



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.15.17.28-TDI

**ESTUDO DE OCORRÊNCIA DE BANDAS CLARAS  
UTILIZANDO LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DA  
REGIÃO F DE BAIXAS LATITUDES EM FUNÇÃO DO  
CICLO SOLAR**

Cristiano Sarzi Machado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 31 de agosto de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A9FAMS>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

### **Presidente:**

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

### **Membros:**

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

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

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

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

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

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

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

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

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

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

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

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



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.15.17.28-TDI

**ESTUDO DE OCORRÊNCIA DE BANDAS CLARAS  
UTILIZANDO LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DA  
REGIÃO F DE BAIXAS LATITUDES EM FUNÇÃO DO  
CICLO SOLAR**

Cristiano Sarzi Machado

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 31 de agosto de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A9FAMS>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

M113e Machado, Cristiano Sarzi.  
Estudo de ocorrência de bandas claras utilizando luminescência atmosférica da região F de baixas latitudes em função do ciclo solar / Cristiano Sarzi Machado. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxii+113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.15.17.28-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Alexandre Alvares Pimenta, e Nelson Jorge Schuch.

1. Bandas Claras. 2. Emissões de luminescência atmosférica. 3. Sistema de imageamento all-sky. 4. Máximo de Temperatura à Meia-Noite. 5. Acoplamento termosfera-ionosfera. I.Título.

CDU 551.510

---

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

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

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

Dra. Inez Staciarini Batista



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Alícia Luiza Clúa de Gonzalez Alarcon



Vice-Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Alexandre Alvares Pimenta



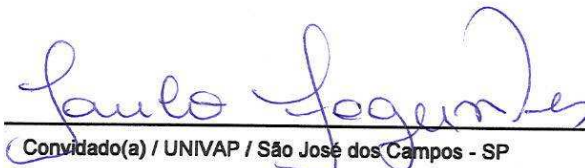
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Nelson Jorge Schuch



Orientador(a) / CRS/INPE / Santa Maria - RS

Dr. Paulo Roberto Fagundes



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

Dr. Yogeshwar Sahai



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

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): Cristiano Sarzi Machado

São José dos Campos, 30 de agosto de 2011



“Mesmo sem naus e sem rumos,  
mesmo sem vagas e areias,  
há sempre um copo de mar  
para um homem navegar.”

Jorge de Lima





## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Dr. Alexandre Alvares Pimenta, pelos ensinamentos e auxílios, pela confiança e dedicação dispensados na orientação deste estudo.

Ao meu orientador, Dr. Nelson Jorge Schuch, pelo constante apoio, pelo incentivo e principalmente pelo conhecimento e princípios compartilhados.

Aos membros da banca examinadora, pelas críticas e contribuições para o aprimoramento do estudo.

À Dra. Inez Staciari Batista, pela concessão dos dados de ionossonda e ao Dr. Delano Gobbi, pela concessão dos dados de fotômetro. Ao Dr. Michael Mendillo da Universidade de Boston, EUA pela doação ao INPE do sistema de imageamento *all-sky* que gerou as imagens utilizadas no estudo e ao Dr. Yogeshwar Sahai, por seu empenho na obtenção das imagens e pela concessão das mesmas para este estudo.

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da Bolsa de Pesquisa.

Agradeço aos meus grandes amigos pelo amparo, incentivo e excepcional companheirismo ao longo dessa jornada.

Agradeço, enfim, a minha família por todo o amor, compreensão e apoio incondicional que incessantemente recebi.



## RESUMO

O Máximo de Temperatura à Meia-noite (MTM) consiste no aumento da temperatura da alta atmosfera que ocorre no período noturno (próximo da meia-noite local) em baixas latitudes. Este fenômeno é acompanhado de um aumento da pressão responsável por reduzir ou mesmo reverter a velocidade de propagação dos ventos neutros meridionais, que normalmente sopram em direção ao equador. A reversão da direção de propagação do vento neutro é responsável por mover a região F ionosférica para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético, até altitudes onde o plasma se recombina dissociativamente, produzindo a emissão da luminescência OI 630,0 nm, que é a assinatura ótica do MTM. Esta assinatura é denominada de Banda Clara.

Utilizando dados de um imageador *all-sky*, instalado em Cachoeira Paulista (22,7°S; 45° O), monitorando a emissão OI 630,0 nm, é investigada a frequência de ocorrência das Bandas Claras em relação ao ciclo solar, meses do ano e nível de atividade geomagnética. Quatro casos particulares do fenômeno de Bandas Claras são analisados empregando imagens *all-sky*, dados de fotômetro das emissões OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm, dados de ionossonda e dados de índice Dst.



# STUDY OF BRIGHTNESS WAVES OCCURRENCE USING F REGION AIRGLOW EMISSIONS AT LOW LATITUDES AS A FUNCTION OF A SOLAR CYCLE

## ABSTRACT

The Thermospheric Midnight Temperature Maximum (MTM) is an enhancement in the thermal structure of the upper atmosphere that occurs during nighttime period (near local midnight) at low latitudes. This phenomenon is accompanied by an increase in pressure, responsible for generating a decrease of the thermospheric wind speed or even a change in its direction of propagation, which is usually towards the equator. This modification in the winds to a poleward direction serves to move the F- region plasma down along the magnetic field lines to altitudes where it can dissociatively recombine in order to produce 630.0 nm airglow emission, which is the optical signature of MTM, known as Brightness Wave. Using data from an all-sky camera system installed at Cachoeira Paulista (22.7°S; 45° W), observing the OI 630.0 nm airglow emission, the occurrence of Brightness Waves is investigated in relation of solar cycle, months of the year and level of geomagnetic activity. Four specific events of Brightness Wave are analyzed using all-sky images, photometer data of OI 630.0 nm, OI 557.7 nm and OI 777.4 nm emissions, ionosonde data and Dst index Data.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: A Estrutura da atmosfera terrestre de acordo com o perfil de temperatura, composição química e densidade eletrônica em função da altura.	5
Figura 2.2: Perfil vertical da densidade eletrônica, juntamente com as regiões ionosféricas, respectivas radiações ionizantes e os íons predominantes em cada região. ....	7
Figura 2.3: Perfis da densidade eletrônica para a atividade solar máxima e mínima, durante o dia e a noite. ....	9
Figura 2.4: Composição atmosférica até 1000 km de altitude. ....	10
Fonte: adaptada de Hargreaves (1992). ....	10
Figura 2.5: O vento neutro termosférico causado pela expansão térmica da atmosfera. ....	13
Figura 2.6: Distribuição global da temperatura da termosfera superior, para o equinócio e atividade solar máxima. As curvas de contorno representam linhas isotérmicas, com valores de temperatura medidos em Kelvin (K). ....	14
Figura 3.1: As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o Perfil de temperatura da atmosfera da Terra. ....	24
Figura 3.2: Espectro da aeroluminescência noturna de algumas emissões importantes. ....	26
Figura 3.3: Diagrama de nível de energia para o oxigênio atômico. ....	27
Figura 4.1: Diagrama de blocos que esquematiza o mecanismo de geração do Máximo de Temperatura à Meia-noite. ....	47
Figura 5.1: Ilustração do imageador all-sky utilizado neste trabalho. ....	51
Figura 5.2: Geometria da camada emissora. $R_T$ é o raio terrestre e $h$ é a altura da camada de emissão. ....	53
Figura 5.3: Campo de cobertura do imageador <i>all-sky</i> utilizado neste trabalho. A imagem corresponde à emissão OI 630,0 nm adquirida em Cachoeira Paulista na noite de 02/11/1999. ....	54
Figura 5.4: Projeção de uma imagem <i>all-sky</i> sobre um sistema de coordenadas geográficas mostrando os efeitos de curvatura e compressão causados pela lente; (a) imagem <i>all-sky</i> com 18X18 pixels; (b) projeção de cada pixel em uma área de 1000 x 1000 km. ....	55

Figura 5.5: Variação da distância $r$ a partir do zênite ao longo da camada de emissão em função do ângulo de elevação. ....	55
Figura 5.6: Diagrama de blocos do fotômetro Multicanal 2, com destaque para as unidades que compõe o sistema. ....	56
Figura 5.7: Representação de um ionograma. ....	61
Figura 5.8: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm evidenciando a passagem de uma Banda Clara sobre o campo de visão do imageador instalado em Cachoeira Paulista na noite de 04-05 de setembro de 1997.....	63
Figura 5.9: Seqüência de imagens linearizadas e em nível de cinza da noite de 04-05 de setembro de 1997. Cada imagem possui uma área de 1024 X1024 km.....	65
Figura 5.10: Método para estimativa da velocidade média de propagação da Banda Clara. A latitude geográfica é apresentada em graus e o tempo local em horas. ....	67
Figura 5.11: Medida da extensão horizontal de uma Banda Clara sobre o zênite de Cachoeira Paulista, na noite de 05 de setembro de 1997. ....	69
Figura 6.1: (a) Horas de observação com imageador <i>all-sky</i> da emissão OI 630,0 nm para o período de 1987 a 2000; (b) freqüência anual de ocorrência de Bandas Claras; (c) variação do Índice F 10.7 cm. ....	75
Figura 6.2: (a) Horas mensais de observação com imageador <i>all-sky</i> da emissão OI 630,0 nm. (b) freqüência mensal de ocorrência de Bandas Claras em função dos meses do ano.....	78
Figura 6.3: Propagação de uma Banda Clara na noite de 25-26 de setembro de 1987. A estrutura entra no campo de visão do imageador às 23:40 TL e sai às 02:20 TL. As setas apontam para a estrutura da Banda Clara. ....	82
Figura 6.4: Gráfico de contorno de intensidade relativa para a noite de 25-26 de setembro de 1987. A seta aponta para o princípio da assinatura da Banda Clara. ....	84
Figura 6.5: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e e OI 777,4 nm em função da hora local para a noite de 25-26 de setembro de 1987. ....	85
Figura 6.6: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de setembro de 1987, para Cachoeira Paulista e Fortaleza. No gráfico, a escala de tempo é decimal. ....	88



Figura 6.7: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 27 de setembro de 1987.....	89
Figura 6.8: Ocorrência de Banda Clara na noite de 25-26 de agosto de 1987. A estrutura entra às 02:00 TL no campo de visão do imageador e sai às 03:40 TL. ....	90
Figura 6.9: Gráfico de contorno de intensidade relativa, ilustrando o deslocamento de uma Banda Clara na noite de 25-26 de agosto de 1987, sobre o campo de visão do imageador de Cachoeira Paulista.....	91
Figura 6.10: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm em função da hora local para a noite de 25-26 de agosto de 1987. ....	92
Figura 6.11: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de agosto de 1987, para Cachoeira Paulista e Fortaleza. No gráfico, a escala de tempo é decimal. ....	93
Figura 6.12: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 30 de agosto de 1987. ....	94
Figura 6.13: Passagem de Banda Clara durante a noite de 25-26 de agosto de 1998, observado com imageador instalado em Cachoeira Paulista.....	95
Figura 6.14: Gráfico de contorno de intensidade relativa para a noite de 25-26 de agosto de 1998. A seta aponta para o princípio da assinatura da Banda Clara no imageador, por volta das 23:40 LT.....	96
Figura 6.15: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 nm e OI 557,7 nm em função da hora local para a noite de 25-26 de agosto de 1998. ....	97
Figura 6.16: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de agosto de 1998, para Cachoeira Paulista e São Luís. No gráfico, a escala de tempo é decimal. ....	98
Figura 6.17: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 28 de agosto de 1998. ....	99
Figura 6.18: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 nm mostrando a passagem de uma Banda Clara sobre o campo de visão do imageador instalado em Cachoeira Paulista na noite de 04-05 de setembro de 1997.....	100
Figura 6.19: Gráfico de contorno de intensidade relativa, mostrando o deslocamento de uma Banda Clara na noite de 04-05 de setembro de 1997, sobre o campo de visão do imageador de Cachoeira Paulista.....	101

Figura 6.20: Parâmetros de ionossonda para a noite de 04-05 de setembro de 1997, medidos em São Luís. No gráfico, a escala de tempo é decimal.....	102
Figura 6.21: Variação horária do índice Dst entre os dias 2 e 7 de setembro de 1997. ....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Classificação de tempestades magnéticas de acordo com a intensidade.....	64
Tabela 6.1: Registro das observações dos anos de 1987, 1988, 1990 e 1994.....	72
Tabela 6.2: Registro das observações dos anos de 1995, 1996 e 1997.....	72
Tabela 6.3: Registro das observações dos anos de 1998, 1999 e 2000.....	72
Tabela 6.4: Registros mensais de observação e ocorrência de Bandas Claras para os meses de Janeiro a Junho.....	76
Tabela 6.5: Registros mensais de observação e ocorrência de Bandas Claras para os meses de Julho a Dezembro.....	77
Tabela 6.6: Ocorrência de Banda Clara e intensidade da tempestade geomagnética.....	79



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}$  - Vetor campo magnético

$\vec{E}$  - Vetor campo elétrico

$e$  - Carga do elétron

$f$  - Freqüência da onda

$f_p$  - Freqüência natural do plasma

$f_{oF2}$  - Freqüência crítica da onda ordinária da camada F2

$\vec{g}$  - Aceleração da gravidade terrestre

$h$  - Constante de Planck

$h'F$  - Altura virtual da base da região F

$hmF2$  - Altura do pico da densidade eletrônica da ionosfera

K - Kelvin (unidade de temperatura)

$k$  - Constante de Boltzmann

L - Taxa de perda de energia por unidade de volume

$m$  - Massa dos elétrons

N - Densidade numérica dos constituintes atmosféricos

$n$  - Densidade numérica dos constituintes atmosféricos

P - Taxa de produção de energia por unidade de volume

$p$  - Pressão do gás neutro

$R_T$  - Raio da Terra

T - Temperatura

$\vec{U}$  - Velocidade do vento neutro

$U_{GZ}$  - Componente zonal geográfica do vento termosférico

$U_{GM}$  - Componente meridional geográfica do vento termosférico

$\vec{V}$  - Velocidade dos íons

$\lambda$  - Comprimento de onda

$\lambda_T$  - Coeficiente de condutividade térmica

$\rho$  - Densidade do gás neutro

$\epsilon_0$  - Permissividade elétrica no vácuo

$v_{ni}$  - Coeficiente de colisão neutro-íon

$\mu$  - Índice de refração do plasma ionosférico

$\mu_m$  - Coeficiente de viscosidade molecular

$\mu_T$  - Coeficiente de viscosidade turbulenta  
 $\nu$  - Frequência de emissão de luminescência  
 $\phi$  - Latitude geográfica  
 $\vec{\Omega}$  - vetor velocidade angular da Terra  
 $\nabla$  - Operador nabla  
 $\vec{v}$  - Vetor velocidade das partículas

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2: A ATMOSFERA TERRESTRE</b> .....	<b>5</b>
2.1- A estrutura vertical da atmosfera neutra.....	6
2.2 - A ionosfera.....	6
2.3 - Dinâmica da termosfera.....	9
2.4 - Ventos neutros termosféricos.....	13
2.5 - Dinâmica da ionosfera.....	15
2.6 - Efeitos de ventos termosféricos horizontais sobre a região ionosférica.....	F 18
2.7 - Acoplamento termosfera-ionosfera.....	20
2.8 - Efeitos de tempestades geomagnéticas sobre a ionosfera.....	21
<b>CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>23</b>
3.1 – A luminescência atmosférica.....	23
3.2 - As principais emissões de luminescência atmosférica da região F.....	26 26
3.3 - A emissão OI 630,0 nm.....	27
3.3.1 - O processo de recombinação dissociativa.....	28
3.3.2 - A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm.....	31
3.4 - A emissão OI 557,7 nm.....	34
3.5 - A emissão OI 777,4 nm.....	36
3.5.1 - O processo de recombinação radiativa.....	36
3.5.2 - O processo de recombinação íon-íon.....	38
<b>CAPÍTULO 4: O MÁXIMO DE TEMPERATURA À MEIA-NOITE ASSOCIADO ÀS BANDAS CLARAS</b> .....	<b>41</b>
4.1 - Histórico da investigação do fenômeno de Máximo de Temperatura à Meia-noite (MTM).....	41
4.2 – Mecanismo de maximização da temperatura à meia-noite.....	47

<b>CAPÍTULO 5: INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
5.1 - O imageamento ótico .....	49
5.2 - O imageador all-sky .....	50
5.3 - Raio de cobertura do imageador.....	53
5.4 - Linearização das imagens <i>all-sky</i> .....	54
5.5 - Instrumentação complementar .....	56
5.5.1 - O fotômetro multicanal 2 .....	56
5.5.2 - A ionossonda .....	57
5.6 - Metodologia .....	62
5.6.1 – O estudo da freqüência de ocorrência de Bandas Claras.....	62
5.6.1 – O estudo de casos específicos de ocorrência de Bandas Claras.....	64
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>71</b>
6.1 - Ocorrência das Bandas Claras em função do ciclo solar .....	71
6.2 - Ocorrência das Bandas Claras em função dos meses do ano.....	76
6.3 - Ocorrência das Bandas Claras em função da atividade geomagnética....	78
6.3 - Estudo de casos de ocorrência de Banda Clara .....	81
6.3.1 - Análise da noite de 25-26 de setembro de 1987 .....	82
6.3.2 - Análise da noite de 25-26 de agosto de 1987 .....	90
6.3.3 - Análise da noite de 25-26 de agosto de 1998 .....	95
6.3.4 - Análise da noite de 04-05 de setembro de 1997 .....	99
6.3.5 - Considerações sobre o estudo de casos .....	103
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A Banda Clara (tradução do termo em inglês *Brightness Wave*) consiste de uma assinatura espaço-temporal presente nas emissões de luminescência atmosférica da região F ionosférica. A assinatura está associada ao fenômeno atmosférico denominado Máximo de Temperatura à Meia-Noite (MTM) e se caracteriza por um acréscimo na taxa de emissão volumétrica de luminescência das linhas de emissão OI 557,7 nm e OI 630,0 nm. O Máximo de Temperatura à Meia-noite é uma anomalia na temperatura neutra da termosfera de baixas latitudes. O fenômeno é acompanhado de aumento da pressão local e conseqüente redução ou mesmo reversão da velocidade dos ventos neutros meridionais, que normalmente sopram em direção ao equador.

A assinatura espacial de uma Banda Clara, detectada por um imageador *all-sky*, consiste de uma região clara na imagem, que se movimenta em direção ao pólo (majoritariamente de norte para sul, no caso de um equipamento instalado no setor brasileiro). As regiões claras correspondem ao acréscimo local na taxa de emissão de luminescência atmosférica.

O objetivo desta Dissertação de Mestrado é estudar as características das Bandas Claras no setor brasileiro de baixas latitudes, utilizando imagens *all-sky* da linha de emissão OI 630,0 nm. São utilizados no estudo, de maneira complementar, dados de fotômetro das emissões OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm, dados de ionossonda e dados de índice geomagnético Dst.

A freqüência de ocorrência das Bandas Claras é investigada através de um estudo estatístico, envolvendo a análise de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm. A análise estatística é executada em função de um ciclo solar (períodos de atividade solar mínima, ascendente, máxima e descendente, considerando o parâmetro de fluxo solar médio F 10.7 cm), em função dos meses do ano (variação mensal) e em função do nível de atividade geomagnética (considerando o índice geomagnético Dst).

O estudo compreende o período de março de 1987 a junho de 2000, limitado pelos dados disponíveis de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm. No intervalo de tempo considerado, foram detectados quarenta eventos de Banda Clara. Os eventos mais evidentes foram selecionados para realização de um estudo de casos específicos do fenômeno no setor brasileiro de baixas latitudes.

O estudo de caso compreende a análise de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, para o cálculo da velocidade média de propagação e inferência das dimensões horizontais médias das Bandas Claras no setor brasileiro de baixas latitudes. De forma complementar, são utilizados dados de fotômetro das emissões de luminescência da região F ionosférica (OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm), bem como dados de ionossonda, para averiguação dos efeitos da passagem da Banda Clara na Ionosfera de baixas latitudes.

O presente estudo é relevante para ampliar o entendimento da fenomenologia das Bandas Claras no setor brasileiro de baixas latitudes, determinando características importantes do fenômeno, como frequência de ocorrência em relação ao ciclo solar e estação do ano, direção e velocidade de propagação e extensão horizontal. De maneira complementar, possibilita aperfeiçoar a compreensão do comportamento da ionosfera frente à passagem de uma Banda Clara em regiões de baixas latitudes.

O Capítulo 2 revisa conceitos sobre a atmosfera neutra e ionizada. A dinâmica da termosfera e da ionosfera é descrita e o acoplamento termosfera-ionosfera é abordado.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão sobre os fundamentos teóricos de luminescência atmosférica, compreendendo as principais emissões de luminescência atmosférica da região F ionosférica, com ênfase na emissão OI 630,0 nm, a principal emissão utilizada no estudo.

O Capítulo 4 apresenta a revisão bibliográfica sobre o fenômeno de Máximo de Temperatura à Meia-Noite (MTM), associado às Bandas Claras, explorando os principais resultados de pesquisas envolvendo o assunto.

O Capítulo 5 descreve a instrumentação utilizada no estudo, com ênfase para o imageador *all-sky*. A metodologia e as técnicas de processamento de imagens necessárias para análise dos dados é discutida. A instrumentação complementar, composta por fotômetro e ionossonda é brevemente apresentada.

O Capítulo 6 exhibe os resultados e a discussão do estudo estatístico da frequência de ocorrência das Bandas Claras e do estudo de casos específicos do fenômeno.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo e sugestões para futuras pesquisas no assunto.



## CAPÍTULO 2

### A ATMOSFERA TERRESTRE

No estudo da atmosfera terrestre, é usual dividir sua estrutura vertical em camadas, classificadas de acordo com sua temperatura, grau de ionização, composição química e estado de mistura dos constituintes (HARGREAVES,1992). Conceitos básicos relacionados à estrutura da atmosfera conforme seu perfil de temperatura e grau de ionização são brevemente revisados. Esses temas são relevantes para o entendimento deste trabalho e estão baseados nas publicações acadêmicas de Rishbeth e Garriott (1969), Brasseur e Solomon (1986), Kirchhoff (1991) e Hargreaves (1992). A Figura 2.1 apresenta a estrutura da atmosfera baseada nestas características.

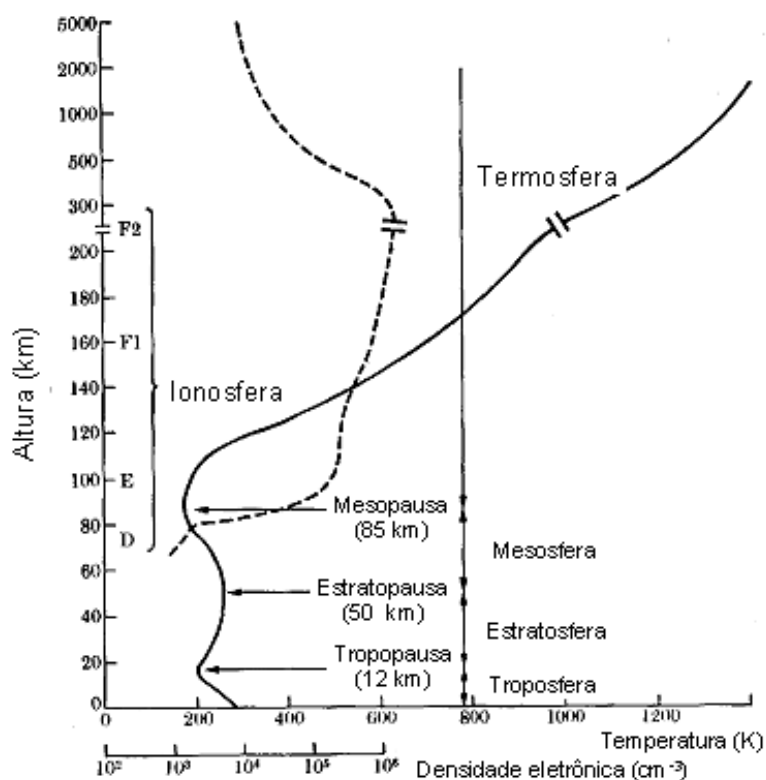


Figura 2.1: A Estrutura da atmosfera terrestre de acordo com o perfil de temperatura, composição química e densidade eletrônica em função da altura.

Fonte: adaptada de Cândido, (2008).

## **2.1- A estrutura vertical da atmosfera neutra**

Segundo seu perfil de temperatura, a atmosfera é dividida em troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Os limites das camadas são chamados pausas e estão localizados nos pontos de inflexão de temperatura, em que o gradiente térmico é nulo.

A troposfera é a região que se estende da superfície até aproximadamente 15 Km, dependendo da latitude. A temperatura decresce com a altitude, sendo a convecção e a radiação os principais processos de transferência de energia. A temperatura é influenciada pela absorção direta da radiação solar no infravermelho e no visível.

A estratosfera situa-se entre 15 e 50 km de altitude. Nessa região, a temperatura aumenta com a altitude. A absorção da radiação ultravioleta pela molécula do ozônio e pelo vapor d' água são responsáveis pelo máximo de temperatura em torno de 50 km de altitude. O processo de radiação é o principal agente dissipador de calor.

A mesosfera inicia em torno de 50 km e se estende até aproximadamente 90 km de altitude. A temperatura diminui com a altitude até atingir valores em torno de 190 K, a menor temperatura da atmosfera. A radiação é ainda um importante mecanismo na remoção de calor nestas altitudes.

A termosfera é a camada atmosférica localizada aproximadamente entre 90 e 300 km. A temperatura aumenta com a altitude, sendo a condução o principal mecanismo para dissipação de energia na região. Na termosfera existe forte absorção de radiação ultravioleta pelo oxigênio atômico. Este processo é responsável pelas altas temperaturas da região.

## **2.2 - A ionosfera**

A ionosfera é a região da atmosfera terrestre constituída por interações entre os átomos e moléculas neutras da atmosfera com fontes ionizantes solares e cósmicas, que geram o plasma ionosférico. Este plasma é definido como sendo

fracamente ionizado, em que a densidade de partículas ionizadas é muito menor que a de partículas neutras. A ionosfera é formada principalmente por íons positivos monovalentes e elétrons, sendo meio de propagação de ondas de rádio. Está localizada em uma faixa de altitude de aproximadamente 70 km (durante o dia) até 1000 km. Em consequência das diferentes densidades atmosféricas, composição da atmosfera neutra, taxas de absorção atmosférica e quantidade de energia proveniente da radiação solar, a ionosfera subdivide-se em três regiões, D, E e F. A Figura 2.2 mostra o perfil vertical da densidade de elétrons, as regiões ionosféricas, respectivas radiações ionizantes e íons formados.

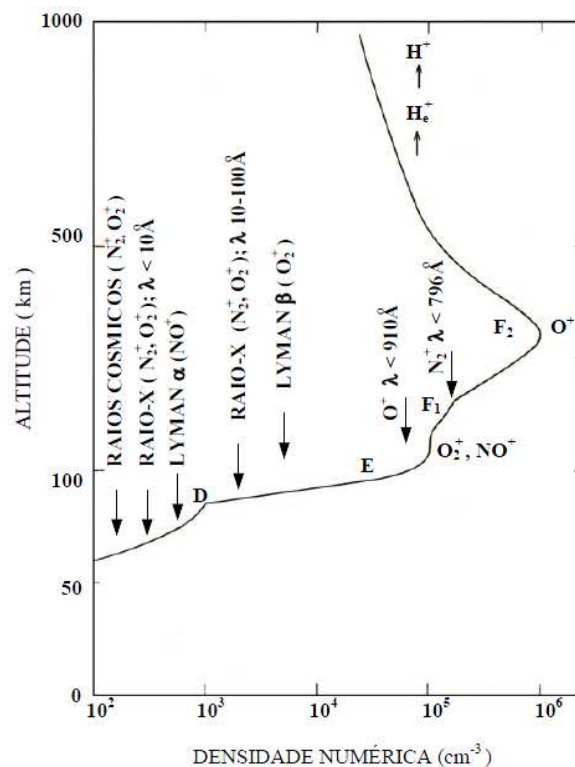


Figura 2.2: Perfil vertical da densidade eletrônica, juntamente com as regiões ionosféricas, respectivas radiações ionizantes e os íons predominantes em cada região.

Fonte: adaptada de Banks (1973).

A região D localiza-se entre 70 e 90 km de altitude. Possui a menor densidade eletrônica de todas as regiões ionosféricas. Durante a noite, a região D praticamente desaparece devido à rápida recombinação de seus íons. As

radiações ionizantes predominantes são os raios X, a radiação Lyman- $\alpha$  e os raios cósmicos, que ionizam gases como  $O_2$ ,  $N_2$  e NO.

A região situada aproximadamente entre 90 e 130 km de altitude é a região E. Ela possui a maior condutividade elétrica ionosférica. As principais fontes de ionização são os raios X, a radiação Lyman- $\beta$  e as radiações no comprimento de onda do extremo ultravioleta (EUV). Os íons majoritários são o  $O_2^+$  e  $NO^+$ . A densidade de íons é da ordem de  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ , enquanto a densidade neutra é maior que  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .

A região F está localizada logo acima da Região E. Inicia em torno dos 130 km, estendendo-se até o limite superior da Ionosfera, numa altitude de aproximadamente 1000 km. Subdivide-se em camadas F1 e F2. Atualmente estuda-se a existência de uma terceira camada, a F3.

A camada F1 localiza-se entre 130 e 180 km. A radiação solar no comprimento de onda do EUV é responsável pela ionização do oxigênio atômico, produzindo elétrons livres e o íon oxigênio atômico  $O^+$ , o elemento majoritário. Durante a noite, na ausência do processo de fotoionização, a camada F1 desaparece.

Acima da camada F1 está a camada F2, composta basicamente de elétrons livres e de íons  $O^+$ . Na camada F2, que engloba o pico de concentração iônica da ionosfera, a difusão é um processo de transporte bastante expressivo, determinando a distribuição da densidade eletrônica local. Além deste processo, as derivas ao longo e perpendiculares às linhas de campo são mecanismos de transporte importantes.

Os perfis de densidade eletrônica da ionosfera para o dia e para a noite, considerando a atividade solar máxima e mínima são apresentados na Figura 2.3.



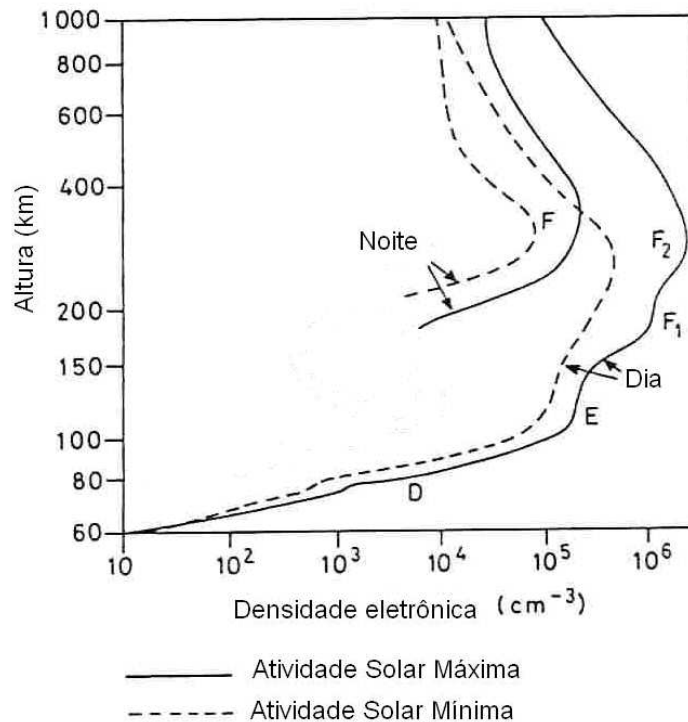


Figura 2.3: Perfis da densidade eletrônica para a atividade solar máxima e mínima, durante o dia e a noite.

Fonte: adaptada de Hargreaves (1992).

O pico de densidade eletrônica na ionosfera ocorre em torno de 300 km de altitude. Ele é consequência do fato de que a densidade atmosférica decresce com o aumento da altitude à medida que a intensidade da radiação solar decresce com a altitude em decorrência da absorção parcial desta radiação pelos constituintes atmosféricos.

### 2.3 - Dinâmica da termosfera

Na termosfera, os constituintes moleculares majoritários são o  $N_2$  e o  $O_2$ . Devido às dissociações pela radiação solar ultravioleta e ao impacto com partículas energéticas, ocorre a produção de átomos de N e O. As espécies minoritárias da termosfera, NO,  $O_3$  e OH resultam de reações químicas locais. Entretanto, as espécies  $CO_2$ , He, Ar,  $H_2O$ ,  $H_2$  e  $CH_4$  são transportadas por difusão para a termosfera a partir das regiões mais baixas da atmosfera.

A presença de espécies ionizadas (como  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $N^+$  e  $NO^+$ ) e de partículas carregadas na termosfera, compõe a região da ionosfera. O pico de

concentração iônica da ionosfera está localizado na camada F, em torno de 300 km de altitude, região que coincide com a termosfera (REES, 1989).

A variação da concentração de alguns componentes atmosféricos, a partir da superfície terrestre até 1000 km, é apresentada na Figura 2.4.

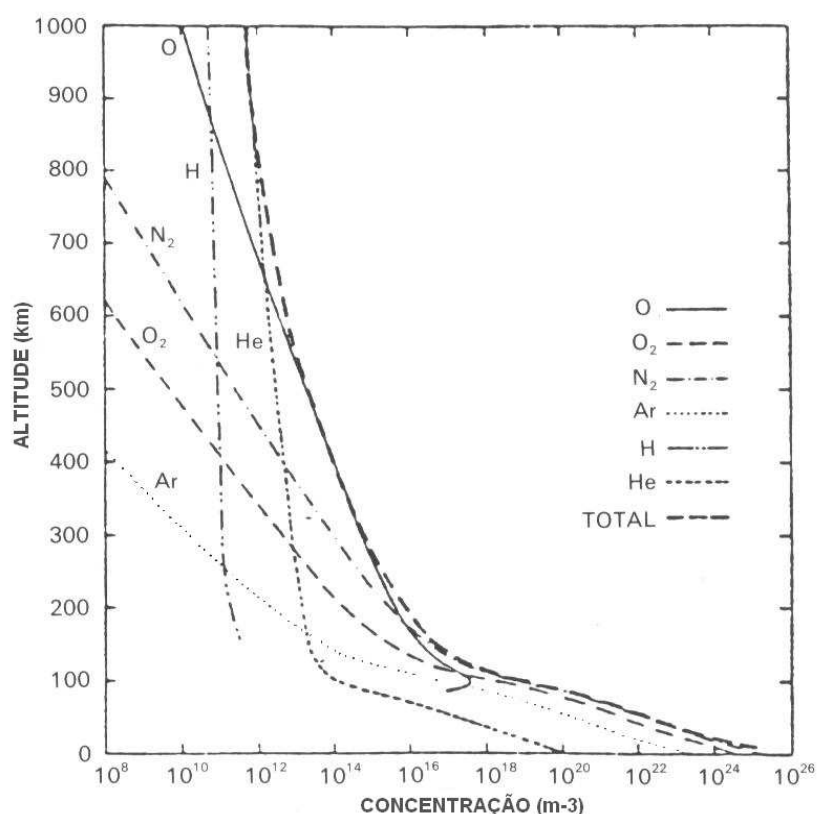


Figura 2.4: Composição atmosférica até 1000 km de altitude.

Fonte: adaptada de Hargreaves (1992).

Segundo a Figura 2.4, nas altitudes entre aproximadamente 200 e 500 km, o oxigênio atômico é o principal constituinte atmosférico. Acima dos 600 km, as partículas neutras deslocam-se em trajetórias praticamente balísticas, de maneira que as colisões entre as partículas são pouco freqüentes (RISHBETH, 1969).

Os processos físicos da termosfera estão relacionados às variações no fluxo de energia solar, sejam elas diárias, sazonais ou anuais. O fluxo de partículas carregadas pode modificar as condições da ionosfera, influenciando o

comportamento da termosfera, principalmente ao ocorrer uma tempestade solar, quando o vento solar se intensifica.

Na termosfera se aplicam as leis fundamentais da Física, e mesmo constituída por partículas neutras e ionizadas, a termosfera pode ser tratada como um fluido compressivo constituído por uma única espécie, permeado por um campo eletromagnético e sujeita aos princípios de conservação de massa, de momento e de energia (FAGUNDES, 1993).

A equação da continuidade é a primeira das equações fundamentais que descrevem a atmosfera neutra, expressando a lei de conservação de massa:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{U}) = 0 \quad (2.1)$$

na qual  $t$  representa o tempo,  $n$  a densidade numérica das partículas e  $\vec{U}$  representa a velocidade macroscópica do fluido como um todo.

A equação do movimento é a segunda equação fundamental, expressando a lei de conservação de *momentum* na atmosfera neutra:

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \frac{1}{\rho} \nabla [(\mu_m + \mu_T) \nabla] \vec{U} - \nu_{ni} (\vec{U} - \vec{v}) - 2\vec{\Omega} \times \vec{U} \quad (2.2)$$

em que  $\vec{U}$  é a velocidade do vento neutro,  $\vec{v}$  é a velocidade dos íons,  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade,  $\vec{\Omega}$  é a velocidade angular da Terra,  $p$  é a pressão do gás neutro,  $\rho$  é a densidade do gás neutro,  $\mu_m$  é o coeficiente de viscosidade molecular,  $\nu_{ni}$  é o coeficiente de colisão neutro-íon e  $\mu_T$  representa o coeficiente de viscosidade turbulenta.

A terceira equação fundamental que descreve a dinâmica da atmosfera neutra é a equação da conservação da energia, desprezando o arraste iônico e a energia dissipada pela viscosidade:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \vec{U} \cdot \nabla T + p \nabla \cdot \vec{U} + \nabla \cdot (-\lambda_T \nabla T) = P - L \quad (2.3)$$

em que T representa a temperatura da atmosfera,  $c_v$  é o calor específico a volume constante,  $\lambda_T$  é o coeficiente de condutividade térmica e P e L são respectivamente as taxas de produção e perda de energia por unidade de volume.

Considerando a equação do movimento, o termo  $-(1/\rho)\nabla p$  representa um gradiente de pressão ao qual está associada uma força responsável pelo movimento de uma parcela do fluido de uma região de alta pressão para uma região de baixa pressão. O termo  $[\nabla[(\mu_m + \mu_T)\nabla]\vec{U}]/\rho$ , a força devido à viscosidade, atua de maneira a remover os gradientes transversais de velocidade no fluido. Na termosfera, a viscosidade é bastante importante, pois o caminho livre médio dos constituintes aumenta com a altitude. O termo de arraste iônico, descrito por  $\nu_{ni}(\vec{U} - \vec{V})$  é o responsável pelo acoplamento da parte neutra com a parte ionizada da atmosfera. O último termo à direita da Equação (2.2) é o termo de Coriolis ( $2\vec{\Omega} \times \vec{U}$ ), sendo a força por unidade de massa associada à rotação da atmosfera em relação a um referencial não-inercial. Esta força não realiza trabalho sobre o fluido, atuando na direção perpendicular ao vetor velocidade do mesmo, alterando sua direção.

As partículas carregadas na termosfera estão sujeitas às forças impostas ao gás neutro e à força eletromagnética, em razão da existência dos campos eletromagnéticos. As partículas carregadas podem vir a modificar o movimento do gás neutro, devido às colisões entre as partículas neutras e os íons na termosfera. Caso não haja campo elétrico, o movimento dos íons fica restrito ao longo do campo magnético. Na existência de campo elétrico, as partículas carregadas podem movimentar-se transversalmente a  $\mathbf{B}$ , ocorrendo transferência de quantidade de movimento dos íons para as partículas neutras. A força de arraste iônico é um importante fator limitante da velocidade dos ventos na termosfera (KIRCHHOFF, 1991; FAGUNDES, 1993).

## 2.4 - Ventos neutros termosféricos

A origem dos ventos na atmosfera está relacionada à existência de um gradiente de pressão, associado a variações locais de densidade e temperatura. Os ventos termosféricos são resultado de gradientes de pressão horizontais gerados pelo aquecimento solar diurno na termosfera. A radiação solar na faixa do ultravioleta, do extremo ultravioleta e dos raios X, absorvida durante o dia entre 100 e 250 km de altitude, produz aquecimento e ionização na termosfera, controlando a dinâmica e a química da região (KIRCHHOFF, 1991; FAGUNDES, 1993).

A expansão térmica da atmosfera iluminada pelo Sol promove o abaulamento atmosférico, que representa os gradientes horizontais de pressão que acionam os ventos termosféricos (KIRCHHOFF, 1991). A Figura 2.5 ilustra o processo.

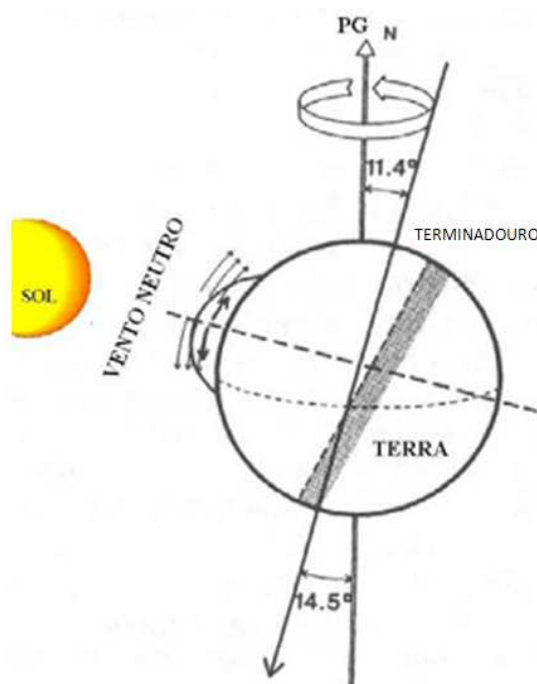


Figura 2.5: O vento neutro termosférico causado pela expansão térmica da atmosfera.

Fonte: Adaptada de Rees (1989).

Os ventos neutros termosféricos interagem de modo efetivo com as partículas ionizadas da ionosfera, inclusive podendo deslocá-la para maiores altitudes durante a noite, contribuindo para sua manutenção no período noturno. Na

região F, o movimento dos ventos neutros é limitado principalmente pelos efeitos de arraste iônico e pela força de Coriolis. Durante o dia, a força de reação ao movimento (arraste iônico) é mais efetiva, reduzindo a velocidade do vento. A componente da força de Coriolis, entretanto, torna-se importante em latitudes médias e altas, sendo nula no equador.

A partir de um modelo de abaulamento atmosférico pode-se deduzir a variação diurna e a direção de fluxo dos ventos termosféricos. A Figura 2.6 mostra um modelo de distribuição global da temperatura na termosfera superior, a partir do qual se pode determinar a direção e o sentido de deslocamento do vento em qualquer ponto. Na Figura, os contornos representam as linhas isotérmicas na termosfera superior onde os gradientes de pressão estão relacionados à distribuição de temperatura.

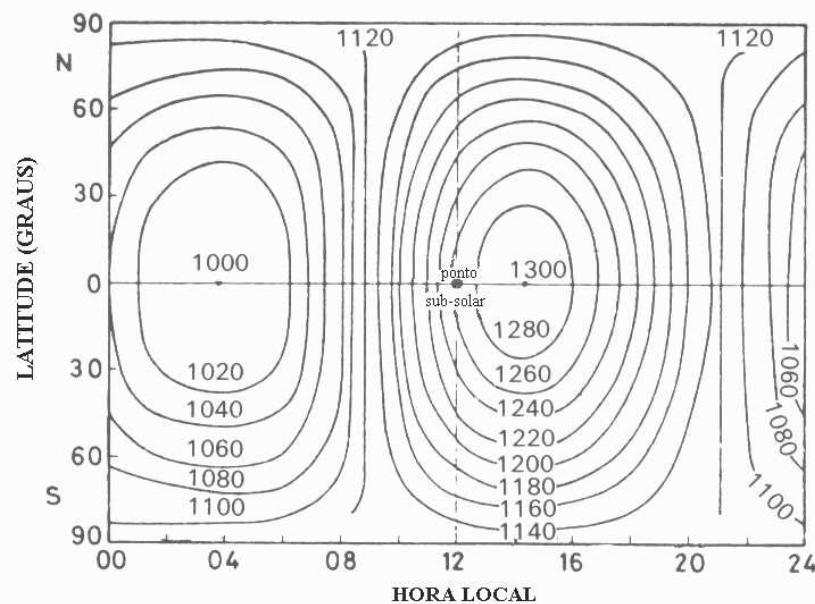


Figura 2.6: Distribuição global da temperatura da termosfera superior, para o equinócio e atividade solar máxima. As curvas de contorno representam linhas isotérmicas, com valores de temperatura medidos em Kelvin (K).

Fonte: Hargreaves (1992).

De acordo com a Figura 2.6, o centro de temperatura (e pressão) máxima e o centro de temperatura (e pressão) mínima encontram-se, respectivamente, no equador às 14 horas e às 4 horas. O fluxo de ar é dirigido do centro de pressão

alta para as pressões mais baixas. Desta forma, o sentido de deslocamento do vento está perfeitamente determinado para qualquer ponto do gráfico.

Considerando a Figura 2.6, no caso de Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O), entre a meia-noite e quatro da manhã (intervalo de tempo típico de ocorrência das Bandas Claras), o vento termosférico possui componente majoritária em direção ao equador.

## 2.5 - Dinâmica da ionosfera

Na região ionosférica, os processos físicos e químicos governam o plasma ambiente, sendo responsáveis pela produção e perda de ionização, e pelo transporte do plasma ionosférico na direção perpendicular ou ao longo do campo geomagnético. A equação da continuidade expressa os efeitos dos vários processos que alteram a densidade eletrônica ( $n_e$ ) e iônica ( $n_i$ ). As equações são escritas da seguinte forma, considerando os elétrons e cada espécie de íons:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i \vec{v}_i) = P_i - L_i \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \vec{v}_e) = P_e - L_e \quad (2.5)$$

onde  $P$  e  $L$  representam os termos de produção e perda e  $\vec{v}$  denota a velocidade macroscópica média de transporte da partícula (íon ou elétron).

O fluxo de cada espécie na ionosfera pode ser obtido através das equações que expressam a conservação da quantidade de movimento. O plasma ionosférico está sujeito a forças gravitacionais, colisionais, forças devidas a gradientes de pressão e também, por se tratar de um gás ionizado, sofre influência de forças elétricas e magnéticas (CHIAN E REUSCH, 1979).

Devido à presença da força eletromagnética é necessário que as equações de movimento sejam separadas para íons e elétrons do plasma ionosférico. Estas equações consideram que a frequência de colisão entre as partículas é tão alta que tanto os elétrons como os íons podem ser tratados como fluidos. Isso implica no cancelamento das velocidades térmicas aleatórias de íons e elétrons, sendo sumariamente ignoradas (RISHBETH e GARRIOT, 1969). Os processos de transporte na ionosfera são resumidamente descritos:

- I. íons e elétrons podem se mover pela ação de campos elétricos. Os movimentos e correntes elétricas geradas são dependentes do campo magnético e das frequências de colisão, que determinam a mobilidade e a condutividade das partículas carregadas. A deriva eletromagnética do plasma ( $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ) transporta a ionização na direção perpendicular ao campo magnético, em razão da presença de campos elétricos gerados por efeito dínamo nas regiões E e F e de campos procedentes da magnetosfera;
- II. a ação dos ventos neutros na termosfera transporta as partículas carregadas, produzindo forças de arraste proporcionais à diferença entre a velocidade do vento  $\vec{U}$  e a velocidade das partículas carregadas ( $\vec{v}_i$  e  $\vec{v}_e$ ). No entanto, tanto a origem quanto a influência dos ventos neutros diferem para a região E e F. Na região E, a origem do vento está ligada a fenômenos de marés atmosféricas e dão origem ao chamado dínamo da região E. Na região F, os ventos são originários do aquecimento diferencial da atmosfera, gerando o chamado dínamo da região F;
- III. a difusão do plasma ionosférico ao longo das linhas do campo magnético, como consequência da força gravitacional e de gradientes de pressão. Na ausência de campos elétricos muito intensos as forças elétricas entre íons e elétrons tendem a mantê-los juntos, de maneira que a difusão de ambas partículas seja na mesma velocidade, caracterizando a chamada difusão ambipolar. Colisões entre as partículas carregadas e neutras e a ação do campo geomagnético podem influenciar este movimento. Em regiões onde a frequência de



colisão é alta (baixa ionosfera) a difusão é mais lenta, sendo mais alta na região F, onde as colisões são pouco freqüentes.

As equações de movimento do plasma ionosférico, considerando separadamente íons e elétrons são:

$$m_i \left( \frac{d\vec{v}_i}{dt} \right) = m_i \vec{g} - \frac{1}{n_i} \nabla p_i + e(\vec{E} + \vec{v}_i \times \vec{B}) - m_i \nu_{in} (\vec{v}_i - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{v}_i - \vec{v}_e) \quad (2.6)$$

$$m_e \left( \frac{d\vec{v}_e}{dt} \right) = m_e \vec{g} - \frac{1}{n_e} \nabla p_e - e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) - m_e \nu_{en} (\vec{v}_e - \vec{U}) - m_e \nu_{ei} (\vec{v}_e - \vec{v}_i) \quad (2.7)$$

Nas equações (2.6) e (2.7), os subscritos  $e$ ,  $i$  e  $n$  se referem respectivamente aos elétrons, íons e partículas neutras;  $\vec{g}$  representa a aceleração da gravidade;  $\vec{U}$  representa a velocidade do vento neutro;  $\nu$  é a freqüência de colisão entre elétrons e íons;  $\vec{v}$  é a velocidade;  $e$  é a carga elétrica;  $\vec{E}$  é o campo elétrico e  $\vec{B}$  é o campo magnético. As pressões parciais dos íons e elétrons são, respectivamente,  $p_i = n_i K T_i$  e  $p_e = n_e K T_e$ , onde  $n_i$  e  $n_e$  representam a densidade numérica,  $T$  a temperatura e  $m$  a massa;  $K$  é a constante de Boltzmann.

O movimento do plasma ionosférico é governado pelas forças externas (de origem elétrica e magnética), pelos processos de produção e perda iônicas, pela ação dos ventos neutros e pela difusão ambipolar. A ação dos campos elétricos e magnéticos faz com que as partículas ionizadas adquiram movimentos perpendiculares às linhas de campo magnético, originando derivas eletromagnéticas na ionosfera.

Depois do pôr-do-sol, ao cessarem as reações de fotoionização, o processo de recombinação entre íons e elétrons é o principal responsável pelo movimento aparente de ascensão do plasma das regiões inferiores da ionosfera durante a noite.

## 2.6 - Efeitos de ventos termosféricos horizontais sobre a região F ionosférica

O vento termosférico atua significativamente na distribuição do plasma da região F ionosférica, alterando a altura do pico da região F e mudando o perfil vertical de ionização. As derivas verticais do plasma ionosférico podem ser causadas por campos elétricos zonais e/ou por ventos termosféricos meridionais ao longo do meridiano magnético. Os campos elétricos zonais são produzidos pela ação dos dínamos das regiões E e F (RISHBETH, 1971).

Através de efeitos de colisão, as partículas ionizadas são transportadas pelos ventos termosféricos na direção de suas componentes projetadas ao longo das linhas de campo magnético. A componente do vento ao longo do meridiano magnético  $U_M$  pode ser expressa por:

$$U_M = U_{GM} \cos(\delta_M) + U_{GZ} \sin(\delta_M) \quad (2.8)$$

em que  $U_{GM}$  denota a componente geográfica meridional,  $\delta_M$  denota a declinação magnética e  $U_{GZ}$  denota a componente geográfica zonal.

Nas latitudes próximas ao equador, onde as linhas de campo magnético são horizontais, os ventos meridionais magnéticos não alteram o pico da camada ionizada e não contribuem para o seu movimento na direção vertical. Na região equatorial, a deriva vertical da ionosfera ocorre devido à ação de campos elétricos. Entretanto, nas regiões de inclinação magnética elevada, a ação dos ventos neutros pode movimentar a ionização da camada de forma significativa (TITHERIDGE, 1995A). Nas regiões de baixa latitude, os movimentos de ionização são causados por interação eletrodinâmica que envolve os ventos neutros, campos elétricos gerados por efeito dínamo e o campo geomagnético.

Em baixas latitudes, a velocidade de deriva vertical da região F pode ser expressa da seguinte forma:

$$V_V = \frac{E}{B} \cos I \pm U_M \cos(I) \sin(I) \quad (2.9)$$

onde  $V_V$  representa a velocidade de deriva vertical;  $I$  representa a inclinação magnética;  $E$  representa o campo elétrico zonal;  $B$  representa o campo magnético terrestre. Os sinais de “mais” e “menos” designam respectivamente latitudes magnéticas sul e norte.

Na equação (2.9), o termo  $U_M \cos(I) \sin(I)$  representa a velocidade de deriva vertical devida ao vento termosférico meridional horizontal. O termo  $(E/B) \cos(I)$  representa a deriva devida ao campo elétrico. Na região equatorial, onde a inclinação é nula, não há movimento vertical pela ação dos ventos neutros. O efeito dos ventos neutros sobre a região F aumenta à medida que a inclinação se aproxima de  $45^\circ$  (regiões de média latitude). À medida que o ângulo de inclinação aumenta, o efeito devido ao campo elétrico diminui e o efeito dos ventos neutros passa a ser preponderante no movimento de ionização da região F (TITHERIDGE, 1995).

A ação do vento neutro soprando em direção ao equador, contendo uma componente para cima ao longo das linhas de campo, produz uma deriva vertical do plasma, aumentando a altitude do pico da camada e acentuando a difusão de ionização. Na região F, a recombinação depende da densidade das moléculas de  $N_2$  e  $O_2$ , que decresce acentuadamente com o aumento da altitude. Assim, a subida da camada diminui a taxa de perda de ionização.

No caso de um vento neutro soprando em direção aos pólos, ocorre deslocamento de ionização para baixas altitudes. Como consequência, acontece o aumento da taxa de perda de ionização.

Portanto, os ventos meridionais horizontais são relevantes no controle da altitude e da concentração eletrônica do pico da camada F (RISHBETH E GARRIOTT, 1969).

## 2.7 - Acoplamento termosfera-ionosfera

O arraste iônico é definido como a força por unidade de volume exercida sobre as partículas neutras devido às interações colisionais entre estas e o plasma ionosférico. O termo de arraste iônico é responsável por acoplar o gás neutro e o ionizado devido ao confinamento dos íons pelo campo geomagnético, que impede que os mesmos se movimentem livremente com os ventos neutros (RISHBETH, 2002).

A densidade eletrônica na ionosfera é dependente das concentrações dos constituintes da atmosfera neutra. Tanto ela quanto a altura do pico da camada possuem variabilidade diária. Esta concentração eletrônica, por meio do arraste iônico, modifica os padrões de circulação dos ventos neutros, que conduzem a ionização ao longo das linhas de campo magnético. Desta forma, devido ao acoplamento termosfera-ionosfera, qualquer alteração nos ventos modificará a altura do pico da camada ionosférica.

De maneira simplificada, Forbes e Robble (1990) demonstraram que o plasma ionosférico age como uma força considerável sobre o vento neutro e vice-versa, de maneira que atua como uma fonte ou um sumidouro de *momentum* do gás neutro. Supondo desprezíveis os efeitos da declinação magnética tem-se que:

$$\frac{\partial U_{GZ}}{\partial t} = -v_{ni}U_{GZ} - \left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)\left(\frac{\partial^2 U_{GZ}}{\partial x^2}\right) + 2r\omega(\cos \phi) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial U_{GM}}{\partial t} = -v_{ni}U_{GM} \sin^2 I + \left(\frac{\mu}{r}\right)\left(\frac{\partial^2 U_{GM}}{\partial y^2}\right) + r\omega^2(\cos \phi)(\sin \phi) \quad (2.11)$$

Nas equações (2.10) e (2.11),  $U_{GZ}$  representa a componente zonal geográfica do vento termosférico, positiva para leste;  $U_{GM}$  é a componente meridional geográfica do vento termosférico, positiva em direção ao equador;  $I$  é o ângulo

de inclinação magnética;  $\nu_{ni}$  é a frequência de colisão entre as partículas neutras e íons na transferência de *momentum*;  $\rho$  é a densidade de massa da atmosfera neutra;  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade;  $p$  representa a magnitude da pressão sobre a atmosfera neutra;  $r$  é a distância radial desde o centro da Terra;  $x$  é a coordenada longitudinal, positiva para leste;  $y$  é a coordenada latitudinal, positiva em direção ao pólo;  $\omega$  é o módulo da velocidade angular da Terra e  $\phi$  é a latitude geográfica.

Considerando as Equações (2.10) e (2.11), nota-se que a componente zonal do vento termosférico está submetida a um arrasto máximo, ao passo que a componente meridional sofre um arrasto que depende do ângulo de inclinação magnética, variando com a latitude. Durante o dia, o termo do arraste iônico é grande, limitando a velocidade do vento neutro, ao retirar-lhe *momentum*. Durante a noite a densidade eletrônica é menor, diminuindo o arraste iônico. Conseqüentemente a magnitude do vento é maior. As colisões entre partículas neutras e ionizadas são responsáveis por transportar a ionização ao longo das linhas de campo magnético, na direção da componente do vento que está ao longo do campo.

## **2.8 - Efeitos de tempestades geomagnéticas sobre a ionosfera**

Durante as tempestades solares, a emissão de radiação solar em determinados comprimentos de onda e a emissão de partículas se intensificam, produzindo perturbações na magnetosfera terrestre, no campo geomagnético, na ionosfera e na termosfera. A tempestade ionosférica é uma perturbação conseqüente das tempestades solares, se constituindo como uma resposta da ionosfera frente à ocorrência de uma tempestade geomagnética. As correntes elétricas geradas na ionosfera e a precipitação de partículas (por processos colisionais) são capazes de aquecer a termosfera em altas latitudes (VOLLAND, 1983).

Nas altas latitudes, a entrada de energia e penetração de partículas nas regiões aurorais influencia a dinâmica da ionosfera e da termosfera,

modificando padrões de ventos termosféricos, produzindo sistemas de correntes, campos elétricos e convecção do plasma ionosférico. Na região auroral, em condições geomagneticamente calmas, existe uma contínua produção de ionização por precipitação de partículas que aquece as regiões mais baixas da ionosfera. Este aquecimento pode aumentar e atingir latitudes mais baixas durante as tempestades geomagnéticas. A convecção do plasma, colidindo com os constituintes neutros, provoca o aumento na temperatura por aquecimento Joule da atmosfera superior.

A intensidade de uma tempestade geomagnética pode ser definida pelo índice geomagnético Dst (*Disturbance Storm Time*). O índice utiliza dados de quatro estações de magnetômetros de baixa latitude que representam as mudanças da corrente de anel. Seu cálculo é feito a partir de uma média longitudinal das diminuições do campo magnético  $\mathbf{H}$ , em unidades de nano Tesla ( $nT$ ). A diminuição é proporcional à energia cinética das partículas injetadas e aprisionadas na corrente de anel.

As fases de uma tempestade geomagnética são descritas através da variação do índice Dst. Em geral, ocorre primeiramente um acréscimo subido no índice, indicando a chegada de uma estrutura de choque interplanetária. A fase inicial da tempestade geomagnética se caracteriza por um aumento contínuo no índice Dst, devido à compressão das linhas de campo magnético. Em seguida, na fase principal, o índice Dst decresce, devido à deflexão da componente horizontal do campo ( $\mathbf{H}$ ). Na seqüência, surge a fase de recuperação, onde o componente  $\mathbf{H}$  do campo retorna às suas condições normais.

A classificação das tempestades quanto à intensidade dos seus efeitos na corrente de anel é feita através do índice Dst, sendo possível classificar as tempestades magnéticas em fracas, moderadas e intensas, de acordo com o valor do índice Dst.

## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

No Capítulo 3 são discutidos os principais aspectos relativos à emissão ótica em ampla faixa do espectro eletromagnético - ultravioleta, visível e infravermelho - conhecida como luminescência atmosférica. Esta emissão é mais um dos fenômenos radiativos que ocorrem na atmosfera terrestre. Outros fenômenos radiativos bastante conhecidos, mas de natureza distinta são os espalhamentos Rayleigh, Mie e Thomson, as nuvens noctilucentes e as auroras polares. A partir da detecção ótica (com imageadores e fotômetros) de determinadas linhas de emissões de luminescência é possível investigar os fenômenos que ocorrem na alta atmosfera, dentre eles as Bandas Claras, que são abordadas no Capítulo 4.

#### 3.1 – A luminescência atmosférica

A luminescência atmosférica é um fenômeno óptico da atmosfera terrestre caracterizado pela emissão de fótons pelos átomos ou moléculas excitados presentes principalmente entre 80 e 400 km de altitude. Ela é definida como uma radiação amorfa, continuamente emitida pela atmosfera de um Planeta (CHAMBERLAIN, 1961). Ao ocorrer o processo de relaxação energética, os constituintes excitados emitem uma radiação tênue e de extensa faixa espectral, que vai do ultravioleta ( $\lambda \sim 250 \text{ nm}$ ) ao infravermelho ( $\lambda \sim 4 \text{ }\mu\text{m}$ ) (CHAMBERLAIN E HUNTER, 1987). As camadas de emissão de aeroluminescência de algumas espécies ao longo da atmosfera são representadas na Figura 3.1.

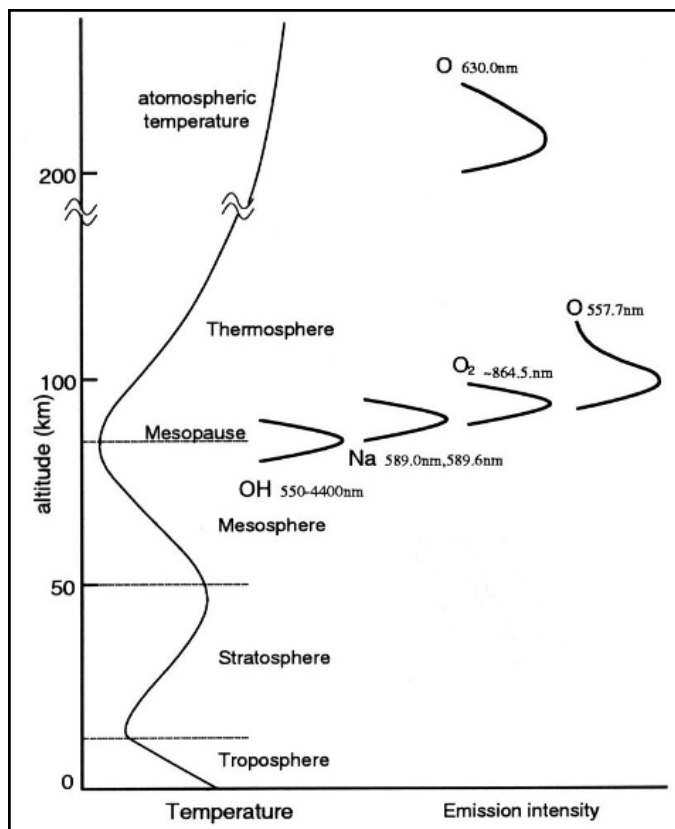


Figura 3.1: As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o Perfil de temperatura da atmosfera da Terra.

Fonte: Maekawa (2000).

A aurora e a luminescência atmosférica são fenômenos radioativos distintos que ocorrem na atmosfera terrestre. A aurora ocorre em altas latitudes e seu principal mecanismo de formação é o impacto de partículas altamente energéticas com os átomos e moléculas da atmosfera, provocando a excitação dos constituintes atmosféricos. Ao decaírem para o seu estado de menor energia, acontece a emissão de luz em diferentes comprimentos de onda. A radiação óptica das auroras pode ser vista a olho nu e possui estrutura definida. A luminescência atmosférica, no entanto, está presente em todas as latitudes, sendo causada principalmente pelas reações químicas entre os constituintes ionizados e neutros da atmosfera. Esta radiação é de baixa intensidade, não podendo ser observada a olho nu. A unidade utilizada em Aeronomia para medir a intensidade de luminescência é o Rayleigh (R), que corresponde à emissão por uma fonte isotrópica de  $10^6$  fótons por centímetro quadrado de coluna de ar, por segundo.



Através das observações da luminescência atmosférica é possível medir a densidade de partículas excitadas, as temperaturas cinéticas dos constituintes, além de identificar as espécies atômicas e moleculares presentes em cada faixa de altitude da atmosfera. Outros temas que podem ser estudados através desta técnica são: acoplamento entre termosfera e ionosfera; ondas atmosféricas; processos de excitação geradores de emissões óticas; processos químicos, iônicos e dinâmicos que regem a distribuição vertical dos constituintes atmosféricos; geração e propagação de irregularidades no plasma da região F da ionosfera noturna, o fenômeno de Bandas Claras, entre outros.

A observação ótica da luminescência atmosférica pode ser feita a partir de instrumentos instalados em solo, a bordo de satélites ou a bordo de foguetes. A escolha da localização irá depender da finalidade do estudo. Para o cálculo da taxa de emissão volumétrica e determinação do perfil da camada de emissão, utiliza-se a fotometria a bordo de satélites e foguetes. Entretanto, para se investigar as flutuações temporais das intensidades de emissão de luminescência, utiliza-se a fotometria em solo.

A luminescência atmosférica pode ser nomeada de acordo com o ângulo zenital da radiação solar, podendo ser diurna (*dayglow*), crepuscular (*twilight*) ou noturna (*nightglow*). Medições noturnas da aeroluminescência são as mais utilizadas, uma vez que a presença da radiação solar torna o espectro eletromagnético bastante complexo e com uma elevada intensidade de ruído.

O comprimento de onda da emissão de aeroluminescência depende do componente atmosférico emissor. A emissão ocorre através de linhas ou bandas espectrais. Existem três espécies importantes de emissões da aeroluminescência:

- a) as emissões do Oxigênio Atômico e Molecular;
- b) as bandas vibracionais e rotacionais da Hidroxila;
- c) as emissões de átomos metálicos, como o Sódio, Potássio, Magnésio e Cálcio.

Para os estudos em aeronomia são muito utilizadas as linhas espectrais do oxigênio atômico com comprimento de onda de 557,7 nm (linha verde), 630,0 nm (linha vermelha) e 777,4 nm; a linha espectral do dubleto de sódio (589,3 nm); as bandas de emissão do radical hidroxila (OH), conhecidas como bandas de Meinel, além das bandas de emissão do oxigênio molecular (O<sub>2</sub>).

Parte do espectro do *nightglow*, de 6000 a 9000 Ângstroms (1 Ângstrom =  $1 \times 10^{-10}$  m) é apresentado na Figura 3.2. Na figura se destacam as linhas de emissão do oxigênio atômico com comprimento de onda 630,0 nm e 636,4 nm e parte das bandas de emissão do OH e do O<sub>2</sub>.

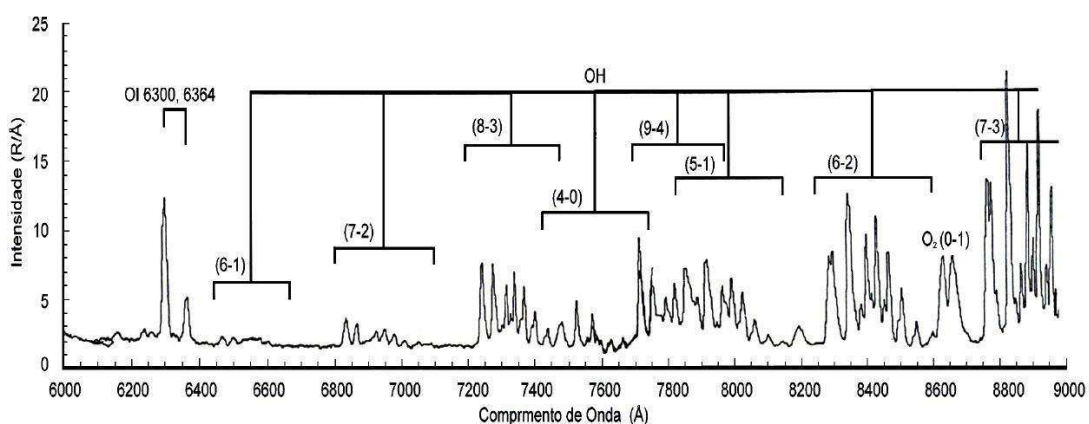


Figura 3.2: Espectro da aeroluminescência noturna de algumas emissões importantes.

Fonte: Adaptada de Johnston et al. (1993).

### 3.2 - As principais emissões de luminescência atmosférica da região F

Na região F, as linhas de emissão de luminescência atmosférica mais utilizadas para estudos da ionosfera são as do oxigênio atômico ionizado em 630,0 nm (com intensidade média de 300 R e altitude de emissão média entre 220 e 300 km); 557,7 nm (intensidade média de emissão de 60 R e altitude de emissão entre 220 e 300 km) e 777,4 nm (intensidade média de emissão de 20 R e altitude de emissão entre 300 e 400 km).

Nas Seções 3.3, 3.4 e 3.5 são apresentadas breves revisões da fotoquímica destas três linhas de emissão, com ênfase para a emissão do OI 630,0 nm, sobre a qual se fundamenta a pesquisa.

### 3.3 - A emissão OI 630,0 nm

A linha de emissão OI 630,0 nm (linha vermelha) advém de uma camada de emissão de cerca de 50 km de espessura localizada entre 220 e 300 km de altitude, abaixo do pico de densidade eletrônica da região F. É emitida pelo átomo de oxigênio excitado ao nível de energia  $^1D$ , que ao decair para o estado fundamental ( $^3P$ ) libera energia na forma de radiação eletromagnética com comprimento de onda de 630,0 nm.

As transições entre os níveis de energia do oxigênio atômico, com ênfase para a transição que emite radiação em 630,0 nm são apresentadas na Figura 3.3. Do nível  $^1D$  para o nível fundamental ocorrem três transições, resultando nas emissões nos comprimentos de onda 639,17 nm, 636,38 nm e 630,0 nm. Entretanto, apenas a 630,0 nm tem intensidade observável, em razão de sua maior probabilidade de transição. Na Figura, são mostradas também duas emissões no ultravioleta (297,23 e 295,83 nm) e a linha verde (557,7 nm).

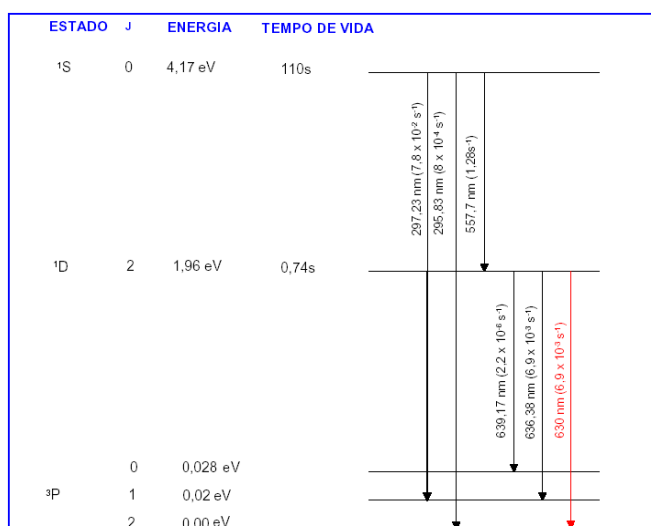


Figura 3.3: Diagrama de nível de energia para o oxigênio atômico.

Fonte: Adaptada de Krassovsky et al. (1962, p. 912).

A emissão OI 630,0 nm é a mais utilizada no estudo da química e dinâmica da região F da ionosfera noturna. A intensidade da luminescência nesse comprimento de onda varia conforme o movimento vertical do plasma ionosférico, aumentando ou diminuindo quando o plasma ionosférico move-se para baixo ou para cima, respectivamente. Em geral, a intensidade desta linha de emissão está entre aproximadamente 50 e 300 Rayleighs.

O mecanismo responsável pela produção de átomos excitados no estado  $^1D$  na região F é o da recombinação dissociativa de íons  $O_2^+$  (oxigênio molecular) e  $NO^+$  (óxido nítrico) com elétrons.

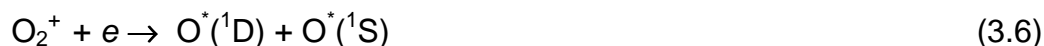
### 3.3.1 - O processo de recombinação dissociativa

A reação de recombinação dissociativa envolvendo duas espécies químicas X e Y, possui a seguinte configuração (BATES E NICOLET, 1950):



Onde  $X^*$  e  $Y^*$  representam o estado excitado de uma espécie química e  $e$  representa um elétron. Parcela da energia da reação de recombinação entre o íon molecular  $XY^+$  e o elétron é responsável por dissociar a molécula em dois átomos excitados.

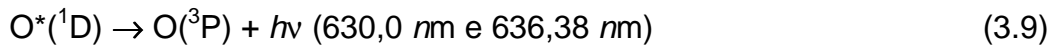
Na região F da ionosfera noturna, o processo de recombinação dissociativa que envolve o íon  $O_2^+$  pode gerar os seguintes produtos:



Por sua vez, o processo de recombinação dissociativa que envolve o íon  $\text{NO}^+$  pode gerar os seguintes produtos, na região F da ionosfera noturna:

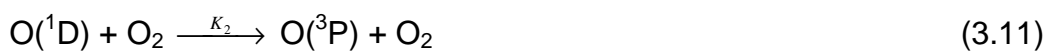


Ao decair de forma espontânea para o estado fundamental  $^3\text{P}$ , o átomo de oxigênio excitado ao nível  $^1\text{D}$  emite linhas discretas nos comprimentos de onda  $630,0 \text{ nm}$  e  $636,38 \text{ nm}$ , liberando energia eletromagnética segundo a equação:



onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência de emissão. Apenas a linha  $630,0 \text{ nm}$  tem intensidade observável, devido a sua maior probabilidade de transição.

O oxigênio excitado no nível  $^1\text{D}$  possui um tempo de vida menor ou igual a 110 segundos. Neste intervalo de tempo, ele pode ser desativado através de colisões (*quenching*) com elementos neutros da atmosfera, sem ocorrer a emissão de fótons (PETERSON E STEIGER, 1966). Os constituintes atmosféricos responsáveis pela desativação por *quenching* são principalmente o  $\text{O}_2$  e o  $\text{N}_2$ . As reações responsáveis por este processo são as seguintes (ABREU, 1986):



onde  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  representam os coeficientes das reações e possuem os seguintes valores:  $k_1 = 2,3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k_2 = 3,2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $k_3 = 8,0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (ABREU, et al., 1986).

Na região F da ionosfera noturna, o íon oxigênio molecular ( $\text{O}_2^+$ ) é produzido através do mecanismo de transferência de carga:



No caso do íon molecular óxido nítrico ( $\text{NO}^+$ ), a reação responsável por sua geração na região F da ionosfera noturna é:



A taxa de produção do íon oxigênio molecular por unidade de volume é a seguinte:

$$\frac{d[\text{O}_2^+]}{dt} = \gamma_1 [\text{O}^+][\text{O}_2] \quad (3.15)$$

A taxa de produção do íon molecular óxido nítrico é representada pela equação:

$$\frac{d[\text{NO}^+]}{dt} = \gamma_2 [\text{O}^+][\text{N}_2] \quad (3.16)$$

Os coeficientes das reações são calculados para uma temperatura típica de 1000 K, sendo:  $\gamma_1 = 2,5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $\gamma_2 = 2,0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (BITTENCOURT, 1972).

Segundo a reação de recombinação dissociativa do  $\text{O}_2^+$ , a intensidade da emissão OI 630,0 nm é dependente das concentrações de elétrons e do íon  $\text{O}_2^+$ . Durante a noite, a intensidade da emissão desta linha depende bastante

dos movimentos verticais da camada F ionosférica. Quando esta camada sobe, a concentração de  $O_2^+$  diminui, ocorrendo uma diminuição na produção de estados excitados no nível  $^1D$ . Como conseqüência, a taxa de emissão desta linha espectral será menor. Ao contrário, quando a camada F desce, a concentração do íon  $O_2^+$  aumentará, elevando a produção de estados excitados ao nível  $^1D$  e, conseqüentemente, aumentando a taxa de emissão do OI 630,0 nm.

### 3.3.2 - A taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm

A taxa de emissão volumétrica  $\epsilon_\lambda(z)$  corresponde ao número de fótons emitidos por unidade de volume por segundo de uma linha de emissão de determinado comprimento de onda  $\lambda$  em um nível de energia  $j$ . O valor da taxa de emissão volumétrica é dado pelo produto do coeficiente de transição de Einstein  $A_j$  e a densidade numérica  $n(j)$  dos átomos no nível  $j$  (BITTENCOURT, 1972):

$$\epsilon_\lambda(z) = (A_\lambda)n(j) \quad (3.17)$$

O coeficiente de Einstein é um parâmetro intrínseco de um átomo, representando a probabilidade de ocorrer a transição de um nível superior de energia para um nível inferior. O inverso da probabilidade de transição é chamado de tempo de vida da transição.

A taxa de emissão volumétrica integrada na direção vertical,  $J_\lambda$ , medida em Rayleighs, pode ser expressa por:

$$J_\lambda = 10^6 \cdot A_\lambda \int_0^\infty n(j) dz \quad (3.18)$$

Considerando que a emissão OI 630,0 nm é decorrente do decaimento do átomo de oxigênio do nível  $^1D$  para o estado fundamental ( $^3P$ ), é possível calcular  $n(^1D)$ , a densidade numérica do oxigênio excitado no nível  $^1D$ , a partir

da resolução da equação da continuidade. Os termos de produção de estados excitados são os seguintes:

$$P_D = K_{D1} \alpha_1 n(O_2^+) n_e + K_{D2} \alpha_2 n(NO^+) n_e + A_{557,7} n(^1S) \quad (3.19)$$

$$P_S = K_{S1} \alpha_1 n(O_2^+) n_e \quad (3.20)$$

Nas Equações 3.19 e 3.20,  $K_{D1}$  representa a probabilidade que o nível  $^1D$  tem de ser populado a partir de uma dada recombinação dissociativa de íons  $O_2^+$ ;  $K_{D2}$  representa a probabilidade que o nível  $^1D$  tem de ser populado a partir de uma dada recombinação dissociativa de íons  $NO^+$ ;  $A_{557,7}$  representa o coeficiente de transição de Einstein durante o decaimento do nível  $^1S$  para o nível  $^1D$  que ocasiona a emissão do fóton no comprimento de onda  $557,7 \text{ nm}$ ;  $K_{S1}$  representa a probabilidade que o nível  $^1S$  tem de ser populado a partir de uma dada recombinação dissociativa de íons  $O_2^+$ ;  $\alpha_1$  representa o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$ ;  $\alpha_2$  é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon  $NO^+$ .

Por sua vez, os termos de perda de estados excitados são os seguintes:

$$L_S = A_S n(^1S) \quad (3.21)$$

$$L_D = A_D n(^1D) + d_D n(^1D) \quad (3.22)$$

Nas Equações 3.21 e 3.22,  $A_S$  representa o coeficiente de Einstein para a transição  $^1S - ^1P$ ;  $A_D$  representa o coeficiente de Einstein para a transição  $^1D - ^3P$ ;  $d_D$  representa o coeficiente de desativação colisional, dado por  $d_D = S_D(O_2)n(O_2) + S_D(N_2)n(N_2)$ , sendo  $S_D(O_2)$  e  $S_D(N_2)$  as taxas de reação específicas para a desativação colisional com  $O_2$  e  $N_2$ , respectivamente.

Os termos de difusão e deriva, representados pelo termo de divergência na equação da continuidade, podem ser ignorados, uma vez que são muito pequenos se comparados aos termos das taxas de produção e perda. Portanto, a equação da continuidade é escrita da seguinte forma:



$$\frac{\partial n}{\partial t} = P - L \quad (3.23)$$

Na condição de equilíbrio fotoquímico, quando as taxas de produção ( $P_j$ ) e perda ( $L_j$ ) se equivalem:

$$P_j - L_j = 0 \quad (3.24)$$

Depois de algumas manipulações algébricas, a densidade numérica do oxigênio atômico excitado no nível  $^1D$  tem a seguinte forma:

$$n(^1D) = \frac{k_D}{A_D} \cdot \frac{1}{(1 + d_D / A_D)} \cdot \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}} \quad (3.25)$$

Na Equação 3.25,  $k_D$  representa o número efetivo de átomos O ( $^1D$ ) produzidos por recombinação  $O_2^+$ ;  $\gamma_1$  representa o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $O_2^+$ ;  $\gamma_2$  representa o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do  $NO^+$ ;  $n(O_2)$  representa a densidade numérica do oxigênio molecular;  $n(e)$  representa a densidade numérica de elétrons;  $n(N_2)$  representa a densidade numérica do nitrogênio molecular;  $d_D$  representa o coeficiente de desativação colisional.

A determinação da taxa de emissão volumétrica da transição  $^1D \rightarrow ^3P$ , responsável por emitir fótons com comprimento de onda de 630,0 nm, é feita multiplicando-se a densidade numérica  $n(^1D)$ , expressa pela Equação 3.25, pelo coeficiente de transição de Einstein  $A_{630,0}$ :

$$\epsilon_{630,0}(z) = (A_{630,0}) \cdot n(^1D) \quad (3.26)$$

A taxa de emissão volumétrica integrada na vertical do OI 630,0 nm, em Rayleighs, é expressa pela seguinte equação:

$$J_{630,0} = 10^{-6} \int \varepsilon_{630,0}(z) \cdot dz \quad (3.27)$$

Reescrevendo, tem-se:

$$J_{630,0} = 10^{-6} \cdot 0,76 \int \frac{K_D}{(1 + d_D / A_D)} \left( \frac{\gamma_1 n(O_2) n(e)}{1 + \frac{\gamma_1 n(O_2)}{\alpha_1 n(e)} + \frac{\gamma_2 n(N_2)}{\alpha_2 n(e)}} \right) dz \quad (3.28)$$

Na Equação 3.28,  $(A_{630,0}) / A_D = 0,76$  e  $k_D = 0,2$  (PETERSON E VANZANDT, 1969).

De acordo com a Equação 3.28, a taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm é diretamente proporcional à concentração eletrônica e à concentração do oxigênio molecular. Este fato fundamenta a acentuada dependência da intensidade da emissão em relação aos movimentos verticais da ionosfera. Quando a camada ionosférica se desloca para alturas superiores, a concentração eletrônica na região de recombinação diminui e, conseqüentemente, ocorre a diminuição da intensidade da emissão. Por outro lado, quando a camada ionosférica desce, acontece o aumento da intensidade da emissão.

### 3.4 - A emissão OI 557,7 nm

A linha de luminescência OI 557,7 nm (linha verde) possui duas fontes na atmosfera: uma camada de emissão entre 90 e 110 km de altitude, na região E da ionosfera e outra entre 220 e 300 km de altitude, na região F ionosférica. A linha verde é resultado da transição do estado  $^1S$  para o estado  $^1D$  do oxigênio atômico.

O processo de produção do oxigênio atômico excitado O ( $^1S$ ) na região F é a recombinação dissociativa do íon oxigênio molecular com elétrons. Este mecanismo é o mesmo que gera a linha vermelha. Sua descrição detalhada encontra-se na Seção 3.3.1. Na região equatorial e de baixas latitudes, uma

fração majoritária da emissão da linha verde se deve à processos de recombinação dissociativa na região F.

O tempo de vida da transição do estado  $^1S$  para  $^1D$  na região F é de aproximadamente 0,74 segundos (PETERSON E STEIGER, 1966). As reações que envolvem a emissão do OI 557,7 nm na região F da ionosfera são as seguintes:



Nas Equações 3.29 e 3.30 e 3.31,  $\gamma_1$ ,  $\alpha_s$  e  $A_s$  representam os coeficientes das reações.

Em médias latitudes, prevalecem as emissões de OI 557,7 nm decorrentes da recombinação do oxigênio atômico provenientes da região entre 90 e 110 km de altitude. As observações desta emissão feitas a partir do solo, em qualquer latitude, monitoram a intensidade integrada das duas fontes (região E e F da ionosfera). A intensidade média desta emissão é de aproximadamente 60 Rayleighs.

A taxa de emissão volumétrica da linha de emissão OI 557,7 nm na região F da ionosfera pode ser escrita como (TAKAHASHI et. al., 1990; SOBRAL et. al., 1993):

$$\epsilon_{557,7}(z) = (A_{557,7})n(^1S) \quad (3.32)$$

$$\epsilon_{557,7}(z) = A_{557,7} \frac{5 \times 10^{-2} \Theta n(e) \beta n(O_2)}{k_1 n(O) + k_2 n(O_2) + k_3 (N_2) + A_s} \quad (3.33)$$

Nas Equações 3.32 e 3.33,  $A_{557,7}$  representa o coeficiente de transição de Einstein durante o decaimento do nível  $^1S$  para o nível  $^1D$ , que ocasiona a emissão do fóton no comprimento de onda  $557,7 \text{ nm}$ ; na Equação 3.33,  $\Theta$  representa a razão entre a densidade do íon  $O^+$  e elétrons;  $\beta = 2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $k_1 = 8 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $k_2 = 3,2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $k_3 = 2,3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $A_S = 1,35 \text{ s}^{-1}$ .

### 3.5 - A emissão OI 777,4 nm

A linha de emissão OI 777,4 nm é resultado da transição do estado  $^5P$  para o estado  $^5S$  do oxigênio atômico, sendo gerada em todas as alturas da ionosfera, com um máximo de intensidade de emissão na região do pico de densidade eletrônica da região F, em torno de 350 km de altitude. Sua intensidade depende da concentração eletrônica ambiente, sendo relativamente fraca, da ordem de 20 Rayleighs. Entretanto, durante a atividade solar máxima, período em que a densidade eletrônica da ionosfera é maior, sua intensidade se eleva.

Os mecanismos responsáveis pela produção do estado excitado  $^5P$  são a recombinação radiativa e a recombinação íon-íon.

#### 3.5.1 - O processo de recombinação radiativa

O processo de recombinação radiativa consiste na captura de elétrons por íons Atômicos  $X^+$ , havendo emissão de fótons com energia  $h\nu$ . A reação de recombinação radiativa é a seguinte:



onde  $X^*$  representa o átomo excitado pela energia excedente na reação.

No processo de recombinação radiativa, o oxigênio atômico ionizado e um elétron se recombinam radiativamente, resultando na produção de um átomo de oxigênio excitado e na emissão de um fóton:



O átomo de oxigênio atômico excitado e o fóton emitido dividem a energia de ionização da recombinação do íon do oxigênio atômico. Em seguida ocorre um decaimento em cascata de transições para o estado fundamental, a menos que o átomo seja desativado por colisão. Ao ocorrer o decaimento do nível  $^5P$  para o nível  $^5S$ , o excesso de energia será emitido na forma de radiação eletromagnética com comprimento de onda de  $777,4 \text{ nm}$ , conforme a seguinte reação:



A taxa de emissão volumétrica integrada  $J_\lambda$  de uma linha de emissão com comprimento de onda  $\lambda$ , gerada a partir do mecanismo de recombinação radiativa é dada por:

$$J_\lambda = \int \alpha_\lambda n(O^+) n(e) dz \quad (3.37)$$

Supondo que na ionosfera

$$n(e) = n(O^+) + n(O_2^+) + n(NO^+) + \dots \quad (3.38)$$

E considerando que na região F

$$n(O^+) \gg n(O_2^+) + n(NO^+) + \dots \quad (3.39)$$

A partir das expressões das Equações 3.38 e 3.39, obtêm-se que  $n(e) = n(O^+)$ . Logo, a intensidade da emissão no mecanismo de recombinação radiativa é dependente da integral do termo  $n(e)^2$ , de acordo com a Equação:

$$J_\lambda = \int \alpha_\lambda n(e)^2 dz \quad (3.40)$$

A intensidade de emissão volumétrica integrada da linha OI 777,4 nm, produzida pelo processo de recombinação radiativa, em Rayleighs, é dada por:

$$J_{777,4} = 10^6 \int \alpha_{777,4} n(e)^2 dz \quad (3.41)$$

onde  $\alpha_{777,4} = 5 \times 10^{-13} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$  (TINSLEY, et al., 1973).

De acordo com a Equação 3.41, a intensidade da emissão OI 777,4 nm produzida pelo mecanismo de recombinação radiativa, não depende da altura da camada F. Segundo Hanson (1969), a concentração eletrônica máxima  $n(e)_m$ , está relacionada com foF2, a máxima frequência refletida, através da equação:

$$n(e)_m = 1,24 \cdot 10^4 (\text{foF2})^2 \quad (3.42)$$

Na Equação 3.43, a dimensão de foF2 é megahertz e de  $n(e)_m$  é  $\text{cm}^{-3}$ .

### 3.5.2 - O processo de recombinação íon-íon

A recombinação íon-íon é o outro mecanismo capaz de produzir os estados excitados que dão origem à emissão OI 777,4 nm. O mecanismo envolve a mútua neutralização de íons positivos e negativos, sendo representado através da seguinte reação:



A reação 3.40 é conhecida como reação de neutralização, onde  $k_E$  representa a energia cinética no centro de massa do sistema.

A recombinação íon-íon é um mecanismo alternativo para produção de estados excitados que dão origem à emissão OI 777,4 nm. A recombinação íon-íon na região F da ionosfera é a seguinte:



A reação descrita na Equação 3.41 produz átomos de oxigênio excitado no estado  $^5\text{P}$  que, através de um processo de cascata rápida, decai para o estado  $^5\text{S}$ , emitindo a linha OI 777,4 nm.

A intensidade de emissão volumétrica integrada (em Rayleighs) da linha OI 777,4 nm, gerada a partir do mecanismo de recombinação íon-íon é dada por:

$$J_{777,4} = 10^{-6} \beta_{777,4} \int \frac{k_1 k_2 n(\text{O}) n(\text{e})^2}{k_2 n(\text{e}) + K_3 n(\text{O})} dz \quad (3.45)$$

Na Equação 3.42,  $k_1 = 1,3 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k_2 = (1,5 \pm 0,5) \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k_3 = 1,4 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\beta_{777,4} = 0,42$  (MASSEY, 1969).

De acordo com as Equações 3.41 e 3.45, a intensidade da emissão OI 777,4 nm depende, sobretudo, da concentração eletrônica, apresentando emissões mais acentuadas em períodos de alta atividade solar, quando a concentração eletrônica da região F pode se elevar.





## CAPÍTULO 4

### O MÁXIMO DE TEMPERATURA À MEIA-NOITE ASSOCIADO ÀS BANDAS CLARAS

O Máximo de Temperatura à Meia-noite (MTM) é um fenômeno da alta atmosfera terrestre (região da termosfera) de baixas latitudes. Este fenômeno é acompanhado de um aumento da pressão e uma redução ou reversão da velocidade dos ventos neutros meridionais, que sopram normalmente em direção ao equador. No entanto, quando a reversão ocorre, passam a soprar em direção aos pólos. O Máximo de Temperatura à Meia-noite é uma anomalia na temperatura neutra que afeta diretamente o comportamento noturno da termosfera em regiões de baixas latitudes. Entretanto, apesar da importância destes efeitos, o mecanismo de geração do fenômeno ainda não é bem compreendido (COLERICO; MENDILLO, 2002).

Na literatura, a assinatura espaço-temporal do fenômeno de MTM é designada de forma geral como *Brightness Wave* ou Banda Clara. A Banda Clara se caracteriza por um acréscimo na taxa de emissão de luminescência, sendo monitorada através da observação das emissões de luminescência da região F ionosférica, utilizando-se imageadores *all-sky* e fotômetros. No imageador *all-sky*, a assinatura da Banda Clara surge como uma região de brilho que se movimenta em direção aos pólos. As regiões de brilho representam a elevação na taxa de emissão de luminescência atmosférica.

Os principais estudos envolvendo o fenômeno de Máximo de Temperatura à Meia-noite são sumarizados na Seção 4.1. O mecanismo de geração do fenômeno é abordado na Seção 4.2.

#### **4.1 - Histórico da investigação do fenômeno de Máximo de Temperatura à Meia-noite (MTM)**

A primeira detecção de um efeito relacionado ao MTM foi realizado por Greenspan (1966), através de um fotômetro medindo a emissão do OI 630,0 nm, instalado a bordo do navio U.S.N.S. Croatan que viajava pela costa do

pacífico na América do Sul. O fotômetro detectou um aumento na emissão de luminescência atmosférica próximo da meia-noite local, ao longo do deslocamento do navio (de 15° N até 15 °S). No entanto, como nenhum parâmetro adicional da camada F da ionosfera se encontrava disponível, o aumento da emissão não pôde ser ligado ao deslocamento da camada F para baixo, devido à ação dos ventos neutros meridionais ou do aumento da temperatura neutra.

Nelson e Cogger (1971), utilizando dados do radar de espalhamento incoerente de Arecibo (18,3°N; 66,7°O) reportaram a descida da camada F relacionada ao aumento da emissão do OI 630,0 nm. Behnke e Harper (1973) atribuíram este deslocamento a uma inversão da direção de propagação do vento neutro, que passava a soprar na direção do pólo. O vento soprando na direção do pólo é responsável por mover o plasma para baixo, ao longo das linhas de campo magnético, até altitudes em que este plasma poderá sofrer recombinação dissociativa, produzindo acréscimo na emissão de aeroluminescência OI 630,0 nm.

A primeira medida *in situ* do fenômeno de máxima temperatura à meia-noite foi feita pelo *Neutral Atmosphere Temperature Instrument* – NATE, capaz de medir a temperatura neutra a bordo do satélite *Atmosphere Explorer-E*. O instrumento era capaz de medir simultaneamente os valores de temperatura neutra e velocidade do vento neutro meridional. Os dados obtidos pelo satélite foram analisados por Spencer et al. (1979), revelando um recorrente aumento da temperatura neutra, acompanhado de um movimento dos ventos meridionais no sentido dos pólos, próximo da meia-noite local.

Mayr et al. (1979) propuseram um modelo de geração do MTM, em que o fenômeno seria resultado das interações entre marés ascendentes na baixa atmosfera e marés semi-diurnas na termosfera. O mecanismo é responsável por transportar energia para o lado noturno da atmosfera, onde um máximo de temperatura local pode se formar.

O trabalho de Herrero e Spencer (1982) caracterizou a dependência sazonal e a distribuição latitudinal do MTM, utilizando mapas bidimensionais de dados de temperatura neutra média, obtidos pelo NATE dentro de um intervalo de latitude geográfica de  $-20^{\circ}$  a  $+20^{\circ}$ . Foi observado que geralmente o MTM se forma na região do equador geográfico e se propaga em direção aos pólos. Duas regiões adicionais de máximo de temperatura se desenvolvem a aproximadamente  $-15^{\circ}$  e  $+15^{\circ}$  de latitude. Durante o equinócio, essas regiões são simétricas em relação ao equador.

Herrero et al. (1983) explicaram que a dependência sazonal se deve à variação sazonal das componentes semidiurnas e terdiurnas das marés da baixa atmosfera. No hemisfério de verão, ambas as componentes atuam simultaneamente (em aproximadamente igual magnitude), reforçando a característica do MTM. No hemisfério de inverno, a componente terdiurna é desprezível, atuando apenas a componente semidiurna, o que faz com que o MTM seja mais fraco durante o inverno.

Bamgboye e McClure (1982) utilizaram o radar instalado em Jicamarca ( $12^{\circ}$  S;  $77^{\circ}$  O) no Peru para investigar a dependência sazonal do MTM através de medidas de temperatura de elétrons e íons. Os resultados obtidos foram consistentes com as descobertas de Herrero e Spencer (1982).

Sobral et al. (1978) e Herrero e Meriwether (1980) utilizaram fotômetros para observar os acréscimos da emissão da aeroluminescência do OI  $630,0 \text{ nm}$  (assinatura espacial do MTM) propagando-se de sudeste para noroeste próximo à meia-noite local em Arecibo ( $18,2^{\circ}$ N;  $66,4^{\circ}$ O), Porto Rico. As características observadas se devem ao padrão de vento meridional associado a um MTM.

Sobral et. al. (1978) relataram que os acréscimos de emissão de luminescência passaram sobre Arecibo dentro de um intervalo de tempo de 2 a 3 horas com uma velocidade de fase média aparente de 300 m/s. A direção de propagação ilustra o movimento do MTM e seu bojo de pressão para longe do equador. O estudo de Sobral et. al. (1978) abrangeu uma faixa de latitude entre  $14^{\circ}$ N e

24°N. O limite superior dos efeitos do MTM é ainda desconhecido. Entretanto, é concebível que possa haver conseqüências deste fenômeno de baixas latitudes em médias latitudes do globo. Assim sendo, ampliar a faixa de latitude das observações faz-se necessário para definição do intervalo de ocorrência deste fenômeno.

Colerico et al. (1996) procederam as primeiras observações da assinatura espacial do MTM utilizando um imageador *all-sky* monitorando a luminescência do OI 630,0 nm. O sistema foi instalado em Arequipa (16,2° S; 71,35° O), Peru. O trabalho reportou um recorrente acréscimo da emissão do OI 630 nm propagando-se de nordeste para sudoeste dentro do campo de visão do imageador, próximo da meia-noite local. Estes acréscimos, embora observados em todas as estações, ocorreram predominantemente nos meses de equinócio. Os autores nomearam este fenômeno como *Midnight Brightness Wave*, em tradução livre para o Português, Banda Clara da meia-noite.

Em média, os eventos de Banda Clara passaram sobre o campo de visão do imageador com uma velocidade de fase entre 200 e 400 m/s, o que é consistente com os resultados de Sobral et al. (1978).

Um interferômetro *Fabry-Perot* instalado juntamente com o imageador, forneceu medidas simultâneas de temperatura e velocidade de propagação dos ventos neutros. Os dados revelaram uma forte correlação entre a passagem de uma Banda Clara e o aumento da temperatura neutra entre 100 e 200 K, além de uma diminuição e até mesmo reversão (para o sentido dos pólos) da velocidade de propagação do vento neutro meridional. Os autores concluíram que a Banda Clara foi resultado de um vento meridional que induziu o colapso da meia-noite da região F, associado com o Máximo de Temperatura à Meia-noite, o que torna a análise da Banda Clara uma forma útil para estudos bidimensionais do MTM.

No equador magnético, as linhas de campo horizontais impedem que o plasma da camada F se mova para baixo pela ação dos ventos neutros. A ausência do fenômeno de Bandas Claras no equador apóia a teoria de que os ventos

neutros tem papel dominante na formação desses eventos, em detrimento dos campos elétricos (COLERICO; MENDILLO, 2002). Um sistema de imageamento adicional foi instalado na localidade de *El Leoncito* (31,8°S; 69°O), Argentina, estendendo a cobertura dos eventos de Bandas Claras até 39°S. Colerico e Mendillo (2002) observaram eventos de Banda Clara atravessando o campo de visão deste imageador em direção ao sul, o que aumenta o limite superior conhecido para a influência do MTM no hemisfério sul.

O trabalho de Batista et al. (1997) investigou o efeito do MTM sobre os ventos neutros em Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O), obtendo a velocidade dos ventos meridionais através de medidas do parâmetro hmF2 feitas por ionossonda. Através deste estudo, constatou-se que durante o solstício de dezembro, normalmente o vento neutro que soprava em direção ao equador, tinha sua direção invertida, passando a soprar em direção aos pólos por algumas horas, entre 22:00 e 01:00 TL. Os dados para o solstício de junho revelaram entre 01:00 e 03:00 TL, um acréscimo na velocidade do vento, que já se movia em direção ao pólo. Segundo os autores, as variações sazonais observadas no padrão de circulação termosférica global se deveram ao MTM. No período de equinócio, entretanto, nenhum efeito relacionado ao MTM foi observado sobre a circulação dos ventos neutros, o que contrasta com as descobertas de Colerico et al. (1996) próximo de 70° O no setor dos Estados Unidos e de Hari and Krishna Murthy (1995) no setor indiano. Ambos observaram uma reversão dos ventos meridionais na direção dos pólos, próximo à meia noite local durante o equinócio. Tal contraste sugere uma possível dependência longitudinal das características do MTM. (COLERICO; MENDILLO, 2002).

Os estudos conduzidos por Colerico et al. (1996) no setor peruano encontraram a relação entre o MTM, vento meridional e a descida da camada F igual àquela encontrada no setor indiano por Sastri e Rao (1994) e Sastri et al. (1994). As observações de Sastri e Rao (1994) foram feitas durante março e abril de 1992. O trabalho comparou medidas de temperatura neutra através de um Interferômetro Fabry-Perot instalado em Kavalur (12,5°N; 79°L) e valores de

$h_{\text{máx}}$  obtidos por uma ionossonda instalada em Ahmedabad (23°N; 72°L) a fim de correlacionar aumentos de temperatura próximos à meia-noite com o movimento descendente da camada F ionosférica. Utilizando os mesmos instrumentos, Sastri et al. (1994) examinaram medidas de temperatura através do interferômetro e de ventos meridionais derivados de dados de ionossonda para relacionar a ocorrência de um MTM com reversões na direção do vento neutro, passando a soprar em direção ao pólo. Estas medidas foram feitas durante o mês de dezembro de 1992, compreendendo o período de solstício.

O trabalho de Rao e Sastri (1994) encontrou um intervalo de amplitude de temperatura do MTM entre 80 e 570K para o setor indiano. Este valor é maior do que o encontrado no setor peruano (entre 100 e 200K). Os autores sugerem que esta diferença longitudinal na amplitude do MTM pode se dever a variações locais no arraste iônico, resultado da dependência da densidade eletrônica da região F em relação à separação entre o equador geográfico e magnético.

Pimenta et. al. (2010), utilizando imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, reportaram pela primeira vez eventos de Banda Clara no setor brasileiro. Segundo os autores, o sentido majoritário de deslocamento das estruturas é de norte para sul, com alguns casos de deslocamento no sentido nordeste para sudoeste. As velocidades médias de deslocamento calculadas estão entre 200 e 400 m/s. Dados de fotômetro revelaram um acréscimo nas emissões OI 630,0 nm e OI 557,7 nm durante a passagem da Banda Clara. A emissão OI 777,4 nm sofreu um pequeno decréscimo em sua intensidade.

Observações feitas em diferentes longitudes demonstram que as características do MTM, como a amplitude, apresentam possíveis variações longitudinais. Considerando que existe uma dependência longitudinal dos parâmetros termosféricos/ionosféricos, é plausível que as assinaturas espaciais do MTM variem também com a longitude. Entretanto, para aumentar a compreensão deste fenômeno, tanto em escala local como global, é necessário um maior monitoramento do mesmo, em conjunto com os parâmetros afetados da região F em diferentes longitudes.

## 4.2 – Mecanismo de maximização da temperatura à meia-noite

O trabalho de Mayr et al. (1979) propõe o mecanismo de geração do Máximo de Temperatura à Meia-noite. Segundo os autores, o MTM surge a partir das interações entre marés ascendentes oriundas da baixa atmosfera, produzidas por aquecimento solar e marés semi-diurnas na termosfera, formadas através do acoplamento íon-partícula neutra. Este mecanismo transporta energia para o lado noturno da atmosfera, onde um máximo de temperatura local pode surgir. O diagrama de blocos da Figura 4.1 ilustra o mecanismo de geração.

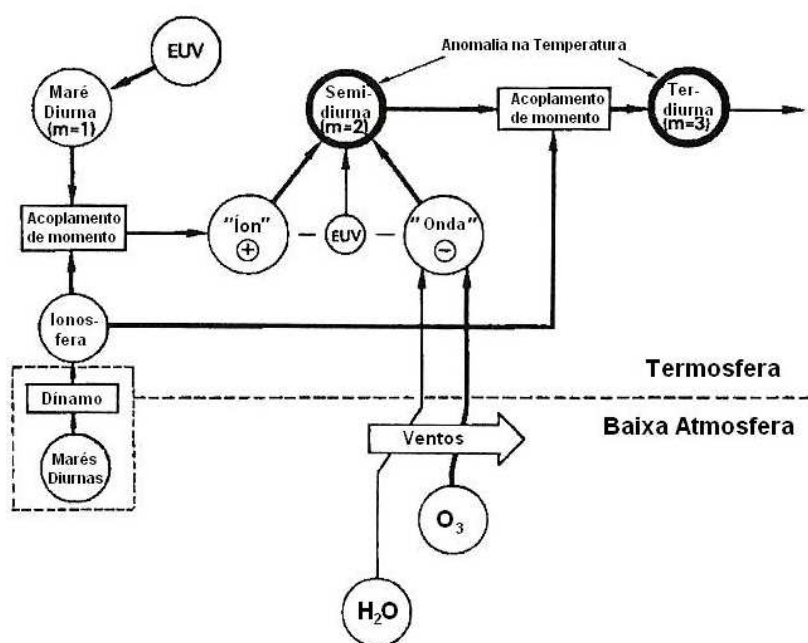


Figura 4.1: Diagrama de blocos que esquematiza o mecanismo de geração do Máximo de Temperatura à Meia-noite.

Fonte: Adaptada de Mayr et al. (1979).

As marés atmosféricas são oscilações em escala global, produzidas pela combinação das ações gravitacionais do Sol e da Lua sobre a Terra e pela ação térmica do Sol, aquecendo a atmosfera. Os períodos das marés são sub-harmônicos de um dia solar ou lunar. A maré atmosférica diurna é essencialmente formada a partir da absorção da radiação solar no comprimento de onda do Extremo Ultra Violeta (EUV).

As marés ascendentes da baixa atmosfera são induzidas por mecanismos térmicos, devido ao aquecimento da atmosfera pela radiação solar. O aquecimento ocorre a partir da absorção de radiação infravermelha pelo vapor d'água (H<sub>2</sub>O) na troposfera e absorção de radiação ultravioleta pelo ozônio (O<sub>3</sub>) na estratosfera e na baixa mesosfera.

A maré semi-diurna da alta termosfera possui três componentes que atuam em sua constituição: as ondas provenientes da baixa atmosfera, a radiação solar na faixa do EUV e o acoplamento de *momentum* entre os ventos associados à maré diurna e o plasma da ionosfera. A contribuição da radiação EUV é menor, de maneira que as outras duas componentes dominam a formação das marés semi-diurnas (MAYR et al.,1979).

O período de ocorrência do fenômeno de MTM é bastante variável. Em baixas latitudes, em geral é observado entre 22:00 TL e 03:00 TL, predominantemente em horários próximos à meia-noite local. A variabilidade da maré semi-diurna contribui significativamente para a variação de ocorrência do MTM (MAYR et al.,1979).

A contribuição de marés terdiurnas (e de outros modos de marés) para a formação do MTM necessita ser investigada. No caso de marés terdiurnas, a contribuição do aquecimento por EUV e ondas de marés provenientes da baixa atmosfera é pequena. O processo de formação dominante é o acoplamento de *momentum* associado ao arraste iônico na interação do plasma ionosférico com os ventos associados a marés semi-diurnas.



## CAPÍTULO 5

### INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Na pesquisa são utilizados dados de um imageador *all-sky* instalado no Observatório de Luminescência do INPE, em Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O) de abril de 1987 a junho de 2000. Este sistema fez parte de uma cooperação científica entre o Grupo de Luminescência Atmosférica do INPE e o grupo do Dr. Michael Mendillo da Universidade de Boston, EUA.

A assinatura espacial de uma Banda Clara detectada por um imageador *all-sky* consiste de uma região de maior intensidade de emissão (região clara na imagem), que se propaga no sentido norte-sul e, em certos eventos, de nordeste para sudoeste, sobre o campo de visão de um equipamento instalado no setor brasileiro. Essas regiões claras representam uma taxa de emissão de luminescência atmosférica mais elevada.

De forma complementar, são utilizados dados obtidos com o fotômetro Multicanal 2 (Multi 2) e por uma digissonda, ambos instalados em Cachoeira Paulista. O funcionamento dos equipamentos é descrito nas Seções 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 e 5.5.

#### 5.1 - O imageamento ótico

No início do século XX, Yntema confirmou a existência da luminescência na atmosfera superior a partir de estudos fotométricos. (CHAMBERLAIN, 1961). A esta altura, as técnicas fotográficas convencionais já detectavam o brilho proveniente das auroras. No entanto, a emissão muito menos intensa da luminescência atmosférica era mais difícil de ser registrada. Só a partir da década de 70, estas emissões passaram a ser monitoradas, utilizando-se filmes fotográficos mais sensíveis.

Em janeiro de 1975, com a finalidade de investigar as emissões na região auroral, o primeiro sistema de imageamento *all-sky* iniciou sua operação em Manitoba, Canadá (MENDE E EATHER, 1976). A fim de estudar os efeitos das irregularidades no plasma da região F ionosférica na transmissão de sinais de

satélite, Weber et. al (1978) utilizou um imageador *all-sky* do OI 630,0 nm para realizar uma campanha de observações a bordo de um avião voando sobre a costa oeste da América do Sul. As primeiras observações em solo na região tropical, com um sistema de imageamento *all-sky*, foram executadas na Ilha de Ascencion (7,95°S; 14,38°O) por Mendillo et. al (1982) no ano de 1981. Este sistema monitorava a emissão do OI 630,0 nm, gravando as imagens em filmes convencionais de 35 mm.

## 5.2 - O imageador *all-sky*

O imageador *all-sky* é um instrumento ótico empregado no monitoramento espacial e temporal das emissões de luminescência atmosférica. O equipamento utilizado na pesquisa é composto basicamente de um sistema ótico e uma câmara convencional, sendo capaz de detectar variações da luminescência noturna e registrá-las através de imagens em filmes de 35 milímetros.

Um imageador pode detectar a variação de luminescência em diferentes comprimentos de onda, utilizando filtros de interferência ótica para selecionar o comprimento de onda desejado. Sendo assim, este instrumento é capaz de monitorar diferentes camadas da atmosfera. No caso desta pesquisa, é feito o monitoramento da camada de emissão do OI 630,0 nm. Esta técnica é bastante útil para a investigação de fenômenos ionosféricos que ocorrem entre 220 e 300 km de altitude.

O imageador utilizado nesta pesquisa é constituído basicamente por uma lente tipo *all-sky*, um sistema telecêntrico de lentes, filtro de interferência, um sistema de reimageamento e uma câmara fotográfica convencional para gravar as imagens.

Na parte superior do imageador localiza-se a lente com campo de visão de 180 graus, denominada *all-sky*. Essa lente proporciona uma imagem completa do céu local, mas devido à sua forma curva, introduz efeitos de curvatura e compressão nas bordas das imagens. Em seguida, como parte do sistema

telecêntrico, o imageador possui uma lente de campo que direciona os feixes de luz, fazendo com que todos incidam na lente colimadora. Esta lente, por sua vez, é responsável por tornar os feixes de luz paralelos ao eixo do sistema ótico. Depois de passarem pelo sistema telecêntrico, os raios de luz alcançam o filtro de interferência ótica, responsável por selecionar o comprimento de onda da emissão a ser medida. A Figura 5.1 ilustra o equipamento. Após atravessar o filtro, os feixes de luz monocromáticos passam por uma lente objetiva capaz de direcionar os feixes para que esses alcancem o intensificador de imagem. Em seqüência, os raios de luz alcançam a câmera fotográfica, onde são novamente colimados e depois disso, uma lente objetiva direciona os feixes sobre os filmes de 35 mm, onde a imagem é projetada.

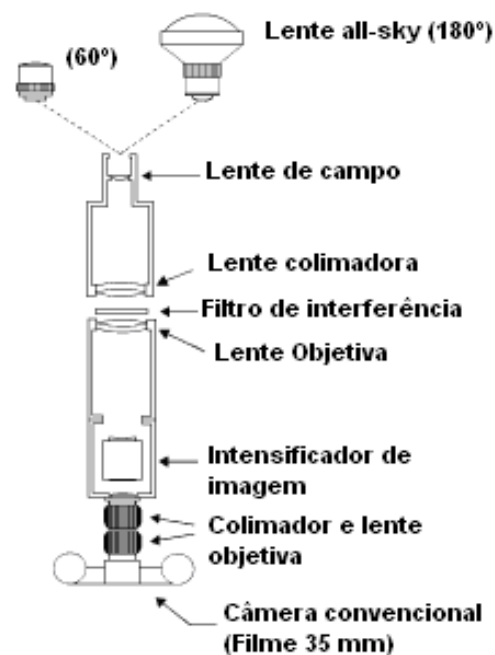


Figura 5.1: Ilustração do imageador all-sky utilizado neste trabalho.

Fonte: Adaptada de Mendillo et al (1982).

O sistema intensificador de imagem é formado por um tubo fechado a vácuo que amplifica sinais de imagem a um nível observável. Internamente, contém um fotocátodo que recebe os fótons incidentes da imagem original e os converte em fotoelétrons por efeito fotoelétrico. Os fotoelétrons são acelerados através de um campo elétrico e se multiplicam ao se chocarem com uma placa

muito fina de vidro condutivo contendo milhões de pequenos orifícios. Quando um elétron entra em um destes canais, ele colide com a parede liberando elétrons adicionais. As colisões subseqüentes produzem mais elétrons, que ao serem projetados sobre o filme irão reproduzir a imagem original de forma intensificada. O intensificador de imagem é necessário, pois a intensidade da emissão da luminescência atmosférica é muito baixa.

O filtro de interferência ótica do sistema possui 4 polegadas de diâmetro e largura de banda passante de 1,35 nm, centrada no comprimento de onda de 630,0 nm. O registro das imagens monocromáticas é feito em intervalos de 20 minutos, com tempo de exposição de 32 segundos.

A operação do imageador *all-sky* é feita em noites em que o céu não esteja encoberto e não exista presença relevante de fontes externas de luz, como luzes de cidades ou presença de lua refletindo a luz solar. Por esse motivo, o período de observação se restringe a cerca de quinze dias por mês, em torno do período de lua nova.

Os imageadores *all-sky* atuais não possuem câmera fotográfica convencional. O dispositivo foi substituído pelo sensor CCD, acrônimo em inglês para *Charge Coupled Device*. Estes novos imageadores têm suas imagens gravadas digitalmente no disco rígido de um microcomputador. Possuem maior resolução temporal e eficiência quântica, além de menor nível de ruído nas imagens, em relação aos imageadores convencionais. O sensor CCD é um detector dividido em uma grade de pixels altamente sensíveis à luz e constituídos de um material semicondutor, cujo princípio de funcionamento está baseado no efeito fotoelétrico. Ao incidirem sobre os pixels, os fótons removem elétrons. Quando o número de elétrons em cada pixel é medido pela CCD, a imagem é reconstruída.

### 5.3 - Raio de cobertura do imageador

Através de uma análise geométrica simples, obtém-se o raio de cobertura de uma lente *all-sky*, considerando a altura da camada emissora e o ângulo zenital de abertura da lente. Desta forma, o campo de visão do imageador varia com a altura da camada de emissão e também com o ângulo zenital da lente *all-sky*. A geometria equivalente é mostrada na Figura 5.2. Para o caso em que o ângulo zenital  $\zeta$  é igual a  $90^\circ$  ( $2 \times 90^\circ = 180^\circ$ ), o raio 'R' do campo de visão da lente *all-sky*, segundo a geometria da Figura 5.2, é expresso por:

$$R^2 = (R_T + h)^2 - R_T^2 \quad (5.1)$$

onde  $R_T$  é o raio da Terra ( $\sim 6370$  km) e  $h$  é a altura da emissão.

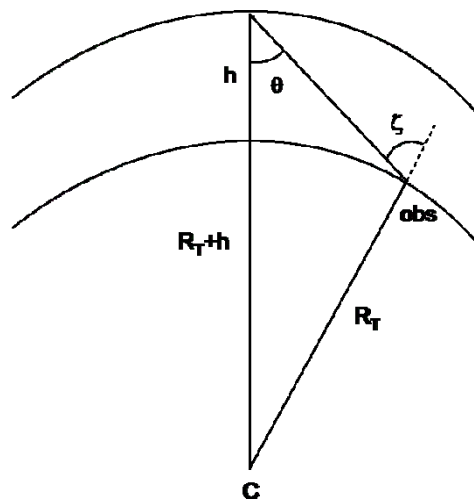


Figura 5.2: Geometria da camada emissora.  $R_T$  é o raio terrestre e  $h$  é a altura da camada de emissão.

Fonte: Adaptada de Chamberlain (1961).

Considerando que a altura da linha de emissão OI 630,0 nm seja 250 km e o ângulo de visão do equipamento seja de 180 graus, o raio de cobertura do imageador é de aproximadamente 1800 km, o que corresponde ao setor sudeste e parte do setor sul, nordeste e centro-oeste brasileiro, além de uma área sobre o Oceano Atlântico. No caso do imageador utilizado neste estudo, a lente *all-sky* possuía um ângulo de visão de 160 graus, reduzindo o raio de cobertura do imageador. O campo de visão do equipamento é ilustrado na Figura 5.3.

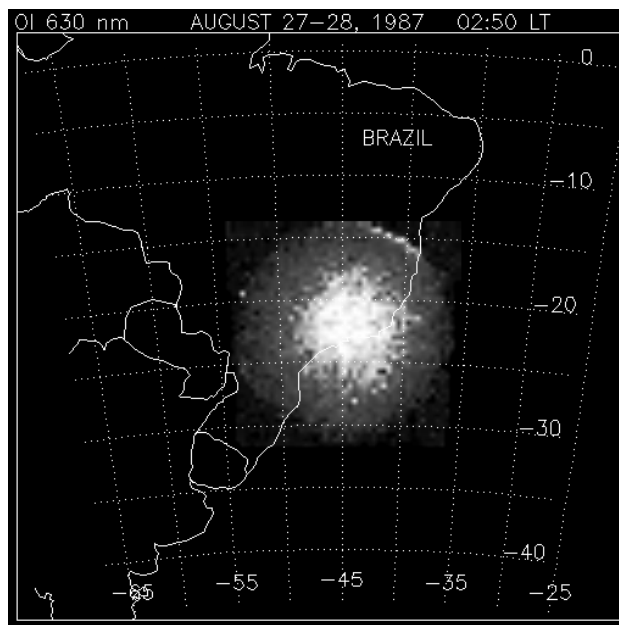


Figura 5.3: Campo de cobertura do imageador *all-sky* utilizado neste trabalho. A imagem corresponde à emissão OI 630,0 nm adquirida em Cachoeira Paulista na noite de 02/11/1999.

Fonte: Pimenta et al (2010).

#### 5.4 - Linearização das imagens *all-sky*

As lentes do tipo *all-sky* introduzem nas imagens efeitos de curvatura e compressão para ângulos de elevação pequenos. Isso ocorre porque o sistema de lentes projeta a imagem na matriz CCD (ou filme convencional), de forma que cada pixel da imagem subentenda o mesmo ângulo do céu (GARCIA et al., 1997). Os efeitos de curvatura e compressão são ilustrados na Figura 5.4, que mostra o efeito da projeção de uma imagem sobre uma malha geográfica uniforme de dimensão 18×18 pixels.

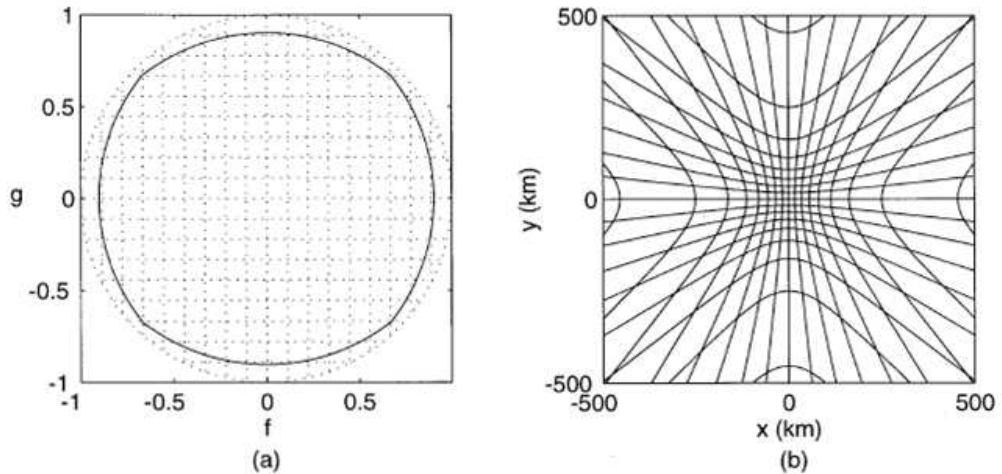


Figura 5.4: Projeção de uma imagem *all-sky* sobre um sistema de coordenadas geográficas mostrando os efeitos de curvatura e compressão causados pela lente; (a) imagem *all-sky* com 18X18 pixels; (b) projeção de cada pixel em uma área de 1000 x 1000 km.

Fonte: Garcia et al. (1997).

De acordo com a Figura 5.4, as dimensões dos pixels projetados variam conforme o ângulo de elevação. A Figura 5.5 ilustra o efeito dessa projeção em função do ângulo de elevação sobre a distância  $r$  ao longo da camada de luminescência. Esta função é essencialmente linear para ângulos de elevação maiores que  $40^\circ$ . Entretanto, para pequenos ângulos de elevação, a distância ao longo da camada de luminescência aumenta rapidamente. Sem o processo de linearização das imagens, os imageadores *all-sky* forneceriam imagens cuja área útil se limitaria a  $40^\circ$  em torno do zênite.

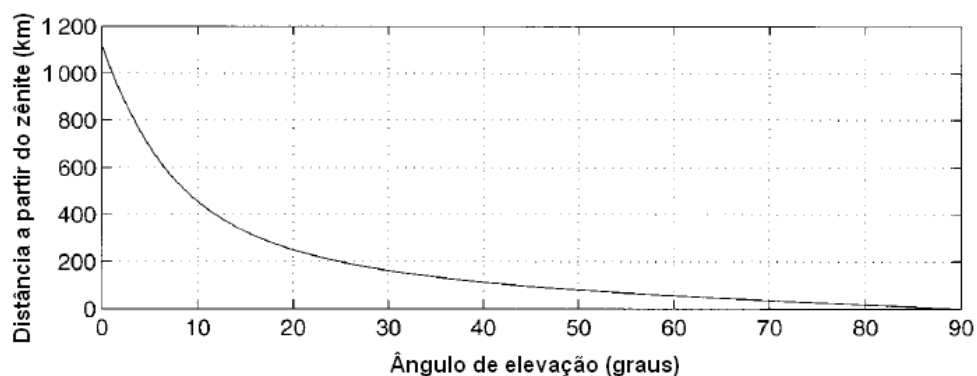


Figura 5.5: Variação da distância  $r$  a partir do zênite ao longo da camada de emissão em função do ângulo de elevação.

Fonte: Garcia et al. (1997).

Para se analisar adequadamente as imagens, primeiramente é necessário eliminar os efeitos de curvatura e compressão introduzidos pelas lentes *all-sky*. As imagens da emissão OI 630,0 nm utilizadas na pesquisa são linearizadas utilizando uma rotina no aplicativo IDL (*Interactive Data Language*). O trabalho de Pimenta (2002) explora maiores detalhes sobre as técnicas de processamento das imagens.

## 5.5 - Instrumentação complementar

### 5.5.1 - O fotômetro Multicanal 2

O fotômetro Multicanal 2 (Multi 2) está instalado no Observatório de Luminescência do INPE de Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O). O equipamento possui cinco filtros de interferência, medindo as emissões da luminescência atmosférica noturna do oxigênio atômico OI 630,0 nm, OI 557,7 nm, OI 777,4 nm, emissões do sódio mesosférico e da molécula de hidroxila OH (6,2). O equipamento é composto basicamente de três unidades: a unidade ótica, a unidade de interface e a unidade de controle e aquisição de dados. O diagrama de blocos do equipamento é mostrado na Figura 5.6.

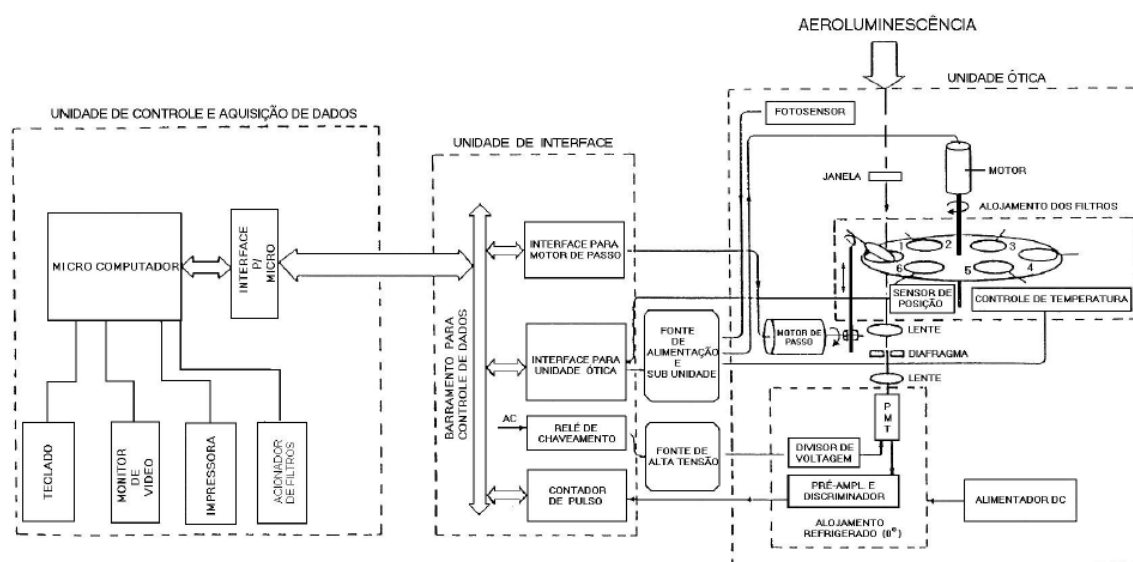


Figura 5.6: Diagrama de blocos do fotômetro Multicanal 2, com destaque para as unidades que compõe o sistema.

Fonte: Adaptada de Gobbi (1993).



A unidade ótica possui uma roda de filtros com os cinco filtros de interferência citados acima, um obturador opaco utilizado para medir o ruído térmico, uma lente e um diafragma que determinam o campo de visão do equipamento, um tubo fotomultiplicador e circuitos eletrônicos para controle e registro dos sinais. O campo de visão total do fotômetro é de dois graus, com abertura efetiva de 50 milímetros de diâmetro.

Os filtros de interferência requerem cuidados especiais com a temperatura, visto que o comprimento de onda passante é dependente da temperatura ambiente. Para evitar um deslocamento em comprimento de onda da curva de transmissão do filtro de interferência, a parte interna da roda de filtros é mantida a uma temperatura de  $28 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . O tubo fotomultiplicador possui um sistema próprio de refrigeração que mantém sua temperatura interna abaixo de  $0^\circ\text{C}$ , minimizando o ruído térmico do equipamento.

Um sistema mecânico é responsável por posicionar um filtro de cada vez no eixo ótico. Em seguida, um motor de passo inclina o filtro, possibilitando uma varredura de  $8,0 \text{ nm}$  a partir do comprimento de onda central do filtro de interferência. Terminada a varredura, o disco gira e posiciona outro filtro no eixo ótico do fotômetro. Para uma seqüência completa de medidas com os cinco filtros são necessários aproximadamente 3,3 minutos.

A unidade de interface controla a unidade ótica e a acopla ao sistema de aquisição de dados. A unidade de controle e aquisição de dados é composta de uma CPU e uma interface de acoplamento com um microcomputador padrão. Os dados são registrados em disco rígido no microcomputador.

### **5.5.2 - A Ionossonda**

A Ionossonda consiste de um sistema transmissor-receptor utilizado para sondagem ionosférica que se baseia no princípio da refração, sendo capaz de fornecer, dentre outros parâmetros, o perfil de densidade eletrônica da ionosfera. O equipamento opera em uma faixa de freqüências próximas à

freqüência natural de oscilação do plasma (freqüência crítica), transmitindo pulsos de alta freqüência (tipicamente entre 1 e 20 MHz) na direção da ionosfera, com incidência vertical ou oblíqua. Os pulsos refletidos são computados por um receptor.

O índice de refração do plasma ionosférico, desconsiderando o campo geomagnético (onda ordinária) e os efeitos colisionais entre partículas neutras e elétrons é dado pela seguinte equação (RATCLIFFE, 1962):

$$\mu^2 = 1 - X = 1 - \left( \frac{fp}{f} \right)^2 \quad (5.2)$$

onde:

$$fp = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{N_e e^2}{m \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

Na Equação 5.2,  $f_p$  é a freqüência natural do plasma e  $f$  é a freqüência da onda. Desta forma,  $X$  representa a razão entre a freqüência de plasma e a freqüência da onda de rádio incidente na ionosfera.

Na Equação 5.3,  $N_e$  representa a densidade de elétrons;  $e$  representa a carga e  $m$  a massa dos elétrons;  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica no vácuo.

Para uma onda extraordinária, o índice de refração do plasma ionosférico pode ser expresso por:

$$\mu^2 = 1 - \frac{X(1-X)}{1-X-Y^2} \quad (5.4)$$

onde:

$$Y = \frac{eB}{2\pi mf} \quad (5.5)$$

A condição para que haja reflexão é  $X = 1$  para ondas ordinárias e  $X = 1 - Y$  para ondas extraordinárias, onde  $Y$  denota a razão entre a girofrequência e a frequência da onda.

Abaixo da ionosfera,  $N_e$  é nula. Portanto,  $X = 0$  e  $\mu = 1$ . À medida que  $X$  aumenta devido à presença de elétrons livres nas camadas ionizadas, o índice de refração diminui até se anular, provocando a reflexão da onda incidente. Nesse caso  $f_p^2 = f^2$ :

$$f_p^2 = \frac{N_e e^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m} = f^2 \quad (5.6)$$

Rearranjando os termos e substituindo os valores das constantes, tem-se a relação entre a frequência da onda e a densidade eletrônica do plasma onde a mesma é refletida:

$$N_e = (1,24 \times 10^4) f^2 \quad (5.7)$$

Na Equação 5.7, a dimensão de  $f$  é megahertz (MHz) e de  $N_e$  é  $\text{cm}^{-3}$ .

Variando a frequência transmitida  $f$  é possível calcular os valores da densidade eletrônica  $N_e$ , a fim de se determinar o perfil de densidade eletrônica da camada. O método fornece o perfil de densidade eletrônica até a altura do pico de densidade (camada F2). Depois do pico, a onda não é mais refletida pela ionosfera, visto que a frequência da onda passa a ser maior que a frequência de plasma. Acima da camada F2, apenas ionossondas a bordo de satélites são capazes de fornecer o perfil vertical de densidade eletrônica ionosférica.

Considerando a presença do campo geomagnético, o índice de refração do plasma ionosférico é obtido através da equação de Appleton-Hartree:

$$\mu^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_t^2 \pm [Y_t^4 + 4(1-X)^2 Y_t^2]^{1/2}} \quad (5.8)$$

onde:

$$Y_{t,l} = \frac{f_L}{f} = \frac{eB_{t,l}}{2\pi mf} \quad (5.9)$$

Nas Equações 5.8 e 5.9, os subíndices  $t$  e  $l$  denotam as componentes do campo geomagnético na direção transversal e longitudinal ao vetor de onda e  $f_L$  é a frequência de cíclotron ou girofrequência, que é a frequência natural na qual elétrons livres circulam em torno das linhas de campo magnético. Da Equação 5.8 podem-se obter os modos ordinário e extraordinário de propagação de ondas. Ao incidir na ionosfera, a onda emitida divide-se em dois modos de propagação: onda ordinária e onda extraordinária. O modo ordinário não é afetado pela presença do campo geomagnético e o campo elétrico da onda é paralelo àquele campo. O modo extraordinário depende do campo geomagnético e em geral o campo elétrico da onda possui uma componente longitudinal ao longo do vetor de onda e uma componente transversal, normal ao vetor de onda.

As primeiras ionossondas (convencionais) operavam de forma analógica, com base na medida do tempo de atraso entre o pulso de alta frequência enviado e o refletido pela ionosfera (conhecido como eco). A partir deste dado, apenas a informação sobre a altura virtual da camada ionosférica era extraída. Atualmente as digissondas são bastante utilizadas. Os equipamentos utilizam modos digitais de operação, além de monitorar um maior número de parâmetros ionosféricos.

O tempo entre a transmissão da onda e a recepção do eco é proporcional à altura virtual  $h'$  (altura de reflexão). A altura real é sempre menor que a altura virtual, uma vez que o pulso emitido é retardado pela ionização local abaixo do ponto de reflexão (YAMASHITA, 1999). Conforme a frequência da onda emitida

aumenta, a altura virtual também aumenta. Ao atingir um valor limite, a onda incidente ultrapassa a camada e a altura virtual é medida como sendo infinita. Essa frequência máxima é a frequência crítica.

Os ionogramas são produzidos a partir de dados obtidos com a ionossonda, que mostram a variação da altura de reflexão da onda (altura virtual -  $h'F$ ) em função da frequência da onda. O registro de dados do ionograma é feito dividindo-se pela velocidade da luz no vácuo o intervalo de tempo entre o envio e a recepção da onda, método que fornece a distância percorrida pelo pulso, ou seja, a altura virtual da camada. Variando-se a frequência de transmissão e de recepção, obtêm-se os gráficos da frequência versus altura virtual da camada. A Figura 5.7 mostra a representação gráfica de um ionograma.

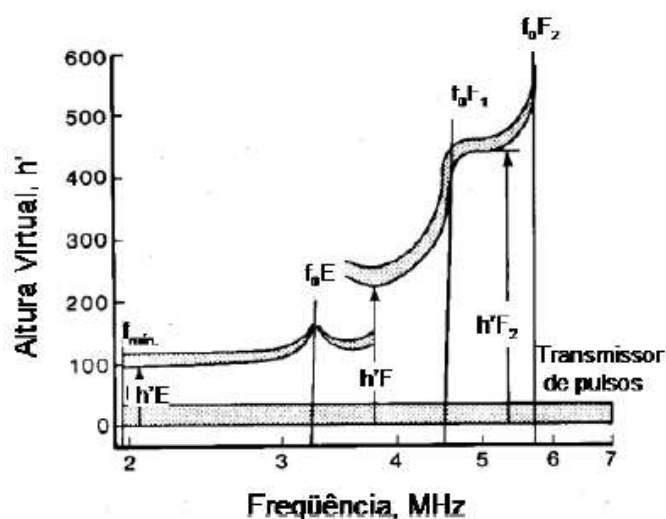


Figura 5.7: Representação de um ionograma.

Fonte: Hunsucker (1991).

Além das curvas de densidade eletrônica em função da altura, é possível utilizar os ionogramas para se monitorar a variação de diversos outros parâmetros ionosféricos. Neste estudo são utilizados de forma complementar dados obtidos por três ionossondas, instaladas em Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O), em Fortaleza (3,9° S; 38,5° O) e em São Luís (2,3° S; 42,2° O).

Os parâmetros ionosféricos de interesse no estudo são:  $h'F$  (altura virtual mínima do traço ordinário em toda a região F),  $hmF2$  (altura de pico da

densidade eletrônica da ionosfera) e foF2 (frequência crítica da onda ordinária da camada F2).

## **5.6 - Metodologia**

### **5.6.1 – O estudo da frequência de ocorrência de Bandas Claras**

A frequência de ocorrência das Bandas Claras no setor brasileiro de baixas latitudes é investigada através de um estudo estatístico, por meio de inspeção visual das imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm.

As fotografias obtidas com o imageador *all-sky* são analisadas visualmente, onde o conjunto de imagens de cada noite de observação é visualizado em seqüência. Registra-se a data da observação, período total da observação e período de observação da Banda Clara (em caso de ocorrência do fenômeno).

As horas diárias de observação e de ocorrência de Bandas Claras são somadas para cada mês de imageamento, possibilitando uma avaliação mensal da frequência de ocorrência do fenômeno. Em seqüência, as horas mensais totais de observação e de ocorrência também são somadas, para a avaliação anual, em função do ciclo solar, da frequência de ocorrência das Bandas Claras. Os resultados dos registros estão tabelados no Capítulo 6.

A análise das imagens permite identificar os casos de Bandas Claras e acompanhar a dinâmica de deslocamento do fenômeno ao longo do campo de visão do imageador. A Figura 5.8 mostra o deslocamento de uma Banda Clara observada pelo imageador instalado em Cachoeira Paulista na noite de 04 - 05 de setembro de 1997. A estrutura entra no campo de visão do imageador as 00:20, Tempo Local (TL), e se movimenta em direção ao sudoeste, saindo do campo de visão as 03:20. Aproximadamente às 02:40 a estrutura passa pelo zênite.

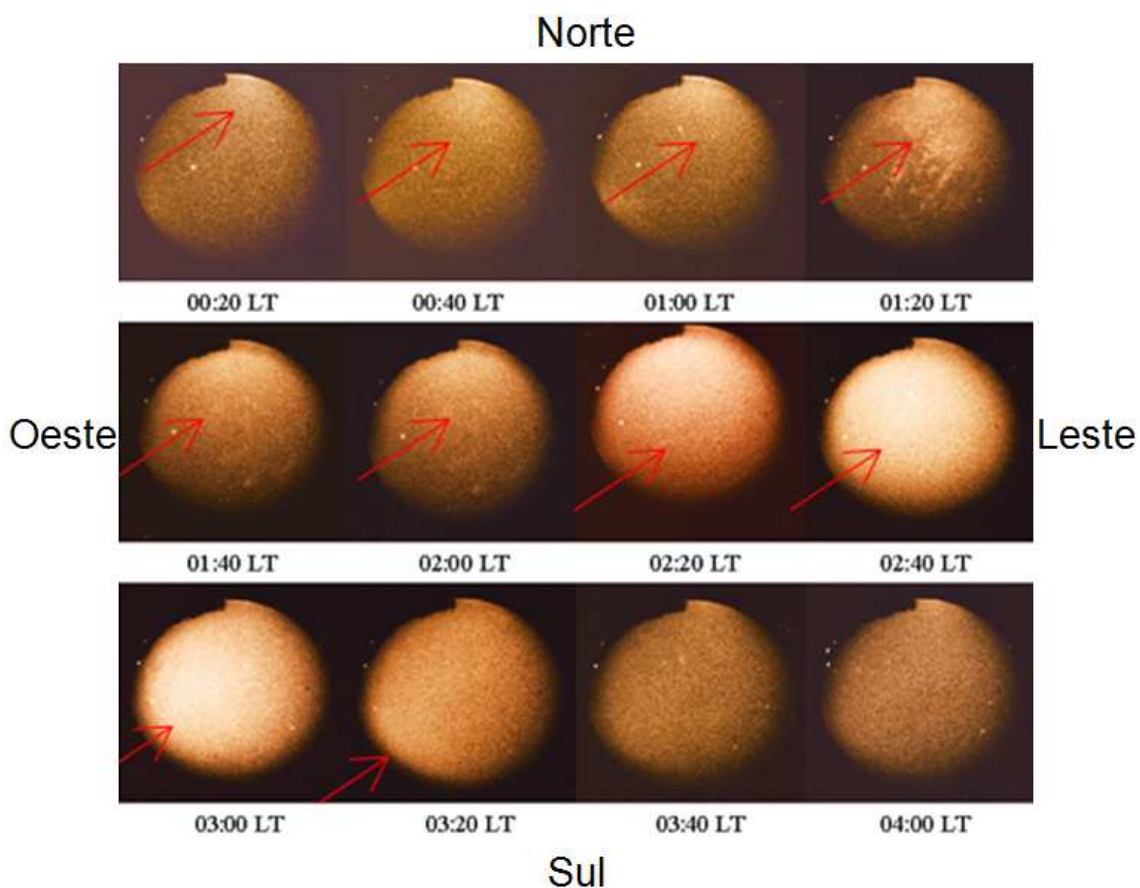


Figura 5.8: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 *nm* evidenciando a passagem de uma Banda Clara sobre o campo de visão do imageador instalado em Cachoeira Paulista na noite de 04-05 de setembro de 1997.

O estudo estatístico é realizado em função da fase do ciclo solar (períodos de atividade solar mínima, ascendente, máxima e descendente), em função dos meses do ano (variação mensal) e em função do nível de atividade geomagnética (considerando o índice geomagnético Dst).

A avaliação das tempestades geomagnéticas é feita a partir da verificação do índice Dst. De acordo com a Tabela 5.1, é possível classificar as tempestades geomagnéticas em fracas, moderadas e intensas, segundo o valor mínimo atingido pelo índice Dst (GONZÁLEZ et al., 1994).

Tabela 5.1: Classificação de tempestades magnéticas de acordo com a intensidade.

Tempestade	Índice Dst (nT)
Fraca	- 50 < Dst < - 30
Moderada	- 100 < Dst < - 50
Intensa	Dst < - 100

Os dados de índice Dst utilizados no estudo foram obtidos do *site* <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>.

As imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm utilizadas são referentes a um período um pouco maior do que um ciclo solar, compreendendo março de 1987 a junho de 2000. Por motivos técnicos, o imageamento foi interrompido em alguns anos, havendo lacunas nos dados disponíveis.

As imagens originais foram gravadas em filmes convencionais de 35 mm. Recentemente, elas passaram por um processo de digitalização, possibilitando a execução do estudo.

### 5.6.1 – O estudo de casos específicos de ocorrência de Bandas Claras

Nesta pesquisa, são selecionados quatro casos de ocorrência de Banda Clara para a investigação das características dinâmicas de propagação do fenômeno, sobretudo o cálculo de sua velocidade de propagação. De forma complementar, são avaliados os efeitos da passagem de uma Banda Clara sobre a ionosfera, utilizando-se dados de fotômetro e ionossonda.

Para analisar as imagens, primeiramente é necessário padronizá-las. A padronização consiste em redimensionar todas as imagens originais para um tamanho de 512 X 512 pixels e em seguida transformar as cores originais da imagem para cores em nível de cinza. Posteriormente, é feita a linearização das imagens para uma área de projeção de 1024 X 1024 km e remoção das



estrelas. A Figura 5.9 apresenta uma seqüência de imagens em nível de cinza, que foram linearizadas e que tiveram as estrelas removidas.

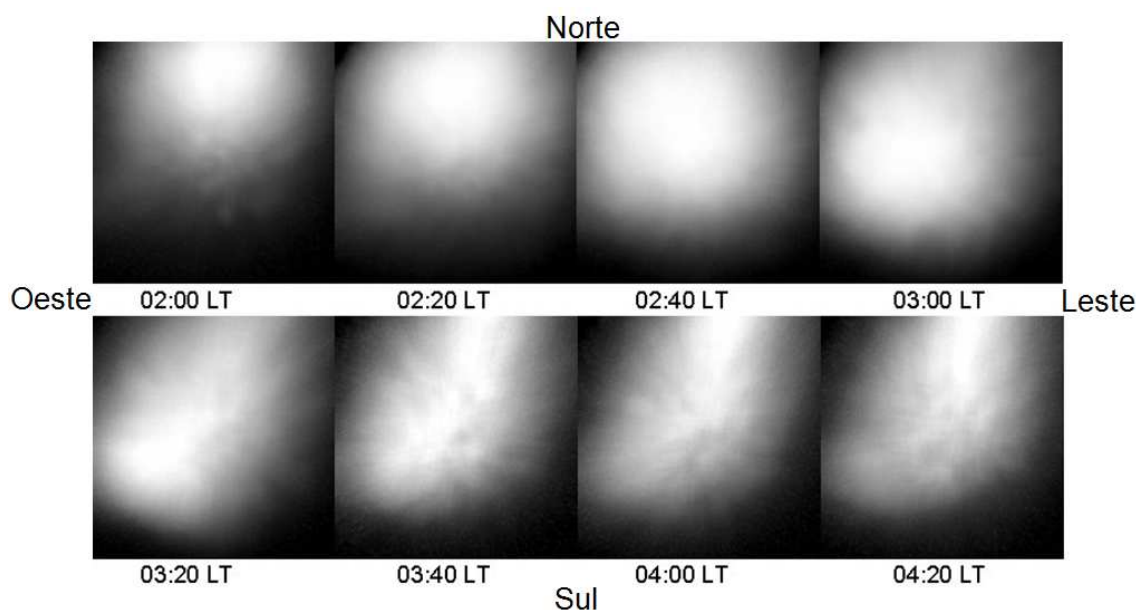


Figura 5.9: Seqüência de imagens linearizadas e em nível de cinza da noite de 04-05 de setembro de 1997. Cada imagem possui uma área de 1024 X1024 km.

Uma imagem digital em nível de cinza é tipicamente composta por tons de cinza, variando entre o preto como menor intensidade e o branco como maior intensidade, podendo conter diversos tons de cinza em sua composição. As imagens em nível de cinza são resultado de um cálculo da intensidade da luz em cada pixel, sendo a intensidade absoluta retratada em escala de cores. As intensidades das cores em nível de cinza são representativas da intensidade de luminescência, onde as cores claras significam acréscimo na luminescência devido à presença da Banda Clara e cores escuras representam locais onde a luminescência é menor.

Através de um aplicativo em linguagem IDL, a variação da intensidade relativa de uma linha central da imagem é medida. Em cada imagem é traçada uma linha meridional de referência, no centro da mesma. A seguir, os valores de intensidade relativa da coluna de pixels da linha de referência são medidos e transformados em uma coluna de valores numéricos de intensidade relativa. A partir da junção dos valores de intensidade relativa da linha central de cada

imagem, é possível gerar um gráfico de contorno de intensidade relativa para uma noite de observação.

O gráfico de contorno pode ser entendido como um keograma, produzido a partir das diversas colunas de intensidade relativa nos pixels. Cada coluna representa a variação da intensidade central de uma imagem da noite de observação. O gráfico contém informações relacionadas à dinâmica da Banda Clara, ilustrando sua variação espacial e o deslocamento da estrutura ao longo do tempo. A partir da análise do gráfico de contorno é possível calcular a velocidade média de propagação da Banda Clara.

Para se estudar as implicações da passagem das Bandas Claras na ionosfera são utilizados adicionalmente dados de fotômetro e digissonda. Dados de fotômetro das emissões da região F ionosférica são comparados com as imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, permitindo o estudo da variação espaço-temporal das emissões, associadas à passagem da Banda Clara. Através dos dados de digissonda é possível monitorar os parâmetros ionosféricos h'F (altura virtual mínima do traço ordinário em toda a região F), hmF2 (altura de pico da densidade eletrônica da ionosfera) e foF2 (frequência crítica da onda ordinária da camada F2) mediante a ocorrência da Banda Clara.

Ao contrário do fotômetro e da ionossonda, os imageadores são capazes de efetuar medidas de maior alcance espacial, o que possibilita a cobertura de grandes áreas horizontais. Através da análise das imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, determina-se para os quatro casos escolhidos a extensão horizontal típica das Bandas Claras no setor brasileiro de baixas latitudes.

#### **5.6.1.1 – Método de estimativa da velocidade média de propagação da Banda Clara**

Para cada um dos casos escolhidos, a velocidade média de propagação da estrutura da Banda Clara é determinada a partir do gráfico de contorno de intensidade relativa correspondente à noite de ocorrência do fenômeno.

O método de estimativa da velocidade média consiste em traçar uma linha central sobre a assinatura espaço-temporal da Banda Clara no gráfico de emissão relativa. A linha central é representativa do movimento do centro da estrutura da Banda Clara, que se desloca para latitudes maiores ao longo do tempo.

No cálculo, são considerados um intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$  e o respectivo deslocamento latitudinal da estrutura, representado por uma variação angular  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ , onde o ângulo  $\theta$  representa a latitude geográfica. A Figura 5.10 ilustra o método para a estimativa da velocidade média de propagação da Banda Clara.

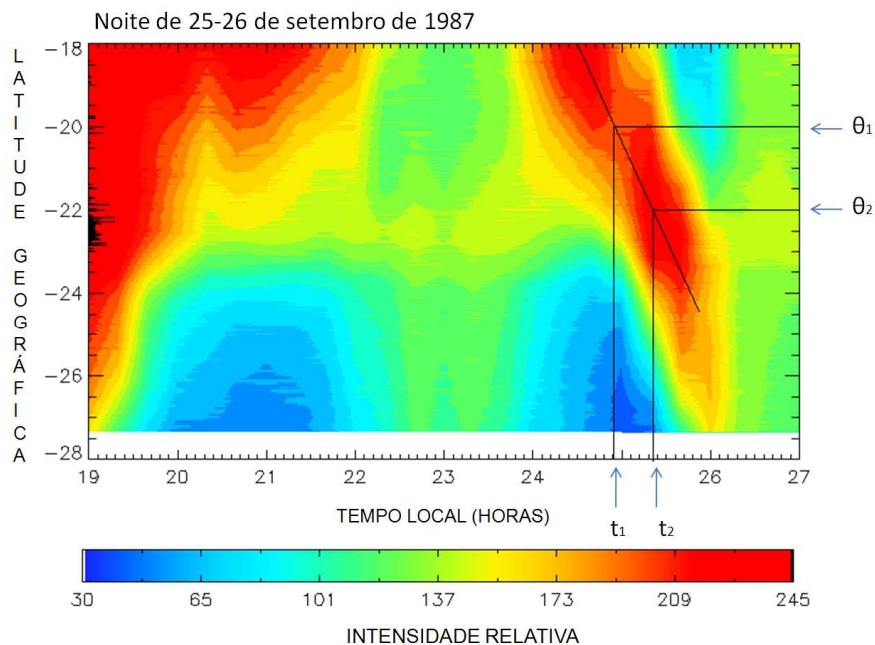


Figura 5.10: Método para estimativa da velocidade média de propagação da Banda Clara. A latitude geográfica é apresentada em graus e o tempo local em horas.

De acordo com a Figura 5.10,  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$  é a variação latitudinal percorrida pelo centro da estrutura no intervalo de tempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Considerando que na região de baixas latitudes um grau de latitude equivale a 110,649 quilômetros, é possível calcular a correspondente distância em quilômetros percorrida pelo centro da estrutura no intervalo de tempo  $\Delta t$ . O cálculo da velocidade média é feito dividindo a variação do espaço percorrido pelo intervalo de tempo. A

Equação 5.10 fornece a expressão para o cálculo da velocidade média de propagação da Banda Clara:

$$\bar{v} = \frac{\theta_2 - \theta_1(110,649km)}{t_2 - t_1} \quad (5.10)$$

Os valores angulares de  $\theta_2$  e  $\theta_1$  e os valores de tempo  $t_2$  e  $t_1$  são retirados diretamente do gráfico de contorno. Os resultados das velocidades de propagação apresentados no Capítulo 6 foram transformados de quilômetros por hora para metros por segundo. É importante salientar que o método considera a velocidade da estrutura aproximadamente constante, desde a entrada até sua saída do campo de visão do imageador.

#### **5.6.1.2 - Determinação da extensão horizontal da Banda Clara**

O método de determinação da extensão horizontal da estrutura da Banda Clara é bastante direto. A partir de uma imagem *all-sky* da emissão OI 630,0 nm linearizada para uma área de 1024 X 1024 km, a dimensão da estrutura da Banda Clara é aferida, com o auxílio do aplicativo *JR Screen Ruler Pro*. Este aplicativo mede na tela do computador a dimensão de qualquer segmento de uma imagem digitalizada.

Na determinação da extensão horizontal da Banda Clara, mede-se pixel a pixel o comprimento de um segmento da imagem (largura ou altura). Sabe-se que esse segmento é equivalente a 1024 km. Em seguida, mede-se a dimensão da estrutura da Banda Clara projetada na imagem. Conhecida a medida da altura ou largura, calcula-se proporcionalmente a dimensão horizontal da Banda Clara. A Figura 5.11 ilustra a utilização do aplicativo para a medida da extensão da Banda Clara na imagem linearizada.

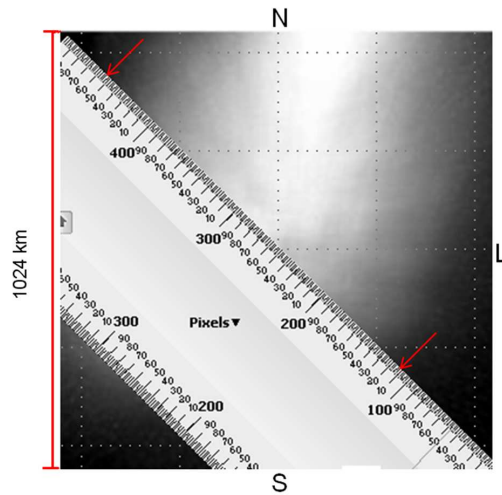


Figura 5.11: Medida da extensão horizontal de uma Banda Clara sobre o zênite de Cachoeira Paulista, na noite de 05 de setembro de 1997.

Em cada caso, a imagem escolhida para a determinação da extensão horizontal é aquela em que a estrutura do fenômeno se encontra sobre o zênite do imageador instalado em Cachoeira Paulista.



## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

No estudo da freqüência de ocorrência das Bandas Claras foram analisadas 3538,83 horas de observação com imageador *all-sky*, com imagens compreendendo o período de março de 1987 a junho de 2000. No período examinado, foram detectadas 40 noites com presença de Bandas Claras, totalizando 82 horas de ocorrência do fenômeno, o que corresponde a 2,32 % do total de horas de observação. Dentre os 40 eventos considerados, 26 (65%) possuem direção de propagação norte - sul; 14 eventos (35%) possuem direção de propagação nordeste - sudoeste. Os resultados dos estudos da freqüência de ocorrência das Bandas Claras, em função do ciclo solar, dos meses do ano do nível de atividade geomagnética são expostos nas Seções 6.1, 6.2 e 6.3, respectivamente.

Quatro casos particulares de ocorrência de Bandas Claras foram selecionados para estudo da dinâmica de ocorrência e avaliação dos efeitos do fenômeno sobre a ionosfera de baixas latitudes. Utilizando seqüências de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, foram construídos gráficos de contorno que permitem monitorar a dinâmica da Banda Clara, em sua passagem ao longo do campo de visão do imageador. Além de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, o estudo dos casos utiliza dados de fotômetro das principais emissões da região F ionosférica (OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm), dados de ionossonda e dados do índice Dst. Para cada caso, são calculadas as velocidades médias de propagação e a extensão horizontal do fenômeno. A Seção 6.3 apresenta a análise dos quatro casos ocorrência de Bandas Claras.

#### **6.1 - Ocorrência das Bandas Claras em função do ciclo solar**

No estudo estatístico da variação anual de ocorrência de Bandas Claras foram somados os tempos de observação e de ocorrência do fenômeno para todos os anos com dados disponíveis. A porcentagem de ocorrência do fenômeno em relação ao tempo total de observação foi calculada. Os registros da contagem anual de horas de observação e ocorrência de Bandas Claras para o período de 1987 a 2000 são apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.3, com exceção dos

anos de 1989, 1991, 1992 e 1993, quando não ocorreu a observação. Os períodos sem observação estão representados por um traço.

Tabela 6.1: Registro das observações dos anos de 1987, 1988, 1990 e 1994.

	1987		1988		1990		1994	
	OBS	OCR	OBS	OCR	OBS	OCR	OBS	OCR
<b>Jan</b>	-	-	-	-	48,67	0,00	-	-
<b>Fev</b>	-	-	1,16	0,00	22,33	0,00	-	-
<b>Mar</b>	28,83	0,00	-	-	51,00	0,00	-	-
<b>Abr</b>	29,67	3,00	-	-	67,00	0,00	-	-
<b>Mai</b>	36,67	4,00	4,67	0,00	124,67	0,00	-	-
<b>Jun</b>	-	-	6,67	0,00	87,00	0,00	-	-
<b>Jul</b>	68,00	0,00	-	-	36,33	2,00	-	-
<b>Ago</b>	59,00	14,00	-	-	41,00	0,00	76,00	2,33
<b>Set</b>	22,16	7,33	44,16	0,00	43,00	0,00	51,67	0,00
<b>Out</b>	5,67	0,00	28,67	0,00	8,33	0,00	3,00	0,00
<b>Nov</b>	31,33	0,00	21,00	0,00	66,33	0,00	34,33	0,00
<b>Dez</b>	13,33	0,00	46,00	3,67	16,33	0,00	29,67	0,00
<b>Total</b>	294,67 (100%)	28,33 (9,61%)	152,33 (100%)	3,67 (2,41%)	612,00 (100%)	2,00 (0,33%)	194,67 (100%)	2,33h (1,20%)

**OBS** – Horas de observação; **OCR** – Horas de ocorrência de Bandas Claras

Tabela 6.2: Registro das observações dos anos de 1995, 1996 e 1997.

	1995		1996		1997	
	OBS	OCR	OBS	OCR	OBS	OCR
<b>Jan</b>	12,00	3,00	21,33	0,00	3,33	0,00
<b>Fev</b>	52,33	1,33	25,67	3,00	56,00	1,00
<b>Mar</b>	40,00	2,33	14,67	1,00	27,00	0,67
<b>Abr</b>	68,33	0,67	40,00	0,00	41,33	0,00
<b>Mai</b>	42,00	0,00	30,67	0,00	62,00	0,00
<b>Jun</b>	89,67	2,00	109,00	0,00	40,33	0,00

**OBS** – Horas de observação; **OCR** – Horas de ocorrência de Bandas Claras (continua)



Conclusão da Tabela 6.2:

<b>Jul</b>	104,67	5,67	77,33	0,00	58,33	1,33
<b>Ago</b>	101,67	0,00	62,00	0,00	69,33	0,00
<b>Set</b>	13,67	0,00	12,33	0,00	32,67	3,00
<b>Out</b>	46,67	5,33	11,33	0,00	32,33	4,00
<b>Nov</b>	15,67	0,00	-	-	7,33	0,00
<b>Dez</b>	-	-	3,00	0,00	14,67	0,00
<b>Total</b>	586,67 (100%)	20,33 (3,46%)	407,33 (100%)	4,00 (0,98%)	444,67 (100%)	10,00 (2,25%)

**OBS** – Horas de observação; **OCR** – Horas de ocorrência de Bandas Claras

Tabela 6.3: Registro das observações dos anos de 1998, 1999 e 2000.

	1998		1999		2000	
	OBS	OCR	OBS	OCR	OBS	OCR
<b>Jan</b>	39,33	3,33	21,67	0,00	26,00	0,00
<b>Fev</b>	9,00	0,00	11,00	0,00	21,33	0,00
<b>Mar</b>	15,33	0,00	18,00	0,00	47,67	0,00
<b>Abr</b>	25,33	0,00	22,33	0,00	55,67	0,00
<b>Mai</b>	39,33	0,00	44,67	0,00	60,67	0,00
<b>Jun</b>	44,33	0,00	20,67	0,00	25,67	2,00
<b>Jul</b>	69,83	0,00	26,00	0,00	-	-
<b>Ago</b>	61,00	1,33	-	-	-	-
<b>Set</b>	13,33	3,00	33,50	0,00	-	-
<b>Out</b>	8,67	0,00	10,83	0,00	-	-
<b>Nov</b>	28,33	0,00	11,00	0,00	-	-
<b>Dez</b>	23,67	0,00	12,33	1,67	-	-
<b>Total</b>	377,50 (100%)	7,67 (2,03%)	232,00 (100%)	1,67 (0,72%)	237,00 (100%)	2,00 (0,84%)

**OBS** – Horas de observação; **OCR** – Horas de ocorrência de Bandas Claras

As horas totais de observação e a frequência de ocorrência de Bandas Claras são apresentadas na forma de histogramas, respectivamente na Figura 6.1 (a) e na Figura 6.1 (b). A Figura 6.1 (c) apresenta o fluxo solar médio, representado pelo índice F 10.7 cm, para o período entre 1985 e 2001. No

histograma da Figura 6.1 (b), a frequência de ocorrência é exibida percentualmente, em relação à quantidade total de horas observadas durante o ano correspondente.

Ao longo dos anos de 1987 e 1988 (ambos pertencentes à fase de atividade solar ascendente), a porcentagem de ocorrência decresce até atingir 0,33% no ano de 1990 (atividade solar alta). Este é o menor valor de porcentagem de ocorrência computado. No período entre 1994 e 1995 (atividade solar descendente), a porcentagem de ocorrência aumenta de 1,20% para 3,46%.

No ano de 1996 (atividade solar baixa), a porcentagem de ocorrência decai para 0,98%. Entretanto, no ano de 1997 (atividade solar ascendente), a porcentagem de ocorrência de Bandas Claras se eleva até um valor de 2,25%. Em seguida, diminui gradualmente nos anos de 1998 e 1999 (fase de atividade solar ascendente) para respectivamente 2,03% e 0,72% do total de horas de observação mensal.

No ano 2000 (atividade solar alta) apresenta uma ocorrência de 0,84% de Bandas Claras, havendo uma elevação da porcentagem de ocorrência do fenômeno em relação ao ano anterior.

Conforme mostra a Figura 6.1, a taxa de ocorrência de Bandas Claras é maior durante períodos de atividade solar ascendente e descendente. Enquanto nos períodos de atividade solar baixa e de atividade solar alta, a taxa de ocorrência tende a ser menor.

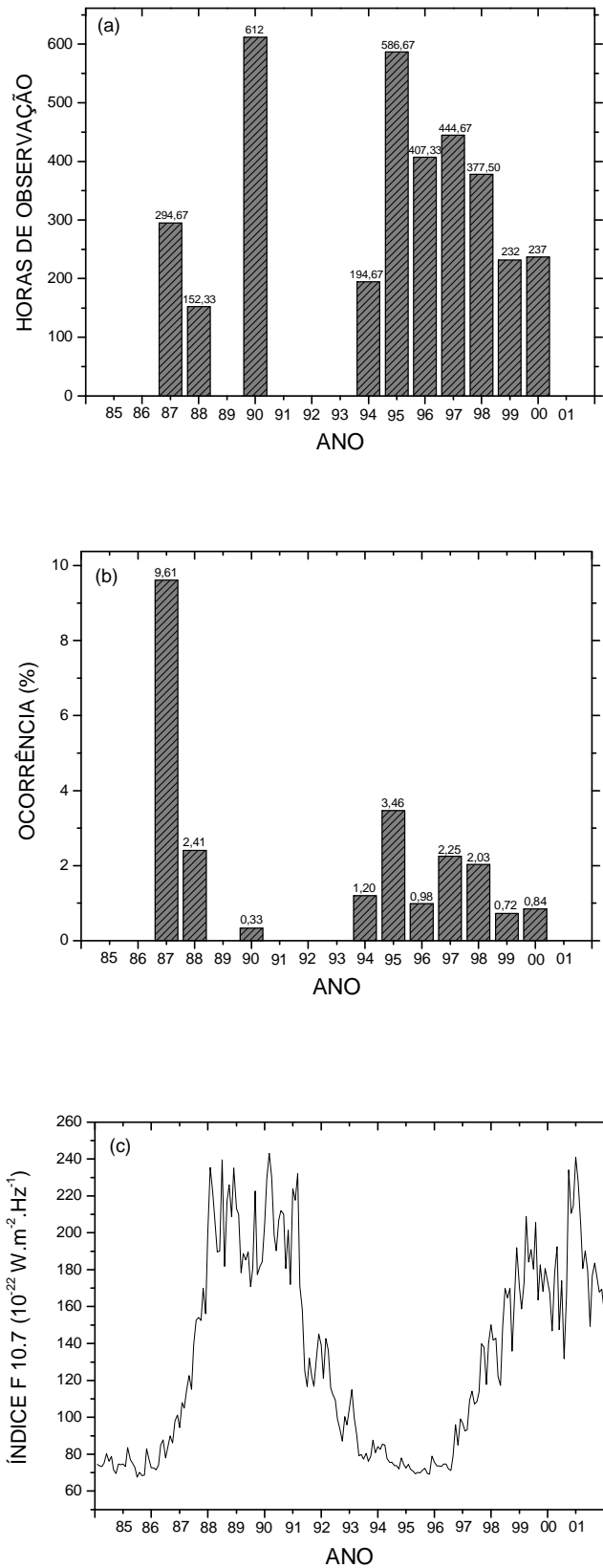


Figura 6.1: (a) Horas de observação com imageador *all-sky* da emissão OI 630,0 nm para o período de 1987 a 2000; (b) freqüência anual de ocorrência de Bandas Claras; (c) variação do Índice F 10.7 cm.

Os anos com maior porcentagem de ocorrência de Bandas Claras são: 1987 (9,61%; atividade solar ascendente - média do índice F 10.7 =  $85,23 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1995 (3,46%; atividade solar descendente - média do índice F 10.7 =  $77,17 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1988 (2,41%; atividade solar ascendente - média do índice F 10.7 =  $140,87 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1997 (2,25%; atividade solar ascendente - média do índice F 10.7 =  $80,75 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1998 (2,03%; atividade solar ascendente - média do índice F 10.7 =  $118,72 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1994 (1,20%; atividade solar descendente - média do índice F 10.7 =  $85,81 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1996 (0,98%; atividade solar baixa - média do índice F 10.7 =  $71,98 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 2000 (0,84%; atividade solar alta - média do índice F 10.7 =  $180,85 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1999 (0,72%; atividade solar ascendente - média do índice F 10.7 =  $153,37 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ), 1990 (0,33%; atividade solar alta - média do índice F 10.7 =  $189,58 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ).

## 6.2 - Ocorrência das Bandas Claras em função dos meses do ano

Os resultados da contagem mensal de horas de observação e de ocorrência de Bandas Claras são sumarizados nas Tabelas 6.4 e 6.5. Foram somados os valores de tempo de observação e de tempo de ocorrência para todos os meses de todos os anos disponíveis. A porcentagem de ocorrência do fenômeno em relação ao tempo mensal total de observação foi calculada.

Tabela 6.4: Registros mensais de observação e ocorrência de Bandas Claras para os meses de Janeiro a Junho.

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho
Tempo de observação (h)	172,33	198,83	242,50	349,67	445,33	423,33
Ocorrência de Banda Clara (h)	6,33 (3,67%)	5,33 (2,68%)	4,00 (1,65%)	3,67 (1,05%)	4,00 (0,90%)	4,00 (0,94%)

Tabela 6.5: Registros mensais de observação e ocorrência de Bandas Claras para os meses de Julho a Dezembro.

	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Tempo de observação (h)	440,50	470,00	266,50	155,50	215,33	159,00
Ocorrência de Banda Clara (h)	9,00 (2,04%)	17,67 (3,76%)	13,33 (5,00%)	9,33 (6,00%)	0,00 (0,00%)	5,33 (3,35%)

Os histogramas com as horas totais de observação mensal e a frequência mensal de ocorrência de Bandas Claras são apresentados, respectivamente na Figura 6.2 (a) e na Figura 6.2 (b). A frequência de ocorrência do fenômeno é exibida percentualmente, em relação à quantidade total de horas observadas durante os meses correspondentes.

A partir do mês de janeiro, a porcentagem de ocorrência de Bandas Claras decai até um valor mínimo em maio. Do mês de junho até outubro, a porcentagem de ocorrência se eleva, voltando a diminuir no mês de dezembro. O mês de novembro não possui registros de ocorrência de Bandas Claras. Os meses de abril, maio e junho possuem os valores de porcentagem de ocorrência mais baixos, enquanto os meses de agosto, setembro e outubro apresentam os valores mais altos.

Excetuando-se o mês de novembro, o mês de maio é o que possui a menor porcentagem de ocorrência de Bandas Claras, sendo de 0,90%. Outubro é o mês com a maior taxa de ocorrência: 6%.

A menor porcentagem de ocorrência se concentra nos meses de maio e junho, próximos ao solstício de junho e do inverno no hemisfério sul. Nos meses de setembro e outubro, próximos ao equinócio de setembro, a taxa de ocorrência de Bandas Claras é maior.

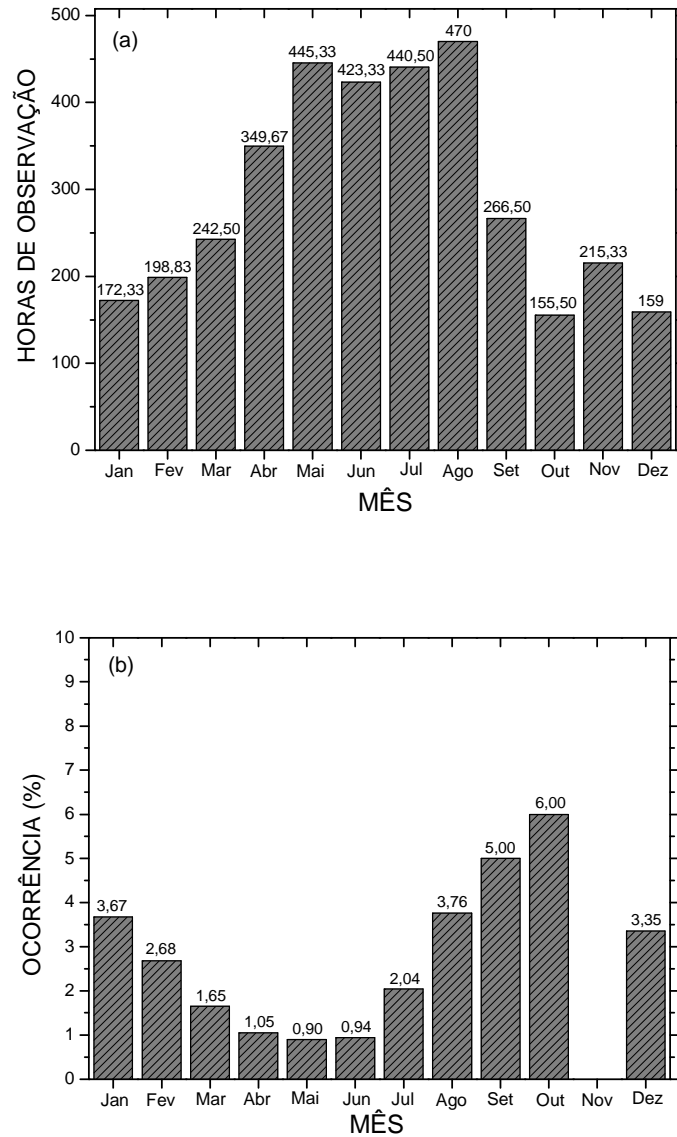


Figura 6.2: (a) Horas mensais de observação com imageador *all-sky* da emissão OI 630,0 nm. (b) frequência mensal de ocorrência de Bandas Claras em função dos meses do ano.

### 6.3 - Ocorrência das Bandas Claras em função da atividade geomagnética

Os dados das noites com presença de Bandas Claras, o período de ocorrência e a intensidade da tempestade geomagnética são apresentados na Tabela 6.6. As noites em que não ocorre tempestade geomagnética estão marcadas por um traço. O período de ocorrência é medido em horas locais.

Tabela 6.6: Ocorrência de Banda Clara e intensidade da tempestade geomagnética.

<b>Ano de 1987</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
02/04/1987	00:20 a 03:20	Fraca
03/05/1987	02:00 a 04:00	-
27/05/1987	01:20 a 03:20	Moderada
21/08/1987	01:20 a 03:20	-
24/08/1987	00:20 a 03:40	Fraca
26/08/1987	02:00 a 03:20	Moderada
28/08/1987	00:20 a 03:20	Moderada
28-29/08/1987	23:40 a 03:40	Moderada
18-19/09/1987	23:40 a 01:40	Fraca
25-26/09/1987	23:40 a 02:00	Moderada
27/09/1987	00:40 a 03:40	Moderada
<b>Ano de 1988</b>		
Noite com ocorrência com Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
07-08/12/1988	23:20 a 01:20	Fraca
09/12/1988	00:40 a 02:20	Fraca
Ano de 1990		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
18/07/1990	02:00 a 04:00	-
<b>Ano de 1994</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
24/08/1994	01:20 a 03:40	Fraca
<b>Ano de 1995</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
07/01/1995	00:40 a 03:40	Fraca
26/02/1995	02:20 a 03:40	Moderada
07/03/1995	00:40 a 01:40	Moderada
07-08/03/1995	23:20 a 00:40	Moderada
28/04/1995	00:00 a 00:40	Fraca
28-29/06/1995	23:20 a 01:20	Fraca

(continua)

Conclusão da Tabela 6.6:

03-04/07/1995	23:40 a 03:40	Moderada
24-25/07/1995	23:00 a 23:20	Moderada
01/08/1995	00:40 a 02:20	-
25/10/1995	00:20 a 02:40	Moderada
25-26/10/1995	23:40 a 02:40	Moderada
<b>Ano de 1996</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
19/02/1996	00:00 a 03:40	-
23/02/1996	01:00 a 03:40	Fraca
25/03/1996	02:00 a 03:00	Moderada
<b>Ano de 1997</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
05/02/1997	03:00 a 04:00	-
11/03/1997	01:20 a 02:00	Fraca
10/07/1997	03:00 a 04:20	-
05/09/1997	00:20 a 03:20	Moderada
05/10/1997	00:20 a 03:00	Moderada
29/10/1997	01:20 a 02:40	Moderada
<b>Ano de 1998</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
01/02/1998	00:40 a 03:40	Moderada
26/08/1998	01:00 a 02:40	Intensa
25/09/1998	01:00 a 03:00	Intensa
<b>Ano de 1999</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
02/12/1999	01:00 a 02:40	-
<b>Ano de 2000</b>		
Noite com ocorrência de Banda Clara	Período de ocorrência	Tempestade geomagnética
05/06/2000	00:00 a 02:00	Fraca



Os resultados sugerem uma correlação entre a ocorrência de tempestades geomagnéticas e o surgimento de um Máximo de Temperatura à Meia-noite, que gera as Bandas Claras. É possível que, em razão da ocorrência de tempestades geomagnéticas, os campos elétricos possam se mapear de altas latitudes para a região tropical, modificando a dinâmica de plasma dessa região. Movimentos horizontais e verticais do plasma, devido à ação dos campos mapeados, podem aquecer a termosfera da região tropical através do efeito Joule, via termo de arraste iônico, originando uma anomalia na temperatura local.

O mecanismo de geração para o Máximo de Temperatura à Meia-noite foi proposto por Mayr et al. (1979). Os autores argumentam que o principal mecanismo de geração do MTM se deve a interações entre marés produzidas por aquecimento solar, provenientes da baixa atmosfera e marés semi-diurnas na termosfera, formadas através do acoplamento íon - partícula neutra. Como resultado dessa interação, ocorre o transporte de energia pelas ação das marés para o lado noturno da atmosfera, provocando um máximo de temperatura local.

O aquecimento da termosfera devido a tempestades geomagnéticas não é um mecanismo de geração de Máximo de Temperatura à Meia-noite previsto pela teoria descrita no trabalho de Mayr et al. (1979).

### **6.3 – Estudo de casos de ocorrência de Banda Clara**

Os critérios de seleção dos casos escolhidos para o estudo da dinâmica das Bandas Claras e seus efeitos na ionosfera, levam em conta a evidência do fenômeno nas imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, além da disponibilidade de simultaneidade dos dados dos diferentes instrumentos. Os casos mais notórios foram escolhidos por possuírem assinaturas espaçotemporais bastante perceptíveis nas imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, representando de maneira típica o fenômeno de Bandas Claras.

As noites escolhidas para análise do fenômeno de Bandas Claras são: 25-26 de setembro de 1987; 25-26 de agosto de 1987; 25-26 de agosto de 1998 e 04-05 de setembro de 1997. Os casos são apresentados nas Seções 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3 e 6.3.4.

### 6.3.1 - Análise da noite de 25-26 de setembro de 1987

A ocorrência de uma Banda Clara na noite de 25-26 de setembro de 1987, sobre o campo de visão do imageador *all-sky* de Cachoeira Paulista é ilustrada na Figura 6.3. O fenômeno se propaga no sentido norte-sul com uma velocidade média estimada em 136 m/s. A extensão horizontal estimada da estrutura é de 1320 km.

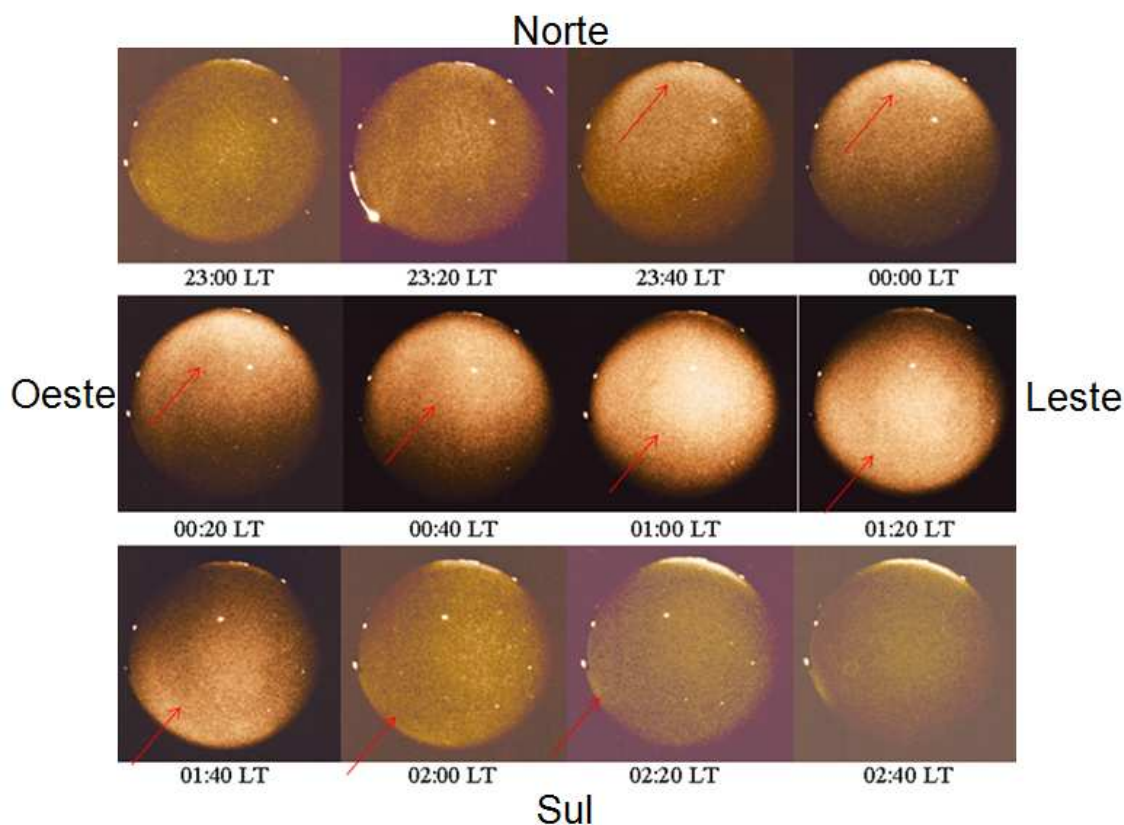


Figura 6.3: Propagação de uma Banda Clara na noite de 25-26 de setembro de 1987. A estrutura entra no campo de visão do imageador às 23:40 TL e sai às 02:20 TL. As setas apontam para a estrutura da Banda Clara.

O gráfico de contorno apresentado na Figura 6.4 representa a intensidade relativa da emissão do OI 630,0 nm na noite de 25-26 de setembro de 1987, ilustrando a propagação da Banda Clara mostrada na Figura 6.3. A variação da latitude geográfica no gráfico da Figura 6.4 está entre aproximadamente 18° S e 27° S. Este é o campo de visão que recobre a área de 1024 km X 10 km da imagem linearizada. No centro da imagem está Cachoeira Paulista (22,7° S; 45° O), local onde o imageador esteve instalado.

O gráfico de contorno possui uma escala de cores, designando cores “frias” (tendendo ao violeta) para intensidades de emissão mais fracas. As cores “quentes” (tendendo ao vermelho) designam intensidades de emissão mais elevadas. A passagem de uma Banda Clara no campo de visão do imageador é registrada por uma assinatura avermelhada no gráfico de contorno.

Da mesma forma que a Figura 6.3, o gráfico de intensidade relativa da Figura 6.4 mostra a entrada da estrutura no campo de visão do imageador por volta das 23:40 TL e saída às 02:00 TL. A Banda Clara passa pelo zênite de Cachoeira Paulista por volta de 01:00 TL. As cores avermelhadas anteriores à ocorrência da Banda Clara são representantes do terminadouro solar e da anomalia equatorial na ionização.

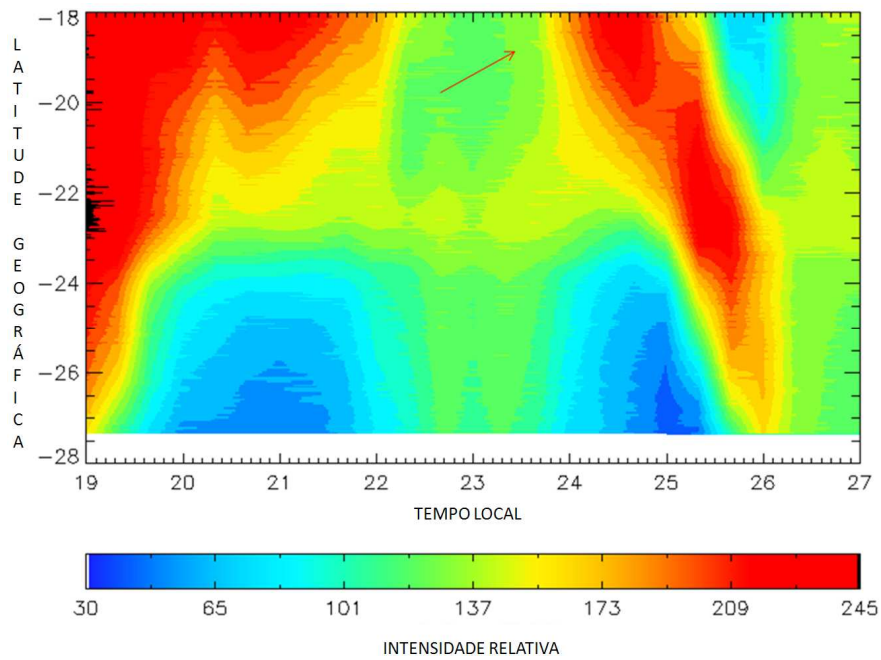


Figura 6.4: Gráfico de contorno de intensidade relativa para a noite de 25-26 de setembro de 1987. A seta aponta para o princípio da assinatura da Banda Clara.

A variação das emissões de luminescência para a noite de 25-26 de setembro de 1987 para os diferentes comprimentos de onda é apresentada na Figura 6.5.

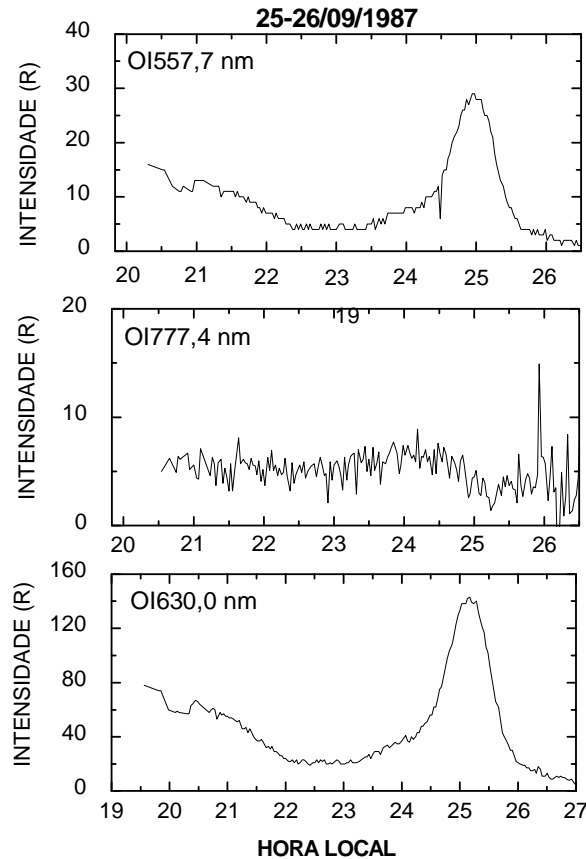


Figura 6.5: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm em função da hora local para a noite de 25-26 de setembro de 1987.

A passagem da Banda Clara provoca o acréscimo acentuado das emissões OI 630,0 nm e OI 557,7 nm. Isto ocorre porque o plasma da camada F ionosférica é transportado para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético, por ação dos ventos neutros soprando na direção do pólo. No período noturno, essas emissões dependem fortemente dos movimentos verticais da camada F ionosférica. O pico das emissões ocorre pouco depois da 01:00 TL, quando a estrutura da Banda Clara alcança o zênite de Cachoeira Paulista.

A emissão do OI 630,0 nm é formada a partir da recombinação dissociativa de íons  $O_2^+$  (oxigênio molecular) e  $NO^+$  (óxido nítrico) com elétrons, de modo que sua intensidade depende da concentração dos íons e elétrons. Por sua vez, os íons  $O_2^+$  e  $NO^+$  são formados a partir do nitrogênio molecular e oxigênio molecular.

Desta forma, conforme mostra a Equação 3.28, a taxa de emissão volumétrica integrada do OI 630,0 nm depende da concentração das moléculas O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> e de elétrons. Por isso varia conforme os movimentos verticais da ionosfera.

No caso da emissão OI 557,7 nm ionosférica, também formada a partir do mecanismo de recombinação dissociativa, quando o plasma é transportado para baixo, sua taxa de recombinação dissociativa também se eleva, aumentando a emissão de luminescência do OI 557,7 nm na ionosfera.

Da mesma forma que o OI 630,0 nm, a emissão OI 557,7 nm é formada a partir da recombinação dissociativa do íon oxigênio molecular com elétrons. A taxa de emissão volumétrica da emissão depende da concentração dos íons e elétrons e por isso varia conforme os movimentos verticais da ionosfera.

Segundo a reação de recombinação dissociativa do O<sub>2</sub><sup>+</sup> (Equações 3.2 a 3.6), as intensidades dessas emissões dependem fortemente das concentrações de elétrons e do íon O<sub>2</sub><sup>+</sup>, que se alteram conforme o movimento vertical da camada F durante a noite. Quando a camada F sobe, a concentração de O<sub>2</sub><sup>+</sup> diminui, ocorrendo uma diminuição na produção de estados excitados no nível <sup>1</sup>D e <sup>1</sup>S do oxigênio atômico. Como consequência, a taxa de emissão destas linhas espectrais será menor. Ao contrário, quando a camada F desce, a concentração do íon O<sub>2</sub><sup>+</sup> aumenta, elevando a produção de estados excitados ao nível <sup>1</sup>D e <sup>1</sup>S e, conseqüentemente, aumentando a taxa de emissão do OI 630,0 nm e OI 557,7 nm.

Contudo, como pode ser visto na Figura 6.5, o acréscimo acentuado na emissão de luminescência não é observado na emissão OI 777,4 nm. Ao invés disso, é observado um pequeno decréscimo iniciando por volta da meia-noite e meia local. Esta emissão é representativa do pico de densidade eletrônica da região F, uma vez que sua intensidade depende do quadrado da concentração eletrônica ambiente.

A intensidade de emissão volumétrica integrada da linha OI 777,4 nm, produzida pelo mecanismo de recombinação radiativa é descrita pela Equação 3.41. A intensidade de emissão volumétrica integrada, gerada a partir do mecanismo de recombinação íon-íon é dada pela Equação 3.45. De acordo com essas Equações, a intensidade da emissão OI 777,4 nm depende preponderantemente da integral em altura da concentração eletrônica ao quadrado. Por isso, sua emissão varia pouco com os movimentos verticais da camada F ionosférica.

Conforme mostra a Figura 6.5, a passagem de uma Banda Clara provoca uma pequena diminuição na emissão OI 777,4 nm. O aumento das taxas de recombinação entre íons e elétrons, devido à diminuição em altura do pico e da base da região F durante a ocorrência de uma Banda Clara, provoca a redução na densidade eletrônica do plasma. Então, a taxa de emissão do OI 777,4 nm, que depende da concentração eletrônica, sofre redução.

Os parâmetros de ionossonda h'F, hmF2 e foF2 para a noite de 25-26 de setembro de 1987 são apresentados na Figura 6.6. Os dados foram coletados pelas ionossondas instaladas em Cachoeira Paulista e Fortaleza.

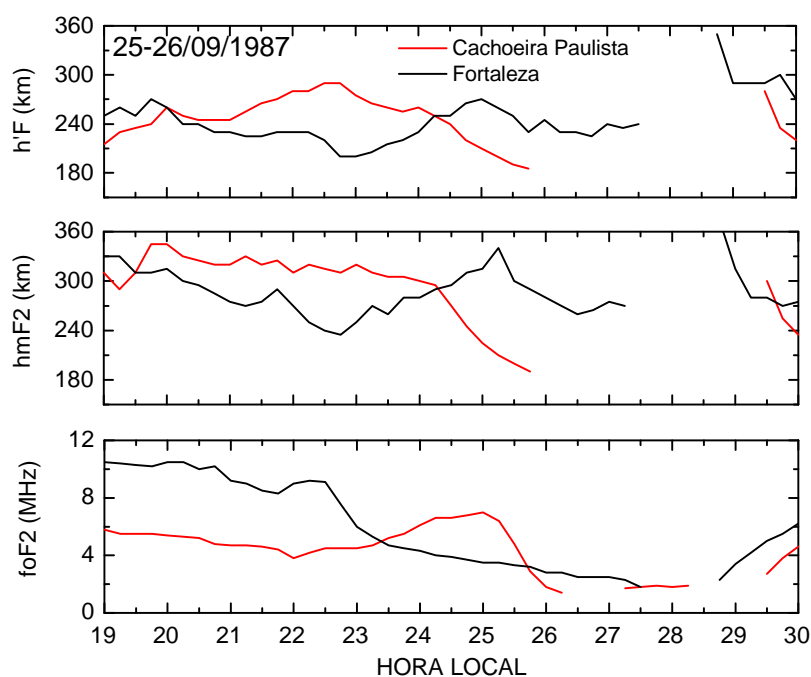


Figura 6.6: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de setembro de 1987, para Cachoeira Paulista e Fortaleza. No gráfico, a escala de tempo é decimal.

O parâmetro ionosférico  $h'F$  representa a altura virtual da base da camada F. O parâmetro  $hmF2$  representa a altura do pico de densidade eletrônica da camada F da ionosfera. O parâmetro  $foF2$  (frequência crítica da onda ordinária da camada F2) é representativo da densidade eletrônica do plasma da camada F.

Como a estrutura da Banda Clara se desloca no sentido dos pólos, primeiramente ocorre alteração dos parâmetros ionosféricos medidos pela ionossonda de Fortaleza. Em seguida, ocorre alteração dos parâmetros ionosféricos medidos pela ionossonda instalada em Cachoeira Paulista. A passagem da Banda Clara sobre a ionosfera é representada pela descida da base e do pico da camada F, representados respectivamente pelos parâmetros  $h'F$  e  $hmF2$ .

A Figura 6.6 mostra os efeitos da dinâmica da Banda Clara sobre a ionosfera de baixas latitudes, através da modificação dos parâmetros tanto em Fortaleza quanto em Cachoeira Paulista. A descida da base e do pico da camada F é representada pelo decréscimo dos valores de  $h'F$  e  $hmF2$ .

O bulbo de pressão criado pelo Máximo de Temperatura local provoca a reversão dos ventos neutros, que interagem com o plasma ionosférico, deslocando-o para baixo ao longo das linhas de campo geomagnético. O plasma então se recombina, provocando a emissão de luminescência, a assinatura ótica da Banda Clara.

Em Cachoeira Paulista, a descida da base e do pico da camada F inicia pouco antes das 23:00 TL. De acordo com as imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, o centro da estrutura alcança o zênite de Cachoeira Paulista por volta da 01:00 TL.



O abaixamento da ionosfera resulta no aumento das taxas de recombinação entre íons e elétrons, o que provoca a redução na densidade de plasma, representada pelo parâmetro foF2. O decréscimo dos valores de foF2, conforme ilustra a Figura 6.6, inicia em torno da 01:00 TL em Cachoeira Paulista. O aumento das taxas de recombinação irá aumentar a emissão das linhas OI 630,0 nm e OI 557,7 nm, que compõe a assinatura ótica da Banda Clara. O acréscimo da emissão do OI 630,0 nm é observado nas imagens *all-sky*.

A variação dos valores do índice Dst durante os dias 23 e 27 de setembro de 1987 é mostrada na Figura 6.7. No período, o menor valor do índice Dst é de -70 nT, no dia 26, caracterizando uma tempestade geomagnética moderada, segundo a Tabela 5.1.

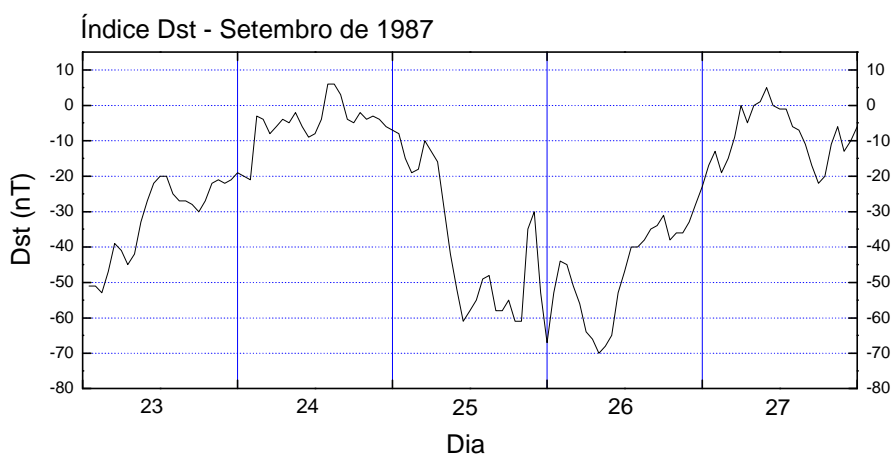


Figura 6.7: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 27 de setembro de 1987.

A Banda Clara ocorre sobre o campo de visão do imageador aproximadamente entre as 23:40 TL do dia 25 e 02:20 TL do dia 26 de setembro de 1987. Quase a totalidade do evento coincide com a fase de recuperação da tempestade geomagnética.

### 6.3.2 – Análise da noite de 25-26 de agosto de 1987

A passagem de uma Banda Clara na noite de 25-26 de agosto de 1987 é ilustrada na Figura 6.8. O fenômeno se propaga no sentido norte-sul com uma velocidade média estimada em 184 m/s. O diâmetro horizontal estimado da estrutura é de 1210 km. O gráfico de contorno da intensidade relativa para o fenômeno é apresentado na Figura 6.9.

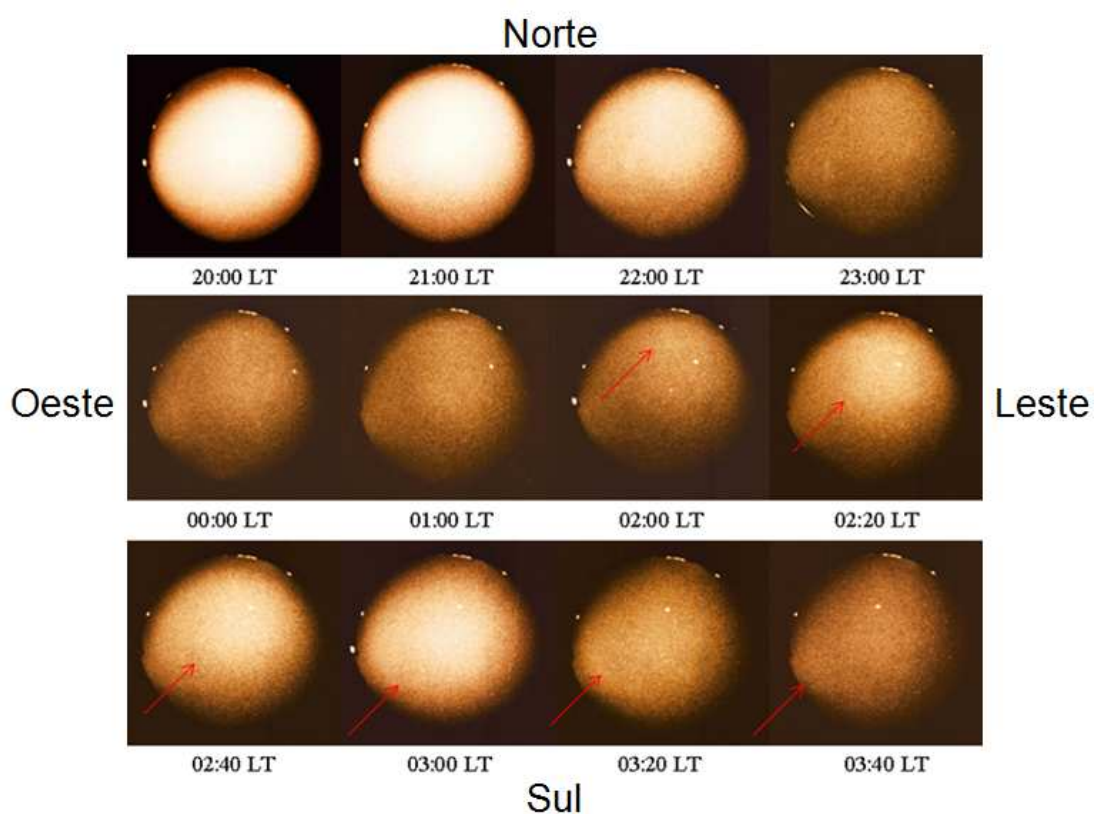


Figura 6.8: Ocorrência de Banda Clara na noite de 25-26 de agosto de 1987. A estrutura entra às 02:00 TL no campo de visão do imageador e sai às 03:40 TL.

Conforme mostram as Figuras 6.8 e 6.9, a estrutura da Banda Clara entra no campo de visão do imageador por volta das 02:00 TL e desaparece por volta das 03:20 TL, não se propagando para latitudes maiores. No gráfico de contorno, a assinatura avermelhada anterior à ocorrência da Banda Clara representa a anomalia equatorial e o terminadouro solar.

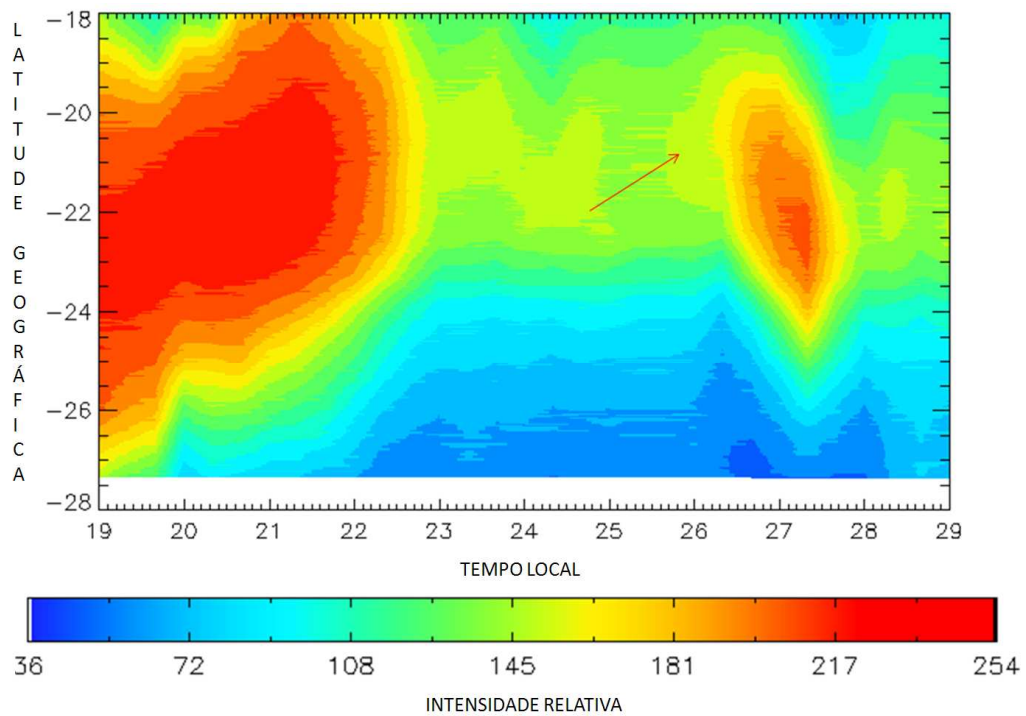


Figura 6.9: Gráfico de contorno de intensidade relativa, ilustrando o deslocamento de uma Banda Clara na noite de 25-26 de agosto de 1987, sobre o campo de visão do imageador de Cachoeira Paulista.

A variação das emissões de luminescência para a noite de 25-26 de agosto de 1987 para os diferentes comprimentos de onda é apresentada na Figura 6.10.

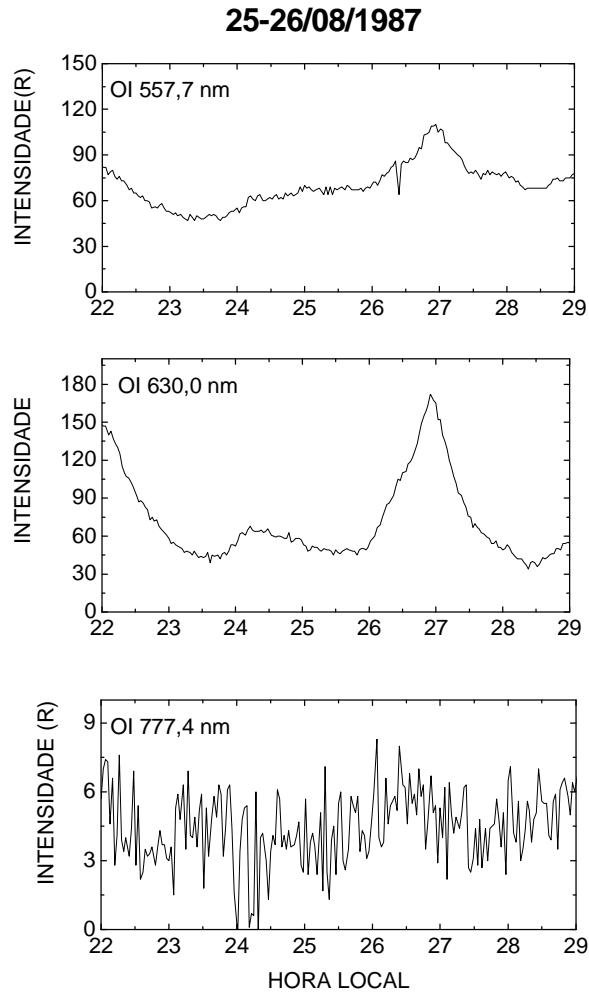


Figura 6.10: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 nm, OI 557,7 nm e OI 777,4 nm em função da hora local para a noite de 25-26 de agosto de 1987.

O abaixamento da ionosfera promove o acréscimo acentuado das emissões OI 630,0 nm e OI 557,7 nm, quando o plasma da camada F é transportado para baixo pela ação dos ventos neutros, se recombinando. O pico das emissões ocorre pouco antes das 03:00 TL.

A emissão OI 777,4 nm, conforme a Figura 6.10, sofre pequena variação durante a passagem da Banda Clara, uma vez que sua intensidade de emissão não depende majoritariamente do movimento vertical da camada F ionosférica. Verifica-se um pequeno decréscimo da emissão por volta das 02:30 TL. Devido

à baixa intensidade da emissão OI 777,4 nm, observa-se um elevado nível de ruído contaminando a medida do sinal.

A variação dos parâmetros de ionossonda para a noite 25-26 de agosto de 1987 é apresentada na Figura 6.11. Os dados foram coletados pelas ionossondas instaladas em Cachoeira Paulista e Fortaleza.

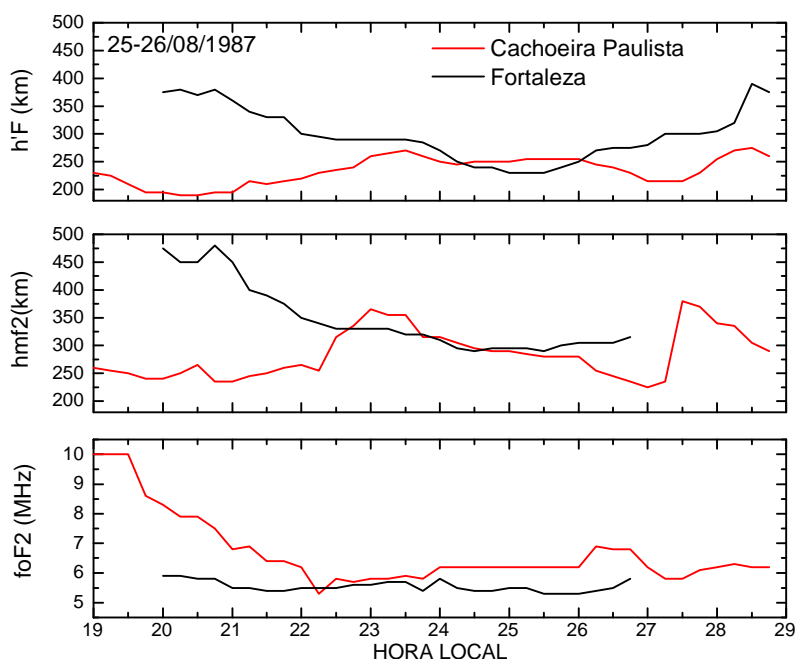


Figura 6.11: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de agosto de 1987, para Cachoeira Paulista e Fortaleza. No gráfico, a escala de tempo é decimal.

A Figura 6.11 mostra a alteração dos parâmetros ionosféricos medidos em Fortaleza e em Cachoeira Paulista, em razão do abaixamento da ionosfera, que irá produzir a assinatura ótica da Banda Clara a partir do aumento da recombinação.

A descida da base e do pico da camada F é representada pelo decréscimo dos valores de  $h'F$  e  $hmF2$ . Em Cachoeira Paulista a descida da base e do pico da camada F se acentua em torno das 02:00 TL. Em Fortaleza, a descida da base e do pico da camada inicia antes, entre 20:30 e 21:00 TL.

A densidade eletrônica do plasma da ionosfera, representada por foF2, começa a decrescer pouco depois das 02:30 TL em Cachoeira Paulista, em decorrência da recombinação responsável por gerar a assinatura ótica da Banda Clara. Em Fortaleza, não se observa uma variação significativa na densidade eletrônica do plasma. A seqüência de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm mostra que o centro da estrutura se encontra no zênite de Cachoeira Paulista por volta da 03:00 TL.

A variação dos valores do índice Dst durante os dias 23 e 30 de agosto de 1987 é apresentada na Figura 6.12. O menor valor alcançado pelo índice Dst no período é de - 97 nT, no dia 25, o que caracteriza uma tempestade geomagnética moderada, segundo a Tabela 5.1.

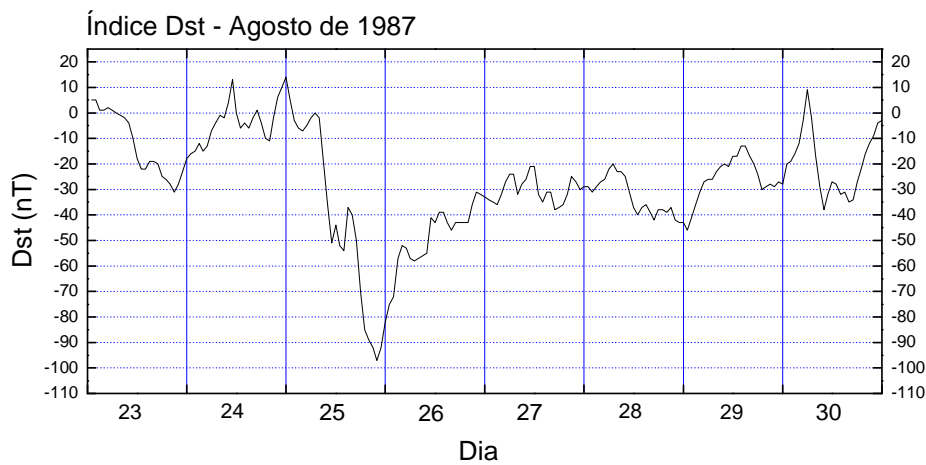


Figura 6.12: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 30 de agosto de 1987.

A Banda Clara ocorre sobre o campo de visão do imageador aproximadamente entre as 02:00 e 03:40 LT do dia 26 de agosto de 1987, coincidindo com a fase de recuperação da tempestade geomagnética.

### 6.3.3 - Análise da noite de 25-26 de agosto de 1998

Uma seqüência de imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm da noite de 25-26 de agosto de 1998, com presença de Banda Clara é apresentada na Figura 6.13. O fenômeno se propaga no sentido norte-sul com uma velocidade média estimada em 175 m/s. O diâmetro horizontal estimado da estrutura é de 1270 km. O gráfico de intensidade relativa para o caso é mostrado na Figura 6.14.

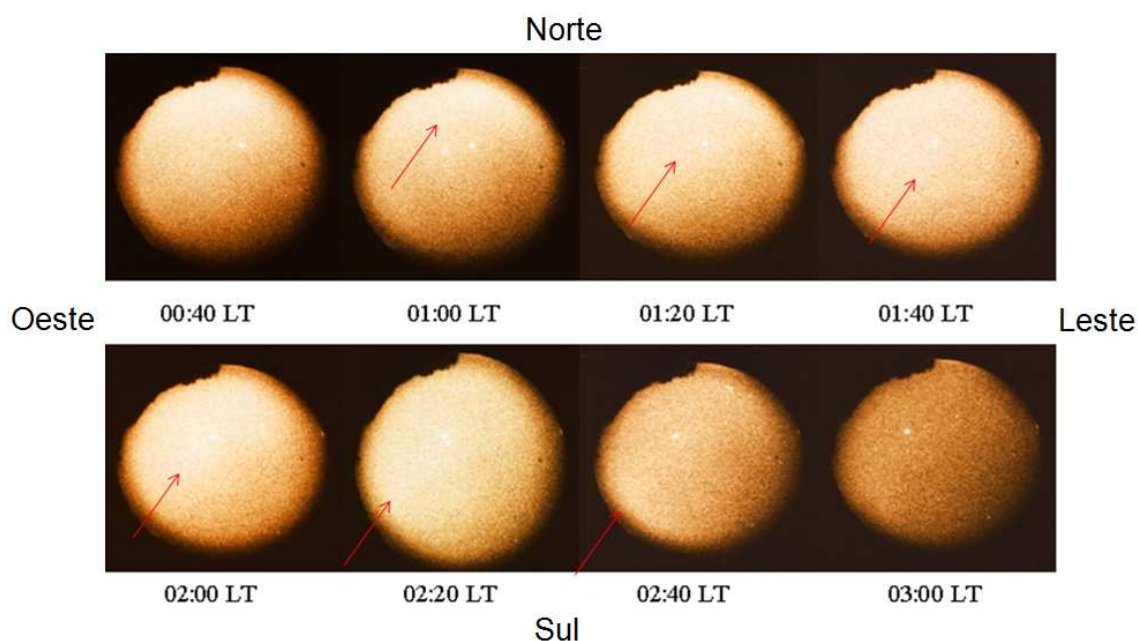


Figura 6.13: Passagem de Banda Clara durante a noite de 25-26 de agosto de 1998, observado com imageador instalado em Cachoeira Paulista.

A noite em questão apresenta uma condição de perturbação na ionosfera, devido à ocorrência de uma tempestade geomagnética, resultando no acréscimo das emissões de luminescência que não estão relacionadas ao fenômeno de Banda Clara.

De acordo com as Figuras 6.13 e 6.14, a Banda Clara entra no campo de visão do imageador em torno da 01:00 TL, saindo aproximadamente as 02:40 TL. O centro da estrutura passa pelo zênite de Cachoeira Paulista por volta das 02:00 TL.

A assinatura da Banda Clara é apontada pela seta vermelha na Figura 6.14. A região com assinatura avermelhada anterior à ocorrência da Banda Clara representa o terminadouro solar, a anomalia equatorial e as emissões decorrentes da perturbação da ionosfera.

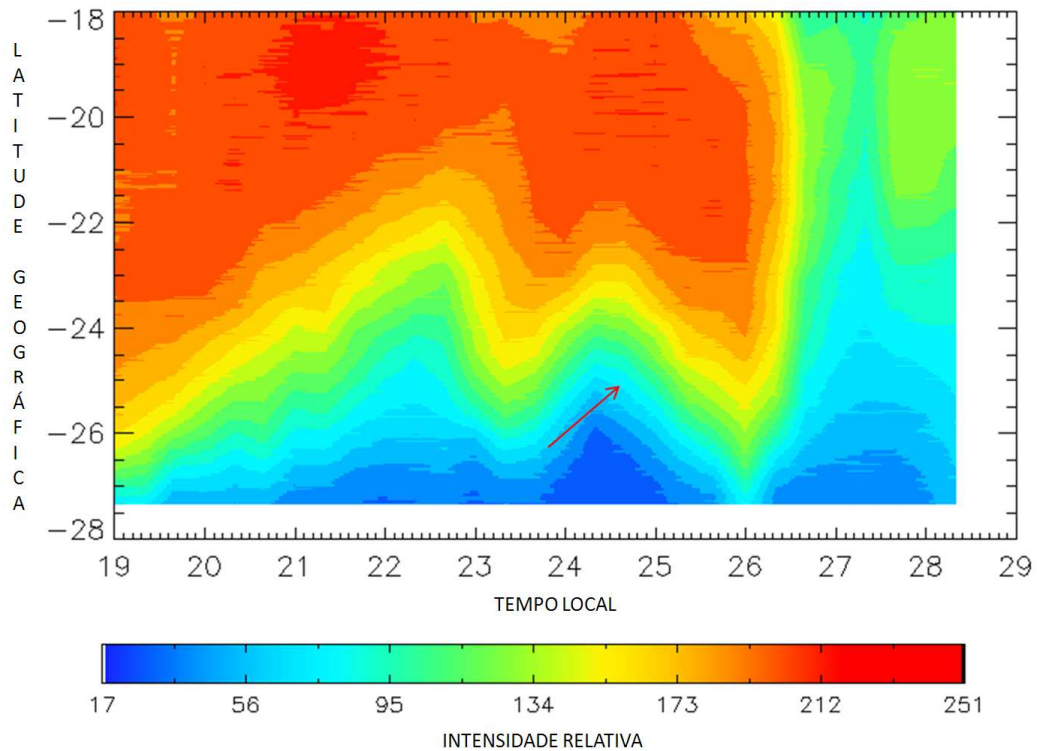


Figura 6.14: Gráfico de contorno de intensidade relativa para a noite de 25-26 de agosto de 1998. A seta aponta para o princípio da assinatura da Banda Clara no imageador, por volta das 23:40 LT.

A variação das emissões OI 630,0 nm e OI 557,7 nm é apresentada na Figura 6.15. Não há dados disponíveis para a emissão OI 777,4 nm.



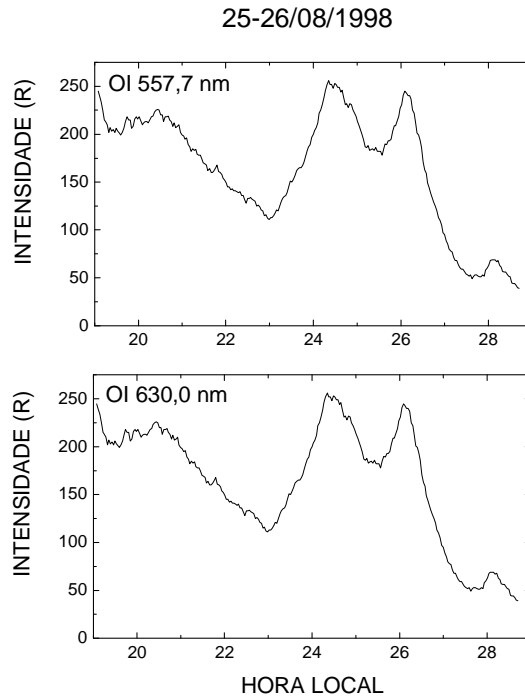


Figura 6.15: Intensidade de luminescência das linhas OI 630,0 *nm* e OI 557,7 *nm* em função da hora local para a noite de 25-26 de agosto de 1998.

Da mesma forma que o reportado nos dois casos anteriores, a passagem da Banda Clara se relaciona com o acréscimo acentuado das emissões OI 630,0 *nm* e OI 557,7 *nm*, quando as taxas de recombinação dissociativa se elevam, devido à descida da camada F da ionosfera sob ação dos ventos neutros. O pico das emissões devido à passagem da banda Clara ocorre pouco depois das 02:00 TL.

A variação dos parâmetros de ionossonda para a noite 25-26 de agosto de 1998 é exibida na Figura 6.16. Os dados foram coletados pelas ionossondas instaladas em Cachoeira Paulista e São Luís.

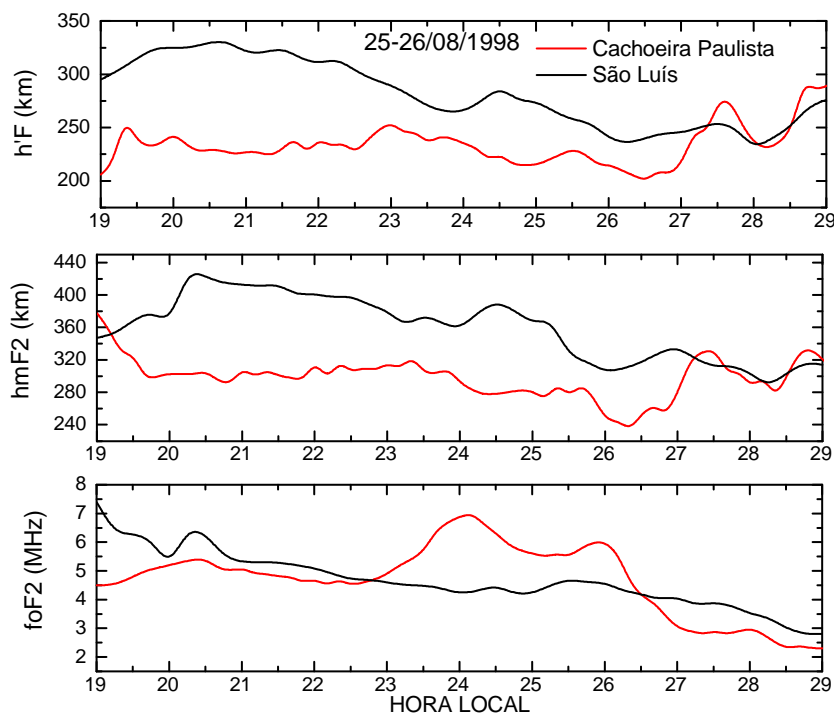


Figura 6.16: Parâmetros de ionossonda para a noite de 25-26 de agosto de 1998, para Cachoeira Paulista e São Luís. No gráfico, a escala de tempo é decimal.

Observa-se uma descida da base e do pico da camada F sobre São Luís, começando por volta das 20:30 TL. Sobre Cachoeira Paulista, a descida da base e do pico da camada F tem início por volta da 01:30 TL.

O decréscimo na densidade eletrônica do plasma, representada pelo parâmetro foF2, conforme a Figura 6.16, tem início por volta das 20:30 TL em São Luiz e por volta de 02:00 TL em Cachoeira Paulista. De acordo com as imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm, o centro da Banda Clara alcança o zênite de Cachoeira Paulista em torno das 02:00 TL.

A variação dos valores do índice Dst durante os dias 23 e 28 de agosto de 1998 é apresentada na Figura 6.17. No período, o menor valor do índice Dst é de -148 nT, no dia 27, caracterizando uma tempestade geomagnética intensa, segundo a Tabela 5.1.

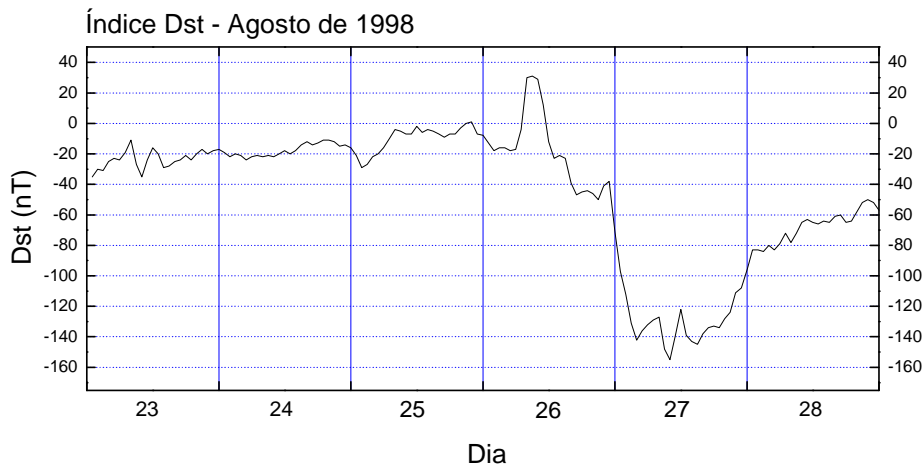


Figura 6.17: Variação horária do índice Dst entre os dias 23 e 28 de agosto de 1998.

A Banda Clara ocorre sobre o campo de visão do imageador aproximadamente entre as 01:00 TL e 02:40 TL do dia 26 agosto de 1998, coincidindo com a fase inicial da tempestade geomagnética.

#### 6.3.4 – Análise da noite de 04-05 de setembro de 1997

A ocorrência de uma Banda Clara na noite de 04-05 de setembro de 1997, detectada pelo imageador *all-sky* de Cachoeira Paulista é ilustrada na Figura 6.18. A estrutura se propaga no sentido nordeste - sudoeste com uma velocidade média estimada em 307 m/s. O diâmetro horizontal estimado da estrutura é de 1310 km. A Figura 6.19 mostra o gráfico de intensidade relativa para a seqüência de imagens.

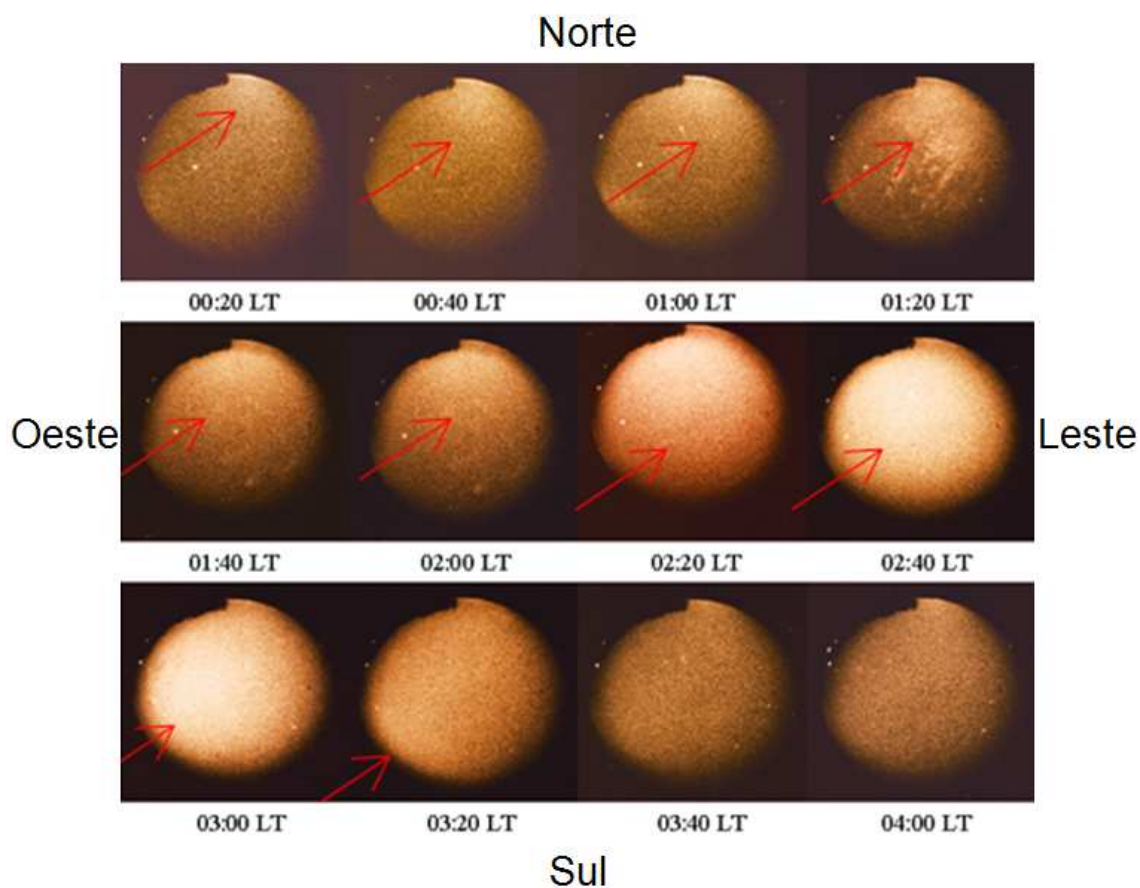


Figura 6.18: Seqüência de imagens da emissão OI 630,0 *nm* mostrando a passagem de uma Banda Clara sobre o campo de visão do imageador instalado em Cachoeira Paulista na noite de 04-05 de setembro de 1997.

A estrutura da Banda Clara entra no campo de visão do imageador em torno da 00:20 TL, saindo aproximadamente as 03:20 TL. O centro da estrutura atinge o zênite de Cachoeira Paulista por volta das 02:40 TL.

A assinatura avermelhada anterior à ocorrência do fenômeno no gráfico de intensidade relativa representa o terminadouro solar e a anomalia equatorial.

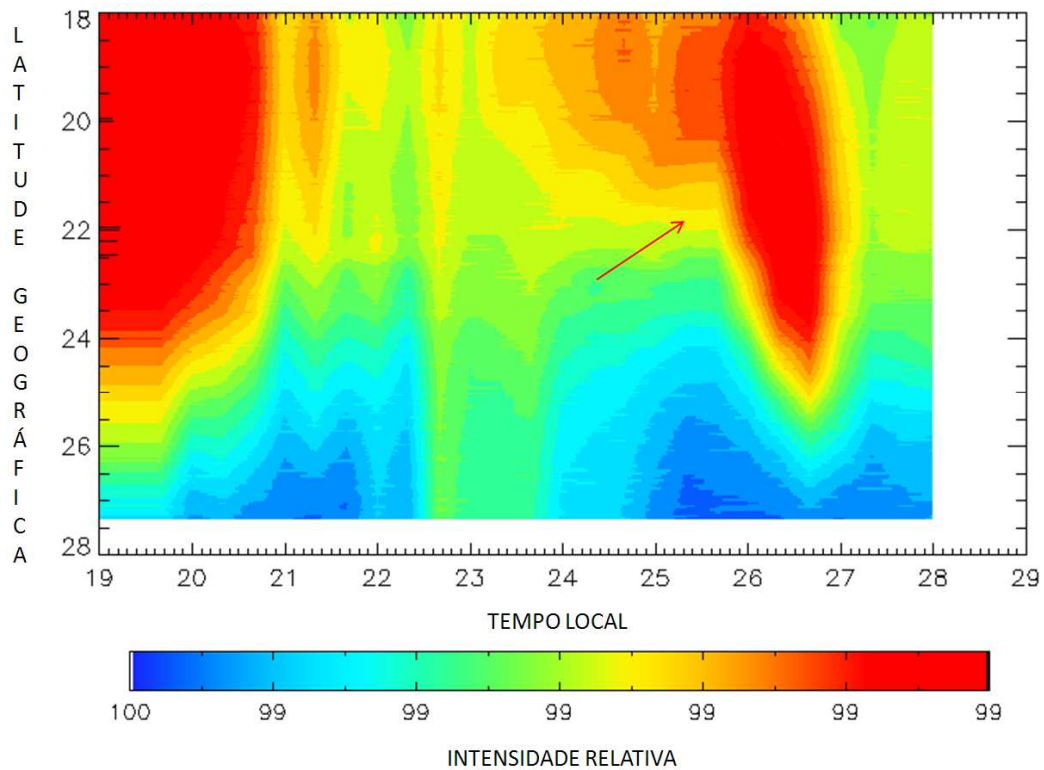


Figura 6.19: Gráfico de contorno de intensidade relativa, mostrando o deslocamento de uma Banda Clara na noite de 04-05 de setembro de 1997, sobre o campo de visão do imageador de Cachoeira Paulista.

A noite de 04-05 de setembro de 1997 não possui dados das emissões de luminescência disponíveis.

A variação dos parâmetros de ionossonda  $h'F$ ,  $hmF2$  e  $foF2$  para a noite 04-05 de setembro de 1997 é apresentada na Figura 6.20. Os dados foram coletados pela ionossonda instalada em São Luís. Não há dados de ionossonda disponíveis para Cachoeira Paulista.

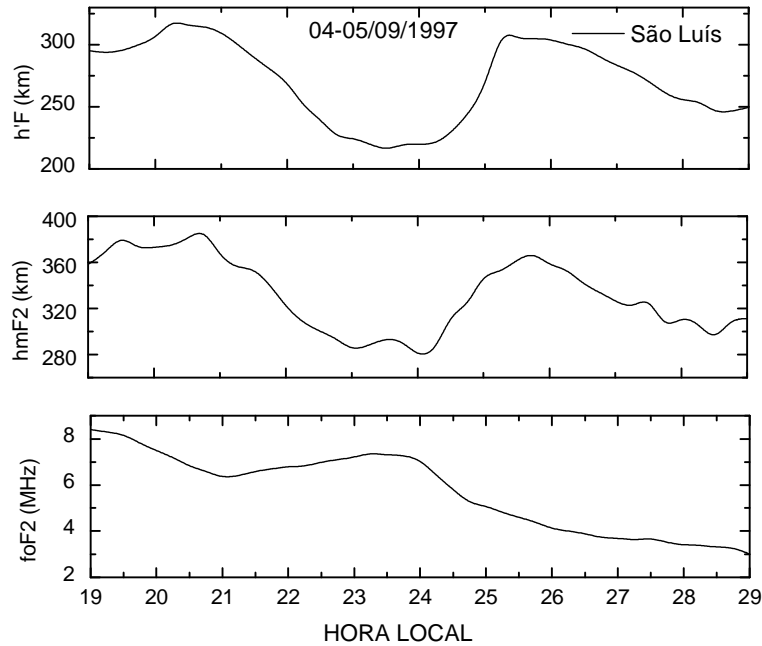


Figura 6.20: Parâmetros de ionossonda para a noite de 04-05 de setembro de 1997, medidos em São Luís. No gráfico, a escala de tempo é decimal.

Segundo a Figura 6.20, a altura do pico e da base da ionosfera sofre significativa variação, descendo a partir das 20:30 TL, até aproximadamente as 24:00 TL. Em seguida a camada sofre uma elevação e por volta da 01:30 TL inicia a descida da base e do pico da camada F sobre São Luís.

O decréscimo na densidade eletrônica do plasma inicia por volta das 23:30 TL. As imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm mostram que o centro da Banda Clara atinge o zênite de Cachoeira Paulista aproximadamente as 02:40 LT.

Os valores do índice Dst durante entre os dias 2 e 7 de setembro de 1997 são mostrados na Figura 6.21. No período, o menor valor do índice Dst é de -98 nT no dia 03, o que caracteriza uma tempestade geomagnética moderada, de acordo com a Tabela 5.1.

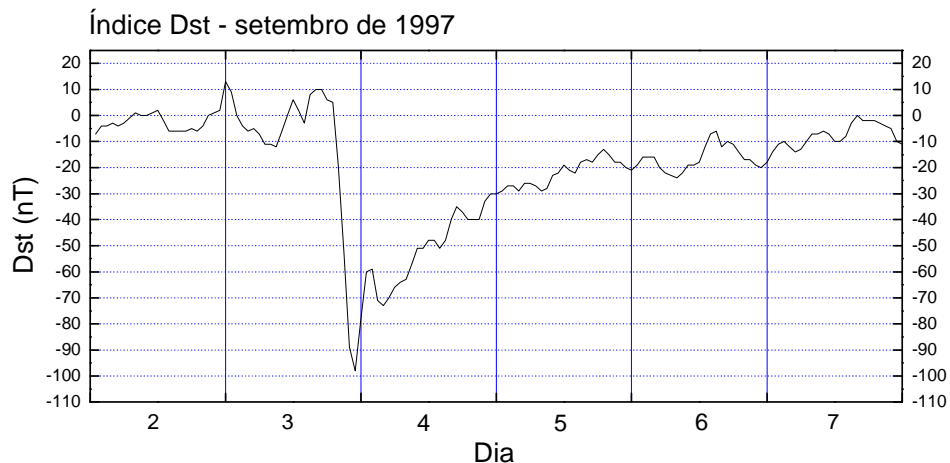


Figura 6.21: Variação horária do índice Dst entre os dias 2 e 7 de setembro de 1997.

A Banda Clara ocorre sobre o campo de visão do imageador aproximadamente entre as 00:20 TL e as 03:20 TL do dia 05 de setembro de 1997. O período de ocorrência coincide com a fase de recuperação da tempestade geomagnética.

### 6.3.5 – Considerações sobre o estudo de casos

O Máximo de Temperatura à Meia-noite pode provocar a inversão do sentido de propagação dos ventos neutros, que passam a soprar no sentido dos pólos. Ao interagirem com o plasma ionosférico, os ventos neutros deslocam o mesmo para baixo, ao longo das linhas de campo geomagnético, diminuindo a altura do pico e da base da ionosfera. O deslocamento vertical promove o aumento da recombinação e a conseqüente redução na densidade eletrônica do plasma. O aumento das taxas de recombinação provoca o acréscimo de emissão das linhas OI 630,0 nm e OI 557,7 nm. O acréscimo da emissão do OI 630,0 nm foi observado pelo imageador *all-sky* e se constitui como a assinatura ótica da Banda Clara detectada por esse equipamento.

Sobre Cachoeira Paulista foi observado, respectivamente através de fotômetro e ionossonda, acréscimos da emissão de luminescência (linhas OI 630,0 nm e OI 557,7 nm) e variações verticais da altura da camada ionosférica, ocorrendo

simultaneamente à passagem da Banda Clara sobre o ângulo de visão do imageador *all-sky*. A variação dos parâmetros de ionossonda sobre Fortaleza foi observada, ocorrendo anteriormente à variação observada em Cachoeira Paulista.

No caso de São Luiz, como se trata de uma região equatorial, não é esperado que os ventos neutros provoquem alteração no movimento vertical da ionosfera. Nas regiões próximas ao equador, onde as linhas de campo magnético são horizontais, a deriva vertical da ionosfera é devida a ação de campos elétricos. Seria possível que, em face da ocorrência de tempestades geomagnéticas, os campos elétricos possam se mapear para a região tropical, provocando movimentos horizontais e verticais do plasma.

Os quatro casos de Banda Clara analisados, com assinaturas espaçotemporais intensas e bastante típicas, estão ligados a ocorrência de tempestades geomagnéticas moderadas ou fortes. Em três dos casos analisados, as Bandas Claras surgiram na fase de recuperação das tempestades geomagnéticas. Em um dos casos, a Banda Clara surgiu na fase inicial da tempestade geomagnética.

Batista et al. (1997) utilizaram medidas do parâmetro hmF2 obtidas por uma ionossonda instalada em Cachoeira Paulista para calcular a velocidade dos ventos neutros. Os autores reportaram alterações no padrão de circulação dos ventos, que foram atribuídas a efeitos do Máximo de Temperatura à Meia-noite. Durante o solstício de dezembro, foram relatados casos em que o vento neutro passou a soprar em direção aos pólos, entre 22:00 e 1:00 TL. No solstício de junho houve um acréscimo na velocidade do vento, que já se movia em direção ao pólo, entre 1:00 e 3:00 TL. No período de equinócio, nenhum efeito relacionado ao MTM foi observado sobre a circulação dos ventos neutros.

O estudo de Batista et al. (1997) analisou noites geomagneticamente calmas da fase de alta atividade solar, enquanto esse estudo compreendeu todas as fases do ciclo solar e períodos geomagnéticos calmos e perturbados.



## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

A Banda Clara é um tipo de uma assinatura espaço-temporal que surge nas emissões de luminescência atmosférica da região F ionosférica. O fenômeno está associado a uma anomalia na temperatura neutra da termosfera de baixas latitudes, denominada de Máximo de Temperatura à Meia-noite. Essa anomalia é capaz de modificar a direção de propagação dos ventos termosféricos.

Os ventos neutros que tiveram sua propagação alterada, soprando em direção aos pólos, deslocam o plasma ionosférico para baixo, ao longo das linhas de campo geomagnético, provocando a descida da base e do pico da camada F da ionosfera. O deslocamento vertical promove o aumento da taxa de recombinação e a redução na densidade eletrônica do plasma. O aumento da taxa de recombinação ocasiona o acréscimo de emissão das linhas OI 630,0 nm e OI 557,7 nm. A redução da densidade eletrônica do plasma gera um decréscimo da emissão OI 777,4 nm.

A assinatura da Banda Clara nas imagens *all-sky* da emissão OI 630,0 nm é caracterizada por uma região de brilho, representativa de um acréscimo local na taxa de emissão de luminescência atmosférica, que se movimenta no sentido norte-sul ou nordeste - sudoeste, tomando como referência um imageador instalado no setor brasileiro de baixas latitudes. O fenômeno é bastante raro e foi pouco investigado no Brasil.

O estudo determina características importantes do fenômeno para o setor brasileiro de baixas latitudes, como frequência de ocorrência, direção e velocidade média de propagação e extensão horizontal. Além disso, o estudo avalia o comportamento da ionosfera frente à passagem de uma Banda Clara em regiões de baixas latitudes.

O estudo estatístico abrange março de 1987 a junho de 2000 (exceto os anos de 1989, 1991, 1992 e 1993), período um pouco maior do que um ciclo solar. Foram analisadas 3538,83 horas de observação com imageador *all-sky* e

detectadas 82 horas de ocorrência do fenômeno, correspondendo a 2,32 % do total de horas de imageamento. As Bandas Claras detectadas se propagam nas direções norte-sul (65% dos casos) e nordeste – sudoeste (35% dos casos).

Em relação à frequência de ocorrência das Bandas Claras ao longo do ciclo solar, a taxa de ocorrência é maior nos períodos de atividade solar ascendente e descendente, quando ocorreu o maior número de tempestades geomagnéticas. Nos períodos de atividade solar baixa e de atividade solar alta a taxa de ocorrência tende a ser menor.

Com respeito à variação mensal, a menor porcentagem de ocorrência se concentra nos meses de maio e junho, próximos ao solstício de junho e próximos ao inverno do hemisfério sul. Em setembro e outubro, meses próximos ao equinócio de setembro, a taxa de ocorrência de Bandas Claras é maior.

Considerando os casos analisados, as velocidades médias estimadas variam entre 136 m/s e 307 m/s. As extensões horizontais estimadas variam entre 1210 km e 1320 km de diâmetro.

A ocorrência de Banda Clara possivelmente está relacionada a eventos de tempestades geomagnéticas. É possível concluir que as tempestades geomagnéticas promovem o aquecimento da termosfera de baixas latitudes, transferindo energia para a termosfera e produzindo um Máximo de Temperatura à Meia-noite associado a uma Banda Clara.

Como tema para trabalhos futuros, propõe-se a investigação do fenômeno de Bandas Claras utilizando o novo imageador *all-sky* do INPE (instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS) associado a um interferômetro *Fabry-Perot*, a fim de se obter informações detalhadas sobre o fenômeno e avaliar seu alcance latitudinal. Sugere-se um estudo de marés atmosféricas no setor brasileiro em função da ocorrência de tempestades

geomagnéticas, com o propósito de comparar os resultados do estudo com a ocorrência de Bandas Claras.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, V. J.; Yee, J. H.; Solomon, S. C.; Dalgarno, A. The quenching rate of O(1D) by O(3P). **Planetary and Space Science**, v.34, n.11, p. 1143- 1145, 1986.

Bamgboye, D.K.; McClure, J.P. Seasonal variation in the occurrence time of the equatorial midnight temperature bulge. **Geophysical Research Letters**, v. 9, n.4, p. 457–460, 1982.

Banks, P.M.; Kockarts, G. **Aeronomy**. Part A. New York: Academic Press, 1973.

Batista, I.S.; Sastri, J.H.; de Medeiros, R.T.; Abdu, M.A. Nighttime thermospheric meridional winds at Cachoeira Paulista (23° S, 45° W): evidence for effects of the equatorial midnight pressure bulge. **Journal of Geophysical Research**, v. 102 (A9), n.20, p.59–62, 1997.

Bittencourt, J. A. **Excitation mechanisms for tropical emissions of atomic oxygen**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1972 (INPE-226-LAFE).

Bates, D. R.; Nicolet, M. The photochemistry of the atmospheric water vapor. **Journal of Geophysical Research**, v.55, n.3, p.301-327, 1950.

Behnke, R.A.; Harper, R.M. Vector measurement of F region ion transport at Arecibo. **Journal of Geophysical Research** v.78, n.34, p. 8222-8234, 1973.

Braessur, G.; Solomon, S. **Aeronomy of the middle atmosphere**. Dordrecht, Holanda: D. Reidel, 441 p., 1986,

Candido, C. M. N. **Estudos de irregularidades do plasma da camada ionosférica e equatorial e de baixas latitudes do setor brasileiro**. 2008. 285 p. (INPE-15246-TDI/1333). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

Chamberlain, J.W. **Physics of the aurora and airglow**. New York: Academic Press, 1961.

Chamberlain, J. W.; Hunter, D. M. **Theory of the planetary atmospheres**. Academic, 1987. v. 36.

Chian, A.; Reusch, M. F. **Física de plasma**. Niterói, RJ: Universidade Federal Fluminense, 1979.

Colerico, M.J.; Mendillo, M.; Nottingham, D.; Baumgardner, J.; Meriwether, J.; Mirick, J.; Reinisch, B.M.; Scali, J.L.; Fesen, C.G.; Biondi, M.A. Coordinated measurements of F region dynamics related to the thermospheric midnight temperature maximum. **Journal of Geophysical Research**, v. 101 (A12), n. 26, p. 783–793, 1996.

Colerico, M.J., Mendillo, M. The current state of investigations regarding the thermospheric midnight temperature maximum (MTM). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p.1361 – 1369, 2002.

Fagundes, P. R. **Estudo da dinâmica da termosfera em baixas latitudes**. 1993. 169p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

Forbes, J.M.; R.G. Roble. Thermosphere-Ionosphere Coupling: An Experiment in Interactive Modeling, **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 201-208, 1990.

Garcia, F.J.; Taylor, M.J.; Kelley, M.C. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. **Applied optics**, v.36, n.8, p.7374-7385, 1997.

Gobbi, D. **Estudo de ondas de gravidade na alta atmosfera através de observações de luminescência atmosférica da hidroxila OH(9-4) e Oxigênio O<sub>2</sub>(0-1)**. 1993, p. 208. (INPE 5539-DTI/527). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

González, W.D.; Joselyn, J.A.; Kamide, J.A.; Kroehl, H.W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B.T.; Vasyliunas, V.M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n.A4, p. 5771-5792, 1994.

Greenspan, J.A. Synoptic description of the 6300 Å nightglow near 78° west longitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 28, 739–745, 1966.

Hanson, W.B. Radiative recombination of atomic oxygen ions in the nighttime F region. **Journal of Geophysical Research**, v.74, no. 14, p. 3720-3722, 1969.

Hargreaves, J. K. **The solar-terrestrial environment**. London: Cambridge University Press, 1992.

Hari, S.S.; Krishna Murthy, B.V. Seasonal variations of equatorial night-time thermospheric meridional winds. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n.11, 1241–1246. 1995.

Herrero, F.A.; Meriwether, J.W. 6300 Å airglow intensity gradients. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 4191–4204. 1980.

Herrero, F.A.; Spencer, N.W. On the horizontal distribution of the equatorial thermospheric midnight temperature maximum and its seasonal variation. **Geophysical Research Letters**, v.9, p. 1179–1182, 1982.

Herrero, F.A.; Mayr, H.G.; Spencer, N.W. Latitudinal (Seasonal) variations in the thermospheric midnight temperature maximum: a tidal analysis. **Journal of Geophysical Research**, v. 88, n. A9, 7225–7235. 1983.

Hunsucker, R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere - a review. **Reviews of Geophysics**, v.20, n. A2, p. 293-315, 1991.

Johnston, J. E.; Broadfoot, A. L. Midlatitude observations of the airglow: Implication to quenching near the mesopause. **Journal of Geophysical Research**, v.98 n.D12, p. 21593-21603, 1993.

Kirchhoff, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 141 p.

Krassovsky, V. I.; Shefov, N. N.; Yarin, V. I. Atlas of the Airglow Spectrum 3000-12400 Å. **Planet Space Science**, v. 9, p. 883-915, 1962.

Maekawa, R. **Observation of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging**. 64p. Kyoto, Japan. Master Thesis (Aeronomy) - Kyoto University, 2000.

Massey, H.S.W. **Electronic and ionic impact phenomena**, Oxford at the Clarendon: London, 1969.

Mayr, H.G.; Harris, I.; Spencer, N.W.; Hedin, A.E.; Wharton, L.E.; Potter, H.S.; Walker, J.C.G.; Carlson, H.C. Tides and the midnight temperature anomaly in the thermosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 6, p. 447-450, 1979.

Mende, S.B.; Eather, R.H. Monochromatic all-sky observations and auroral precipitation patterns. **Journal of Geophysical Research**, v.81, n. 22, p.3771, 1976.

Mendillo, M.; Baumgardner, J. Airglow characteristics of equatorial plasma depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A9, p. 7641-7651, 1982.

Nelson, G.L.; Cogger, L.L. Dynamical behavior of the nighttime ionosphere at Arecibo. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 33, p. 1711-1726, 1971.

Peterson, V.I.; Steiger, W.R. F-region nightglow emissions of atomic oxygen. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 9, p. 2267-2277, 1966.

Peterson, V.L. e Vanzandt, T.E., O(1D) Quenching in ionospheric F-region. **Planetary and Space Science**, v.17, no.10, p.1725, 1969.

Pimenta, A. Á. **Estudos da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical**. 2002. 194 p. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

Pimenta, A. Á.; Lopes, L.; Machado, C. S.; Amorim, D. C.; Schuch, N. J.; Fagundes, P. R.; Sahai, Y.; Abalde, J. R.; Bittencourt, J. A.; da Rosa, M. B.;

Girardi, T. **Plasma irregularities in the F region studied by ground-based optical in the brazilian sector.** Trabalho apresentado no AGU Meeting of the Americas, 08–12 de agosto de 2010.

Rao, H.N.R.; Sastri, J.H. Characteristics of the equatorial midnight temperature maximum in the Indian sector. **Annales Geophysicae**, v. 12, p. 276–278, 1994.

Rees, M. H. **Physics and chemistry of the upper atmosphere.** Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

Rishbeth, H.; Garriot, O. K. **Introduction to ionospheric physics.** New York: Academic Press, 1969.

Ratcliffe, J. A. **The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere.** Cambridge: Cambridge University Press, 1962.

Rishbeth, H. The F-layer dynamo. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 2, p. 263-267, 1971a.

Rishbeth, H. High above the Earth. **Nature**, v. 418, n. 6893, p. 23, 2002.

Sastri, J.H.; Rao, H.N.R.; Optical interferometer measurements of the thermospheric temperature at Kavalur (12.55°N, 78.5°E), India. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, n.6, p. 775–782, 1994.

Sastri, J.H.; Rao, H.N.R.; Somayajulu, V.V.; Chandra, H. Thermospheric meridional neutral winds associated with equatorial midnight temperature maximum (MTM). **Geophysical Research Letters**, v. 21, n.9, p. 825–828, 1994.

Sobral, J.H.A.; Carlson, H.C.; Farley, D.T.; Swartz, W.E. Nighttime dynamics of the F region near Arecibo as mapped by airglow features. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. A6, p. 2561–2566, 1978.

Sobral, J.H., Takahashi, H. Abdu, M. A., Muralikrishna, P., Sahai, Y. Zamlutti, C.J., de Paula, E.R., Batista, P. P. Determination of the Quenching Rate of the O(<sup>1</sup>D) by O(<sup>3</sup>P) from Rocket-Borne Optical (630 nm) and Electron Density Data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 98, n. A5, p. 7791-7798, 1993.

Spencer, N.W.; Carignan, G.R.; Mayr, H.G.; Neimann, H.B.; Theis, R.F.; Wharton, L.E. The midnight temperature maximum in the Earth's equatorial thermosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 6, n. 6, p. 444–446, 1979.

Takahashi, H. Clemesha, B. R., Batista, P. P. Sahai, Y. Abdu, M. A., Muralikrishna, P. Equatorial f-region OI6300 A and OI 5577 A emission profiles observed by rocket-borne airglow photometers. **Planetary and Space Science**, v. 38, n. 4, p. 547-554, 1990.



Tinsley, B.A.; Christensen, A.B.; Bittencourt., J.A.; Gouveia, H.; Angreji, P.D.; Takahashi, H. Excitation of oxygen permitted line emission in the tropical nightglow. **Journal of Geophysical Research**, v.78, no.7, p. 1174-1186, 1973.

Titheridge, J. E. Winds in the ionosphere – A review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 57, n. 14, p. 1681-1714, 1995a.

Volland, H. Dynamics of the disturbed ionosphere. **Planetary and Space Science**, v.34, no. 4-5, p. 327-335, 1983.

Weber, E. J.; Buchau, J.; Eather, R. H.; Mende, S. B. North-South aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. A2, p. 712-716, 1978.

Yamashita, C.S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 75p. (INPE-7516-TDI/729). (Dissertação em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.