



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA SOBRE A  
ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ PARA O ANO DE 2007,  
2010 e 2011**

Eduarda Luiza Maurer Kossmann

Relatório de Iniciação Científica do  
Programa PIBIC, orientada pelo Dr.  
José Valentin Bageston

UFSM

Santa Maria

2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA SOBRE A  
ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE FERRAZ PARA O ANO DE 2007,  
2010 e 2011**

Eduarda Luiza Maurer Kossmann

Relatório de Iniciação Científica do  
Programa PIBIC, orientada pelo Dr.  
José Valentin Bageston

UFSM

Santa Maria

2021

## RESUMO

Este trabalho, iniciado em setembro de 2020, tem como objetivo estudar a atmosfera, em especial a ocorrência de ondas de gravidade e a luminescência atmosférica; Instruir-se dos equipamentos utilizados para investigar as ondas de gravidade (Radar Meteorológico e Imageador All-Sky); gerar os keogramas para os anos de 2007 e analisá-los; Aplicar a técnica espectral de Fourier para obter os parâmetros das ondas de gravidade de média escala. Inicialmente, o trabalho tratou de interpretar claramente os tópicos teóricos, compreender que as ondas de gravidade atmosféricas são definidas como perturbações transversais ao vetor de propagação de energia, e que um dos mecanismos físicos que possibilita o surgimento delas é o desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão. Dentre as temáticas estudadas, vale ressaltar o tópico das divisões da atmosfera segundo o perfil vertical de temperatura. A região da Mesosfera e Termosfera são importantes para esta pesquisa; na Mesosfera localizam-se várias camadas de airglow e, apoiado nisso, pode-se investigar a atividade das ondas de gravidade de diversas escalas espacial e temporal; na Termosfera há registros de grande ocorrência de fenômenos eletromagnéticos e a emissão do airglow na linha vermelha do oxigênio atômico (OI 630,0 nm), que é muito importante para monitorar fenômenos que perturbam a ionosfera terrestre. Após a familiarização com a linguagem de programação IDL (*Interactive Data Language*), foi possível reconhecer as ondas de gravidade em imagens sequenciais e nas estruturas de keogramas. As observações a serem mostradas neste trabalho foram conduzidas na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) no ano de 2007, e o foco deste trabalho são as ondas de média escala (entre ~60 e 500 km) identificadas em keogramas. Até o momento, um total de 80 keogramas foram gerados em 83 noites de observação e cerca de 30 keogramas foram analisados. Para a obtenção das características físicas das ondas de gravidade de média escala e suas direções de propagação, utilizou-se a técnica de transformada de Fourier unidimensional. Os parâmetros de onda caracterizados até o momento mostram-se nos seguintes intervalos: comprimento de onda horizontal entre 61,6 e 480 km; período observado entre ~ 5 e 32 minutos e velocidades entre 83 e 900 m/s. A perspectiva futura é a finalização da análise das ondas para o ano de 2007, incluindo a análise das direções de propagação, e posteriormente investigar os eventos de onda de média escala nos anos de 2010 e 2011.

Palavras-chave: Aeroluminescência. Ondas de Gravidade de Média Escala. Mesosfera.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág</u>
2.1 Esquema de Funcionamento do Imageador All Sky. Fonte: PIMENTA, A. A.. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial – INPE, São José dos Campos, 2002. ....	6
2.2 Imagem de um Keograma do dia 10/07/2007. Fonte: próprio autor.....	7
2.3 Figura com o box destaque e resultados do keograma do dia 10/09/2007. Fonte: próprio autor.....	8

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Níveis Críticos.....	4
<b>3. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....</b>	<b>5</b>
3.1 Imageador All-Sky.....	5
3.2 Análise das Ondas de média escala.....	6
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>7</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>6. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....</b>	<b>10</b>

## 1. Introdução

Na atmosfera, importantes fenômenos químicos e físicos ocorrem, isso faz com que o estudo da atmosfera terrestre seja de grande relevância e interesse, pois permite monitorar as mudanças que nela estão ocorrendo. Como exemplo podemos usar a região entre 80 e 100 km (média atmosfera), sendo uma área valiosa em interações fotoquímicas e dinâmicas, nela localizamos as camadas de airglow, as nuvens noctilucetas e as camadas de metais meteóricos.

Tais níveis da atmosfera são divididos em: Troposfera; Estratosfera; Mesosfera, sendo esse um nível muito importante, pois ali localizam-se várias camadas de airglow e pode-se investigar o funcionamento das ondas de gravidade; Termosfera, na qual há registros da emissão do airglow na linha vermelha do Oxigênio (OI 630,0 nm).

As ondas de gravidade atmosféricas podem ser definidas como perturbações transversais ao vetor de propagação de energia. Elas são geradas quando uma parcela de ar é perturbada do seu estado de equilíbrio, e esta perturbação pode ser de origem mecânica, quando uma parcela de ar desloca-se sobre uma elevação terrestre ou térmica, por convecção. Estas ondas propagam-se ascendentemente na atmosfera e crescem em amplitude de forma exponencial, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura (BAGESTON, 2009).

A importância das ondas de gravidade se dá pela influência destas na circulação atmosférica e no estado térmico da média atmosfera (VINCENT, 1994), sendo esses os principais motivos para se entender as mudanças sazonais e latitudinais da atividade das ondas de gravidade.

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Estudar com precisão a atmosfera, saber como está dividida, aprender os fenômenos da alta atmosfera, em especial a ocorrência de ondas de gravidade e a luminescência atmosférica

2. Instruir-se dos instrumentos utilizados para investigar as ondas de gravidade (Radar Meteórico e Imageador All-Sky).

3. Compreender, também, a técnica de análise espectral de Fourier e saber como utilizá-las para obter os parâmetros das ondas de gravidade de pequena e de média escala;

4. Gerar os *keogramas* para os anos de 2007 e analisá-los;

5. identificar as ondas de gravidade em animações de imagens originais e em *keogramas*;

6. Aplicar a técnica de Fourier para obter os parâmetros das ondas de gravidade de média escala;

Uma campanha observacional de airglow na Estação Antártica Comandante Ferraz entre abril e outubro de 2007, utilizando um imageador all-sky, foi realizada com o objetivo de investigar as características das ondas de gravidade em altitudes mesosféricas. Durante a campanha, foi possível identificar um total de 241 eventos de onda em 43 noites de observação. (BAGESTON,2009). No presente trabalho, as ondas a serem estudadas são as ondas de gravidade de média escala, e a principal motivação do estudo foi a precariedade de análise das ondas de gravidade sobre a Antártica. Ademais, trabalhos consideravelmente recentes com observações por imageador e por instrumentação em satélite, mostram uma intensa atividade de ondas de gravidade na atmosfera na região da Península Antártica, o que resulta em um interesse maior sobre o assunto.

O presente relatório está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica utilizada para compreender o fenômeno de ondas de gravidade. No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada. No Capítulo 4 são apresentados os principais resultados observados. Por fim é apresentado no Capítulo 5 as principais conclusões deste trabalho.

## 2. Fundamentação Teórica

A atmosfera terrestre é uma camada gasosa formada há cerca de 4,6 bilhões de anos que, com o auxílio das plantas, evoluiu até se tornar o espesso manto de ar que é hoje (KIRCHHOFF, 1991).

A atmosfera terrestre suporta um grande número de fenômenos ondulatórios, essas ondas atmosféricas podem ser divididas em três tipos principais, são elas: ondas longitudinais, ondas cujo deslocamento ocorre na mesma direção de propagação; ondas verticais transversais ou ondas de gravidade, são ondas que se propagam na horizontal e compostas de deslocamentos verticais; ondas horizontais transversais, são ondas que se propagam horizontalmente e compostas de deslocamentos horizontais, perpendiculares à direção de propagação. Elas também podem se apresentar como uma combinação desses três tipos acima (BEER, 1974, apud FECHINE, 2007).

Para compreender a dinâmica da atmosfera, podemos dividi-la em camadas de acordo com temperatura ou densidade de elétrons e íons.

De acordo com a variação de temperatura:

- Troposfera: é a região da atmosfera que vai da superfície terrestre até aproximadamente 12 km de altura, onde a temperatura diminui em função da altitude, chegando a uma temperatura em torno de 220 K.
- Estratosfera: Essa camada inicia acima da tropopausa e estende-se até a estratopausa, aproximadamente 50 km de altitude. A temperatura aumenta devido a absorção da radiação solar ultravioleta pelas moléculas de ozônio e vapor d'água, chegando aproximadamente a 300 K.
- Mesosfera: é a camada acima da estratosfera, nela a temperatura diminui com a altitude, chegando ao mínimo de aproximadamente 190K numa altitude de aproximadamente 90 km. É nessa camada que se encontram as emissões de aeroluminescência atmosférica de maior importância para o estudo das ondas de gravidade.
- Termosfera: é a camada mais externa da atmosfera iniciando acima da mesopausa, a temperatura tende a um máximo e ocorrem fenômenos eletromagnéticos e a emissão do airglow na linha vermelha do oxigênio (OI 630,0 nm).



As ondas de gravidade são ondas atmosféricas verticais transversas que podem ser definidas como perturbações transversais ao vetor de propagação de energia, elas são resultantes do desequilíbrio entre o gradiente de pressão e a força de gravidade, tendo seus períodos característicos de 270 s até 8 h e escala espacial até centenas de quilômetros (FRITTS e ALEXANDER, 2003). Além do transporte vertical de momentum e energia, elas também são importantes quando estão sujeitas a algum processo de canalização, pois acabam confinando o fluxo de energia e momentum a uma limitada faixa de alturas (FECHINE, 2007).

Estas ondas propagam-se na atmosfera de forma ascendente e crescem exponencialmente, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura. Este crescimento ocorre até o nível crítico, onde a maior parte das ondas quebra e transfere energia e momentum para o fluxo básico (BAGESTON, 2009).

Em determinadas alturas, as ondas sofrem efeitos de saturação, depositam energia e transferem momentum ao fluxo médio (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

Na troposfera, as possíveis fontes de geração das ondas de gravidade são os fluxos de ar sobre montanhas, as tempestades convectivas, as atividades frontais, o cisalhamento de vento e as interações onda-onda (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

## **2.1 Níveis críticos**

Considerando que os ventos na atmosfera variam em função da altura, uma onda de gravidade propagante pode encontrar uma região onde o vento apresenta a mesma velocidade de fase da onda, essa região é denominada de nível crítico. Quando uma onda se aproxima de um nível crítico a frequência intrínseca da onda tende a zero e por consequência, o número de onda vertical tende a infinito. Caso o tempo necessário para a onda atingir o nível crítico for muito grande, a onda será absorvida no nível crítico, em vez de ser refletida ou transmitida.

Os níveis críticos podem ocorrer na baixa atmosfera devido às correntes de jato, já na alta atmosfera, quando ocorrem, exercem um efeito importante sobre as ondas de gravidade.

### **3. Instrumentação e Metodologia**

A metodologia utilizada no projeto de pesquisa consistiu, primeiramente, de revisões bibliográficas sobre a atmosfera terrestre, sobre os fenômenos que ocorrem na alta atmosfera, incluindo principalmente a Luminescência Atmosférica (ou Airglow), a partir de livros, dissertações e teses da área em questão (Aeronomia). Posteriormente, o estudo foi focado nas ondas na atmosfera terrestre de forma geral, e finalizando com as ondas de gravidade observadas na Mesosfera.

A última revisão bibliográfica que antecedeu a análise de dados foi sobre programação, pois para a análise dos dados de imagens de airglow e a geração de *keogramas* era necessário familiarização com linguagem de programação *IDL* (*Interactive Data Language*). A análise em questão se refere à aplicação de análise de Fourier em série temporal de “fatias” de imagens, que são orientadas nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste.

Por fim, foi realizado o processamento e análise de dados do imageador all-sky de luminescência atmosférica, construindo um banco de dados de *keogramas*. Esses dados para análise das ondas de média escala já estavam disponíveis, mas para o período (2007, 2010 e 2011) de operação da câmera de baixo custo na Antártica (Estação Antártica Comandante Ferraz – EACF) ainda não se tinha a base de imagens de *keogramas* e análises de ondas de média escala. Para dados antigos da Antártica ainda não haviam sido realizadas análises de ondas de média escala a partir de *keogramas*, pois o foco dos trabalhos até o momento estavam sendo as ondas de pequena escala.

Neste primeiro ano das atividades foram gerados e analisados um ano de dados de *keogramas* (2007).

#### **3.1 Imageador All-Sky**

O imageador é constituído por um sistema de alinhamento óptico e de uma câmera Charge Coupled Device (CCD), que é capaz de detectar as variações na intensidade das emissões de aeroluminescência noturna na região mesosférica e registrá-las através de imagens em arquivos digitais (MEDEIROS, 2001).

O sistema óptico é constituído de uma lente olho de peixe com um campo de visão de 180°, captando a luz de todo o céu do local, um sistema de lentes telecentricas, uma roda de filtros de interferência que selecionam determinadas linhas e bandas da luminescência atmosférica. O imageador também conta com um dispositivo CCD (Charge Coupled Device), um sistema de refrigeração e uma fonte de alimentação.

A Figura 1 mostra o esquema de um imageador all-sky.

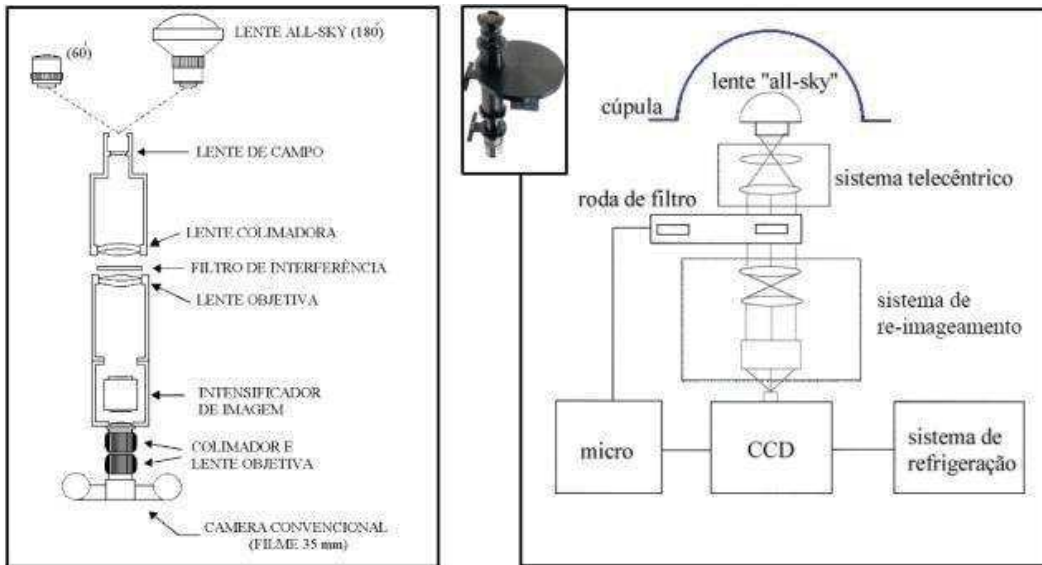


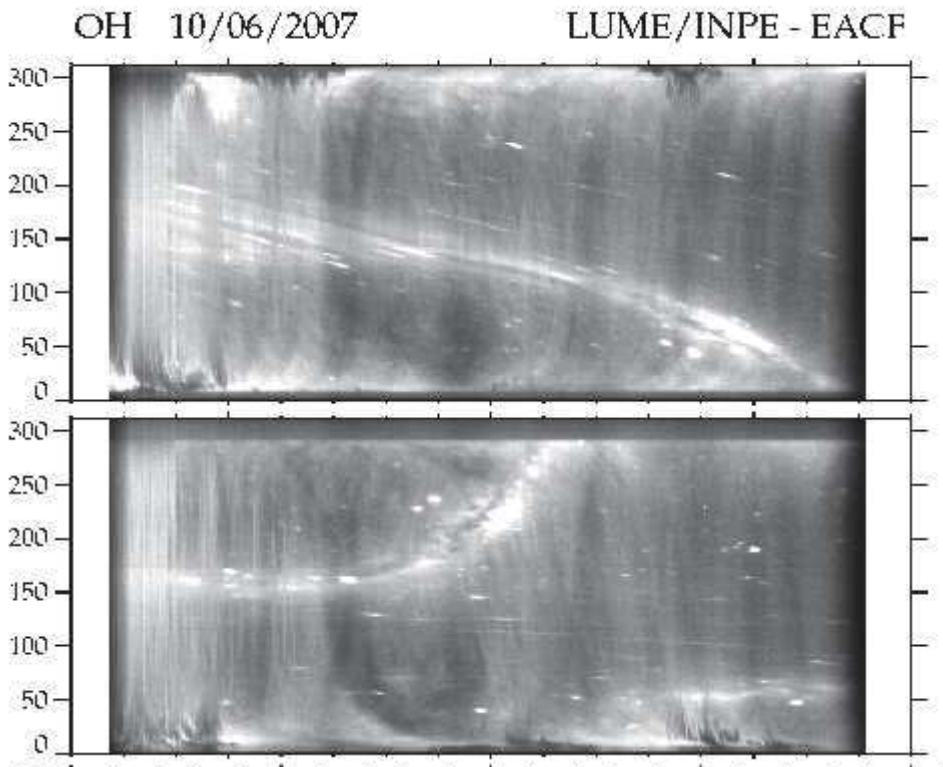
Figura 1: Imageador ALL SKY, (PIMENTA, 2003).

### 3.2 Análise das Ondas de Média Escala

A técnica para a análise das ondas de gravidade de média escala é a dos Keogramas, os quais são imagens correspondentes a uma noite completa de observação, e a partir deles é possível extrair informações de ondas de média e grande escala.

Com a utilização de Keogramas é possível estudar as oscilações que ocorrem em cada direção separadamente, e depois os parâmetros da onda são obtidos por relações geométricas entre as componentes (PAULINO, 2012).

A Figura 2 traz um exemplo de keograma 10/06/2007, nela são apresentados os keogramas zonal (painel superior), e meridional (painel inferior).



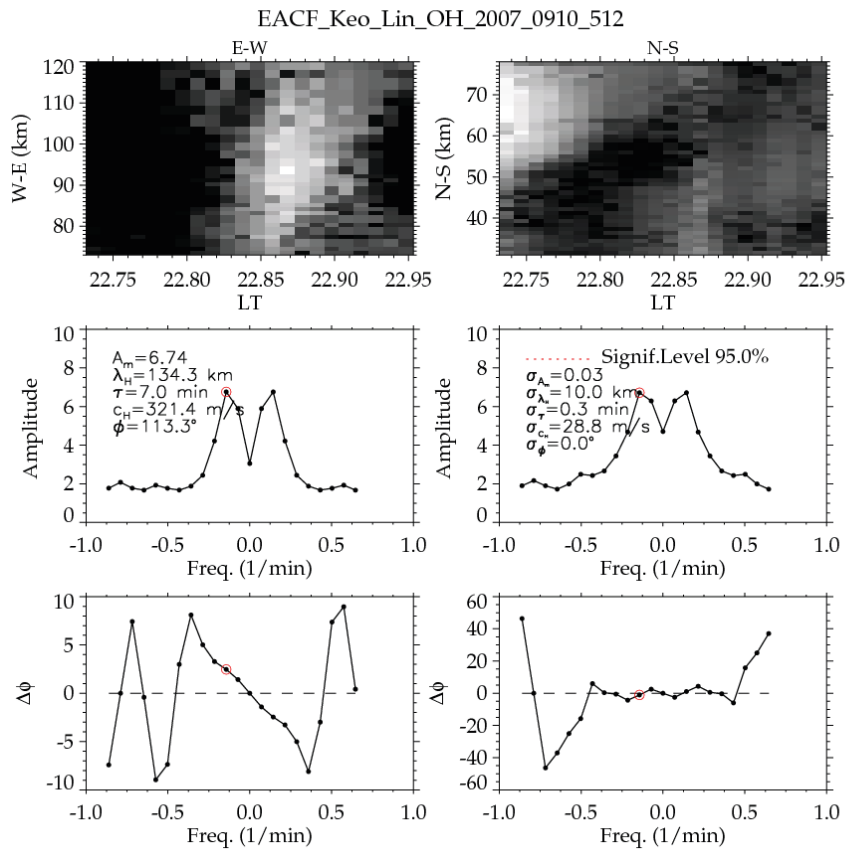
Para realizar a análise dos keogramas, uma região que contenha a oscilação de interesse é escolhida nas duas componentes. Então é aplicada a transformada de Fourier e em seguida é calculado o espectro cruzado. Com isso tem-se a amplitude e a fase do espectro cruzado, e então, de acordo com GIONGO (2016), seguimos o procedimento:

- 1) Definido a frequência a partir da amplitude máxima, determina-se o período;
- 2) Calcula-se a velocidade das componentes zonais e meridionais
- 3) Determina-se o comprimento de onda para as componentes zonais e meridionais.
- 4) Cálculo do comprimento de onda horizontal, a velocidade de fase horizontal e a direção de propagação podem ser obtidas geometricamente.

## 4. Resultados Obtidos

Imagens da aeroluminescência noturna das emissões OH foram usadas com o objetivo de investigar as características das ondas de gravidade de média escala. Com um total de 83 noites analisadas, os resultados mostraram que os 156 eventos de ondas observados apresentaram as seguintes características: comprimentos de onda horizontais entre 61,6 e 480 km, períodos observados entre 5 e 32 min, velocidades de fases entre 83 e 400 m/s.

Um dos eventos identificados de onda de gravidade de média escala na noite de 10/09/2007. A Figura 3 mostra o *keograma* gerado para esta noite.



A Figura 3 mostra os resultados obtidos com a análise dos keogramas da noite. Nele podemos ver em destaque o 'box' selecionado nas figuras superiores, nas figuras do meio vemos a amplitude em função da frequência, e nas inferiores a fase do espectro cruzado em função da frequência.

Como mostrado nas figuras do meio, os parâmetros calculados dessa onda foram: comprimento de onda de 134,3 km, período de 7 min, velocidade de 321,4 m/s e direção de propagação de 113,3°.

## **5. Conclusão**

O presente trabalho tinha como objetivo o estudo dos eventos de ondas de gravidade sobre a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). Para a observação foi feito o uso de um imageador all-sky instalado na estação, a partir das observações das emissões do OH as imagens obtidas foram processadas com o uso de programas computacionais desenvolvidos em *IDL*. Após a redução das imagens, foi feita a identificação dos eventos de ondas dos dados correspondentes ao ano de 2007. Nisso foram identificados 156 eventos de onda de média escala.

Para a análise e caracterização dos eventos foi feita a aplicação da transformada de Fourier discreta, que permitiu a obtenção dos parâmetros físicos das ondas de gravidade, Então se analisou as ondas caracterizadas com a análise espectral de acordo com suas características, em histogramas e gráficos.

## 6. Referências Bibliográficas

ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. Middle atmosphere dynamics. New York: Academic Press, 1987.

BAGESTON, J. V. Caracterização de ondas de gravidade mesosférica na Estação Antártica Comandante Ferraz. 176 p. (INPE-16660-TDI/1618). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009-12-16 2010.

BAGESTON, J. V. Determinação da temperatura da mesosfera superior utilizando um espectro-imageador. 152 p. (INPE-14129-TDI/1080). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BEER, T. Atmospheric waves. London: Adam Hilger, 1974.

FECHINE, J. Estudo de frentes mesosféricas na região equatorial. Tese (Doutorado em Geofísica) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE15179-TDI/1295). 2007.

FIGUEIREDO, C. A. Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes no continente sul americano. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

FRITTS, D. C.; ALEXANDER, M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, v.41, n.1, Apr. 2003.

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



MEDEIROS, A. F. Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência. 187p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, São José dos Campos. (INPE-10478-TDI/932), 2001.

SALBY, M. L. Fundamentals of atmospheric physics. San Diego: Academic Press, 1996.

PAULINO, I. S. Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera ionosfera. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial (Ciências Atmosféricas)) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

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

VINCENT, R. A. Gravity-wave motions in the mesosphere and lower thermosphere observed at mawson, antarctica. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v. 56, n. 5, 1994.

WRASSE, C. M. Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas. Tese (Doutorado em Geofísica) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. (INPE-12249-TDI/978), 2004.

WRASSE, C. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; LIMA, L. M.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; FECHINE, J. Determinação dos parâmetros de ondas de gravidade através da análise espectral de imagens de aeroluminescência. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 3, 2007.