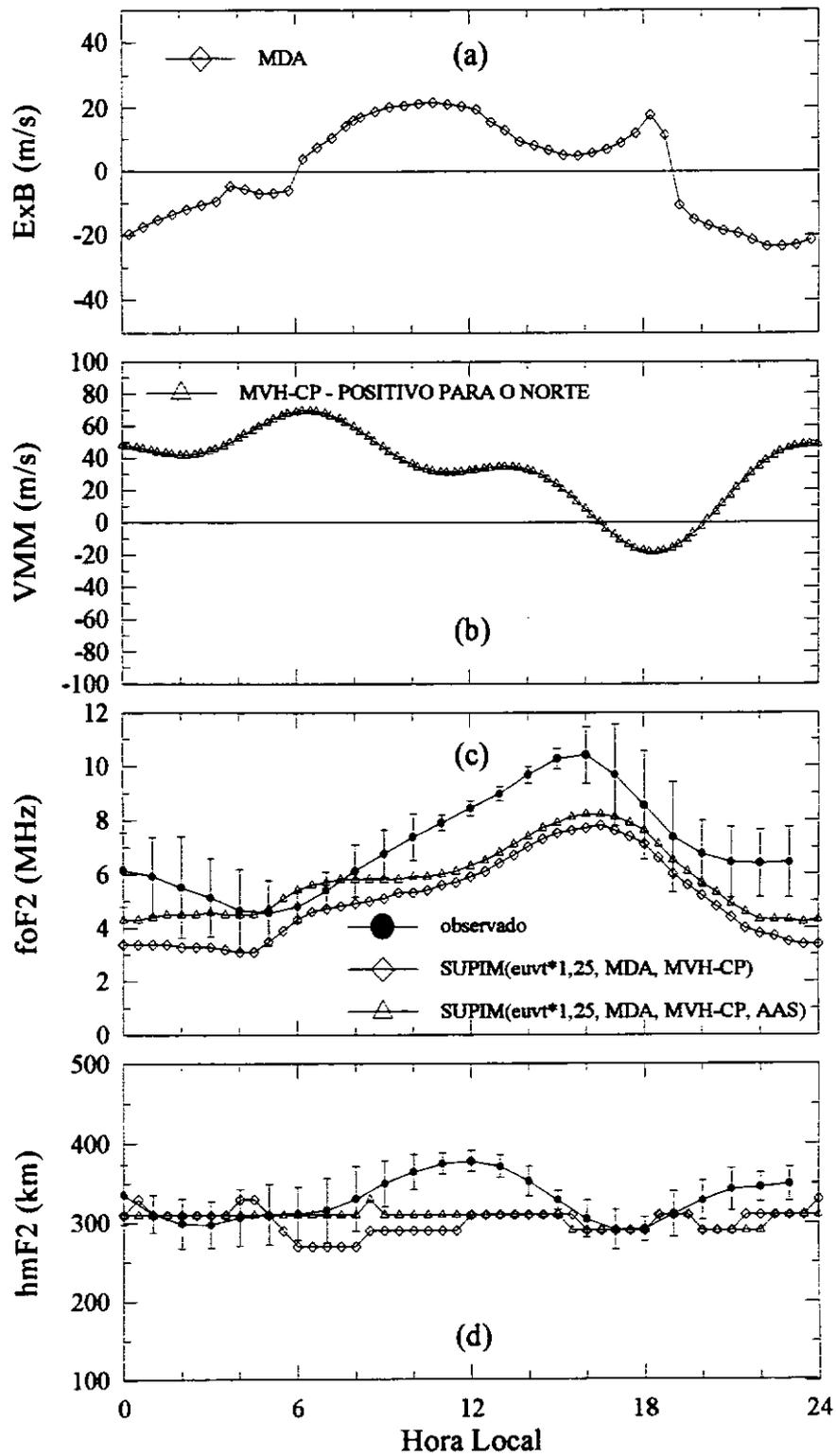


Fig. 6.4 - Deriva eletromagnética $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos da Anomalia do Atlântico Sul.

A explicação para as discordâncias entre os valores de foF2 (calculados e experimentais) entre 15:00-18:00 horas pode estar associada a um erro na distribuição meridional dos ventos fornecidos pelo modelo HWM90. Desta forma, podemos continuar assumindo que o vento local, isto é, o vento sobre Cachoeira Paulista neste horário produzido por HWM90 está correto, os problemas podem existir nas outras posições ao longo do meridiano magnético. É importante mencionar que entre 15:00-18:00 horas a ionosfera sobre Cachoeira Paulista sofre grandes efeitos da Anomalia Equatorial e estes efeitos também são dependentes da distribuição meridional dos ventos. Tendo em vista a complexidade da ionosfera sobre Cachoeira Paulista, durante os horários em que a Anomalia Equatorial está desenvolvida, decidimos escolher um horário em que essa Anomalia não esteja desenvolvida, ou em desenvolvimento, para ajustar P_{χ_f} e conseqüentemente encontrar a taxa de produção devido a Anomalia do Atlântico Sul (P_{AAS}). O horário adequado a essas condições é em torno das 05:00 horas.

Para ter uma idéia da coerência deste método (método usado para obter a taxa de produção devido a Anomalia do Atlântico Sul), primeiro calculamos o fluxo de partículas precipitadas (F_i) usando a taxa de produção P_{AAS} calculada em 300 km de altitude sobre Cachoeira Paulista e depois comparamos com o fluxo obtido através de medidas de satélites e publicado por Mann et al. (1963). Para obter F_i através da taxa de produção P_{AAS} usamos a seguinte equação (Rees, 1963):

$$\frac{P_z}{F_i} = \frac{1}{r_0} \frac{E_0}{\Delta E_{ion}} \lambda \left(\frac{z}{R} \right) \frac{n_z}{n_R} \quad (6.2)$$

onde:

P_z é a taxa de produção por unidade de volume (neste caso, $P_z = P_{AAS}$),

F_i é o fluxo de elétrons incidentes,

E_0 é a energia inicial do elétron (keV),

$\Delta E_{ion} = 35$ eV é a perda média de energia por par de ions formado (Banks e Kockarts, 1973),

$r_0 = \frac{R}{r}$, onde $R = 4,57 \times 10^{-6} E_0^{1,75}$ e ρ é a densidade de massa (g/cm^3) na altura de

penetração mais baixa,

n_z é a densidade numérica de átomos ou moléculas ionizáveis na profundidade z ,

n_R é a densidade numérica de átomos ou moléculas ionizáveis na profundidade R ,

$\lambda\left(\frac{z}{R}\right)$ é a função de distribuição normalizada da dissipação de energia (Rees, 1963).

De acordo com os resultados desse modelo desenvolvido por Rees (1963) a produção de íons devida à precipitação das partículas, para altitudes em torno de 300 km, é gerada principalmente por elétrons de baixa energia, ou seja, elétrons com energia menor que 1 keV. Os resultados do trabalho do Rees podem ser vistos na Figura 6.5.

Devido a falta de dados do fluxo de partículas precipitadas com baixa energia, na região da Anomalia do Atlântico Sul, foi necessário fazer uma extrapolação do fluxo de elétrons apresentado por Mann et al. (1963). Essa extrapolação foi efetuada considerando uma variação exponencial do fluxo de elétrons (F_e) da seguinte forma:

$$F_e = F_\infty \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) \quad (6.3)$$

onde

$$F_\infty = 1,6548 \times 10^3 \text{ elétrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{keV}$$

$$E_0 = 57,8 \text{ keV}$$

$E =$ energia.

Essa extrapolação também foi usada por Batista (1975) num trabalho sobre precipitações de partículas e efeitos ionosféricos associados na região da Anomalia do Atlântico Sul.

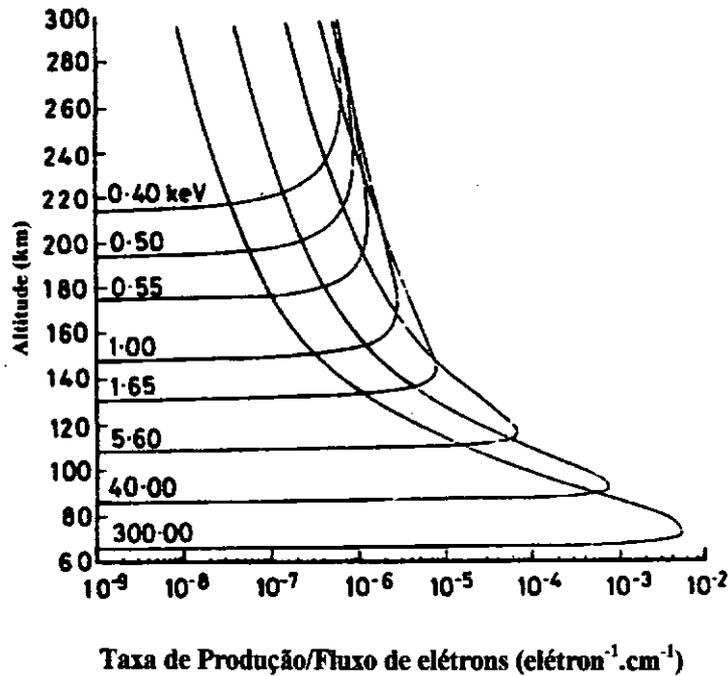


Fig. 6.5 - Taxa de produção devido a elétrons monoenergéticos de vários níveis de energia.

FONTE: Rees (1963), p. 1212.

Para concluir a comparação entre o fluxo de partículas precipitadas na região da Anomalia calculado neste trabalho (F_i), com o fluxo de elétrons obtidos a partir de dados de satélites (F_e), fixamos um nível de energia para os elétrons de 0,5 keV e também adotamos que os cálculos serão efetuados numa altitude de 300 km. Fazendo a extrapolação nos dados de Mann et al. (1963) encontramos

$$F_e(0,5 \text{ keV}; 300 \text{ km}) = 1,6405 \times 10^3 \text{ elétrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}.$$

No cálculo de F_i foi necessário introduzir algumas aproximações: primeiro calculamos a taxa de produção devida à precipitação de partículas e essa taxa de produção, de acordo com o nosso método, representa uma taxa de produção total, ou seja, um resultado no qual estão incluídos os efeitos das precipitações de partículas (elétrons e prótons) com todos os níveis de energia. Depois, com essa taxa de produção (P_{AAS}) e considerando $E_0 = 0,5 \text{ keV}$ e usando a equação desenvolvida por Rees (Equação 6.2) encontramos F_i :

$$F_i(0,5 \text{ keV}; 300 \text{ km})=2,7 \times 10^4 \text{ elétrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}.$$

Comparando o resultado de $F_e(0,5 \text{ keV}; 300 \text{ km})$ com $F_i(0,5 \text{ keV}; 300 \text{ km})$ constatamos uma grande diferença entre esses resultados, mas diante de todas as aproximações e principalmente pelo fato de considerarmos uma taxa de produção total para obter um fluxo de elétrons com uma energia fixa de 0,5 keV ($E_0 = 0,5 \text{ keV}$) esse resultado já era esperado.

Apenas para mostrar que, o fato de usarmos uma taxa de produção total (P_{AAS}) para calcular o fluxo de elétrons com uma energia fixa produziu um resultado superestimado em relação aos dados experimentais decidimos calcular um fluxo (F_T) levando em consideração a soma das contribuições de elétrons com quatro níveis de energia: 0,4; 0,5; 0,55; e 1 keV. Desta forma, assumimos que

$$\frac{P_{AAS}}{F_T} = \frac{P_z}{F_i} \Big|_{E_0=0,4} + \frac{P_z}{F_i} \Big|_{E_0=0,5} + \frac{P_z}{F_i} \Big|_{E_0=0,55} + \frac{P_z}{F_i} \Big|_{E_0=1}$$

O resultado de F_T foi

$$F_T(0,4;0,5;0,55;1; 300 \text{ km})=7,4 \times 10^3 \text{ elétrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1} \cdot \text{ster}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}.$$

Conforme podemos ver, o valor de F_T diminuiu bastante em relação ao resultado obtido considerando elétrons com apenas um nível de energia. Entretanto, diante de tudo isso, concluímos que este método para calcular a taxa de produção devido aos efeitos da Anomalia do Atlântico Sul é bastante razoável.

6.2.2 - EFEITOS DAS MUDANÇAS DOS VENTOS SOBRE foF2 E hmF2 SIMULADOS EM CACHOEIRA PAULISTA E EM FORTALEZA

Iniciamos esse estudo com a estação de Cachoeira Paulista, pois os ventos meridionais exercem maior influência no controle dos parâmetros ionosféricos dessa região do que na região de Fortaleza.

Para fazer essa investigação sobre os ventos, continuamos com as entradas fixas do fluxo solar EUV ($euvt * 1,25$), deriva $E \times B$ (MDA), taxa de produção global igual a $P_T + P_{\chi_f} * 0,15$ e ajustamos apenas os ventos no modelo SUPIM. A Figura 6.6b mostra dois modelos de ventos MVH-CP e MVA-CP (modelo de vento ajustado sobre Cachoeira Paulista) e os resultados do SUPIM para o vento MVH-CP ($SUPIM(euvt * 1,25, MDA, MVH-CP, AAS)$) e para o vento MVA-CP ($SUPIM(euvt * 1,25, MDA, MVA-CP, AAS)$) respectivamente. O modelo de vento MVA-CP difere do MVH-CP apenas no setor de Cachoeira Paulista. Conforme mostra a Figura 6.6c, os resultados de foF2 obtidos com as mudanças dos ventos (MVA-CP) apresentam as mesmas discrepâncias dos resultados calculados com o vento MVH-CP. De fato, os resultados de foF2 modelados com os ventos MVH-CP e MVA-CP diferem muito pouco um do outro e principalmente durante o dia. Isso mostra que, durante o dia, foF2 sobre Cachoeira Paulista não é sensível aos efeitos isolados dos ventos locais. Já o parâmetro hmF2 reage sensivelmente às mudanças nos ventos locais. Devido a isso, foi relativamente fácil descobrir um vento (MVA-CP) que proporcionasse excelentes resultados de hmF2, como mostra a Figura 6.6d.

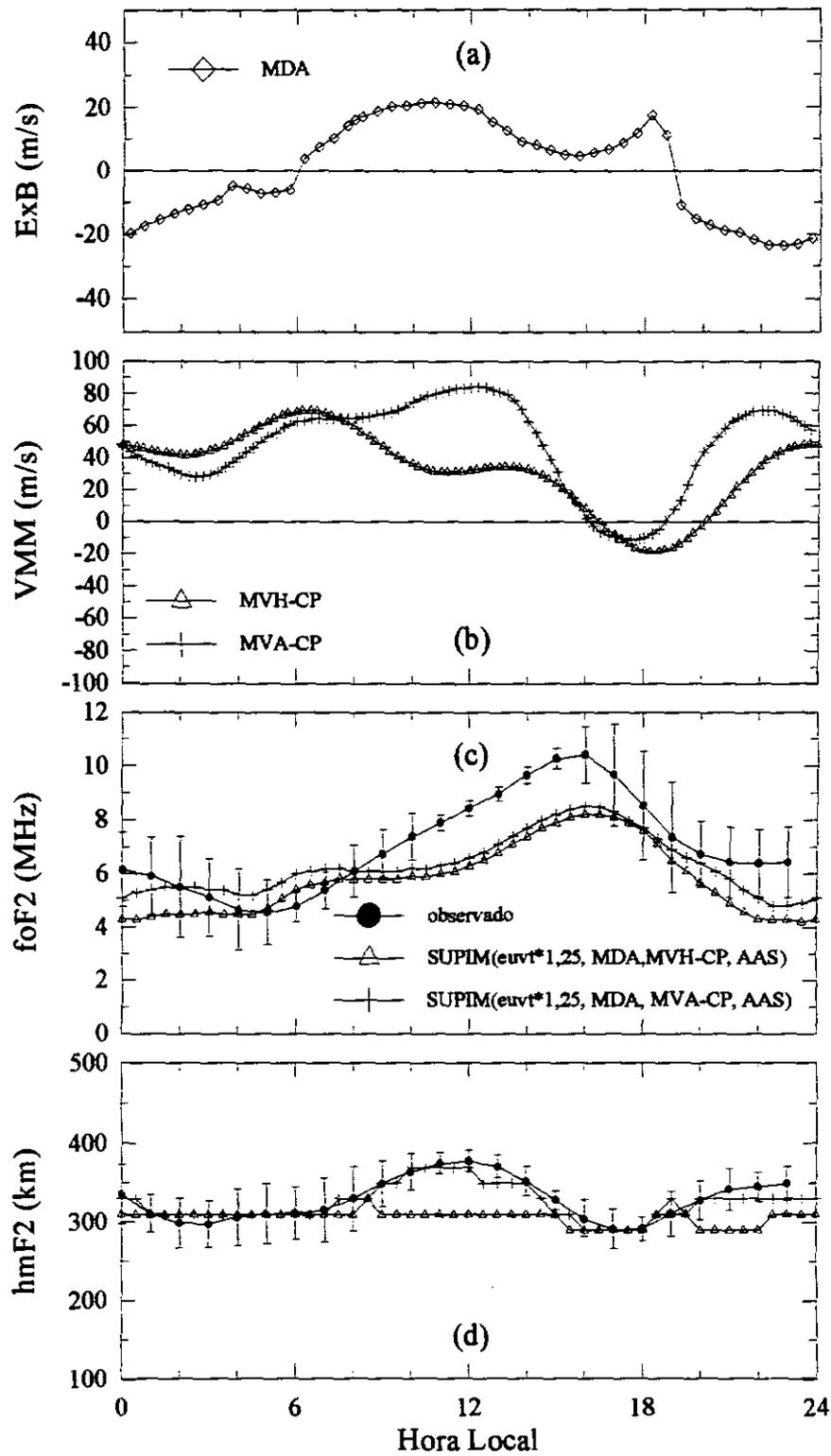


Fig. 6.6 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações do vento local.

Para investigar o comportamento de foF2, não apenas sobre Cachoeira Paulista, mas também ao longo do meridiano magnético, fizemos uma saída dos resultados de foF2 em função da latitude magnética. A Figura 6.7 mostra os resultados do SUPIM obtidos com as mesmas considerações dos resultados apresentados na Figura 6.6, porém temos valores de foF2 em função da latitude (6.7b) e calculados às 14:00 horas. Também na Figura 6.7 mostramos a variação latitudinal dos ventos MVH-CP e MVA-CP, calculados em 300 km de altitude e usados para obter os valores de foF2.

Analisando os resultados apresentados na Figura 6.7, podemos ver que os valores de foF2 sofreram alterações nas latitudes em torno do ponto conjugado de Cachoeira Paulista quando introduzimos mudanças no vento sobre Cachoeira Paulista. Devido a essa constatação, surgiu a idéia de fazer ajustes também nos ventos em torno do ponto conjugado de Cachoeira Paulista. Como ponto de partida assumimos que o modelo de vento MVA-CP está correto, pois proporciona bons resultados de hmF2. Seguindo o mesmo critério para ajustar os ventos no setor de Cachoeira Paulista, conforme foi mostrado no Capítulo 5, definimos a faixa de 14°-24° de latitude magnética para representar o setor conjugado de Cachoeira Paulista, no qual iremos também ajustar os ventos.

A Figura 6.8 mostra os resultados de foF2 obtidos com o uso dos ventos meridionais ajustados tanto em Cachoeira Paulista (MVA1-CP) como no seu setor conjugado (MVASC-CP). Conforme podemos ver nesta figura, finalmente, podemos dizer que fazendo ajustes nos ventos meridionais do setor conjugado de Cachoeira Paulista conseguimos excelentes resultados para foF2 de Cachoeira Paulista. Na verdade, o procedimento para ajustar os ventos no setor conjugado de Cachoeira Paulista foi o seguinte: primeiro fizemos uma mudança brusca no vento em torno do meio dia e descobrimos que essa mudança provocou uma reação em foF2 sobre Cachoeira Paulista com uma defasagem de aproximadamente 4 horas. Sabendo disso, passamos a fazer suaves ajustes nos ventos e sempre observando as reações de foF2 em

relação aos dados observados, até encontrar o modelo de vento MVASC-CP apresentado na Figura 6.8b.

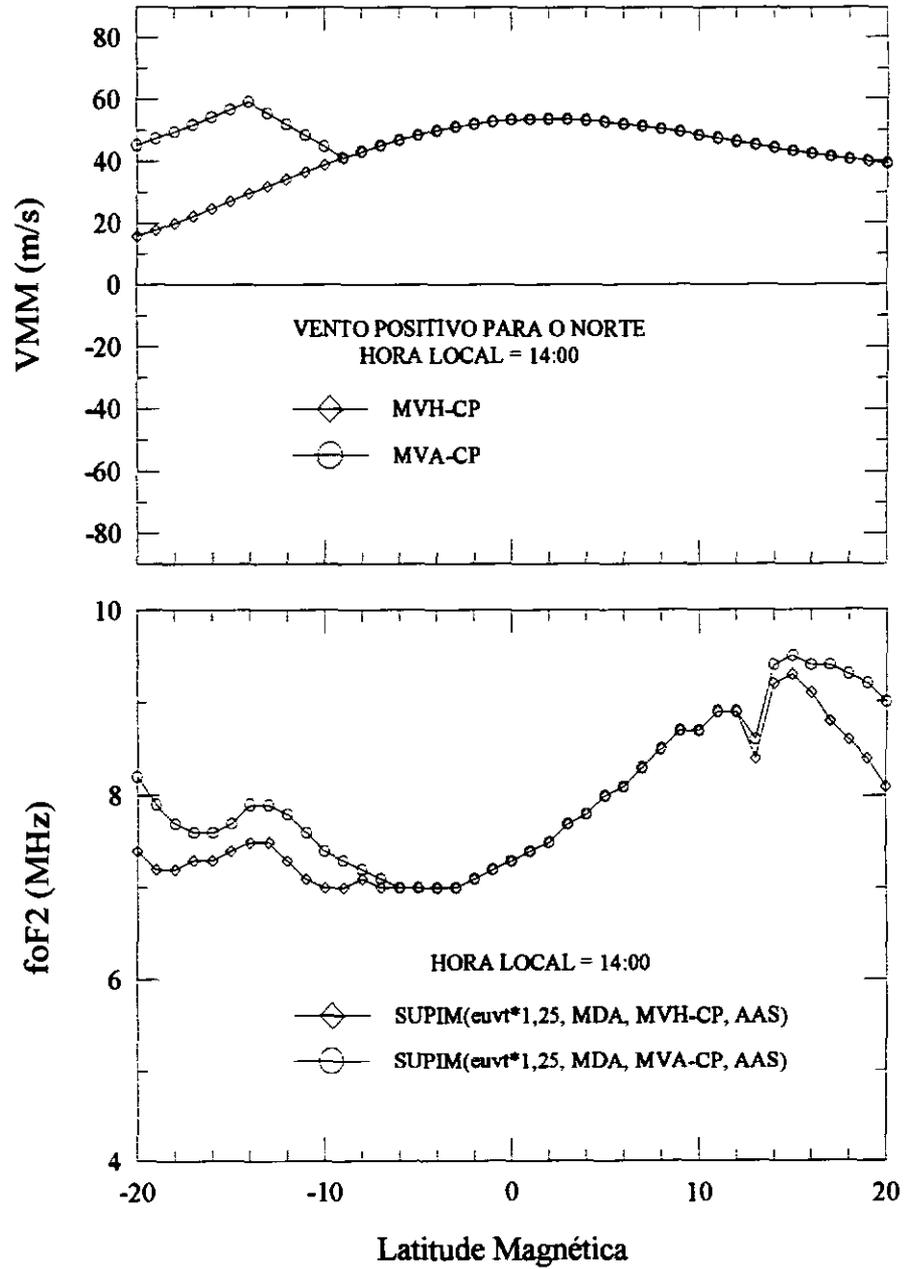


Fig. 6.7 - Variações latitudinais dos ventos termosféricos em 300 km e foF2 ao longo do meridiano magnético de Cachoeira Paulista.

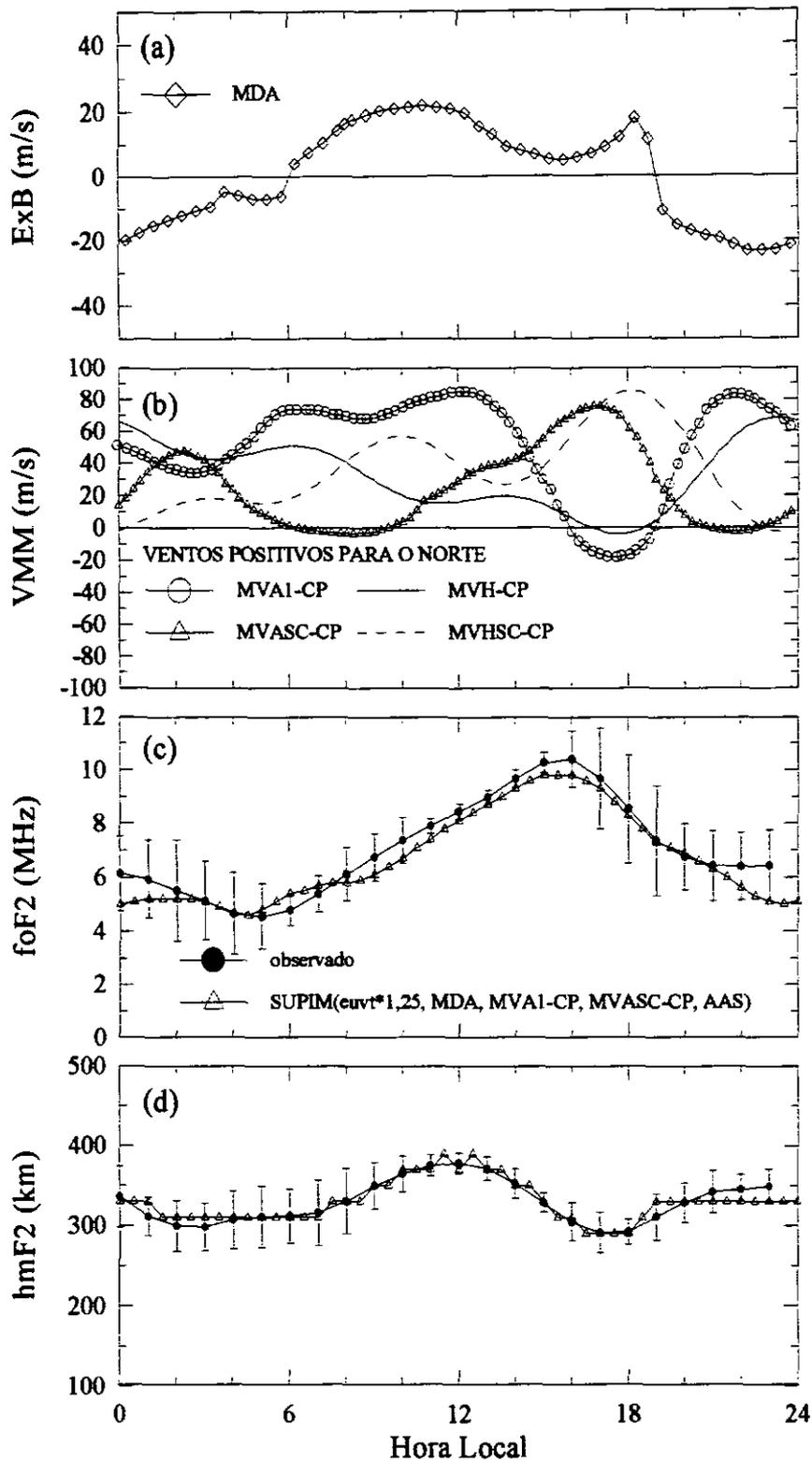


Fig. 6.8 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de f_oF2 e h_mF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos local e do setor conjugado.

Comparando os resultados de foF2 mostrado na Figura 6.6c (SUPIM(euvt*1,25, MDA, MVA-CP, AAS)) com os resultados da Figura 6.8c, e fazendo uma análise do comportamento do parâmetro foF2 sobre Cachoeira Paulista, depois que mudamos o vento no setor conjugado desta estação em relação ao vento produzido pelo modelo HWM90 (MVHSC-CP), podemos ver que baixando a intensidade do vento no setor conjugado foF2 sobre Cachoeira Paulista aumenta e, conforme foi mencionado anteriormente, essa resposta ocorre depois de 4 horas. Ainda nesta seção iremos apresentar uma explicação detalhada dos efeitos dos ventos conjugados sobre foF2 e hmF2 tanto de Cachoeira Paulista como de Fortaleza.

Analisando os dados de hmF2 modelados com os ventos MVA1-CP e MVASC-CP podemos ver uma ótima concordância entre os resultados modelados com estes ventos e os dados observados (Figura 6.8d). É importante mencionar que os resultados de hmF2 obtidos com o uso dos modelos de ventos MVA1-CP e MVASC-CP difere muito pouco daqueles encontrados com o modelo de vento MVA-CP, ou seja, hmF2 sobre Cachoeira Paulista não apresenta mudanças significativas devido às variações dos ventos no setor conjugado de Cachoeira Paulista. Portanto, diante de tudo isso podemos concluir que, para este período de verão de atividade solar mínima, os ventos sobre Cachoeira Paulista controlam muito bem as variações do parâmetro hmF2 e os ventos, do seu setor conjugado, são muito importantes no desenvolvimento da frequência crítica da região F ionosférica (foF2).

As mudanças dos ventos sobre Cachoeira Paulista e em torno do seu setor conjugado não afetam foF2 e hmF2 sobre Fortaleza durante o dia. Mas, durante a noite, dependendo da intensidade do vento no setor conjugado e principalmente entre 20:00-05:00 horas, foF2 sobre Fortaleza passa a reagir sensivelmente às variações dos ventos no setor conjugado de Cachoeira Paulista. Então, tomamos o cuidado de fazer os ajustes no vento do setor conjugado de Cachoeira Paulista de tal forma que não afetasse foF2 de Fortaleza e isso passou a ser adotado como um dos mais importantes critérios para os ajustes desses ventos.

Agora, vamos analisar os efeitos dos ventos meridionais, tanto o efeito do vento do local como do vento do setor conjugado, sobre foF2 e hmF2 de Fortaleza. Conforme foi discutido na Seção 6.2, os resultados do modelo SUPIM para Fortaleza apresentam inconsistência em relação aos dados experimentais apenas entre os valores de hmF2 e isso ocorre somente entre 07:00-16:00 horas. Para fazer os ajustes nos ventos de Fortaleza tomamos como ponto de partida a média entre os ventos de Cachoeira Paulista e do seu ponto conjugado para representar o vento local de Fortaleza. A faixa de latitude magnética usada para incluir os efeitos dos ventos modificados sobre Fortaleza foi de -2° a -9° graus. Os resultados obtidos com a execução do SUPIM sob essas condições não apresentaram nenhuma alteração significativa, tanto nos valores de hmF2 como de foF2, no sentido de melhorar a concordância entre dados observados e resultados calculados. Entretanto, seguindo o exemplo de Cachoeira Paulista, em que passamos a obter bons resultados somente quando iniciamos a fazer ajustes dos ventos no seu setor conjugado, executamos o modelo SUPIM com alterações dos ventos também no setor conjugado de Fortaleza e hmF2 de Fortaleza reagiu sensivelmente a esses ventos.

As Figuras 6.9c e 6.9d mostram os resultados de foF2 e hmF2 obtidos com uma combinação dos modelos dos ventos ajustados sobre Fortaleza e sobre o seu setor conjugado (Figura 6.9b). A Figura 6.9b, além de mostrar os ventos ajustados de Fortaleza (MVA-FZ) e do seu setor conjugado (MVASC-FZ), também apresenta os ventos sobre esses dois setores calculados pelo modelo HWM90 (MVH-FZ, MVHSC-FZ). Como podemos ver na Figura 6.9, uma combinação adequada do vento local de Fortaleza com o vento do seu setor conjugado proporciona boa concordância entre os resultados do SUPIM e os dados experimentais.

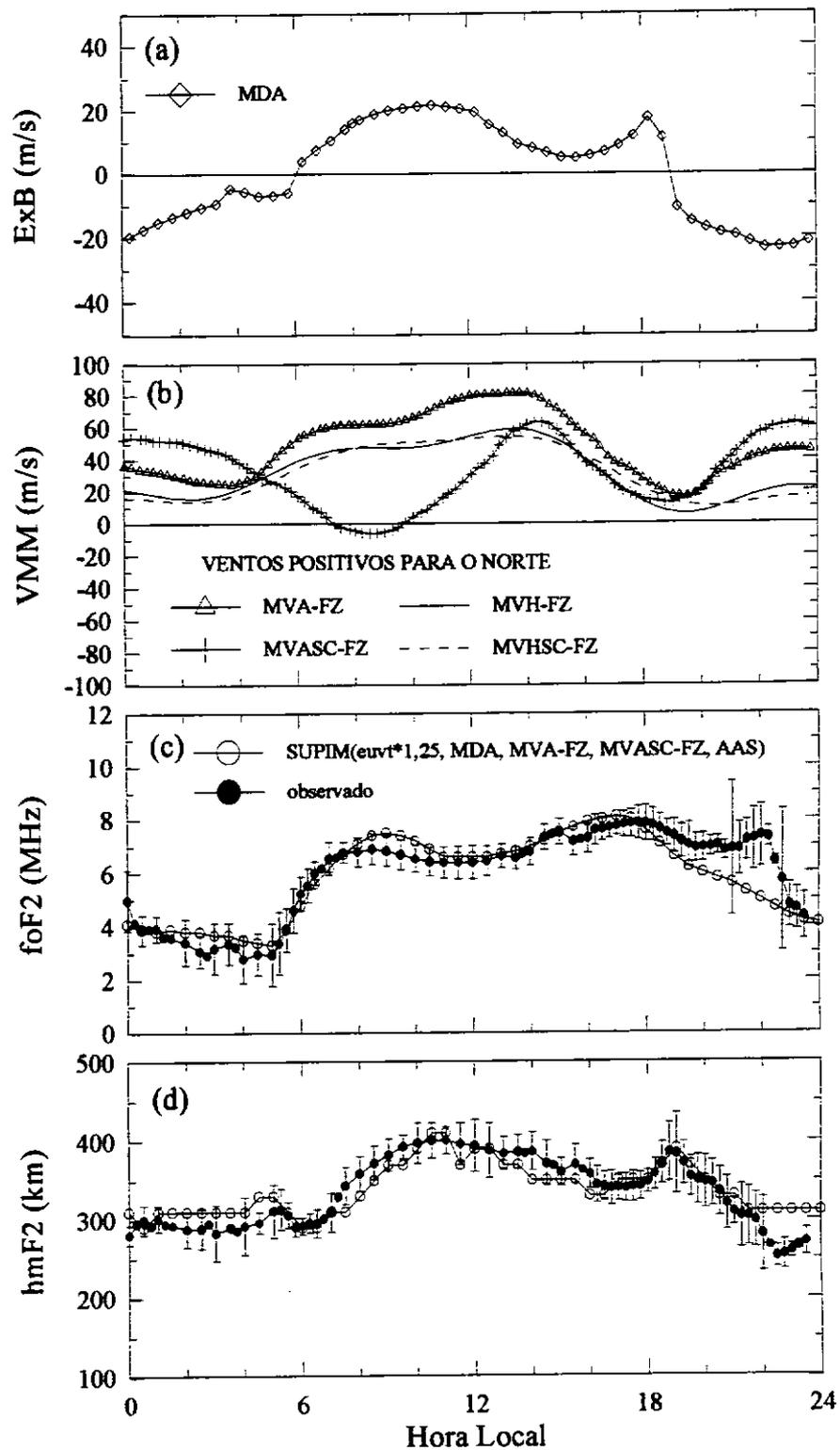


Fig. 6.9 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos local e do setor conjugado.

O procedimento para encontrar os modelos de vento MVA-FZ e MVASC-FZ foi o seguinte: iniciamos os ajustes dos ventos apenas no setor conjugado e no horário entre 07:00-16:00 horas. Constatamos que neste horário, diminuindo o vento em relação aos valores fornecidos pelo modelo HWM90, provoca um aumento de $hmF2$ sobre Fortaleza. Sabemos que a mudança desse vento pode afetar também $foF2$ de Fortaleza, então, passamos a ajustar o vento até atingir um limite em que $foF2$ de Fortaleza não apresentasse discordância com os dados observados. Esse ajuste do vento no setor conjugado de Fortaleza não foi suficiente para que os resultados de $hmF2$ atingissem boa concordância com os dados observados, mas, ao introduzirmos ajustes também no vento local de Fortaleza, conseguimos superar as discordâncias finais. O ajuste do vento no setor conjugado de Fortaleza, em torno das 16:00 horas, produziu um pequeno aumento de $foF2$ entre 00:00-05:00 horas em relação aos dados observados, então, fizemos também ajustes nos ventos nesse horário. Neste caso, seguimos uma situação inversa ao que aconteceu durante o dia, pois ajustamos os ventos de tal forma que corrigisse $foF2$ e não afetasse $hmF2$.

Os ventos nos setores conjugados de Fortaleza e de Cachoeira Paulista desempenham um papel muito importante no controle dos parâmetros $foF2$ e $hmF2$ dessas estações. Uma explicação qualitativa e de uma forma bastante simplificada para esclarecer que, mudanças nos ventos num hemisfério provocam variações na ionosfera do outro hemisfério pode ser dada da seguinte maneira: o movimento do plasma ionosférico é fortemente controlado pelo campo magnético da Terra. Por causa disso e da geometria do campo geomagnético podemos dizer que, de uma forma aproximada, o movimento das partículas ionosféricas ocorre em tubos magnéticos, os quais conectam um hemisfério a outro. A Figura 6.10 mostra uma ilustração sobre isso e podemos ver os tubos magnéticos interligando Cachoeira Paulista e Fortaleza aos seus respectivos setores conjugados. Em Cachoeira Paulista, conforme foi mostrado anteriormente, diminuindo o vento no seu setor conjugado aumenta $foF2$. Isso pode ser entendido da seguinte forma: para este período em estudo, verão de atividade solar mínima, o vento sopra do sul para o norte e isso gera um fluxo de partículas ao longo do

tubo magnético também neste mesmo sentido (sul-norte). Desta forma, diminuindo o vento apenas numa das extremidades do tubo magnético, neste caso coincidindo com o setor conjugado de Cachoeira Paulista, o processo de difusão altera toda a distribuição do fluxo de partículas ao longo do tubo magnético. Consequentemente, isso causa mudanças na ionosfera sobre Cachoeira Paulista.

A explicação dos efeitos do vento conjugado de Cachoeira Paulista sobre o parâmetro foF2 desta estação, também pode ser aplicada para Fortaleza, mas, devido ao fato de Fortaleza se localizar muito próximo do equador magnético, esta estação recebe forte influência da ação conjunta dos campos elétrico e geomagnético e isso torna desprezível os efeitos isolados do vento conjugado sobre foF2 de Fortaleza, conforme mostramos na Figura 6.9. Entretanto, o vento no setor conjugado de Fortaleza, durante o dia, provoca grandes variações no parâmetro hmF2. É importante mencionar que essas variações ocorrem apenas por causa da ação conjunta de campo elétrico, campo magnético e ventos tanto local como do setor conjugado. Na verdade, a explicação sobre a subida do pico da região F ionosférica, durante o dia, devido à ação conjunta de ventos, campo elétrico e campo geomagnético foi dada por Balan e Bailey (1995,1996). Este trabalho mostra que na região F ionosférica, em latitudes próximas do equador magnético (o caso de Fortaleza) pode se formar uma camada extra, denominada de F3, e em torno das 11:00 horas, a densidade de elétrons desta camada pode ficar maior do que a densidade de elétrons da camada F2. Por causa disso os valores medidos da altura do pico da região F apresentam-se bastante elevados, em torno das 11:00 horas.

A diferença entre as explicações sobre a formação da camada F3 dada por Balan e Bailey e a explicação que vamos apresentar neste trabalho é que incluímos os efeitos do vento do setor conjugado. Através da Figura 6.10 podemos entender, de forma qualitativa, todo o processo de subida do pico da região F, durante o dia, bem como o de formação da camada F3. Devido ao efeito fonte, o qual dá origem à Anomalia Equatorial, o plasma ionosférico sobre Fortaleza, em torno de 350 km,

apresenta um movimento fluindo na direção do pólo sul. A força responsável por este movimento, vamos chamá-la de F_1 , apresenta direção e sentido conforme mostra a Figura 6.10. A força que dá origem aos ventos e que, durante o verão, movimenta o plasma na direção do equador vamos chamá-la de F_2 . Calculando a resultante destas forças (F_3), conforme mostra a Figura 6.10, podemos ver que o movimento resultante do plasma será na vertical e de baixo para cima. Desta forma, fica muito claro porque $hmF2$ atinge valores tão elevados durante o dia e que através das modelagens são explicados somente quando se usa uma combinação adequada de ventos, campo elétrico e campo geomagnético.

Fazendo uma análise dos ventos para este período, verão de atividade solar mínima, constatamos grandes diferenças entre os ventos meridionais calculados neste trabalho e os ventos produzidos pelo modelo HWM90, conforme mostram as Figuras 6.8b e 6.9b. Os resultados sobre a estação de Cachoeira Paulista (Figura 6.8b) mostram que as diferenças mais marcantes são entre 06:00-15:00 horas e sobre o setor conjugado desta estação temos apenas um pequeno intervalo, entre 12:00-17:00, em que esses ventos apresentam intensidade um pouco mais semelhantes. No setor de Fortaleza (Figura 6.9b) não temos grandes discrepâncias entre os modelos de ventos. O modelo de vento que estamos propondo para Fortaleza apresenta-se apenas um pouco mais elevado do que o vento produzido pelo modelo HWM90. Já os resultados da comparação entre estes ventos no setor conjugado de Fortaleza mostram grandes discrepâncias, apresentando concordância apenas no intervalo de 13:00-19:00 horas, como mostra a Figura 6.9b.

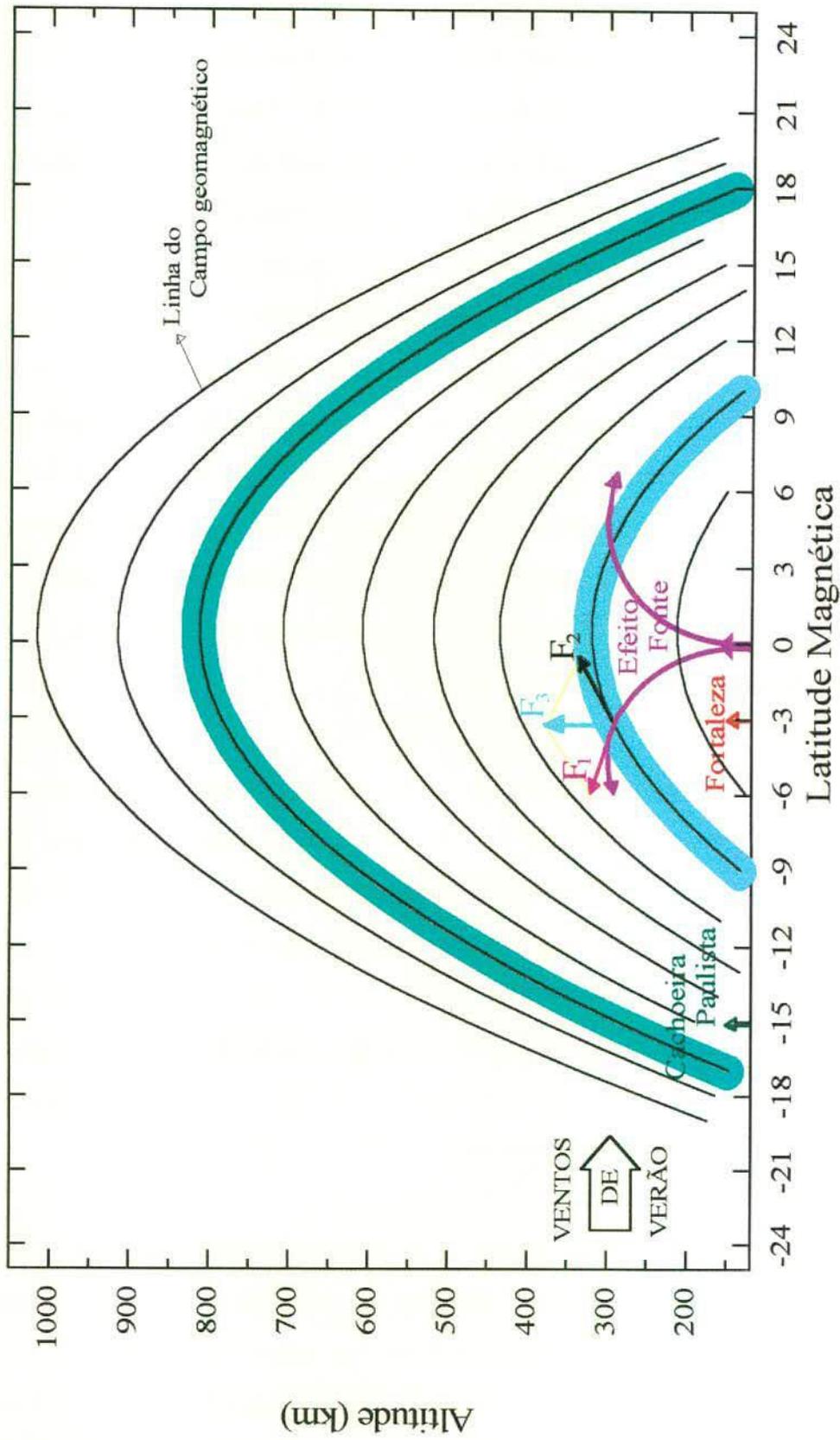


Fig. 6.10 - Ilustração qualitativa dos efeitos dos ventos e dos campos elétrico e geomagnético sobre a ionosfera de Cachoeira Paulista e de Fortaleza.

Medeiros (1995) também desenvolveu um método para calcular os ventos meridionais em baixas latitudes brasileiras. Seu método baseia-se nos cálculos da altura do pico da região F para a estação de Cachoeira Paulista e usa a deriva calculada sobre Fortaleza através do método de Batista et al. (1996). Medeiros (1995) também calculou os ventos meridionais sobre Cachoeira Paulista para os mesmos períodos em que estamos estudando, ou seja, verões de atividade solar mínima e máxima e invernos de atividade solar mínima e máxima. Todos os seus resultados também mostraram discrepâncias quando comparados com os ventos do modelo HWM90 e suas explicações para as diferenças entre os resultados desses ventos são atribuídas a imprecisão do modelo semi-empírico HWM90 causada pela pequena amostra de dados de ventos não apenas para a região brasileira, mas também para todo o hemisfério sul. A região brasileira apresenta características peculiares em relação aos outros setores, como por exemplo, a declinação magnética, que nesta região é a mais acentuada. Provavelmente por causa disso, as interpolações efetuadas pelo código HWM90 para calcular os ventos neste setor apresentam erros também acentuados.

Comparando os resultados dos ventos calculados neste trabalho (ventos ajustados) com os resultados de Medeiros (1995), constatamos uma boa concordância no horário entre 17:00-03:00 horas, como mostra a Figura 6.11. Nos outros horários as diferenças entre esses ventos são marcantes e na maior parte com o vento ajustado maior do que os ventos de Medeiros. Para descobrir uma explicação sobre as diferenças nos resultados destes modelos será necessário uma investigação profunda no que diz respeito aos processos físicos envolvendo cada método. Portanto, sugerimos um estudo mais elaborado sobre esse assunto num trabalho futuro.

De acordo com o que já foi apresentado, calculamos os ventos meridionais sobre Cachoeira Paulista, Fortaleza e nos seus respectivos setores conjugados. Desta forma, também podemos fazer um estudo comparativo entre a distribuição latitudinal destes ventos e os ventos do modelo HWM90. As Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 mostram os resultados dos ventos ajustados ao longo do meridiano que

passa sobre a região brasileira e os resultados dos ventos do modelo HWM90. Esses resultados foram calculados às 06:00, 12:00 e 18:00 horas, respectivamente. Com o objetivo de observar as variações de foF2 em relação apenas as diferenças entre os modelos de vento, também nestas figuras mostramos as variações latitudinais deste parâmetro. A intensidade do vento ajustado apresenta-se maior do que a intensidade do vento HWM90 em todas as latitudes (de sul a norte) entre -20° e 20° , para os cálculos efetuados às 06:00 horas. Isso não acontece com os resultados obtidos às 12:00 ou às 18:00 horas. Às 12:00 horas, o vento ajustado passa a ser menor do que o vento HWM90 em torno de -11° e continua assim em todo o hemisfério norte. Entretanto, às 18:00 horas as diferenças entre os ventos não surgem apenas na intensidade, mas também temos diferenças no sentido em alguns setores de latitudes. Entre -20° e -12° o vento ajustado sopra para o norte, enquanto o vento HWM90 sopra para o sul e entre 2° e 9° temos uma situação inversa.

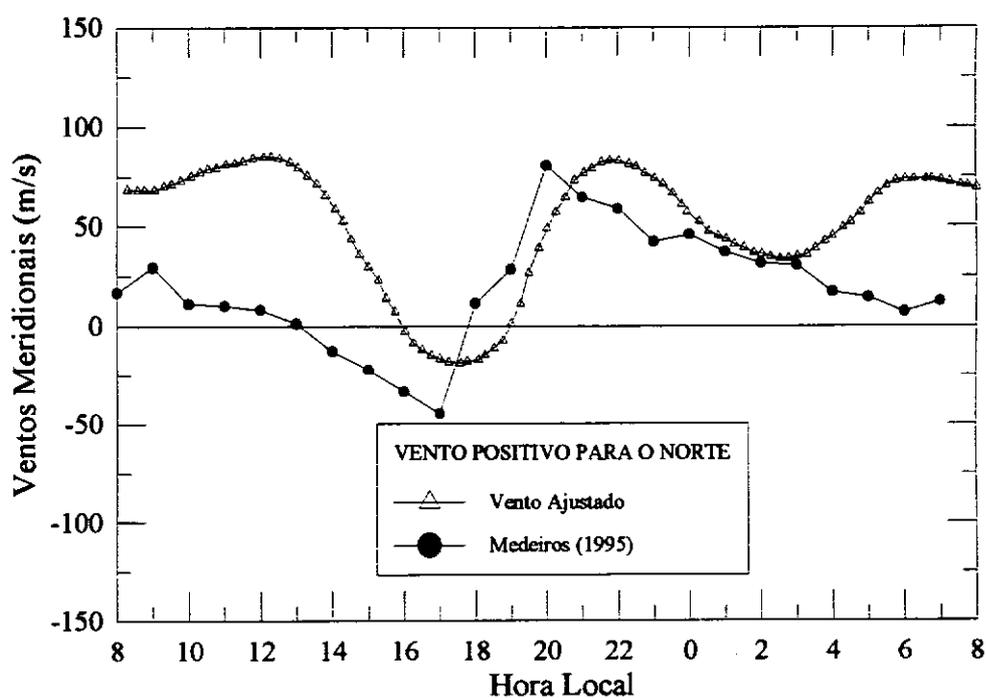


Fig. 6.11 - Comparação entre o vento calculado neste trabalho (vento ajustado) e o vento obtido por Medeiros (1995) para verão de atividade solar mínima em Cachoeira Paulista.

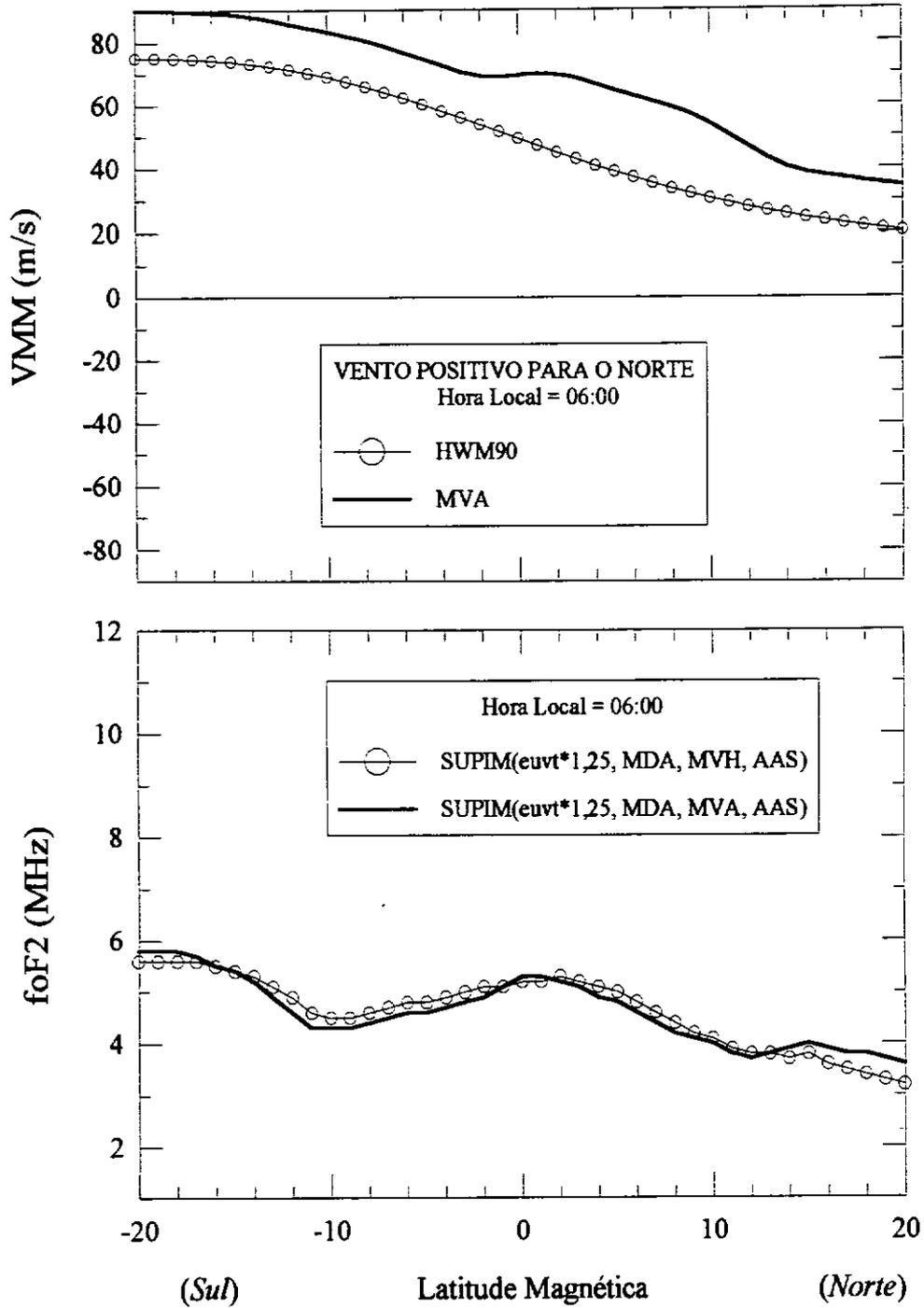


Fig. 6.12 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.

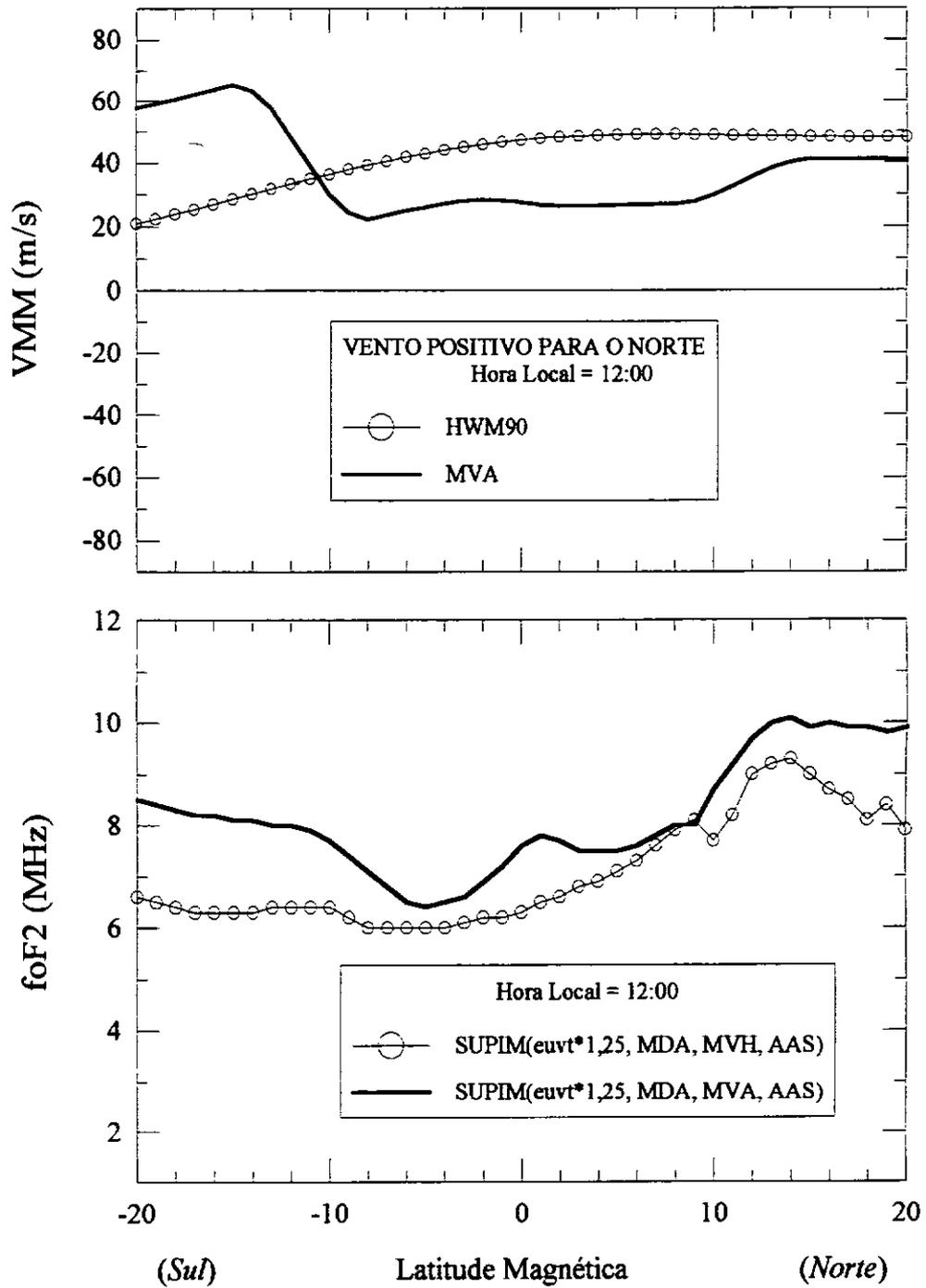


Fig. 6.13 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.

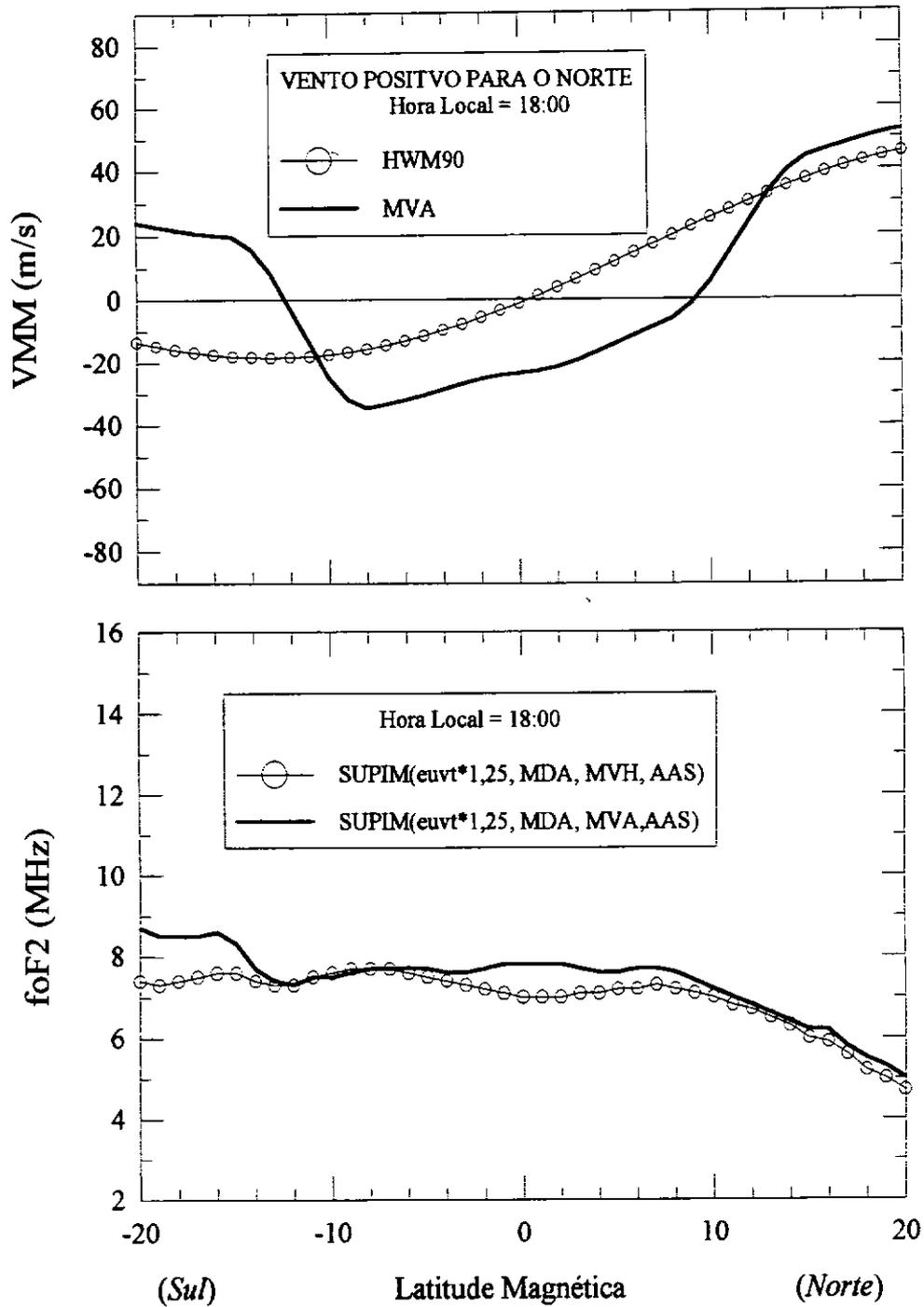


Fig. 6.14 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de verão de atividade solar mínima.

É importante mencionar que as variações latitudinais dos ventos ajustados, mostradas neste trabalho, sofreram um alisamento ao ser usada uma média corrida de três pontos. De acordo com os resultados de alguns testes desenvolvidos com o modelo SUPIM isso não afeta os resultados de foF2 e de hmF2 calculados, tanto em Fortaleza como em Cachoeira Paulista.

De acordo com os resultados de foF2, também mostrados nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14, a distribuição com a latitude deste parâmetro obtida com o uso do vento ajustado no modelo SUPIM apresenta grande alteração, em relação aos cálculos efetuados com o uso do vento HWM90, nos resultados efetuados ao meio dia e às 18:00 horas. Porém, no caso das 18:00 horas, a alteração mais importante só ocorre em torno de Cachoeira Paulista (-15°).

Com o objetivo de expor uma visão geral das mudanças latitudinais de foF2 provocadas não apenas pelas mudanças dos ventos, mas também pelas mudanças de todos os outros parâmetros de entrada, decidimos construir diagramas de contornos de foF2, numa grade latitude versus hora local, para mostrar os resultados iniciais e finais produzidos pelo modelo SUPIM durante as simulações de verão de atividade solar mínima. A Figura 6.15a apresenta os resultados do SUPIM usando os parâmetros de entrada sem alterações (resultados iniciais) e a Figura 6.15b mostra os resultados do SUPIM com os parâmetros de entrada devidamente ajustados (resultados finais). Conforme podemos ver comparando esses resultados, as correções dos parâmetros de entrada provocaram fortes mudanças na distribuição latitudinal de foF2, tornando os picos da Anomalia Equatorial mais definidos e mais afastados do equador geomagnético. Também podemos constatar que o pico da Anomalia Equatorial atinge sua intensidade máxima mais cedo no hemisfério norte do que no hemisfério sul para esse caso de verão de atividade solar mínima no hemisfério sul.

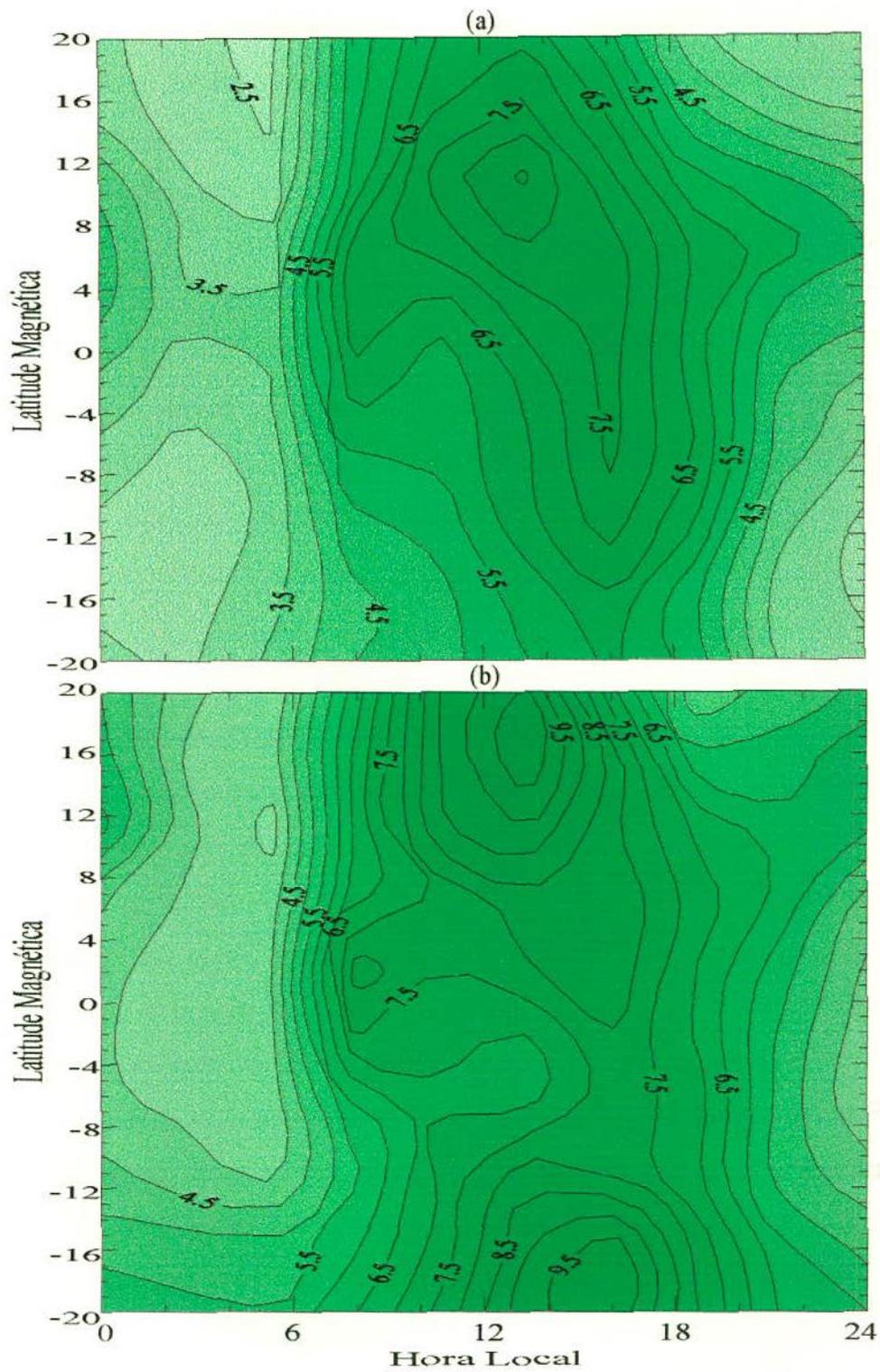


Fig. 6.15 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para verão de atividade solar mínima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.

6.3 - SIMULAÇÕES DE foF2 E hmF2 PARA VERÃO DE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA EM FORTALEZA E EM CACHOEIRA PAULISTA

Para o período de verão de atividade solar máxima seguimos os mesmos critérios adotados para modelar foF2 e hmF2 durante verão de atividade solar mínima (Seção 6.2). Na verdade, para verão de atividade solar mínima, quando ajustamos o fluxo solar EUV, a deriva $E \times B$ e os ventos, conseguimos explicar as variações diurnas tanto de foF2 como de hmF2 sobre as estações de Fortaleza e de Cachoeira Paulista.

A Figura 6.16 mostra os primeiros resultados para verão de atividade solar máxima modelados sobre Fortaleza. Esta figura também apresenta o mesmo padrão das figuras mostradas nas seções anteriores deste capítulo, onde os dois primeiros quadros (a e b) mostram as derivas e os ventos usados nas simulações e logo abaixo (quadros c e d) temos os resultados produzidos com o uso dessas derivas e ventos e, junto com eles, os dados observados. Os resultados de foF2 e de hmF2 simulados com fluxo solar sem ajustes (euvt), com a deriva MDB e com o vento MVH-FZ (SUPIM(euvt, MDB, MVH-FZ)) não apresentam boa concordância com os dados observados. Entretanto, usando a deriva ajustada MDA e continuando sem ajustar os ventos e o fluxo solar EUV, conseguimos melhorar os resultados de foF2 e de hmF2 (SUPIM(euvt, MDA, MVH-FZ)). Conforme podemos ver na Figura 6.16, os ajustes na deriva $E \times B$ não foram suficientes para superar todas as discordâncias entre os resultados calculados e os dados experimentais. Mas, os resultados obtidos com a deriva MDA satisfazem os critérios definidos na seção anterior, onde adotamos que os resultados calculados sobre Fortaleza devem concordar com os dados observados, em pelo menos 50%, para concluirmos que a deriva ajustada está adequada para representar o comportamento médio de determinada época. No final dessa seção, vamos introduzir as mudanças nos ventos usados pelo modelo SUPIM, para corrigir as inconsistências apresentadas nos resultados de foF2 e de hmF2 calculados sobre Fortaleza com o uso da deriva MDA.

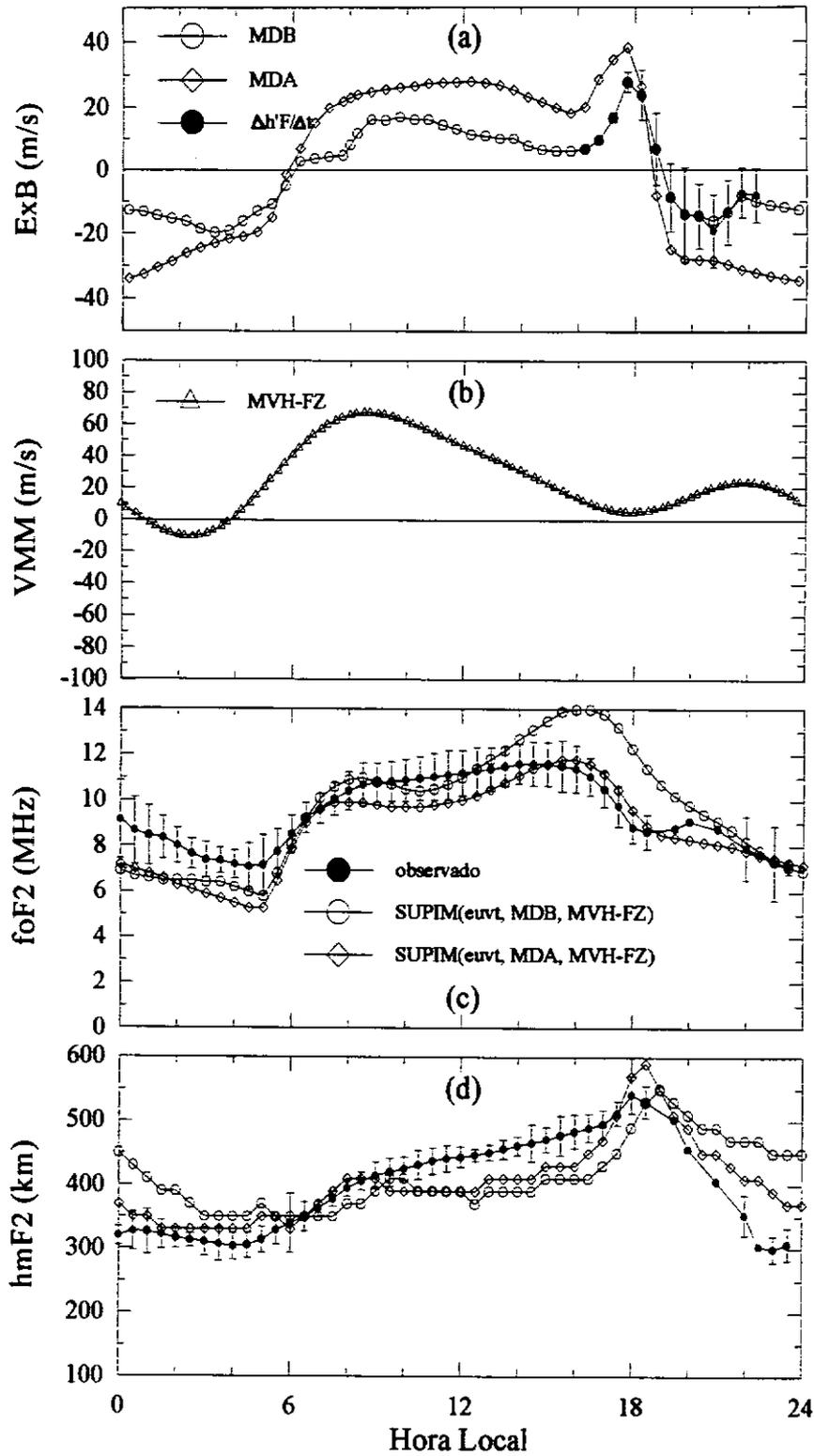


Fig. 6.16 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças da deriva eletromagnética $E \times B$.

Neste período de verão de atividade solar máxima, constatamos que o fluxo solar EUV não apresentou a necessidade de ser ajustado. Portanto, podemos concluir que, para esta época, o modelo EUV94 fornece adequadamente os valores do fluxo solar EUV.

Com a finalidade de observar a resposta ionosférica sobre Cachoeira Paulista, durante atividade solar máxima, às mudanças na deriva, executamos o SUPIM com as seguintes condições:

a) SUPIM(euvt, MDB, MVH)

b) SUPIM(euvt, MDA, MVH).

A Figura 6.17 mostra os resultados modelados com essas condições e podemos ver um comportamento diferente do que aconteceu durante verão de atividade solar mínima, onde os parâmetros foF2 e hmF2 apresentaram variações desprezíveis devido as mudanças da deriva $E \times B$. Para este caso, foF2 e hmF2 sofrem um aumento entre 16:00-23:00 horas por causa das mudanças na deriva. Isso acontece porque durante verão de atividade solar máxima temos um aumento tanto da deriva como da densidade do plasma ionosférico e isso causa maior desenvolvimento da Anomalia Equatorial e, portanto, traz consequências para a ionosfera de Cachoeira Paulista. Também na Figura 6.17, podemos observar que os resultados modelados de foF2 estão mais baixos do que os dados experimentais e essa diferença torna-se ainda maior entre 19:00-05:00 horas. Para melhorar tanto os resultados de foF2 como os resultados de hmF2 vamos incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul e fazer os ajustes dos ventos.

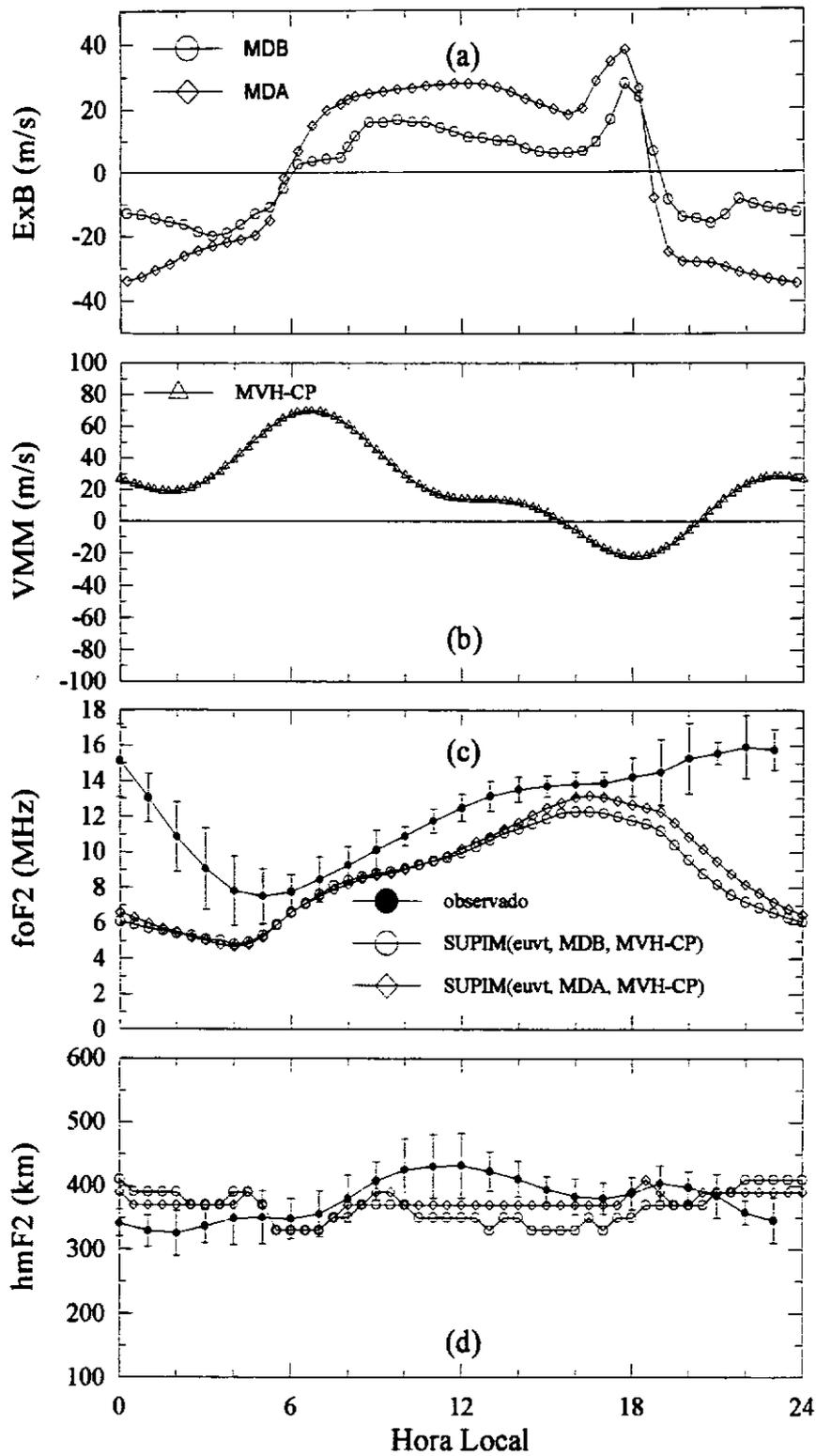


Fig. 6.17 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de $foF2$ e $hmF2$ em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$.

6.3.1 - EFEITOS DA ANOMALIA DO ATLÂNTICO SUL SOBRE foF2 E hmF2 EM CACHOEIRA PAULISTA

Para incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul sobre Cachoeira Paulista devemos manter a deriva e o fluxo solar EUV, ajustados a partir dos dados de Fortaleza, e incluir a taxa de produção equivalente ao que seria produzido pelas precipitações das partículas energéticas.

As Figuras 6.18a e 6.18b mostram a deriva MDA e o vento MVH-CP, os quais foram usados para fazer mais uma simulação de foF2 e de hmF2. Os resultados desta simulação estão apresentados nas Figuras 6.18c e 6.18d. Como podemos ver, os resultados de foF2 e de hmF2, em torno das 05:00 horas, apresentam concordância com os dados observados e isso satisfaz a condição de situação adequada para encerrar os ajustes da taxa de produção calculada com o ângulo χ_f (P_{χ_f}), conforme foi definido na seção 6.2.1.

A taxa de produção devida aos efeitos da Anomalia do Atlântico Sul (P_{AAS}), para este período de verão de atividade solar máxima, foi encontrada quando consideramos 15% de P_{χ_f} ($P_{AAS} = 0,15P_{\chi_f}$). Durante atividade solar mínima também encontramos a mesma relação entre P_{AAS} e P_{χ_f} , ou seja, $P_{AAS} = 0,15P_{\chi_f}$. Isso mostra que as precipitações de partículas sobre Cachoeira Paulista aumentam com a atividade solar, já que a taxa de produção obedece essa mesma relação com a atividade solar.

6.3.2 - EFEITOS DAS MUDANÇAS DOS VENTOS SOBRE foF2 E hmF2 EM CACHOEIRA PAULISTA E EM FORTALEZA

Seguindo o mesmo procedimento apresentado durante os estudos sobre verão de atividade solar mínima, ajustamos os ventos produzidos pelo modelo HWM90 tanto sobre Cachoeira Paulista como no seu setor conjugado.

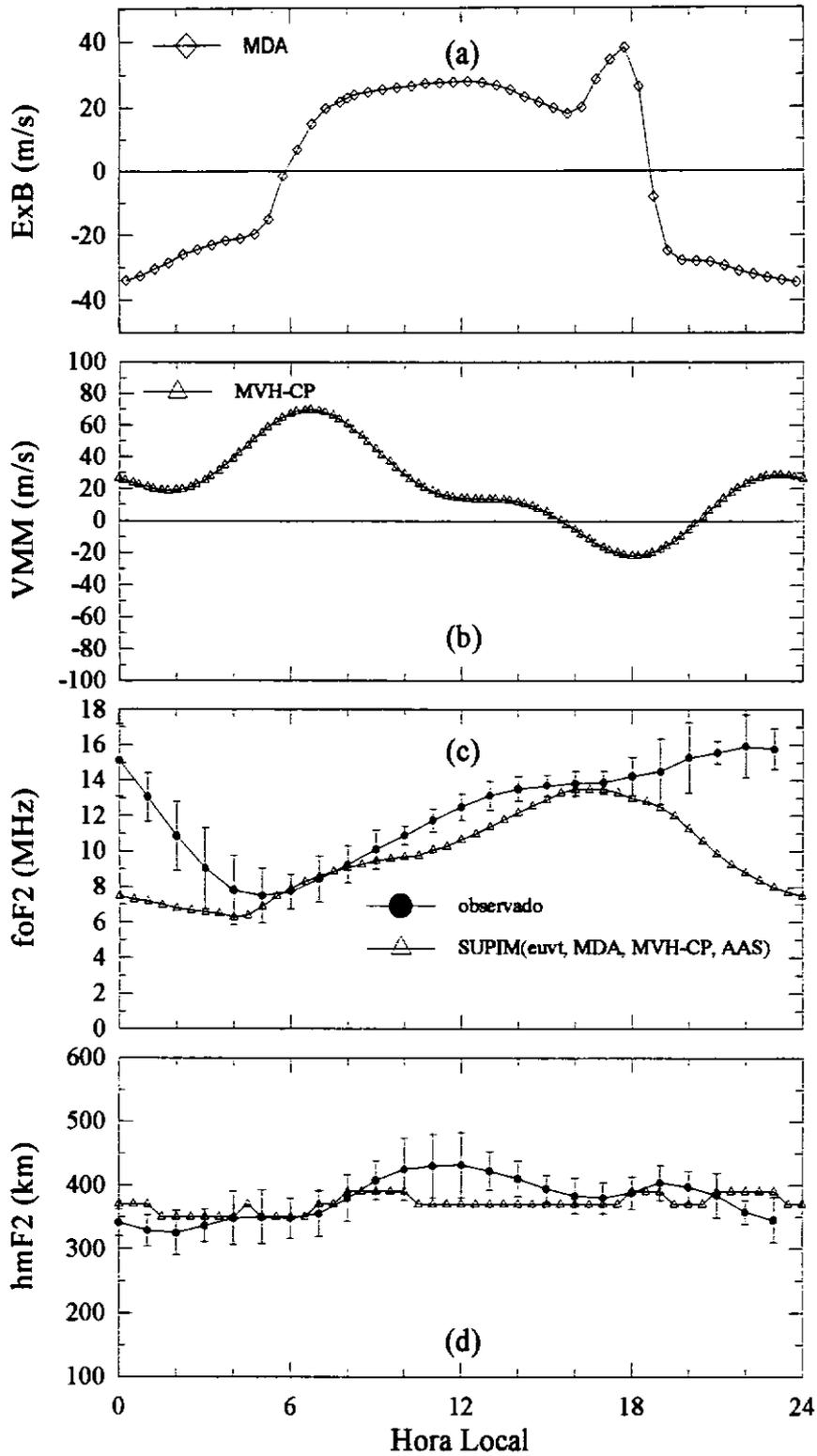


Fig. 6.18 - Deriva eletromagnética $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos da Anomalia do Atlântico Sul.

Os modelos de ventos MVA-CP e MVASC-CP mostrados na Figura 6.19b são os resultados dos ventos ajustados sobre Cachoeira Paulista e sobre o seu setor conjugado. Os ventos MVH-CP e MVHSC-CP também foram calculados nestes setores, porém, são resultados do modelo HWM90. Usando os ventos MVA-CP e MVASC-CP no modelo SUPIM conseguimos excelentes resultados de foF2 e de hmF2 sobre Cachoeira Paulista, como mostram as Figuras 6.19c e 6.19d.

No que diz respeito aos efeitos dos ventos sobre os parâmetros foF2 e hmF2 de Cachoeira Paulista, calculados durante este período de verão de atividade solar máxima, constatamos o mesmo tipo de comportamento que estes parâmetros apresentam durante atividade solar mínima, onde foF2 é sensível às variações do vento no setor conjugado e hmF2 é fortemente controlado pelo vento local.

A Figura 6.20 mostra os resultados de foF2 e de hmF2 sobre Fortaleza. Esses resultados foram obtidos com o uso dos ventos MVA-FZ e MVASC-FZ no modelo SUPIM. Os ventos MVA-FZ e MVASC-FZ representam os ventos sobre Fortaleza e sobre o seu setor conjugado, respectivamente. Os resultados finais de foF2 e de hmF2 (Figuras 6.20c,d), durante a noite, não apresentam boa concordância com os dados observados. Porém, neste horário a representatividade dos dados, os quais deram origem aos valores médios apresentados na Figura 6.20, é muito baixa. Conforme podemos ver na Figura 5.3, na maior parte deste horário os dados são de apenas um dia. Portanto, não podemos levar em consideração as discordâncias neste horário.

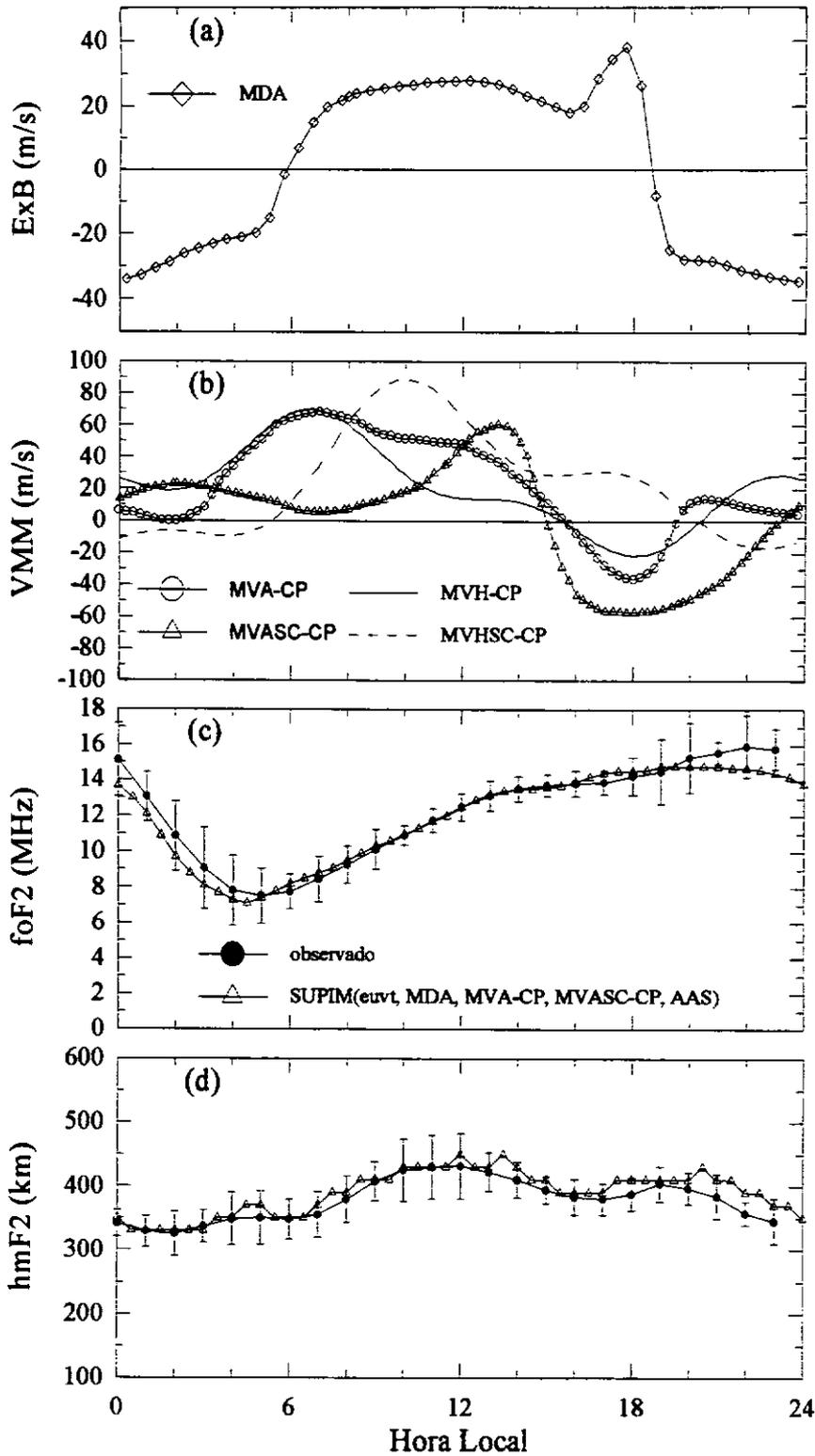


Fig. 6.19 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.

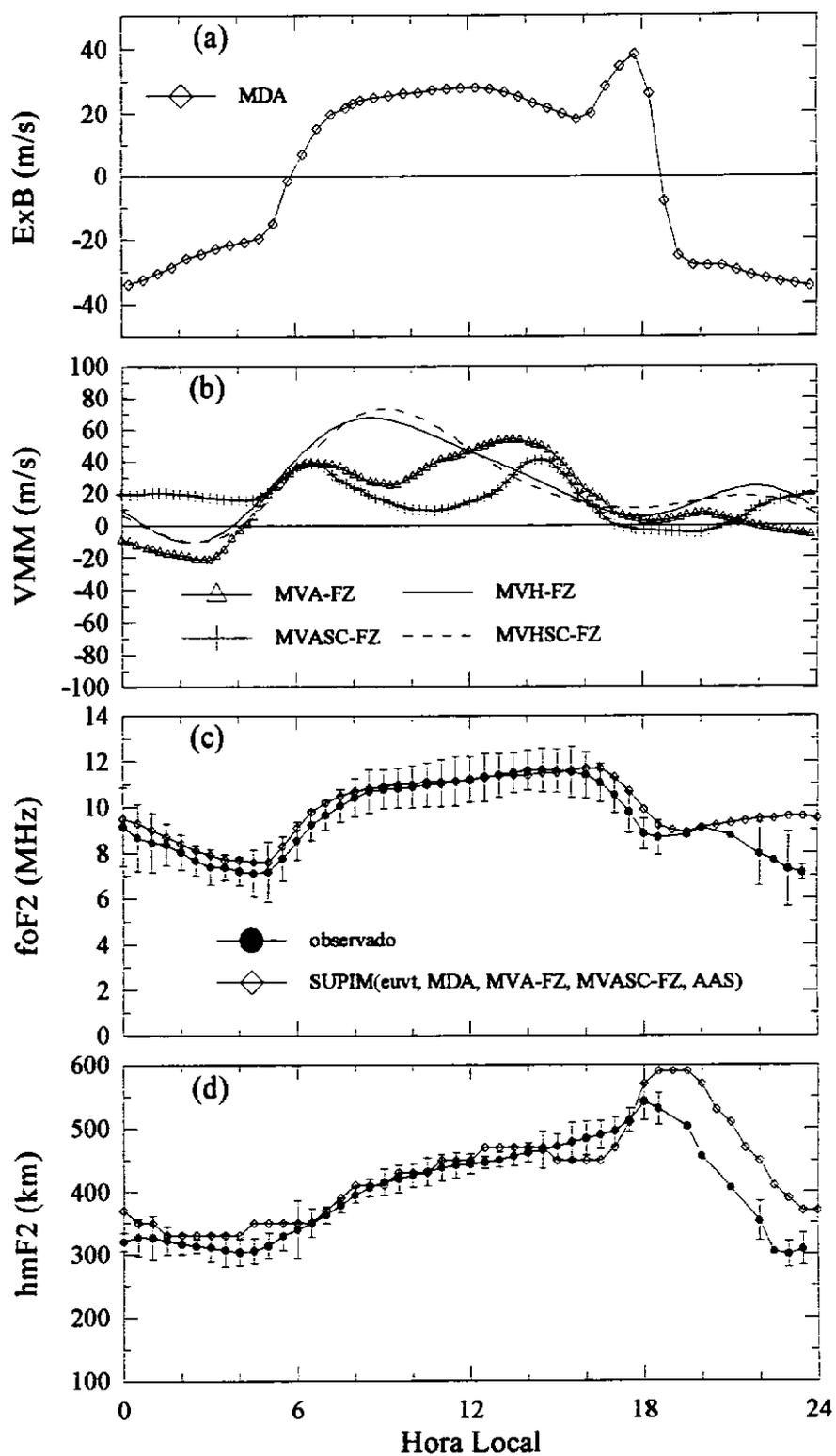


Fig. 6.20 - Deriva eletromagnética $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante verão de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.

Uma constatação interessante sobre os resultados de foF2 de Fortaleza é que, somente à noite (20:00-05:00) e quando diminuimos o vento no setor conjugado de Cachoeira Paulista ocorre um aumento de foF2 sobre Fortaleza. Isso pode ser visto, claramente, comparando os resultados do SUPIM apresentados nas Figuras 6.16 e 6.20. De fato, isso acontece porque diminuindo o vento no setor conjugado de Cachoeira Paulista aumenta a densidade de partículas carregadas ao longo do tubo magnético. Este tubo, passa sobre Cachoeira Paulista e também sobre Fortaleza, como podemos ver na Figura 6.10. Apesar deste tubo passar muito acima da altura do pico da ionosfera de Fortaleza, neste horário, a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ está invertida em relação ao comportamento diurno. Então, devido a isso temos um fluxo de partículas de cima para baixo que causa o aumento de foF2 nas latitudes equatoriais.

Comparando as variações diurnas dos ventos ajustados, para este período em estudo, com os ventos do modelo HWM90 constatamos que as maiores discordâncias entre esses ventos acontecem nos setores conjugados de Cachoeira Paulista e de Fortaleza, conforme pode ser visto nas Figuras 6.19b e 6.20b. Porém, durante alguns horários temos resultados semelhantes. Em Cachoeira Paulista, os intervalos onde os resultados concordam são: 05:30-08:00 e 15:00-17:00 horas. Em Fortaleza: 03:30-06:30 e 16:00-20:00 horas. No setor conjugado de Fortaleza os horários de concordância são: 04:30-06:30 e 15:30-16:30 horas. No setor conjugado de Cachoeira Paulista não temos intervalos com concordâncias entre os resultados do vento calculado neste trabalho e o vento HWM90.

Os resultados do vento ajustado para Cachoeira Paulista, a exemplo do que aconteceu durante verão de atividade solar mínima, apresenta boa concordância com os resultados de Medeiros (1995) apenas no horário em torno do pico pré-inversão e também durante a maior parte da noite, conforme mostra a Figura 6.21. Também nesta figura mostramos os resultados dos ventos fornecidos pelo modelo HWM90 e dados de ventos registrados sobre Cachoeira Paulista durante período de verão de atividade solar máxima. Estes dados foram obtidos usando técnica de Fabry-Perot (FP) e foram

publicados por Sahai et al. (1992). As barras de erro sobre os dados de ventos mostram o desvio padrão em relação aos valores médios. Tanto os ventos ajustados como os ventos do modelo HWM90, apresentam boa concordância com os dados observados, como mostra a Figura 6.21.

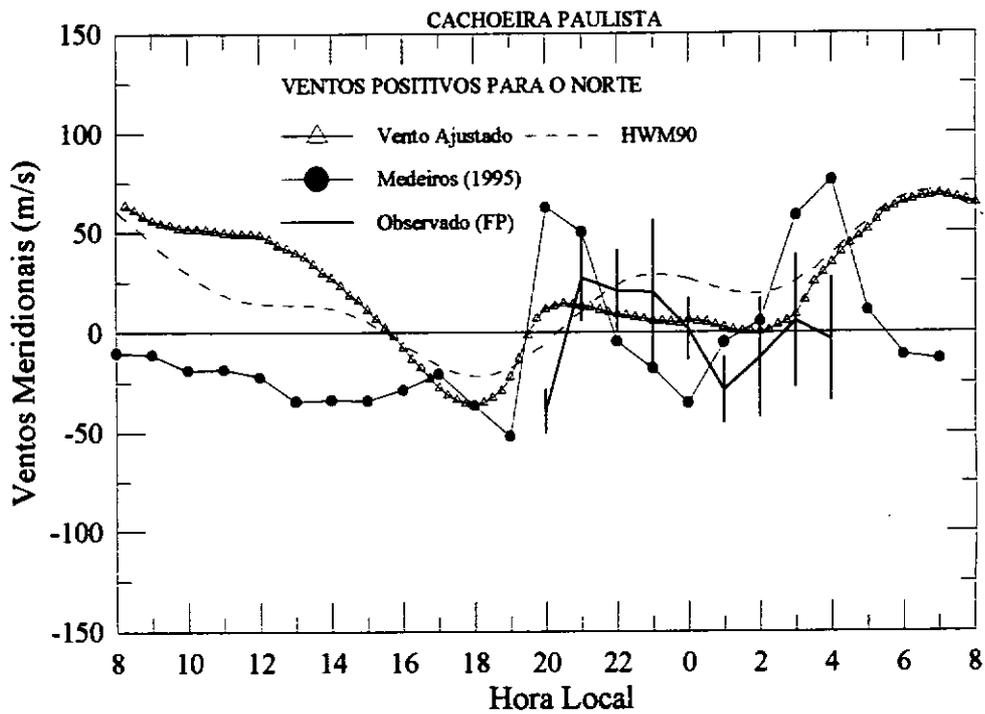


Fig. 6.21 - Comparação entre o vento ajustado, o vento de Medeiros (1995), o vento do modelo HWM90 e o vento observado. Verão de atividade solar máxima.

Através das Figuras 6.19b e 6.20b podemos ter uma idéia das variações latitudinais dos ventos, mas para termos uma visão mais clara construímos as Figuras 6.22, 6.23 e 6.24 mostrando cortes longitudinais dos ventos ajustados e dos ventos do modelo HWM90 para 06:00, 12:00 e 18:00 horas respectivamente. Estas figuras também mostram variações latitudinais de foF2 calculadas pelo SUPIM usando esses ventos. Às 06:00 horas, apesar dos ventos não apresentarem diferenças significativas, os resultados de foF2 obtidos com os ventos ajustados e com os ventos HWM90 apresentam valores diferentes. Isso é consequência das diferenças entre os ventos durante algumas horas anteriores. Às 12:00 horas, o vento ajustado é igual ao

vento HWM90 apenas no setor de Fortaleza (-9° a -2°). Na faixa de latitude antes do setor de Fortaleza o vento ajustado é maior do que o vento HWM90 e depois do setor de Fortaleza o vento ajustado torna-se menor.

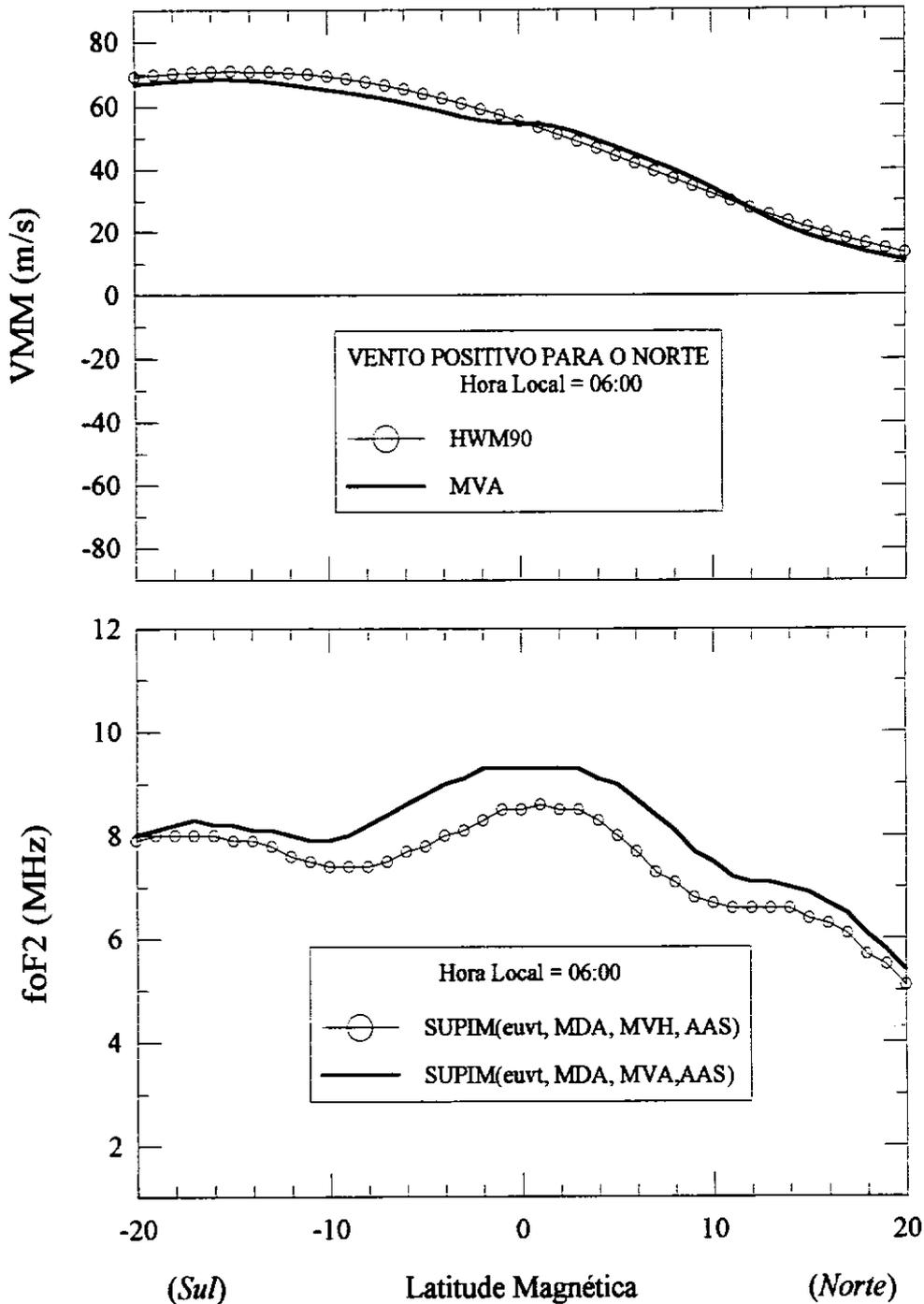


Fig. 6.22 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas para verão de atividade solar máxima.

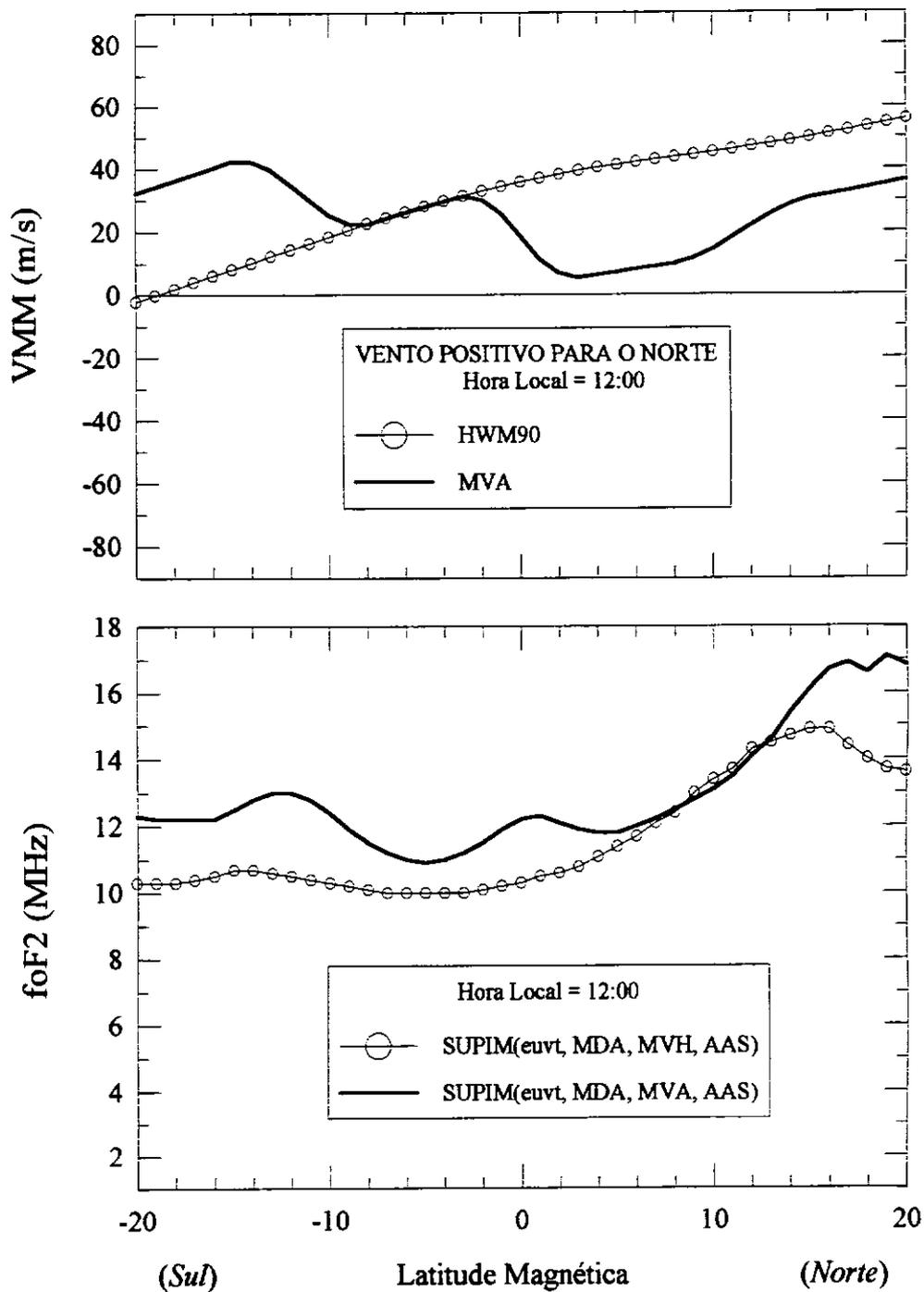


Fig. 6.23 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de verão de atividade solar máxima.

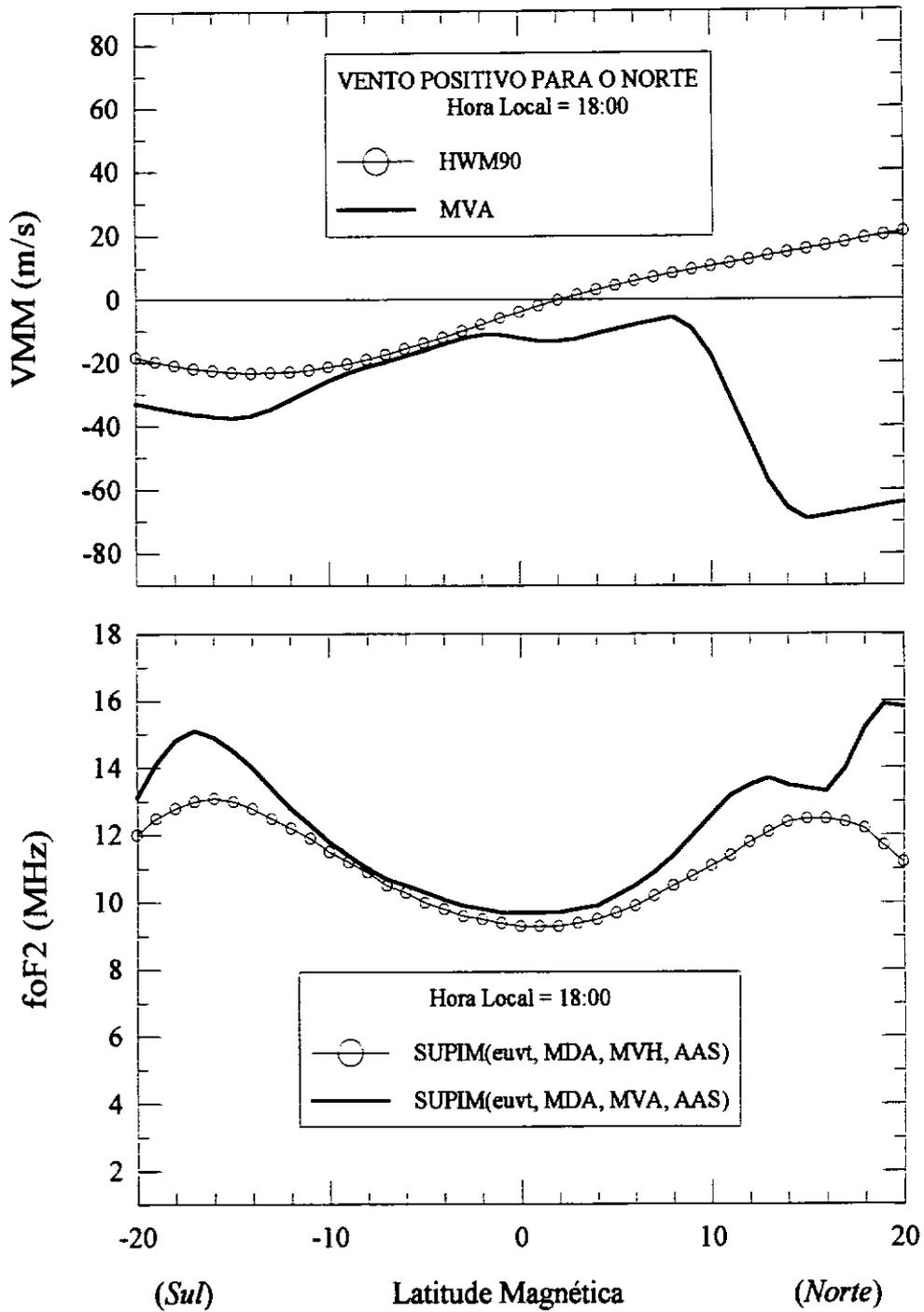


Fig. 6.24 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de verão de atividade solar máxima.

A distribuição latitudinal de foF2 sofre alterações significativas com os ajustes dos ventos, principalmente no hemisfério sul, como mostra a Figura 6.23. Às 18:00 horas, no setor conjugado de Cachoeira Paulista, podemos observar uma das maiores diferenças entre os ventos ajustados e o vento HWM90. Neste setor, o vento ajustado sopra com grande intensidade para o sul e no sentido inverso do vento HWM90. É importante mencionarmos mais uma vez que os ajustes dos ventos no setor conjugado de Cachoeira Paulista foi a única forma de completar a explicação da variação diurna de foF2 registrada em Cachoeira Paulista.

A Figura 6.25 mostra contornos de foF2 ilustrando o comportamento latitudinal deste parâmetro. No topo desta figura temos os resultados obtidos com o SUPIM sem fazer alterações nos parâmetros de entrada e na parte inferior os resultados com as mudanças. Estes resultados apresentam algumas características semelhantes ao que foi constatado durante verão de atividade solar mínima, tais como: os picos da Anomalia Equatorial ficam mais definidos e mais afastados do equador geomagnético quando introduzimos os ajustes dos parâmetros de entrada e o pico desta anomalia atinge seu valor máximo mais cedo no hemisfério de inverno do que no hemisfério de verão.

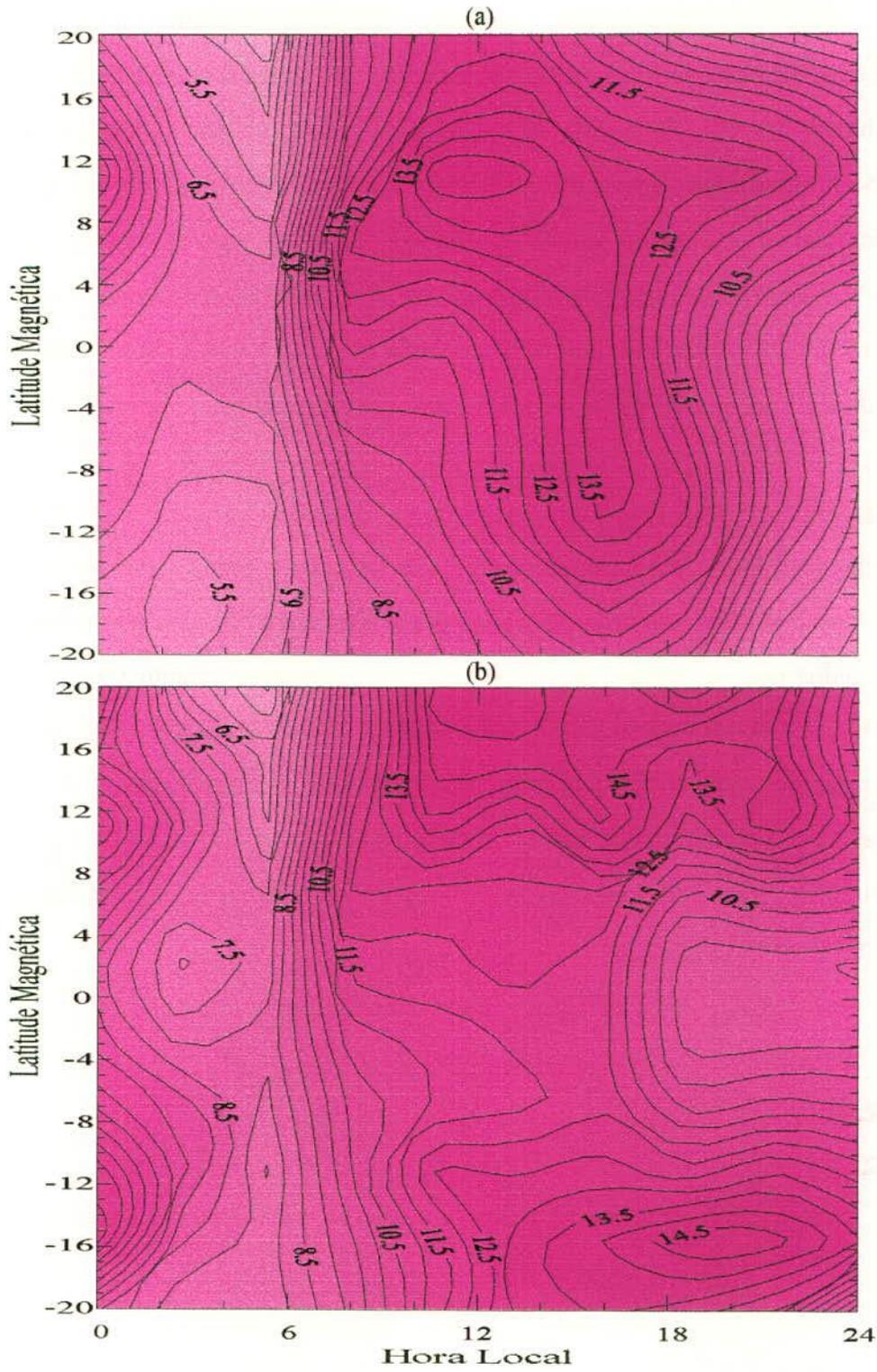


Fig. 6.25 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para verão de atividade solar máxima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.

6.4 - SIMULAÇÕES DE foF2 E hmF2 PARA INVERNO DE ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA EM FORTALEZA E EM CACHOEIRA PAULISTA

Todos os resultados calculados para este período foram efetuados seguindo os mesmos critérios definidos durante os estudos de verão.

A Figura 6.26 mostra o resultado final dos ajustes efetuados na deriva MDB para definir o modelo adequado da deriva representativa de inverno de atividade solar mínima (MDA). Na parte inferior desta figura (quadros c e d) temos os resultados de foF2 e de hmF2 para Fortaleza calculados pelo modelo SUPIM usando as derivas MDB e MDA. Para obter estes resultados não foram incluídos ajustes nos ventos e no fluxo solar EUV. Como pode ser visto, as mudanças na deriva melhora a concordância entre foF2 calculado e o observado, mas não corrige as discordâncias de hmF2 entre 07:00-16:00 horas. Conforme visto nas simulações de verão, neste horário, podemos superar essas discordâncias através dos ajustes dos ventos. Também seguindo o mesmo procedimento dos estudos de verão, antes de fazer os ajustes dos ventos em Fortaleza vamos analisar os resultados sobre a estação de Cachoeira Paulista.

Comparando os resultados da simulação de foF2 sobre Fortaleza com os dados experimentais, podemos concluir que não há necessidade de fazermos ajustes no fluxo solar EUV. Com isso fica estabelecido que o modelo EUV94 fornece valores adequados do fluxo EUV para inverno de atividade solar mínima.

A Figura 6.27 mostra os resultados para Cachoeira Paulista obtidos com as mesmas condições do caso de Fortaleza, ou seja, resultados calculados pelo SUPIM mudando apenas a deriva equatorial. Tanto os resultados de foF2 como os de hmF2 não apresentam diferenças significativas ao serem calculados com o uso das derivas MDB e MDA. Isso também foi constatado nos resultados de verão, pois sobre Cachoeira Paulista esses parâmetros (foF2 e hmF2) são fortemente controlados por ventos, segundo os resultados do SUPIM.

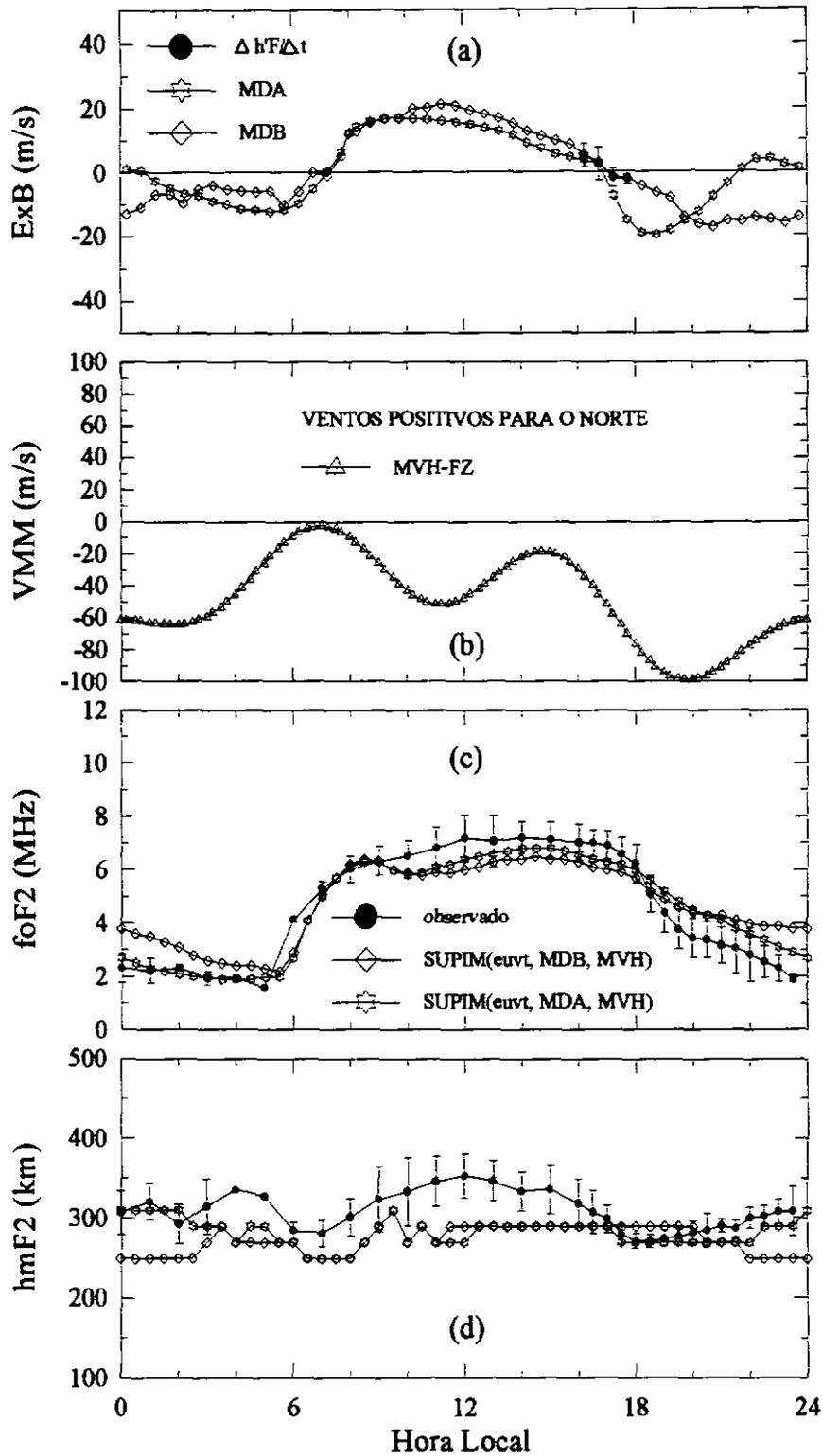


Fig. 6.26 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$.

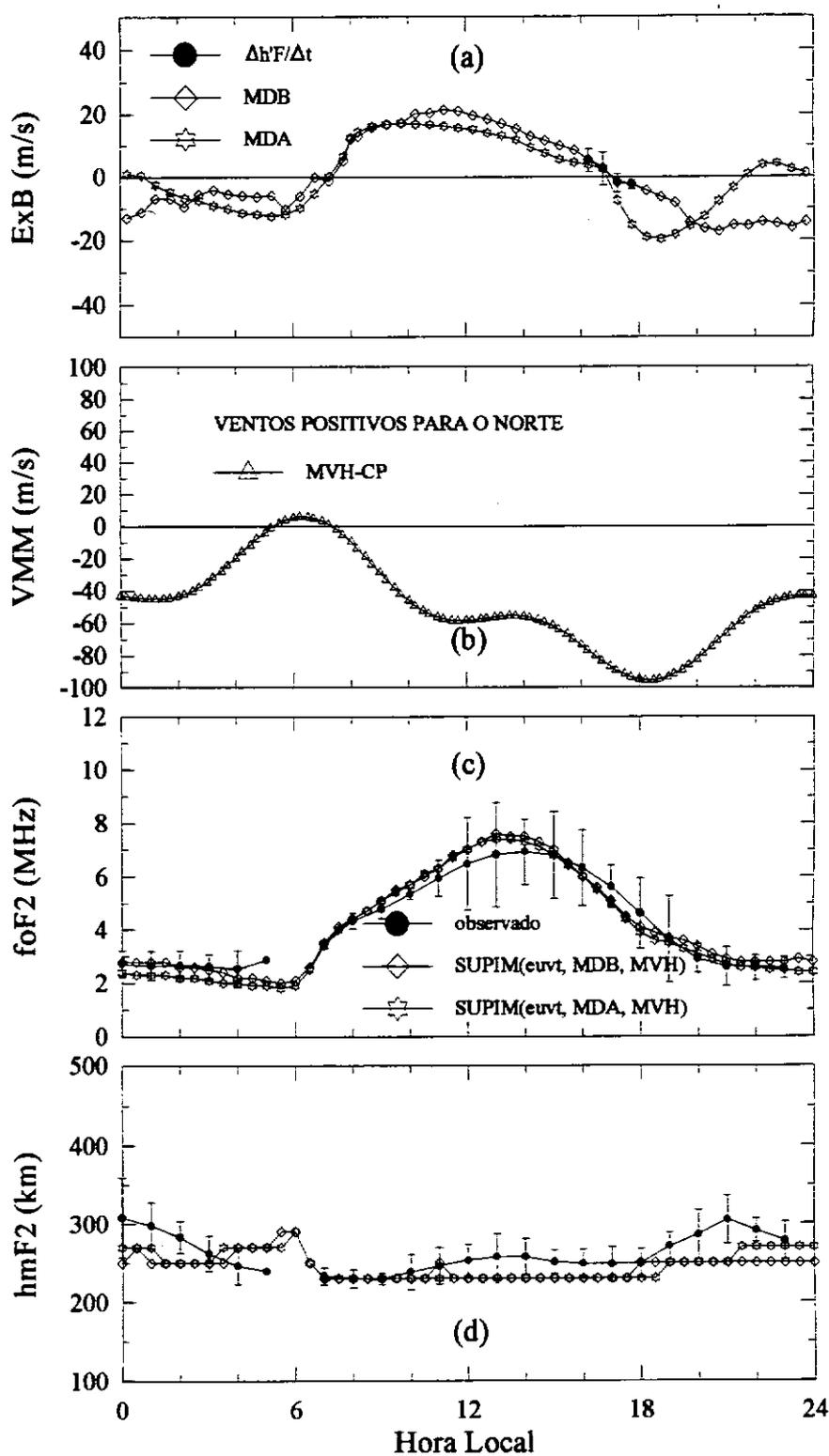


Fig. 6.27 - Derivas eletromagnéticas $E \times B$, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das mudanças na deriva $E \times B$.

Um fato muito interessante que constatamos neste caso de inverno é que os valores de foF2 sobre Cachoeira Paulista apresentam boa concordância com os dados antes de termos incluído os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul. Isso significa que os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul, na região F ionosférica de Cachoeira Paulista, pode ser desprezível durante o inverno. A explicação para isso pode ser dada baseando-se no fato de que durante o inverno, devido à queda de temperatura, a atmosfera sofre uma contração e por causa disso as interações ionosfera-magnetosfera diminuem, causando também uma queda na precipitação de partículas na região da anomalia. Na verdade, devido à contração da atmosfera as partículas energéticas atingem seus pontos de reflexões antes de atingirem a atmosfera mais densa e isso evita suas precipitações. Já no verão, por causa da expansão da atmosfera, isso não acontece e traz aumento da precipitação de partículas.

6.4.1 - EFEITOS DAS MUDANÇAS DOS VENTOS SOBRE foF2 E hmF2 EM FORTALEZA E EM CACHOEIRA PAULISTA

Conforme foi mostrado nas Figuras 6.26 e 6.27, os valores calculados de foF2, tanto em Fortaleza como em Cachoeira Paulista, mostram boa concordância com os dados, mas o parâmetro hmF2 apresentou algumas discordâncias. Por causa disso, achamos que teríamos a necessidade de ajustar somente os ventos locais destas estações, ou seja, os ventos dos setores conjugados fornecidos pelo modelo HWM90 estariam corretos. Porém, após ajustar os ventos locais, para elevar os valores de hmF2 durante alguns horários (a necessidade disso pode ser vista nas Figuras 6.26 e 6.27) ocorreu um aumento significativo de foF2. Então, foi necessário ajustar também os ventos dos setores conjugados para que foF2 voltasse a atingir concordância com os dados observados. Os resultados finais, com todos os ventos devidamente ajustados, tanto de Cachoeira Paulista como de Fortaleza, estão nas Figuras 6.28 e 6.29, respectivamente.

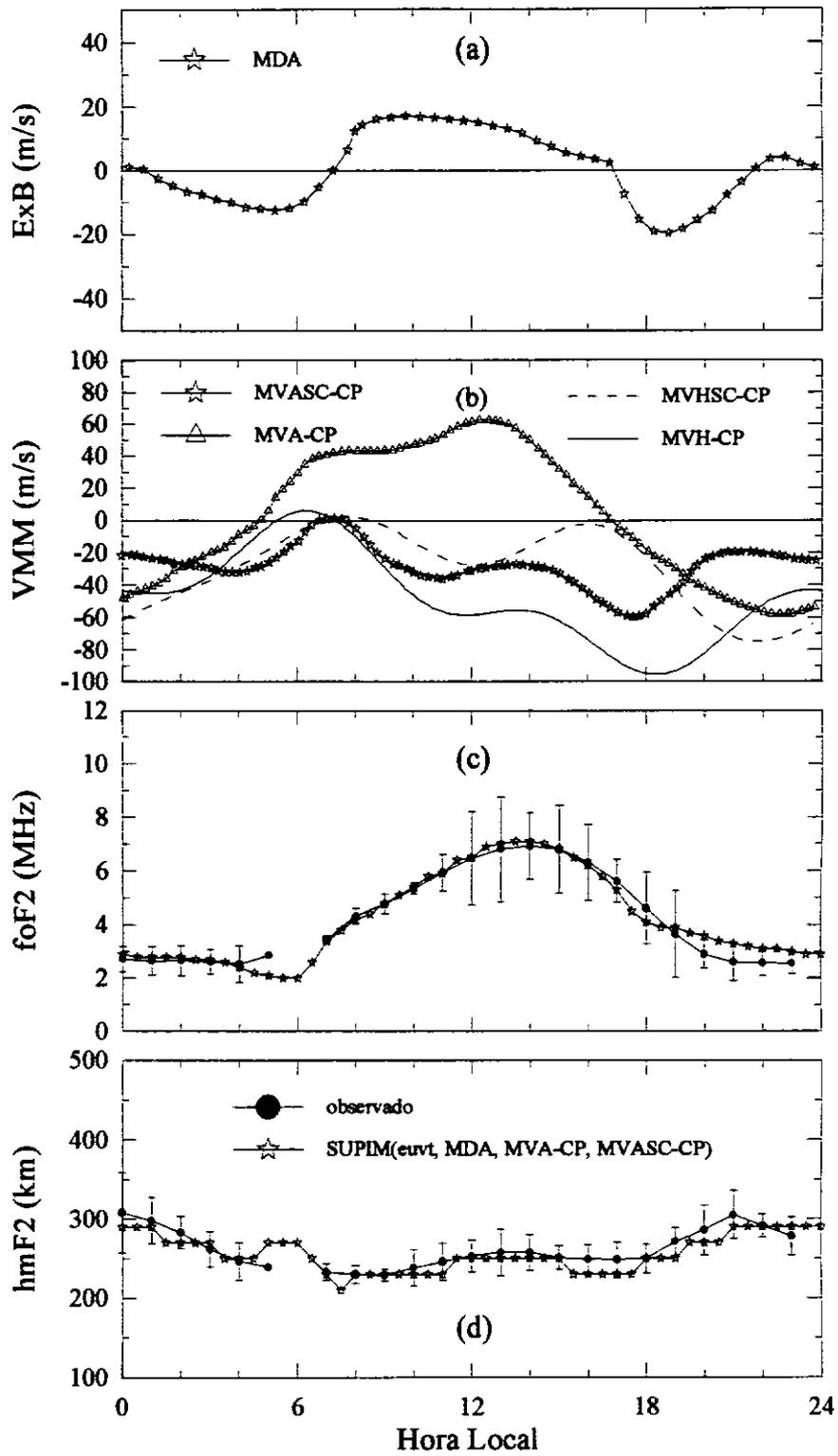


Fig. 6.28 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de f_oF2 e h_mF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos.

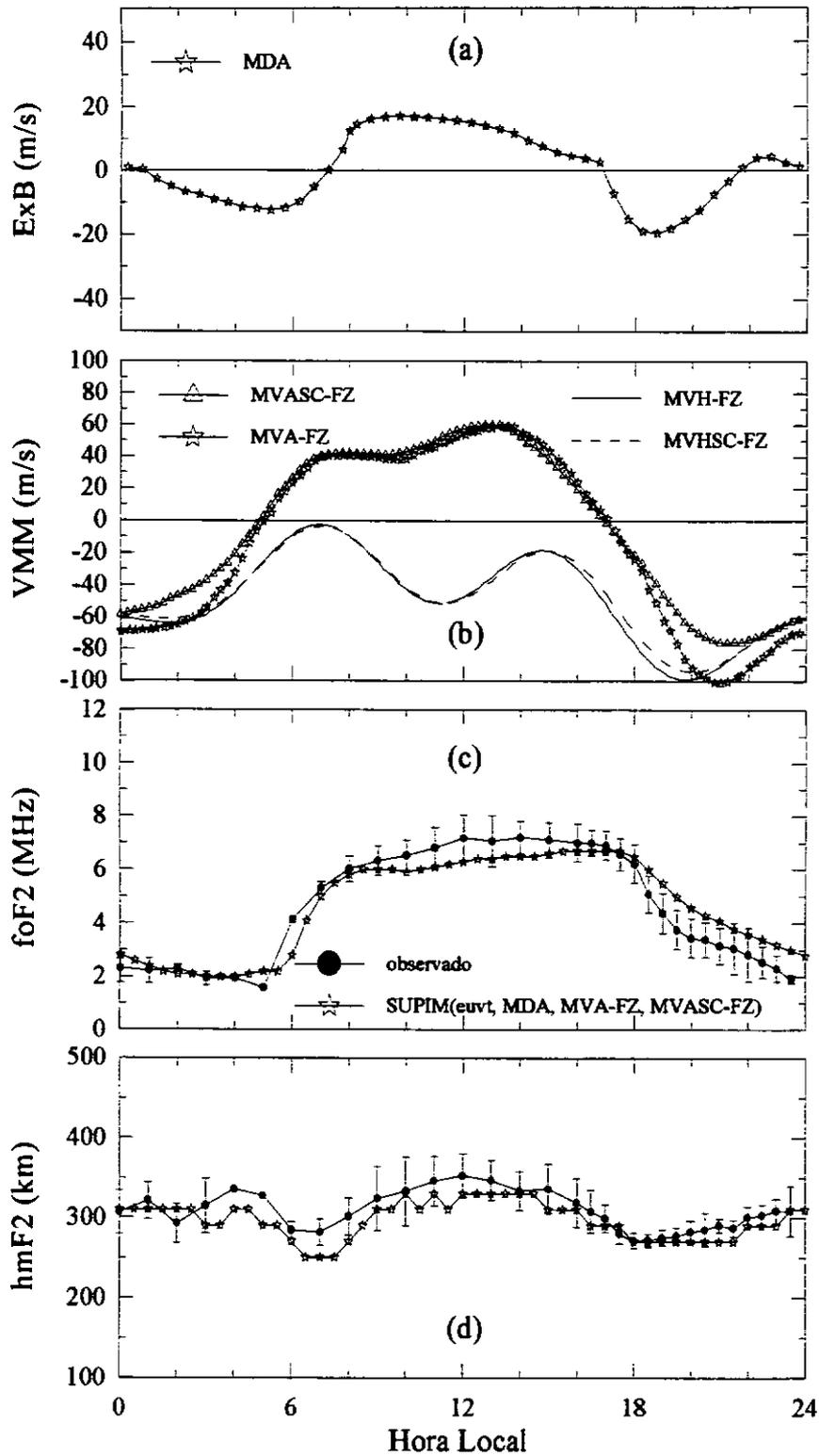


Fig. 6.29 - Deriva eletromagnética $E \times B$, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de f_oF2 e h_mF2 em Fortaleza durante inverno de atividade solar mínima. Efeitos das variações dos ventos.

Comparando as variações diurnas dos ventos ajustados com os ventos produzidos pelo modelo HWM90, podemos ver grandes discordâncias nos resultados de Fortaleza (6.29b) e de Cachoeira Paulista (Figura 6.28b). Em Fortaleza, no seu setor conjugado e no setor conjugado de Cachoeira Paulista as maiores diferenças entre esses modelos de vento ocorrem entre 05:00-18:00 horas. Já os ventos ajustados para Cachoeira Paulista não apresentam discordâncias tão marcantes com os ventos HWM90, como acontece nos outros locais, mas também apresenta discordâncias principalmente depois das 10:00 horas.

Comparando os ventos ajustados de Cachoeira Paulista com os resultados de Medeiros (1995), podemos ver que estes modelos de vento apresentam características muito diferentes, como mostra a Figura 6.30. Os ventos calculados por Medeiros durante a noite sopram para o norte, já os ventos ajustados sopram para o sul. Durante o dia, apesar de ambos os ventos soprarem para o sul, a intensidade do vento de Medeiros é maior do que a intensidade do vento ajustado.

As Figuras 6.31, 6.32 e 6.33 mostram cortes longitudinais dos resultados dos ventos ajustados, dos ventos do modelo HWM90 e resultados de foF2 calculados com o uso destes ventos. Da mesma forma que foi feito para verão, essas figuras mostram resultados para 06:00, 12:00 e 18:00 horas respectivamente. Analisando esses resultados também podemos constatar grandes discordâncias entre os ventos. Às 06:00 horas, em quase toda a distribuição latitudinal esses ventos sopram em sentidos invertidos, ou seja, enquanto o vento ajustado sopra para o norte o vento HWM90 sopra para o sul e vice-versa. Na verdade, apenas entre -13° e -7° o vento ajustado sopra no mesmo sentido do vento HWM90 (para o norte), mas com intensidade maior, em quase toda essa faixa de latitude. Ao meio dia, o comportamento latitudinal do vento ajustado também é diferente do comportamento do vento HWM90. Entre -20° e -12° , o vento ajustado é menor do que o vento HWM90 e ambos sopram para o sul, mas em torno de -12° o vento ajustado inverte seu sentido enquanto o vento HWM90 continua soprando para o sul. Essa inversão dos ventos ajustados, em torno de -12° , revela uma

característica inesperada, pois tratando-se de verão no hemisfério norte era esperado que, principalmente ao meio dia, os ventos soprassem para o sul. Às 18:00 horas, os dois modelos de vento mostram seus resultados soprando para o sul, mas o vento ajustado apresenta intensidade inferior a intensidade do vento HWM90. Os resultados de foF2 calculado pelo SUPIM usando o vento ajustado e o vento HWM90 apresentam diferenças mais significativas às 12:00 e às 18:00 horas.

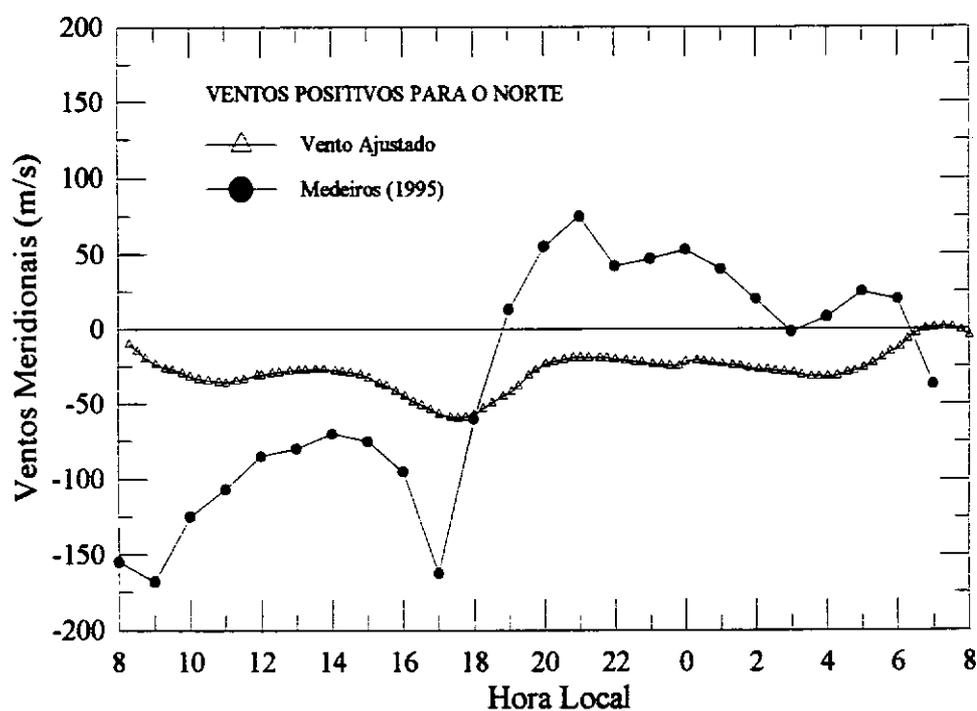


Fig. 6.30 - Comparação entre o vento ajustado e o vento obtido por Medeiros (1995) para inverno de atividade solar mínima em Cachoeira Paulista.

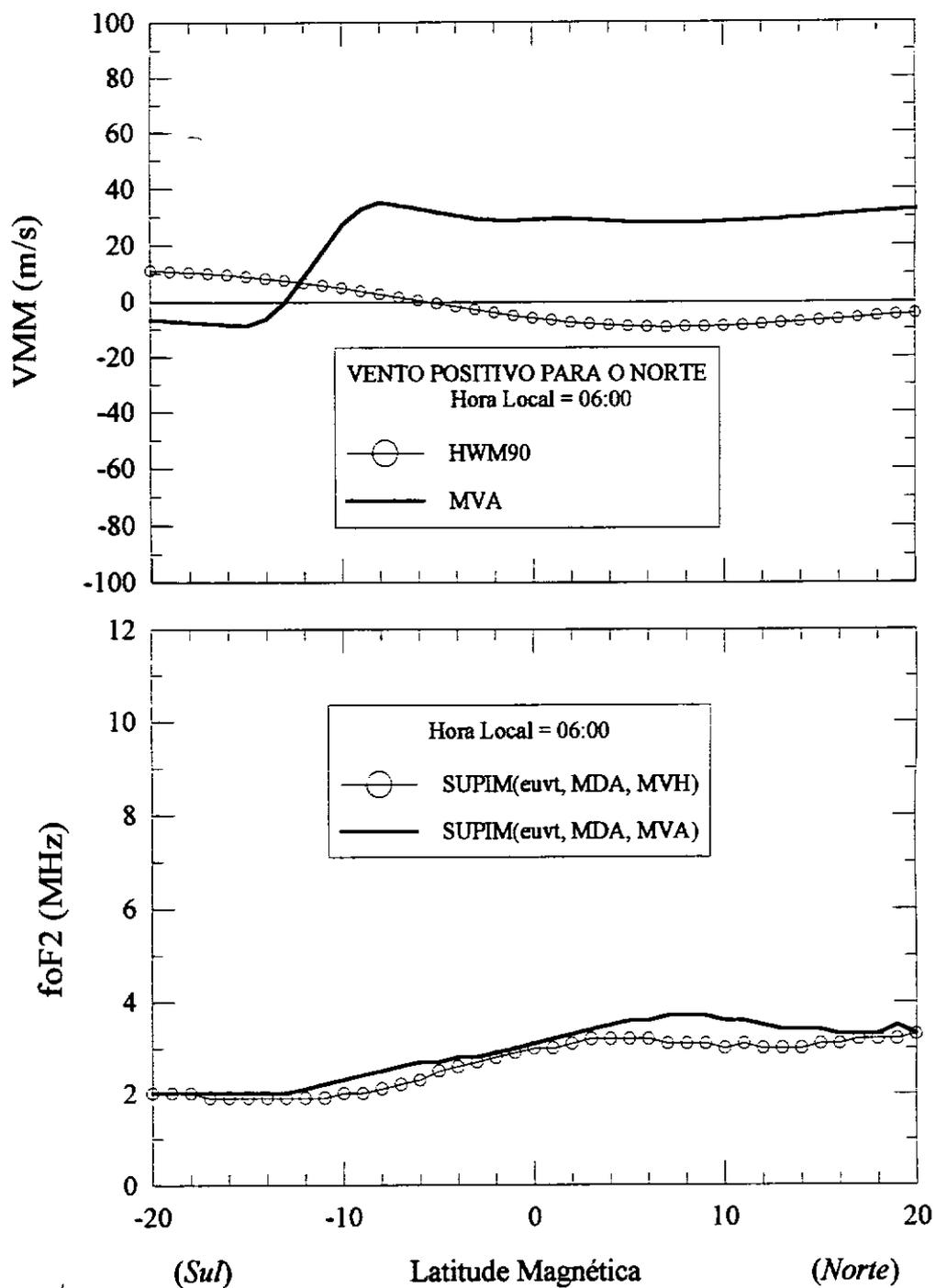


Fig. 6.31 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Caso de inverno de atividade solar mínima.

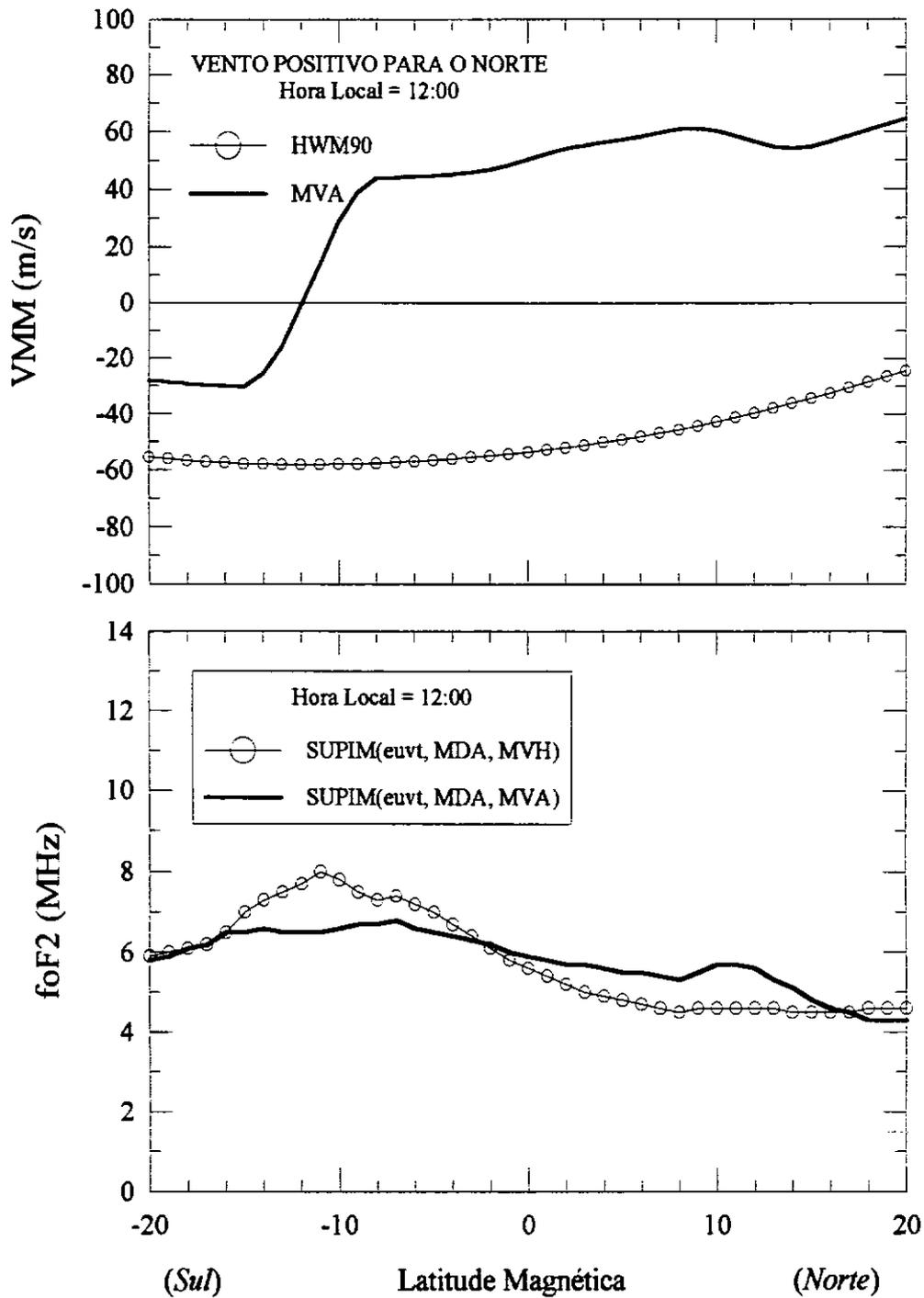


Fig. 6.32 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de inverno de atividade solar mínima.

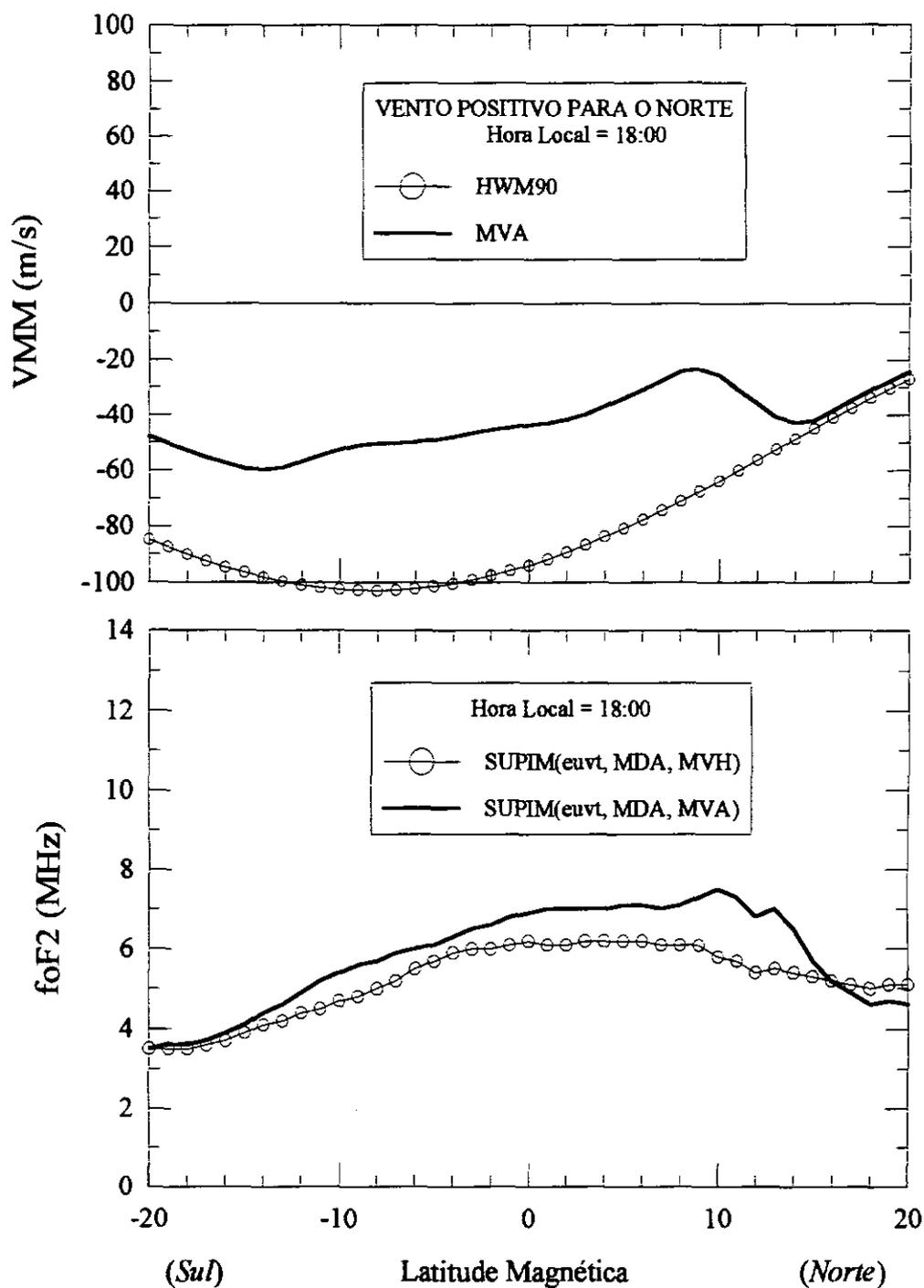


Fig. 6.33 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Inverno de atividade solar mínima.

Com a finalidade de observar, de uma forma geral, as diferenças entre as distribuições latitudinais de foF2 calculadas com o modelo SUPIM sem

introduzir mudanças nos parâmetros de entrada (Figura 6.34a) construímos contornos de foF2 numa grade de latitude magnética versus hora local. Os resultados deste modelo, incluindo as alterações, estão apresentados na Figura 6.34b. Como pode ser visto na Figura 6.34, também para esse caso de inverno, a distribuição latitudinal de foF2 sofre fortes mudanças depois de incluir as correções dos parâmetros de entrada, principalmente durante o dia. Por exemplo, a intensidade máxima do pico da anomalia, depois das correções, se inverte ficando o pico mais definido no hemisfério de verão do que no hemisfério de inverno.

6.5 - SIMULAÇÕES DE foF2 E hmF2 PARA INVERNO DE ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA EM FORTALEZA E EM CACHOEIRA PAULISTA

As Figuras 6.35 e 6.36 mostram resultados de simulações de foF2 e hmF2 para Fortaleza e para Cachoeira Paulista respectivamente. O objetivo destas simulações de Fortaleza são de investigar a necessidade de ajustar o fluxo EUV dado pelo modelo EUV94 e calcular a deriva representativa de inverno de atividade solar máxima. Já no caso de Cachoeira Paulista, as finalidades são de verificar a necessidade de incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul e saber se precisamos modificar os ventos, conforme procedimento estabelecido anteriormente. De acordo com os resultados de Fortaleza, a deriva ajustada (MDA) atinge valores satisfatórios diferenciando-se muito pouco da deriva MDB. Consequentemente, os resultados de foF2 e de hmF2 calculados com a deriva MDA apresentam pouca diferença dos resultados obtidos com a deriva MDB, mas são satisfatórios segundo os critérios usados para escolher a deriva padrão de determinada época. Os resultados de hmF2 entre 07:00-16:00 horas, da mesma forma como aconteceu nos estudos de verão e de inverno de atividade solar mínima, apresentam valores inferiores aos dados observados, como mostra a Figura 6.35d. A explicação para essas discordâncias é dada através dos ventos, como foi mencionado nas seções anteriores. Entretanto, isso também será discutido na próxima seção.

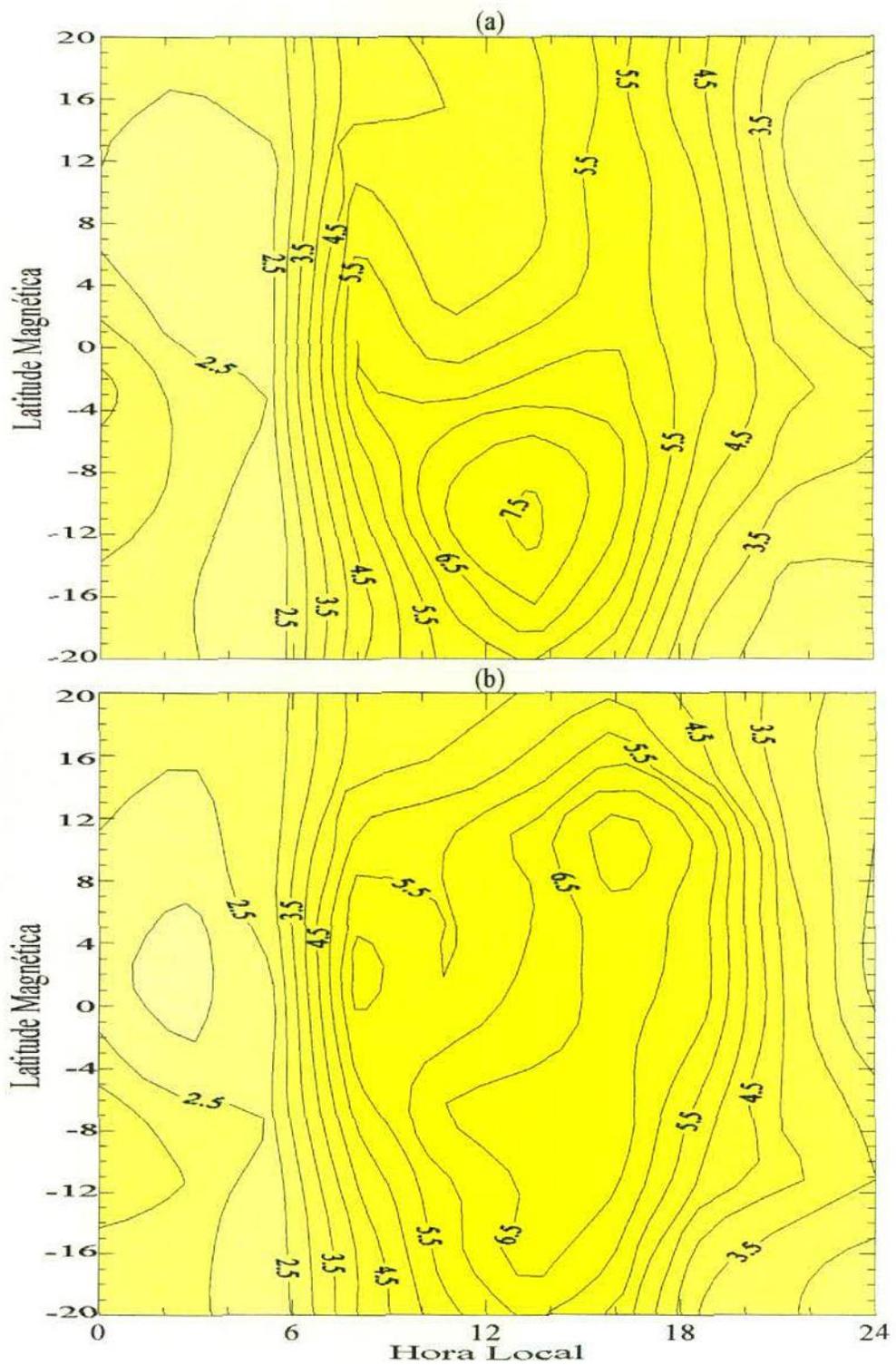


Fig. 6.34 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para inverno de atividade solar mínima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.

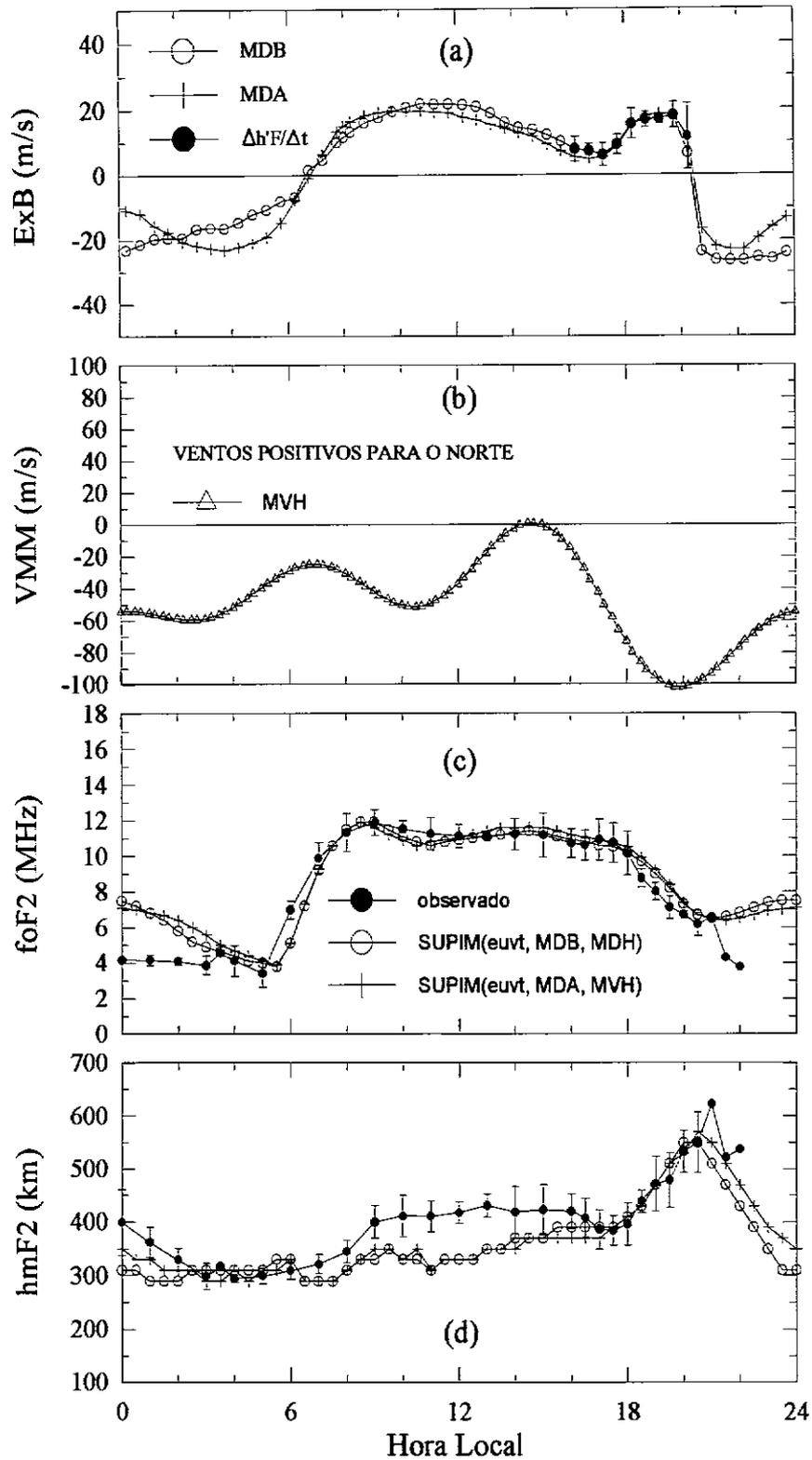


Fig. 6.35 - Derivas eletromagnéticas, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de $foF2$ e $hmF2$ em Fortaleza durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

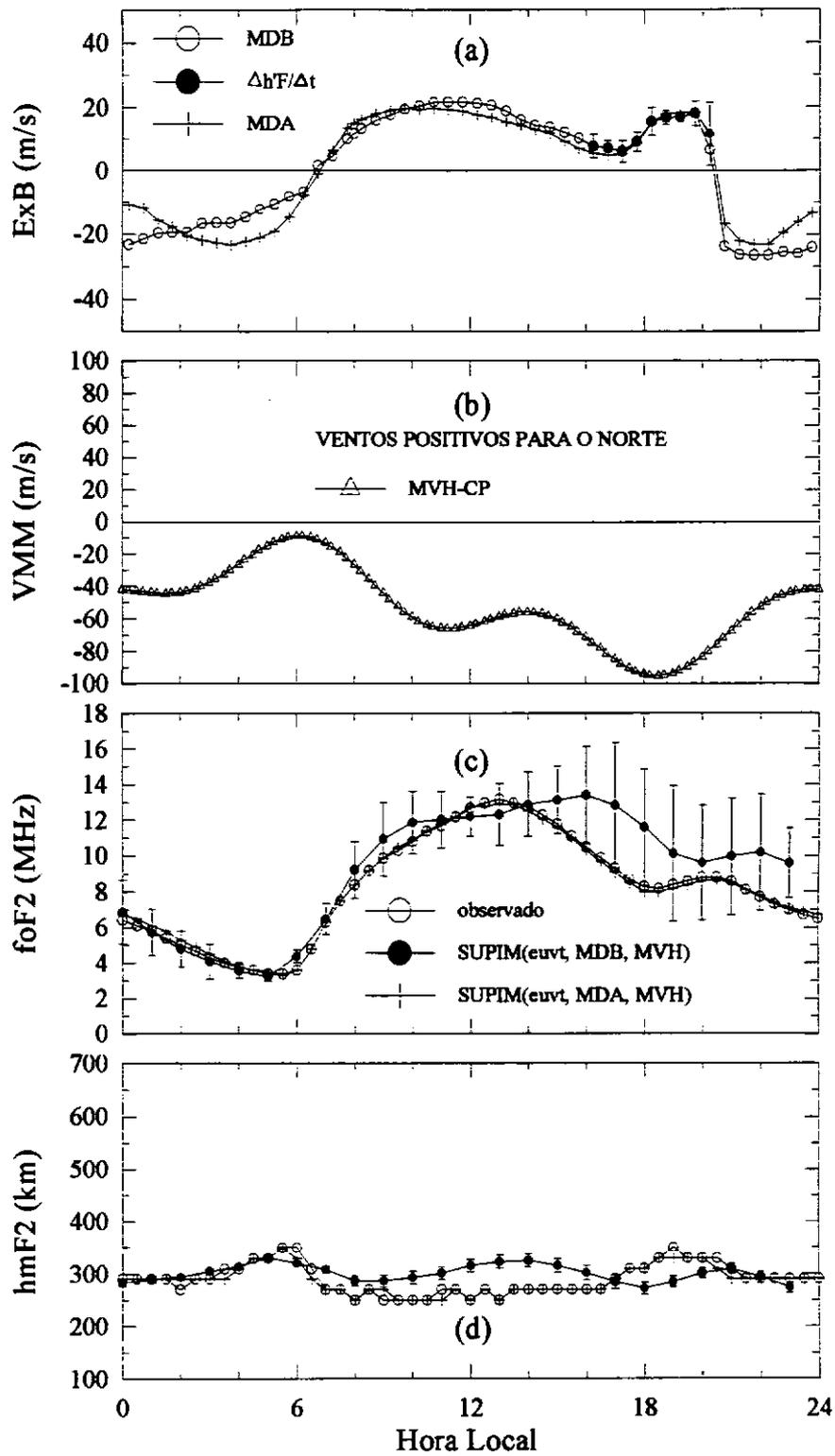


Fig. 6.36 - Derivas eletromagnéticas, vento ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de $foF2$ e $hmF2$ em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das mudanças na deriva.

Os resultados de foF2 sobre Fortaleza nos mostra que não existe necessidade de fazer os ajustes nos valores do fluxo EUV produzido pelo modelo EUV94.

Os resultados de foF2 e de hmF2 sobre Cachoeira Paulista, obtidos com o uso das derivas MDB e MDA no modelo SUPIM, não apresentam diferenças significativas entre si. De fato isso já era esperado, pois além desses modelos de deriva apresentarem poucas diferenças, os valores de foF2 e de hmF2 de Cachoeira Paulista não têm apresentado grande sensibilidade às mudanças das derivas, como foi constatado anteriormente.

Comparando os resultados de foF2 e de hmF2, calculados pelo modelo SUPIM para Cachoeira Paulista, com os dados observados constatamos que não há necessidade de incluir os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul. Esse importante resultado também foi observado no inverno de atividade solar mínima e confirma a conclusão de que os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul na região F ionosférica apresentam uma variação sazonal, com efeito desprezível durante o inverno.

6.5.1 - EFEITOS DAS MUDANÇAS DOS VENTOS SOBRE foF2 E hmF2 EM CACHOEIRA PAULISTA E EM FORTALEZA

Os resultados de foF2 e de hmF2, tanto de Cachoeira Paulista como de Fortaleza, obtidos com os ventos devidamente ajustados estão mostrados nas Figuras 6.37 e 6.38, respectivamente. Conforme pode ser visto nestas figuras, os resultados de foF2 e de hmF2 atingiram concordância com os dados observados. Também neste caso de inverno de atividade solar máxima, semelhante ao que aconteceu durante inverno de atividade solar mínima, quando corrigimos hmF2 de Cachoeira Paulista e de Fortaleza com mudanças dos ventos locais, os valores de foF2 aumentaram significativamente causando discordâncias com os dados experimentais. Entretanto, ajustando os ventos dos setores conjugados, conseguimos superar as discordâncias.

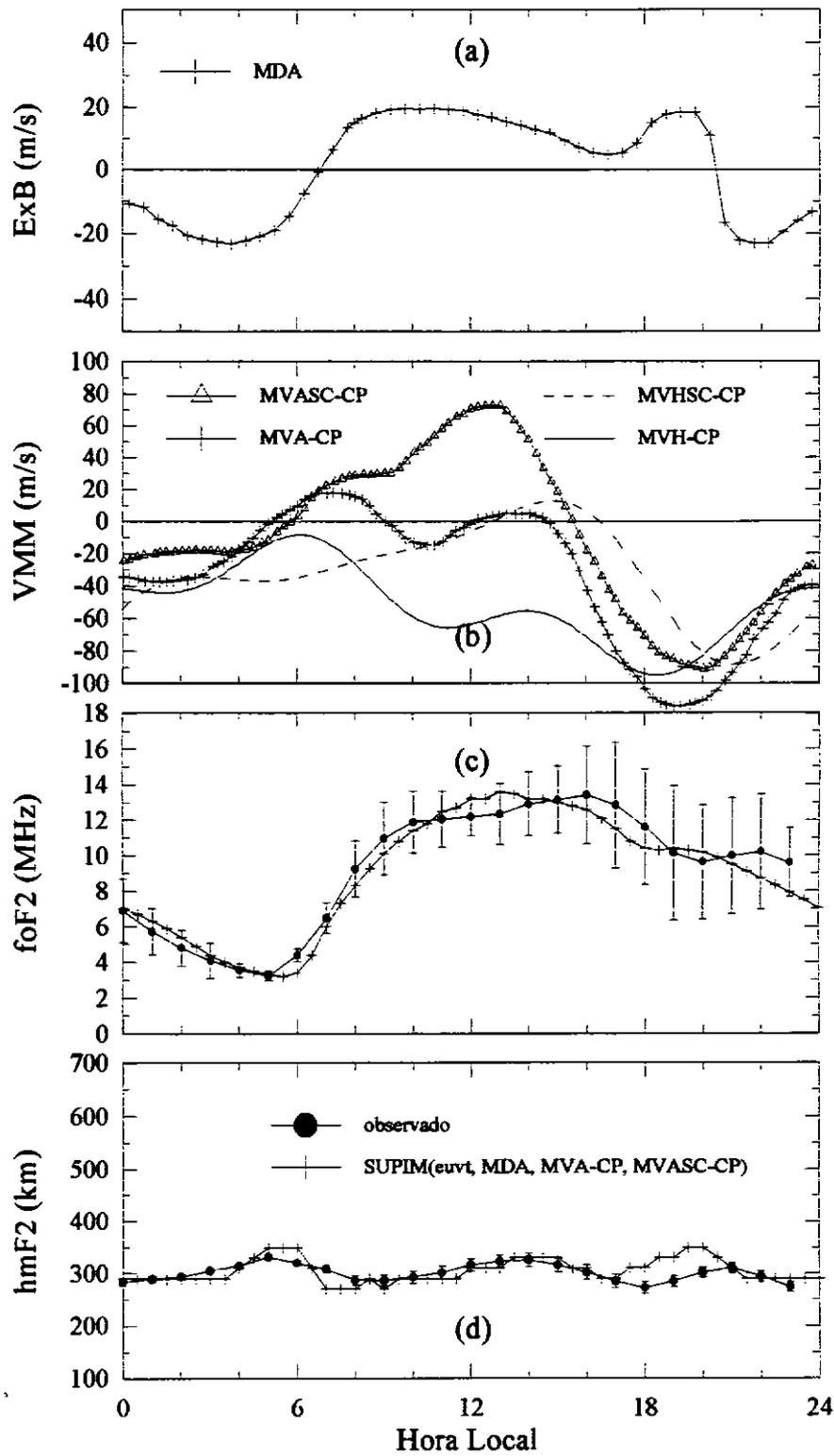


Fig. 6.37 - Deriva eletromagnética, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de foF2 e hmF2 em Cachoeira Paulista durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.

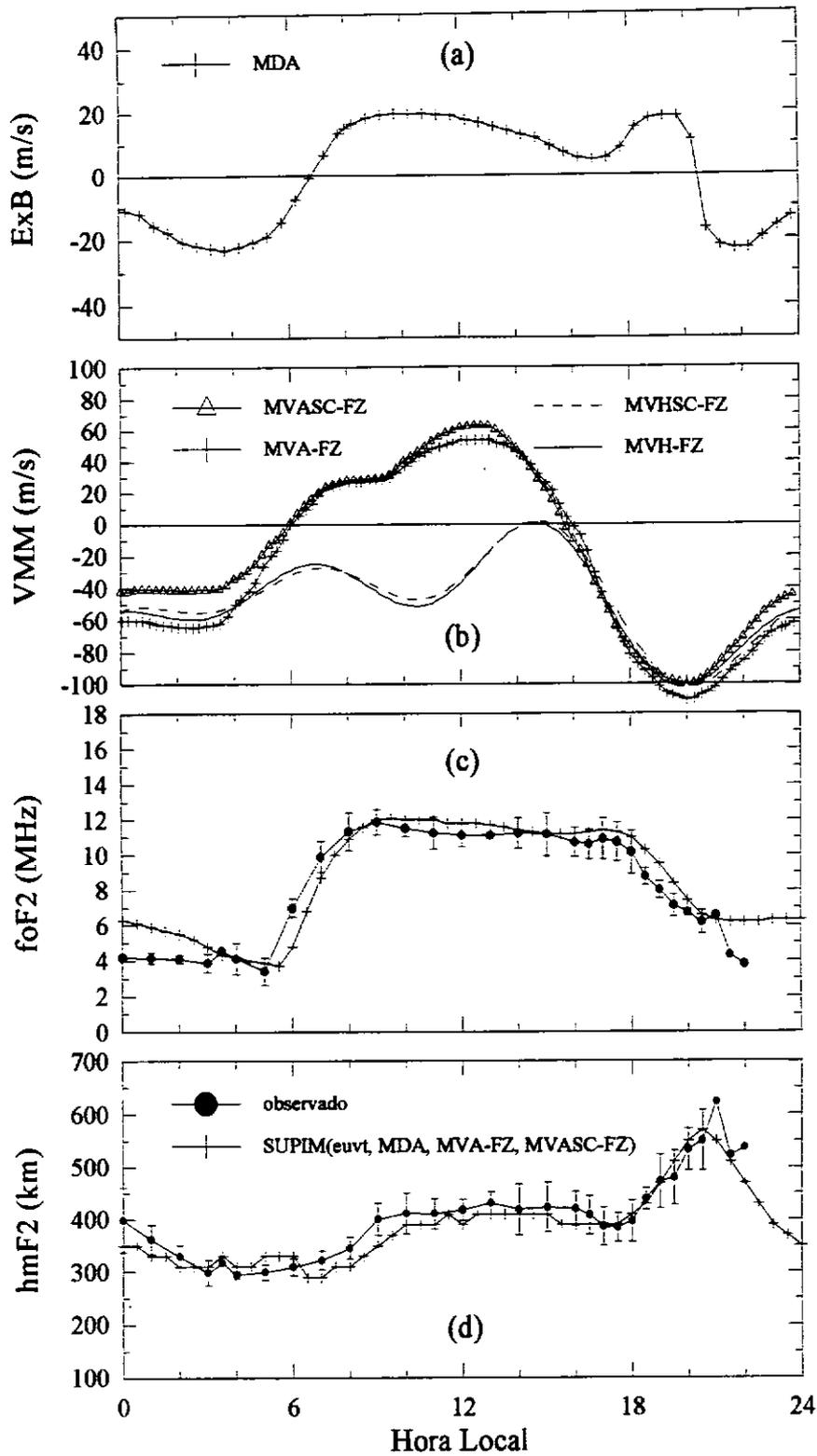


Fig. 6.38 - Deriva eletromagnética, ventos ao longo do meridiano magnético, dados observados e resultados modelados de $foF2$ e $hmF2$ em Fortaleza durante inverno de atividade solar máxima. Efeitos das variações dos ventos.

Comparando os ventos ajustados de Cachoeira Paulista com os ventos do modelo HWM90 não constatamos grandes diferenças. Apenas entre 17:00-22:00 horas temos uma discordância mais significativa. Entretanto, em Fortaleza, no seu setor conjugado, e no setor conjugado de Cachoeira Paulista as maiores discordâncias entre esses ventos ocorrem entre 05:00-16:00 horas, como mostram as Figuras 6.37b e 6.38b.

Fazendo uma comparação dos resultados dos ventos ajustados sobre Cachoeira Paulista com os ventos calculados por Medeiros (1995), constatamos que as melhores concordâncias acontecem ao entardecer e durante parte da noite, como mostra a Figura 6.39. Também nesta figura mostramos os ventos calculados pelo modelo HWM90 e os dados de ventos obtidos com o uso de interferometria de Fabry-Perot (dados publicados por Sahai et al., 1992). Conforme pode ser visto, tanto os ventos ajustados como os ventos do modelo HWM90, mostram boa concordância com os dados experimentais.

As Figuras 6.40, 6.41 e 6.42 mostram variações latitudinais dos ventos meridionais calculados neste trabalho e ventos produzidos pelo modelo HWM90 às 06:00, 12:00 e às 18:00 horas, respectivamente. Estas figuras também mostram resultados de foF2 calculados com esses ventos. Às 06:00 horas, o vento ajustado apresenta sentido inverso em relação ao vento do modelo HWM90 para toda a faixa de latitude entre -20° e 20° . Nesta faixa de latitude, o vento ajustado sopra para o norte, enquanto o vento HWM90 sopra para o sul. Os resultados de foF2 obtidos com esses ventos e usando o modelo SUPIM não apresentam diferenças significativas.

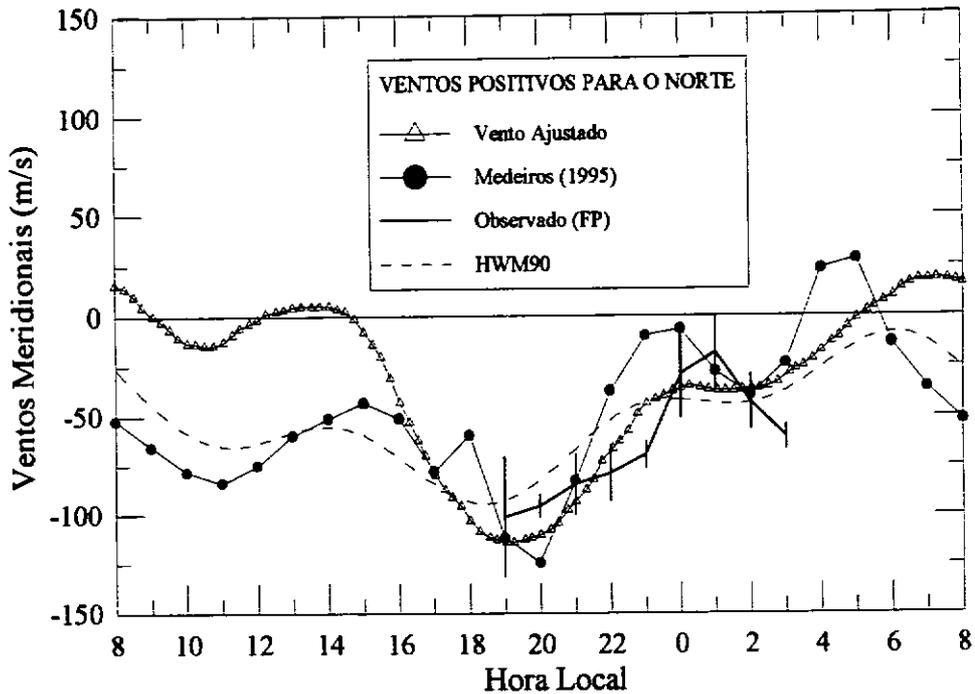


Fig. 6.39 - Comparação entre o vento ajustado, o vento obtido por Medeiros (1995), o vento do modelo HWM90 e o vento observado em Cachoeira Paulista para inverno de atividade solar máxima.

As maiores discordâncias entre as variações latitudinais dos ventos ajustados e dos ventos do modelo HWM90 ocorrem às 12:00 horas (veja Figura 6.41). Nesta hora, entre -14° e 20° o vento ajustado sopra para o norte atingindo valores bastante altos e isso não acontece com o vento HWM90, que sopra para o sul. Da mesma forma que aconteceu nos resultados de inverno de atividade solar mínima, esse comportamento do vento ajustado não era esperado, visto que, tratando-se de verão no hemisfério norte os ventos deveriam soprar para o sul. As distribuições latitudinais de foF2, calculadas com o uso destes ventos, apresentam diferenças mais acentuadas no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Às 18:00 horas, tanto o vento HWM90 como o vento ajustado sopram para o sul, porém o vento ajustado é mais intenso e essa intensidade aumenta no setor conjugado de Cachoeira Paulista, como mostra a Figura 6.42. Também nesta figura podemos ver que o aumento do vento no setor conjugado de Cachoeira Paulista provocou um aumento de foF2 sobre Cachoeira Paulista.

Também para este caso de inverno de atividade solar máxima, como mostra a Figura 6.43, construímos contornos de foF2 para termos uma visão geral da distribuição deste parâmetro ao longo das latitudes, à medida que varia a hora local. A Figura 6.43a mostra os resultados obtidos pelo modelo SUPIM, sem levar em consideração os ajustes dos parâmetros de entrada, e os resultados com os ajustes destes parâmetros estão na Figura 6.43b. Comparando esses resultados podemos ver que as diferenças mais significativas ocorrem durante o dia, em que os picos máximos da Anomalia Equatorial ficam mais definidos depois de fazer os ajustes dos parâmetros de entrada e, da mesma maneira que aconteceu durante verão de atividade solar mínima e de atividade solar máxima e inverno de atividade solar mínima, o pico da anomalia atingiu sua intensidade máxima mais cedo no hemisfério de inverno do que no hemisfério de verão.

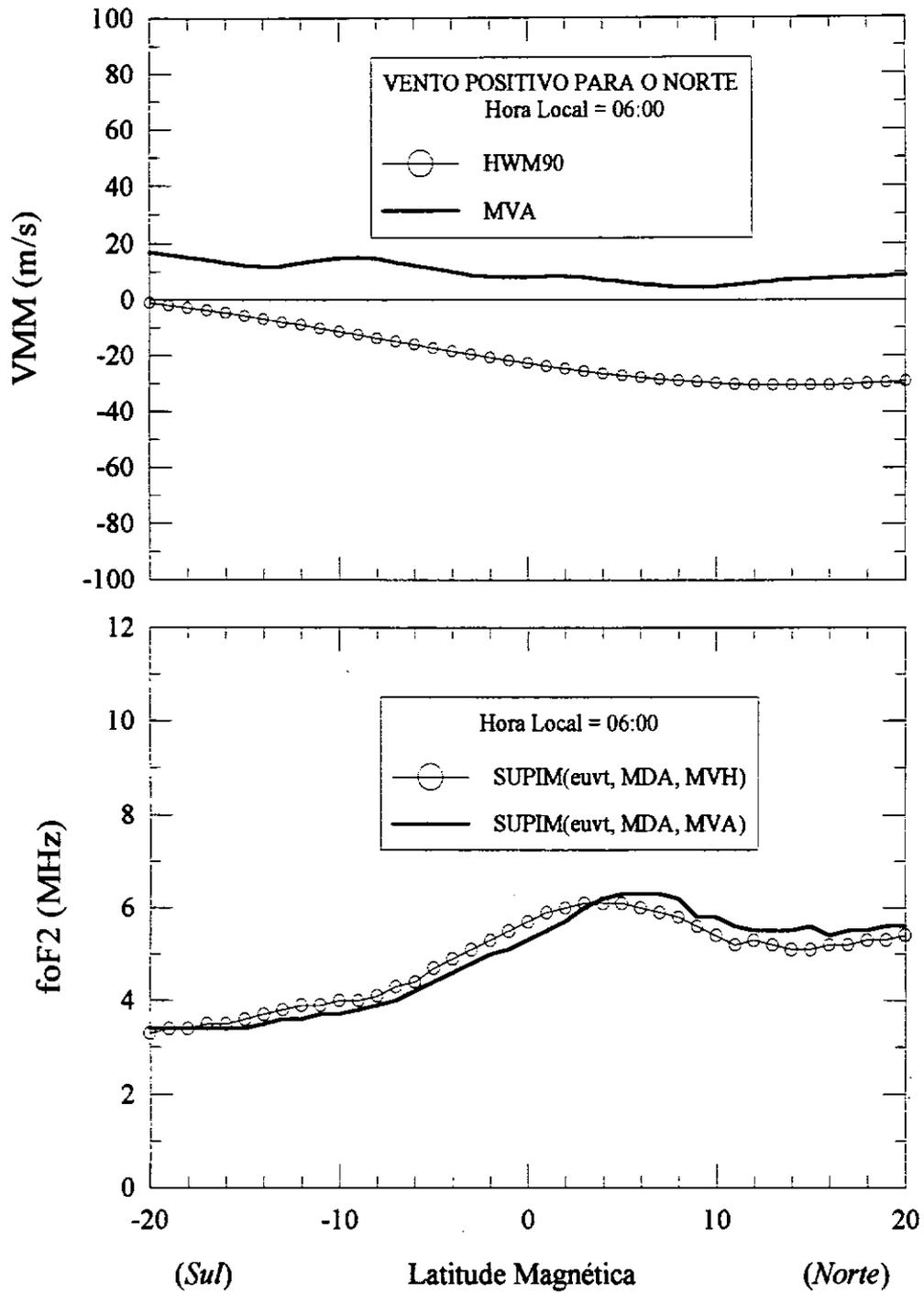


Fig. 6.40 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 06:00 horas. Inverno de atividade solar máxima.

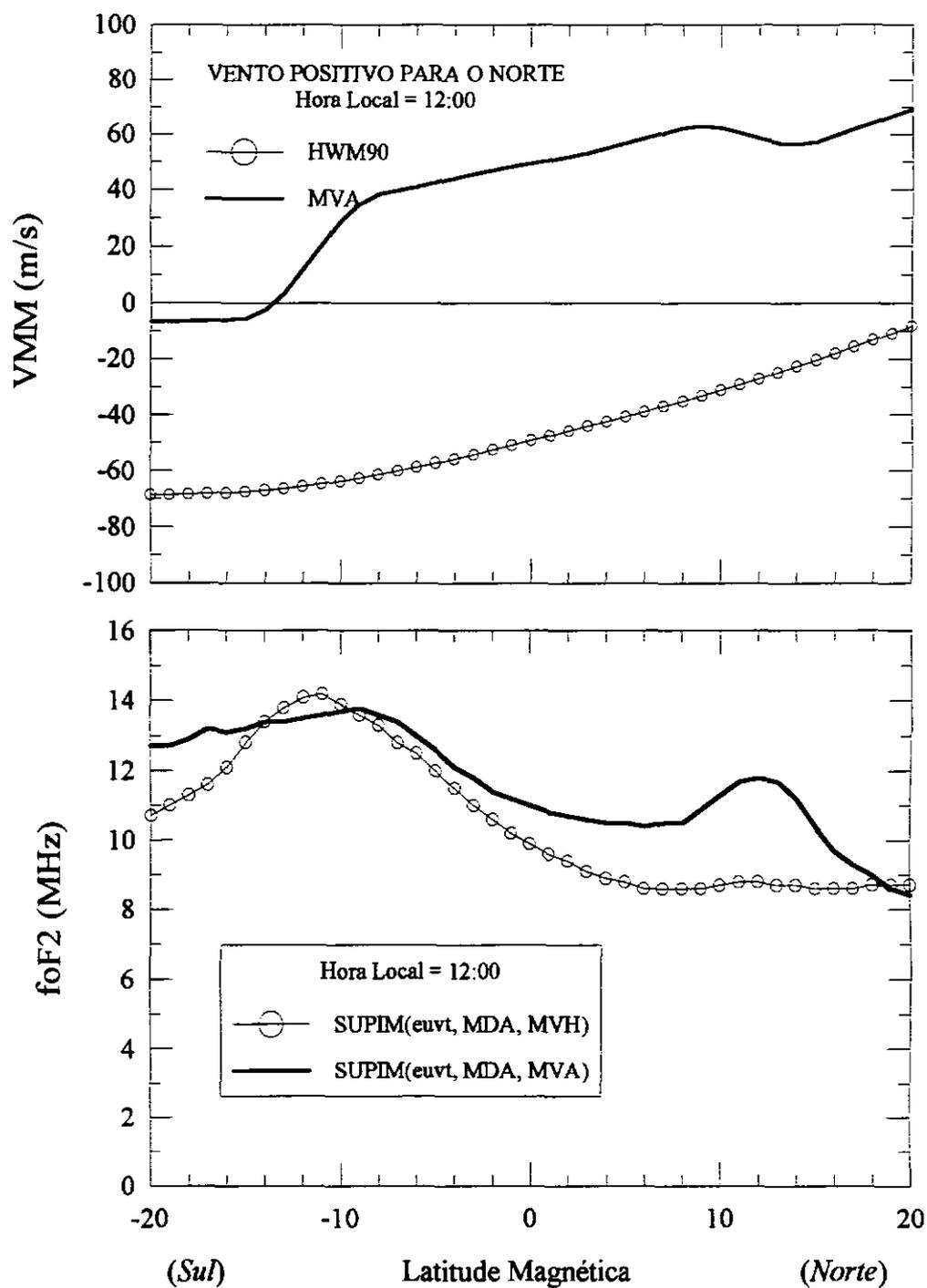


Fig. 6.41 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 12:00 horas. Caso de inverno de atividade solar máxima.

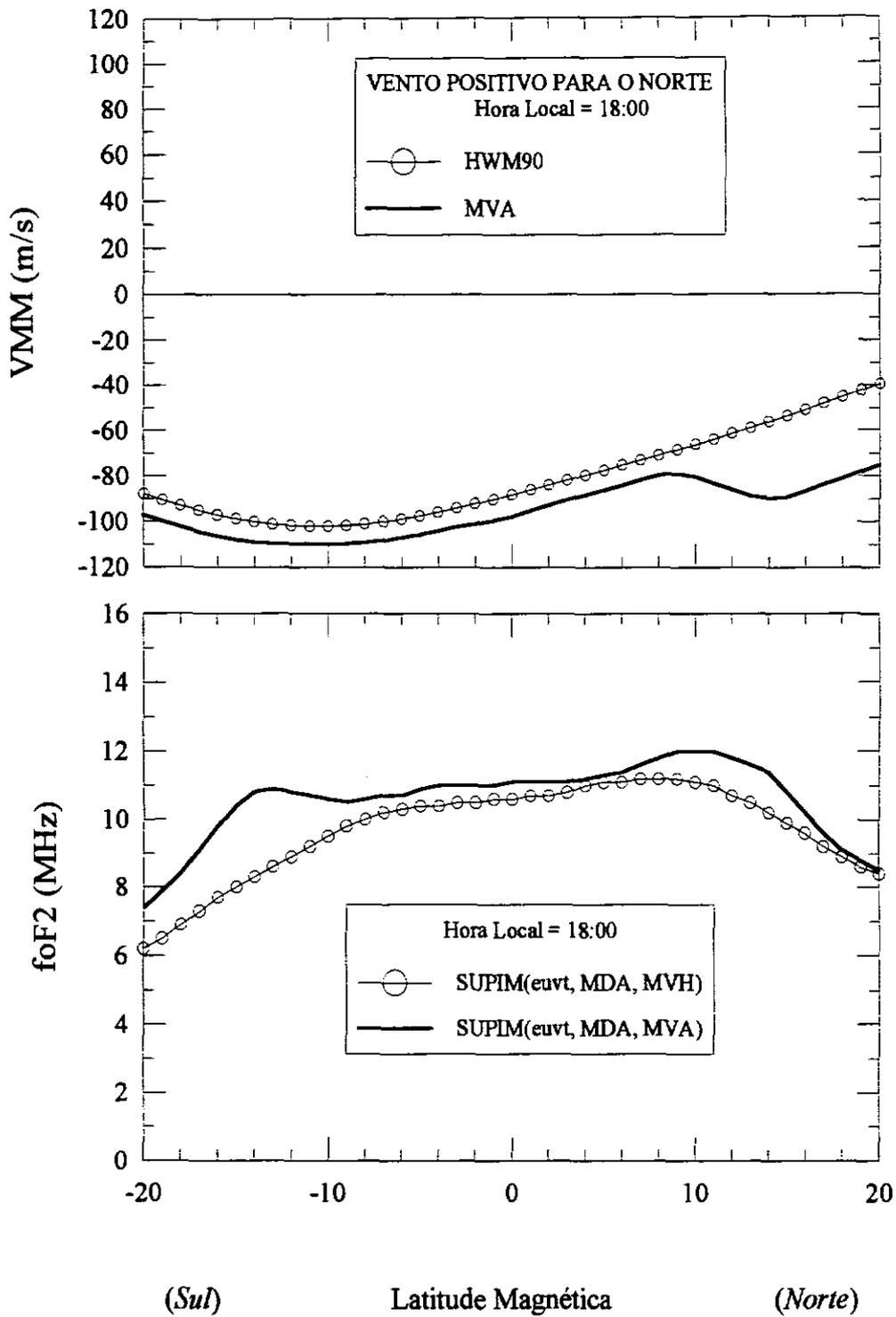


Fig. 6.42 - Variação latitudinal do vento ajustado, do vento fornecido pelo modelo HWM90 e de foF2 às 18:00 horas. Caso de inverno de atividade solar máxima.

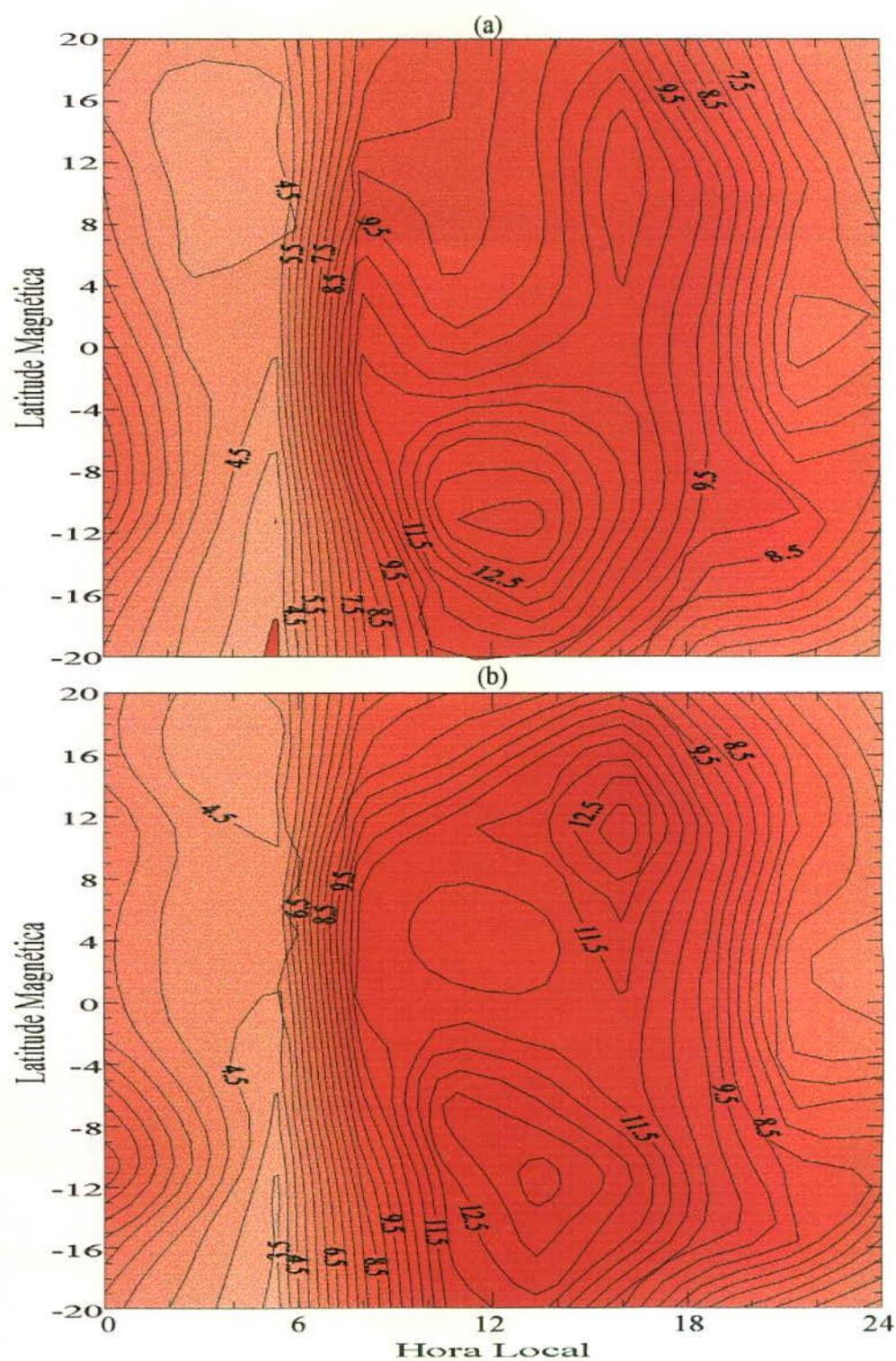


Fig. 6.43 - Contornos de foF2 calculados pelo modelo SUPIM para inverno de atividade solar máxima com as seguintes condições: (a) sem alterações dos parâmetros de entrada e (b) com alterações.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Os resultados das simulações com o modelo SUPIM para Huancayo, mostram que o valor do fluxo solar produzido pelo modelo EUV94 está superestimado em 40%, durante o equinócio de atividade solar máxima. Os resultados de foF2 e de hmF2, calculados em Huancayo, usando a deriva $E \times B$ obtida pelo método de Batista et al. (1996) no SUPIM apresentam melhor concordância com os dados observados do que os resultados calculados com o uso do modelo de deriva de Fejer et al. (1991) no modelo SUPIM. Essas discordâncias podem ser causadas pelo fato da deriva de Fejer et al. não ser da mesma época que os dados de foF2 e hmF2.

Através do modelo SUPIM, e baseando em dados simultâneos de Fortaleza e de Cachoeira Paulista, encontramos modelos de derivas equatoriais, ventos termosféricos e calculamos os parâmetros foF2 e hmF2 para a região brasileira. Este estudo foi feito para verão e inverno, tanto de atividade solar mínima como de atividade solar máxima.

De acordo com os resultados do SUPIM obtidos com base em dados de foF2 e de hmF2, constatamos que o modelo EUV94 está subestimando em 25% o valor do fluxo solar durante o verão de atividade solar mínima. Durante verão de atividade solar máxima, inverno de atividade solar mínima e máxima o modelo EUV94 fornece valores adequados de fluxo EUV.

Desenvolvemos um método para calcular uma taxa de produção extra sobre Cachoeira Paulista, causada pelos efeitos da Anomalia do Atlântico Sul. Os resultados mostram que durante o inverno essa taxa de produção é desprezível. Provavelmente, isso é causado pela contração da atmosfera devido à diminuição da temperatura durante essa estação do ano, indicando que as partículas energéticas

aprisionadas ao campo geomagnético atingem seus pontos de reflexão antes de interagirem com a atmosfera mais densa.

Em Fortaleza, os parâmetros foF2 e hmF2 apresentam sensíveis variações devido às mudanças da deriva $E \times B$. Mas, entre 07:00-15:00 horas, o parâmetro hmF2 é fortemente controlado pela combinação de ventos e deriva. Foi constatado que hmF2 de Fortaleza neste horário apresenta uma dependência não apenas do vento local, mas também de uma distribuição adequada dos ventos ao longo do meridiano magnético até o ponto conjugado. Em Cachoeira Paulista, os ventos locais controlam hmF2. Também sobre essa estação, durante verão e inverno, constatamos que foF2 apresenta grande dependência dos ventos no seu ponto conjugado.

Os modelos de vento calculados com o SUPIM, com base em dados de foF2 e de hmF2, apresentam as seguintes características em relação aos resultados do modelo empírico HWM90:

Verão de atividade solar mínima: os perfis diurnos dos ventos calculados neste trabalho (ventos ajustados) discordam completamente dos valores obtidos pelo modelo HWM90. As discordâncias acontecem tanto em Cachoeira Paulista como em Fortaleza e também nos seus respectivos pontos conjugados.

Verão de atividade solar máxima: também temos grandes discordâncias entre os ventos ajustados e os ventos do modelo HWM90, porém, durante alguns horários temos resultados semelhantes. Em Cachoeira Paulista, os intervalos onde os resultados concordam são: 05:30-08:00 e 15:00-17:00 horas. Em Fortaleza: 03:30-06:30 e 16:00-20:00 horas. No setor conjugado de Fortaleza os horários de concordâncias são: 04:30-06:30 e 15:30-16:30 horas. No setor conjugado de Cachoeira Paulista não temos intervalos com concordâncias entre os resultados do vento calculado neste trabalho e o vento HWM90.

Inverno de atividade solar mínima: em Fortaleza, no seu setor conjugado e no setor conjugado de Cachoeira Paulista as maiores diferenças entre os modelos de vento ocorrem durante o dia. Em Cachoeira Paulista as discordâncias são menores do que nos outros locais.

Inverno de atividade solar máxima: também neste caso, os ventos em Cachoeira Paulista não apresentaram grandes discordâncias. As maiores diferenças acontecem entre 17:00-22:00 horas. Em Fortaleza, no seu setor conjugado, e no setor conjugado de Cachoeira Paulista as maiores discordâncias ocorrem entre 05:00-16:00 horas.

Os resultados da comparação entre os ventos ajustados e os dados observados em Cachoeira Paulista mostram boa concordância. Também encontramos boa concordância dos ventos ajustados em Cachoeira Paulista com os resultados de Medeiros (1995) durante a tarde e a noite, exceto, durante inverno de atividade solar mínima.

Analisando diagramas de contornos da variação da distribuição latitudinal de foF2 com a hora local, constatamos que a intensidade máxima do pico da Anomalia Equatorial forma-se mais cedo sempre no hemisfério de inverno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, M.A.; Anathakrishnan, S.; Coutinho, E.F.; Krishnan, B.A.; Reis, E.M. Azimuthal drift and precipitation of electrons into the south atlantic geomagnetic anomaly during SC magnetic storm. *Journal of Geophysical Research*, 78(25):5830-5838, 1973.
- Abdu, M.A.; Batista, I.S. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian geomagnetic anomaly: evidence for a regular particle ionization source. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 39(6):723-732, 1977.
- Abdu, M.A.; Bittencourt, J.A.; Batista, I.S. Some characteristics of spread F at the magnetic equatorial station Fortaleza. *Journal of Geophysical Research*, 86(A8):6836-6842, 1981a.
- Abdu, M.A.; Batista, I.S.; Piazza, L.R.; Massambani, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the south atlantic anomaly: evidence from VLF phase measurements. *Journal of Geophysical Research*, 86(A9):7533-7542, 1981b.
- Anderson, D.N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-I. *Planetary and Space Science*, 21(3):409-419, Mar. 1973a.
- Anderson, D.N. Theoretical study of the ionospheric F region equatorial anomaly-II. Results in the America and Asian sectors. *Planetary and Space Science*, 21 (3):421-442, Mar. 1973b.
- Bailey, G.J. The effect of a meridional $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift on the thermal plasma at $L = 1.4$. *Planetary and Space Science*, 31(4):389-409, 1983.

- 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* **8**(3):171-190, Mar. 1990.
- Bailey, G.J, Sellek, R.; Rippeth, Y. A modelling study of the equatorial topside ionosphere, *Annales Geophysicae*, **11**(4):263-272, 1993.
- Bailey, G.J.; Balan, N.; Su, Y.Z.; The Sheffield University ionosphere-plasmasphere model - A review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. [in press], 1996.
- Balan, N.; Bailey, G.J. Equatorial plasma fountain and its effects: possibility of an additional layer, *Journal of Geophysical Research*, **100**(A11):21421-21432, Nov. 1995.
- Balan, N.; Bailey, G.J. Modelling studies of equatorial plasma fountain and equatorial anomaly. *Advances in Space Research*, **18**(3):107-116, 1996.
- Banks P.M; Kockarts, G. *Aeronomy*. New York, Academic Press, 1973.
- Batista, I.S. *Precipitação de partículas e efeitos ionosféricos associados na região da anomalia geomagnética brasileira*. (Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial e da Atmosfera) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Dez. 1975. 108 p. (INPE-800-TPT/020).
- Batista, I.S. *Dinamo da região F equatorial: assimetrias sazonais e longitudinais no setor americano*. (Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Jan. 1986. 169 p. (INPE-3760-TDL/206).

- Batista, I.S.; Abdu, M.A.; Bittencourt, J.A. Equatorial F region vertical plasma drifts: seasonal and longitudinal asymmetries in the american sector. *Journal of Geophysical Research*, 91(A11):12055-12064, Nov. 1986.
- Batista, I. S.; Medeiros, R.T.; Abdu, M.A.; Souza, J.R.; Bailey, G.J.; De Paula, E.R. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region, *Journal of Geophysical Research*, 101(A5):10887-10892, May 1996.
- Bittencourt, J.A. *Determination of tropical F-region winds from atomic oxygen airglow emissions*. (Doctoral Thesis) - The University of Texas, Texas, May 1975.
- Bittencourt, J.A.; Tinsley, B.A. Tropical F-region winds from OI1356- \AA and OI 6300- \AA emissions 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 81(22):3781-3785, Aug. 1976.
- Bittencourt, J.A.; Abdu, M.A. A Theoretical comparison between apparent and real vertical ionization drift velocities in the equatorial F region. *Journal of Geophysical Research*, 86(A4):2451-2454, Apr. 1981.
- Bittencourt, J.A. The low latitude ionosphere: a dynamic computer model. - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Jul. 1996. 214 p. (INPE-5965-RPQ/674).
- Bonelli E. A self-consistent numerical model for the ionospheric dynamo. *Revista Brasileira de Geofisica*, 13(3):263-270. 1995.
- Brown, L.D.; Daniell, R.E.; Jr.; Fox, M.W.; Klobuchar, J.A.; Doherty, P.H.. Evaluation of six ionospheric models as predictors of total electron content. *Radio Science*, 26(4):1007-1015, July-Aug. 1991.

- Chan, H.F.; Walker, G.O. Computer simulations of the ionospheric equatorial anomaly in East Asia for equinoctial, solar minimum conditions. Part I-formulation of model. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 46 (12):1103-1112, Dec. 1984.
- Chiu, Y.T. An improved phenomenological model of ionospheric density. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37(12):1563-1570, Dec. 1975.
- De Paula, E.R. *Resposta da região F ionosférica às tempestades magnéticas em baixas latitudes no Brasil*. (Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Fev. 1987. 210 p. (INPE-4106-TDL/259).
- Farley, D.T. A theory of electrostatic fields in the ionosphere at nonpolar geomagnetic latitudes. *Journal of Geophysical Research*, 65(3):869-877, Mar. 1960.
- Farley, D.T.; Bonelli E.; Fejer, B.G.; Larsen, M.F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 91(A12):13723-13728, Dec. 1986.
- Fejer, B. G.; De Paula, E. R.; González, S. A.; Woodman, R. F. Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca, *Journal of Geophysical Research*. 96(A8):13901-13906, August 1991.
- Fuller-Rowell, T.J.; Rees, O.; Quegan, S.; Moffett, R.J.; Bailey, G.J. Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model. *Journal of Geophysical Research*, 92(A7):7744-7748, July 1987.

- Ghielmetti ,H.S.; Becerra, N.S.; Gordell, A.M.; Heredie, M.; Roederer, J.G.
Enhancement of X-ray intensity at balloon altitudes in the south american anomaly.
Physical Review letters. 12(14):388-390, Mar. 1964.
- Hanson, W.B.; Moffett, R.J. Ionization transport effects in the equatorial F region.
Journal of Geophysical Research, 71(23):5559-5572, Dec. 1966.
- Hedin, A.E. MSIS-86 thermospheric model. *Journal of Geophysical Research*,
92:(A5):4649-4662, May 1987.
- Hedin, A.E.; Biondi, M.A.; Hernandez, R.G.; Johnson, R.M.; Killeen, T.L.; Mazaudier,
C.; Meriwether, J.W.; Salah, J.E.; Sica, R.J.; Smith, R.W.; Spencer, N.W.;
Wickwar, V.B.; Viridi, T.S. Revised global model of thermosphere winds using
satellite and ground-based observations. *Journal of Geophysical Research*,
96:(A5):7657-7688, May 1991.
- Heelis, R.A.; Kendall, P.C.; Moffet, R.J.; Windle, D.W.; Rishbeth, H. Electrical
coupling of the E and F regions and its effects on F region drifts and winds. *Planetary
and Space Science*, 25(5):743-756, May 1974.
- Kelley, M.C. *The earth's ionosphere*. , New York, Academic Press, 1989.
- Kendall, P.C. Geomagnetic control of diffusion in the F2-region of the ionosphere-I.
The form of the diffusion operator. *Journal of Atmospheric and Terrestrial
Physics*, 24:805-811, 1962.
- Mann, G.L.; Bloom, S.D.; Jr., H.I.W. The electron spectrum from 90 to 1200 keV as
observed on discoverer satellites 29 and 31. In: Proceedings of the third international
space science symposium. *Space Research 3*. Washington, 2-8 May 1962.
Amsterdam, North-Holland Publishing, 1963, p. 447-462.

Medeiros, R.T. *Eletrodinâmica da ionosfera equatorial: ventos termosféricos meridionais deduzidos de sondagens ionosféricas*. (Tese de Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Ago. 1995. 173 p. ('in Press').

Piggot, W.R.; Rawer, K. *U.R.S.I. handbook of ionogram interpretation and reduction*. Asheville, NC, U. S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration Environmental Data Service, July 1978.

Quegan, S.; Bailey, G.J.; Moffett, R.J. Diffusion coefficients for three major ions in the topside ionosphere. *Planetary and Space Science*, 29(8):851-867, 1981.

Raitt, W.J.; Shunk, R.W.; Banks, P.M. A comparison of the temperature and density structure in high and low speed thermal proton flow. *Planetary and Space Science*, 23:1103-1117, 1975.

Rees, M.H. Auroral ionization by incident energetic electrons. *Planetary and Space Science*. 11(4):1209-1218, 1963.

Rishbeth, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial F-region. *Planetary and Space Science*, 19(3):357-369, 1971.

Rishbeth, H. Thermospheric winds and the F-region: a review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 34:1-47, 1972.

Roble, R.G.; Ridley, E.C.; Dickinson, R.E. On the global mean structure of the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, 92(A8):8745-8758, Aug. 1987.

- Sahai, Y.; Takahashi, H.; Fagundes, P.R.; Clemesha, B.R.; Teixeira, N.R.; Bittencourt, J.A. Observations of thermospheric neutral winds at 23°S. *Planetary and Space Science*, 40(6):767-773, Jun. 1992.
- Salah, J.E. Interim standard for the ion-neutral atomic oxygen collision frequency. *Geophysics Research Letters*, 20(15):1543-1546, Aug. 1993.
- Sojka, J.J.; Schunk, R.W. A theoretical study of the global F region for June solstice, solar maximum and low magnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 90(A6):5285-5298, June 1985.
- Souza, J.R. *Técnicas de medidas e modelagem do conteúdo eletrônico total ionosférico*. (Monografia Referente ao Exame Integrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, Set. 1993. 50 p. (INPE-5557-PUD/062).
- 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*, 4(11):1005-1023, Nov. 1969.
- Titheridge, J. E. Ionogram analysis with generalized program POLAN, report UAG-93, *World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics*, NOAA, Boulder, CO, 80303, 1985.
- Titheridge, J. E. Winds in the ionosphere-A review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57:(14):1681-1714, Feb. 1995.
- Tobiska, W.K. Revised solar extreme ultraviolet flux model. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53:(11/12):1005-1018, Apr. 1991.

- Torr, D.G.; Torr, M.R. Chemistry of the thermosphere and ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 41:797-839. 1979.
- Walker, G.O.; Chan, H.F. Computer simulations of the seasonal variations of the ionospheric equatorial anomaly in East Asia under solar minimum conditions. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 51(11/12):953-974, Nov.-Dec. 1989.
- Watanabe, S.; Oyama, K.-I.; Abdu, M.A. Computer simulation of electron and ion densities and temperatures in the equatorial F region and comparison with Hinotori results. *Journal of Geophysical Research*, 100(A8):14581-14590. Aug. 1995.
- Wells, G.D. *A time-dependent model for the low-latitude ionosphere*. (Master Thesis) - Utah State University, Utah, May 1988.
- Young, E.R.; Torr, D.G.; Richards, P.G.; Nagy, A.F. A computer simulation of the midlatitude plasmasphere and ionosphere. *Planetary and Space Science*, 28(8):881-893, Aug. 1980.