

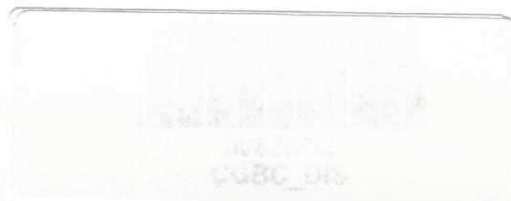
MEINARDO FURTADO DA COSTA

ESTUDO DA RAZÃO ENTRE AS INTENSIDADES DAS EMISSÕES DO
OI557,7 nm E DO OI630,0 nm NA REGIÃO EQUATORIAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
MESTRADO EM METEOROLOGIA

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO - 2002



ESTUDO DA RAZÃO ENTRE AS INTENSIDADES DAS EMISSÕES DO
OI557,7 nm E DO OI630,0 nm NA REGIÃO F EQUATORIAL

MEINARDO FURTADO DA COSTA

ESTUDO DA RAZÃO ENTRE AS INTENSIDADES DAS EMISSÕES DO
OI557,7 nm E DO OI630,0 nm NA REGIÃO EQUATORIAL

Dissertação apresentada ao Curso
de Mestrado em Meteorologia da
Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Ciências Atmosféricas
Mestrado em Meteorologia



C837e Costa, Meinardo Furtado da
Estudo da razão entre as intensidades das emissões do
OI557,7 nm e do OI630,0 nm na região equatorial /
Meinardo Furtado da Costa. - Campina Grande, 2002.
112 f. : il. color

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade
Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Atmosfera-Intensidade 2. Intensidade Atmosférica 3.
Meteorologia 4. Dissertação I. Buriti, Ricardo Arlen, Dr.
II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande(PB)
III. Título

CDU 551.510.4(043)

MEINARDO FURTADO DA COSTA

ESTUDO DA RAZÃO ENTRE AS INTENSIDADES DAS EMISSÕES DO
OI557,7 nm E DO OI630,0 nm NA REGIÃO EQUATORIAL

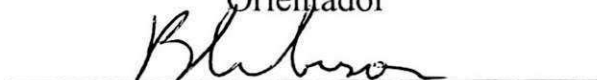
Aprovado em: 17/05/2002

BANCA EXAMINADORA



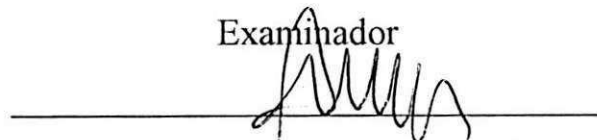
Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti

Orientador



Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Examinador



Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros

Examinador

Com muito amor, à minha
esposa Andreza Angélica
Soares Furtado e às minhas
filhas Brenda Natally
Soares Furtado e Bianca
Layse Soares Furtado.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação do Mestrado em Meteorologia, professores e funcionários.

Ao Prof. Dr. Ricardo Arlen buriti, pela orientação e os ensinamentos ministrados e sobretudo pelo estímulo as minhas atividades.

À André A . Nepomuceno, Estudante de Física, pela colaboração na elaboração desta dissertação.

Ao operador do fotômetro, Augusto, pelos bons serviços prestados.

Ao grupo de Pesquisa de Luminescência Atmosférica da UFPB.

E às demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram na elaboração desta dissertação.

RESUMO

A emissão da linha verde devida ao oxigênio excitado no nível quântico 1S (OI557,7 nm) é proveniente de duas regiões da atmosfera terrestre. Uma em torno de 97 km – topo da mesosfera – é a que apresenta a maior intensidade de emissão. A outra, cuja intensidade de emissão é menor, é chamada de região F da ionosfera e está localizada, em média, a 250 km de altitude. Atualmente usam-se duas técnicas de medida desta intensidade. Os instrumentos óticos instalados no solo, medem a intensidade integrada e, conseqüentemente, não distingue qual é a quantidade proveniente de cada região. A técnica mais bem sucedida para este tipo de medida é através de lançamento de fotômetros instalados em foguetes que podem atingir altitudes acima de 400 km. A grande vantagem desta técnica é a possibilidade de realizar medidas da intensidade *in situ* e obter o perfil de emissão (intensidade versus altitude) do OI557,7 nm. Porém, a grande desvantagem desta técnica é o alto custo envolvido. Também é sabido que este percentual, considerado como 20% da emissão do OI630,0 nm, varia bastante dependendo de vários parâmetros atmosféricos. Este trabalho consiste em determinar o valor da intensidade do OI557,7 nm proveniente da região F, para que seja subtraído da intensidade total medida pelo fotômetro instalado em São João do Cariri (8,5°S, 36°W) e assim, obter-se a intensidade do OI557,7 nm na mesosfera. Esta técnica consiste em obter os valores das intensidades do OI557,7 nm e do OI630,0 nm (linha vermelha) antes e durante a passagem de bolhas de plasma no campo de visão do fotômetro. O conjunto de dados analisados é referente ao período entre janeiro de 1998 e junho de 2001. Deste conjunto foram selecionados 96 eventos que permitiram obter a razão entre a intensidade do OI557,7 nm com

relação a intensidade do OI630,0 nm. A razão média obtida foi de $0,31 \pm 0,08$ e apresenta uma dependência anual.

ABSTRACT

The green line emitted by the deexcitation of the oxygen atom from its 1S quantum state (OI557,7 nm) comes from the two regions of the terrestrial atmosphere, one of them, which is responsible for the greater intensity of emission, is located at the top of mesosphere at an altitude of about 97 km. The other region, called F of the ionosphere and responsible for the less intensity of emission, is situated at an altitude of about 250 km on the average. The optical instruments used for the measurements of the total intensity are unable to sort out the quantity of emission coming from each part of the above cited regions. The most successful experimental technique to this end is the that of photometers installed on the rocket propelled space vehicles which can go up to the hight of 400 km. This technique bears a special advantage to be able to measure the emission profile (intensity versus altitude) in loco of the OI557,7 nm spectral line, however, the cost involved are far higher. It is known that this contribution of about 20% of the emission at OI630,0 nm varies significantly as a function of various atmospheric parameters. Our research work presented here determines the value of the emission of OI557,7 nm, coming from F region. Subtracting the latter contribution from the total intensity of emission we obtain the values corresponding to OI557,7 nm of mesosphere. The total intensity is measured by the photometer installed at São João do Cariri (7,5° S; 36° W). We have used this technique to obtain the values of the intensities of emission at OI557,7 nm and OI630,0 nm (red line) before and during the passage of the plasma bubbles in the field of view of the photometer referred above. The data presented here were taken from january 1998 to june 2001. We made a judicious selection of 96 events out of this data

to determine the ratio of the intensities at the green line (OI557,7 nm) to those of the red line (OI630,0 nm). The ratio thus obtained is $0,31 \pm 0,08$ and shows na annual dependence.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Atmosfera Terrestre.....	17
1.2	Atmosfera Segundo sua Temperatura.....	17
1.3	Atmosfera Segundo sua Densidade Eletrônica.....	21
1.4	Luminescência Atmosférica.....	25
1.4.1	Emissões do Oxigênio Atômico.....	27
1.4.2	Emissões do O ₂ Atmosférico O ₂	29
1.5	Instrumentação na Luminescência	29
1.6	Bolhas de Plasma.....	31
1.7	Objetivo e Estrutura da Dissertação.....	32
2.	LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA E BOLHAS DE PLASMA.....	35
2.1	Luminescência Atmosférica.....	35
2.1.1	Introdução.....	35
2.1.2	Fotoquímica.....	37
2.1.2.1	Introdução.....	37
2.1.2.2	Mecanismo de Excitação do Oxigênio Atômico na Mesosfera.....	42
2.1.2.3	Taxa de Reação Integrada do OI630,0 nm na Região F.....	47
2.2	Bolhas de Plasma.....	48
2.2.1	Introdução.....	48

3.	INSTRUMENTAÇÃO	52
3.1	O fotômetro MULTI 3	52
3.1.1	Introdução	52
3.2.1	Descrição do Equipamento	54
3.1.3	Determinação dos Canais	59
3.1.4	Calibração	60
3.1.3.1	Transmissão dos Filtros	61
3.1.4	Determinação da Sensibilidade	64
3.1.5	Redução dos Dados	68
3.1.6.1	Filtro #F ₁ – 557,7 nm	69
3.1.6.2	Filtro #F ₃ – 630,0 nm	71
3.1.6.3	Filtro #F ₅ – 868,5 nm	72
4.	DADOS DO MULTI 3 E METODOLOGIA	77
4.1	Dados do MULTI 3	77
4.2	Estatística dos Dados Observados	82
4.3	Metodologia	87
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
5.1	Resultados	92
5.2	Discussão	98
6.	CONCLUSÃO	104
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE FIGURAS

1.1 Perfis de temperatura da atmosfera e concentração de alguns constituintes da atmosfera para a cidade de São João do Cariri-Pb.	20
1.2 Distribuição vertical da concentração eletrônica calculada para a cidade de São João do Cariri utilizando o modelo IRI	25
2.1 Espectro de airglow mostrando as principais linhas de emissão	37
2.2 Perfil de emissão teórica para o OI557,7 nm referente ao dia 30 de abril de 1997 às 23:00 LT para São João do Cariri.....	46
2.3 Níveis de energia e transição do oxigênio atômico mostrando algumas linhas emitidas mais importantes no airglow e/ou aurora. Fonte: Hargreaves (1992)	50
2.4 Imagem de uma bolha de plasma sobre o céu de São João do Cariri.....	51
3.1 Fotografia do fotômetro MULTI 3 instalado no OLAP	53
3.2 Diagrama de blocos do fotômetro MULTI 3	55
3.3 Diagrama da parte ótica do MULTI 3	57

3.4 Diagrama detalhado do mecanismo de elevação de cada filtro de interferência com o sensor ótico e as microchaves.	58
3.5 Montagem experimental usada para determinar a sensibilidade absoluta do fotômetro	64
3.6 Curvas de transmitância para o filtro #F ₁	69
3.7 Curvas de transmitância para o filtro #F ₃	72
3.8 Curvas de transmitância para o filtro #F ₅	73
4.1 Hora do nascer e do pôr-do-sol para São João do Cariri Programa Skymap.	78
4.2 Comportamento da luz de fundo (em 554,0 nm) para o dia 18/01/2001.	80
4.3 Comportamento das intensidades do a) OI557,7 nm, b) O ₂ (0,1), c) OI630,0 nm e d) luz de fundo obtida pelo MULTI 3 em 12/12/1998.	81
4.4 Histograma do número de depressões observadas no OI557,7 nm e OI630,0 nm para o Cariri nos anos de 1998 à 2001.	86

4.5	Histograma do número de depressões utilizadas para obter o percentual de OI557,7 na camada F da ionosfera para o Cariri entre os anos de 1998 à 2001.	86
4.6	Comportamento da intensidade OI557,7 nm e O ₂ (0,1)	88
5.1	Histograma do número de ocorrência para cada valor de <i>r</i> encontrado	93
5.2	Distribuição da razão média em função dos meses dos anos de 1998 à 2001.	95
5.3	Razão entre OI557,7 e OI630,0 em função do dia do ano para São João do Cariri.....	96
5.4	Valor da razão ao longo dos três anos e seis meses de dados Observados no Cariri.	97

LISTA DE TABELAS

3.1 Diferença entre a leitura de comprimento de onda do monocromador (MacPherson – 270) e as linhas espectrais das lâmpadas de neônio e mercúrio.	62
3.2 Irradiância $E_{\lambda}^{(')}$ da lâmpada padrão ES8315, radiância e brilhância fotométrica do segundo difusor.....	67
4.1 Distribuição mensal das depressões do ano de 1998.....	83
4.2 Distribuição mensal das depressões do ano de 1999.....	83
4.3 Distribuição mensal das depressões do ano de 2000.....	84
4.4 Distribuição mensal das depressões do ano de 2001	84
4.5 Distribuição total mensal das depressões dos três anos e seis meses de observações utilizadas	85
5.1 Razão média OI557,7/OI630,0 mensal.....	94

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Estudar a natureza físico-química da atmosfera terrestre é de fundamental importância, pois permite monitorar prováveis mudanças globais que possam ocorrer no nosso meio ambiente. A humanidade tem sido alertada para os cuidados que se deve ter para a preservação das condições de vida do nosso planeta. Os materiais e gases poluentes que o homem joga na atmosfera provocam fenômenos prejudiciais a ele mesmo, tais como buraco de ozônio e efeito estufa. Tais poluentes podem ser levados à altitudes de até 100 km devido a circulação dos ventos e espalhados globalmente. Assim, os estudos realizados sobre dinâmica e fotoquímica da atmosfera visam conhecer a natureza desta circulação e composição atmosférica para que se possa prever e, conseqüentemente, alertar a humanidade para mudanças que possam comprometer a nossa sobrevivência. A meteorologia, através de estudos da dinâmica da troposfera, procura evitar catástrofes através da previsão do tempo. No entanto, a tendência atual dos meteorologistas é também estudar o comportamento de sua região usual com outras regiões da atmosfera em busca de respostas para precisar melhor as previsões do tempo. Assim, ter em mãos um modelo atmosférico mais acurado, construído por meteorologistas e

aeronomistas (estudiosos da física e da química da alta atmosfera) é de grande importância para o homem.

1.1 Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre foi formada a aproximadamente 5 bilhões de anos (Vianello e Alves, 1991). Os gases predominantes no início eram o CO_2 , H_2O e H_2 , liberados por erupções vulcânicas. A produção de oxigênio veio a partir do surgimento de algas que sintetizavam suas moléculas orgânicas através do processo da fotossíntese. A atmosfera terrestre pode ser considerada como composta de: mistura de gases (ar seco), água nos seus três estados físicos e partículas sólidas. Os constituintes principais (em % por volume) são: Nitrogênio (N_2) -78%, Oxigênio (O_2) - 20%, Argônio (Ar) - 1%, Gás Carbono (CO_2), Gases Nobres e Outros - 1%. Embora pouco abundantes, o CO_2 , H_2O e O_3 têm grande capacidade de absorver radiação solar. A atmosfera terrestre pode ser classificada com relação ao seu perfil de temperatura ou com relação à sua densidade eletrônica.

1.2 Atmosfera Segundo sua Temperatura

De acordo com o perfil de temperatura, a atmosfera divide-se em:

a) Troposfera

Região compreendida desde a superfície até a altitude de aproximadamente 15-18 km no equador e 6-8 km nos pólos; aqui sua

temperatura decresce a uma taxa de aproximadamente $6,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ até um mínimo de $-50 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta diminuição é devida à expansão adiabática da atmosfera que foi aquecida pelo calor do solo ao absorver radiação solar. A obtenção de dados para estudo da dinâmica e composição desta região é a mais fácil entre todas, pois podem ser coletados diretamente através de sensores instalados a bordo de aviões, balões e na própria superfície. Nesta camada, desenvolve-se os principais fenômenos meteorológicos como nuvens, chuvas, ventos e por isso é chamada de zona dos turbilhões (Vianello e Alves, 1991).

b) Estratosfera

Região acima da troposfera e separada da mesma pela tropopausa (região onde a temperatura é mínima). Sua altitude máxima está compreendida entre 40 e 50 km. Sua temperatura, ao contrário da troposfera, aumenta até a aproximadamente $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Isto deve-se ao fato de absorver radiação solar no ultravioleta (comprimento de onda de 200-300 nm) e reemiti-la pelo ozônio (Vianello e Alves, 1991).

c) Mesosfera

Está localizada acima da estratopausa e abaixo da mesopausa, entre 50 e 100 km. Sua temperatura diminui até o mínimo de toda a atmosfera terrestre, aproximadamente, $-90 \text{ }^\circ\text{C}$. Sua principal fonte de calor é a absorção do ultravioleta pelo ozônio próximo da estratopausa. Como praticamente não existe absorção de radiação em altitudes bem acima da estratopausa, a

mesosfera tende a diminuir sua temperatura devido à expansão adiabática do ar, como no caso da troposfera. O estudo nesta região é difícil, pois, está acima das altitudes que balões podem alcançar e muito abaixo das órbitas de satélites. As medidas *in situ* só podem ser feitas por foguetes. Desta maneira, a utilização de equipamentos sensíveis à luz emitida por esta região é de grande importância para obtenção de informações sobre a dinâmica e composição da atmosfera (vianello e Alves, 1991; Kirchhoff, 1991).

c) Termosfera

Esta região está localizada acima da mesopausa e sua temperatura aumenta rápida e monotonicamente até uma altitude onde o caminho médio das moléculas é tão grande que o significado do gás não tem mais sentido. A radiação ultravioleta e os raios-X provenientes do sol, têm energia suficiente para ionizar e dissociar átomos e moléculas alterando a sua composição química e aquecendo esta parte da atmosfera. Como ela é menos turbulenta, os gases de diferentes densidades podem se separar de acordo com a altitude. A espécie mais dominante nesta região é o hidrogênio. Os limites das camadas, as chamadas pausas, estão localizadas nos pontos de inflexão em que o gradiente térmico é nulo (Iribarne e Cho, 1980; Kirchhoff, 1991).

Na Figura 1.1 são mostrados os perfis verticais de temperatura e concentração de alguns componentes da atmosfera segundo o modelo MSIS-90 (MSIS – Mass Spectrometer Incoherent Scalter) para a cidade de São João do Cariri-Pb (7,5° S; 36° W) no horário de 12h00 (tempo local) do dia 01.01.1997.

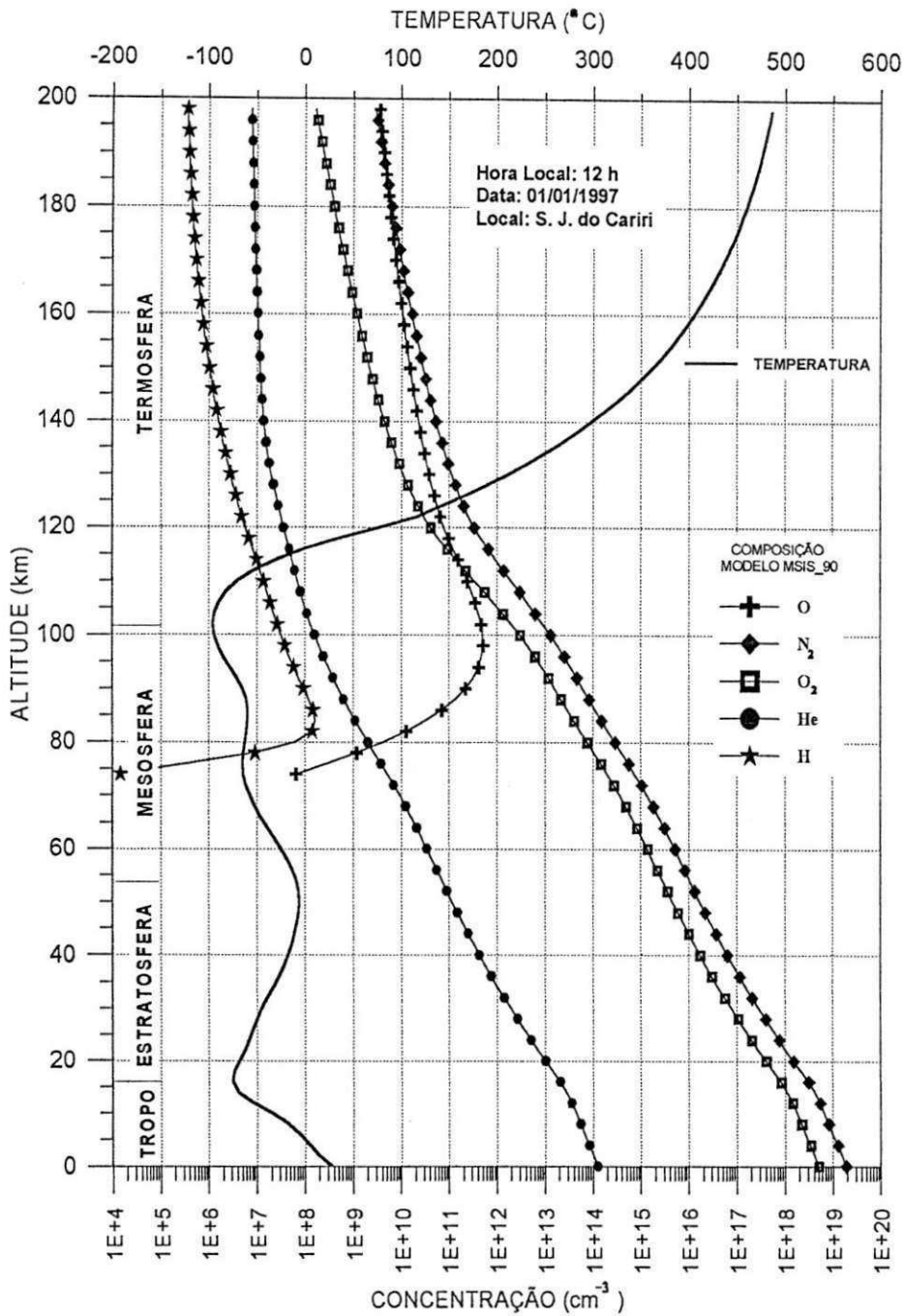


Fig.1.1 – Perfis de temperatura da atmosfera e concentração de alguns constituintes da atmosfera segundo o modelo MSIS-90 para cidade de São João do Cariri-Pb (7,5° S; 36° W).

1.3 Atmosfera Segundo sua Densidade Eletrônica

A atmosfera também pode ser classificada com relação a sua densidade eletrônica, constituindo assim a ionosfera, que estende-se de, aproximadamente 60 km, até alturas superiores a 1000 km. Sua formação deve-se à produção de íons, principalmente por absorção de raios-X e extremo ultravioleta solar. Em condições especiais, partículas de elevada energia cinética também podem produzir ionização através de colisões com partículas neutras, chamada de ionização secundária ou corpuscular (Iribarne e Cho, 1980; Kirchhoff, 1991).

A produção de pares íons-elétrons é proporcional ao número de fótons incidentes e ao número de partículas ionizáveis. Como a densidade atmosférica diminui com a altura, a absorção de fótons no topo é mínima e nas alturas inferiores, a produção é novamente pequena porque a maioria dos fótons já foram absorvidos nas regiões superiores. Portanto, a produção de pares íons-elétrons deve ter um pico numa altura intermediária, ou seja, em torno de 300 km (Kirchhoff, 1991).

A perda de ionização se processa através da recombinação dos pares íons-elétrons e, no equilíbrio fotoquímico, tem-se a igualdade entre os processos de produção e perda, no qual se pode deduzir a densidade eletrônica (desprezando o termo de transporte na equação de continuidade), que é o parâmetro característico da ionosfera. De acordo com sua variação com a altura, e por conveniência de estudo, divide-se a ionosfera em diversas regiões ou camadas, cada uma delas com propriedades características (Iribarne e Cho, 1980; Kirchhoff, 1991).

Portanto, conforme o perfil de densidade eletrônica, a atmosfera divide-se em:

a) Região D

Está situada até cerca de 80 km de altitude. Devido a densidade atmosférica ser maior nesta região do que nas outras, a importância de colisões entre íons, elétrons, e partículas neutras é considerável, sendo por isso frequentes as reações que envolvem o terceiro corpo M, que funciona como um catalizador (uma molécula não-reativa) (Iribarne e Cho, 1980; Kirchhoff, 1991).

As radiações ionizantes mais importantes são raios-X, que ionizam oxigênio e nitrogênio em torno de 80 km. A radiação solar Lyman- α ioniza o óxido nítrico NO, sendo a radiação adicional nas alturas inferiores causada pelos raios cósmicos.

As reações químicas mais importantes incluem os componentes O, O₃, NO, NO₂, CO₂ e H₂O. Todos estes são minoritários em comparação com os gases O₂ e N₂. A distribuição vertical destes componentes minoritários é influenciada por vários fenômenos, o que torna a região D menos regular do que a ionosfera superior. Isto porque, as reações ionizantes utilizam-se de um terceiro corpo para absorver o excesso de energia produzidos nas reações (Kirchhoff, 1991).

Ao contrário da ionosfera superior, na região D os íons negativos são os mais importantes, assim como os íons complexos que resultam da aglutinação de íons à molécula de água (“Water cluster ions”). Os íons negativos são produzidos por junção eletrônica (“attachment”), ou seja, $O_2 + e + M \rightarrow O_2^- + M$ (Kirchhoff, 1991).

b) Região E

Esta região situa-se entre as altitudes de 80 a 130 km. A região E é importante pela presença de correntes elétricas que nela fluem e sua interação com o campo magnético. Portanto, esta região é a que apresenta maior condutividade elétrica, em virtude de apresentar um maior caminho livre para os elétrons (as colisões com outras partículas são menos frequentes). Assim como a região D, esta região contém principalmente ionização molecular.

c) Região F

Esta situada acima da camada E, e é subdividida em F_1 e F_2 . A primeira possui um pico esporádico de concentração eletrônica em torno de 180 km de altitude. Seus constituintes principais são o nitrogênio e o oxigênio atômicos. A região F_2 é onde está situado o pico de concentração eletrônica. Ao contrário das outras regiões, esta é caracterizada por ionização atômica que produz igual número de elétrons e íons positivos. O constituinte principal é o oxigênio atômico. Portanto, a região F caracteriza-se por ionização

atômica onde a maior densidade é do O^+ , porém, existe íons moleculares tais como, O_2^+ , N_2^+ e O^+ em menores quantidades.

Nesta região ocorre um dos fenômenos mais importantes da ionosfera noturna das regiões equatorial e de baixas latitudes, as bolhas de plasma. Definidas como as regiões onde a densidade de plasma (componentes atmosféricos) é drasticamente reduzida. Estas irregularidades no plasma têm sua origem na base da camada F equatorial, após o pôr-do-sol, a partir de perturbações iniciais na ionização e, normalmente se deslocam de oeste para leste.

A passagem das bolhas de plasma num determinado local, diminui drasticamente, a densidade dos componentes ionosféricos e uma das implicações é a pane causada nos sistemas de comunicações que utilizam este espaço atmosférico.

Na Figura 1.2 é mostrado os perfis teóricos de concentração eletrônica para o meio dia e a meia noite do dia 01/01/1997, calculado segundo o modelo IRI (International reference ionosphere, 1995) para a região de São João do Cariri. Durante o dia, têm-se produção eletrônica devido a radiação solar, o que aumenta grandemente a concentração eletrônica e a noite, devido aos processos de recombinação dos pares íons-elétrons, têm-se uma diminuição da concentração eletrônica. O pico de concentração eletrônica se verifica na região F, aproximadamente em torno de 360 km ao meio dia e, de 280 km à meia noite.

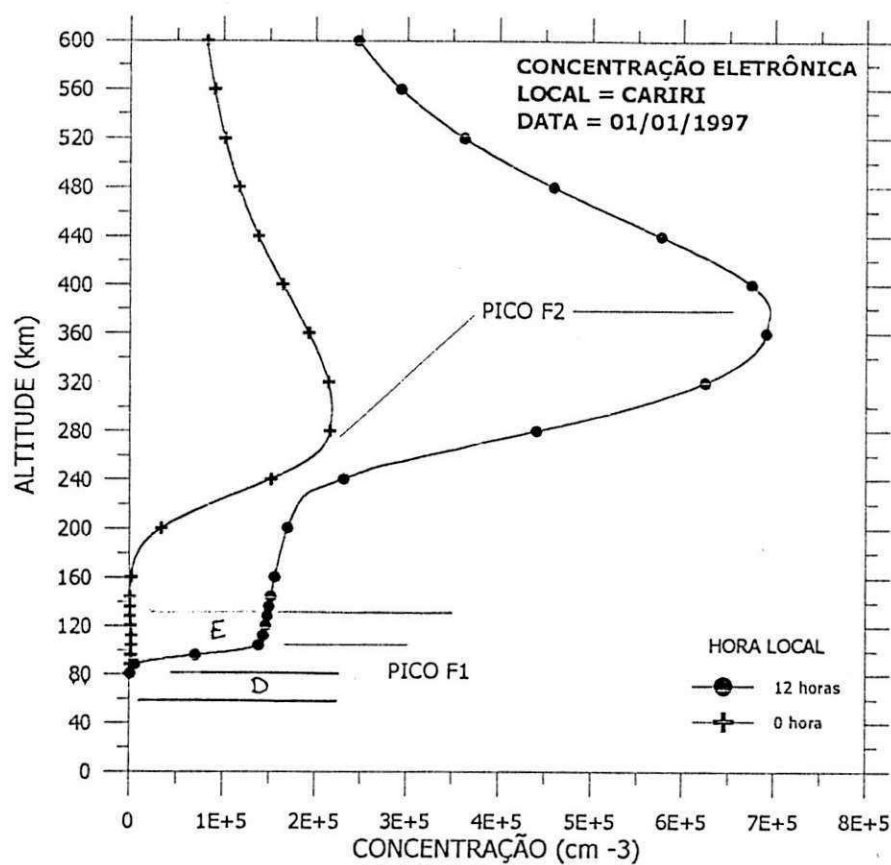


Fig.1.2 – Distribuição vertical da concentração eletrônica calculada para a região geográfica de São João do Cariri utilizando o modelo IRI (International reference Ionosphere) 1995.

1.4 Luminescência Atmosférica

A luminescência atmosférica, é uma luz natural proveniente principalmente da alta atmosfera. A princípio pode ser confundida com as auroras, que ocorrem apenas em altas latitudes e surgem a partir da excitação dos constituintes termosféricos devido ao impacto com partículas do vento

solar. A luminescência atmosférica, por sua vez, é uma emissão muito fraca, causada por reações iônicas dos constituintes atmosféricos que, por sua vez, são ionizados pela radiação ultravioleta solar durante o dia e por colisões com outras moléculas ou com partículas carregadas. A luminescência ocorre em regiões da atmosfera entre aproximadamente 80 e 400 km. A sua faixa de emissão espectral está entre 300 nm e 900 nm (Chamberlain, 1961).

Os primeiros estudos sobre luz atmosférica vem da antiga Grécia nos séculos III, IV e V a.c. Galileu Galilei foi quem batizou este fenômeno de aurora. Edmond Halley (1656 – 1742) foi o primeiro a associar as auroras ao campo magnético terrestre. No século XVIII o pesquisador Elias Loomis percebeu que ao ocorrer uma erupção solar, apareciam auroras entre 20 e 40 horas depois. A hipótese do vento solar, que transporta prótons e elétrons do sol, como responsável pelas auroras, só foi comprovada experimentalmente em 1958 com medidas feitas pelo satélite Explorer I (Hersberg, 1950). Estas partículas viajam a quase 390 km/s e quando são aprisionadas pelo campo magnético terrestre, são aceleradas e emitem luz ao interagir com o oxigênio e nitrogênio na alta atmosfera, entre 100 e 300 km de altitude (Chamberlain, 1961, 1987).

Ao contrário das auroras, o airglow começou a ser observado no início do século XX quando se atribuiu sua origem as luzes das estrelas. Porém, Dufay (1933) mostrou que esta luz era devida à luz do zodíaco ou uma luminescência proveniente da atmosfera. A luz do zodíaco é causada pelo espalhamento da luz solar por gases interplanetários e poeiras. É chamado de zodíaco porque seu brilho é maior na região das constelações do zodíaco e são mais visíveis após o entardecer.

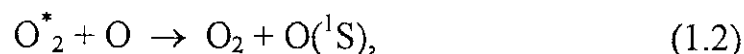
No início do século XX já se sabia que o oxigênio atômico era responsável pela emissão das linhas nos comprimentos de onda de 557,7 nm e 630,0 nm. Rayleigh (1930) foi um grande estudioso da linha 557,7 nm e para distingui-las das auroras, chamou esta luz de aurora não-polar, que mais tarde passou a se chamar de luminescência atmosférica. A este pesquisador, deve-se em sua homenagem, o nome da unidade de intensidade absoluta normalmente utilizado em aeronomia. Chapman (1931) propôs a reação $O+O+O \rightarrow O_2 + O^*$ (o símbolo * representa a molécula ou o átomo no estado excitado) para explicar a emissão do OI557,7 nm. Resultados de laboratórios levaram Barth (1964) a considerar um mecanismo de duas etapas para explicar a emissão da linha verde do oxigênio.

As principais partículas responsáveis pelas emissões nightglow são o oxigênio atômico e molecular, a molécula de OH, e também o sódio. Algumas características da luminescência do oxigênio atômico e molecular podem ser resumidas a seguir.

1.4.1 Emissões do Oxigênio Atômico

A linha verde ou OI557,7 nm, foi a primeira emissão a ser observada. Sua intensidade de emissão varia entre 100 e 200 R (1 R – Rayleigh é igual a 10^6 fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ por coluna) e sua camada tem um pico em torno de 98 km de altitude. O estado excitado $O(^1S)$ é o responsável pela emissão e seu mecanismo de excitação é realizado em duas etapas para altitudes abaixo de 100 km:

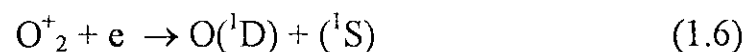
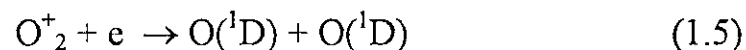




Onde M é a molécula média da atmosfera composta principalmente por O₂ e N₂. Entretanto, em latitudes baixas e equatoriais, para altitudes acima de 100 km, o seu mecanismo de excitação envolve o O₂⁺ e o elétron através do processo de recombinação dissociativa:



Outra linha de emissão do oxigênio atômico é a do OI630,0 nm. Ela ocorre quando o oxigênio decai do nível ¹D (abaixo do ¹S) para o nível ³P. O seu mecanismo de excitação, nos trópicos, envolve o O₂⁺ e o elétron através do processo de recombinação dissociativa (Peterson e Van Zandt, 1969) em altitudes próximas de 250 ± 30 km. A recombinação dissociativa do íon molecular O₂⁺ pode produzir os seguintes produtos (Abreu et al., 1983; Bates, 1981):

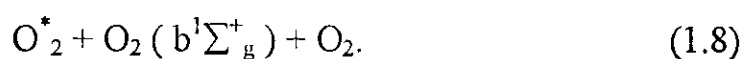
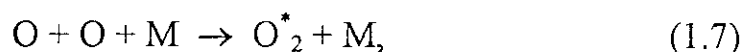


Outra emissão importante do oxigênio atômico é a da linha OI777,4 nm, que tem intensidade relativamente fraca (da ordem de 20 Rayleighs), e não é afetada de modo significativo pelo movimento de deriva vertical do plasma, sendo gerada em todas as alturas da ionosfera. Os dois

mecanismos de recombinação propostos para as emissões do oxigênio atômico, que gera a linha OI777,4 nm (Pimenta, 2002) são: recombinação radiotiva e recombinação íon-íon.

1.4.2 Emissões do O₂ Atmosférico O₂(b)

Estas emissões resultam da transição eletrônica $b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ com várias bandas vibracionais nas altitudes abaixo de 110 km. As principais bandas vibracionais do O₂ são: a) a banda (0-0) que está situada na região 762 nm do espectro, porém, impossível de ser medida do solo devido a absorção de sua emissão pela baixa e média atmosfera e b) a banda (0-1), que está centrada em 868 nm e pode ser observada do solo. A intensidade total da emissão do O₂(b) está compreendida entre 300 e 600 R. O mecanismo de excitação do O₂(b) é o seguinte (Greer et al., 1981):



1.5 Instrumentação na Luminescência

A observação da luminescência atmosférica através de equipamentos desenvolvidos para este fim, pode fornecer informações de fundamental importância sobre a dinâmica e a fotoquímica da atmosfera. É evidente que um estudo global requer uma rede de observatórios espalhados por todo o planeta e isto teria a vantagem de monitorar fenômenos de escala

continental. A variedade de instrumentos também é importante, e mais ainda se usados simultaneamente, pois permite obtenção de dados cujos resultados são mais completos. A instrumentação utilizada para estudar a aeroluminescência consiste basicamente no fotômetro, imageador, interferômetros. Estes equipamentos podem ser usados de várias maneiras: no solo, a bordo de aviões, satélites e foguetes. As medidas de solo são, sem dúvida, as menos onerosas e permitem estudar as flutuações da intensidade de várias emissões. As medidas *in situ* só podem ser feitas por foguetes pois a região da mesopausa é alta para uso de balões e é baixa para uso de satélites. Estas medidas permitem determinar o perfil vertical de emissão volumétrica. As medidas a bordo de satélites através de imageadores, interferômetros, etc., permitem estudar a distribuição global do campo de radiação (Sobral et al., 1992; Melo et al., 1993).

Dentre os equipamentos utilizados, o fotômetro é um instrumento de menor custo, simples e portátil. Ele mede a intensidade e, em alguns casos, a temperatura da atmosfera na região de onde provêm estas emissões. O imageador com detector CCD, por sua vez, é uma versão bem mais moderna da câmara de TV de alta sensibilidade e da câmara fotográfica, muito utilizadas no início das décadas de 70 e 80 para obter imagens de estruturas ondulatórias nas regiões de emissão (Peterson e Kieffaber, 1973; Hapgood e Taylor, 1982). A evolução destes equipamentos deu-se, principalmente, no campo dos detectores utilizados por eles. Para se ter uma idéia, Meinel (1950) obteve o espectro na região do infravermelho num período de aproximadamente 12 h; mais recentemente Johnston e Broadfoot (1993) obtiveram o espectro de luminescência de 300 a 900 nm num intervalo de tempo de apenas 1 hora. Um dos principais responsáveis por isso foi um detector denominado Intensified Charge Couple Device (ICCD).

1.6 Bolhas de Plasma

A instabilidade no plasma da região F tem sua origem na ionosfera equatorial e constitui-se de regiões onde a densidade de plasma é drasticamente reduzida, representando um dos mais importantes fenômenos da ionosfera noturna nas regiões equatoriais e de baixa latitudes (Pimenta, 2002). As instabilidades ionosféricas de grande escala são normalmente denominadas bolhas de plasma. Começam a se desenvolver no início da camada F, logo após o pôr do sol, a partir de perturbações iniciais na ionização e apresentam um movimento ascendente não-linear.

Observações utilizando diferentes técnicas mostram que essas bolhas de plasma são alinhadas ao longo do campo magnético da Terra e podem se estender até algumas centenas de quilômetros em altura, indo desde a base da camada ionosférica até acima do pico da camada. As mesmas possuem dimensões horizontais muito grandes, da ordem de milhares de quilômetros, alinhadas com o campo magnético e podem atingir comprimentos de aproximadamente 450 km na direção perpendicular ao campo. As emissões que têm origem na região F, como por exemplo, as emissões OI630,0 nm, OI557,7 nm e OI777,4 nm têm suas intensidades diminuídas repentinamente quando da ocorrência de bolha de plasma, o que é esperado em virtude da diminuição da densidade de íons e elétrons desta região. Portanto, a luminescência atmosférica é também uma das técnicas utilizadas no estudo da instabilidade do plasma ionosférico (Pimenta, 2002; Sahai et al., 1981).

1.7 Objetivo e Estrutura da Dissertação

As emissões do oxigênio atômico na linha do OI557,7 nm têm duas fontes, uma na região E (90-110 km) e a outra na região F (250-300 km). Em latitudes baixa e equatorial, uma significativa fração desta emissão vem dos processos de recombinação dissociativa na região F. Observações realizadas (com instrumento instalados em base terrestre) da emissão OI557,7 nm fornecem uma intensidade integrada vinda de ambas camadas (a mesosférica – região E e termosférica – região F).

Para estudar a emissão mesosférica do OI557,7 nm em relação a outras emissões mesosféricas, tais como hidroxila e bandas de oxigênio molecular, é importante ter uma estimativa da componente da região F. As observações do solo não conseguem determinar qual a porcentagem de emissão de um constituinte numa determinada região; porém, através da diminuição abrupta da intensidade da emissão do OI630,0 nm devido à presença de bolhas de plasma, também observado do solo, é possível determinar a quantidade de emissão do OI557,7 nm de cada camada (Fagundes et al., 1995). Isto permite obter com maior precisão o valor da intensidade de emissão desta linha e assim estudar melhor o comportamento físico-químico da mesosfera e termosfera.

As variações temporais de ambas as emissões OI630,0 nm e OI557,7 nm mostram simultâneas e similares quedas de intensidade quando uma bolha de plasma cruza o campo de visão do fotômetro. Assim, comprovamos estas variações com o comportamento da intensidade do O₂. Uma vez que a emissão do oxigênio molecular atmosférico (O₂A(0-1)) origina-se através de processos de recombinação do oxigênio atômico na

mesosfera, que é similar aos processos de emissão OI557,7 nm na região E, variações temporais de ambas emissões seriam similares se fosse somente da região mesosférica (Takahashi et al., 1985). Isto indica que a queda da intensidade OI557,7 nm deve-se apenas à componente da região F desta emissão, se a variação repentina não for observada na intensidade O₂A(0,1).

Com o objetivo de determinar o percentual da intensidade do OI557,7 nm da região F, analisar-se-ão várias noites referentes às observações simultâneas das intensidades OI557,7 nm, OI630,0 nm e O₂A (0-1) em 868,5 nm realizadas no período de 1998 à 2001, a fim de obter a porcentagem de emissão do OI557,7 nm na região F. Para isto, foi necessário estudar os processos de emissão de vários constituintes atmosféricos e averiguar a presença de bolhas de plasma na termosfera. Os dados utilizados foram obtidos por um fotômetro instalado no Observatório de Luminescência Atmosférica em São João do Cariri-Pb (7,5° S; 36° W).

No capítulo 2 são descritos os fundamentos teóricos e os processos que dão origem às emissões de luminescência atmosférica e às bolhas de plasma na atmosfera superior, particularmente as emissões em 557,7 nm e 630,0 nm do oxigênio atômico e do oxigênio molecular, O₂(0-1) em 868,5 nm.

O capítulo 3 descreve a instrumentação utilizada no estudo da luminescência atmosférica, isto é, o fotômetro MULTI 3.

O capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para encontrar a componente da emissão OI557,7 nm na região F e os dados obtidos pelo fotômetro MULTI 3.

O capítulo 5 é dedicado a apresentação dos resultados obtidos e discussão.

O capítulo 6 refere-se a conclusão do trabalho.

CAPÍTULO 2

LUMINESCÊNCIA DO OI557,7 nm E OI630,0 nm E BOLHAS DE PLASMA

2.1 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

2.1.1 Introdução

Como se sabe a atmosfera superior é uma fonte permanente de emissões de fótons, liberados por átomos ou moléculas excitadas acima do seu nível normal de energia. A estas emissões dá-se o nome de luminescência atmosférica. A luminescência é devida a diversos processos físico-químicos e ocorre, em geral, através de emissão de bandas e linhas espectrais, situadas em torno do ultravioleta e do infravermelho próximo e ocorre entre as altitudes de 80 e 250 km.

A luminescência atmosférica é uma luz muito fraca para ser vista a olho nu, necessitando para sua detecção e medida de intensidade, de instrumentos específicos tais como fotômetros, interferômetros e

imageadores. Com base na observação pode-se determinar a densidade de certos constituintes, temperatura da atmosfera e efeitos dinâmicos da alta atmosfera.

Os processos de excitação–emissão mais comuns são :

- a) Ressonância – processo em que fótons são absorvidos e reemitidos na frequência de ressonância do átomo ou molécula. O fóton emitido tem a mesma frequência do fóton incidente (Kirchhoff, 1991);
- b) Fluorescência – o fóton emitido é de energia menor que o incidente;
- c) Quimiluminescência – resulta de reações químicas que, sendo exotérmicas, podem deixar os produtos da reação em estados excitados, capazes de emitir fótons (Kirchhoff, 1991);
- d) Excitação por colisões – partículas com energia cinética elevada, ao colidir com outras, podem excitá-las, como nas auroras polares. O processo inverso também pode ocorrer, isto é, a desexcitação de uma partícula por colisão (“quenching”).

Como já descrito na Introdução Geral (capítulo 1), os principais constituintes responsáveis pelo airglow, são o oxigênio atômico e o molecular, o sódio e a hidroxila OH. Na Figura 2.1 está representado o espectro do airglow para comprimentos de onda entre 3000 e 9000 Å com as principais linhas e bandas de emissão, destacando-se o OH; também pode-se observar várias linhas de emissão, tais como: OI557,7 nm, OI630,0 nm, O₂(0,1), O₂(0,0) (esta não observada do solo devido à absorção pelo vapor d'água na baixa atmosfera) e NaI (589 nm).

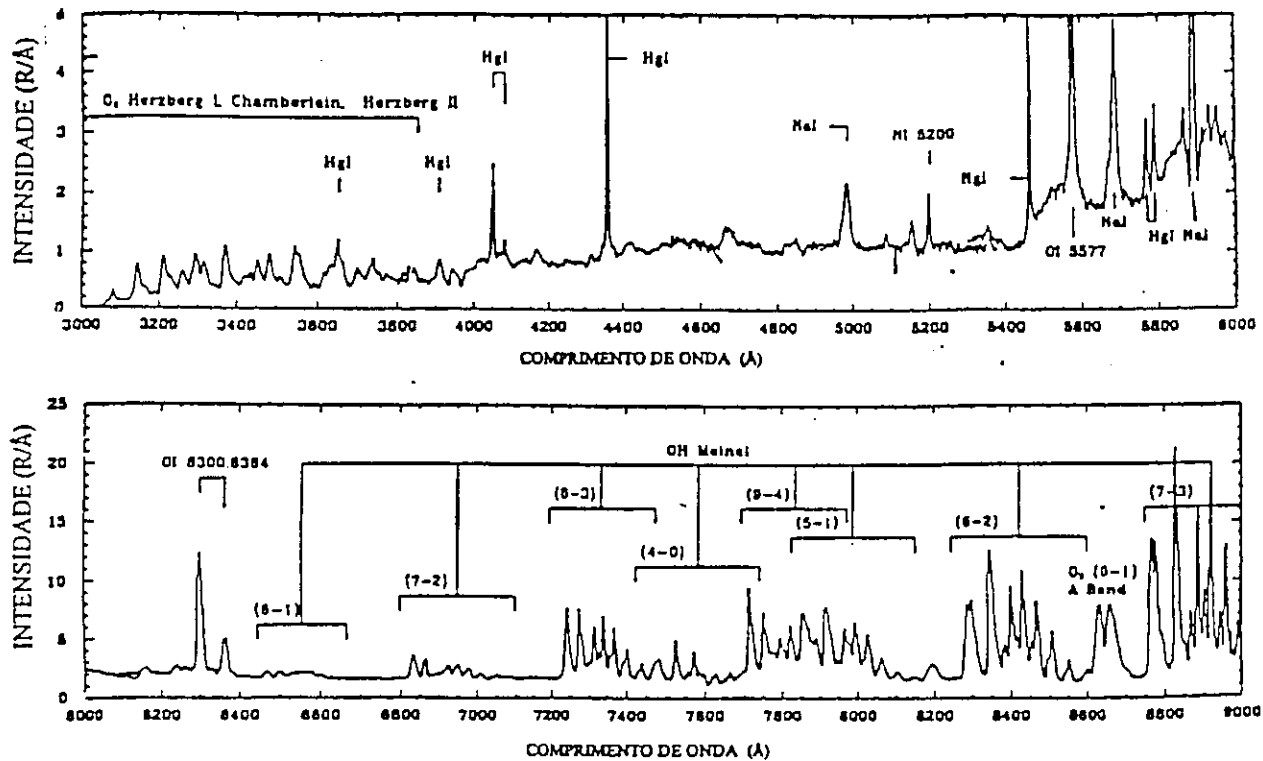


Fig. 2.1 - Espectro de airglow mostrando as principais linhas de emissão.

FONTE: Johnston e Broadfoot (1993), p. 21595.

2.1.2 Fotoquímica

2.1.2.1 Introdução

A distribuição de alguns componentes atmosféricos é afetada por reações químicas. Nestas reações são comuns as interações com fótons solares, que podem provocar excitação, ionização de átomos (ou moléculas)

ou dissociação de moléculas, sendo o excesso de energia liberado através da emissão de fótons. Portanto, através de reações fotoquímicas, se estabelece uma perda ou uma produção de determinado componente atmosférico, cuja densidade pode ainda ser afetada por uma divergência de fluxo. A variação temporal dessa densidade é expressa, matematicamente, através da equação de continuidade (Kirchhoff, 1991):

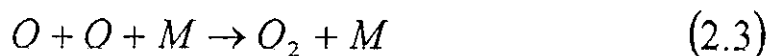
$$\frac{\partial n}{\partial t} = P - L - \text{div} \left(v \vec{V} \right) \quad (2.1)$$

onde n é a densidade numérica, t o tempo, P o termo de produção, L o termo de perda e \vec{V} a velocidade das partículas. Os termos P e L são determinados a partir das equações químicas, e o termo $\text{div}(n\vec{V})$ é chamado termo de transporte, que depende das condições dinâmicas, sendo $n\vec{V}$ o fluxo das partículas de densidade n . Gradientes horizontais são comumente desprezíveis em comparação com os verticais. Portanto, o termo de transporte pode ser simplificado, de modo que se pode escrever (Kirchhoff, 1991):

$$\frac{dn}{dt} = P - L - \frac{n \partial \vec{V}}{\partial h} \quad (2.2)$$

Quando o termo de transporte é pequeno em relação aos demais, resulta a equação fotoquímica, isto é, apenas processos fotoquímicos podem alterar a densidade do constituinte. No caso em que também dn/dt é desprezível, resulta o equilíbrio fotoquímico com $P=L$.

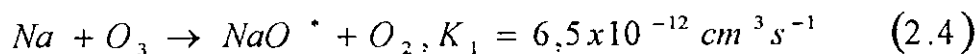
Um tipo de reação química que ocorre na atmosfera, denominada de recombinação, segue como exemplo (Kirchhoff, 1991):



Esta reação é uma indicação qualitativa da produção e perda de O_2 e O , respectivamente. Para se calcular os termos de produção e perda, é necessário que o coeficiente da taxa de reação seja especificado, geralmente designado pela letra K indexada quando ocorre mais de uma reação. Para algumas reações químicas, que se acredita ocorrerem na atmosfera, não há ainda uma determinação em laboratório da respectiva taxa de reação, o que dificulta o seu estudo.

No exemplo dado, aparece o terceiro corpo M . Este não toma parte na reação química, mas é necessário para uma distribuição adequada do excesso de energia resultante da reação. Na prática, M é substituído por N_2 ou $N_2 + O$ (Kirchhoff, 1991).

Portanto, a maneira mais correta de se especificar uma reação química seria, por exemplo, a reação química responsável pela emissão do airglow na linha 589 nm, ou seja:



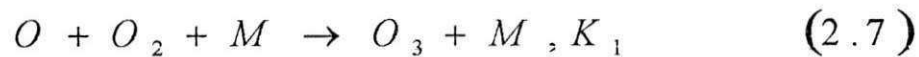
onde K o valor da taxa de reação e O_3 é o ozônio. O produto entre as concentrações dos elementos reagentes (Na e O_3 , no caso) pela taxa de reação K_1 , $[Na] [O_3] K_1$ corresponde a taxa de perda do elemento Na (ou O_3) por volume, em benefício da produção de $Na O^*$ (ou O_2). A taxa de produção de $Na O^*$ por volume, seria, portanto:

$$P(\text{NaO}^*) = [\text{Na}][\text{O}_3]K_1, \quad (2.5)$$

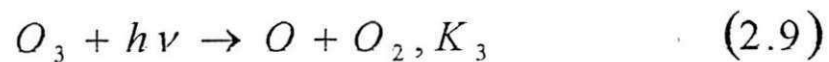
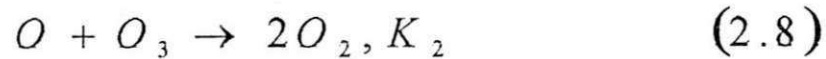
onde os colchetes indicam as densidades das substâncias representadas. Do mesmo modo, a taxa de perda de sódio, por unidade de volume, de acordo com a reação, seria dada por

$$L(\text{Na}) = [\text{Na}][\text{O}_3]K_1 \quad (2.6)$$

A densidade de um elemento químico pode ser determinado, como no exemplo seguinte, para o ozônio. A reação de produção é dada por:



e as reações de perdas, por:



Desprezando o termo de transporte, a equação fotoquímica seria igual a:

$$\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = [\text{O}][\text{O}_2][\text{M}]K_1 - [\text{O}][\text{O}_3]K_2 - [\text{O}_3]K_3 \quad (2.10)$$

ou ainda no equilíbrio fotoquímico:

$$[\text{O}] = \frac{[\text{O}][\text{O}_2][\text{M}]K_1}{[\text{O}]K_2 + K_3} \quad (2.11)$$

Um conceito importante, relativo aos processos de perda ou produção, é o da constante de tempo de reação. Constante de tempo pequena implica num processo rápido de perda ou produção. Esta característica é importante quando se deve escolher quais as reações importantes, competitivas, no processo de perda ou produção e quais devem ser desprezadas, devido a lentidão com que se processam. Através deste critério também é possível concluir se processos de transporte devem ser incluídos ou não na equação de continuidade.

A comparação entre processos, no entanto, pode ser feita simplesmente, considerando as perdas de cada reação.

No processo



A perda de Oxigênio atômico é representada por:

$$L(O) = K_1 [O][O_2][M] \quad (2.13)$$

e a variação correspondente na densidade de O seria, apenas com esta perda:

$$\frac{d[O]}{dt} = -K_1 [O][O_2][M] \quad (2.14)$$

o que implicará num decréscimo exponencial no tempo, cuja constante é:

$$\tau = \frac{1}{K_1 [O_2][M]} \quad (2.15)$$

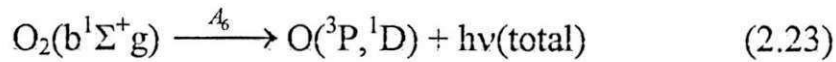
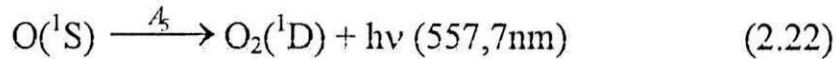
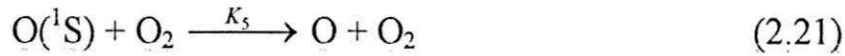
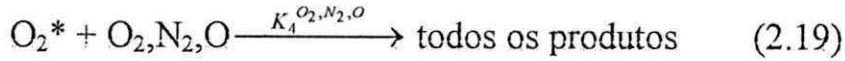
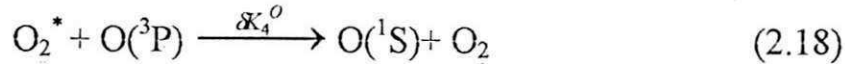
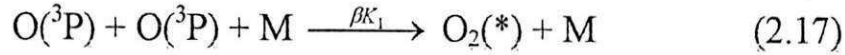
e como $[O_2]$ e $[M]$ (e em alguns casos também K_1) variam com altura, τ é também função da altura. Portanto, a constante de tempo para a perda do oxigênio atômico é grande para alturas elevadas e pequena em baixas altitudes, o que significa que a variação temporal do oxigênio atômico é pequena em grande altitudes, levando-se em conta apenas esta reação.

As taxas de reação são, muitas vezes, dependentes da temperatura que, por sua vez, variam com a altura. A taxa K_1 da reação anterior é dada, por exemplo, pela relação (com T em K) (Kirchhoff, 1991):

$$K_1 = 8,2 \times 10^{-35} \exp(445 / T) (\text{cm}^6 \text{s}^{-1}) \quad (2.16)$$

2.1.2.2 Mecanismo de Excitação do Oxigênio Atômico na Mesosfera

A seguir apresentar-se-á a fotoquímica responsável pela emissão da linha 557,7 nm na mesosfera e o cálculo do perfil da taxa de emissão volumétrica. Esta taxa, cuja unidade é o número de fótons/cm².s, tem um pico em torno de 97 km de altitude e está diretamente relacionada com a intensidade de luz emitida. Este perfil, como será visto mais adiante, tem uma forma gaussiana. Ele foi obtido a partir da equação da taxa de emissão e foram utilizados parâmetros atmosféricos obtidos pelo modelo MSIS para o céu do Cariri. A emissão do 557,7 nm origina-se quando um átomo de oxigênio, estando no estado excitado ¹S, decai espontaneamente emitido a luz verde. As principais reações responsáveis por esta emissão são (McDade et al., 1986):



onde

β é a fração de recombinação na reação (2.17),

δ é a fração de recombinação na reação (2.18),

K_1 , K_4 , e K_5 são coeficientes de taxa de reação nas reações (2.17), (2.18) e 2.19),

A_4 , A_5 e A_6 são coeficientes de taxa de reação nas reações (2.20), (2.22) e (2.23),

h a constante de Planck,

ν a frequência da radiação.

No cálculo da taxa de emissão volumétrica do oxigênio atômico, procede-se de forma semelhante a adotada para o oxigênio molecular. Para o precursor O_2^* , os termos de produção e perda serão (kirchhoff, 1991):

$$P_1 = [\text{O}_2^*][\text{O}]\delta K_4 \quad \text{e} \quad L_1 = [\text{O}(^1\text{S})][\text{O}_2]K_5 + A_6[\text{O}(^1\text{S})] \quad (2.24)$$

Analogamente, para o $\text{O}(^1\text{S})$, tem-se (Kirchhoff, 1991):

$$P_2 = [O]^2[M]\beta K_1$$

e

$$L_2 = [O_2^*][O_2] K_4^{O_2} + [O_2^*] K_4^{N_2} + [O_2^*][O] K_4^O + [O_2^*]A_4 \quad (2.25)$$

No equilíbrio fotoquímico, $P_1 = L_1$ e $P_2 = L_2$. Isso leva às seguintes expressões:

$$[O_2^*] = \frac{[O]^2[M]\beta K_1}{A_4 + K_4^{O_2}[O_2] + K_4^{N_2}[N_2] + K_4^O[O]} \quad (2.26)$$

$$[O(^1S)] = \frac{[O_2^*] \times [O] \delta K_4^O}{(A_6 + K_5[O_2])} \quad (2.27)$$

Substituindo (2.26) em (2.27), tem-se:

$$[O(^1S)] = \frac{[O]^2[M]\beta K_1 [O] \delta K_4^O}{(A_6 + K_5[O_2]) (A_4 + K_4^{O_2}[O_2] + K_4^{N_2}[N_2] + K_4^O[O])} \quad (2.28)$$

A taxa de emissão volumétrica do oxigênio atômico na mesosfera é dada por:

$$V_{1s} = A_5 [O(^1S)] \quad (2.29)$$

Como $[O(^1S)]$ dado em (2.28), obtém-se, finalmente:

$$V_{1s} = \frac{A_5 [O]^3 \beta K_1 [M] \delta K_4^O}{(A_6 + K_5[O_2]) (A_4 + K_4^{O_2}[O_2] + K_4^{N_2}[N_2] + K_4^O[O])} \quad (2.30)$$

Antes de obter-se o perfil de emissão do oxigênio atômico, é conveniente que sejam feitas algumas simplificações na equação (2.30). Vamos escrevê-la na seguinte forma:

$$\frac{A_5 K_1 [O]^3 [M]}{V_{1s} (A_6 + K_5 [O_2])} = \frac{1}{\beta \delta} \left[\frac{A_4}{K_4^O} + \frac{K_4^{O_2}}{K_4^O} \left(1 + R \frac{K_4^{N_2}}{K_4^{O_2}} \right) [O_2] + [O] \right] \quad (2.31)$$

onde R é a razão entre as concentrações de N₂ e O₂. Utilizando dados de concentração obtidos por foguetes, pesquisadores (McDade et al., 1986) encontraram um pequeno valor positivo para o termo $(1/\beta\delta)(A_4/K_4^{O_2})$ com desvio padrão que incluía pequenos valores negativos. Essa fato leva a uma importante conclusão: o termo A₄ está relacionado à perda de O₂* de acordo com a equação (2.18). Como esse termo é pequeno, a emissão espontânea do O₂* também é pequena e, portanto, não contribui de forma significativa para a emissão de linha verde em seu pico.

Desprezando o termo $(1/\beta\delta)(A_4/K_4^{O_2})$ e fazendo $C'^O = (1/\beta\delta)$ e $C'^{O_2} = (1/\beta\delta)(K_4^{O_2}/K_4^O)(1 + RK_4^{N_2}/K_4^{O_2})$, a taxa de emissão volumétrica torna-se finalmente, igual a (MacDade et al., 1986):

$$V_{1s} = \frac{A_5 K_1 [O]^3 [M]}{(C'^{O_2} [O_2] + C'^O [O]) (A_6 + K_5 [O_2])} \quad (2.32)$$

Um modelo atmosférico (MSIS – 86) fornece as concentrações presentes na equação (2.32) em função da altitude. As constantes C'^O, C'^{O₂} e A₆ foram extraídas de McDade et. al., 1986. As taxas de reação K₁ e K₅ são funções da temperatura que por sua vez é função da altitude e também foi

obtida do modelo atmosférico MSIS. Com essas informações, pode-se obter o perfil de emissão teórico para o OI5577. Esse perfil está mostrado na Figura 2.2.

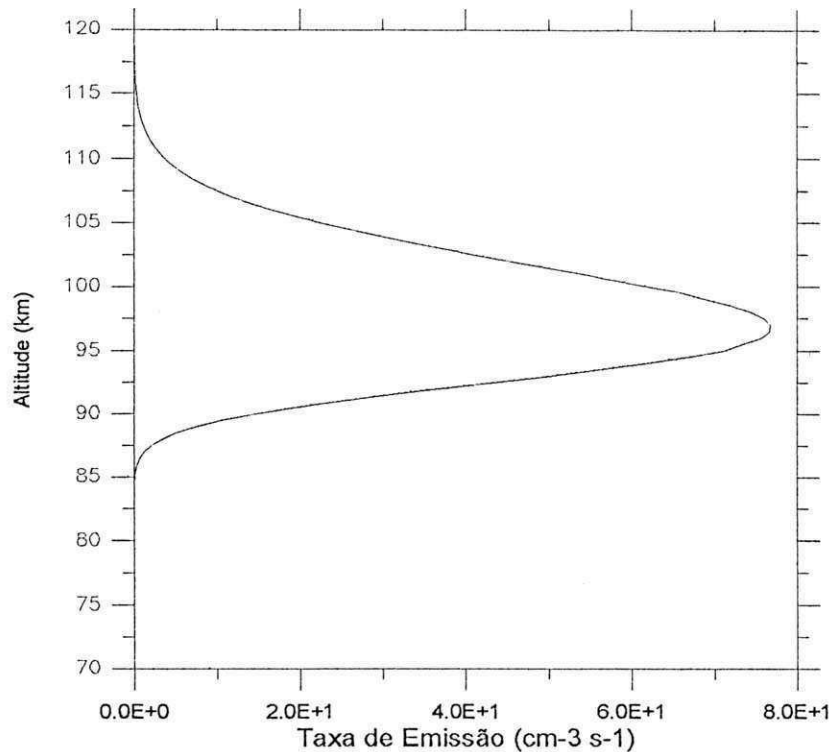


Fig.2.2 – Perfil de emissão teórico para o OI557,7 nm referente ao dia 30 de abril as 23:00 LT para São João do Cariri, obtido através do MSIS.

De acordo com esse perfil, o pico de emissão do OI5577 está em torno de 97 km de altitude. Tal perfil está em boa concordância com perfis obtidos por pesquisadores usando medidas de foguetes (McDade et al., 1986).

A intensidade do OI557,7 nm integrada, ou seja, vista por um observador do solo, em Rayleighs, é dada por (Pimenta, 2002):

$$I_{5577M} = 10^{-6} \int V_{1S}(h) dh, \quad (2.33)$$

onde h é a altitude e os limites de integração referem-se às altitudes onde a taxa de emissão começa e termina.

2.2.3 A Taxa de Emissão Volumétrica Integrada do OI630,0 nm na Região F

O OI630,0 nm deve-se a transição entre os estados 1D_2 e 3P_2 . Assim, semelhante a equação 2.33, pode-se escrever a intensidade integrada da emissão do OI630,0 nm na região F é dada por (Peterson e Van zandt, 1969):

$$I_{630} = 0,76 \times 10^{-6} \int \frac{k_D}{\left(1 + \frac{d_D}{A_D}\right)} \frac{\gamma_1 [O_2] [e]}{\left(1 + \frac{\gamma_1 [O_2]}{\alpha_1 [e]} + \frac{\gamma_2 [N_2]}{\alpha_2 [e]}\right)} dz, \quad (2.34)$$

onde

γ_1 é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do O^+_2 ,

γ_2 é o coeficiente da reação de transferência de carga na produção do NO^+ ,

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

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

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

α_1 é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon O^+_2 ,

α_2 é o coeficiente na reação de recombinação dissociativa do íon NO^+ ,

d_D é o coeficiente de desativação colisional.

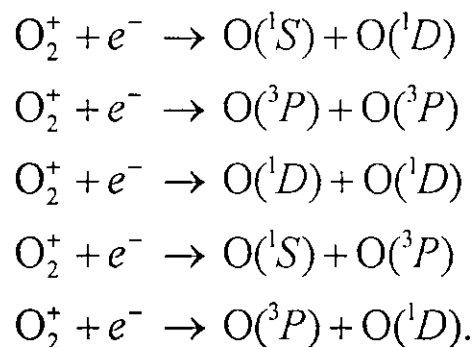
2.3 Bolhas de Plasma

2.3.1 Introdução

De um modo geral, a bolha de plasma é uma diminuição da concentração do plasma na ionosfera, sendo então considerada uma instabilidade equatorial (magnética) noturna. Este fenômeno é resultado do acoplamento entre o campo geomagnético e o movimento dinâmico das partículas ionizadas (Pimenta, 2002). Seu deslocamento é sempre de oeste para leste, mas o sentido contrário de deslocamento da bolha já foi reportado na literatura (Taylor et al., 1997). Suas dimensões horizontais podem atingir até 5000 km, acompanhando as linhas de campo magnético terrestre e podem alcançar altitudes de até 1000 km.

Mais especificamente, podemos dizer que as irregularidades na região da termosfera, tal como a bolha, têm sua origem devido à instabilidade de Rayleigh-Taylor (Haerendel, 1973) e a deriva vertical dos íons, ou plasma inosférico, conhecida como deriva eletromagnética $\vec{E} \times \vec{B}$ (Reid, 1968). Ao anoitecer, o plasma da ionosfera sofre uma mudança de direção de movimentação e começa a se deslocar para baixo, pois ocorre uma mudança de direção do campo elétrico \vec{E} , que durante o dia apontava para o leste e à noite aponta para o oeste. Porém, antes de ocorrer a inversão de direção, esta deriva sofre um aumento bastante rápido devido ao surgimento de campos de polarização resultantes da separação de cargas elétricas no plasma. Esta forte variação da velocidade da deriva pode ocasionar o aparecimento de bolhas de plasma (Fejer et al., 1979). Sua ocorrência também está relacionada com o período do ano que ocasiona uma mudança entre as linhas de campo magnético e a incidência solar sobre a Terra.

As bolhas podem ser detectadas por instrumentos óticos do chão, à bordo de foguetes ou satélites, quando estes registram uma forte queda da intensidade do airglow do OI630 nm. A intensidade de luz desta emissão deve-se a uma recombinação dissociativa entre os íons O_2^+ e elétrons presentes na camada F noturna da ionosfera resultando, assim, em vários produtos (Weber et al., 1978; Mendillo e Baumgardiner, 1982 Sahai et al., 1981 Sobral et al., 1992; Pimenta, 2002):



Os estados relacionados com D e S, são estados excitados, enquanto que o estado P, é um estado não excitado.

A reação de cada espécie excitada em qualquer reação acima representa a eficiência quântica para aquele estado excitado (Sobral et al., 1994). No caso do $O(^1S_0)$, quando relaxado para o estado excitado 1D_2 , emite luz no comprimento de 557,7 nm, enquanto que o $O(^1D_2)$ emite no comprimento de 630 nm quando relaxa para o estado 3P_1 . O diagrama de níveis de energia para algumas transições do oxigênio atômico, pode ser visto na Figura 2.3. A inexistência da emissão do 630,0 nm próximo da mesopausa, ao contrário do 557,7 nm, deve-se ao fato que, nestas altitudes, o oxigênio atômico no estado $O(^1D)$ tem um tempo de vida (~ 110 s) maior que

o tempo de colisão com outras moléculas nestas altitudes. Quando ocorre a diminuição da concentração de elétrons na camada F é de se esperar uma diminuição da intensidade do 630 nm.

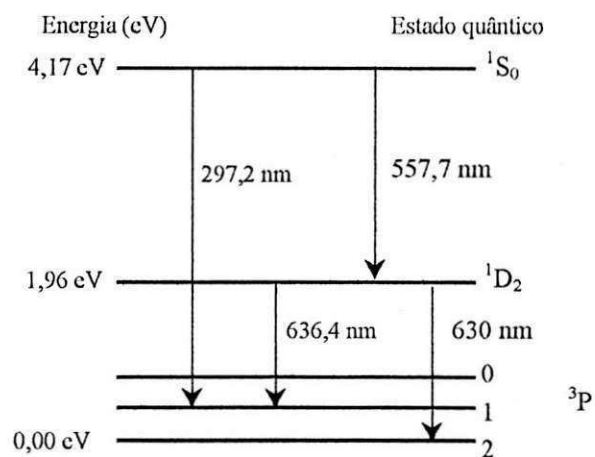


Fig. 2.3 – Níveis de energia e transições do oxigênio atômico mostrando algumas linhas emitidas mais importantes no airglow e/ou aurora.

Fonte: Hargreaves, 1992, 235p.

Também existem outros tipos de instrumentos capazes de detectar irregularidades atmosféricas, entre eles estão o GPS (Global Position System), digisonda, radar coerente, etc. Exemplo de uma bolha de plasma, obtida por um imageador "all-sky", está mostrada na Figura 2.4. Pode-se perceber a presença de regiões escura, na direção Norte-Sul, que está relacionada com a diminuição da intensidade do OI630 nm. Esta bolha foi observada em São João do Cariri, em 18 de novembro de 2000 às 21h41min.

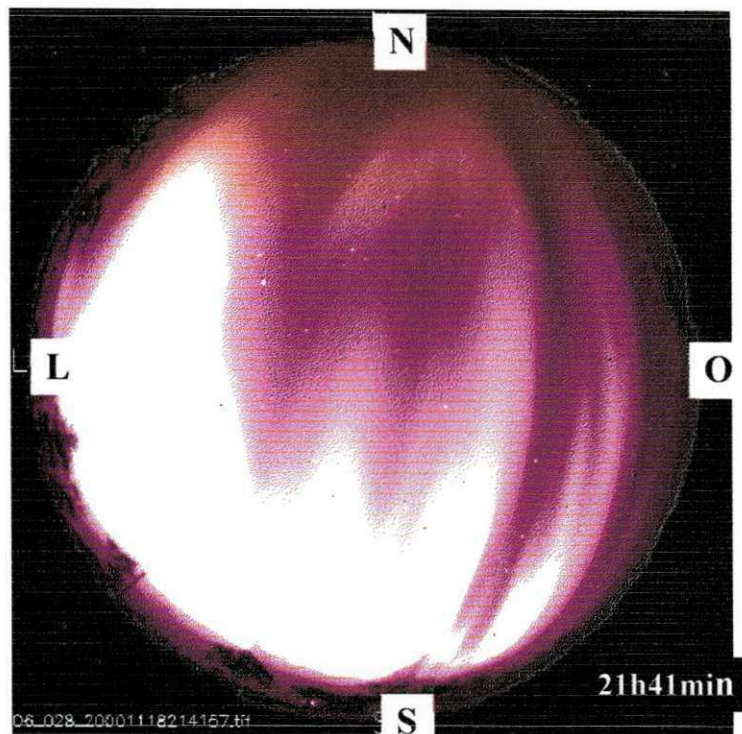


Fig. 2.4 – Imagem de uma bolha de plasma sobre o céu de São João do Cariri obtida em 18/11/2000 às 21h41min.

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTAÇÃO

3.1 O Fotômetro MULTI 3

3.1.1 Introdução

Uma das técnicas tradicionalmente empregadas no estudo das emissões da luminescência atmosférica é a fotometria. Usando fotômetros com filtros de interferências inclináveis em relação ao seu eixo ótico, pode-se obter varreduras em comprimento de onda, o que permite conhecer a radiação desejada e o ruído de fundo em cada região do espectro.

Com o objetivo de estudar algumas emissões do oxigênio atômico, do sódio mesosférico, da hidroxila e do oxigênio molecular, foi desenvolvido no INPE um fotômetro multicanal (referido como MULTI 3) com cinco filtros de interferência ótica inclináveis. Este equipamento opera rotineiramente na cidade de São João do Cariri (7,5°S; 36°W) desde 1997,

sempre em período de lua nova. Na Figura 3.1 é mostrado uma fotografia de parte do laboratório de luminescência atmosférica (OLAP), onde se pode ver o fotômetro MULTI 3.

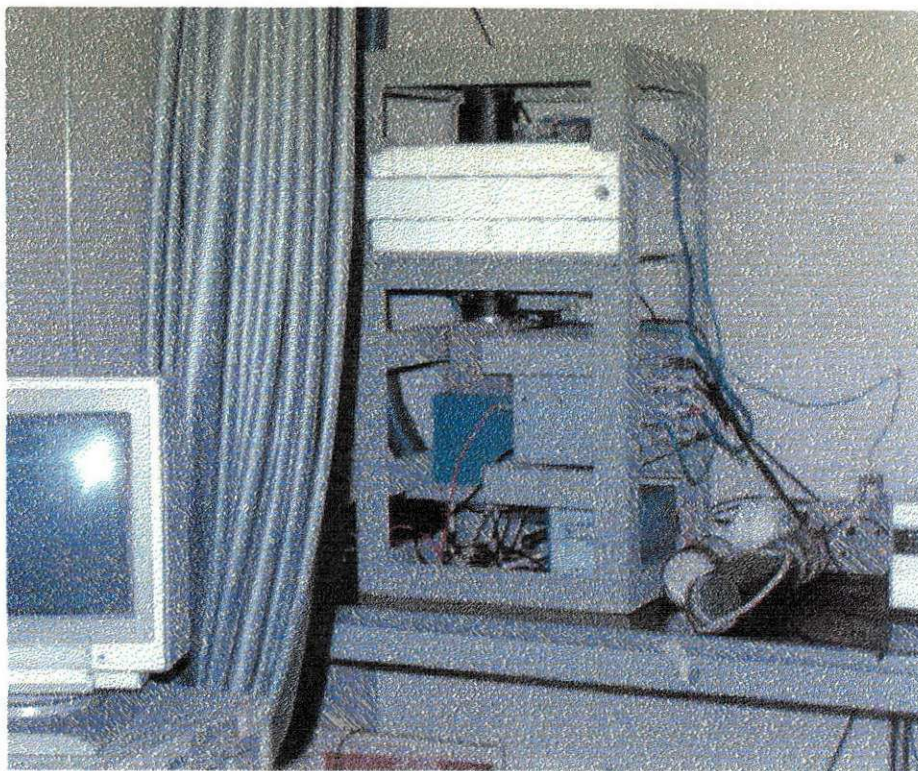


Fig. 3.1 – Fotografia do fotômetro MULTI-3 instalado no OLAP. O monitor, à esquerda, permite visualizar os dados obtidos pelo fotômetro em tempo real.

Neste capítulo será descrito o funcionamento básico do fotômetro MULTI 3, bem como, os processos utilizados na calibração e redução de dados.

3.1.2 Descrição do Equipamento

O fotômetro MULTI 3 pode ser esquematizado em três unidades básicas: a unidade óptica, a unidade de interface e a unidade de controle e aquisição de dados, conforme diagrama de blocos mostrado na Figura 3.2.

A unidade óptica envolve a parte de seleção do comprimento de onda a ser medido, a determinação do campo de visão, a fotomultiplicadora e o pré-amplificador, sendo a principal unidade do fotômetro.

A Figura 3.3 mostra o diagrama da parte ótica do MULTI 3. O sistema consiste em um disco com cinco filtros de interferência que determinam, cada um, uma certa faixa de comprimento de onda e um obturador para medida do ruído térmico; uma lente e um diafragma que determinam o campo de visão; uma fotomultiplicadora e os instrumentos eletrônicos que registram os sinais. A abertura efetiva do sistema ótico é de 50mm de diâmetro e o campo de visão envolve um ângulo total de 2 graus. Os cinco filtros de interferência permitem observação da aeroluminescência em diferentes regiões do espectro. Quando um dos filtros é colocado no eixo ótico, um motor (M_2) faz com que o filtro se incline possibilitando a varredura em comprimento de onda. A relação entre o ângulo de inclinação (θ) do filtro e o deslocamento em comprimento de onda ($\Delta\lambda$) é expressa por (Eather e Reasoner, 1969):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = -\frac{\theta^2}{2\mu^2} \quad (3.1)$$

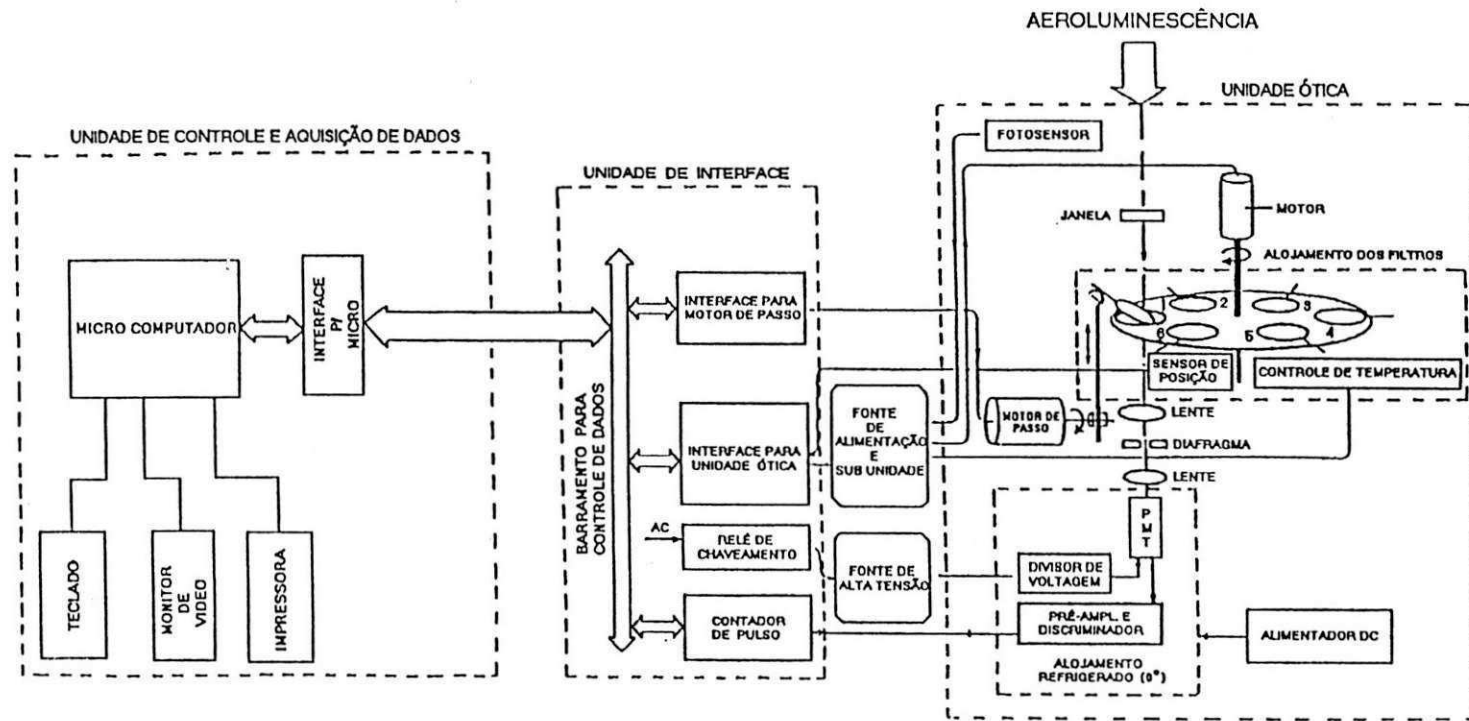


Fig. 3.2 – Diagrama de bloco do MULTI-3. A unidade de controle e aquisição de dados é formada por um micro PC 386 com uma placa de interface para o fotômetro. Na unidade de interface encontram-se várias placas eletrônicas destinadas ao controle do detector, roda e inclinação do filtro, controle de temperatura e fonte de alta tensão. O bloco aeroluminescência é composto principalmente de filtros de interferência, motores de passo, lente e diafragma e fotomultiplicadora.

onde λ_0 é o comprimento de onda característico de cada filtro em $\theta = 0$ e μ é o índice de refração do filtro. Quando termina uma varredura o disco gira, posicionando outro filtro. Ao todo, é necessário aproximadamente 2,7 minutos para uma seqüência completa de medidas com os cinco filtros mais o obturador.

Na Figura 3.4 é apresentado um diagrama simplificado do mecanismo de elevação de cada filtro. Quando na posição $\theta = 0^\circ$, o filtro permanece encostado em seu apoio. A medida em que o motor de passo gira (no caso, em sentido anti-horário tendo o eixo ótico como referência), movimentada a haste que inclina o filtro. É possível parar esse movimento em qualquer passo do motor permitindo que o filtro permaneça com uma determinada inclinação por um intervalo de tempo desejado. Ao final de cada varredura o motor gira em sentido contrário, descendo a haste e levando o filtro novamente para a posição $\theta = 0^\circ$. O motor de passo com resolução de $0,9^\circ$ - possibilita 100 posições de inclinação para cada filtro. Denominando essas posições por canais, cada filtro tem 100 canais disponíveis (0 a 99) para leitura, cada um correspondendo a um determinado comprimento de onda diferente.

As variações na temperatura ambiente podem provocar um deslocamento em comprimento de onda da curva de transmissão do filtro de interferência. Eather e Reasoner (1969) estimam esse deslocamento em $0,25 \text{ \AA } ^\circ\text{C}^{-1}$. Para evitar esse efeito, os filtros do MULTI 3 são mantidos em alojamento com controle de temperatura em $28 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

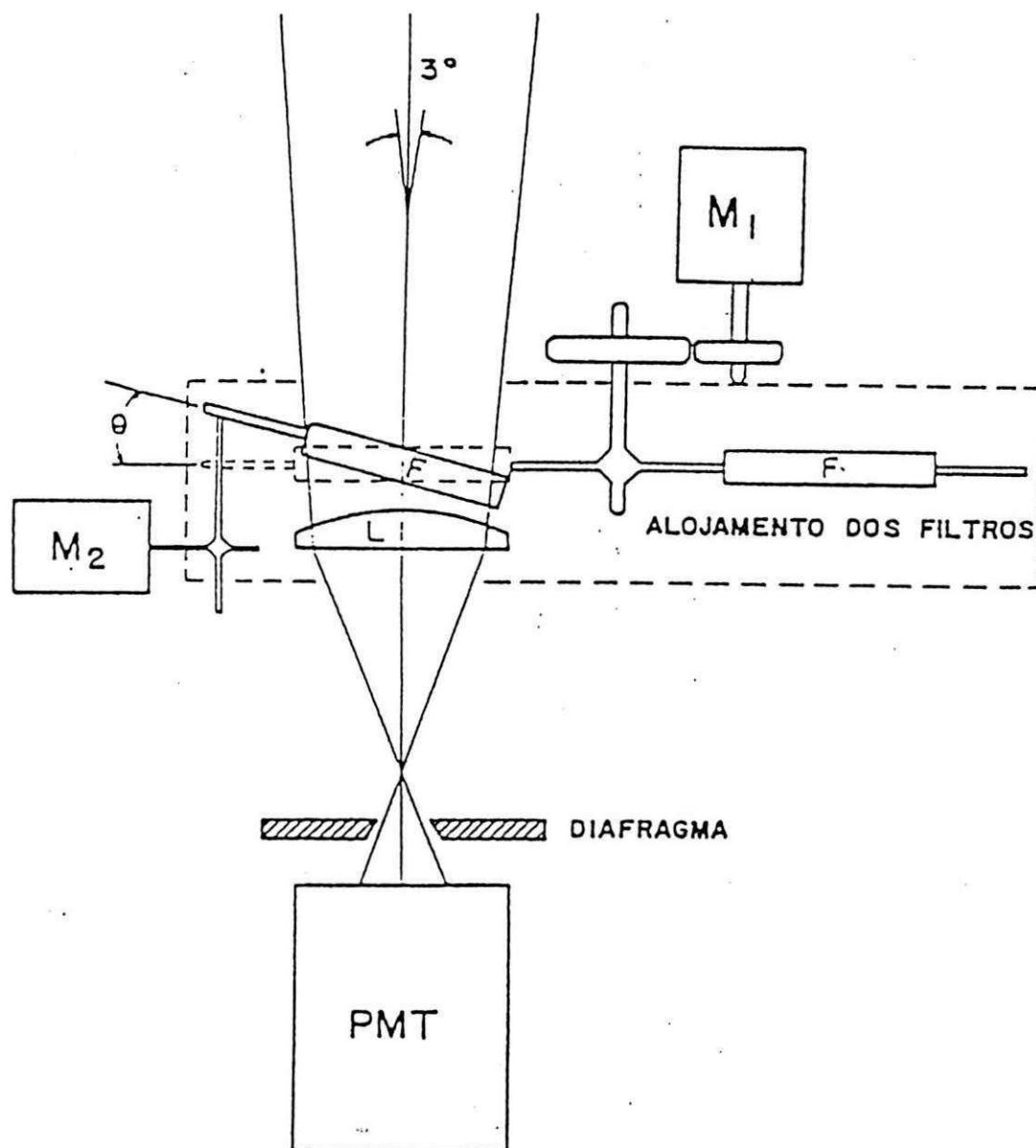


Fig.3.3 – Diagrama da parte ótica do MULTI 3. Em destaque pode-se ver o alojamento dos filtros e o respectivo motor, M_1 que faz a seleção da luminescência a ser medido. Também é mostrado o motor, M_2 que realiza a varredura espectral do filtro selecionado a partir de variação de sua inclinação com relação ao eixo ótico. Também se pode ver a PMT, que é o sensor ótico.

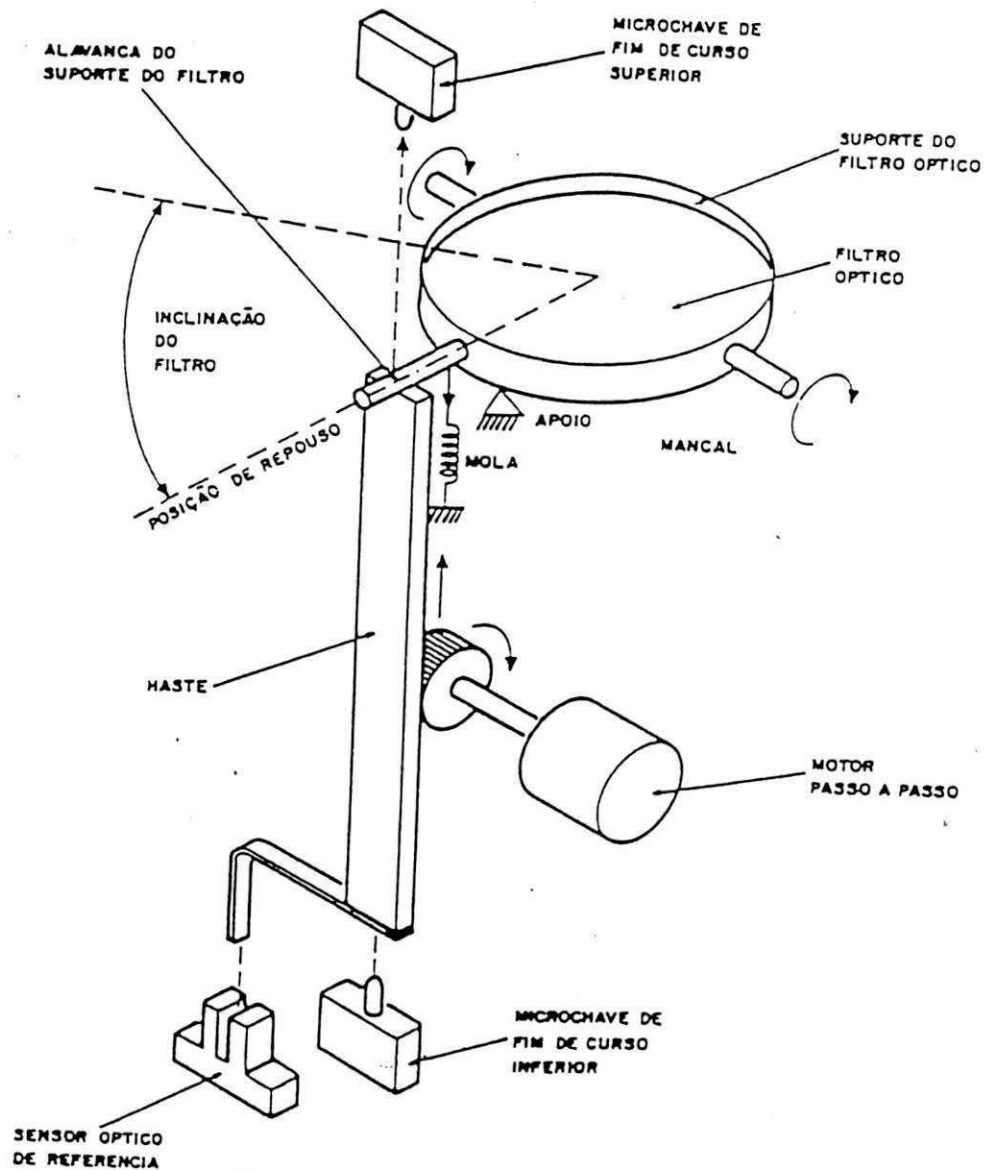


Fig.3.4 – Diagrama detalhado do mecanismo de elevação de cada filtro de interferência. O sensor óptico e as microchaves limitam o curso da haste de acordo com a calibração realizada em laboratório.

Os fótons selecionados pelo sistema ótico atingem o cátodo da fotomultiplicadora gerando elétrons que, multiplicados 10^6 vezes pelos díodos (eletrodos que emitem elétrons por meio do fenômeno da emissão secundária) dão origem a um pulso. Este pulso passa por um pré-amplificador (AMPTEK A 101) e é transformado em um pulso TTL, o qual é encaminhado a um sistema eletrônico de contagem. A fotomultiplicadora é mantida a uma temperatura $< 0^\circ\text{C}$ para minimizar seu ruído térmico.

A unidade de interface possui um contador de pulsos com duas saídas: uma analógica e outra para o motor de passo.

A unidade de aquisição de dados e controle do equipamento consiste de uma CPU e uma interface para acoplar com um microcomputador padrão MSX.

O operador entra com a data e o tempo inicial e, ao final das observações noturnas os dados registrados em disco rígido são: o número do filtro de interferência para identificação, a hora da observação e a contagem dos pulsos para cada canal. Obtém-se, também, uma saída analógica em um registrador gráfico para monitoramento visual do funcionamento do fotômetro.

3.1.3 Determinação dos canais

A finalidade da determinação dos canais é encontrar para que inclinações do filtro de interferência serão obtidos os comprimentos de onda desejados.

No caso do MULTI 3, essa determinação foi feita em laboratório usando-se um monocromador McPherson modelo 270 para selecionar o comprimento de onda desejado. Para cada comprimento de onda foi feita uma varredura na inclinação do filtro e, pela transmissão máxima registrada foi escolhido o canal que deve ser usado para um determinado comprimento de onda. O fotômetro é, então, programado para adquirir dados da aeroluminescência, nos canais selecionados para cada filtro.

Nesse ponto é importante ressaltar a necessidade de se conhecer a precisão com que o monocromador seleciona o comprimento de onda indicado em seu mostrador. Essa precisão pode ser conhecida usando-se lâmpadas espectrais de N_c , A_r e H_g , e comparando-se o comprimento de onda registrado no monocromador e o tabelado para as linhas bem resolvidas do espectro de cada lâmpada.

Os filtros normalmente deterioram-se com o tempo e isso altera suas características. Para verificar se os canais escolhidos continuam selecionando os comprimentos de onda desejados, rotineiramente é feita varredura contínua na inclinação de cada filtro usando a aeroluminescência como fonte padrão. Caso alguma mudança seja observada a programação dos canais é corrigida.

3.1.4 Calibração

Para poder-se estimar a intensidade de uma emissão de

luminescência deve-se saber avaliar as características do instrumento usado. No caso de um fotômetro deve-se conhecer a transmissão e a sensibilidade absoluta de cada filtro nos canais a serem usados.

3.1.4.1 Transmissão dos filtros

A resposta do fotômetro a uma luz quase monocromática de potência espectral, ϕ_λ pode ser expressa como (Melo, et al., 1992)

$$J_1(\lambda) = C \eta(\lambda) T(\lambda) \phi_\lambda \Delta\lambda \quad (3.2)$$

onde $J_1(\lambda)$ representa a resposta do fotômetro em pulsos por segundo; $\eta(\lambda)$ a eficiência quântica da fotomultiplicadora; $T(\lambda)$ a transmissão do filtro em função do comprimento de onda λ ; C um fator instrumental (dimensional) e $\Delta\lambda$ a resolução espectral do monocromador. Assim, tem-se que:

$$T(\lambda) = \frac{J_1(\lambda)}{C \eta(\lambda) \phi_\lambda \Delta\lambda} \quad (3.3)$$

Os filtros empregados têm, em geral, uma largura de transmissão da ordem de 10\AA . Como a resolução do monocromador deve ser maior que essa largura, usa-se um monocromador McPherson modelo 270 com rede holográfica de 1200 linhas/mm cuja resolução é de aproximadamente 1\AA . Usando lâmpadas de N_e e H_g determina-se a diferença entre o comprimento de onda selecionado pela rede e o valor lido no registrador. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Diferença entre a leitura de comprimento de onda do monocromador (Mcpherson – 270) e as linhas espectrais das lâmpadas de neônio e mercúrio.

Lâmpada λ (nm)	Monocromador λ (nm)	Diferença (nm)
(Hg) 546,15	546,15	0,08
(Ne) 585,41	585,57	0,16
(Ne) 633,44	633,57	0,13
(Ne) 754,40	754,53	0,13
(Ne) 784,32	794,44	0,12
(Ne) 808,25	808,46	0,21
(Ne) 813,64	813,81	0,17
(Ne) 830,03	830,18	0,15
(Ne) 837,76	838,09	0,33
(Ne) 841,84	841,99	0,15
(Ne) 859,13	859,33	0,20
(Ne) 863,47	863,85	0,38
(Ne) 867,95	868,37	0,42
(Ne) 868,19	868,63	0,44
(Ne) 877,17	877,35	0,18
(Ne) 878,06	878,16	0,10
(Ne) 878,33	878,45	0,12
(Ne) 885,39	885,49	0,10

Para cada filtro de interferência, a resposta do fotômetro é dada por:

$$J_2(\lambda) = C \eta(\lambda) \phi_\lambda \Delta \lambda \quad (3.4)$$

Através do quociente entre as equações (3.2) e (3.4), pode-se obter a seguinte relação:

$$T(\lambda) = \frac{J_1(\lambda)}{J_2(\lambda)} \quad (3.5)$$

Desse modo, pode-se determinar a curva de transmissão ou transmitância, $T = T(\lambda)$, para cada filtro em função do comprimento de onda.

Com o objetivo de melhor avaliar as condições de cada filtro, determina-se o valor percentual da transmissão, T_{\max} , isto é, a relação (3.5) calculada para um certo λ onde a contagem do sinal (vide equação 3.2) é máxima.

A largura efetiva de cada filtro, $\Delta \lambda_{\text{eff}}$, para cada posição pode ser calculada usando $T(\lambda)$ relativo a $T(\lambda = \lambda_{\max}) = 1$ e definido a transmissão relativa $t(\lambda) = T(\lambda)/T(\lambda_{\max})$, tal que:

$$\Delta \lambda_{\text{eff}} = \int t(\lambda) d\lambda \quad (3.6)$$

3.1.4.2 Determinação da Sensibilidade Absoluta

A montagem experimental usada para determinar a sensibilidade absoluta de cada filtro é representada na Figura 3.5. Esse esquema é baseado no trabalho de Yano e Kiyama (1975), e emprega uma lâmpada calibrada ES-8315 e dois difusores de MgO cuja reflectância é tomada pelo valor constante de 0,98 (Kulkarni e Sanders, 1964).

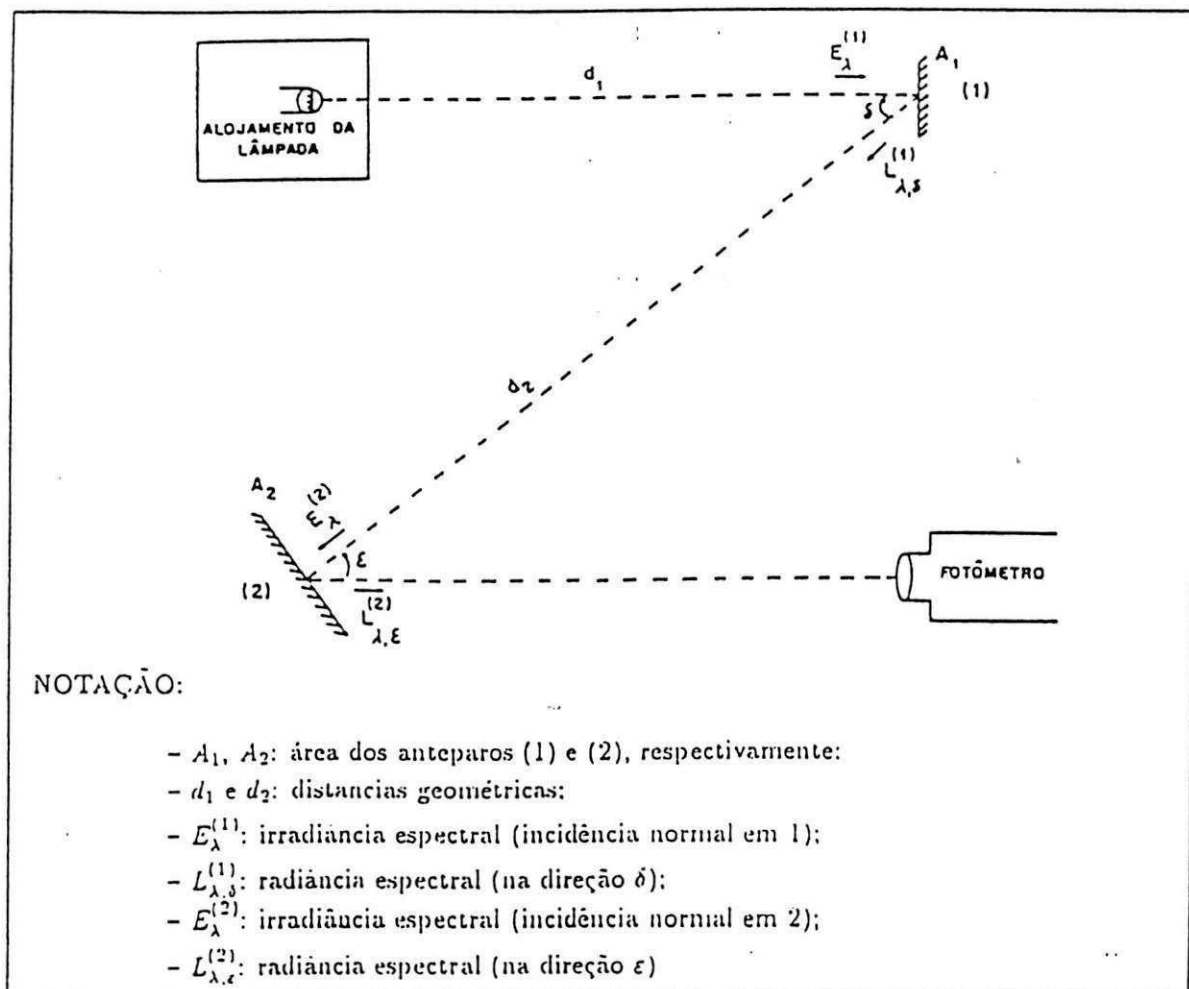


Fig. 3.5 – Montagem experimental usada para determinar a sensibilidade absoluta do fotômetro.

A radiância espectral de uma placa branca, L_λ ($\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$), que é proporcional a irradiância espectral na sua superfície, E_λ ($\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$), está relacionada com a propriedade de espalhamento da luz na superfície da placa. Para os difusores 1 e 2:

$$L_{\lambda,\delta}^{(1)} = \frac{K_\delta^{(1)}}{\pi} E_\lambda^{(1)}, \quad (3.7)$$

$$L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)} = \frac{K_\varepsilon^{(2)}}{\pi} E_\lambda^{(2)} \quad (3.8)$$

onde $K = K(\lambda, \mathbf{x})$ representa o fator de difusidade (reflectância), que normalmente depende do espectro (λ) e da direção de incidência da radiação (\mathbf{x}).

Da lei de Lambert, tem-se que:

$$E_\lambda^{(2)} = L_{\lambda,\delta}^{(1)} \frac{A_1 \cos \delta}{d_2^2}, \quad (3.9)$$

onde A_1 e d_2 encontram-se definidos na Figura 3.4. Usando a equação (3.8):

$$L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)} = E_\lambda^{(1)} \frac{K_\delta^{(1)} K_\varepsilon^{(2)}}{\pi^2} \frac{A_1 \cos \delta}{d_2^2} \quad (3.10)$$

O valor de $E_\lambda^{(1)}$ pode ser obtido por uma fonte padrão de irradiância espectral, $E_\lambda^{(0)}$, fornecida pelo fabricante. Assim, usando novamente a lei de Lambert,

$$E_{\lambda}^{(1)} = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 E_{\lambda}^{(0)}, \quad (3.11)$$

onde d_0 é a distância padrão de medida, usualmente de 50cm.

Finalmente, substituindo a equação (3.11) em (3.10), obtém-se:

$$L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)} = \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2 E_{\lambda}^{(0)} \frac{K_{\delta}^{(1)} K_{\varepsilon}^{(2)}}{\pi^2} \frac{A_1 \cos \delta}{d_2^2} \quad (3.12)$$

Em aeronomia é costume utilizar a unidade Rayleigh (R) para medir radiância associada a aeroluminescência. Por convenção, adotou-se que $1 \text{ R} = 10^6 \text{ fótons s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ de uma coluna vertical. Assim podemos definir a radiância espectral em Rayleigh nm^{-1} por:

$$B_{\lambda} = \frac{4\pi}{10^6} \frac{\lambda}{hc} L_{\lambda} \cong 6,328 \times 10^{10} \lambda L_{\lambda} \quad (3.13)$$

onde λ na última igualdade deve ser expresso em nm.

A Tabela 3.2 mostra $L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)}$ e $B_{\lambda,\varepsilon}^{(2)}$ calculados para os comprimentos de onda correspondentes aos canais do MULTI 3 a serem utilizados para as medidas da luminescência atmosférica do oxigênio atômico e molecular. Um polinômio foi usado para interpolar os dados fornecidos pelo fabricante da lâmpada padrão e obter $E_{\lambda}^{(0)}$ nos comprimentos de onda desejados.

Determinando $B_{\lambda,\varepsilon}^{(2)}$, pode-se conhecer a sensibilidade absoluta S ($R^{-1} s^{-1}$) para cada comprimento de onda desejado, medindo o número de pulsos de energia por segundo registrado pelo fotômetro e calculando a largura efetiva dos filtros em cada canal escolhido:

$$S(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{B_{\lambda,\varepsilon}^{(2)} \Delta\lambda_{eff}} \quad (3.14)$$

Tabela 3.2 – Irradiância $E_{\lambda}^{(0)}$ da lâmpada padrão ES8315 (fornecida pelo fabricante), radiância e brilhância fotométrica do segundo difusor – Calculados conforme texto para os comprimentos de onda utilizados.

$\lambda(\text{nm})$	$E_{\lambda}^{(0)}$ (Wcm^{-3})	$L_{\lambda,\varepsilon}^{(2)}$ ($\text{Wcm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$)	$B_{\lambda,\varepsilon}^{(2)}$ (Rnm^{-1}) $\times 10^2$
557,70	11,56	4,8048	1,6960
630,00	16,81	6,9882	2,7865
857,20	26,20	10,894	5,9106
866,00	26,29	10,930	5,9909

Na calibração do MULTI 3, quatro fontes de luz foram padronizadas: duas fontes de filamento poroso – denominadas de Lâmpada L_1 e Lâmpada L_2 – e duas fontes radiativas – C_{14} e Kr. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3, onde a brilhância de cada fonte é calculada a partir dos dados obtidos através da lâmpada padrão ES8315.

É importante ressaltar que existem variações na sensibilidade do fotômetro, tanto a curto quanto a longo prazo. Para detectar variações de curto prazo, usou-se a Lâmpada padrão L₂, a fim de corrigir, periodicamente, a sensibilidade absoluta dos filtros em cada canal usado.

3.1.5 Redução dos Dados

De uma maneira geral, a resposta do fotômetro a uma emissão de aeroluminescência pode ser expressa como (Takahashi, 1981):

$$J_{\varepsilon} = B_{\varepsilon}S_{\varepsilon} + \int_{\lambda} S_{\varepsilon}(\lambda)G_{\lambda}(\lambda)d\lambda \quad (3.15)$$

B_{ε} representa a intensidade da linha ε observada, em unidades R; $S_{\varepsilon}(\lambda)$ a sensibilidade do fotômetro para um dado comprimento de onda, em unidades $R^{-1} s^{-1}$ e $G_{\lambda}(\lambda)$ a intensidade espectral do contínuo da radiação de fundo, em unidades $R \text{ nm}^{-1}$.

Tendo em vista a definição da largura efetiva do filtro (equação 3.6), a equação (3.15) pode ser aproximada por;

$$J_{\varepsilon} \cong B_{\varepsilon}S_{\varepsilon} + S_{\varepsilon}(\lambda_{\max})G_{\lambda}(\lambda_{\max})(\Delta\lambda_{\text{eff}})_k \quad (3.16)$$

onde as quantidades S e G_{λ} são calculadas em $\lambda = \lambda_{\max}$ (picos de transmissão dos filtros).

3.1.6.1 Filtro F#1 – 557,7 nm

Esse filtro é usado para medidas em dois comprimentos de onda diferentes: $\lambda 557,7$ nm (posição P_1), que corresponde a linha verde do oxigênio atômico e $\lambda 554,0$ nm (posição P_2) para conhecer a contribuição da radiação de

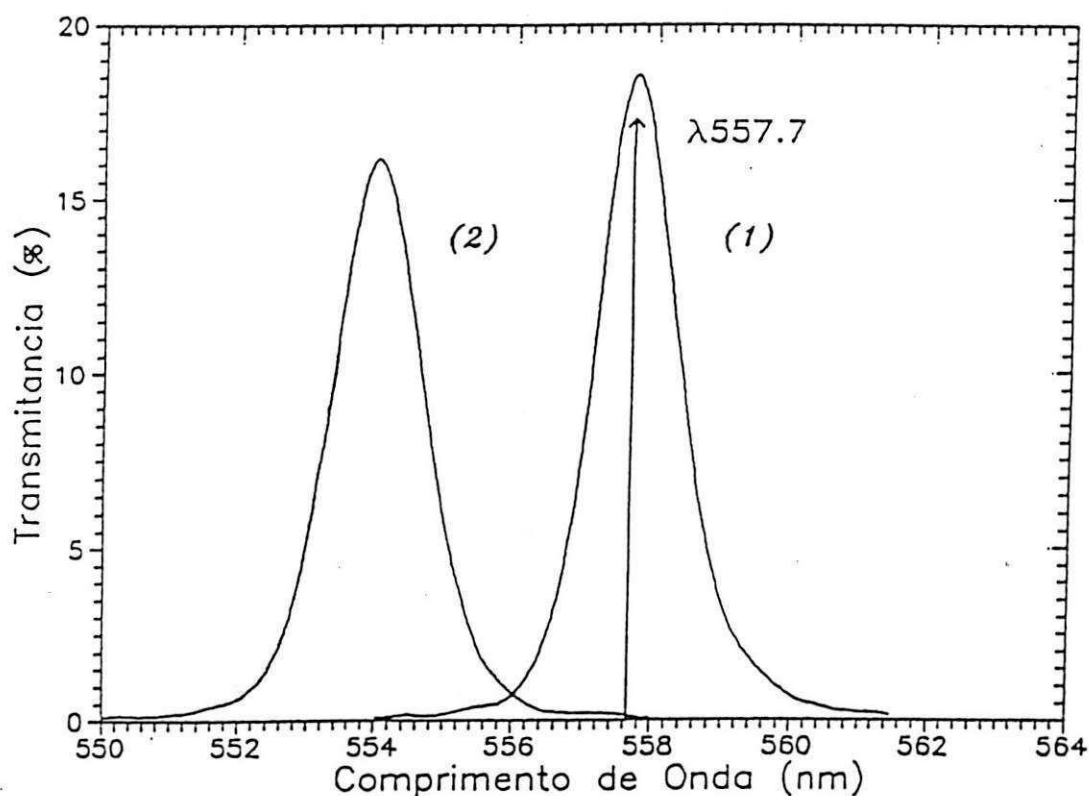


Fig.3.6 – Transmitância para as posições (1) e (2) do filtro F#1. Os números referem-se aos canais utilizados.

Uma análise quantitativa é possível usando a equação (3.16). Inicialmente, escreve-se a resposta do fotômetro nas duas posições P_1 ($k = 1$) e P_2 ($k = 2$) segundo Melo et al.,1992:

$$J_1 = I_{557,7} S_1 + G S_1 (\Delta \lambda_{eff})_1, \quad (3.17)$$

$$J_2 = I_{557,7} (S_2)_{\lambda 557,7} + G S_2 (\Delta \lambda_{eff})_2, \quad (3.18)$$

onde o termo

$$(S_2)_{\lambda 557,7} = S_2 \frac{t_2(\lambda 557,7)}{t_2(\lambda 557,7)} \quad (3.19)$$

surge devido a superposição das duas curvas de transmitância. Da equação (3.18) segue que:

$$G = \frac{J_2 - I_{557,7} (S_2)_{\lambda 557,7}}{S_2 (\Delta \lambda_{eff})_2}, \quad (3.20)$$

Substituindo a equação (3.20) em (3,17) tem-se:

$$J_1 = I_{557,7} S_2 + \frac{J_2 - I_{557,7} (S_2)_{\lambda 557,7}}{S_2 (\Delta \lambda_{eff})_2} S_1 (\Delta \lambda_{eff})_1 \quad (3.21)$$

Usando que, em geral:

$$A_k = \frac{S_k (\Delta \lambda_{eff})_k}{S_m (\Delta \lambda_{eff})_m} \quad (3.22)$$

$\forall k = 1, \dots, m-1$ e $m =$ número de posições do filtro. Para $m = 2$, pode-se escrever uma equação para a brilhância da emissão em $\lambda 557,7$:

$$I_{557,7} = \frac{J_1 - J_2 A_1}{S_2 (1 - CA_1)} \quad (3.23)$$

representando por C o quociente entre $(S_2)_{\lambda 557,7}/S_1$.

Dessa forma, a partir dos valores medidos para J_1 e J_2 e dos valores de S_1 , $(\Delta\lambda_{\text{eff}})_1$, S_2 e $(\Delta\lambda_{\text{eff}})_2$ obtidos da calibração, é possível calcular a intensidade da linha verde do oxigênio atômico (557,7nm) na aeroluminescência mesosférica.

– Filtro F#3 – 630,0nm

De modo análogo ao filtro F#1, esse filtro mede duas emissões da aeroluminescência: uma em $\lambda 630,0\text{nm}$, referente à linha vermelha do oxigênio atômico e a outra em $\lambda 627,0\text{nm}$ para conhecimento da radiação de fundo. As curvas de transmitância relativa desses canais são mostradas na Figura 3.7.

O processo de análise é semelhante ao apresentado para o filtro F#1. A intensidade de emissão é dada por:

$$I_{630,0} = \frac{J_1 - J_2 A_1}{S_1 (1 - CA_1)} \quad (3.24)$$

onde C representa o quociente entre $(S_2)_{\lambda 630,0}/S_1$.

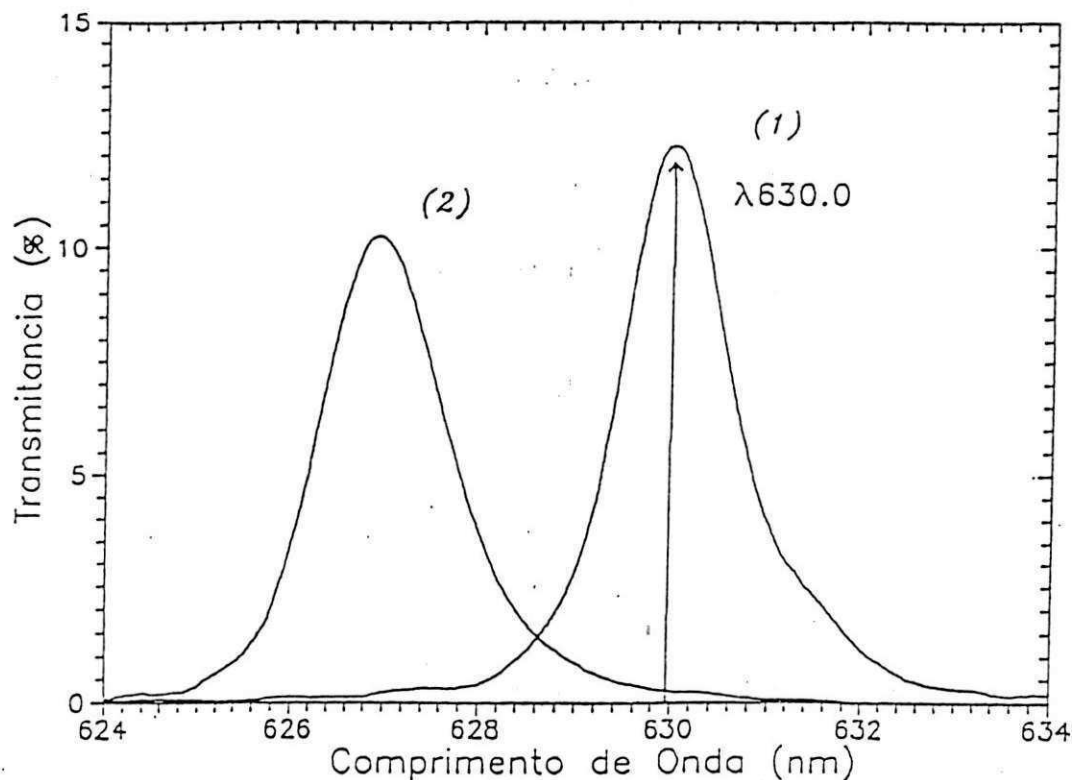


Fig.3.7 – Curvas de transmitância para os canais do filtro F#3. Os números referem-se aos canais utilizados.

– Filtro F#5 – 868,5nm

Esse filtro mede a banda (0-1) do sistema Atmosférico do O_2 . São obtidos dados em três comprimentos de onda: $\lambda = 868,5$ nm, que corresponde ao centro da mistura dos ramos P + Q; $\lambda = 865,5$ nm, que corresponde ao pico desta mistura de ramos, e $\lambda = 857,2$ nm usado para conhecer a radiação de fundo. A curva de transmitância relativa de cada canal, juntamente com uma representação do espectro da banda em questão, são mostrados na Figura 3.8.

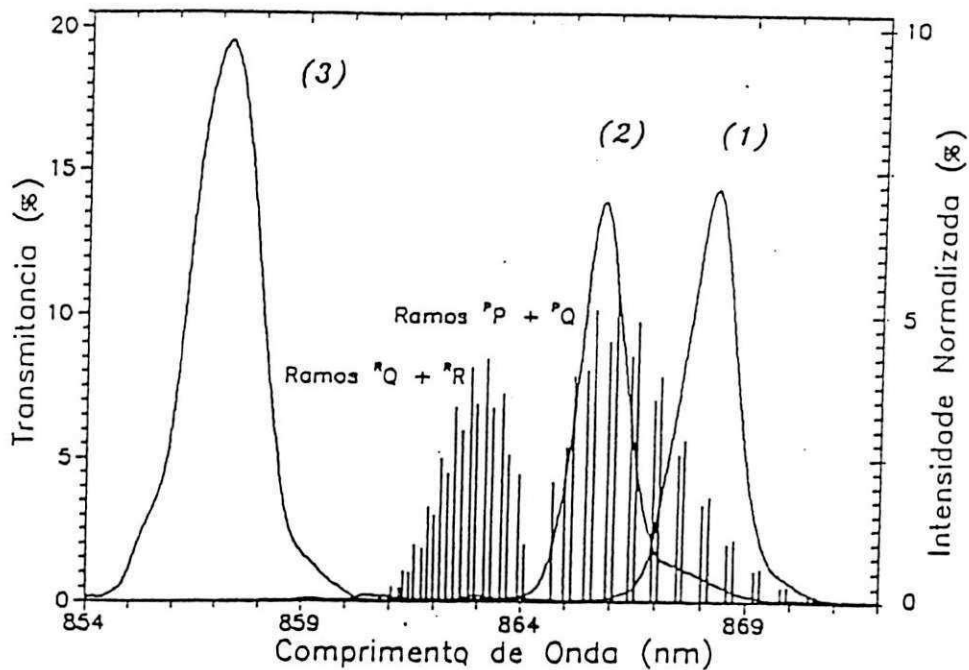


Fig.3.7 – Curvas de transmitância para os canais do filtro F#5. Os números referem-se aos canais utilizados.

De acordo com a equação (3.16), a resposta do fotômetro em cada canal pode ser dada por:

$$J_1 = \sum_{\alpha}^{P+Q} I_{\alpha} (S_1)_{\alpha} + GS_1 (\Delta\lambda_{eff})_1, \quad (3.25)$$

$$J_2 = \sum_{\beta}^{P+Q} I_{\beta} (S_2)_{\beta} + GS_2 (\Delta\lambda_{eff})_2, \quad (3.26)$$

$$J_3 = GS_3 (\Delta\lambda_{eff})_3, \quad (3.27)$$

onde α e β representam as linhas rotacionais dos ramos P+Q.

As equações (3.25), (3.26) e (3.27) podem ser colocadas na forma:

$$J_1 - A_1 J_3 = S_1 I_{O2} \sum_{\alpha}^{P+Q} i_{\alpha}(t_1)_{\alpha}, \quad (3.28)$$

$$J_2 - A_2 J_3 = S_2 I_{O2} \sum_{\beta}^{P+Q} i_{\beta}(t_2)_{\beta} \quad (3.29)$$

onde foi usada a relação (3.22) para $m = 3$. Dividindo membro a membro, obtém-se (Melo et al., 1992):

$$\left(\frac{S_2}{S_1} \right) \frac{J_1 - A_1 J_3}{J_2 - A_2 J_3} = \frac{\sum_{\alpha}^{P+Q} i_{\alpha}(t_1)_{\alpha}}{\sum_{\beta}^{P+Q} i_{\beta}(t_2)_{\beta}}, \quad (3.30)$$

Analogamente ao filtro F#1, definindo a função teórica

$$M_{P+Q} = \frac{\sum_{\alpha}^{P+Q} i_{\alpha}(t_1)_{\alpha}}{\sum_{\beta}^{P+Q} i_{\beta}(t_2)_{\beta}} \quad (3.31)$$

que é dependente da temperatura rotacional. Pode-se calcular uma função de ajuste inversa do tipo polinomial de grau-p, segundo Melo et al., 1992:

$$T = T(M_{P+Q}) = \sum_{n=0}^p a_n (M_{P+Q})^n, \quad (3.32)$$

para cada valor de M_{P+Q} dado pela equação (3.31). A partir dos dados observacionais J_1, J_2 e dos resultados da calibração do MULTI 3 (A_1, S_1 e S_2), obtém-se:

$$\langle M_{P+Q} \rangle_{obs.} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \frac{J_1 - A_1 J_3}{J_2 - A_2 J_3} \quad (3.33)$$

Usando, então, a função de ajuste (3.32), calcula-se a temperatura rotacional da emissão $O_2(0-1)$ segundo a expressão:

$$T_{obs} = \sum_{n=0}^p a_n \left(\langle M_{P+Q} \rangle_{obs.} \right)^n \quad (3.34)$$

A intensidade de $O_2(0-1)$ é calculada definindo a seguinte função teórica:

$$SM_{P+Q} = \sum_{\beta}^{P+Q} i_{\beta}(t_2)_{\beta}, \quad (3.35)$$

Variando a temperatura rotacional T , obtém-se uma função de ajuste polinomial de grau-q, qual seja:

$$SM_{P+Q} = SM_{P+Q}(T) = \sum_{n=0}^q b_n T^n \quad (3.36)$$

Usando o valor para T_{obs} , calculado pelo ajuste (3.32), obtém-se $\{SM_{P+Q}\}_{obs}$.

Finalmente, das equações (3.29) e (3.35), tem-se que:

$$I_{O_2} = \frac{J_2 - A_2 J_3}{S_2 \langle SM_{P+Q} \rangle_{obs}} \quad (3.37)$$

CAPÍTULO 4

DADOS DO MULTI 3 E METODOLOGIA

4.1 Dados do MULTI 3

O fotômetro é um instrumento de alta sensibilidade, usado para medir a intensidade (fluxo de fótons numa coluna vertical) de uma emissão, fornecendo, assim, medidas absolutas das emissões da luminescência atmosférica noturna. As observações são efetuadas durante o período noturno, entre aproximadamente 19h e 4h. Este período depende da época do ano. No verão, por exemplo, as observações começam às 18h40min, ou seja, em torno de 50 minutos após o pôr-do-sol e terminam em torno das 4h da manhã do dia seguinte. Isto tem por finalidade evitar a presença da luz solar na atmosfera da região onde se faz a observação. No inverno, por outro lado, as observações começam mais cedo e terminam mais tarde, naturalmente neste período pode-se observar mais o airglow. Na Figura 4.1 são mostradas as horas do nascer e do pôr-do-sol para o ano de 1998 em São João do Cariri, também pode ver a duração total da noite. O fotômetro opera durante um intervalo de aproximadamente 13 dias por mês, em torno do período de lua

nova, evitando-se assim, a presença dos efeitos da lua no campo de visão do fotômetro.

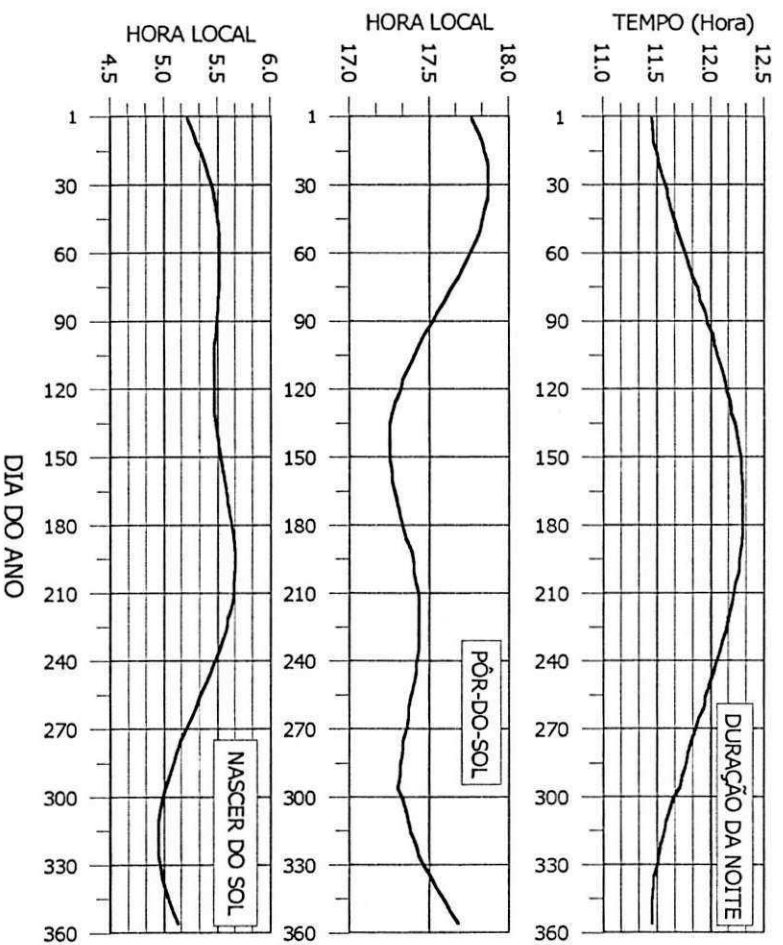


Fig.4.1 – Hora do nascer (abaixo) e do pôr-do-sol (centro). No topo temos a duração, em horas, da noite em S. J. do Cariri para ano de 1998.

Fonte: Programa Skymap.

A fim de seleccionar os dados com relação a sua qualidade, ou seja, se são aproveitáveis ou não, observou-se o comportamento da Luz de Fundo – região do espectro eletromagnético que não possui emissão de luminescência atmosférica – variando com o tempo. A região de fundo do OI557,7 nm, por exemplo, encontra-se em 554,0 nm. Esta emissão fornece as

condições de observação do fotômetro com relação à presença de nuvens no céu e/ou luzes artificiais, o que prejudica as observações. Assim, antes de utilizar os dados do trabalho, foi necessário observar as condições do céu. Na Figura 4.2 é mostrado um exemplo de Luz de Fundo onde pode-se ver o seu comportamento na noite do dia 18/01/2001. Neste caso, os dados de fotômetro aproveitáveis encontram-se entre 20h e 23h30min e entre 00h 40min e 1h50min do dia 19. Nos outros intervalos indicam a presença de nuvens na região do céu dentro do campo de visão do fotômetro, caracterizada pelo aumento do sinal.

No presente trabalho, foram utilizadas medidas das intensidades das emissões do OI557,7nm, OI630,0nm, e O₂ (0-1) em 868,5 nm, realizadas em São João do Cariri durante o período de janeiro de 1998 a junho de 2001. A resolução temporal dos dados observados pelo fotômetro MULTI3 é de 2 min e 42 segundos (2,42min). Os dados selecionados tinham que satisfazer algumas condições: a) céu limpo, ou seja, Luz de Fundo com valores entre 1 e 4 R/Å; b) presença de bolhas de plasma e c) variação suave da intensidade do O₂(0,1) no mesmo intervalo de tempo da ocorrência da bolha.

A Figura 4.3 mostra, como exemplo, as variações temporais nas intensidades, obtidas com o fotômetro MULTI3, do OI630,0nm, OI557,7nm, O₂ (0-1) em 864,5nm e Luz de Fundo, durante a noite de 12/12/1998. Os gráficos mostram, por exemplo, bruscas variações nas intensidades das linhas OI630,0nm e OI557,7nm associadas à passagem de bolha de plasma sobre o campo de visão do fotômetro entre 20h e 22h. É notório a perturbação do sinal nas emissões quando a Luz de Fundo tem sua variação acentuada devido a presença de nuvens no céu em torno das 23h.

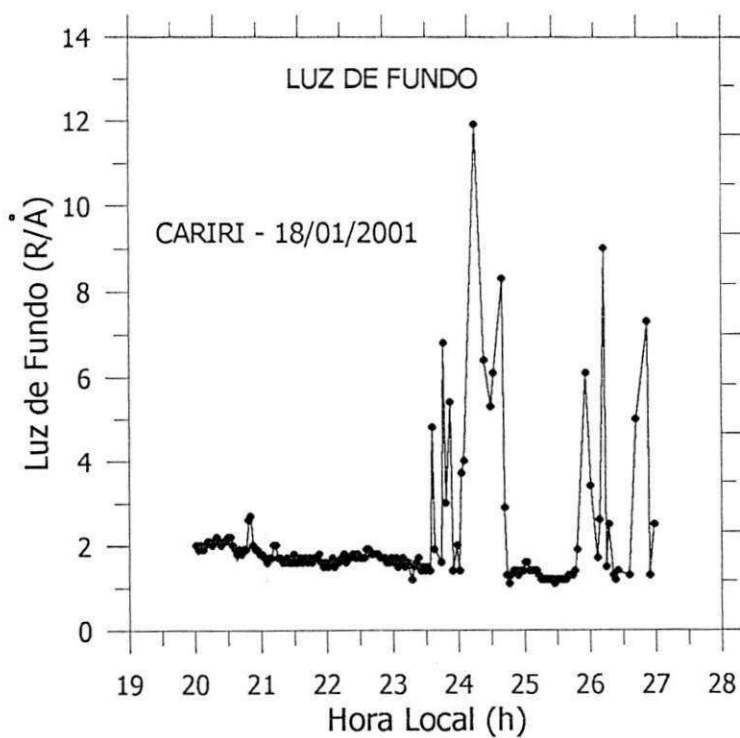


Fig.4.2 – Comportamento da luz de fundo (em 554,0 nm) para o dia 18/01/2001. Neste dia, o céu apresentou condições favoráveis para aproveitamento de dados principalmente entre 20 e ~23h30min.

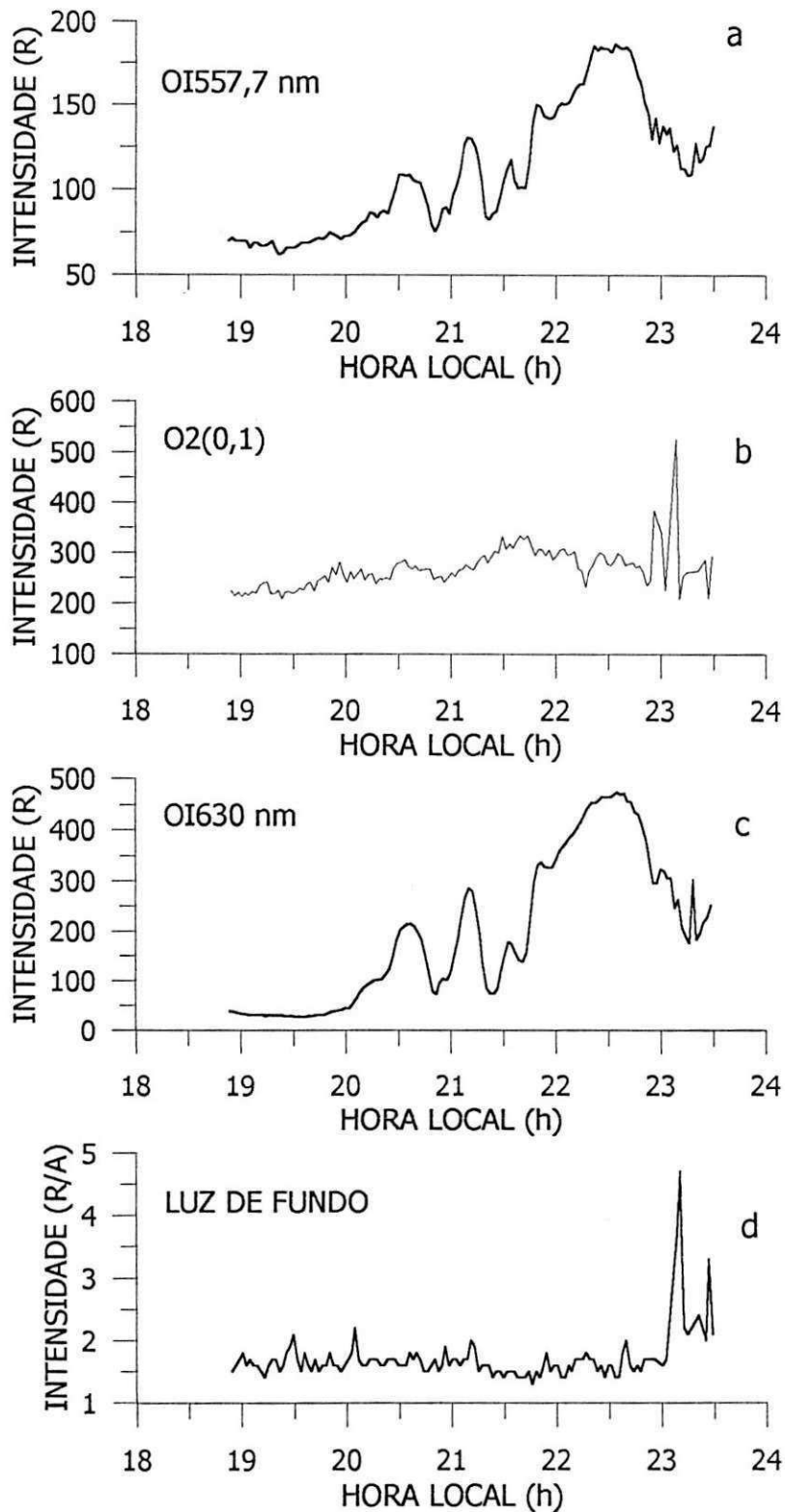


Fig. 4.3 – Comportamento das intensidades do a) OI557,7 nm, b) O₂(0,1), c) OI630 nm e d) Luz de Fundo para o dia 12/12/1998 obtido pelo fotômetro MULTI 3 em São João do Cariri.

4.2 Estatística dos dados observados

O nosso interesse está em utilizar dados que apresentaram variações bruscas das intensidades de emissão do OI557,7nm e OI630,0nm, associadas com as bolhas de plasma e que cruzam o campo de visão do fotômetro. Esta é a condição indispensável para o cálculo da componente OI557,7nm na região F (Fagundes et al., 1995). Portanto, dentre aproximadamente 588 dias de observações, selecionou-se 79 dias com ocorrência das bolhas de plasma, dos quais foram verificadas 148 depleções simultâneas nas intensidades OI557,7nm e OI630,0nm. Sendo que, somente 96 depleções, correspondente a um total 52 dias de observações, foram aproveitadas por satisfazerem as condições da técnica utilizada para calcular a componente da emissão OI557,7nm da região F.

Nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3, e 4.4 são apresentadas para cada mês o total das depleções, o número de depleções utilizadas, a percentagem de aproveitamento e o número de dias observados com ocorrência das bolhas de plasma nos anos de 1998, 1999, 2000 e 2001, respectivamente. A Tabela 4.5 é semelhante às anteriores só que, mostra os totais mensais para os 3,5 anos de observações.

TABELA 4.1 – DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS DEPLEÇÕES DO ANO DE 1998.

1998 Mês	Total de depleções	Total de depleções utilizadas	Percentagem de utilização %	Total de dias de observações
Janeiro	03	03	100	02
Fevereiro	11	05	54,45	05
Março	04	00	0	03
Setembro	02	01	50	01
Outubro	09	07	77,78	06
Novembro	01	00	0	01
Dezembro	13	08	61,54	06
Total	43	24	55,81	24

TABELA 4.2 – DISTRIBUIÇÃO DAS DEPLEÇÕES DO ANO DE 1999.

1999 Mês	Total de depleções	Total de depleções utilizadas	Percentagem de utilização %	Total de dias de observações
Janeiro	08	04	50	03
Fevereiro	20	17	85	07
Março	02	00	0	02
Setembro	01	01	100	01
Outubro	04	00	0	02
Novembro	03	00	0	02
Dezembro	11	06	54,54	07
Total	49	28	57,14	24

TABELA 4.3 – DISTRIBUIÇÃO DAS DEPLEÇÕES DO ANO DE 2000.

2000 Mês	Total de depleções	Total de depleções utilizadas	Percentagem de utilização %	Total de dias de observações
Janeiro	03	02	66,67	01
Fevereiro	04	04	100	03
Setembro	02	02	100	02
Outubro	02	00	0	02
Novembro	09	06	66,67	06
Dezembro	10	07	70	06
Total	30	21	70	20

TABELA 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DAS DEPLEÇÕES DO ANO DE 2001.

2001 Mês	Total de depleções	Total de depleções utilizadas	Percentagem de utilização %	Total de dias de observação
Janeiro	15	14	93,33	06
Fevereiro	11	09	81,82	05
Total	26	23	88,46	11

TABELA 4.5 – DISTRIBUIÇÃO MENSAL TOTAL DAS DEPLEÇÕES DOS 3,5 ANOS DE OBSERVAÇÕES UTILIZADAS NESTE TRABALHO.

Mês	Total de depleções	Total de depleções utilizadas	Percentagem de utilização %	Total de dias de observações
Janeiro	29	23	79,31	12
Fevereiro	46	35	76,07	20
Março	06	00	0	05
Setembro	05	04	80	04
Outubro	15	07	46,67	10
Novembro	13	06	46,15	09
Dezembro	34	21	61,76	19
Total	148	96	64,86	79

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram dois histogramas relacionados com a distribuição das depleções das intensidades observadas simultaneamente no OI630,0nm e no OI557,7nm e também com relação às depleções utilizadas neste trabalho (aquelas que satisfazem as condições da técnica adotada neste trabalho para calcular o percentual do OI557,7 nm na ionosfera) em função do mês e ano de observação das referidas emissões. Pode-se ver que as bolhas aparecem principalmente entre os meses de setembro e março do ano seguinte, ou seja, o aparecimento de bolhas tem um comportamento sazonal. O que está de acordo com as observações feitas por Pimenta (2002).

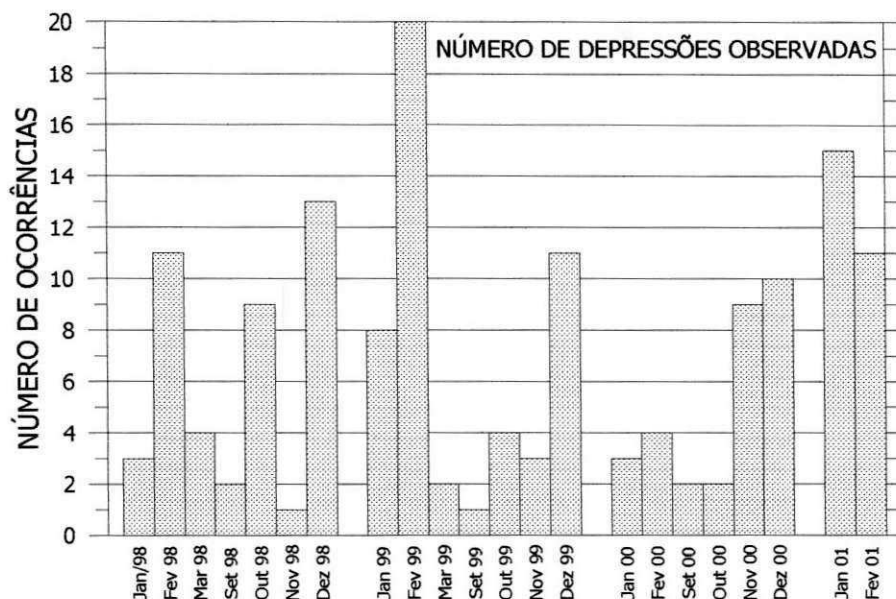


Fig. 4.4 – Histograma do número de depleções observadas no OI557,7 nm e OI630,0 nm para o Cariri entre os anos de 1998 e 2001.

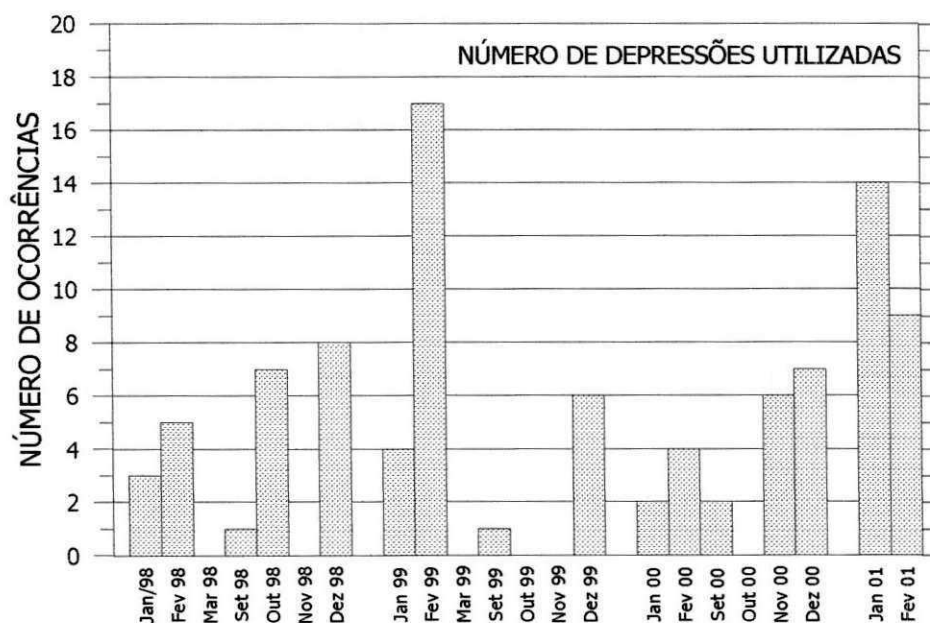


Fig. 4.5 - Histograma do número de depleções utilizada para obter o percentual de OI557,7 nm na camada F da ionosfera para o Cariri entre os anos de 1998 e 2001.

4.3 Metodologia

Inicialmente, através dos dados obtidos pelo fotômetro para cada dia de observação, obtêm-se gráficos das variações das intensidades, em função do tempo, das emissões do OI630,0nm, do OI557,7nm e do O₂ mesosférico. Em seguida, verifica-se a ocorrência simultânea de queda repentina nas intensidades OI630,0nm e OI557,7nm. Vale salientar que pode-se ter mais de uma ocorrência de queda de intensidade para cada dia de observação.

Uma vez detectada a depleção, compara-se graficamente (visualmente) a variação na intensidade do OI557,7nm no intervalo de tempo da ocorrência da queda de intensidade com a variação de intensidade do O₂ mesosférico para o mesmo intervalo de tempo. Se não ocorreu grande variação na intensidade do O₂ mesosférico, ou seja, queda brusca de intensidade; esta depleção é selecionada (veja Figura 4.3). Caso contrário, a queda de intensidade do OI557,7 nm é devida a outro fenômeno de variação que ocorreu exclusivamente na região da mesopausa, e não pela passagem da bolha de plasma naquele intervalo de tempo, logo esta variação é desprezada. Isto pode ser visto na Figura 4.6, onde percebe-se uma grande variação da intensidade do O₂(0,1) dentro do intervalo de tempo em que a intensidade do OI557,7 nm também diminui.

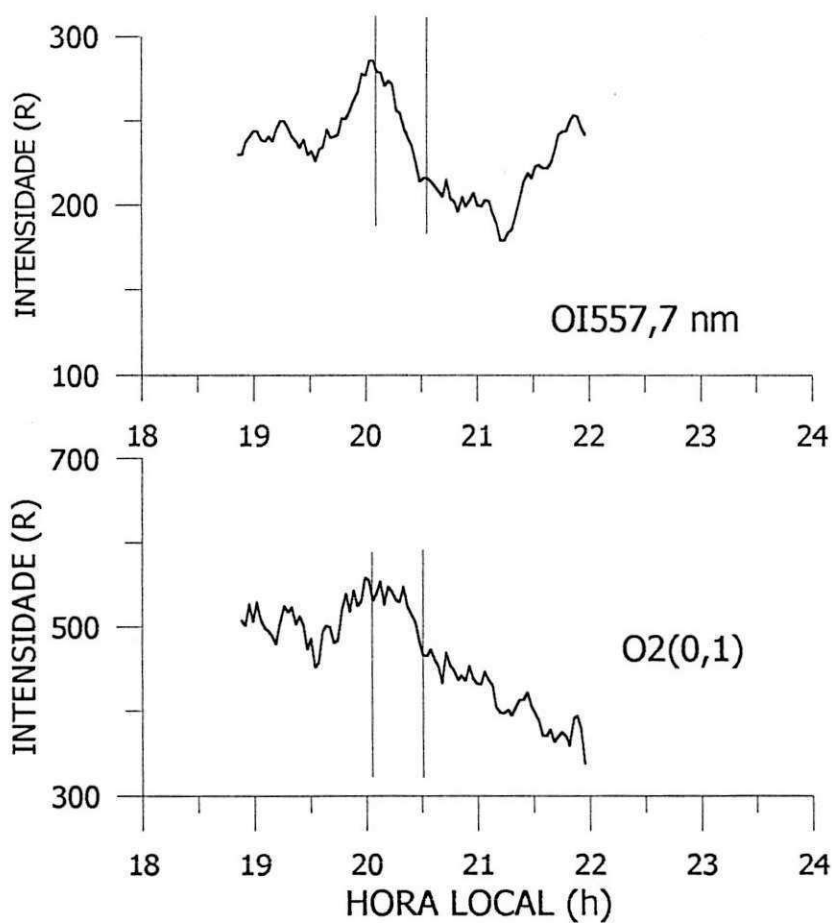


Fig. 4.6 – Comportamento da intensidade do OI557,7 nm e O₂(0,1) para o dia 15/06/1998.

Selecionadas as depleções simultâneas nas intensidades das emissões OI630,0 nm e OI557,7 nm, ocasionadas pela passagem das bolhas de plasma sobre o campo de visão do fotômetro. As variações nas intensidades das emissões provocadas pela depleções, são obtidas entre dois momentos:

a) antes da passagem das bolhas de plasma sobre o campo de visão do fotômetro, cujo valor tomado, corresponde à intensidade máxima que precede o início da queda, dado por:

$$I_{557,7}^A = I_{557,7(E)}^A + I_{557,7(F)}^A \quad (4.1)$$

$$I_{630,0}^A = I_{630,0(F)}^A \quad (4.2)$$

b) durante a passagem de bolha de plasma sobre o campo de visão do fotômetro, cujo valor utilizado corresponde a intensidade mínima atingida na depleção, dado por:

$$I_{557,7}^D = I_{557,7(E)}^D + I_{557,7(F)}^D \quad (4.3)$$

$$I_{630,0}^D = I_{630,0(F)}^D \quad (4.4)$$

onde A representa antes e D representa durante o evento de bolha de plasma e (E) e (F) componentes das regiões E e região F, respectivamente. Observe-se que a intensidade 557,7 nm é uma intensidade integrada das regiões E e F, já que as emissões do OI557,7 nm provêm de ambas camadas.

Portanto, utilizando as equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4) pode-se obter a diferença entre as duas condições, A e D, que para a emissão OI557,7 nm é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta I_{557,7} &= I_{557,7(E)}^A - I_{557,7(E)}^D + I_{557,7(F)}^A - I_{557,7(F)}^D \\ \Delta I_{557,7} &= \Delta I_{557,7(E)}^A + \Delta I_{557,7(F)}^D \end{aligned} \quad (4.5)$$

O mesmo pode-se fazer para a emissão OI630,0 nm, que fica:

$$\begin{aligned}\Delta I_{630,0} &= I_{630,0(F)}^A - I_{630,0(F)}^D \\ \Delta I_{630,0} &= \Delta I_{630,0(F)}\end{aligned}\quad (4.6)$$

Como as bolhas de plasma ocorrem na região F e levam um curto tempo para cruzar o campo de visão do fotômetro, pode-se considerar que $I_{557,7(E)}^A \approx I_{557,7(E)}^D$. Esta aproximação só é correta, somente nos casos quando a intensidade de emissão da banda O₂(0,1) mostra pequenas variações para os mesmos intervalos de tempo das depressões, implicando dizer que praticamente não há variações nas intensidades da emissão OI557,7 nm na mesosfera nestes intervalos. Define-se uma razão r entre a diferença de intensidade OI557,7 nm e OI630,0 nm como (Fagundes et al., 1995):

$$r = \frac{\Delta I_{557,7(E)} + \Delta I_{557,7(F)}}{\Delta I_{630,0(F)}} \quad (4.7)$$

Como $\Delta I_{557,7(E)} = I_{557,7(E)}^A - I_{557,7(E)}^D$ e $I_{557,7(E)}^A \approx I_{557,7(E)}^D$, $\Delta I_{557,7(E)} = 0$. Logo,

$$r = \frac{\Delta I_{557,7(F)}}{\Delta I_{630,0(F)}} \quad (4.8)$$

Uma vez selecionadas as depleções nas intensidades OI557,7nm e OI630,0nm, calcula-se as razões r_i ($i = 1,2,3,\dots,n$) entre as variações de intensidade de OI557,7 nm e OI630,0 nm, ou seja,

$$r_i = \frac{\Delta I_{557,7}^i(F)}{\Delta I_{630,0}^i(F)} \quad (4.9)$$

onde $i = 1,2,3,\dots,n$; refere-se a i -ésima depleção. Em seguida calcula-se a razão média r , ou seja,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (4.10)$$

Como a intensidade das depleções das duas emissões é causadas por mudança repentina no perfil de densidade de elétrons devido a bolhas de plasma que modifica as intensidades das componentes OI557,7 nm e OI630,0 nm. Assim, pode-se dizer que a razão r obtida só depende das emissões OI557,7 nm e OI630,0 nm na região F, ou seja, $r = I_{557,7(F)} / I_{630,0(F)}$ (Fagundes et al., 1995).

Portanto, a emissão do OI557,7 nm na região F é diretamente proporcional a emissão do OI630,0 nm, onde a constante de proporcionalidade é o próprio valor de r encontrado, ou seja:

$$I_{557,7(F)} = r I_{630,0(F)} \quad (4.11)$$

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

Neste trabalho, foram utilizados um total de 96 casos de depleções simultâneas nas intensidades integradas do OI557,7 nm e OI630,0 nm, associadas com a passagem das bolhas de plasma sobre o local das observações. Estas depleções – forte queda na intensidade do OI630,0 nm e OI557,7 nm – foram obtidas de 52 noites de observações simultâneas das variações temporais de intensidade das referidas emissões e da emissão O₂(0,1) a qual foi utilizada como parâmetro selecionador das depleções observadas através do fotômetro multicanal (MULTI 3) instalado em São João do Cariri, desde 1997. Os dados utilizados neste trabalho referem-se ao período compreendido entre janeiro de 1998 a junho de 2001.

Cálculos da razão entre as diferenças de intensidades das depleções OI557,7 nm e OI630,0 nm, $r = \Delta\text{OI557,7}/\Delta\text{OI630,0}$, mostraram valores variando entre 0,14 e 0,52. O valor médio da razão encontrado foi de $0,31 \pm 0,08$. A

Figura 5.1 mostra estes resultados, através de um histograma do número de ocorrências para cada valor de r encontrado. A curva gaussiana sobre o histograma, mostra que cerca de dois terço das razões encontradas se distribuem entre $\pm 0,08$ do valor 0,31.

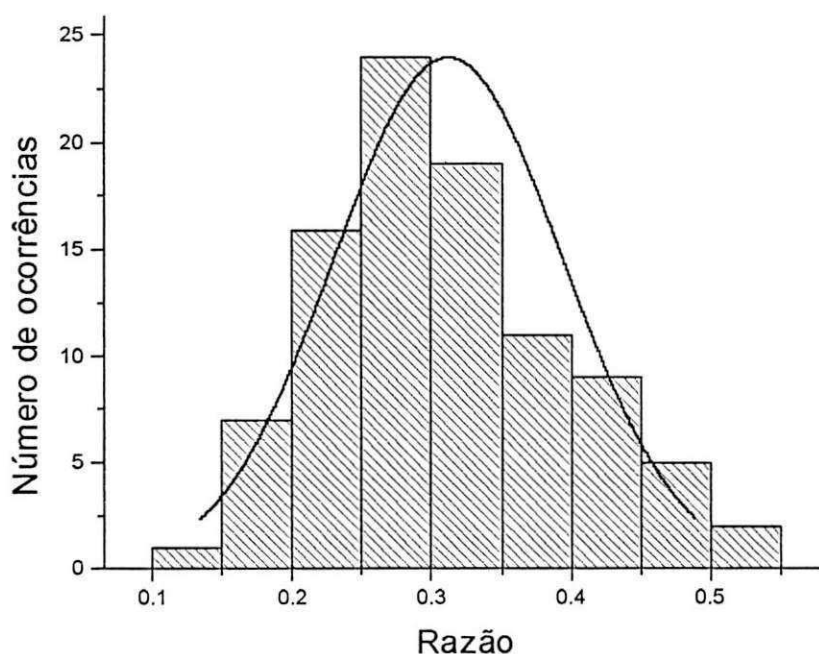


Fig. 5.1 – Histograma do número de ocorrências para cada valor do r encontrado. A curva representa a distribuição normal dos valores obtidos.

Na Tabela 5.1 são mostradas as distribuições mensais das depleções, com as respectivas razões mínimas, máximas e médias encontradas para cada

mês onde detectou-se as depleções relacionadas com a camada F. Observa-se uma maior concentração das depleções nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, este último com um maior número de ocorrências, resultado que concorda com os de Pimenta (2002).

Tabela 5.1 – Razão média OI557,7/OI630,0 mensal.

Mês	r_{\min}	r_{\max}	r_{med}	Total de depleções
Setembro	0,21	0,51	0,35	4
Outubro	0,25	0,51	0,37	7
Novembro	0,23	0,48	0,32	6
Dezembro	0,19	0,49	0,32	21
Janeiro	0,14	0,53	0,30	23
Fevereiro	0,18	0,45	0,30	35

Na Figura 5.2 é ilustrada a distribuição das razões médias encontradas para os meses que tiveram ocorrências de depleções selecionadas, mostrando também o total das depleções utilizadas para o cálculo da razão média. Observa-se que as razões médias mensais apresentam uma variação entre os meses, porém, deve-se levar em conta o número de pontos (razões) utilizados para o cálculo desta média. Portanto, as razões médias mensais que apresentaram uma maior confiabilidade, foram as encontradas para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, em virtude de contribuírem com um maior número de razões para o cálculo da razão média.

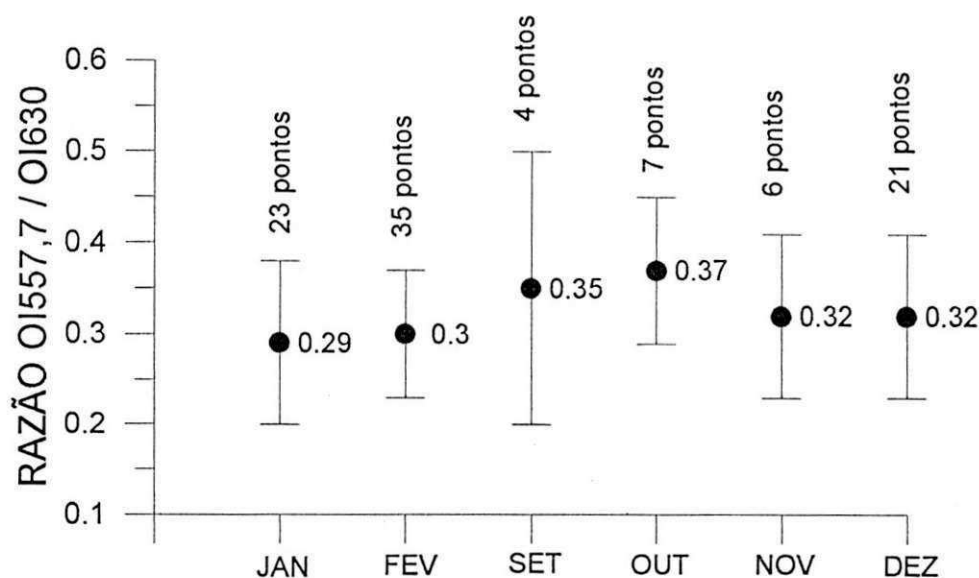


Fig. 5.2 – Distribuição da razão média em função dos meses dos anos de 1998 a 2001. As barras verticais indicam o desvio padrão para cada período calculado.

A Figura 5.3 mostra a razão entre as variações de OI557,7 nm e OI630,0 nm nas depleções para cada valor calculado. Observa-se que as razões encontradas se concentram principalmente nos 60 primeiros e nos últimos 90 dias do ano. Indicando assim um comportamento sazonal das depleções, que pode ser visto também na Tabela 5.1 e Figura 5.2, onde as depleções se distribuem nos meses de janeiro, fevereiro, setembro, outubro, novembro e dezembro. O que é o esperado, uma vez que a ocorrência das bolhas de plasma (responsável pelas depleções) se verifica de setembro a março. É evidente a ausência das bolhas de plasma entre março e agosto e, conseqüentemente, de

razões calculadas neste período. A linha horizontal escura indica o valor médio obtido a partir de todos os pontos calculados.

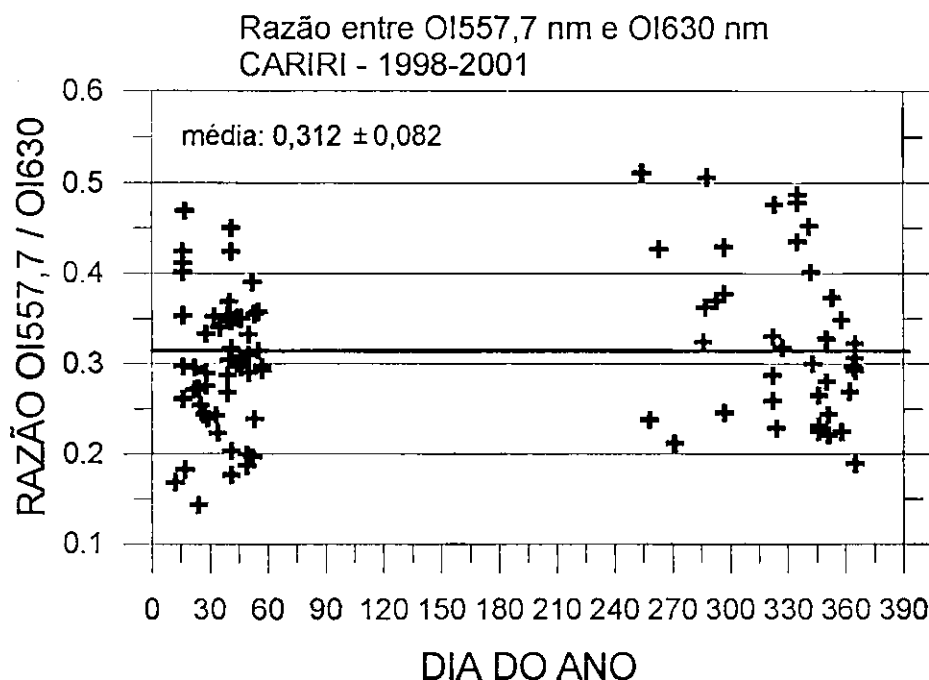


Fig.5.3 – Razão entre OI557,7 e OI630,0 em função do dia do ano para São João do Cariri. Os dados são referentes ao período entre janeiro de 1998 e junho de 2001.

Com a finalidade de observar possível comportamento ao longo dos anos das razões entre as variações de OI557,7 nm e OI630,0 nm nas depleções, elaborou-se um gráfico da razão em função da seqüência de dias. Da Figura 5.4 podemos ver a existência de uma variação ao longo do período observado. O período compreendido entre o final do ano de 1999 e o início de 2000,

apresentou valores maiores da razão com relação aos outros períodos calculados, conforme pode ser visto através da curva de ajustamento polinomial de segunda ordem das razões calculadas. Tal comportamento poderia estar relacionado com o ciclo solar que é de aproximadamente 11 anos e que teve seu máximo (23^o ciclo) no início de 2000.

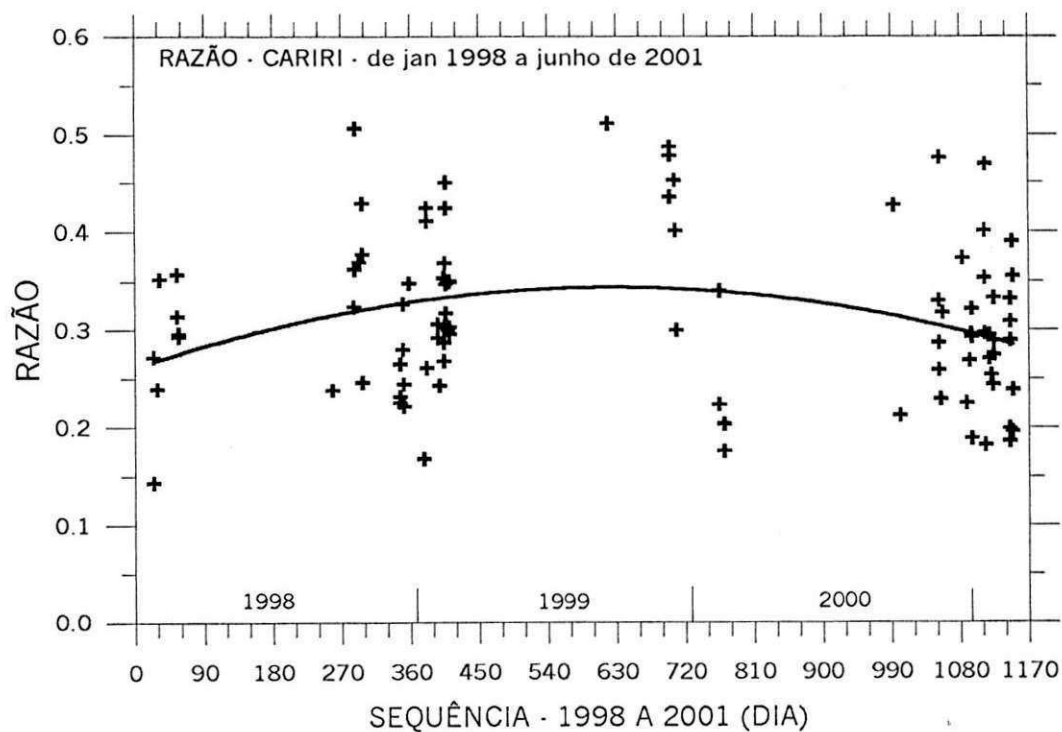


Fig. 5.4 – Valor da razão calculada ao longo de quase 3,5 anos de dados observados no Cariri. A linha cheia representa um ajuste polinomial de segunda ordem.

5.2 Discussão

A razão média entre as intensidades de emissão OI557,7 nm e OI630,0 nm para a região F, $I_{557,7}/I_{630,0}$, obtida neste trabalho foi de $0,31 \pm 0,08$. Este resultado foi obtido de 96 casos de depleções simultâneas nas intensidades destas emissões, referentes à 52 noites de observações (quase duas depleções por noite) de um período de 3,5 anos de medidas (menos de 10% dos dias observados), tendo o fotômetro operando com resolução temporal de 2,7 minutos.

O erro na intensidade do OI557,7 nm e OI630,0 nm, devido ao fotômetro varia entre 7 e 10%. Porém, ao levar-se em conta um valor de 10%, tem-se um erro máximo na razão média de 4%, o que está dentro do intervalo do desvio, que é de 0,08.

A Figura 5.1 mostra como as razões encontradas (no total de 96) se distribuem com relação à frequência de ocorrência de cada uma. As razões com valores entre 0,25 e 0,30, foram as que tiveram maior número de repetições, com vinte e quatro ocorrências. Observe-se que os valores se distribuem segundo uma curva normal, a qual indica que dois terço das razões encontradas situam-se no intervalo de $\pm 0,08$ do valor máximo 0,31, que é a razão média encontrada.

Com o objetivo de verificar diferenças entre as razões encontradas para cada mês, foram calculadas as razões médias mensais (Tabela 5.1 e Figura 5.2), que resultaram em médias de 0,32; 0,29 e 0,30 para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (meses com maior número de razões calculadas),

respectivamente. Estes resultados mostraram que as razões médias foram praticamente iguais. Os outros meses apresentaram poucos valores, com médias variando entre 0,32 e 0,35. Esta distribuição indicou que o comportamento sazonal da razão média é praticamente constante. Como também confirmam o comportamento sazonal da ocorrência das bolhas de plasma.

Para observar diferenças entre as razões calculadas com relação ao ano que as geraram, as razões obtidas dos 3,5 anos de dados foram plotados em função do dia do ano e mostraram valores mais altos compreendidos entre o final de 1999 e início de 2000, o que pode ser visto na Figura 5.4 através da linha cheia, que representa um ajuste polinomial. Tal comportamento pode está relacionado com o ciclo solar que é 11 anos e que teve seu máximo (23^o ciclo) no início de 2000.

Fagundes et al. (1995) em trabalho semelhante para médias latitudes, obtiveram um valor menor, $0,26 \pm 0,07$, para a região de Cachoeira Paulista (22,7°S; 45°W). Neste seu trabalho, fizeram uso de 98 casos de depressões referentes a 25 noites de observações (quase 4 depressões por noite) escolhidos entre os períodos de 1981 à 1983 e de 1987 à 1989 (6 anos de observações), com aproveitamento menor que 3% dos dias observados. Este menor aproveitamento deve-se ao fato que Cachoeira Paulista apresenta menos noites de observação durante o ano (Buriti et al, 2000). Com relação aos dados utilizados, estes foram obtidos com resoluções de 10 min e 3 min para o primeiro e segundo períodos, respectivamente. Também dados de ionosonda foram utilizados, onde valores de r calculados foram plotados como função do parâmetro ionosférico $h'F$, o qual indica a altura da camada de emissão até ao

pico de concentração eletrônica. Observou-se que r é cerca de 0,25 quando $h'F$ está entre 190 km e 240 km, mas é menor, cerca de 0,15 para $h'F$ acima de 250 km. Quando a parte mais baixa da camada F é alta ($h'F > 250$ km), r torna-se menor, sugerindo que a intensidade OI630,0 nm cresce mais que a intensidade OI557,7 nm. O “quenching” do estado radiativo $O^*(^1D)$ mostrou ser menor quando a camada da emissão é maior (mais alta), conseqüentemente a intensidade da emissão OI630,0 nm cresce (Takahashi et al., 1990; Torr e Torr, 1982). Observou-se, também, que a razão r tem uma tendência a mostrar valores pequenos quando $h'F$ é menor que 190 km. Nos dois casos ($h'F > 240$ km e $h'F < 190$ km), r foi igual a 0,17.

Ionosonda – é um sistema transmissor-receptor que emite ondas eletromagnéticas verticalmente em relação ao solo, em várias frequências. Quando a frequência da onda é igual a frequência do plasma (que varia com a altura) esta é refletida e captada pelo sistema. Então, através do tempo decorrido entre transmissão e recepção da onda à frequência f , obtêm-se as chamadas curvas de $h'F$. Baseado na teoria magneto-iônica pode-se produzir a partir das curvas de $h'F$, curvas de densidade eletrônica em função da altura (Iribarne e Cho, 1980).

Outros resultados obtidos usando medidas simultâneas das emissões OI557,7 nm e OI630,0 nm com fotômetros à bordo de foguetes, foram: 0,20 para a localidade de White Sands (32,4°N; 106,3°W) obtido por Gullledge et al. (1968); 0,15 para a região de Wallops Island (37,8°N; 75,5°W) obtido por Sharp et al. (1975) e Hays e Sharp (1973). Takahashi et al. (1990) realizaram experimentos com fotômetros a bordo de foguete lançado do Centro de

Lançamento da Barreira do Inferno em Natal (5,8°S; 35,2°W) em outubro de 1986. O valor médio obtido foi de 0,17, com valores variando de 0,26 em 200 km e 0,08 em 320 km de altitude . Das observações citadas acima, verificou-se que a altura do pico das emissões nesses experimentos variou entre 230 e 270 km. Esta variabilidade é resultado do movimento vertical da altitude do pico da camada F que, como citado anteriormente, também depende da hora local. Observou-se também a similaridade entre os perfis de emissão; porém, as intensidades OI557,7 nm e OI630,0 nm apresentaram valores diferentes entre eles. Isto acarreta naturalmente valores distintos da razão. Takahashi et al. (1990) atribuíram essa variação em função da altitude como sendo devido à dependência da razão entre a eficiência quântica de 1S e 1D com o “quenching” do N_2 e O_2 . Nesse modelo, esta variação vai de 0,02 em 200 km até 0,08 em 270 km de altitude.

O valor da razão, $r = I_{557,7}/I_{630,0}$, obtido neste trabalho poderia facilmente ser associado com o movimento vertical da ionosfera. Ao longo do dia, a ionosfera equatorial sofre um deslocamento para cima, devido à deriva eletromagnética ExB . À noite, a direção do campo elétrico é invertida, provocando o deslocamento do plasma para baixo, que por sua vez, eleva os níveis de intensidades das emissões OI557,7 nm e OI630,0 nm. Desse modo, estas intensidades aumentam, ou diminuem, quando o plasma ionosférico move-se para baixo, ou para cima, respectivamente. Portanto, as intensidades das luminescências são mais ou menos intensas, quando a densidade do plasma aumenta, ou diminui.

Um aumento na densidade do plasma provoca um aumento do “quenching” do $O(^1D)$, principalmente por N_2 (Torr e Torr, 1982), diminuindo assim, a emissão $OI630,0$ nm. Este efeito é desprezível para a emissão $OI557,7$ nm, pois o tempo de vida do estado 1S responsável por esta emissão é de 0,9s, muito menor do que a do estado 1D , responsável pela emissão $OI630,0$ nm que é de aproximadamente 134s (Baluja e Zeippen, 1988).

Portanto, em termos proporcionais, a emissão $OI557,7$ nm tem um nível de engrandecimento maior do que a emissão $OI630,0$ nm, o que leva a obter um valor médio da componente da emissão $OI557,7$ nm da região F equatorial maior que os valores anteriormente encontrados para outras regiões.

Silverman (1970) sugeriu que a componente da intensidade de emissão $OI557,7$ nm da região F é cerca de 20% da emissão $OI630,0$ nm. Smith e Steiger (1968) têm acentuado que, durante períodos em que a emissão $OI630,0$ nm é engrandecida, a componente da emissão $OI557,7$ nm da região F seria muito grande. Isto poderia possivelmente estar associado com o desenvolvimento de fortes bolhas de plasma na região F equatorial. O surgimento de bolhas de plasmas é precedida por uma elevação do pico da deriva vertical em curto espaço de tempo e, quando de sua inversão provoca o deslocamento rápido da camada F e, conseqüentemente, aumentando os níveis das emissões com tempo. O que assegura, ainda mais, que o valor de r obtido, aparentemente alto, seria o esperado.

O valor da razão obtida neste trabalho foi 5% maior que a razão obtida por Fagundes et al. (1995). Provavelmente, deve-se à região equatorial

apresentar produção eletrônica maior, o que provoca um engrandecimento maior dos níveis de intensidades das emissões. Quanto ao valor obtido por Takahashi et al. (1990), de 0,17, tratar-se de um valor único, para uma condição ionosférica única, não representando característica da região F equatorial.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Foram analisadas três anos e meio de dados do fotômetro MULTI 3 instalado em São João do Cariri, nos períodos de janeiro de 1998 à junho de 2001, com o objetivo de detectar depressões nas intensidades das emissões OI557,7 nm e OI630,0 nm provocadas pela passagem de bolhas de plasma sobre o campo de visão do fotômetro. Desta análise, foram obtidas cinquenta e dois dias de observações, com noventa e seis depressões simultâneas nas intensidades de emissão do OI557,7 nm e OI630,0 nm, conforme critérios de seleção da técnica utilizada para calcular a razão entre as intensidades 557,7 e 630,0 discutida no capítulo 4.

Os valores calculados da razão r entre as diferenças de intensidade OI557,7 nm e OI630,0 nm nas depressões ($\Delta I_{557,7(F)}/\Delta I_{630,0(F)}$), mostraram valores variando entre 0,14 e 0,53, com valor médio de $0,31 \pm 0,08$. Indicando

assim, que a componente da emissão OI557,7 nm na região F equatorial poderia ser 31% da emissão OI630,0 nm.

O comportamento sazonal das razões obtidas mostraram uma maior concentração, cerca de 82%, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que forneceram razões médias de 0,32; 0,29 e 0,30; respectivamente. Portanto, praticamente não havendo variação, ou seja, a variação foi menor que o erro do valor médio total.

Foi observado, também, que as razões obtidas mostraram valores maiores no final de 1999 e início de 2000, tal comportamento poderia estar relacionado com o ciclo solar que teve seu máximo no início de 2000.

O valor da razão obtido neste trabalho, aparentemente alto, comparado com valores obtidos para outras regiões, pode representar uma característica da região F equatorial. Este valor, provavelmente pode estar associado com o movimento vertical da ionosfera equatorial, que eleva os níveis de intensidades e o “quenching” do estado radiativo 1D responsável pela emissão OI630,0 nm e conseqüentemente, aumenta o valor da r (OI557,7/OI630,0).

Com uma visão geral dos resultados aqui obtidos, podemos concluir que este trabalho é mais uma contribuição para o conhecimento das emissões da luminescência atmosférica das regiões F e mesosférica.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se:

- Outras técnicas de observação,
- Utilizar uma maior quantidade de dados,
- Utilizar dados de digisonda com a finalidade de estudar a dependência da razão com a altitude e
- Estudar se existe uma relação mais precisa entre a razão e o ciclo solar.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU et al. **The dissociative recombination de O_2^+ : the quantum yield of $O(^1S)$ and $O(^1D)$** . Journal of Geophysical Research, 88, 4140, 1983.

BALUJA, K.L.; ZEIPPEN, C.J. **M1 and M2 transition probabilities for states within the $2p^4$ configuration of the OI isoelectronic**. Journal of Physical, B 21, 1455, 1988.

BATES, D. R. **The green light of the night sky**. Planetary and Space Science, 29, 1061, 1981.

BARTH, C. A . **Three-Bory Reaction**. Annales Geophysicae, 20, 182, 1964.

BURITI, R.A.; TAKAHASHI, H.; GOBBI, D. **First results from mesosphere airglow observations at 7,5° S**. RBGF – Submetido. São João do Cariri – Pb, 2000.

CHAMBERLAIN, J. W. **Physics of the Aurora and Airglow**. Academic, New York, 1961.

CHAMBERLAIN, J. W.; HUNTEN, D. M. **Teory of Planetary Atmosferes**. New York, Academic. London, 1987.

CHAPMAN, S. **Some Phenomena of the upper Atmosphere.** Proc. R. Lond. A131, 353, 1931.

CHIPLONKAR, M. W.; TILLU, A. D. **The F-Layer Component of the 5577Å Emission of the Nightglow at Poona.** Annales Geophysicae, 26, 213-222, 1970.

DUFAY, J. **Reünions de L'Institut do Dóptique.** Paris, v. 13, 6, 1933.

EATTHEER, R. H., REASONER, D. L. **Spectrophotometry of Faint Light Sources with a Tilting-Filter Photometer.** Applied Optics, 8(2): 227-242, 1969.

FAGUNDES P. R.; SAHAI, Y.; TAKAHASHI, H. **Investigation of OI557, nm and OI630, nm nightglow intensity ratios during occurrence of equatorial of F-region plasma bubbles.** Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 57, 929-932, 1995.

FEJER et al. **Dependence of equatorial F-region vertical drift on season and solar cycle.** Journal of Geophysical Research, V. 84, 5792-5796, 1979.

GOBBI et al. **Equatorial atomic Oxygen Profiles Derived from Rocket Observations of OI557,7 nm Airglow Emission.** Planetary and Space Science, 40(6), 775-781, 1992.

GREER et al. **The Excitation of the ($b^1\Sigma_g^+$) in the Night.** Planetary and Space Science, 29, 383, 1981.

GULLEDGE et al. **Intensity profiles of the 6300Å and 5577Å OI lines in the night airglow.** Journal of Geophysical Research, 87, 5535, 1968.

HAERENDEL, G. **theory of equatorial spread-F, repot.** Max Planck Institute fur Extraterrestre Physics, 1973.

HAPGOOD, M.A.; TAYLOR, M.J. **Analysis of Airglow Image Data.** Annalles Geophysicae, 138, 803-813, 1982.

HARGREAVES, J.K. **The solar – terrestrial environment.** p. 235, 1992.1992.

HAYS, P.B.; SHARP, W.E. **Twilight airglow Photoelectrons and [OI] 5577-Angstrom radiation.** Journal of Geophysical Research, 78, 1153, 1973.

HERSBERG J. **Molecular spectra and molecular struture** .London, D. van Nostrand, 1950.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric Physics.** 1^aed. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Companing, 1980.

JOHNSTON, J.E.; BROADFOOT, A .L. **Midlatitude observations of the nighth airglow: Implications to quenching near the mesopause.** Journal of Geophysical Research, 98, 21,593, 1993.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à Geofísica Espacial.** 1^aed. São Paulo: Nova Estela. Editora Universitária de São Paulo: FAPESP, 1991.

KULKARNI, P.V.; SANDERS, C.L. Use of Radioactivated Light source for the Absolute Calibration of two-colour Night Airglow Photometer. *Planetary and Space Science*, 12: 189-194, 1964.

MCDADE et al. – ETON 2: Quenching Parameters for the proposed precursors of $O_2(b^1\Sigma^+_g)$ and $O(^1S)$ in the terrestrial nightglow. *Planetary and Space Science*, 34, 9, 789-800, 1986.

MELO et al. *Fotômetro Multi2 Experiência de calibração*. INPE - S.J. dos Campos – SP, 1993.

MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J. F. Airglow Characteristics of equatorial plasma depleções. *Journal of Geophysical Research*, 87(A9), 7641-7652, 1982.

MEINEL, A .B. OH emission bands in the spectrum of the night sky I. *Astrophysical Journal*, 11, 555, 1950.

PERTERSON, V. L.; VAN ZANDT, T. E. $O(^1D)$ Quenching in ionospheric F-region. *Planetary and Space Science*, 17, 1725, 1969.

PERTERSON, A.W.; KIEFFABER, L.M. Infrared Photography of OH airglow Structures *Nature*, 242 (5396): 321-322, 1973.

PIMENTA, Alexandre Alvares. Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical do Brasil, 2002. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RAYLEIGH, IV LORD. **Absolute intensity of the aurora line in the night sky and the number of atomic transitions.** Proc. Roy. Soc. London, A129 376-381, 1930.

REID, G.C.; **The formation of small-scale irregularities in the ionosphere.** Journal of Geophysical Research, v. 73, 1627-1640, 1968.

SAHAI et al. **Plasma irregularities in the tropical F-região detected by OI7774Å and 6300Å nightglow measurements.** Journal of Geophysical Research, 86(A5), 3496-3500, 1981.

SHARP, W.E.; RUSCH, D.W.; HAYS, P.B. **Dissociative recombination source for OI (¹D) atoms.** Journal of Geophysical Research, 80, 2876, 1975.

SILVERMAN, S.M. **Night airglow phenomenology.** Space and Science Ver, 11, 341, 1970.

SMITH, L.L.; STEIGER, W.R. **Night Airglow Intensity Variations in the [OI] 5577Å, [OI] 6300Å and N₂I 5890-96 Å Emission lines.** Journal of Geophysical Research, 73, 2531, 1968.

SOBRAL et al. **O(¹S) and (D¹) Quantum Yields from Rocket Measurements of Electron Densities and 557,7 and 630,0 nm Emissions in the Nocturnal F-Region.** Planetary and Space Science, 40 (5), 607-619, 1992.

TAKAHASHI et al. **Atmospheric wave propagations in the mesopause region observed by the OH (8,3) band, N₂D, O₂A (8645Å) band and OI5577Å nightglow emissions.** Planetary and Space Science, 33, 381, 1985.

TAKAHASHI et al. **Equatorial F-Region OI6300 Å and OI5577 Å Emission Profiles Observed by Rocket Borne Airglow Photometers.** Planetary and Space Science, 38 (4), 547-554, 1990.

TAYLOR et al. **High-Resolution OI (630 nm) Image Measurements of Region Depletion Drifts During the Guar Campaign.** Geophysical Research Letters, 24(13), 1699-1702, 1997.

TORR, M. R.; TORR, D.G. **The role of metastable species in the thermosphere.** Review of Geophysics and Space Physics, 20, 91, 1982.

YANO, K.; KIYAMA, Y. **Nightglow Photometer Calibration – I – A low Brightness standard – NAGO 2,** 1975.

WEBER et al.. **North-south aligned de equatorial airglow depletions.** Journal of Geophysical Research, 83, 712, 1978.