



Monografia

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA  
AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA NA ALTA ATMOSFERA  
TERRESTRE**

Trabalho de Graduação em Física

**Cristiano Sarzi Machado**

**Santa Maria, dezembro de 2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA  
AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA NA ALTA ATMOSFERA  
TERRESTRE**

Monografia desenvolvida por **Cristiano Sarzi Machado** no Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT, sob orientação do **Dr. Nelson Jorge Schuch**, Pesquisador Titular Sênior III do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT.

Apresentada à Disciplina de Trabalho de Graduação em Física II – FSC 1048, do Curso de Física Bacharelado da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Física**.

**Cristiano Sarzi Machado**

(Curso de Física Bacharelado – UFSM)

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

(Orientador – INPE)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO**

A comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**ESTUDO DA VARIABILIDADE DA  
AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA NA ALTA ATMOSFERA  
TERRESTRE**

elaborada por

**Cristiano Sarzi Machado**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Física**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**  
**(Presidente/Orientador – CRS/INPE-MCT)**

**Dr. Gervásio Annes Degrazia**  
**(DF/CCNE-UFSM)**

**Dr. Natanael Rodrigues Gomes**  
**(DELC/CT-UFSM)**

**Dr. Osvaldo Moraes**  
**(DF/CCNE-UFSM – Suplente)**

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	6
RESUMO .....	7
OBJETIVOS .....	8
I) GERAL .....	8
II) ESPECÍFICOS .....	8
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1 - A ATMOSFERA TERRESTRE.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2 - O CAMPO GEOMAGNÉTICO .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 3 - A ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL .....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 4 - LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 5. IRREGULARIDADES NA REGIÃO F IONOSFÉRICA.....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 6. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
6.1. AS TÉCNICAS OBSERVACIONAIS .....	29
6.1.2. O DISPOSITIVO CCD (CHARGE COUPLED DEVICE) .....	29
6.1.3. FOTÔMETROS .....	30
6.1.4. CÂMERAS IMAGEADORAS .....	30
6.2. O OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL E O FOTÔMETRO FOTSUL.....	32
6.3. METODOLOGIA .....	33
6.3.1. ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO .....	34
6.3.2. TRATAMENTO DOS DADOS.....	35
<b>CAPÍTULO 7. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>36</b>
7.1. PARA OS DADOS DO OES.....	36
7.2. PARA OS DEMAIS SÍTIOS (COMPARAÇÃO).....	40
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>45</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – A ESTRUTURA DA ATMOSFERA TERRESTRE.....	9
FONTE: ADAPTADA DE BRASSEUR E SOLOMON (1986, p. 33).....	9
FIGURA 1.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MAGNETOSFERA.....	12
FONTE: <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Magnetosphere_rendition.jpg">HTTP://PT.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/FICHEIRO:MAGNETOSPHERE_RENDITION.JPG</a> .....	12
FIGURA 1.3 – CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN.....	13
FONTE: <a href="http://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/vanallen.htm">HTTP://BR.GEOCITIES.COM/SALADEFISICA5/LEITURAS/VANALLEN.HTM</a> .....	13
FIGURA 1.3 – PERFIL VERTICAL DA IONOSFERA.....	14
FONTE: ROBERT & ANDREW (2000, p. 30).....	14
FIGURA 1.4 – PERFIL TÍPICO DA DENSIDADE ELETRÔNICA DA IONOSFERA, MOSTRANDO AS REGIÕES DE CONCENTRAÇÃO DOS PRINCIPAIS ÍONS QUE FORMAM A IONOSFERA E A ESTRUTURA DAS CAMADAS.....	15
FONTE: ROBERT & ANDREW (2000, p. 334).....	15
FIGURA 2.1 – DIPOLO MAGNÉTICO TERRESTRE.....	16
FONTE: <a href="http://www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra">WWW.INGV.IT/TEMI-RICERCA/LA-TERRA</a> .....	16
FIGURA 3.1 - CARTA MAGNÉTICA DE INCLINAÇÃO, DECLINAÇÃO E INTENSIDADE TOTAL DO CAMPO GEOMAGNÉTICO PARA O ANO DE 2005. FONTE: <a href="http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/t-m.pdf">HTTP://SWDCDB.KUGI.KYOTO-U.AC.JP/IGRF/MAP/T-M.PDF</a> .....	18
FIGURA 3.2 – POSICIONAMENTO DA AMAS NO ANO DE 2001.....	19
FONTE: <a href="http://science.nasa.gov/sama/picture01">HTTP://SCIENCE.NASA.GOV/SAMA/PICTURE01</a> .....	19
FIGURA 4.1 – AS CAMADAS DE EMISSÃO DE AEROLUMINESCÊNCIA ESTÃO REPRESENTADAS ESQUEMATICAMENTE, JUNTAMENTE COM O PERFIL DE TEMPERATURA DA ATMOSFERA DA TERRA.....	20
FONTE: MAEKAWA (2000, p.4).....	20
FIGURA 4.2 - ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.....	21
FONTE: <a href="http://www.dhnet.org.br/.../images/espectro.gif">WWW.DHNET.ORG.BR/.../IMAGES/ESPECTRO.GIF</a> .....	21
FIGURA 4.3 – ESPECTRO DA AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA DE ALGUMAS EMISSÕES IMPORTANTES.....	22
FONTE: ADAPTADA DE JOHNSTON (1993, p. 215).....	22
FIGURA 4.4 - DIAGRAMA DE NÍVEL DE ENERGIA PARA O OXIGÊNIO ATÔMICO.....	23
FONTE: KRASSOVSKY (1962, p. 912).....	23
FIGURA 4.5 – LOCALIZAÇÃO DA CAMADA DE HIDROXILA NA ATMOSFERA TERRESTRE.....	26
FONTE: <a href="http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/atmos/atmos_lecture_br.html">HTTP://WWW.METEOR.IASTATE.EDU/GCCOURSE/ATMOS/ATMOS_LECTURE_BR.HTML</a> .....	26
FIGURA 4.6 – DESLOCAMENTO DE UMA BOLHA DE PLASMA AO LONGO DO EQUADOR MAGNÉTICO.....	27
FONTE: <a href="http://www.ondascurtas.com/images/bolhaionosferica.jpg">HTTP://WWW.ONDASCURTAS.COM/IMAGES/BOLHAIONOSFERICA.JPG</a> .....	27
FIGURA 6.1 - CÂMERAS IMAGEADORAS CCD INSTALADAS NA PLATAFORMA DO PRÉDIO #5 DO.....	31
OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL, EM SÃO MARTINHO DA SERRA, RS.....	31
FIGURA 6.2 – EXEMPLO DE IMAGENS CAPTADAS POR CÂMERAS IMAGEADORES NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL: POR UMA CÂMERA COM LENTE <i>FISHEYE</i> (DIREITA) E UMA IMAGEM CAPTADA POR UMA CÂMERA COM LENTE <i>WIDE-ANGLE</i> ( ESQUERDA).....	31
FIGURA 6.3 – VISTA PANORÂMICA DOS PRÉDIOS 1, 2, 3, 5, 6 DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/INPE – MCT, EM SÃO MARTINHO DA SERRA, RS, BRASIL.....	32
FIGURA 6.4 – DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO DO SISTEMA DO FOTÔMETRO FOTSUL, INSTALADO NO OES. ..	33
FIGURA 6.5 – PARTE DO SISTEMA INTEGRANTE DO FOTÔMETRO FOTSUL, INSTALADO NO INTERIOR DO LABORATÓRIO DE ÓPTICA E LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA DO OES.....	33
FIGURA 6.6 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO.....	34
FONTE: ADAPTADA DE <a href="http://images.google.com.br/imgres?imgur">HTTP://IMAGES.GOOGLE.COM.BR/IMGRES?IMGUR</a> .....	34
FIGURA 7.1 – PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 557,7 NM PARA OS MESES DE JANEIRO À JUNHO.....	36
FIGURA 7.2 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 557,7 NM PARA OS MESES DE JULHO À DEZEMBRO. .....	37
FIGURA 7.3 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 630 NM PARA OS MESES DE JANEIRO À JUNHO....	38
FIGURA 7.4 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 630 NM PARA OS MESES DE JULHO À DEZEMBRO.39	39
FIGURA 7.5 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 557,7 NM PARA O OES (29°S, 53°O) E PARA O CENTRO ESPACIAL DE CACHOEIRA PAULISTA (22.7°S, 45°O).....	40
FIGURA 7.6 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 630 NM PARA O OES (29°S, 53°O) E PARA O CENTRO ESPACIAL DE CACHOEIRA PAULISTA (22.7°S, 45°O).....	41
FIGURA 7.7 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 630 NM PARA O OES (29° S, 53°O), CENTRO ESPACIAL DE CACHOEIRA PAULISTA (22.7°S, 45°O)E OBSERVATÓRIO DE LUMINESCÊNCIA.....	42
DA PARAÍBA (7,4 °S, 36,6°O) PARA OS MESES DE JANEIRO À AGOSTO.....	42
FIGURA 7.8 - PERFIS DAS INTENSIDADES MÉDIAS MENSIS DO OI 630 NM PARA O OES (29° S, 53°O), CENTRO ESPACIAL DE CACHOEIRA PAULISTA (22.7°S, 45°O)E OBSERVATÓRIO DE LUMINESCÊNCIA.....	43
DA PARAÍBA (7,4 °S, 36,6°O) PARA OS MESES DE SETEMBRO À DEZEMBRO.....	43

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família: meu pai Moacir Issler Machado, minha mãe Inês Marice Sarzi Machado, minha irmã Letícia Sarzi Machado e especialmente meu avô, José Sarzi. Graças aos incentivos que sempre tive e continuo tendo pude direcionar minha atenção para os estudos desde cedo, quando descobri o prazer que é estudar. Agradeço profundamente pelo apoio e carinho.

Ao orientador amigo e Mentor, Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, RS, pela sua especial dedicação e orientação desde março de 2007, quando iniciei meus projetos de pesquisa no CRS/INPE-MCT, propiciando-me grande crescimento pessoal e profissional. Agradeço por ter acreditado em minha pessoa desde os primeiros instantes, pela sua dedicação tanto pessoal como profissional, pela amizade sincera e pelas inúmeras oportunidades profissionais que tive acesso graças às suas sugestões, indicações e orientação pessoal. Agradeço pelos seus ensinamentos, em especial o relacionado com as técnicas de Inteligência Emocional e de Mentoreamento, que me têm sido fundamentais para vida pessoal e carreira profissional. No mesmo sentido, agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Barcellos da Rosa, Professor da UNIPAMPA e Ex-Pesquisador PCI do CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, pela sua co-orientação nas minhas atividades de Iniciação Científica, em especial pela atenção dispensada e amizade valiosa.

Aos Drs. Delano Gobbi e Hisao Takahashi, da divisão de Aeronomia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT, pela dedicação e co-orientação no decorrer da realização deste trabalho e de projetos de pesquisa do Programa PIBIC/INPE-CNPq/MCT anteriores.

Ao Dr. Ademílson Zanandrea pelo auxílio na análise dos dados que compõem este trabalho.

A todos os colegas e ex-colegas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, com quem tive e tenho o prazer de conviver e trabalhar. Em especial àqueles com quem pude aprofundar a amizade. Essas relações têm sido muito importantes para o meu desenvolvimento.

De maneira geral, a todos que de alguma forma colaboraram com a execução deste trabalho.

## RESUMO

A presente monografia tem como tema principal o estudo das emissões de aeroluminescência na alta atmosfera terrestre, entre 70 e 300 km de altitude.

Sua execução abrange a compreensão física dos processos que envolvem a fenomenologia da aeroluminescência e suas aplicações em estudos de Aeronomia, além de noções básicas sobre instrumentação na área.

Um estudo acerca da variabilidade mensal da aeroluminescência das emissões do OI 557,7 nm e OI 630 nm, monitoradas desde 2001 no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, foi realizado.

Estudo comparativo foi executado considerando as emissões ópticas observadas em observatórios instalados em três municípios Brasileiros, isto é, em três estações/sítios diferentes de observações: Cachoeira Paulista, SP (22,7°S, 45°O), São Martinho da Serra, RS (29°S, 53°O) e São João do Cariri, PB (7,4 °S, 36,6° O).

## **OBJETIVOS**

### **I) Geral**

a) Estudar comparativamente a Aeroluminescência noturna em três observatórios, estações de monitoramento em diferentes latitudes, utilizando dados observacionais referentes ao período de 2001 a 2006.

### **II) Específicos**

a) Traçar perfis mensais das emissões de oxigênio atômico nos comprimentos de onda 557,7 *nm* e 630,0 *nm* para as três estações de monitoramento para o período entre 2001 e 2006.

b) Analisar os perfis sazonais das emissões estudadas, para os dados observacionais obtidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT , via monitoramento, em São Martinho da Serra, RS.

## INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é a região de transição entre a Terra e o Espaço, sendo essencial para o desenvolvimento e manutenção da vida no Planeta. Neste sentido, estudos sobre as características e fenômenos atmosféricos são de grande interesse do Homem.

Esta Monografia, desenvolvida no âmbito da disciplina de Trabalho de Graduação em Física II – FSC 1048 apresenta e descreve tópicos e assuntos relacionados à Aeronomia. A Aeronomia é o estudo da Física e Química da média e alta atmosfera neutra e ionizada.

Nos capítulos iniciais é elaborada uma revisão teórica sobre aspectos que envolvem o estudo da atmosfera planetária, expondo os mais importantes conceitos envolvidos na execução deste trabalho, como a fenomenologia da Luminescência Atmosférica e sua utilização em estudos da atmosfera terrestre.

A instrumentação e metodologia intrínsecas a este trabalho são discutidas e apresentadas, com ênfase na instrumentação fotométrica para o estudo da Luminescência Atmosférica.

Por fim, os resultados obtidos são apresentados e analisados. O cumprimento dos objetivos firmados para a execução do trabalho foi totalmente alcançado, resultando do estudo proposto a obtenção de significativas conclusões relacionadas à fenomenologia da Luminescência Atmosférica nos três sítios de observação.

## CAPÍTULO 1 - A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera da Terra é constituída de uma mistura de gases que envolve o Planeta, permanecendo ligada a este pela ação da força da gravidade. É composta principalmente de nitrogênio (78,08%), oxigênio (20,94%), argônio (0,93%), dióxido de carbono (0,03%) e vapor de água (1%). Sua formação deve-se provavelmente ao processo de remoção de gás do interior do próprio Planeta. Gases como o dióxido de carbono, dióxido de enxofre, vapor de água e nitrogênio foram liberados do interior do Planeta Terra principalmente por meio de emissões vulcânicas. Essa complexa estrutura pode ser classificada de acordo com vários fatores, como perfil de temperatura, processos físicos dominantes e composição iônica. A Figura 1.1 mostra o perfil desta estrutura, que é dividida em camadas.

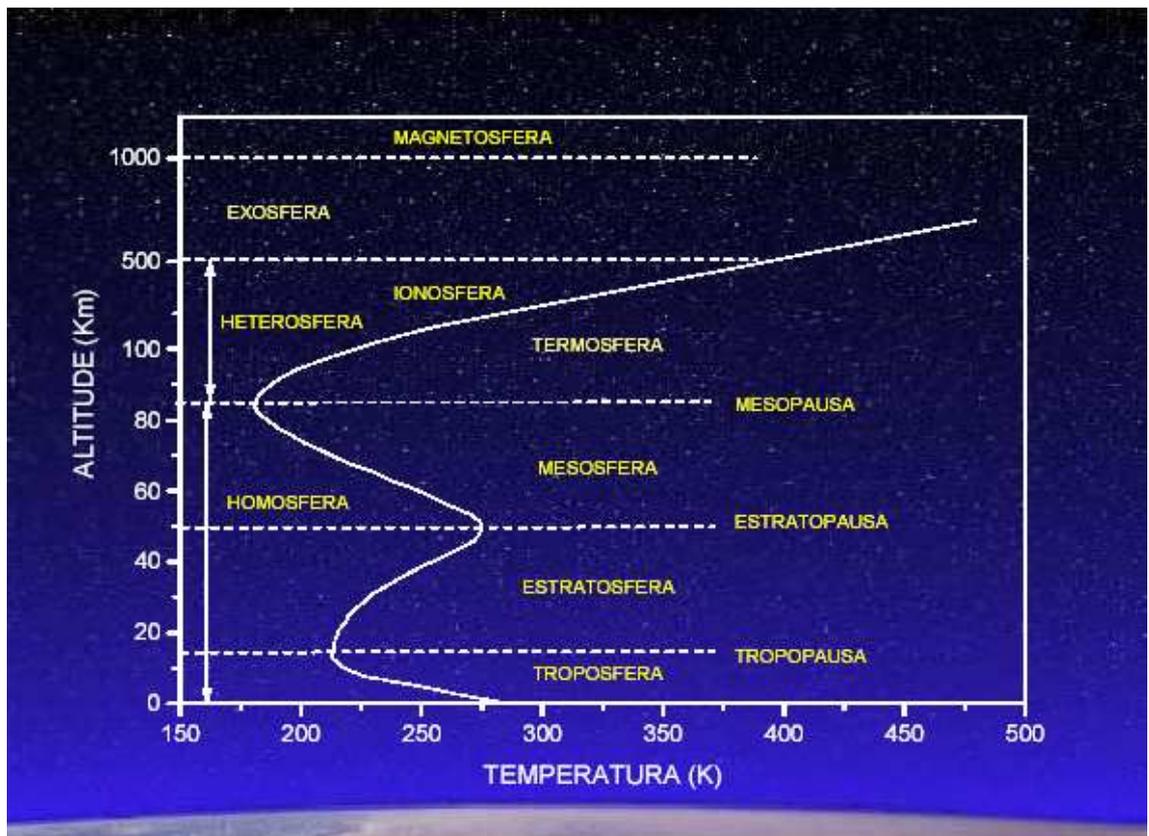


Figura 1.1 – A estrutura da Atmosfera Terrestre.  
Fonte: Adaptada de Brasseur e Solomon (1986, p. 33)

## **1.1.2. A Atmosfera, conforme seu perfil de temperatura**

A atmosfera terrestre pode ser classificada conforme seu perfil de temperatura, sendo dividida em camadas. A camada mais próxima da superfície da Terra é a Troposfera. Em seguida vem a Estratosfera, depois Mesosfera e então a Termosfera. Os limites das camadas são chamados *pausas* e estão localizados nos pontos de inflexão de temperatura, em que o gradiente térmico é nulo.

### **1.1.2.1. Troposfera**

Troposfera é a região que se estende da superfície até aproximadamente 15 Km, dependendo da latitude. A temperatura diminui  $7 \text{ K.Km}^{-1}$ , até um valor mínimo de 220 K para essa camada. A convecção e a radiação são os principais processos de transferência de energia, dissipando calor. A temperatura é influenciada pela absorção direta da radiação solar no infravermelho e no visível.

### **1.1.2.2. Tropopausa**

Tropopausa é o limite superior da Troposfera, dividindo-a da Estratosfera. Nessa região ocorre o mínimo de temperatura da Troposfera. No Equador, sua altitude é de 15 km em média, com uma temperatura de 195 K, aproximadamente. Nos pólos, sua altitude é de 8 a 10 km, com uma temperatura de 220 K.

### **1.1.2.3. Estratosfera**

A Estratosfera situa-se entre 15 e 50 km de altitude, logo acima da Troposfera. A temperatura aumenta com a altitude até um máximo de 270 K. Esse valor máximo de temperatura é alcançado pela absorção e reemissão da radiação solar ultravioleta pelo ozônio atmosférico e pelo vapor d'água. Na Estratosfera, o processo de radiação é o principal agente dissipador de calor.

### **1.1.2.4. Estratopausa**

Estratopausa é o nome dado à camada intermediária entre a Estratosfera e a Mesosfera. Situa-se em torno de 50 km de altitude, apresentando uma temperatura em torno de 270 K.

#### **1.1.2.5. Mesosfera**

A Mesosfera está localizada acima da Estratosfera, iniciando em torno de 50 km e se estende até aproximadamente 90 km de altitude. A temperatura diminui com a altitude até atingir 190 K, a menor temperatura da atmosfera.

#### **1.1.2.6. Mesopausa**

A Mesopausa é a região da atmosfera que determina o limite entre a Mesosfera e a Termosfera, situando-se em torno de 85 km de altitude, com uma temperatura em torno de 190 K.

#### **1.1.2.7. Termosfera**

Termosfera é a camada atmosférica localizada aproximadamente entre 90 e 300 km. A temperatura aumenta com a altitude, atingindo até 3000 K. Nessa região, o principal mecanismo para dissipação de energia é a condução.

### **1.1.3. A Atmosfera, conforme seus processos físicos**

Conforme seus processos físicos, a atmosfera pode ser classificada em Homosfera, Heterosfera e Exosfera.

#### **1.1.3.1. Homosfera**

A Homosfera estende-se da superfície até 100 km de altitude. Nessa região a composição dos gases é uniforme.

#### **1.1.3.2. Heterosfera**

A Heterosfera situa-se entre 100 e 500 km. Não existe uma mistura homogênea de gases, ocorrendo uma composição por estratos devido à tendência das moléculas gasosas se distribuírem de acordo com o seu peso e carga elétrica.

#### **1.1.3.3. Exosfera**

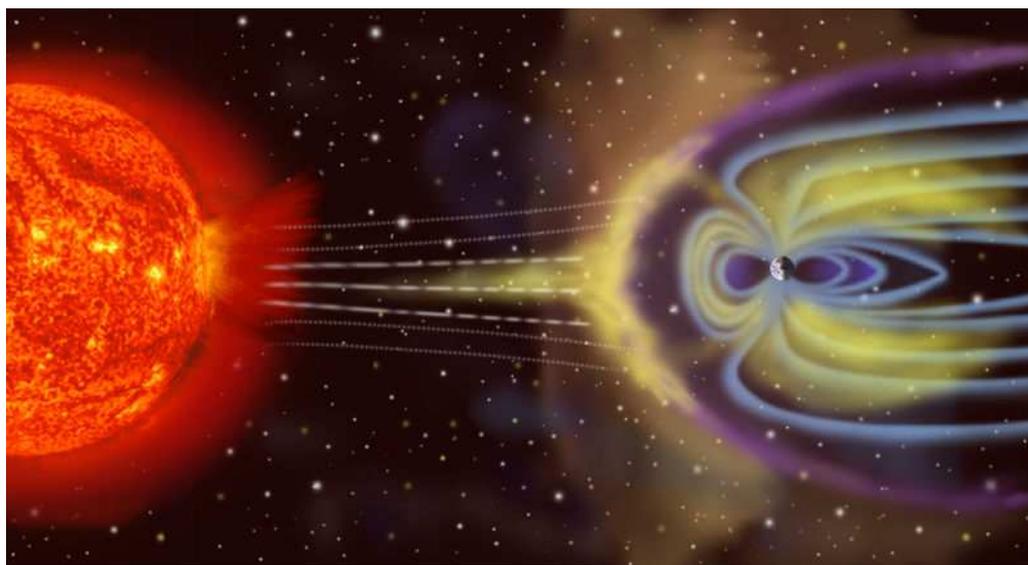
A Exosfera localiza-se acima de 500 km de altitude. Nessa região o ar é muito rarefeito e colisões entre moléculas ocorrem sem muita frequência. As partículas constituintes da atmosfera que são mais leves, como o H e He, são constantemente perdidas para o meio interplanetário.

### 1.1.4. A Atmosfera, conforme sua composição iônica

A estrutura da atmosfera segundo sua composição iônica é caracterizada pela Ionosfera e Magnetosfera.

#### 1.1.4.1. Magnetosfera

Situa-se acima da Ionosfera. A Magnetosfera, conforme representação esquemática vista na figura 1.2 é uma região envoltória ao Planeta Terra, constituindo a parte exterior da atmosfera, onde o campo magnético terrestre controla os processos eletrodinâmicos da atmosfera ionizada. Essa região surge da incidência da radiação sobre a atmosfera permeada pelo campo magnético terrestre, agindo como um escudo e obstáculo ao vento solar e raios cósmicos, compostos por partículas energeticamente carregadas.

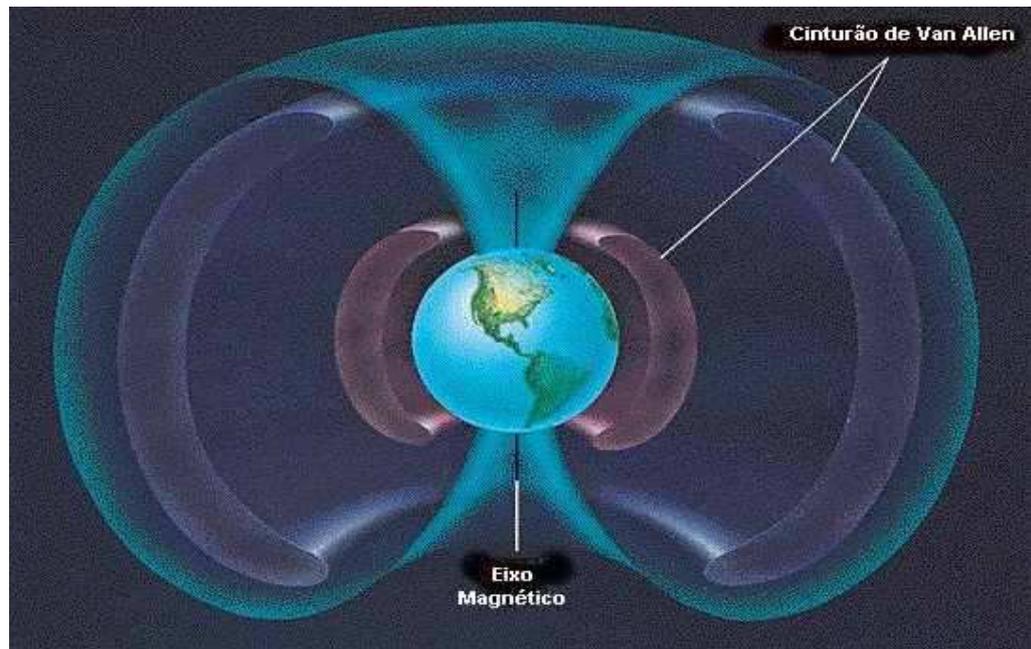


**Figura 1.2 – Representação esquemática da Magnetosfera.**  
Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Magnetosphere\\_rendition.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Magnetosphere_rendition.jpg)

Em 1958 descobriram-se imensas regiões de radiação dentro da Magnetosfera. Essas regiões, agora conhecidas como cinturões de radiação Van Allen (figura 1.3), contêm prótons e elétrons energéticos presos pelo campo magnético da Terra (Coutinho, 1974). O cinturão de Van Allen é composto de duas faixas, das quais a interior se situa entre 2200 e 5000 km, e a exterior entre 13000 e 55000 km da superfície da Terra.

Não existe entre os dois cinturões uma delimitação; eles fundem-se em altitudes variáveis. Durante os períodos de intensa atividade solar, grande parte das partículas eletricamente carregadas vindas do Sol consegue romper a barreira formada pelos cinturões de radiação de Van Allen, que ao atingir a alta atmosfera produzem os fenômenos das auroras polares e das tempestades magnéticas.

Na Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS, a região de radiação do cinturão de Van Allen mais interno se aproxima em maior intensidade da superfície terrestre. A consequência é que a intensidade da radiação que penetra nessa região intensifica-se. O cinturão, ao se aproximar da superfície da Terra, reduz a espessura da camada de proteção ,blindagem, do Planeta. O reduzido isolamento proporcionado pelo cinturão na região da AMAS, facilita a penetração de partículas carregadas.

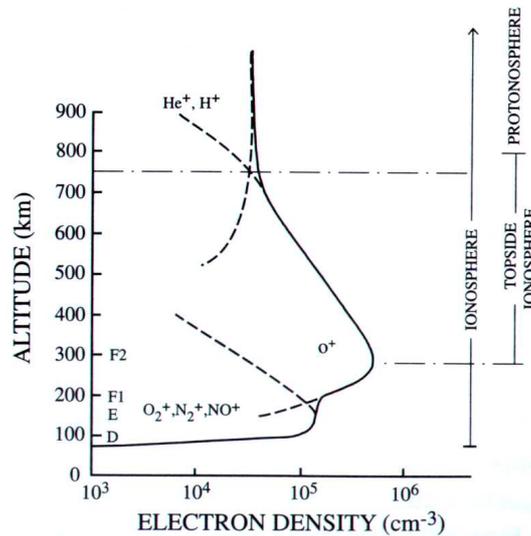


**Figura 1.3 – Cinturão de radiação de Van Allen.**  
Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/vanallen.htm>

#### 1.1.4.2. Ionosfera

A Ionosfera é a região da atmosfera terrestre constituída por interações entre os átomos e moléculas neutras da atmosfera com fontes ionizantes solares e cósmicas, gerando um plasma com alta densidade de cargas livres, o plasma ionosférico (Robert & Andrew, 2000). Portanto, é nessa camada que ocorre a ionização, mesmo que parcial, dos constituintes

atmosféricos. A densidade de íons e elétrons é suficiente para afetar a propagação de ondas eletromagnéticas. A Figura 1.3 apresenta a ilustração de um perfil típico da densidade eletrônica da Ionosfera.



**Figura 1.3 – Perfil vertical da Ionosfera.**  
**Fonte: Robert & Andrew (2000, p. 30).**

Os limites dessa camada ionizada vão desde 60 km (dia) e 90 km (noite) até aproximadamente 1000 km de altitude.

As fontes solares ionizantes da Ionosfera são principalmente as radiações no EUV (Extremo Ultra-Violeta), e os raios X.

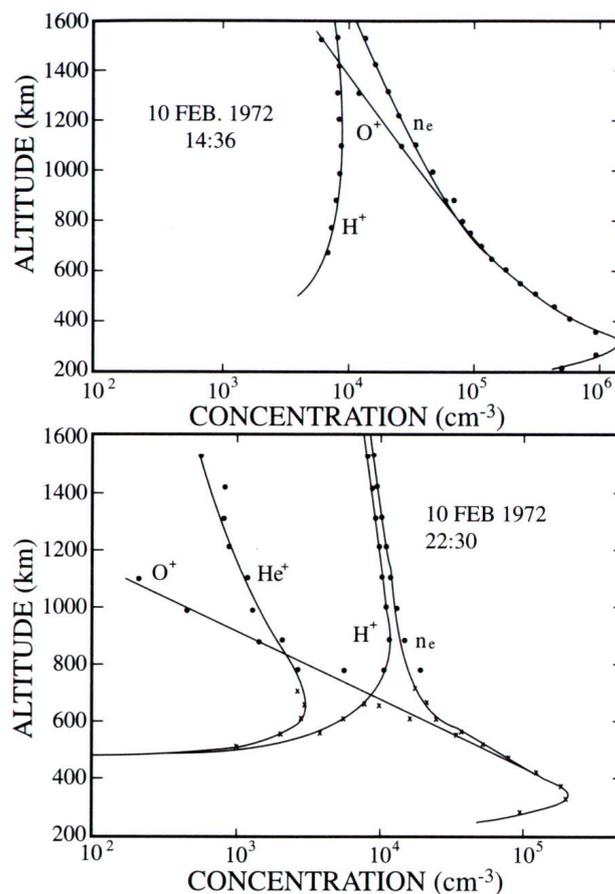
Em conseqüência das diferentes densidades eletrônicas, diferentes constituintes e taxas de absorção, a Ionosfera subdivide-se em três regiões, D, E e F.

A região **Região D** é denominada baixa Ionosfera, localizando-se do limite inferior da Ionosfera até cerca de 90 km acima da superfície. Possui uma densidade eletrônica baixa, a menor de todas as regiões ionosféricas. Como a ionização dessa região é altamente dependente da energia solar, durante a noite, a Região D praticamente desaparece devido à rápida recombinação de seus íons. As radiações ionizantes predominantes são os raios X e a radiação Lyman- $\alpha$ .

A região situada aproximadamente entre 90 e 150 km de altitude é a **Região E**. Ela possui a maior condutividade elétrica ionosférica. Subdivide-se em camada E2, relativamente mais densa, e camada Es (esporádica) instável. As principais fontes de ionização são os raios X, a radiação Lyman- $\beta$  e as radiações EVU.

A **Região F** está localizada logo acima da Região E. Inicia em torno dos 150 km, estendendo-se até o limite superior da Ionosfera, numa altitude de aproximadamente 1000 km. Subdivide-se em camadas F1, F2. Atualmente estuda-se a existência de uma terceira camada, a F3.

A camada F1 localiza-se aproximadamente entre 150 e 250 km de altitude. Sua principal fonte de ionização é a radiação solar no espectro do EUV. Um pico esporádico na concentração eletrônica em torno de 180 km aparece nessa região. A camada F2 localiza-se a partir de 250 km até 1000 km, englobando o pico de concentração iônica. Essa região é dominada por processos dinâmicos, havendo forte interação entre a Ionosfera superior e os ventos termosféricos. A camada F3, ainda em estudo, possui altitude de localização dependente das condições solares e atmosféricas. A figura 1.4 representa um perfil de composição iônica para a Ionosfera diurna e noturna.



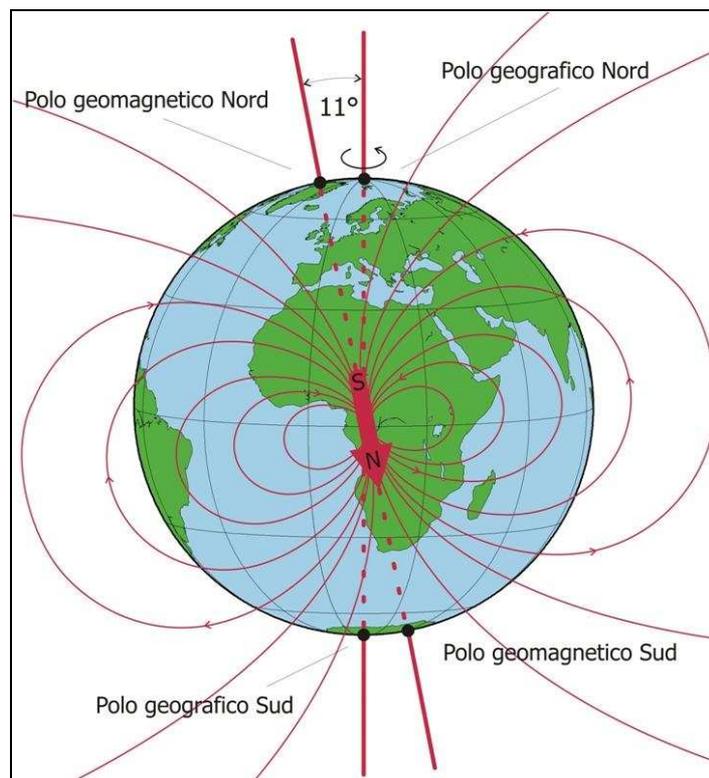
**Figura 1.4 – Perfil típico da densidade eletrônica da Ionosfera, mostrando as regiões de concentração dos principais íons que formam a Ionosfera e a estrutura das camadas.**

**Fonte: Robert & Andrew (2000, p. 334).**

## CAPÍTULO 2 - O CAMPO GEOMAGNÉTICO

A *Teoria do Dínamo* é a mais aceita atualmente para explicar grande parte do mecanismo do campo geomagnético (Kirchoff, 1991), porém esse modelo não explica a reversão do alinhamento do campo geomagnético.

O campo geomagnético pode ser entendido como a composição de um dipolo magnético excêntrico (atuando como componente principal do campo) e de vários outros campos secundários. Segundo a teoria mais aceita, o componente principal do campo geomagnético origina-se no interior da Terra, resultante de correntes fluindo em um núcleo metálico em estado de fusão. Essas correntes seriam oriundas de uma ação equivalente a de um dínamo de auto-excitação, que estaria presente no núcleo terrestre, representando mais de 90% da intensidade total do campo magnético da Terra. A figura 2.1 mostra uma representação do campo magnético terrestre.



**Figura 2.1 – Dipolo magnético terrestre.**  
Fonte: [www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra](http://www.ingv.it/temi-ricerca/la-terra)

De acordo com a *Teoria do Dínamo*, o componente principal do campo geomagnético pode ser representado como dipolo magnético colocado no centro da Terra com seu centro deslocado e inclinado  $11,5^\circ$  em relação ao eixo de rotação da Terra.

Os componentes secundários do campo geomagnético, que contribuem em escala muito menor e tem intensidade variável, são originados por correntes elétricas presentes nas regiões ionizadas da Ionosfera/Magnetosfera.

Um efeito da presença do campo geomagnético é sua influência sobre o movimento de partículas carregadas, como elétrons livres e íons, que estão presentes na Ionosfera e na Magnetosfera. Sua presença impede a incidência direta de partículas energéticas oriundas do vento solar.

Existem basicamente dois tipos de variação magnética. Uma delas está associada a períodos magneticamente calmos. A outra diz respeito à variações mais intensas, associadas a tempestades magnéticas.

## CAPÍTULO 3 - A ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS foi descoberta em 1950. Caracteriza-se por ser uma região da Terra que apresenta intensidade do campo geomagnético muito baixa, resultando numa grande depressão na Magnetosfera da Terra. Essa região estende-se atualmente sobre o sul da América do Sul e região do Atlântico Sul. No entanto, mapas sistemáticos da configuração da AMAS têm sido obtidos desde 1922, com resultados recentes indicando uma variação anual de seu centro em cerca de  $0.25^\circ$  para oeste e de  $0.05^\circ$  para norte. Na parte central da anomalia, a intensidade do campo geomagnético apresenta um mínimo global, em torno de  $22.500 \text{ nT}$ .

Em consequência da depressão na Magnetosfera, os cinturões de radiação de Van Allen são pressionados em direção à superfície terrestre, ocasionando larga precipitação de partículas energéticas na alta atmosfera da região. Como consequência, ocorre perturbações no campo geomagnético e na Ionosfera. Por esse motivo, a AMAS é um bom local de observação de fenômenos que envolvam a Alta Atmosfera (Makita, 1997). A figura 3.1 mostra o modelo IGRF da Intensidade Total do Campo Geomagnético para o ano de 2005.

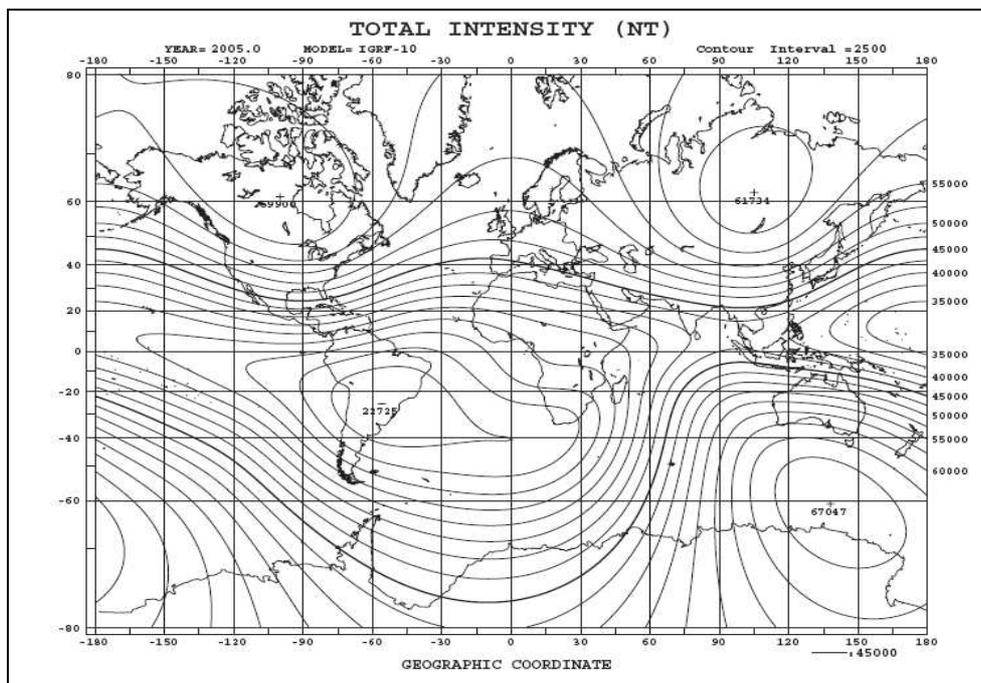
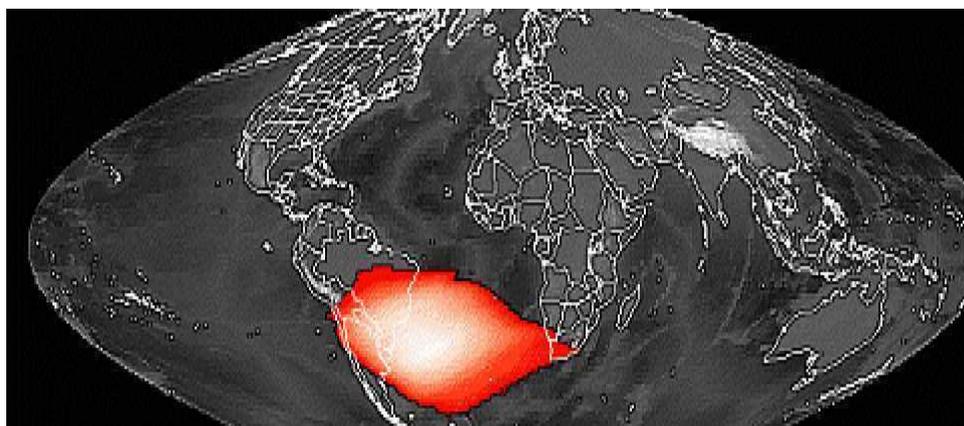


Figura 3.1 - Carta magnética de inclinação, declinação e intensidade total do Campo Geomagnético para o ano de 2005. Fonte: <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/map/t-m.pdf>

A AMAS está localizada no Sul da América do Sul e se estende sobre as regiões Sudeste e Sul do território brasileiro, desde o estado de São Paulo ao Sul do Rio Grande do Sul. Na figura 3.2 tem-se uma ilustração do posicionamento da AMAS para o ano de 2001.



**Figura 3.2 – Posicionamento da AMAS no ano de 2001.**  
**Fonte: <http://science.nasa.gov/sama/picture01>**

## CAPÍTULO 4 - LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A existência do que hoje denominamos aeroluminescência (“airglow”) ou luminescência atmosférica foi estabelecida por Yantema (1909). No entanto, a partir do ano 1900, vários astrônomos começaram a admitir a existência de uma componente terrestre para a luz do céu noturno. Newcomb e Burns foram os primeiros a medir esse efeito visualmente, em 1901 e 1902, respectivamente. Sydney Chapman, em 1931, propôs a teoria atualmente aceita para o mecanismo da aeroluminescência.

Em 1930, Lord Rayleigh IV conseguiu distinguir a aeroluminescência do fenômeno das auroras, denominando-a de aurora não-polar.

A luminescência atmosférica é um fenômeno óptico da atmosfera terrestre causado pela emissão de fótons pelos átomos ou moléculas excitados presentes principalmente entre 80 e 400 km de altitude. As camadas de emissão de aeroluminescência de algumas espécies ao longo da atmosfera são representadas na figura 4.1.

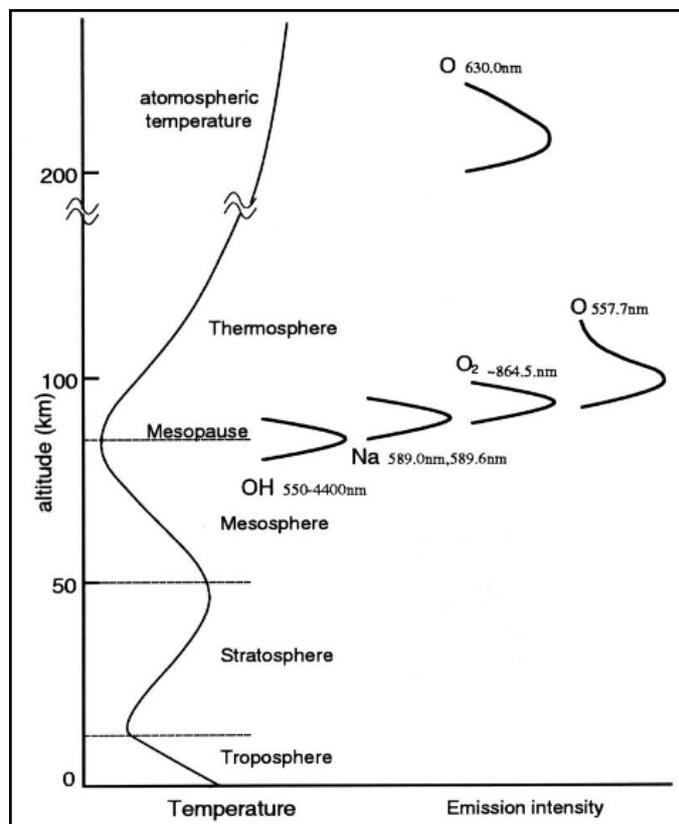
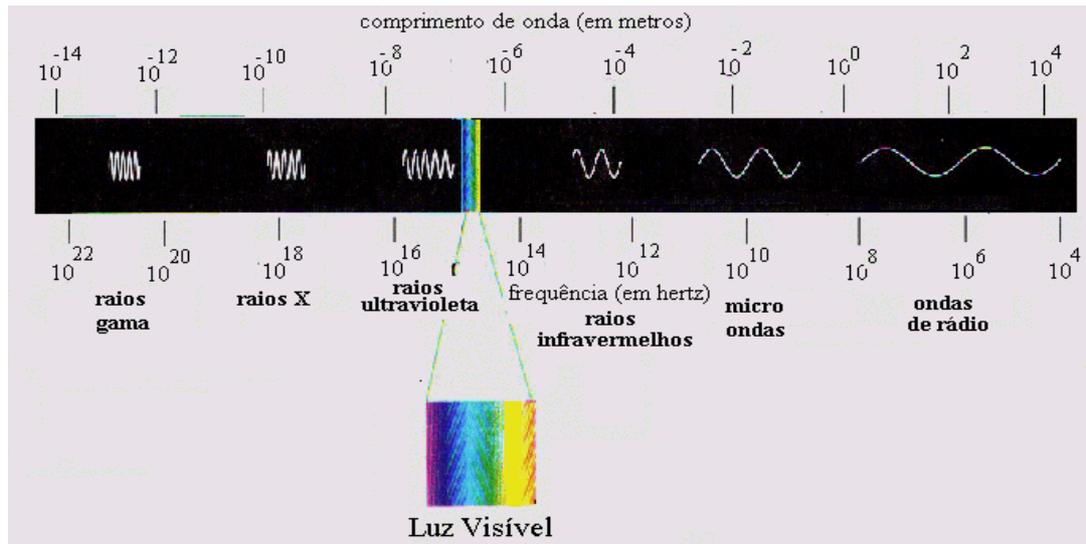


Figura 4.1 – As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o Perfil de temperatura da atmosfera da Terra .  
Fonte: Maekawa (2000, p.4).

A aeroluminescência é definida como uma radiação amorfa, continuamente emitida pela atmosfera de um Planeta (*Chamberlain, 1961*). Ao ocorrer o processo de relaxação energética, os constituintes excitados emitem uma radiação tênue e de extensa faixa espectral, que vai do ultravioleta ( $\lambda \sim 250 \text{ nm}$ ) ao infravermelho ( $\lambda \sim 4\mu\text{m}$ ). A figura 4.2 apresenta o espectro eletromagnético.



**Figura 4.2 - Espectro eletromagnético.**  
 Fonte: [www.dhnet.org.br/.../images/espectro.gif](http://www.dhnet.org.br/.../images/espectro.gif)

A transferência de energia proveniente da radiação solar para os átomos e moléculas da atmosfera terrestre é o principal processo responsável pela geração do fenômeno de aeroluminescência. No entanto, outros processos que desencadeiam emissões de luminescência envolvem reações fotoquímicas entre os componentes atmosféricos. Alguns desses processos mais comuns são a ressonância, a fluorescência, a quimiluminescência e a excitação por colisões.

A aeroluminescência pode ser nomeada de acordo com o ângulo zenital da radiação solar, podendo ser diurna (*Dayglow*), crepuscular (*Twilight*) ou noturna (*Nightglow*). Medições noturnas da aeroluminescência são as mais utilizadas, pois a presença da radiação solar torna o espectro complexo e com uma elevada intensidade de ruído. Para especificar a quantidade luminosa de luminescência, utiliza-se a unidade Rayleigh (R), muito utilizada em Aeronomia. Um Rayleigh corresponde à intensidade de uma fonte isotrópica de radiação que emite  $10^6$  fótons por centímetro quadrado de coluna de ar, por segundo.

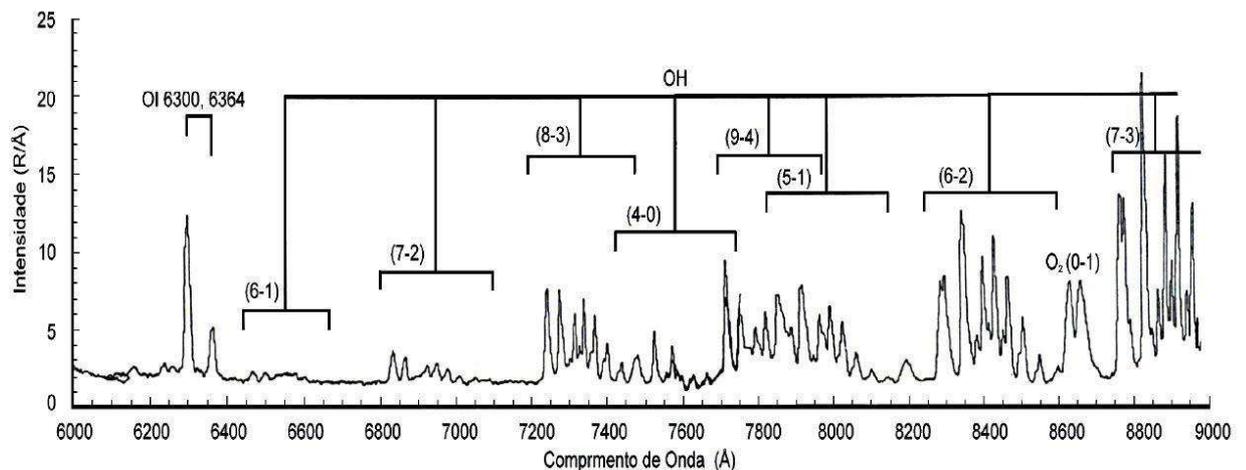
Através da aeroluminescência, pode-se estudar:

- processos químicos, iônicos e dinâmicos que regem a distribuição vertical dos vários constituintes atmosféricos;
- processos de excitação que geram emissões ópticas;
- a geração e propagação de irregularidades do plasma ionosférico;
- processos ligados à deposição de partículas neutras energéticas na alta atmosfera;
- ondas atmosféricas;
- temperatura da mesosfera superior (valor médio integrado na camada);
- acoplamento entre a termosfera e Ionosfera.

O comprimento de onda da emissão de aeroluminescência depende do componente atmosférico emissor. A emissão ocorre através de linhas ou bandas espectrais. Existem três espécies importantes de emissões da aeroluminescência no espectro visível:

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

Algumas das principais emissões da Aeroluminescência são tratadas a seguir. Parte do espectro do *Nightglow* é apresentada na figura 4.3.



**Figura 4.3 – Espectro da aeroluminescência noturna de algumas emissões importantes.**  
**Fonte: Adaptada de Johnston (1993, p. 215).**

## 4.1. As linhas de emissão do Oxigênio Atômico

As linhas mais importantes de emissão da aeroluminescência do oxigênio atômico ionizado (OI) são em 630 nm – linha vermelha, 557,7 nm – linha verde e em 777,4 nm.

A Figura 4.4 ilustra os níveis de energia do oxigênio atômico relativos às várias transições eletrônicas deste átomo.

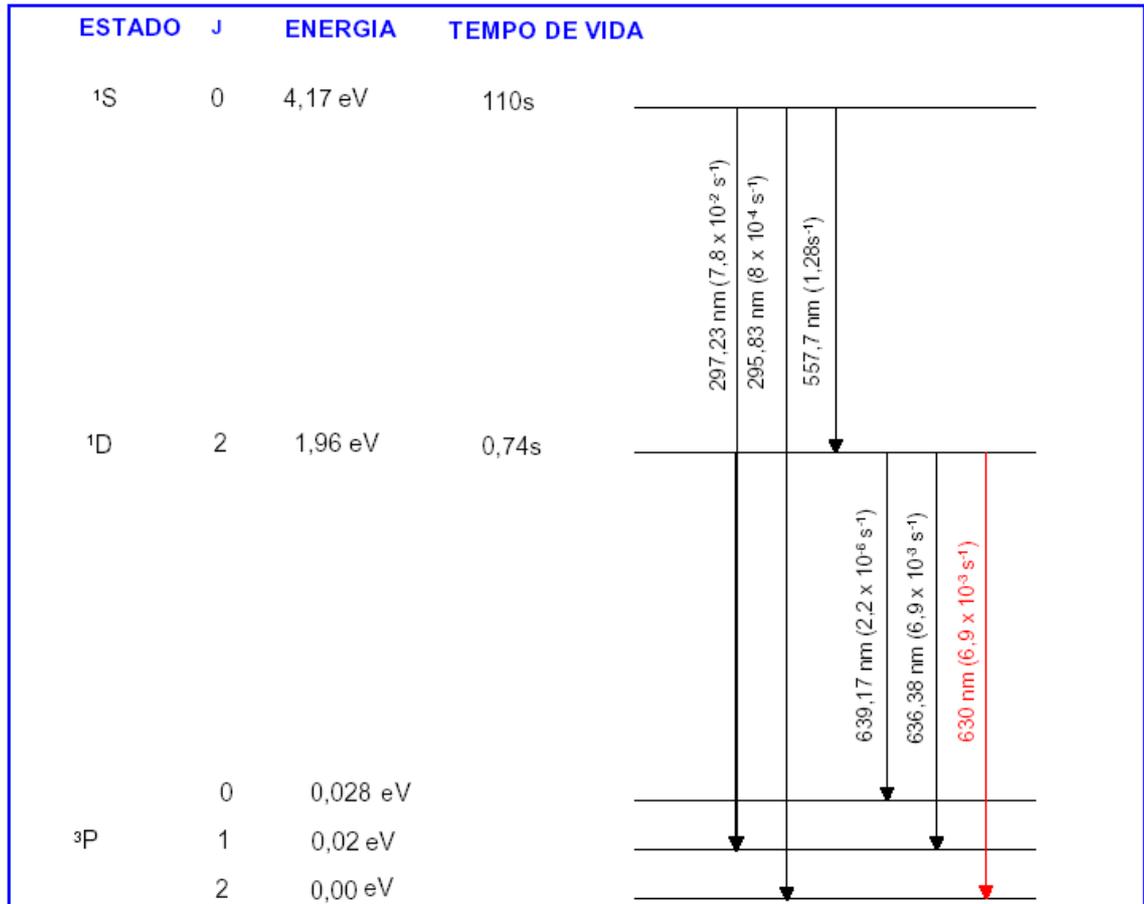


Figura 4.4 - Diagrama de nível de energia para o oxigênio atômico.  
Fonte: Krassovsky (1962, p. 912).

### 4.1.1. A linha vermelha

A linha vermelha (630 nm) do OI é emitida pelo átomo de oxigênio no nível de energia  $O(^1D)$ , que ao decair libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética. O nível  $O(^1D)$  é gerado a partir do processo de recombinação dissociativa do íon molecular  $O_2^+$  com elétrons da região F Ionosférica. Este processo é expresso pela seguinte reação (Whoite, 2000):

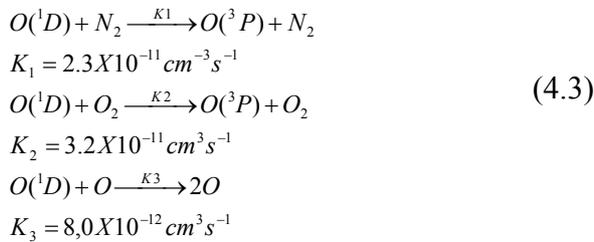


Na reação 4.1,  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a frequência correspondente ao comprimento de onda 630 nm. O símbolo (\*) indica que o átomo está no estado excitado. A relação de rendimento para o  $O(^1D)$  produzido como uma função de altura pode ser calculada a partir das taxas de emissão volumétrica. Neste cálculo a produção e perda são apresentados por Link e Cogger (1988).

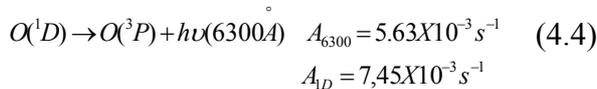
Produção:



Perda do  $O(^1D)$ :



Radiação:



Com estes dados é possível calcular a taxa de emissão volumétrica através da seguinte equação:

$$V_{6300} = f(^1D) \alpha_1 [O_2^+][e] \times \frac{A_{6300}}{A_{1D} + K_1[N_2] + K_2[O_2] + K_3[O]} \quad (4.5)$$

A linha vermelha é a mais utilizada no estudo da Química e da dinâmica da região F noturna. Ela provém de uma camada de emissão com aproximadamente 50 km de espessura localizada abaixo do pico de emissão da região F, com sua fonte de emissão entre 240 e 300 km de altitude. A intensidade da aeroluminescência nesse comprimento de onda varia conforme a densidade de elétrons ionosféricos. Ela é mais intensa quando a densidade de elétrons é maior, nas ocasiões em que o plasma ionosférico se move para baixo. A intensidade é menos intensa quando o plasma ionosférico move-se para cima, diminuindo a densidade de elétrons ionosféricos.

### 4.1.2. A linha verde

A linha verde do oxigênio atômico possui uma fonte de emissão na região E, na altura da mesosfera e outra na região F (*Takahashi, 1987*). A maior parte dessa emissão surge da recombinação do oxigênio atômico na mesopausa, em médias latitudes. Em baixas latitudes, uma fração significativa desta emissão surge de processos de recombinação dissociativa na região F. As medidas fotométricas em solo obtém a intensidade integrada das duas fontes, na região E e F. Na região F, o processo de produção do Oxigênio atômico excitado  $O(^1S)$  é a recombinação dissociativa do íon Oxigênio Molecular com elétrons. Este processo à noite é o mesmo da emissão da linha OI 630 nm, porém a fração de produção é aproximadamente 20 % da mesma.

A emissão da linha verde é causada por um processo de recombinação dissociativa do íon oxigênio (*Jacob, 1985*):



### 4.1.3. OI 777,4 nm

A emissão do OI 777,4 nm possui intensidade relativamente fraca. Ela é gerada em todas as alturas da Ionosfera, não sendo afetada de maneira significativa pelo movimento da deriva vertical do plasma ionosférico. A recombinação radioativa e a recombinação íon-íon são os dois mecanismos propostos para as emissões do oxigênio atômico que gera essa linha (*Hanson, 1969*).

## 4.2. As bandas de emissão da Hidroxila – $OH(^2\Pi)$

As bandas de emissão do radical hidroxila são conhecidas como bandas de Meinel. O espectro da aeroluminescência noturna da hidroxila é mostrado na figura 4.3. O mecanismo proposto para excitação do radical OH na mesopausa, consta de uma reação entre hidrogênio e ozônio (*Bates e Nicolet, 1950*).

A camada de emissão da aeroluminescência do OH está localizada na região da mesosfera, com um pico de emissão em torno de 87 km. A figura 4.5 aponta a camada de

hidroxila na atmosfera.

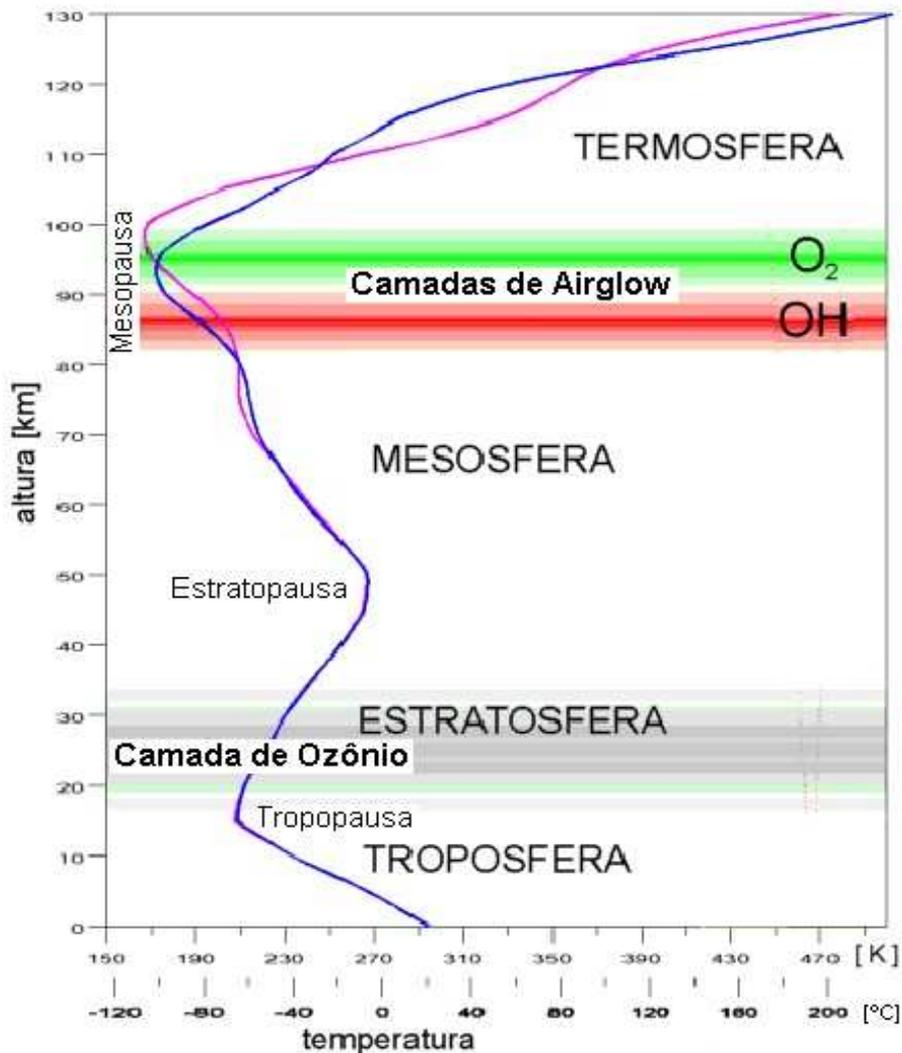


Figura 4.5 – Localização da camada de hidroxila na atmosfera terrestre.  
 Fonte: [http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/atmos/atmos\\_lecture\\_br.html](http://www.meteor.iastate.edu/gccourse/atmos/atmos_lecture_br.html)

As observações da aeroluminescência mesosférica fornecem informações sobre os processos dinâmicos e fotoquímicos da mesosfera superior. A aeroluminescência das emissões de Hidroxila tem sido usada há pelo menos três décadas para inferir o movimento de ondas de gravidade e marés atmosféricas que se propagam na região da alta atmosfera. Observações contínuas são imperativas para o estudo do regime de ondas, que têm períodos entre 5 minutos a 12 horas na região da mesosfera superior. Além disso, a temperatura rotacional do OH (6,2) é calculada baseando-se nas intensidades relativas das linhas rotacionais, que são dependentes dos valores de temperatura.

## CAPÍTULO 5. IRREGULARIDADES NA REGIÃO F IONOSFÉRICA

Na Ionosfera Terrestre existem extensas regiões alinhadas ao longo das linhas do Campo Geomagnético, e cujo, interior ocorre um alto grau de rarefação do plasma ionosférico (Sahai, 2000). As irregularidades ionosféricas de grande escala são denominadas *bolhas de plasma*. As *bolhas de plasma* se desenvolvem na base da camada F, logo após o pôr do Sol e estendem-se a altas altitudes, de até 1500 km. Possuem dimensões horizontais Norte – Sul muito grande, da ordem de 5000 km ao longo das linhas do campo magnético, na extensão Leste – Oeste entre a região de distúrbios de dezenas a centenas de km. Após se formar, as *bolhas de plasma* derivam para cima com uma velocidade que geralmente varia de 100 m/s a 500 m/s. Elas apresentam uma deriva zonal ao longo da linha do equador magnético, representada na figura 4.6, que pode chegar a aproximadamente a 200 m/s.

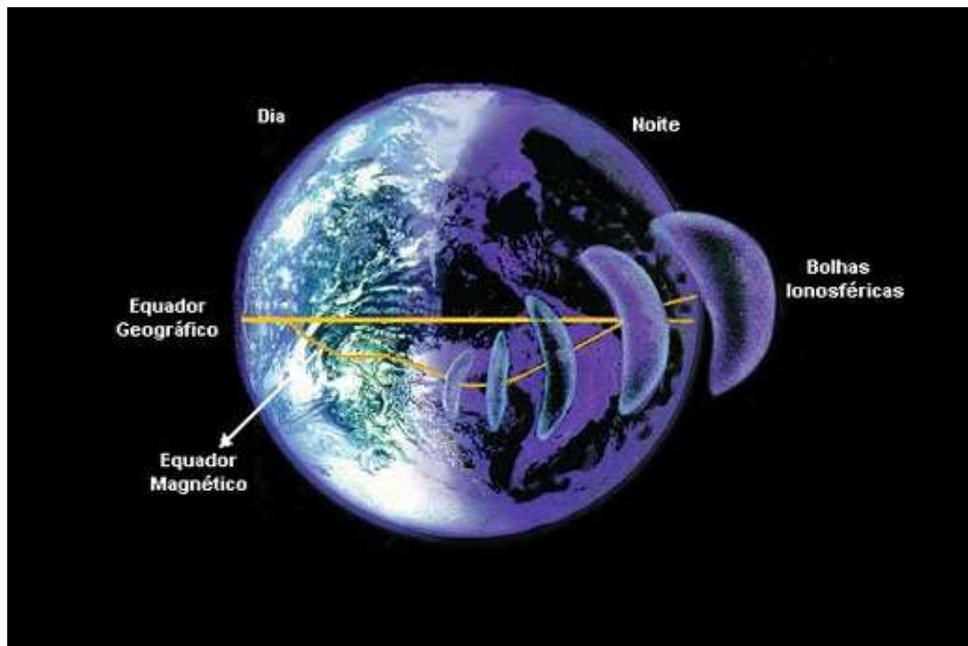


Figura 4.6 – Deslocamento de uma bolha de plasma ao longo do equador magnético.  
Fonte: <http://www.ondascurtas.com/images/bolhaionosferica.jpg>

Uma das maneiras para estudar bolhas de plasma é através do uso da técnica da aeroluminescência do OI 630 nm. Isso porque a intensidade da aeroluminescência neste comprimento de onda é diretamente proporcional à densidade eletrônica e à quantidade de oxigênios moleculares.

Dentro da região das *bolhas de plasma*, a densidade eletrônica diminui de forma

acentuada, acarretando uma redução abrupta na intensidade da aeroluminescência nessas regiões. Assim, observando a redução da intensidade da aeroluminescência do OI 630 nm é possível monitorar a ocorrência das *bolhas de plasma*.

## CAPÍTULO 6. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

### 6.1. As Técnicas observacionais

As observações óticas de aeroluminescência são efetuadas em geral de três formas:

- a) no solo;
- b) a bordo de foguete;
- c) em satélites.

O método escolhido leva em conta o propósito do estudo. Quando o objetivo é investigar flutuações nas intensidades das emissões (variabilidade temporal), utiliza-se a fotometria de solo. Caso o objetivo seja determinar o perfil vertical da camada de emissão (taxa de emissão volumétrica), geralmente se usa medidas de fotometria a bordo de foguete. No entanto, o estudo da distribuição global do campo de radiação da aeroluminescência pode ser obtido através de técnicas de imageamento a bordo de satélite.

Para se investigar a variação espacial do fenômeno de aeroluminescência, utilizam-se câmeras imageadoras de alta definição. Essas câmeras empregam dispositivos CCD - *charge coupled device*. Este dispositivo é empregado em fotômetros, em substituição às células fotomultiplicadoras.

#### 6.1.2. O dispositivo CCD (Charge Coupled Device)

O dispositivo CCD é parte integrante das câmeras imageadoras. Consta de um detector de fótons altamente sensível à luz e sua principal função é a de transferir a energia dos fótons incidentes em uma corrente de elétrons que são liberados devido ao efeito fotoelétrico.

Para representar a imagem de um objeto focalizado por um sistema de lentes, usa-se a quantidade de elétrons liberados, que é proporcional à intensidade da radiação luminosa incidente.

O detector CCD é dividido em uma grande quantidade de pequenas áreas sensíveis a luz, espaçadas regularmente na forma de linhas e colunas, os chamados pixels. Os fótons “arrancam” elétrons quando incidem sobre os pixels. Com isso, os pixels armazenam os elétrons até serem “lidos” fora da CCD, na forma de corrente elétrica. Quando o número de elétrons em cada pixel é medido pela CCD, a imagem é reconstruída.

A resolução dos sensores CCD's, é definida pela quantidade de pixels, seu tamanho e a

distância entre eles.

As funções básicas que um dispositivo CCD necessita efetuar na geração de uma imagem são:

- a) Geração de cargas (elétrons): esta função usa o efeito fotoelétrico;
- b) Coleta de cargas: nessa parte do processo, os elétrons são coletados nos pixels. Os locais onde os elétrons são coletados são definidos pelo arranjo de eletrodos, chamados portas condutoras;
- c) Transferência de cargas: este processo é efetuado pela manipulação da voltagem nas portas condutoras da CCD, fazendo que os elétrons sejam transferidos de um pixel para outro. No final desse processo, cada linha terá o registro vertical dos pixels de todas as colunas;
- d) Armazenamento de cargas: neste último processo, os dados são armazenados em uma linha ou coluna, são transferidos por cabo serial para um amplificador, sendo lidos posteriormente fora da CCD, como uma voltagem de saída. Com essa voltagem é possível reconstruir, pixel a pixel, a imagem original observada.

### **6.1.3. Fotômetros**

Os fotômetros são equipamentos projetados para medir a aeroluminescência noturna, e por se tratar de um equipamento ótico situado no solo, sua utilização ocorre geralmente em noites sem nuvens.

No sistema de fotometria tradicional existe uma fonte de alta voltagem, necessária ao funcionamento de uma célula fotomultiplicadora. Como a fotomultiplicadora trabalha em alta tensão, o sistema só pode ser operado na ausência de fontes de luz artificiais e em noites sem lua no céu noturno (lua nova).

### **6.1.4. Câmeras imageadoras**

As câmeras imageadoras têm como objetivo observar a variação espacial da radiação de aeroluminescência, monitorando fenômenos como as *bolhas de plasma*.

Em geral, esses equipamentos possuem uma parte óptica constituída por uma lente *Fisheye*, capaz de capturar uma imagem com um ângulo de 180° do céu noturno ou uma lente *Wide-Angle*, que capta um ângulo de 90° do céu. A lente *Wide-Angle* produz imagens de uma parte mais limitada da abóbada celeste, porém com melhor definição espacial, ao passo que uma lente do tipo *Fisheye* gera imagens mais amplas, porém com menor definição. A sensibilidade destas câmeras depende do tipo de lente e tempo de exposição em que está

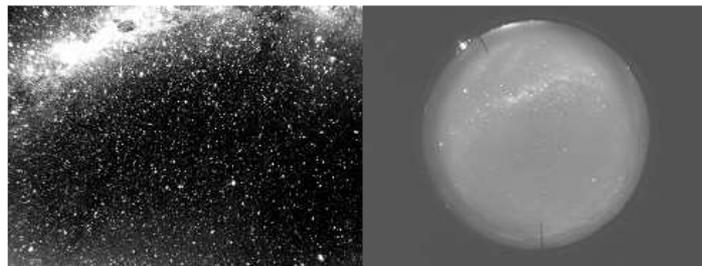
operando.

Um exemplo de câmeras imageadoras utilizadas nos Observatório Espacial do Sul são mostradas na figura 6.1.



**Figura 6.1 - Câmeras imageadoras CCD instaladas na plataforma do Prédio #5 do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS.**

Exemplos de imagens celestes obtidas no Observatório Espacial do Sul por câmeras imageadoras CCD's são mostradas na figura 6.2.



**Figura 6.2 – Exemplo de imagens captadas por câmaras imageadores no Observatório Espacial do Sul: por uma câmera com lente *Fisheye* (direita) e uma imagem captada por uma câmera com lente *Wide-Angle* ( esquerda).**

## 6.2. O Observatório Espacial do Sul e o fotômetro Fotsul

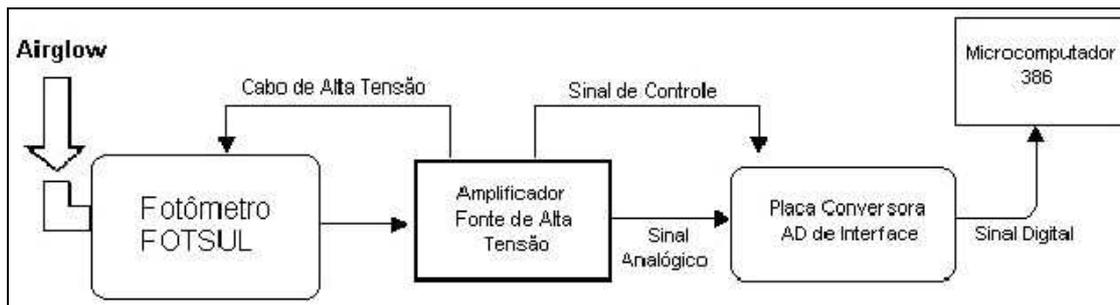
Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, (29° S, 53° O), figura 6.3, foi um dos sítios de observação, onde encontrava-se instalado e operacional um dos equipamentos (fotômetro) que forneceram dados observacionais para este trabalho. O OES localiza-se no interior da cidade de São Martinho da Serra, a cerca de 60 km de Santa Maria. O local é adequado para as campanhas de observação de aeroluminescência, visto que sofre pouca influência de luz artificial.



**Figura 6.3 – Vista panorâmica dos prédios 1, 2, 3, 5, 6 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra., RS, Brasil.**

No OES, o monitoramento da aeroluminescência é feito junto ao Laboratório de Óptica e Luminescência Atmosférica - LOLA/OES/CRS/INPE – MCT, Prédio # 5, onde foi utilizado o fotômetro Fotsul para a coleta de dados observacionais analisados na Monografia.

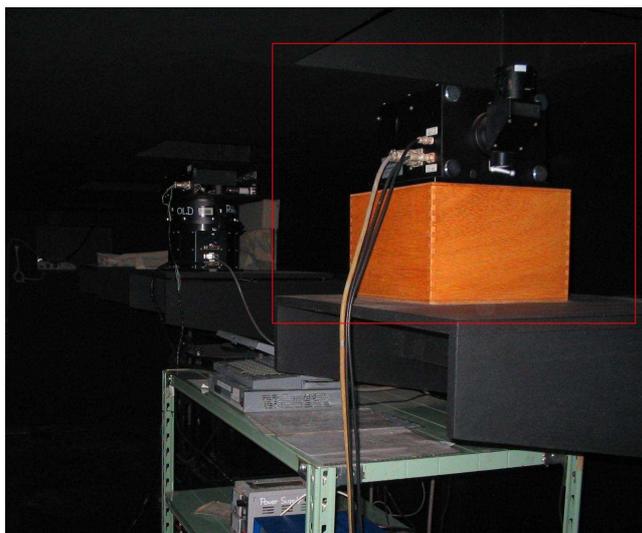
O fotômetro Fotsul consiste em um sistema de filtros de interferência ótica (caso especial do interferômetro *Fabry-Perot*) que seleciona o comprimento de onda a ser medido, acoplado com um tubo fotomultiplicador e um sistema eletrônico de discriminação e processamento de sinal. Juntamente com estes dispositivos é acoplado um sistema de armazenamento e coleta de dados. Um diagrama de blocos do sistema do fotômetro Fotsul é mostrado na figura 6.4.



**Figura 6.4 – Diagrama de blocos simplificado do sistema do fotômetro Fotsul, instalado no OES.**

O fotômetro Fotsul é composto por dois filtros para registro de dois comprimentos de onda diferentes:  $557,7\text{ nm}$  e  $630,0\text{ nm}$  provenientes das transições eletrônicas do Oxigênio Ionizado. A função dos filtros é permitir que apenas a intensidade das emissões com estes dois comprimentos de onda específicos sejam contabilizadas pela célula fotomultiplicadora.

O fotômetro Fotsul é mostrado na figura 6.5 no interior do prédio do Laboratório de Óptica e Luminescência Atmosférica do OES.



**Figura 6.5 – Parte do sistema integrante do fotômetro Fotsul, instalado no interior do Laboratório de Óptica e Luminescência Atmosférica do OES.**

Atualmente, desde fevereiro de 2008, o equipamento Fotsul encontra-se fora de uso por defeito técnico.

### **6.3. Metodologia**

Os dados que foram utilizados neste trabalho referem-se às observações das emissões de aeroluminescência realizadas no período de 2001 a 2006 através de fotômetros zenitais,

instalados em três estações de monitoramento distintas.

### 6.3.1. Estações de monitoramento

Na seção 6.2 enfatizou-se a descrição do Observatório Espacial do Sul, um dos sítios de observação e coleta de dados para análise. Existem, no entanto, dois outros fotômetros instalados em locais distintos, cujos dados observacionais da intensidade da aeroluminescência foram utilizados para execução deste trabalho. Essa abordagem enfática ao OES deve-se ao fato de que o objetivo principal do trabalho é o estudo do fenômeno de aeroluminescência no Sul do Brasil.

Os equipamentos utilizados para coleta de dados observacionais analisados neste trabalho são:

a) Fotômetro Fotsul, instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT (29° S, 53° O), São Martinho da Serra, RS;

b) Fotômetro Multi – 2, instalado no Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O, Cachoeira Paulista, SP;

c) Fotômetro Multicanal, instalado no Observatório de Luminescência da Paraíba (7,4 °S, 36,6° O), São João do Cariri, PB.

A localização dos observatórios das três estações de monitoramento são mostrados na figura 6.6.



Figura 6.6 – Localização das estações de monitoramento.  
Fonte: adaptada de <http://images.google.com.br/imgres?imgur>

### 6.3.2. Tratamento dos dados

Os dados observacionais da intensidade de aeroluminescência coletados pelos fotômetros são numéricos, com valores absolutos da intensidade da aeroluminescência. São dados armazenados em disco rígido do computador controlador no formato 'txt'.

O Fotsul entrou em operação em janeiro de 2001, tendo sido desativado em 2008. No entanto, os dados gerados por equipamento, a partir de 2007, não eram confiáveis. Este fato limitaram o período de estudo para a análise apresentada.

Com os dados da intensidade da luminescência atmosférica do OI 557,7 nm e OI 630 nm coletados nos três sítios de observação, no período de 2001 a 2006, foram construídos perfis mensais da aeroluminescência da linha verde e da linha vermelha do oxigênio atômico ionizado.

Para se obter um perfil mensal da aeroluminescência do OI 557,7 e do OI 630 nm, a primeira ação é diagramar os dados referentes a cada mês, de 2001 a 2006 relativos a cada observatório, sítio de observação. Utilizou-se apenas um dia de coleta de cada mês. O critério utilizado para escolha desse dia foi o maior tempo de coleta e a qualidade dos dados. Como os intervalos de coleta diferem conforme o mês, variando os instantes de princípio e término da observação, considerou-se apenas a intersecção dos intervalos de observação.

Os valores das intensidades foram normalizados e considerando esses valores, foram gerados os perfis mensais, considerando-se as médias da intensidade e do tempo de observação, além do desvio padrão das intensidades.

A normalização dos dados tem o objetivo de amenizar possíveis erros de leitura dos equipamentos, uma vez que relativiza o valor absoluto de intensidade de aeroluminescência.

A investigação do fenômeno da aeroluminescência no sítio de observação localizado no OES constitui o escopo desse trabalho. Os objetivos secundários são traçar um perfil mensal das emissões de oxigênio atômico, nos comprimentos de onda 557,7 nm e 630,0 nm, para os dados observacionais das outras duas estações de monitoramento, a fim de permitir a intercomparação dos perfis de emissão. Dessa forma, para os dados do OES, foi utilizada a Transformada de *Wavelet*. As funções *Wavelet* são ferramentas poderosas para a análise de sinais, decompondo funções tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. A aplicação da Transformada de *Wavelet* foi executada com apoio e auxílio do Dr. Ademilson Zanandrea.

## CAPÍTULO 7. RESULTADOS OBTIDOS

### 7.1. Para os dados do OES

Os perfis mensais da aeroluminescência do OI 557,7 nm obtidos a partir dos dados recolhidos pelo fotômetro Fotsul, instalado no Observatório Espacial do Sul estão dispostos nas figuras 7.1 e 7.2. Os perfis mensais da aeroluminescência do OI 630 nm, gerados a partir dos dados recolhidos pelo fotômetro Fotsul, instalado no Observatório Espacial do Sul estão dispostos nas figuras 7.3 e 7.4.

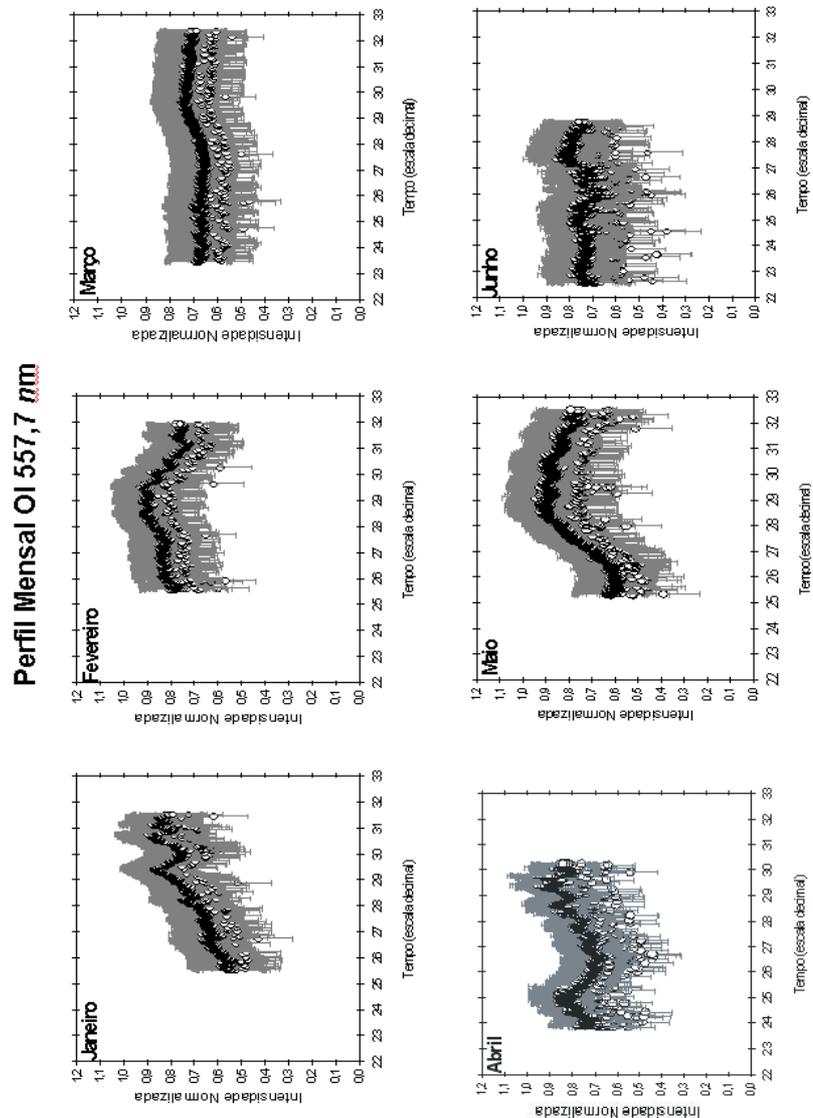
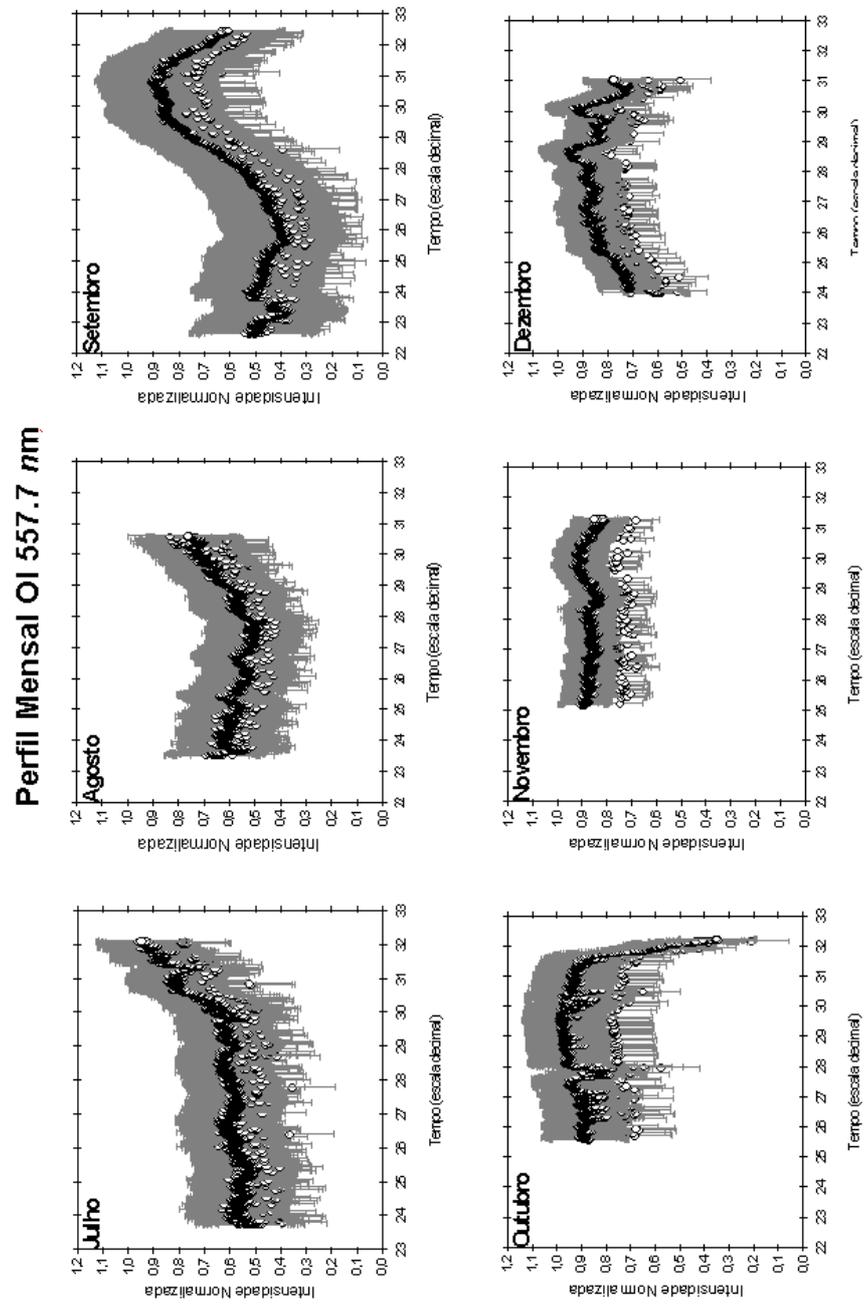
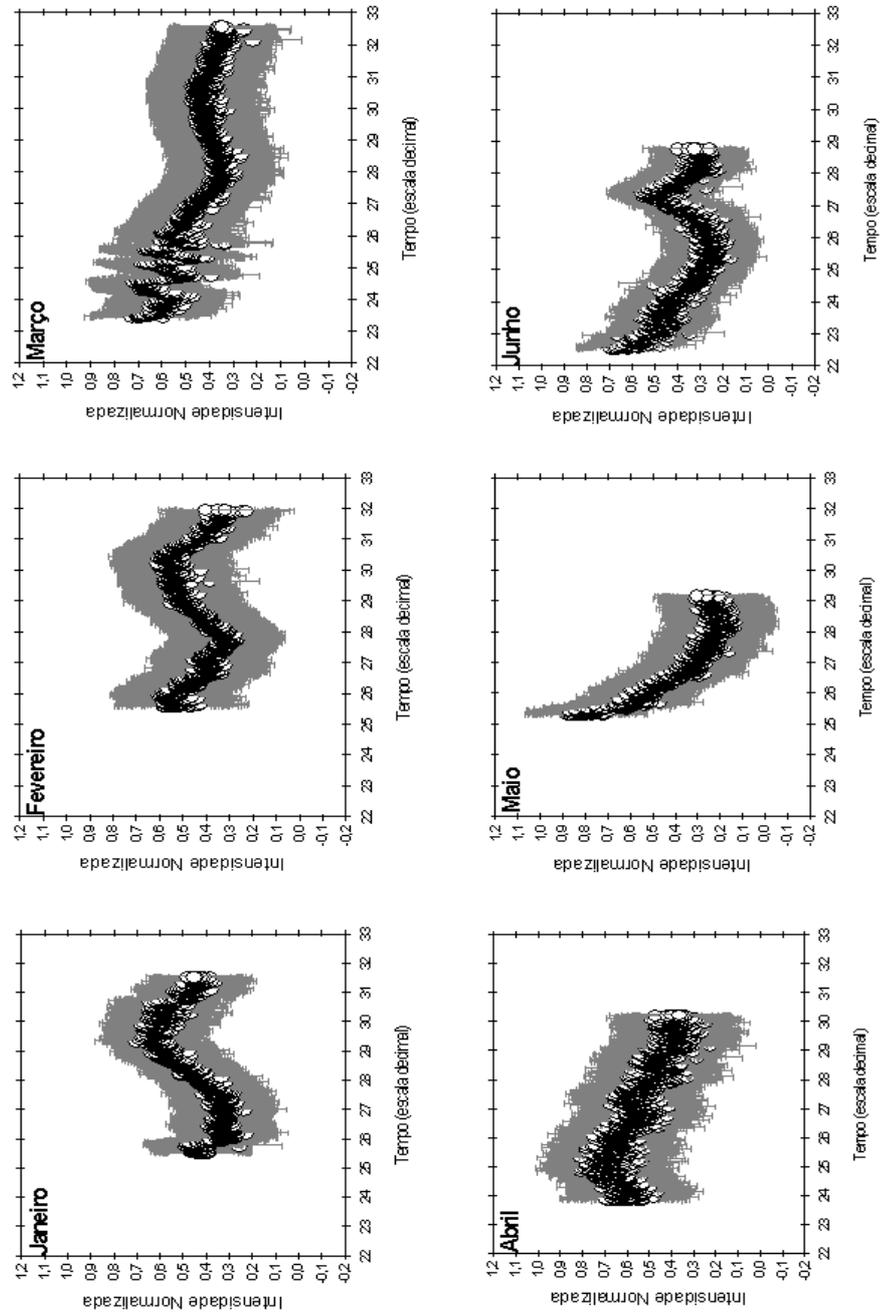


Figura 7.1 – Perfis das intensidades médias mensais do OI 557,7 nm para os meses de janeiro à junho.

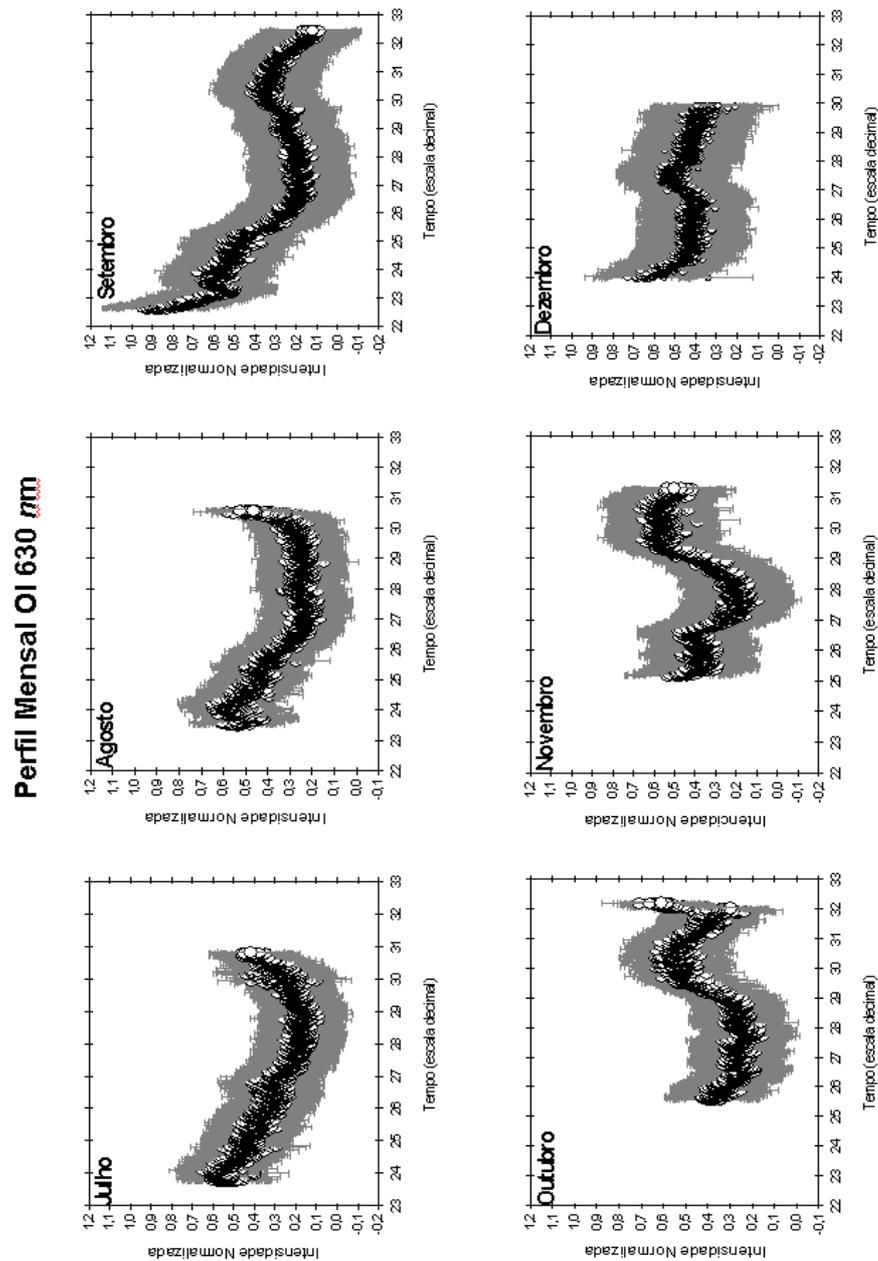


**Figura 7.2 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 557,7 nm para os meses de julho à dezembro.**

**Perfil Mensal OI 630 nm**



**Figura 7.3 - Perfis das intensidades m3dias mensais do OI 630 nm para os meses de janeiro à junho.**



**Figura 7.4 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 630 nm para os meses de julho à dezembro.**

Em termos da emissão do OI 630 nm, de fevereiro a outubro, oscilações típicas, com presença de inflexões foram observadas, enquanto que de março a setembro, tendências de decaimento exponencial foram registradas. De abril a setembro, um incremento na intensidade pôde ser visualizado. Entretanto, de outubro a fevereiro, o comportamento foi oposto.

Para o OI 557,7 nm, de abril a setembro, o perfil de emissão mostra um aumento ao longo do monitoramento. De outubro a fevereiro, os perfis de emissão mostraram uma variabilidade constante.

## 7.2. Para os demais sítios (comparação)

Os perfis mensais da aeroluminescência do OI 557,7 e OI 630 nm gerados a partir dos dados recolhidos pelo fotômetro Fotsul e pelo fotômetro Multi – 2, instalado no Centro Espacial de Cachoeira Paulista estão dispostos nas figuras 7.5 e 7.6.

Os perfis mensais da aeroluminescência do OI 630 nm gerados a partir dos dados recolhidos pelo fotômetro Fotsul, pelo fotômetro Multicanal e pelo fotômetro Multi – 2 são apresentados nas figuras 7.7 e 7.8.

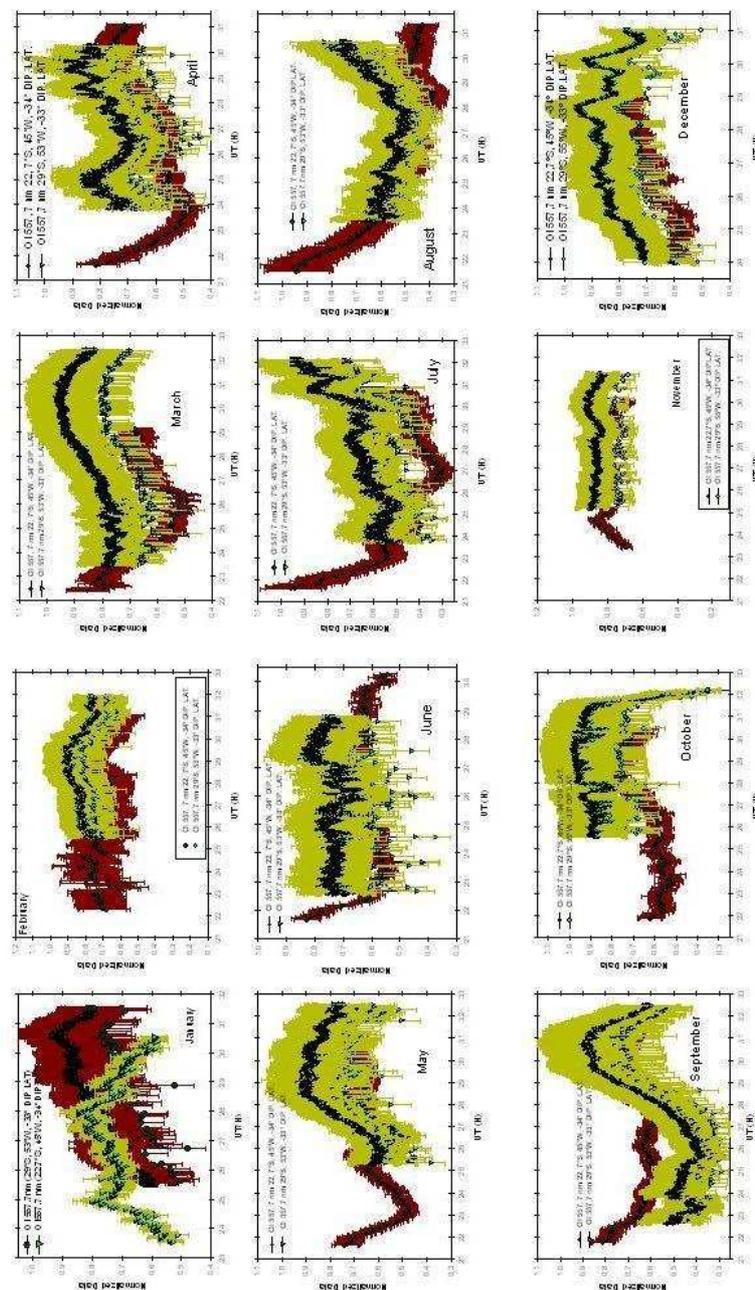


Figura 7.5 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 557,7 nm para o OES (29°S, 53°O) e para o Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O).

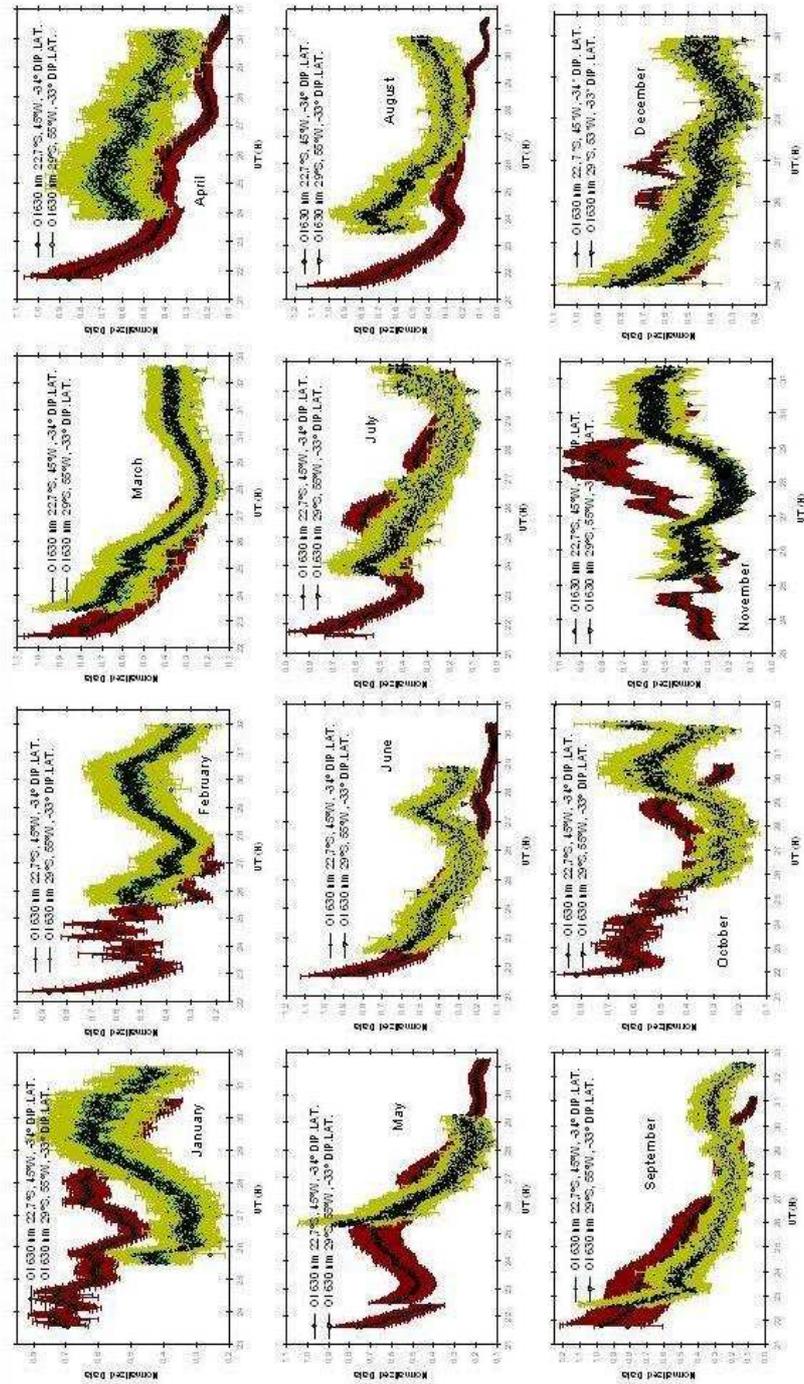
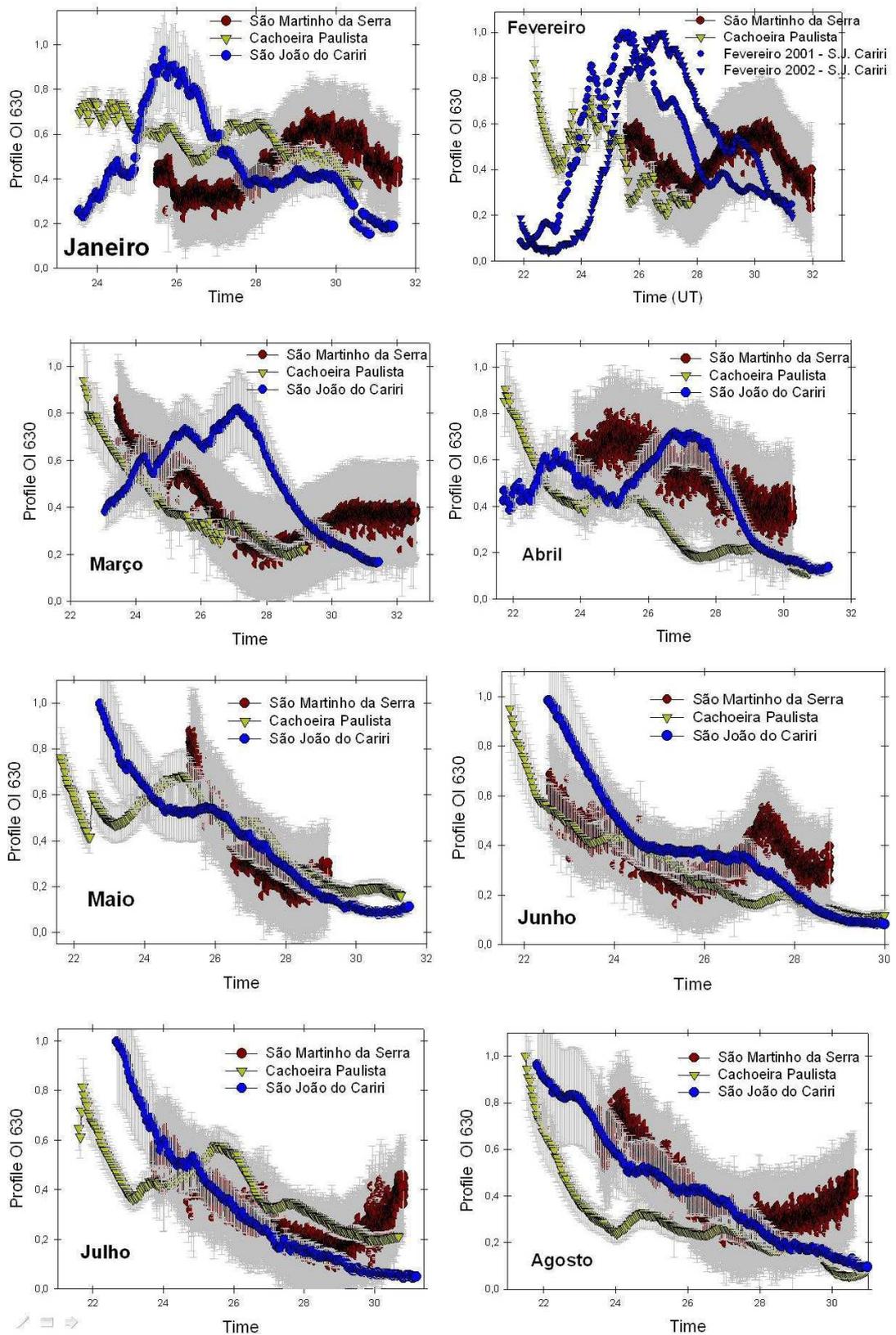
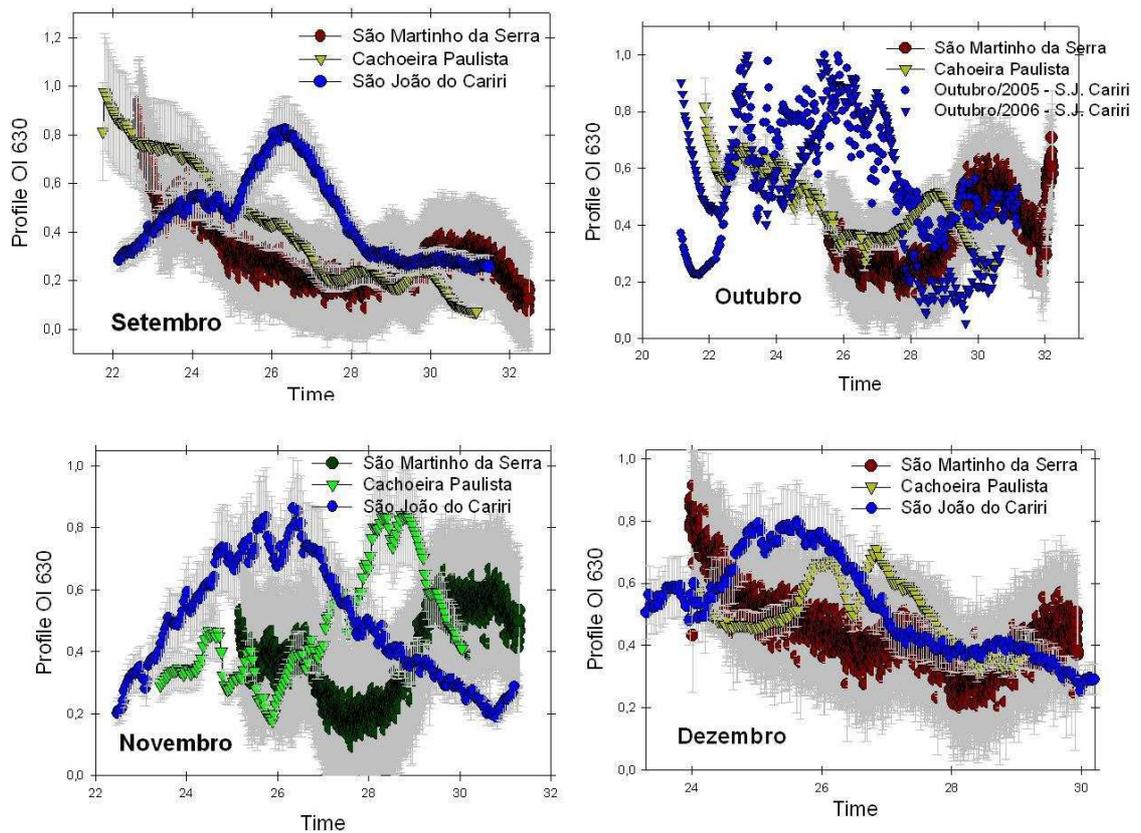


Figura 7.6 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 630 nm para o OES (29°S, 53°O) e para o Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O).



**Figura 7.7 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 630 nm para o OES (29° S, 53°O), Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O) e Observatório de Luminescência da Paraíba (7,4 °S, 36,6°O) para os meses de janeiro à agosto.**



**Figura 7.8 - Perfis das intensidades médias mensais do OI 630 nm para o OES (29° S, 53°O), Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°O) e Observatório de Luminescência da Paraíba (7,4 °S, 36,6°O) para os meses de setembro à dezembro.**

A partir dos dados de intensidade normalizada, uma variação sazonal da intensidade de aeroluminescência foi observada para os três sítios de observação.

Valores máximos foram observados nos períodos de equinócio (março-abril e setembro-outubro) e picos de menor valor de intensidade foram observados nos períodos de solstício (junho-julho e dezembro-janeiro).

Foram visualizadas, para os três observatórios, sítios de coleta de dados observacionais, depleções no perfil das emissões ópticas do OI 630 nm, caracterizadas por picos abruptos nas séries temporais dos valores de intensidade da emissão. As depleções são causadas pela formação de *bolhas de plasma* ionosférico, que ao passarem pela zona de integração de radiação do fotômetro, provocam uma diminuição da contagem de fótons pelo instrumento.

As depleções foram observadas mais frequentemente no período do verão no Hemisfério Sul.

## CAPÍTULO 8. CONCLUSÃO

Em termos da emissão do OI 630 nm observadas no Observatório Espacial do Sul, de fevereiro a outubro, oscilações típicas foram visualizadas. De março a setembro, tendências de decaimento exponencial foram observadas. De abril a setembro, registrou-se um incremento na intensidade de emissão nesse comprimento de onda. De outubro a fevereiro, o comportamento foi oposto.

Para o OI 557,7 nm, visualizou-se um aumento ao longo do monitoramento no período de abril a setembro. De outubro a fevereiro, os perfis de emissão mostraram uma variabilidade constante.

Foram registrados nos perfis de emissão dos três sítios de observação, a presença do fenômeno de *bolhas de plasma*, indicado pelo decréscimo característico da intensidade de emissão do OI 630 nm.

A execução deste trabalho de Monografia, desenvolvendo o Projeto de Pesquisa apresentado na disciplina de Trabalho de Graduação em Física I, permitiu ao acadêmico a aplicação de diversos conhecimentos adquiridos ao longo do Curso de Física. Possibilitou o aprimoramento de novos conhecimentos científicos e de técnicas que foram adquiridos ao longo da análise e interpretação de resultados e na própria execução da Monografia, visto que, durante esse período fez-se necessário e ocorreu um aprofundamento intelectual por parte do acadêmico em relação a novos conhecimentos relacionados as áreas da Geofísica Espacial e Geomagnetismo, especialmente em Aeronomia.

As atividades desenvolvidas pelo acadêmico na disciplina de Trabalho de Graduação II e que resultaram nesta Monografia, foram essenciais para o seu desenvolvimento técnico e científico, contribuindo na complementação da sua formação como Bacharel em Física e no desenvolvimento das suas potencialidades.

## CAPÍTULO 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Brasseur, G.; Solomon, S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Dordrecht, D. Reidel Publish Comp., 1986.

Chamberlain, J. W.; *Physics of the Aurora and Airglow*, American Geophysical Union, 1995.

Coutinho, E. F.; *Introdução às Partículas Presas e a Anomalia Geomagnética Brasileira*, Ciência e Cultura, 26(4), 329-339, 1974.

Hanson, W. B., *Radiative Recombination of Atomic Oxygen Ions in the Nighttime F Region*, J. Geophys. Res., 74, 3720, 1969.

Jacob, P. G., 1985, *Manifestations of Atmospheric Gravity Waves in the Airglow at 95km*, PhD thesis, University of Adelaide, Adel., Australia.

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

Kirchoff, V.W.; *Introdução à Geofísica Espacial*, Editora da Universidade de São Paulo, 1991.

Krassovsky, V. I., N. N. Shefov and V. I. Yarin, *Atlas of the Airglow Spectrum 3000-12,400 Å*, Planet. Space Sci. 1962.

Link, R., and L. L. Cogger. *A reexamination of the OI 6300-Å nightglow*, J. Geophys. Res., 93(A9), 1988.

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

Makita, K.; Okano, S.; Yukimatsu, A.; Nishino, M.; Shibasaki, K.; Yamamoto, H.; Kikuchi, T.; Nozaki, K.; Fujitaka, K.; Furukawa, M.; Takahashi, H.; Schuch, N.J.; *Upper Atmosphere Observations in the Brazilian Geomagnetic Anomaly Region*, Bulletin of Science and Engineering, Takushoku University, V. 1, No.2, 1997.

Pinto, O. J.; González, W. D.; *Anomalia Magnética Brasileira*, Ciência Hoje, vol. 9, no 52, 31-35, 1989.

Robert W. Schunk and Andrew F. Nagy, *Ionospheres – Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, Cambridge Atmospheric and Space Science Series - Cambridge University Press, Printed in the United States of America, 2000.

Sahai, Y.; P. R. Fagundes; J. A. Bittencourt; *Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 62, pp. 1377-1383, 2000.

Takahashi, H., B. R. Clemesha; et al. *Rocket observations of the atomic and molecular oxygen emissions in the equatorial region*. *Adv. Space Res.*, 10: (10)47-50, 1987.

Woithe, J, 2000, *Optical studies of the mesospheric region*, PhD Thesis, University of Adelaide, Australia.