

# ESTUDO DA IONOSFERA EM BAIXAS LATITUDES ATRAVÉS DO MODELO COMPUTACIONAL LION E COMPARAÇÃO COM PARÂMETROS IONOSFÉRICOS OBSERVADOS

**Valdir Gil Pillat<sup>1</sup>, Paulo Roberto Fagundes<sup>1</sup>, José Augusto Bittencourt<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Univap, Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, [valdirgp@yahoo.com.br](mailto:valdirgp@yahoo.com.br)

<sup>2</sup> Orientador, INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758, Jd. da Granja, São José dos Campos, SP, 12201-970

**RESUMO** - Observações ionosféricas realizadas com ionossondas do tipo CADI, em São José dos Campos (23.2°S, 45.9°W; dip latitude 17.6°S) e em Palmas (10.2°S, 48.2°W; dip latitude 5.7°S), em condições de atividade solar máxima e mínima, são apresentadas e comparadas com resultados obtidos pelo modelo computacional Low-Latitude Ionosphere Model, denominado modelo LION, que simula o comportamento dinâmico da ionosfera em baixas latitudes. Detalhes sobre as comparações das observações ionosféricas com os resultados do modelo são discutidos.

**Palavras-chave:** ionosfera, simulação numérica, ionograma, modelo computacional.

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra

## INTRODUÇÃO

A ionosfera é o resultado da interação da ionização eletromagnética solar e radiação corpuscular com os constituintes atmosféricos neutros, envolvendo a produção íon-elétron, mecanismo de produção e perda e os processos de transporte. Os símbolos D, E, F1 e F2 são usados para distinguir as regiões ionosféricas em termos de altitude, que basicamente se diferenciam nos processos físicos e químicos dominantes em cada camada.

Em baixas latitudes a principal fonte de ionização é a radiação eletromagnética na faixa de UV, EUV e raios-X, diferentemente das altas latitudes onde a radiação eletromagnética e as partículas energéticas, provenientes do vento solar, estão também envolvidas nos processos de ionização.

O constituinte neutro majoritário acima de 250 km é o oxigênio atômico e radiações com comprimento de onda menores que 91,1 nm são suficientemente energéticas para fornecer os 13,6eV requeridos para a formação do par oxigênio atômico (O<sup>+</sup>) e elétron livre. Assim, o íon O<sup>+</sup> torna-se o mais importante na camada F (BITTENCOURT, 1996).

No entanto, a ionização produzida em uma determinada região da ionosfera pode ser transportada para outras regiões ou removida através de reações químicas do tipo recombinação elétron-íon (principal processo) e recombinação íons negativos-íons positivos (processo secundário).

Nas regiões D, E e F1, existe uma condição de equilíbrio fotoquímico durante o dia, de tal modo que a produção de pares elétrons-íons por fotoionização e a perda por recombinação são

compensadas. Vale ressaltar que os processos de transporte desempenham um papel secundário nestas regiões ionosféricas. Já na região F2, os processos envolvendo recombinações são menos eficazes que nas regiões D, E e F1 e assim o transporte do plasma por difusão, arraste e processos eletrodinâmicos assume um papel mais importante. O máximo de densidade eletrônica ocorrerá em alturas onde os processos de recombinação e difusão estão em equilíbrio. Os principais mecanismos de transporte na região F são:

- Deriva do plasma eletromagnético ( $\vec{E} \times \vec{B}$ ), com o transporte da ionização perpendicularmente às linhas de campo magnético;
- Difusão do plasma ao longo das linhas de campo magnético;
- Ventos neutros termosféricos, que arrastam a ionização na direção da componente do vento ao longo da linha de campo.

A deriva de plasma na direção vertical, causada por um campo elétrico leste-oeste, causa um processo conhecido como efeito fonte. A combinação desta deriva eletromagnética com difusão do plasma ao longo das linhas de campo, esta última devido à gravidade e gradiente de pressão, resulta numa remoção do plasma das regiões equatoriais e uma conseqüente deposição do mesmo em baixas latitudes. Desta forma, forma-se uma região ao redor de  $\pm 15^\circ$  (norte-sul) em relação ao equador magnético com uma densidade de plasma maior que a normalmente esperada. Esta distribuição de ionização na região tropical é conhecida como anomalia ionosférica equatorial (AIE) ou anomalia de Appleton. As características da anomalia ionosférica equatorial

dependem da longitude, hora local, estação do ano e período de ciclo solar.

Um outro processo é o transporte de plasma pela ação dos ventos neutros termosféricos. A colisão entre os íons e os constituintes neutros arrasta o plasma ao longo das linhas de campo magnético, na direção da componente do vento ao longo das linhas de campo, produzindo um transporte inter-hemisférico do plasma ionosférico e causando uma assimetria na anomalia ionosférica equatorial. Dado um vento termosférico inter-hemisférico, por exemplo, soprando do hemisfério norte para o sul, o arraste provocado pelo vento vai deslocar o plasma do hemisfério norte para o sul. No entanto, como o plasma tende a seguir as linhas de campo, então no hemisfério norte o plasma será deslocado para cima e no hemisfério sul para baixo. Este processo resulta em uma distribuição assimétrica de densidade de plasma e altura do pico da camada F para cada um dos máximos de ionização ao redor de  $\pm 15^\circ$  do equador magnético. Em baixas latitudes os processos de transportes dependem da geometria das linhas de campo magnético de uma determinada região. As variações longitudinais da declinação magnética e da separação latitudinal entre o equador geográfico e geomagnético têm papel importante nos efeitos da deriva e do vento no plasma ionosférico. Conhecendo estes efeitos foi proposto alterar o modelo computacional "LION Model" desenvolvido em Fortran, por J. A. Bittencourt, e reescrito por V. G. Pillat, em Visual Basic, para facilitar a interface entre o modelo e o pesquisador. Com esta atualização ficou o modelo

ficou mais versátil para a escolha dos parâmetros de entrada e para selecionar o tipo de saída

## MATERIAIS E MÉTODOS

No modelo LION, a evolução temporal e a distribuição espacial da densidade e velocidades das partículas ionosféricas são calculadas por um conjunto de equações dependente do tempo, acopladas a um sistema de equações não-lineares da continuidade e momentum para os íons  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $N_2^+$  e  $N^+$ , levando em conta a fotoionização das espécies atmosféricas, pela radiação solar extrema ultravioleta, as reações químicas e iônicas de produção e perda, e os processos de transporte do plasma, incluindo os efeitos ionosféricos do vento neutro termosférico, a difusão do plasma e a deriva do plasma eletromagnético. O campo magnético da Terra é representado por um dipolo magnético inclinado e centrado. Esta configuração de acoplamento das equações não-lineares é resolvida ao longo de uma dada linha de campo em um quadro de referência movendo verticalmente, no plano do meridiano magnético, com a velocidade da deriva do plasma eletromagnético. Os resultados do modelo reproduzem adequadamente as principais características e o comportamento dinâmico da ionosfera em baixas latitudes sobre condições magnéticas calmas, para atividade solar máxima e mínima. Detalhes da comparação das observações ionosféricas, com os resultados do modelo são apresentados e discutidos.

O fluxograma apresentado na Figura 1 mostra de maneira compacta as principais características do modelo LION e os resultados gerados por ele.

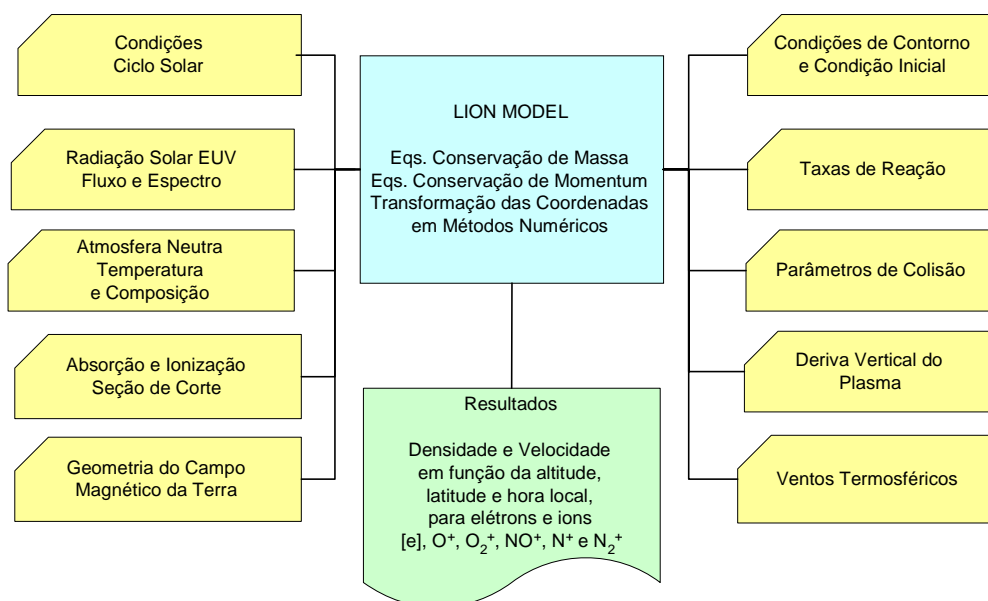


Figura 1. Fluxograma mostrando como o modelo LION utiliza as equações de conservação e os parâmetros de entrada. FONTE: PILLAT, 2006

O programa computacional “LION Model” possui uma interface gráfica que facilita a escolha dos parâmetros de entrada. Conforme mostra a Figura 2.

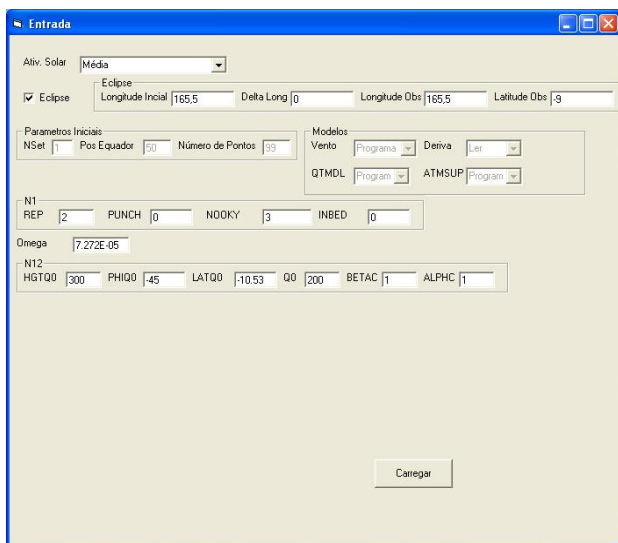


Figura 2 – Interface gráfica para entrada de dados para gerar a saída do modelo

## RESULTADOS

As principais saídas do LION são às densidades eletrônicas e iônicas na ionosfera, geradas a partir dos parâmetros inseridos para o fluxo EUV solar, atmosfera neutra, deriva eletromagnética e vento termosférico.

Os resultados mostrados neste trabalho foram gerados de um arquivo de deriva com 30 linhas de campo, espaçamento de 30 km entre duas linhas de campo adjacentes, altitude inicial de 140 km, para um período de atividade solar máxima, verão hemisfério sul (dezembro) e no setor longitudinal brasileiro. A Figura 3 ilustra a distribuição eletrônica às 14:00 (hora local). No eixo vertical mostra-se a variação com a altitude, e, no eixo horizontal, a variação com a latitude (coordenadas magnéticas). Através da Figura 3 é possível ver a formação de dois máximos de densidade eletrônica situados ao norte e ao sul do equador magnético, entre as latitudes de 15°S - 5°S e de 5°N - 15°N, e entre as altitudes de 300 - 450 km. Estas regiões de maior concentração são conhecidas como anomalia ionosférica equatorial ou anomalia de Appleton. Este fenômeno ocorre durante todo o dia, é intensificado logo após o pôr do sol e decai durante a noite, sendo fortemente dependente da atividade solar e estação do ano.

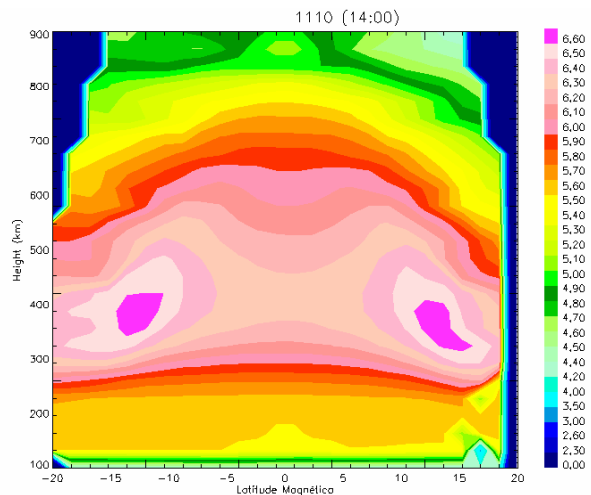


Figura 3 – Exemplo da variação da densidade eletrônica em função da latitude magnética e altitude para as 14:00 horas (hora local), atividade solar máxima e no solstício de dezembro (verão hemisfério sul).

Para validar os resultados do modelo LION foram comparados com dados observados e com o modelo IRI, modelo empírico. Foi implementada uma nova interface que permite reunir 10 ionogramas (10 dias consecutivos), assim comparar o comportamento médio observado para um determinado mês com o resultado do modelo LION em um horário e latitude geomagnética fixas. Nesta comparação a densidade eletrônica calculada pelo modelo LION é convertida em frequência utilizando a relação  $N_e = 1,24 \times 10^4 f^2$ .

Na Figura 4 são mostradas as comparações para atividade solar máxima e mínima para alguns horários, com intervalo de tempo de 6 em 6 horas, e as observações realizadas em Palmas (Latitude Magnética -0.32).

Esta comparação apresentou uma boa concordância com a tendência média das observações. No entanto, alguma discrepância na frequência crítica (foF2) e na altura do pico da camada são notadas.

Nota-se que as 00:00 LT, na atividade solar mínima, a frequência crítica (foF2) foi subestimada com relação às observações.

A Figura 5 para o período de equinócio (maio de 2002 para a atividade solar máxima e abril de 2004 para atividade solar mínima) mostra que os resultados do modelo LION apresentam uma concordância relativamente boa com os resultados do modelo IRI. No entanto, algumas discrepâncias na frequência crítica (foF2) e na altura do pico da camada são notadas.

Nota-se que na atividade solar máxima (12:00 LT e 18:00 LT) e na atividade solar mínima (12:00 LT, 18:00 LT e 00:00 LT) a frequência crítica (foF2) é superestimada com relação ao IRI.

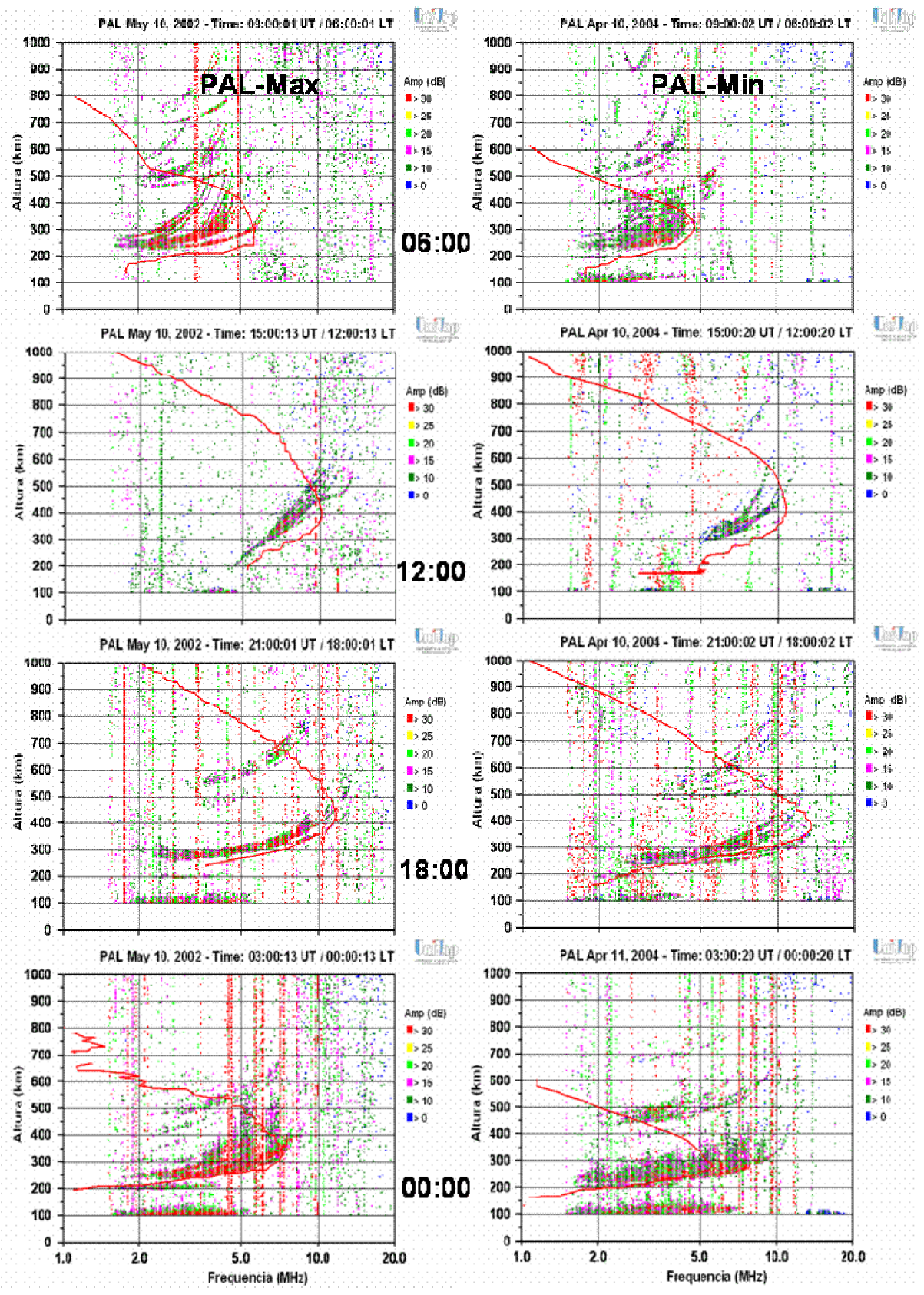
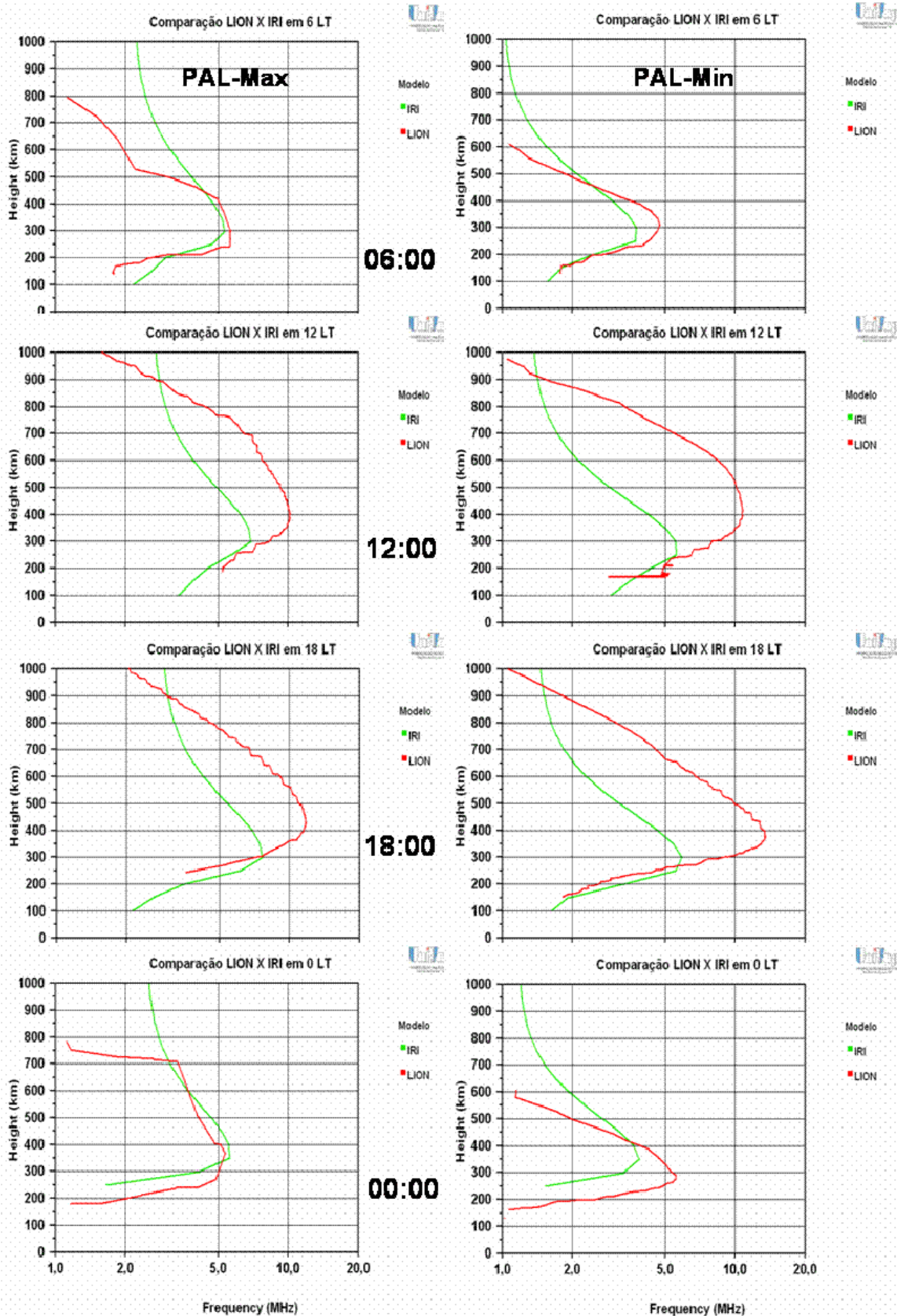


Figura 4 – Exemplo da comparação entre os resultados do modelo LION (linha contínua vermelha) e as observações, no período do equinócio, em Palmas.



**Figura 5** – Exemplo da comparação entre os resultados do modelo LION (vermelho) e os resultados do modelo empírico IRI (verde), no período do equinócio, em Palmas.

(19

Comparando os resultados do modelo LION e do modelo IRI com as observações realizadas em Palmas conclui-se que o modelo LION simula com mais precisão os efeitos ocorridos na ionosfera para esta região, segundo Batista, et al

96) o modelo IRI não está considerando o efeito fonte correto para o setor brasileiro. E por isso os resultados do IRI possuem algumas diferenças com relação às observações realizadas. No entanto, Bittencourt e Chryssafidis (1994)

comparando os dados de Fortaleza (região equatorial) com o modelo IRI para atividade solar máxima, 1979 e 1980, indica que para os meses de junho e setembro o modelo subestima a densidade eletrônica observada. E para atividade solar mínima, 1986, o modelo IRI em geral superestima a densidade eletrônica observada. Estas discrepâncias surgem devidas aos fortes efeitos dinâmicos do plasma ionosférico associados com a anomalia equatorial que provavelmente o modelo IRI não consegue simular de maneira adequada.

## DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho é realizar estudos sobre o comportamento dinâmico da ionosfera tropical através do modelo computacional LION ("Low-latitude Ionospheric Model"), que simula o comportamento dinâmico da ionosfera em baixas latitudes. No modelo LION, a evolução temporal e a distribuição espacial das densidades e velocidades das várias espécies ionosféricas são calculadas por solução numérica do sistema de equações acopladas não-lineares dependentes do tempo (equação da continuidade e equação de conservação de momentum) para os íons  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $N_2^+$  e  $N^+$ , levando em conta fotoionização das espécies atmosféricas pela radiação solar na faixa do extremo ultravioleta, as reações químicas e iônicas de produção e perda, e os processos de transporte do plasma, incluindo os efeitos ionosféricos do vento neutro termosférico, difusão de plasma e a deriva eletromagnética do plasma.

As comparações realizadas entre os resultados do modelo LION e as observações realizadas em Palmas ilustram o potencial do modelo LION. Os resultados do modelo LION apresentam uma concordância relativamente boa com as observações. No entanto, algumas discrepâncias foram notadas, principalmente durante a madrugada. Provavelmente as discrepâncias foram causadas devido à escolha de parâmetros de entrada que representam um comportamento médio da ionosfera para determinada atividade solar, estação do ano e setor longitudinal, e não valores diários (fluxo solar, deriva vertical de plasma, velocidade do vento neutro, declinação magnética e atmosfera neutra). Vale a pena ressaltar que medidas diretas de deriva vertical e de ventos termosféricos para a região em observação devem contribuir para o aprimoramento dos resultados do modelo LION. Para este trabalho os dados da deriva de plasma e dos ventos termosféricos utilizados foram obtidos em Jicamarca ( $12^\circ S$ ) e como Palmas ( $10^\circ S$ ).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BATISTA, I.S.; ABDU, M.A.; DE MEDEIROS, R.T.; DE PAULA, E.R. Comparison Between IRI Predictions and Digisonde Measurements at Low Latitude Station. *Adv. Space. Res.*, v.18, n.6, p.49-52, 1996.

BITTENCOURT, J. A. The Low Latitude Ionosphere: A Dynamic Computer Model, INPE-5965-RPQ/674, São José dos Campos, 1996.

BITTENCOURT, J. A.; CHRYSSEAFIDIS, M. On the IRI model predictions for the low-latitude ionosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 56, n.8, p. 995-1009, 1994

PILLAT, V. G. Estudo da Ionosfera em Baixas Latitudes através do Modelo Computacional Lion e Comparação com Parâmetros Ionosféricos Observados. 2006. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, 2006.