



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

**INPE-13981-PRE/9156**

**ESTUDO DA ABSORÇÃO MAGNETOHIDRODINÂMICA DE  
ONDAS ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO F USANDO TÉCNICAS  
ÓTICAS E DE RÁDIO**

Ezequiel Dionísio Vieira Filho\*

\* ISE, bolsista CNPq

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/ CNPq/INPE), orientado pelo  
Dr. Alexandre Álvares Pimenta.

INPE  
São José dos Campos  
2006

INPE-13981-PRC/9156



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DA ABSORÇÃO MAGNETOHIDRODINÂMICA DE ONDAS  
ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO F USANDO TÉCNICAS ÓTICAS E DE RADIO**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Ezequiel Dionísio Vieira Filho (ISE, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [dionisio@laser.inpe.br](mailto:dionisio@laser.inpe.br)

Dr. Alexandre Alvares Pimenta (DAE/CEA/INPE, Orientador)  
E-mail: [pimenta@laser.inpe.br](mailto:pimenta@laser.inpe.br)

Junho de 2006

*"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável (...) para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do Espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer."*

ALBERT EINSTEIN



*Aos meus pais,  
Ezequiel Dionísio Vieira e  
Natalina Antonio Mariano e amigo  
César Luis Guirão Cruz*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que me apoiaram e me ajudaram a vencer mais esta etapa da minha vida.

Ao orientador Dr. Alexandre Alvares Pimenta pelos conhecimentos compartilhados, pela orientação e apoio na realização deste projeto e por acreditar na minha capacidade de fazê-lo.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico) pelo auxílio financeiro de um ano de bolsa.

Ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela oportunidade e utilização de suas instalações.

Aos funcionários do laboratório LASER pelo acolhimento e companheirismo ao longo deste ano.

Aos professores e amigos da ISE (Instituto Superior de Ensino) pelo apoio, pelo companheirismo e pelos conhecimentos compartilhados que foram muito úteis e aproveitados na realização deste projeto.

Aos meus pais Natalina Mariano Vieira e Ezequiel Dionísio Vieira, ao meu querido amigo César Luis Guirão Cruz e a toda minha família pelo amor, carinho, compreensão e apoio que foram fundamentais para a realização deste projeto que antes era um sonho: trabalhar na área de Exatas utilizando o que eu sempre quis e gosto de estudar: Matemática.

Muito obrigado!



## RESUMO

No início da iniciação científica foram realizadas leituras de artigos, livros e pesquisa sobre o assunto de dados de imageadores e tratamento de imagens all-sky. Através deste, obtive conhecimentos de composição e estrutura química da alta atmosfera terrestre. Foram usados programas de tratamento de imagens como o IDL, esses dados foram armazenados e expostos em gráficos para uma melhor visualização e entendimento.

Em uma primeira etapa foram digitalizadas as imagens (as imagens atualmente estão registradas em filmes de 35 mm) obtidas com um imageador tipo all-sky que operou em Cachoeira Paulista durante o período de março de 1987 a novembro de 2000 (aproximadamente 13 anos de dados). Paralelamente a digitalização das imagens, estou fazendo um estudo estatístico da frequência de ocorrência dessas ondas atmosféricas na região F assim como a direção preferencial de propagação. Em uma segunda etapa foi feito um estudo (evidentemente seguindo as orientações) da absorção magnetohidrodinâmica dessas ondas de forma a esclarecer qual dos efeitos no mecanismo de absorção dessas ondas são mais importantes, isto é, o efeito da densidade eletrônica ou a direção de propagação das ondas. Em uma etapa futura faremos um estudo para linearizar essas imagens de forma a extrairmos parâmetros quantitativos das imagens.

Foram realizadas digitalizações de imagens all-sky para dias específicos onde observou-se estruturas de ondas na região F da ionosfera com características parecidas a ondas tipo "bore" observadas na mesosfera. Esse estudo inicial será mostrado no evento Pibic que acontecerá agora em julho de 2006 no INPE. O grupo possui toda infra-estrutura necessária para a realização das tarefas mencionadas acima.



**First observations of thermospheric bore events using all-sky OI 630 nm emission images in the Brazilian tropical sector**

**ABSTRACT**

Using ground-based measurements we investigate the unusual observations of moving dark wide-band structures in the OI 630 nm nightglow emission all-sky images, possibly associated with thermospheric bore events, that occurred in the Brazilian tropical region. On the nights of August 30-31, 1995, July 19, 1998 and July 13, 1999, the all-sky imaging observations of the OI 630 nm emission carried out at Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W, magnetic declination 20°W), Brazil, showed dark band structures, stretched across the entire imager, propagating from southeast to northwest. These dark patches moved with average speed of about 250 m/s at an altitude of 220-300 km, which is the typical altitude range of the OI 630.0 nm airglow emission. Also, ionosonde observations, available for two of the events, registered abrupt increases in both the F-layer peak height ( $h_pF_2$ ) and base height ( $h'F$ ) on July 19, 1998 and July 13, 1999, when the low intensity band passed over Cachoeira Paulista. This behavior is related with thermospheric bore events, which pushes the F-layer plasma to higher altitudes along the geomagnetic field lines, thus causing the 630 nm airglow intensity reduction. It should be pointed out that these thermospheric events are not related to geomagnetic disturbed conditions. In this paper we present, for the first time, events of thermospheric bore and the effects of the ionization on its propagation in the nighttime ionosphere.



## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS.....  | 13 |
| LISTA DE TABELAS.....  | 15 |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....   | 17 |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....  | 19 |
| <br>   |    |
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....   | 21 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 2 - .....   | 23 |
| 2.1- Instrumentação e análise de dados.....  | 23 |
| 2.2- O imageador all-sky.....  | 23 |
| 2.3- A ionossonda.....   | 30 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA<br>ATMOSFÉRICA DA REGIÃO F..... | 35 |
| 3.1- As principais emissão de luminescência atmosférica de região F .....          | 35 |
| 3.2- A linha vermelha OI 630,0 nm.....   | 37 |
| 3.3 – O Mecanismo de Recombinação Dissociativa.....                                | 38 |
| 3.4- A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm.....                   | 40 |
| 3.5- Observação.....   |    |
| <br>   |    |
| CAPITULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....   | 47 |
| <br>   |    |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....  | 49 |
| <br>   |    |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS   |    |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| 2.1- Imageador all-sky com câmara fotografica                | 25 |
| 2.2- Diagrama em bloco do imageador all-sky com câmara CCD   | 28 |
| 2.3- característica dos filtros                              | 29 |
| 2.4- Esquema de um Ionograma                                 | 32 |
| 3.1- Espectro de luminescência atmosférica noturna da reg. F | 37 |
| 3.2- Cachoeira Paulista 19 de julho de 1998                  | 43 |
| 3.3- Cachoeira Paulista 19 de julho de 1998                  | 44 |
| 3.4- Cachoeira Paulista, 13 de julho de 1999                 | 45 |
| 3.5- Cachoeira Paulista (22,7° S, 45° O, dec.mag 20° O)      | 46 |
| 3.6- Cachoeira Paulista, 30-31 de agosto de 1995             | 46 |



## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| 2.1- Características dos filtros e alturas médias das camadas do airglow na região F | 28 |
| 2.2- Parâmetros contidos no ionograma e suas respectivas nomenclaturas               | 33 |
| 3.1- Principais emissão da luminescência atmosférica noturna na região F             | 36 |
| 4.1- G (EM CM <sup>-1</sup> )  | 47 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $A_D$  - Coeficiente de radiação
- $A_j$  - Coeficiente de transição de Einstein em um nível j
- $B$  - Vetor campo magnético terrestre
- $D/Dt$  - Operador derivada total ou substantiva
- $d_D$  - Coeficiente de desativação colisional
- $E$  - Vetor campo elétrico
- $g$  - Vetor aceleração da gravidade
- $J_{630,0}$  - A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm
- $k_Q$  - Coeficiente de reação (quenching)
- $M$  - Massa do íon
- $n$  - Denota a densidade de plasma
- $n(O_2)$  - Densidade numérica do oxigênio molecular
- $n(e)$  - Densidade numérica de elétrons
- $n(N_2)$  - Densidade numérica do nitrogênio molecular
- $\alpha_D$  - Coeficiente de reação (produção)
- $\alpha_1$  - Coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$
- $\alpha_2$  - Coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $NO^+$
- $\frac{\partial}{\partial q}$  - Derivada parcial
- $\gamma_1$  - Coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $O_2^+$
- $\gamma_2$  - Coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $NO^+$
- $\varepsilon_\lambda(z)$  - Fótons emitidos por unidade de volume por segundo
- $\varepsilon_{630,0}(z)$  - Taxa de emissão volumétrica do OI 630,0 nm



## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

- GPS - Global Positioning System
- VHF - Very high frequency
- CCD - Couple charge device
- DN - Digital number
- Vzp - Deriva vertical de plasma



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Nesses últimos 30 anos, a pesquisa sobre ondas de gravidade tem explorado aspectos como identificação das prováveis fontes, direção preferencial de propagação, tipos de ondas (canalizadas, propagantes, evanescentes) e difusão de momento e energia. Adicionalmente, a propagação de ondas de gravidade na ionosfera tem sido investigado por diversos pesquisadores durante períodos de atividade magnética calma e perturbada (Hines, 1960a, Sobral et al., 1997; Boska et al., 2003). O conhecimento sobre ondas de gravidade teve uma considerável evolução a partir do advento dos foguetes de sondagem e de métodos indiretos para a medida dos ventos na alta atmosfera nos anos 50. Observou-se que estes apresentavam características bastantes diferentes que na baixa atmosfera. O perfil vertical do vento na alta mesosfera e baixa termosfera apresentava altos valores e enormes variações com a altura. Hines, em uma série de artigos (por exemplo: Hines, C.O., 1959) explicou que na realidade esses ventos poderiam ser explicados como sendo provenientes de uma soma de modos de propagação de ondas internas de gravidade que ocorrem num fluido devido às forças inerciais, gravidade e gradiente de pressão. Hines (1972) sugeriu que o transporte de momento pelas ondas de gravidade poderia afetar a circulação média na atmosfera. Lindzen (1981) mostrou os aspectos das interações de ondas de gravidade com o fluxo médio, sugerindo que ondas de gravidade com escalas horizontais de ~ 1000 km eram responsáveis pela transferência de momento para a atmosfera superior. Seguindo os estudos de Lindzen (1981), outros pesquisadores propuseram novas hipóteses para explicar a quebra de ondas de gravidade e conseqüentemente o depósito de energia e momento na atmosfera. Weinstock (1985) sugeriu que processos de interação onda-onda poderiam explicar o mecanismo de quebra de ondas de gravidade.

Com o advento de novas técnicas de observações de ondas de gravidade na mesosfera e termosfera, o conhecimento sobre estas ondas sofreu um considerável avanço. Algumas destas técnicas são as seguintes: **a)** radares MF (Vincent e Fritts, 1987) que medem ventos entre 60 e 100 km.; **b)** radares de espalhamento incoerente capazes de realizar observações na baixa termosfera (Oliver et al., 1997).; **c)** os radares de laser que são

capazes de medir densidades e temperaturas na região MLT (Clemesha, 1995).: **d)** Instrumentos óticos dos tipos: fotômetro (Takahashi et al., 1974; Buriti, 1997; Sobral et al., 1997) e imageadores tipo All-Sky (Garcia e Taylor; Batista et al., 2000; Medeiros et al., 2003). Por outro lado, ondas atmosféricas na região F da ionosfera durante períodos de atividade magnética calma ainda requerem investigações relativo a processos de absorção. Esse estudo visa esclarecer o efeito da densidade eletrônica e direção de propagação dessas ondas no processo de dissipação dessas ondas.

## **CAPÍTULO 2**

### **2.1- INSTRUMENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS**

A nossa fonte principal de dados para o estudo da dinâmica das ondas atmosféricas da região F foram obtidas com imageadores tipo all-sky. A emissão de luminescência atmosférica usada para esse estudo foi o OI 630,0 nm. Através da emissão OI 630,0 nm, foi possível estudar a dinâmica e a morfologia das ondas atmosféricas na base da região F. Os imageadores all-sky realizam medidas de maior alcance espacial (quando comparado com medidas de foguetes, digissonda e fotômetros) possibilitando-nos observar grandes áreas horizontais (aproximadamente, 15° de latitude/longitude a partir do zênite para o caso do OI 630,0 nm, assumindo a altura da camada de emissão em torno de 250 km).

Dados complementares obtidos com uma digissonda também foram utilizados nesse estudo. Uma das vantagens das digissondas frente aos equipamentos ópticos (caso dos imageadores all-sky e fotômetros) é a sua capacidade de operar ininterruptamente durante longos períodos, produzindo longas séries temporais de dados.

### **2.2 O IMAGEADOR ALL-SKY**

O primeiro sistema de imageamento all-sky foi originalmente projetado e entrou em operação em Janeiro de 1975 (Mende e Eather, 1976) com o propósito de investigar as emissões com origem na região auroral. Weber et. al (1978) usando um equipamento similar, realizou uma série de vôos sobre a costa oeste da América do Sul, afim de estudar as irregularidades no plasma da região F equatorial e os seus respectivos efeitos nos sinais transmitidos por satélites. Já as primeiras observações feita com o sistema de

imageamento all-sky em solo na região equatorial foi realizada por Mendillo et. al (1982) em uma campanha na ilha Ascension (7,95° S, 14,38° W).

Uma das primeiras versões dos imageadores all-sky é mostrado na figura 2.1. Como podemos observar, a parte superior do imageador é constituída por uma lente denominada “all-sky” onde a mesma proporciona um campo de visão de 180°, obtendo dessa forma, uma imagem completa do céu local. Porém, esse tipo de lente introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens para pequenos ângulos de elevação (nas bordas da lente). A “lente de campo” garante que toda “luz” vinda da lente all-sky incida na lente colimadora. Esse sistema óptico utiliza ainda um filtro de 4 polegadas de diâmetro com largura de faixa de 1,35 nm, centrada no comprimento de onda de 630 nm. Filtros de interferência com banda estreita (bastante seletivo) se fazem necessário pois as intensidades de determinadas linhas do espectro eletromagnético de luminescência atmosférica noturna, tais como OI 630,0 nm e OI 777,4 nm, possuem intensidades relativamente baixas. Como na região equatorial o conteúdo eletrônico é ainda mais baixo, devido a anomalia equatorial, um intensificador de imagem foi acrescentado ao sistema de forma a amplificar a intensidade da emissão. O registro das imagens monocromáticas são feitas por uma câmara convencional (filmes de 35mm) em intervalos de 20 minutos e tempo de exposição de 32 segundos.

Através de um programa de colaboração científico entre o grupo de luminescência atmosférica do INPE e o grupo do Dr. Michael Mendillo da Universidade de Boston, esse imageador foi instalado no observatório do LUME em Cachoeira Paulista (22,7° S, 45° W) em outubro de 1987. Fico operando rotineiramente até agosto de 2000.

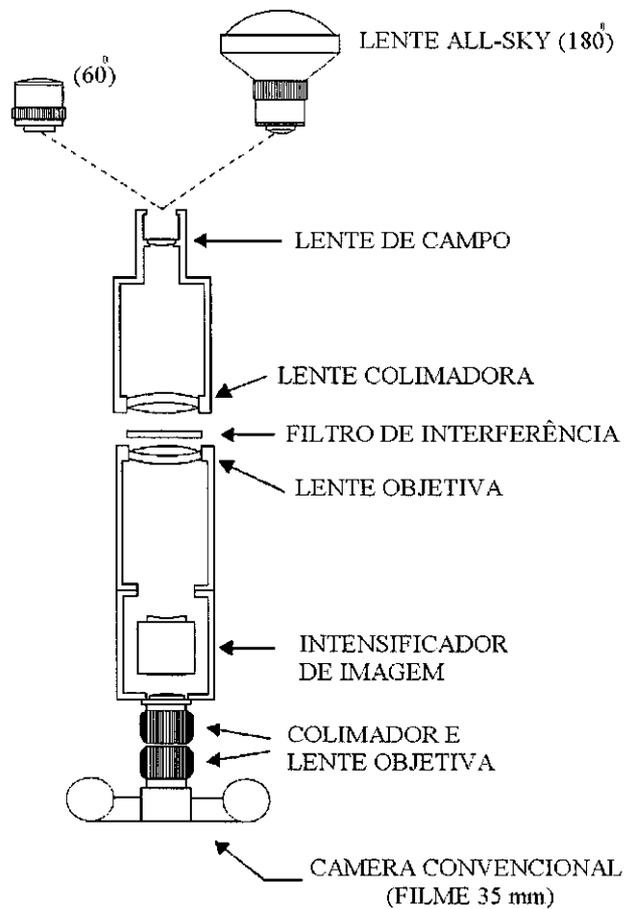


Fig. 2.1 – Imageador all-sky com câmara fotográfica

FONTE: Mendillo et al. (1982)

As últimas gerações de imageadores all-sky são constituídos basicamente por uma lente tipo all-sky, um sistema telecêntrico, uma roda de filtros de interferência, um sistema de reconstrução de imagens, uma câmara CCD (Coupled Charge Device), um sistema de refrigeração e um microcomputador. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram respectivamente o

esquema e foto dos imageadores all-sky CCD atuais que estão sendo usados no estudo da velocidade zonal, comportamento espacial e bifurcações das bolhas de plasma.

Através da lente all-sky, como dito anteriormente, obtemos um campo de visão de 180° do céu noturno. Como nas primeiras gerações de imageadores, esse tipo de lente introduz efeitos de compressão e curvatura nas imagens para pequenos ângulos de elevação. O sistema telecêntrico de lentes torna os feixes perpendiculares a roda de filtro, evitando assim, efeito de deslocamento Doppler na linha de emissão selecionada. Uma das vantagens dos imageadores atuais é a possibilidade da troca de filtro automaticamente e o registro das imagens como arquivos digitais (dispensa o procedimento da digitalização das fotografias como nos primeiros imageadores). A roda de filtros de interferência possui 5 filtros, sendo gerenciada pelo programa de aquisição de dados.

O detetor CCD é uma matriz de dimensões 1024x1024 pixels, tendo área de 6,54 cm<sup>2</sup>. As dimensões da CCD foram agrupadas para 512x512 pixels de forma a melhorar a relação sinal ruído. A resolução da câmara CCD é determinada pela geometria da mesma. Um “pixel” pode variar de poucos micrômetros a 48 μm e área total de 1 a 24 cm<sup>2</sup>. A alta eficiência quântica (~80% no visível), o baixo ruído térmico [(0,5 elétrons/pixel)/s], o baixo ruído de leitura (15 elétrons rms), e a alta linearidade (0,05%) permitem uma excelente capacidade de medidas quantitativas das emissões de aeroluminescência. O sistema de refrigeração reduz a temperatura da câmara CCD, de forma a minimizar o ruído térmico gerado pelos componentes elétricos e eletrônicos da própria câmara. Já o microcomputador é usado no controle da roda de filtros e no processo de aquisição de dados.

Para se conhecer o campo de visão dos imageadores all-sky, é importante considerar a relação entre o ângulo zenital da lente all-sky e a altura da camada de emissão considerada. Pela Figura 3.4, percebe-se que o campo de visão do instrumento corresponde ao setor sudeste e parte do setor sul brasileiro e também a uma área equivalente do oceano atlântico.

Como a maioria dos instrumentos ópticos situados em solo e projetado para medir a aeroluminescência noturna, o imageador CCD all-sky necessita de céu límpido para operar. Essas condições restringem o período de observação a 13 dias por mês centrado na lua nova. Portanto, as condições climática e o ruído de fundo contaminando o espectro eletromagnético (nuvens, a lua e as luzes circunvizinhas ao ponto de observação) são fatores que limitam os instrumentos ópticos nas observações da luminescência atmosférica. Na tabela 2.1 temos as características dos filtros usados nas observações das emissões com origem na região F da ionosfera.

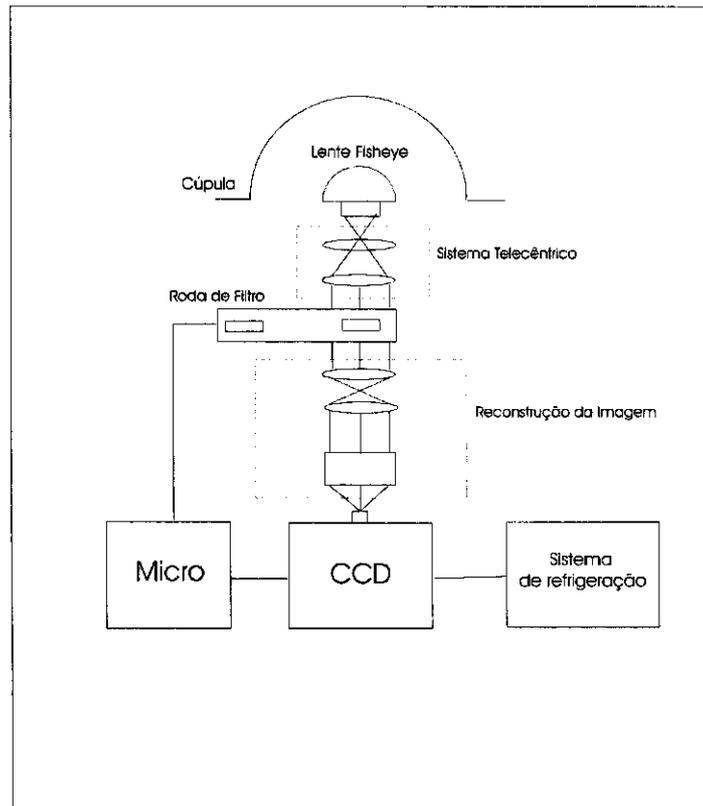


Fig. 2.2 – Diagrama em blocos do imageador “All Sky” com câmara CCD

TABELA 2.1- CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS E ALTURAS MÉDIAS DAS CAMADAS DO AIRGLOW NA REGIÃO F

| Filtro | Comprimento de onda<br>(nm) | Largura de banda<br>(nm) | Altura média da<br>camada (km) |
|--------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| OI     | 630,0                       | ,5                       | 250                            |
| OI     | 557,7                       | 2,65                     | 250                            |
| OI     | 777,4                       | 1,35                     | 350                            |

Cachoeira Paulista (22,7° S, 45° W)

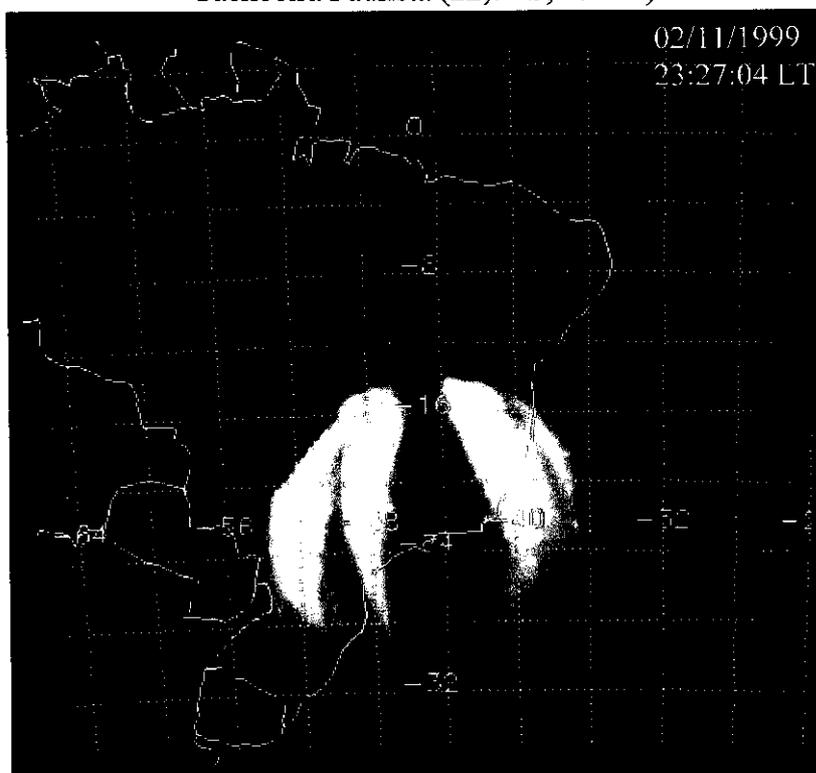


Fig. 2.3 – Campo de visão do imageador all-sky obtida através da emissão OI 630,0 nm, assumindo a altura da camada de emissão em torno de 250 km.

### 2.3 – A IONOSSONDA

A ionossonda é um instrumento bastante representativo para medidas de parâmetros ionosféricos, sendo que desde meados da década de 20, são realizadas medidas dessa natureza. Marconi foi quem fez as primeiras transmissões de sinais com ondas eletromagnética. Em 1901, transmitiu sinais que partiram da Cornuália (Inglaterra) para Terra Nova (Canadá). Através de trabalhos independentes, Kennelly e Heaviside sugeriram a existência de uma camada refletora ionizada, a qual havia possibilitado a transmissão e recepção dos sinais de Marconi, apesar da curvatura da Terra.

A ionossonda é essencialmente um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética verticalmente em relação ao solo, tipicamente entre 1 e 25 MHz. Em geral, como a ionosfera é um meio magnetoionizado, a onda emitida se divide em duas: onda ordinária e onda extraordinária. A onda ordinária é refletida nas alturas onde o índice de refração  $\mu$  é nulo. Isso ocorre quando a frequência da onda é igual a frequência de plasma. Portanto, emitindo-se ondas em frequência diferentes, que serão refletidas em alturas diferentes, pode-se construir o perfil de densidade da ionosfera, visto que a frequência de plasma é dado por:

$$W_N = \left( \frac{N_e e^2}{m \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (2.01)$$

A frequência da onda está relacionada com a densidade do plasma onde a mesma é refletida, através da expressão:

$$N_e = 1,24 \times 10^4 f^2 \quad (2.02)$$

onde  $f$  é a frequência da onda, em MHz, e  $N_e$  é a densidade numérica do plasma, em  $\text{cm}^{-3}$ .

Através desse método, obtemos o perfil de densidade eletrônica até a altura do pico máximo (camada F2). Após o pico máximo, a frequência da onda passa a ser maior que a frequência de plasma, não sendo mais refletida pela ionosfera.

O ionograma é essencialmente um gráfico que mostra a variação da altura de reflexão da onda, chamada altura virtual ( $h'$ ) em função da frequência dessa onda. Através de ionogramas, baseado na teoria de propagação de ondas na ionosfera, podem-se produzir curvas de densidade eletrônica em função da altura. Podem também ser utilizados para estudar a variação dos vários parâmetros ionosféricos, tais como:  $NmF2$ ,  $hmF2$ ,  $h'F$ ,  $h'F2$  e  $fof2$ . A Figura 2.4 apresenta um esquema de um ionograma mostrando o perfil de densidade eletrônico enquanto que a tabela 2.3 descreve a nomenclatura dos parâmetros que podem ser extraídos dos ionogramas.

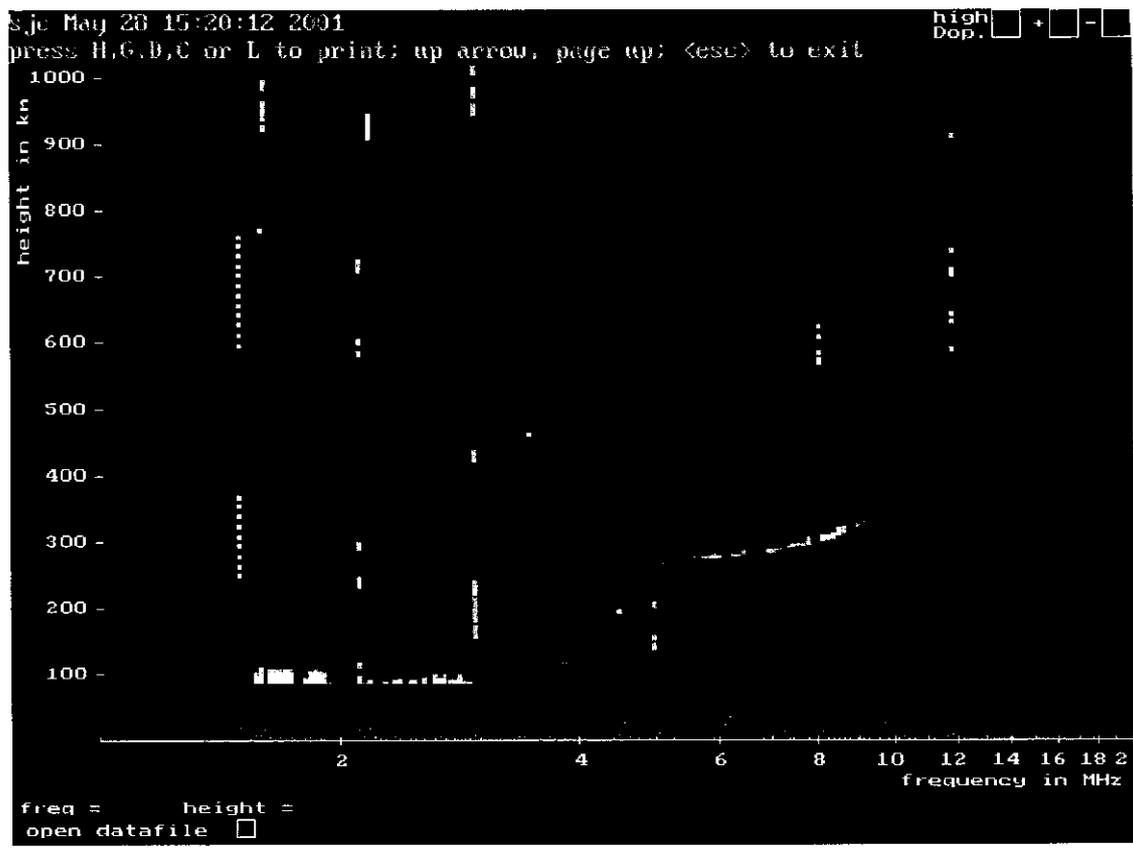


Fig. 2.4 – Esquema de um ionograma.

TABELA 2.3- PARÂMETROS CONTIDOS NO IONOGRAMA E SUAS RESPECTIVAS NOMENCLATURA

|           |  |
|-----------|--|
| $h'E$     | Altura virtual mínima em toda camada E normal.   |
| $h'Es$    | Altura virtual mínima em toda camada Es observada.   |
| $f_{min}$ | A menor frequência na qual o traço do eco foi observado no ionograma.  |
| $foE$     | Frequência crítica da onda ordinária correspondente a camada densa mais inferior na região E que causa descontinuidade na altura do traço E. |
| $fxE$     | Frequência crítica da onda extraordinária correspondente a camada densa mais inferior na região E.   |
| $foEs$    | A máxima frequência da onda ordinária, na qual o traço contínuo da camada Es é observado.  |
| $fxEs$    | A máxima frequência da onda extraordinária, na qual o traço contínuo da camada Es é observado.   |
| $h'F$     | Altura virtual mínima do traço ordinário em toda região F.   |
| $h'F2$    | Altura virtual mínima do traço ordinário da camada estável mais alta da região F.  |
| $foF1$    | Frequência crítica da onda ordinária da camada F1, pouco encontrada nas regiões de baixa latitude.   |
| $fxF1$    | Frequência crítica da onda extraordinária da camada F1.  |
| $foF2$    | Frequência crítica da onda ordinária da camada F2, a camada mais alta na região F.   |
| $fxF2$    | Frequência crítica da onda extraordinária da camada F2.  |



### CAPÍTULO 3

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DA REGIÃO F

### 3.1 As principais Emissões de Luminescência Atmosférica da Região F

A atmosfera superior da Terra é uma fonte permanente de emissões de fótons que são liberados por átomos ou moléculas excitadas acima de seu nível normal de energia. A produção desta luminescência é devida a diversos processos físico-químicos e, em geral, ocorre através da emissão de bandas e linhas espectrais.

Geralmente, temos duas categorias distintas de emissões da atmosfera superior na faixa de altura que varia de 80 km a 600 km, sendo uma delas denominada aurora e a outra luminescência atmosférica ou aeroluminescência ou ainda “airglow”. A aurora é geralmente causada pela excitação dos constituintes termosféricos pelo impacto de partículas energéticas com os átomos e moléculas da atmosfera e ocorre tipicamente em altas latitudes, enquanto que a luminescência atmosférica são emissões usualmente muito mais fracas causadas por reações químicas dos constituintes atmosféricos. Ambas ocorrem tanto do lado diurno quanto do lado noturno da atmosfera superior da Terra. A aurora, devido ao alto brilho visível a olho nu (principalmente durante tempestades geomagnéticas), foi primeiramente observada. Registros históricos revelam observações aurorais na Grécia antiga nos séculos III, IV e V a.c.

O estudo de emissões atmosféricas teve início com os trabalhos de Gassendi em 1621 sobre as primeiras observações sistemáticas de um fenômeno ocorrido no sul da França, que ele denominou “Aurora Boreal”. Mais tarde, Slipher (1919) observou que existiam emissões na atmosfera mesmo quando auroras não podiam ser notadas. Esse fenômeno foi devidamente demonstrado por Dufay (1933) como sendo auto-luminescência atmosférica e, portanto, distinto de auroras. Mesmo assim o nome “aurora não polar” (Rayleigh, 1931) só foi substituído quando Elvey (1950), sob sugestão de Otto Struve, propôs o uso da palavra “airglow”, que em Português é normalmente denominado luminescência atmosférica. Essa denominação vem sendo usada até hoje para indicar a

radiação ótica amorfa continuamente emitida pela atmosfera de um planeta (Chamberlain, 1978).

Portanto, a luminescência atmosférica pode ser definida como uma radiação de natureza eletromagnética, tênue, amorfa e constante, cuja emissão é proveniente de átomos e moléculas excitadas existentes na atmosfera, principalmente nas altitudes entre 80 km e 400 km. A luminescência atmosférica pode ser observada em qualquer latitude e existe em vários comprimentos de onda.

As emissões noturnas de luminescência atmosférica da região F mais estudadas são as emissões do oxigênio atômico OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm. Na tabela 3.1 temos as principais emissões da região F, suas intensidades típicas e comprimentos de onda respectivos, enquanto na Figura 3.1 temos o espectro eletromagnético de luminescência atmosférica ao redor da linha OI 777,4 nm.

TABELA 3.1 – PRINCIPAIS EMISSÕES DA LUMINESCÊNCIA  
ATMOSFÉRICA NOTURNA NA REGIÃO F

| <i>Emissão Atmosférica</i> | <i>Intensidade Típica (R)</i> | <i>Comprimento de onda (nm)</i> | <i>Altura média da camada de emissão (km)</i> |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| <b>OI 557,7 nm</b>         | 60                            | 557,7                           | 250-300                                       |
| <b>OI 630,0 nm</b>         | 300                           | 630,0                           | 250-300                                       |
| <b>OI 777,4 nm</b>         | 20                            | 777,4                           | 300-400                                       |

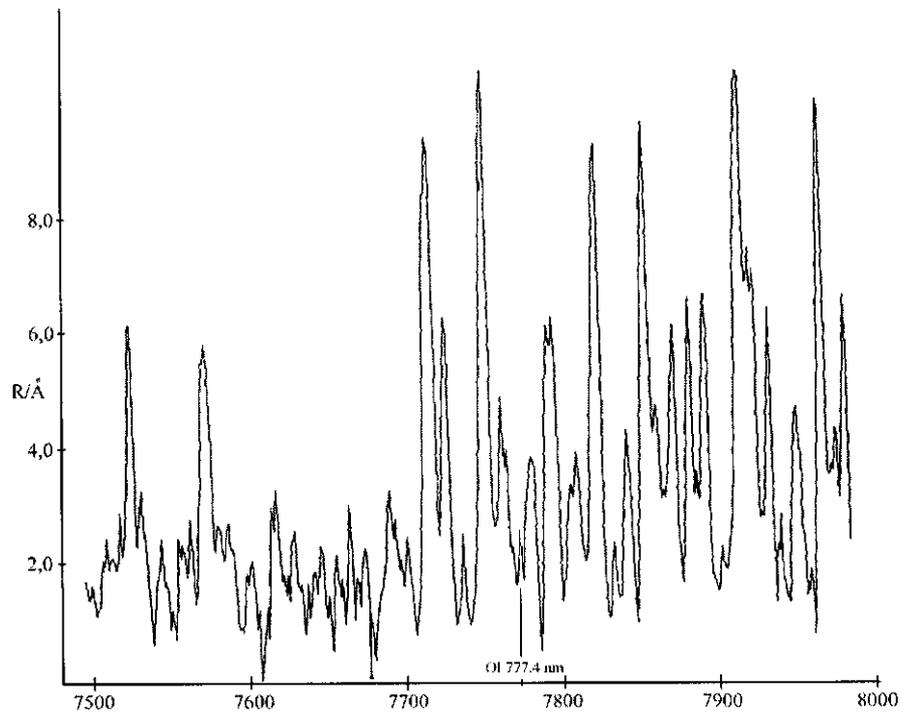


Fig. 3.1 - Espectro de luminescência atmosférica em torno da linha OI 777,4nm.

FONTE: Broadford e Kendall (1968).

### 3.2 A Linha Vermelha OI 630,0 nm

A linha de emissão OI 630,0 nm é a mais utilizada no estudo da dinâmica da região F noturna. Ela provém de uma camada emissora de aproximadamente 50 km de espessura localizada abaixo do pico da região F (aproximadamente uma altura de escala) com sua fonte de emissão entre 240 e 300 km de altitude. A intensidade do OI 630,0 nm aumenta, ou diminui, quando o plasma ionosférico move-se para baixo, ou para cima, respectivamente. Dessa forma, a intensidade da luminescência é mais, ou menos, intensa quando a densidade de elétrons aumenta, ou diminui. Através da linha de emissão OI 630,0 nm, a geração, dinâmica e morfologia das bolhas de plasma têm sido largamente estudadas nos últimos 20 anos, juntamente com técnicas de ondas de rádio.

### 3.3 O Mecanismo de Recombinação Dissociativa

Já está bem estabelecido que o processo de produção do oxigênio atômico excitado  $O(^1D)$  na região F, que leva à geração da linha OI 630,0 nm, é a recombinação dissociativa do íon oxigênio molecular com elétrons. Na reação de recombinação dissociativa

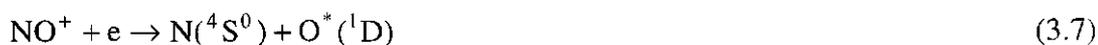


parte da energia da reação é usada para dissociar o íon molecular  $XY^+$  em átomos excitados. A recombinação dissociativa do íon molecular  $O_2^+$  pode produzir os seguintes produtos:



O átomo do oxigênio atômico excitado no nível  $^1D$ , ao decair para o estado fundamental espontaneamente ( $O^*(^1D) \rightarrow O(^3P) + h\nu$  (630,0nm e 636,4nm)), libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética, emitindo linhas discretas nos comprimentos de onda 630,0 nm e 636,4 nm.

Ainda não está bem estabelecido se a recombinação dissociativa do íon  $NO^+$



e



deve ser incluída na teoria da luminescência do OI 630,0 nm.

A taxa de produção do oxigênio excitado, por unidade de volume, devido ao mecanismo de recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$  é

$$\frac{dn(O^*)}{dt} = \alpha_1 n(O_2^+) n(e). \quad (3.9)$$

Por outro lado, a taxa de produção do oxigênio excitado, por unidade de volume, devido ao mecanismo de recombinação dissociativa do íon  $NO^+$  é

$$\frac{dn(O^*)}{dt} = \alpha_2 n(NO^+) n(e) \quad (3.10)$$

onde  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são os coeficientes das reações.

Na região F, durante a noite, o íon molecular,  $O_2^+$ , é produzido através do mecanismo de transferência



A taxa de produção do íon molecular  $O_2^+$ , por unidade de volume, é então dada por

$$\frac{dn(O_2^+)}{dt} = \gamma_1 n(O^+) n(O_2) \quad (3.12)$$

onde  $\gamma_1$  é o coeficiente da reação a uma temperatura de 1000 K. A partir da reação de recombinação dissociativa do  $O_2^+$ , notamos que a intensidade da emissão da linha OI 630,0 nm depende fortemente das concentrações do íon  $O_2^+$  e elétrons.

O íon molecular  $NO^+$  é produzido através da reação



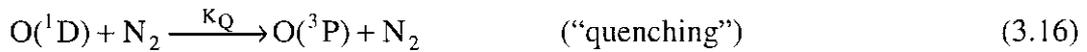
A taxa de produção do íon molecular  $NO^+$ , por unidade de volume, é

$$\frac{dn(NO^+)}{dt} = \gamma_2 n(O^+) n(N_2) \quad (3.14)$$

onde  $\gamma_2$  é o coeficiente da reação a uma temperatura de 1000 K.

A deriva vertical  $\mathbf{ExB}$  observada na região F, após o pôr-do-sol, influencia significativamente a intensidade da emissão OI 630,0 nm. Um movimento de plasma para cima, diminui a concentração do  $O_2^+$ , conseqüentemente diminuindo a concentração do oxigênio atômico excitado no nível  $^1D$ , e, diminuindo assim, a intensidade da emissão OI 630,0 nm. Já um movimento de deriva vertical para baixo, aumenta a intensidade da emissão do OI 630,0 nm.

O tempo de vida do oxigênio excitado no nível  $^1D$  é  $\leq 110$  segundos (Peterson et al. 1966), podendo ser desativado durante este período por colisões (“quenching”), sem a emissão de fótons. Os principais constituintes atmosféricos envolvidos na desativação do  $O(^1D)$  são as moléculas neutras  $O_2$  e  $N_2$ . Assim sendo, as reações do OI 630,0 nm envolvidas no processo são



onde  $\alpha_D$ ,  $k_Q$  e  $A_D$  representam os coeficientes das reações.

### 3.4 A Taxa de Emissão Volumétrica Integrada do OI 630,0 nm

A taxa de emissão volumétrica  $\varepsilon_\lambda(z)$  (fótons emitidos por unidade de volume por segundo) de uma linha, tendo comprimento de onda  $\lambda$ , em um nível  $j$ , é dado pelo produto do coeficiente de transição de Einstein,  $A_j$ , e a densidade numérica  $n(j)$  dos átomos no nível  $j$

$$\varepsilon_\lambda(z) = A_\lambda n(j). \quad (3.19)$$

A taxa de emissão volumétrica integrada, na direção vertical, em Rayleighs, é então dada por:

$$J_{\lambda} = 10^{-6} \cdot A_{\lambda} \int_0^{\infty} n(j) dz \quad (3.20)$$

A densidade numérica  $n(^1D)$ , pode ser determinada, resolvendo-se a equação da continuidade para a “população” do oxigênio excitado no nível  $^1D$ , sendo dada por

$$n(^1D) = \frac{k_D}{A_D} \frac{I}{(1 + d_D/A_D)} \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}} \quad (3.21)$$

onde

$\gamma_1$  é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $O_2^+$ ,

$\gamma_2$  é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $NO^+$ ,

$n(O_2)$  é a densidade numérica do oxigênio molecular,

$n(e)$  é a densidade numérica de elétrons,

$n(N_2)$  é a densidade numérica do nitrogênio molecular,

$\alpha_1$  é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$ ,

$\alpha_2$  é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $NO^+$ ,

$d_D$  é o coeficiente de desativação colisional.

Para obtermos a taxa de emissão volumétrica para a transição  $^1D_2 \rightarrow ^3P_2$ , que emite a linha OI 630,0 nm, temos que multiplicar a densidade numérica  $n(^1D)$ , dada na eq. (3.21), pelo coeficiente de transição de Einstein,  $A_{630,0}$ . Portanto, a taxa de emissão volumétrica do OI 630,0 nm devido a recombinação dissociativa dos íons  $O_2^+$  e  $NO^+$  é

$$\varepsilon_{630,0}(z) = A_{630,0} \cdot n(^1D). \quad (3.22)$$

A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm, na vertical, em Rayleighs, é dada por

$$J_{630,0} = 10^{-6} \int \varepsilon_{630,0}(z) \cdot dz \quad (3.23) \text{ ou}$$

$$J_{630,0} = 10^{-6} \cdot 0,76 \int \frac{I}{(1 + d_D/A_D)} k_D \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{\left(1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}\right)} dz \quad (3.24)$$

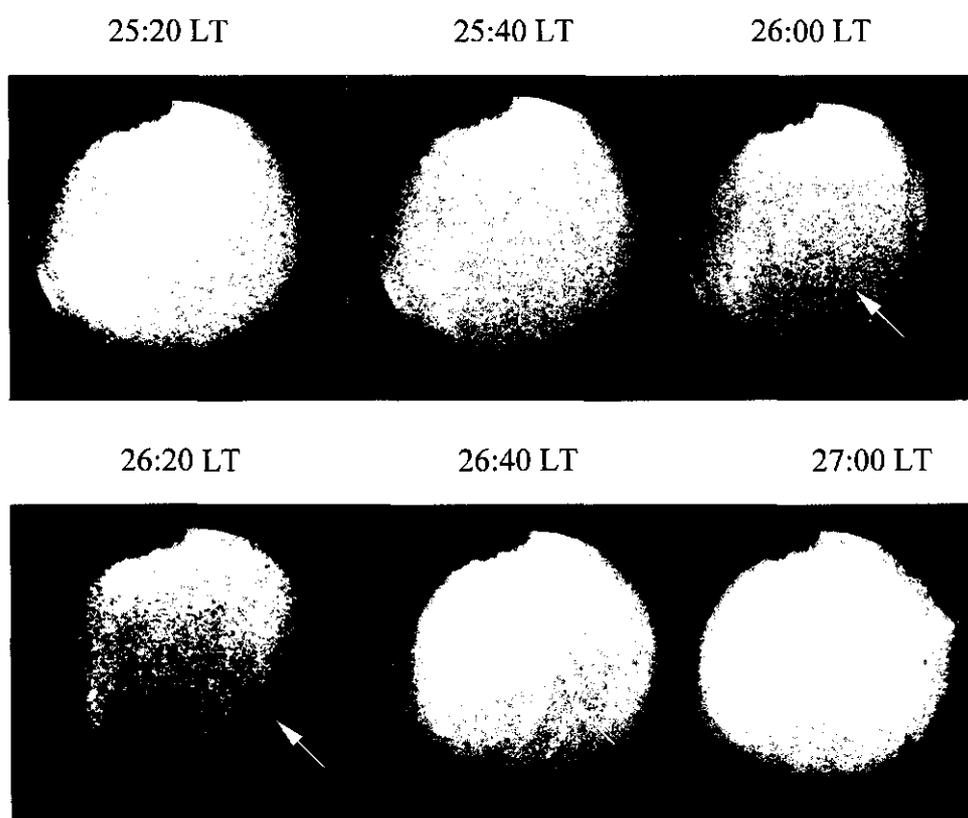
onde

$$A_{630,0}/A_D = 0,76 \text{ e } k_D = 0,2, \quad (\text{Peterson e Vanzandt, 1969}).$$

### 3.5 - Observação

A figura 3.6 mostra um exemplo de imagem All-sky obtida na noite de 19/07/1998, onde o mesmo exibe estrutura de ondas observados na região F da ionosfera através da linha de emissão OI 630,0 nm. Tais estruturas propagam-se de sudeste para noroeste com velocidade média de cerca de 240 m/s em uma altitude entre 200 e 300 km. Por volta das 26:40LT a estrutura de onda com semelhanças de um “bore” se dissipa dando origem a uma estrutura com periodicidade com comprimento de onda de N500 K que logo em seguida se dissipa também. Por outro lado, um ionossonda instalado no mesmo sítio, por volta dos 26:30 LT as 27:30 LT registrou um abrupto aumento no parâmetro  $f_0F_2$  (densidade eletrônica) onde tanto a base da ionosfera quanto a altura do pico desceram para uma faixa de altura entre 200 e 300 km

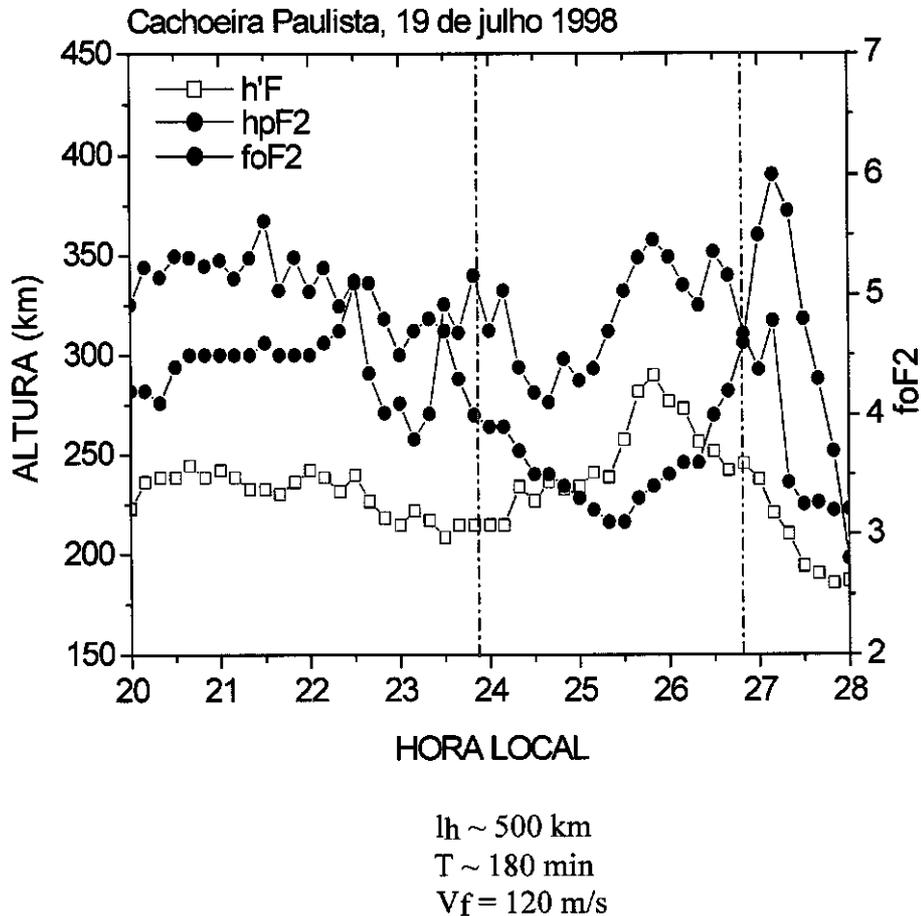
**FIGURA 3.6 Cachoeira Paulista, 19 de julho de 1998**



Contraste entre claro-escuro nas imagens varia significativamente. Manifestação da densidade eletrônica. Estruturas de onda se dissipam

Na figura 3.7, temos que  $h'F$  e  $hpF_2$  mostram um pico (período de cerca de 270 minutos por volta dos 26:00LT. Essa subida da ionosfera coincide com a passagem da estrutura de onda sobre Cachoeira Paulista (ver figura 3.6) as 26:40LT. A descida  $hpF_2$  mostra uma superposição de ondas com um período menor entre 26:30LT a 27:20 LT. Esse período é de cerca de 40 minutos).

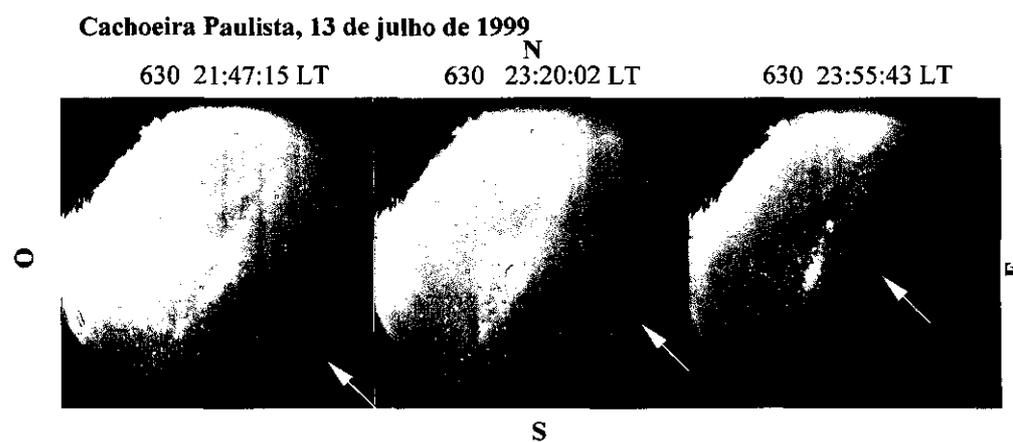
FIGURA .3.7



A figura 3.8 mostra outra seqüência de imagem All-sky obtida em 13/07/1999, das 21:47 LT as 23:55 LT. Neste exemplo, a estrutura de onda possivelmente associada a uma “bore” termosférica se propaga de sudeste para noroeste com velocidade média de 250 m/s e passa sobre Cachoeira Paulista as 23:55 LT. Observações obtidas com a ionossonda (ver figura 3.9) registrou um abrupto aumento tanto em h'F quanto em hpF2 quando a estrutura de onda passou sobre a zênite Cachoeira Paulista.

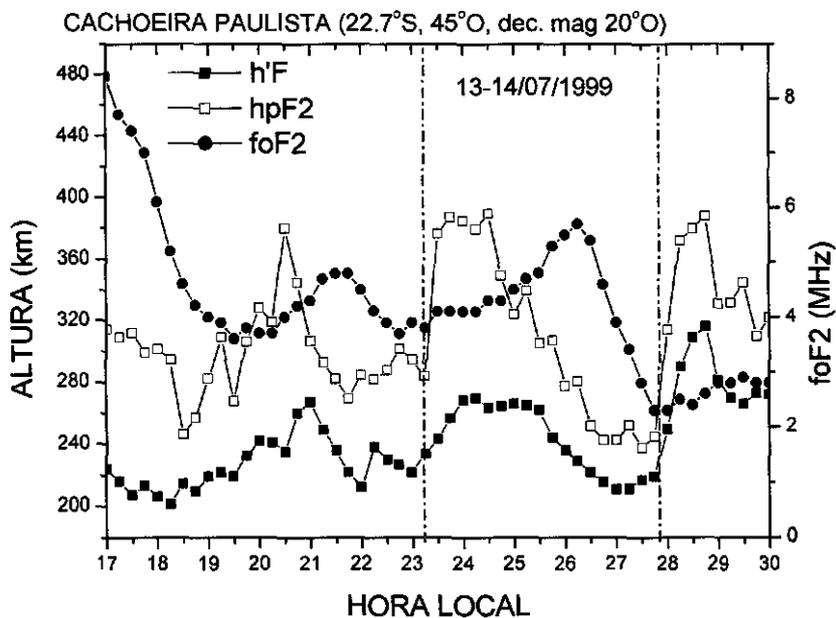
Na noite de 30-31/08/1995 (Figura 3.10) temos um excelente exemplo de uma estrutura de onda possivelmente relacionada com uma “bore” termosférica. As 25:00 LT é possível ver a passagem de tal estrutura através de todo o campo de visão do imageador.

**FIGURA 3.8**

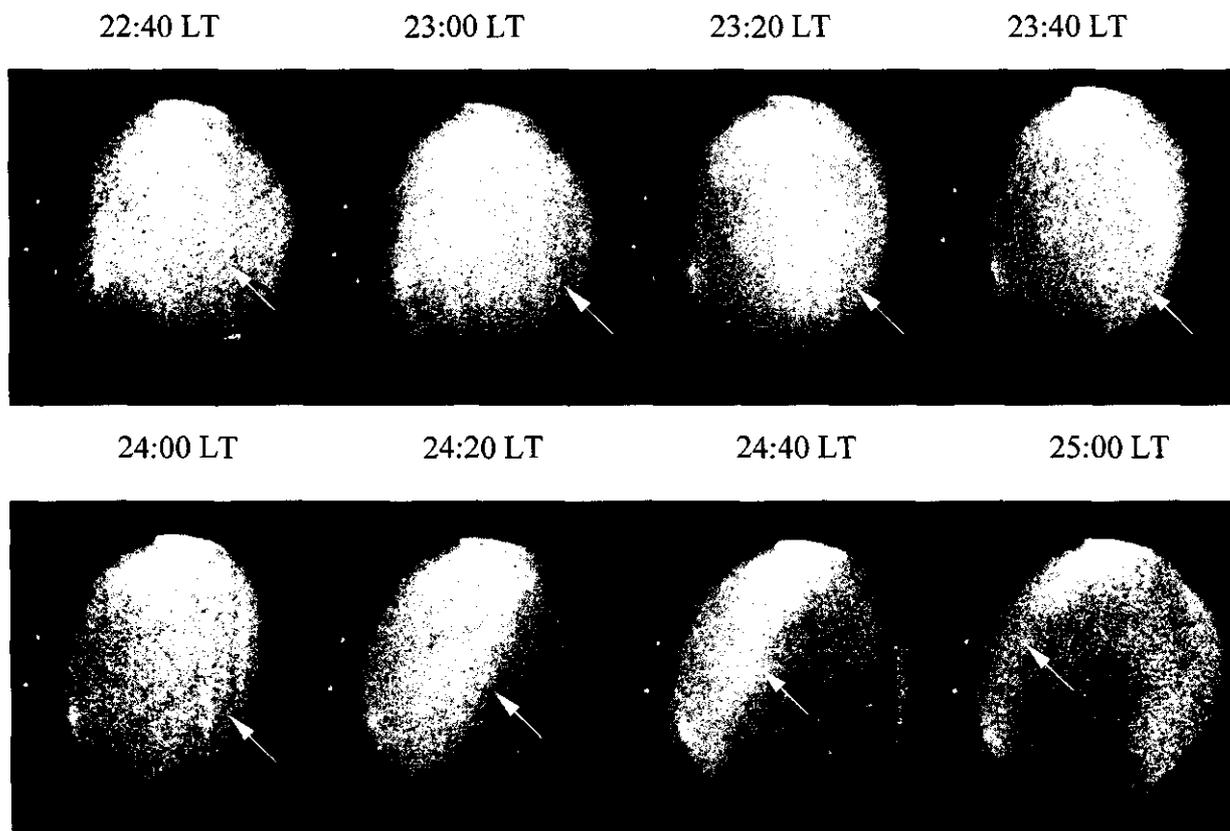


Nós estimamos o comprimento de onda horizontal dessa estrutura de onda como tendo Th 3400 km e período de 3,5 horas. Infelizmente não temos dados de ionosonda para essa noite.

**FIGURA 3.9**



**FIGURA 3.10** Cachoeira Paulista, 30-31 de agosto de 1995



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um bom parâmetro para explicarmos a absorção magnetohidrodinâmica de ondas atmosféricas na região F é através do índice de absorção  $R_x$  que pode ser expresso como

$$R_x = G \left[ 1 + k_x^2 / k_z^2 - (\cos \alpha - \cos \gamma / k_z)^2 \right] \quad (4.1)$$

onde

$$G = \frac{N_e M \nu_{im} k_x}{N_m M_m \omega} \quad (4.2)$$

e  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$  e  $\cos \gamma$  são projeções sobre os eixos x, y, e z do vetor unitário **B**. Nesse sistema cartesiano, x aponta para norte, y para leste e z para cima.  $N_e$  é a densidade eletrônica,  $M$  é a massa do íon,  $\nu_{im}$  é a frequência de colisão entre íons e constituintes neutros,  $\omega$  é a frequência angular da onda,  $K_x$  e  $K_z$  é o número de onda horizontal e vertical, respectivamente.  $M_m$  é a massa molecular e  $N_m$  é a concentração molecular.

Na equação 4.1 estimamos o valor de  $G$ , que é independente da orientação do campo magnético **B**. A tabela 5.1 fornece os valores de  $G$  (em  $\text{cm}^{-1}$ ) para as altitudes de 220 km, 250 km e 300 km. Nessas estimativas usamos a velocidade de fase da onda medida, isto é  $V_p = \omega / K_x = 250$  m/s, a frequência de colisão para cada altura especificada anteriormente  $\nu_{im}$  e a concentração de elétrons obtidos com a ionosonda.

TABELA 4.1

**G (EM CM<sup>-1</sup>)**

| Altitude (Km) | Vp=250M/s             |
|---------------|-----------------------|
| 220           | 3.3 x10 <sup>-9</sup> |
| 250           | 7.0x10 <sup>-9</sup>  |
| 300           | 3.2x10 <sup>-8</sup>  |

Por outro lado a fator dentro dos colchetes na equação 4.1 depende da direção de propagação relativamente a **B**. Nós podemos comparar os valores de  $R_x$  para uma onda que se propaga na direção norte-sul e leste-oeste. Se nós assumimos que a direção de propagação é paralela a direção x, isto é, ao longo dos meridianos magnéticos, temos que  $\cos\beta=0$ . Então a partir da equação 5.1 temos:

$$(R_x)_m = G(\sin\alpha - K_x \cos\alpha / K_z)^2 \quad (4.3)$$

e para ondas se propagando na direção leste-oeste,  $\cos\alpha=0$ , onde obtemos

$$(R_x)_n = G(1 + K_x^2 \sin^2 \gamma / K_z^2) \quad (4.4)$$

Titheridge (1973) mostrou que onde sob condições onde

$$\omega^2 / K_x^2 C_o^2 \ll 1, \text{ teremos } K_x \ll K_z$$

Então para pequenos  $\alpha$ , temos

$$(R_x)_m = GK_n^2 / K_z^2$$

e para valores grande de  $\alpha$ , temos

$$(R_x)_m = G \sin^2 \alpha$$

Fica evidente então que

$$(R_x)_m \ll (R_x)_n$$

Dessa forma, a absorção de ondas deve ser mínimo na direção norte-sul.

Esse raciocínio feito anteriormente explica porque as ondas na região F da ionosfera são freqüentemente observadas propagando-se ao longo dos meridianos magnéticos.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÃO**

- 1- As observações de ondas na região F da ionosfera, possivelmente associados a “bore” termosféricos moveram-se de sudeste para noroeste com velocidade média de 250 m/s.
- 2- Essas observações não estão associadas a períodos com tempestades magnéticas.
- 3- As estimativas do índice  $R_x$  mostrou que o aumento da absorção esta relacionada principalmente com o aumento na concentração de elétrons.
- 4- Através da tabela 5.1 fica evidente que a absorção será máximo próximo do pico da região F.
- 5- Estruturas de ondas que se propagam abaixo do pico da região F devem alcançar maiores distancias.
- 6- A absorção das ondas deve ser menor na direção norte-sul.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chamberlain, J.W. **Theory of planetary atmospheres**. New York: Academic Press, 1978.

Clemesha, B.R., Sporadic neutral metal layers in the mesosphere and lower thermosphere, **J. Atmosph. Terr. Phys.**, 57, 725-736, 1995.

Elvey, C.T. Note on the spectrum of the airglow in the red region. **Astrophysics Journal**, v.111, p. 432-433, 1950.

Fritts D.C. and Dunkerton T.J., Fluxes of heat and constituents due to convectively instable gravity waves, **J. Atmos. Sci.**, 42,549-556,1985.

Mende, S.B.; Eather, R.H. Monochromatic all-sky observations and auroral precipitation patterns. **Journal of Geophysical Research**, v.81, no.22, p.3771, 1976.

Mendillo, M.; Baumgardner, J. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v.87, no. A9, p. 7641-7647, 1982.

Peterson, V.I; Steiger, W.R. F-region nightglow emissions of atomic oxygen. **Journal of Geophysical Research**, v.71, no.9, p. 2267-2277, 1966.

Rayleigh, IV LORD. Absolute intensity of the aurora line in the night sky and the number of atomic transitions. **Proc. Roy. Soc.**, v.A, no.131, p. 376-381, 1931.

Slipher, V.W. On the general auroral illumination of the sky and the wavelength of the chief aurora line. **Astrophysics Journal**, v.49, no.7, p. 266-275, 1919.

Slipher, V.W. On the general auroral illumination of the sky and the wavelength of the chief aurora line. **Astrophysics Journal**, v.49, no.7, p. 266-275, 1919.

Sobral, J.H.A.; Abdu, M.A.; Sahai, Y. Equatorial plasma bubble eastward velocity characteristics from scanning airglow photometer measurements over Cachoeira

Paulista. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v.47, no. 8-10, p. 895-900, 1985.

Titheridge, J.E. Theory of moving ionospheric disturbances, **Journal of Geophysical Research**, 656-660, 1973

Tsunoda, R.T. Control of the seasonal and Longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated E region Pedersen conductivity. **Journal of Geophysical Research**, v.90, no. A1, p. 447-456, 1985.

Weber, E.J.; Buchau, J.; Eather, R.H.; Mende, S.B. North-south aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research**, v.83, no. A2, p. 712-716, 1978.