



**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA
OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE
FERRAZ (EACF) E NO BRASIL**

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

Gabriel Augusto Giongo
(UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
CRS/COCRE/INPE–MCTIC
E-mail: gabrielgiongo@hotmail.com

Dr. José Valentin Bageston
(Pesquisador do CRS/COCRE/INPE–MCTIC, Orientador).
E-mail: bageston@gmail.com

COLABORADORES

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/COCRE/INPE)
Dr. Cristiano Max Wrasse (DAE/INPE)
Dr. Cosme Barros Figueiredo (DAE/INPE)

Julho de 2018



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Título:

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA
OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE
FERRAZ (EACF) E NO BRASIL.**

Processo: 139638/2017-2

Aluno Bolsista no período de agosto/2017 a Julho/2018:

Gabriel Augusto Giongo

Acadêmico do Curso de Física Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. José Valentin Bageston

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/COCRE/INPE – MCTIC

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/ COCRE/INPE-MCTIC

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica – CRS/COCRE/INPE

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCTIC & UFSM, por meio do Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica - LMLA/CRS/COCRE /INPE – MCTIC e com apoio do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT – UFSM.



AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiro aos meus pais Jair Valentin Giongo e Sandra Elisa Pertile Giongo, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e me ensinando a viver. Agradeço aos meus irmãos Jorge Luiz e Jair Henrique, e a toda minha família por todo apoio, carinho e incentivo que recebo.

Ao Dr. José Valentin Bageston, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRS/COCRE/INPE–MCTIC), por sua dedicação e orientação nas minhas atividades de Iniciação Científica.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/COCRE/INPE-MCTI, meu Co-orientador e Mentor, por todo apoio, dedicação e orientação que tem me prestado.

Ao grupo de alunos graduandos e pesquisadores do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – (CRS/COCRE/NPE-MCTIC), meus sinceros agradecimentos. Agradeço também á toda equipe de funcionários do CRS, por me proporcionarem um ótimo ambiente de estudos e trabalho.

De maneira geral, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com a execução deste Projeto de Pesquisa.



RESUMO

O presente relatório apresenta as atividades desenvolvidas pelo bolsista Gabriel Augusto Giongo, acadêmico do curso de Física Bacharelado, da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, durante o período de Agosto de 2016 a Julho de 2018, no Projeto de Pesquisa: **“Estudo Das Ondas De Gravidade De Média Escala Observadas Na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e No Brasil”**. O objetivo deste trabalho é o estudo dos eventos de ondas de gravidade atmosféricas de média escala, assim como a análise, caracterização e classificação das mesmas, de acordo com seus parâmetros físicos (comprimento de onda, velocidade de fase, amplitude e direção de propagação), para todos os anos de imageamento da aeroluminescência, ou seja, 2007, 2010, 2011, 2014, 2015 e 2016. Para a identificação e análise das ondas foram utilizados dados obtidos com um imageador *all-sky* instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). A análise dos eventos de onda foi feita utilizando programas computacionais desenvolvidos em IDL (*Interactive Data Language*), onde a técnica utilizada para extração dos parâmetros de onda é a Análise de Fourier bidimensional (FFT-2D). Ao todo, nesses anos citados foram identificadas 146 ondas de gravidade de média escala, que apresentaram as seguintes características: 1) comprimento de onda horizontal variando desde aproximadamente 50 km até próximo de 500 km, com maior ocorrência de ondas entre 50 e 200 km; 2) período observado concentrando-se principalmente entre 15 e 35 minutos; 3) velocidade de fase observada com variação desde 20 a 200 m/s, com maior ocorrência de 50 a 110 m/s. As direções de propagação foram bem variáveis, com a maioria das ondas se propagando para nordeste, leste, sudeste e sul, enquanto que a minoria (25%) das ondas se propagou para sudoeste, oeste, nordeste e norte.



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 A ATMOSFERA TERRESTRE	8
3 ONDAS DE GRAVIDADE	10
4 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA	12
5 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	13
5.1 Imageador <i>All-Sky</i>	13
5.2 Linearizações das Imagens	15
5.3 Análises das Ondas de Pequena Escala	17
5.4 Análises das Ondas de Média Escala	19
6 RESUSTADOS E DISCUSSÕES	22
6.1 Resultados Para as Ondas de Média Escala.....	22
6.2 Instalação do Imageador no Observatório Espacial do Sul (OES/INPE).....	25
6.3 Publicação de Artigo	28
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o perfil de temperatura da atmosfera da Terra.	8
Figura 2: Esquema de propagação de uma onda de gravidade, que demonstra que a amplitude e a velocidade de fase crescem com a altitude.	11
Figura 3: Esquema de um imageador utilizado para medir as emissões da luminescência atmosférica noturna na EACF e em Cacheira Paulista-SP.	13
Figura 4: (A) Fotografia do módulo de observações de airglow, na EACF, onde se encontra o imageador all-sky. (B) Cúpula onde está instalada a câmera imageadora de ondas de gravidade, destacando-se no interior dela parte do sistema telecêntrico e a lente fish-eye.	14
Figura 5: Exemplos de imagens obtidas com o imageador all-sky na emissão do OH NIR na península antártica.	14
Figura 6: Função de lente do imageador all-sky instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz.	16
Figura 7: Mesma imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas.	17
Figura 8: Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral.	18
Figura 9: Espectros médios da transformada de Fourier aplicada no quadro selecionado para a análise da onda no canto inferior da Figura 7.	19
Figura 10: Exemplo de keograma, obtido da noite de 27/08/2011.	20
Figura 11: Resultado da análise do keograma mostrado na Figura 11.	21
Figura 12: Número de eventos de ondas de gravidade de média escala observados na EACF em função dos parâmetros físicos, e do ano de observação.	23
Figura 13: Gráfico do número de eventos em função da direção de propagação para os eventos de ondas de gravidade de média escala.	25
Figura 14: Foto do imageador que foi instalado no OES.	26
Figura 15: Imageador instalado no OES.	26
Figura 16: Tela do programa utilizado na calibração após o cálculo da função de lente.	27
Figura 17: Mapas gerados na calibração do imageador instalado no OES.	28
Figura 18: Ambiente atmosférico no momento de ocorrência de uma frente mesosférica sobre a EACF.	29



1 INTRODUÇÃO

O estudo da atmosfera terrestre é de grande importância, pois nela ocorrem diversos fenômenos físicos e químicos, muitos deles estão fortemente relacionados entre si. Um exemplo de fenômeno químico que ocorre na Média/Alta atmosfera, região entre 80 e 100 km de altura, são as camadas de aeroluminescência ou airglow, que é uma radiação amorfa e muito tênue emitida por átomos e moléculas da atmosfera durante o dia e a noite. A aeroluminescência pode ser estudada com o uso de vários equipamentos, dentre eles o imageador all-sky, destacado como o principal equipamento utilizado nesse trabalho. Como exemplo de fenômeno físico que ocorre na atmosfera podemos citar o movimento de ondas de diversas escalas espacial e temporal.

Uma das propriedades mais importantes da atmosfera é sua capacidade de suportar movimentos de ondas (ANDREWS et al., 1987), sendo que tais ondas podem ser de diferentes tipos, de acordo com suas escalas espacial e temporal. As ondas na atmosfera são geradas quando uma parcela de ar é perturbada do seu estado de equilíbrio. Esta perturbação pode ser de origem mecânica, por exemplo, quando uma parcela de ar desloca-se sobre uma elevação terrestre; ou térmica, por convecção. O movimento dessas ondas na atmosfera comunica a influência de uma região para a outra através da transferência de energia e momentum (SALBY, 1996).

As ondas de gravidade são causadas pelo desequilíbrio entre a força gravitacional e o gradiente de pressão. Estudos recentes sugerem que as ondas de gravidade atuam como importante fonte de perturbação de mesoescala na atmosfera. Em determinadas alturas mesosféricas, as ondas sofrem efeitos de saturação e, conseqüentemente, depositam energia e transferem momento ao fluxo médio, um processo que passa a ser um importante fator na escala de circulação global da alta atmosfera (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

No presente trabalho, as ondas a serem estudadas são as ondas de gravidade de curto período, as quais são conhecidas por desempenharem um importante papel na dinâmica da média atmosfera. A importância das ondas de gravidade se dá pela influência destas na circulação atmosférica e no estado térmico da média atmosfera (VINCENT, 1994).

2 A ATMOSFERA TERRESTRE

A atmosfera terrestre é a camada gasosa que rodeia e acompanha o movimento da Terra e foi formada há cerca de 4,6 bilhões de anos. Inicialmente os gases presos no interior da Terra (CO_2 , H_2 e H_2O), escapavam e a envolviam; com as plantas a atmosfera evoluiu até se tornar o espesso manto de ar que é hoje (KIRCHHOFF, 1991).

Para estudar a atmosfera ela pode se dividi-la em camadas de acordo com determinados parâmetros, por exemplo, temperatura ou densidade de elétrons e íons. A classificação da atmosfera, de acordo com o perfil vertical de temperatura é mostrada de forma esquemática na Figura 1. Nesta figura observam-se quatro camadas: Troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. As inflexões ou gradientes nulos de temperatura são chamados de “pausas”, ou seja, Tropopausa, Estratopausa, Mesopausa. A Figura 1 mostra as principais camadas de emissão da aeroluminescência, que serão descrita em detalhes no Capítulo 4.

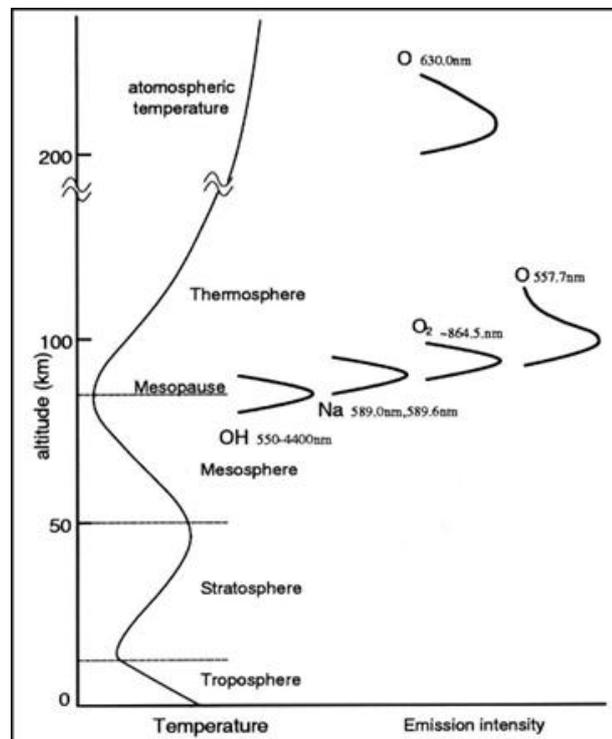


Figura 1: As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o perfil de temperatura da atmosfera da Terra. Fonte: MAEKAWA (2000, p.4).

As camadas de acordo com a variação de temperatura são detalhadas a seguir:

- **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 ao primeiro mínimo de temperatura na tropopausa, em torno de 220 K. Essa diminuição se deve principalmente a expansão adiabática da Atmosfera, que foi aquecida pela energia na forma de calor cedida pelo solo que absorveu radiação solar.



- **Estratosfera:** Essa camada inicia acima da tropopausa e estende-se até aproximadamente 50 km de altitude até a estratopausa, a temperatura volta a aumentar principalmente devido à absorção da radiação solar ultravioleta pelas moléculas de ozônio e vapor d'água, chegando a um máximo de aproximadamente 300 K.
- **Mesosfera:** é a camada situada acima da estratosfera nela a temperatura diminui com a altitude até chegar ao mínimo de aproximadamente 190K numa altitude de aproximadamente 90 km, denominada de mesopausa. É nessa camada que se encontra 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).

3 ONDAS DE GRAVIDADE

As ondas de gravidade são perturbações transversais ao vetor de propagação de energia da onda, com períodos característicos desde minutos até horas e escala espacial de alguns quilômetros até centenas de quilômetros. O mecanismo físico que possibilita o surgimento das ondas de gravidade é o desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão (ou empuxo). Estas ondas propagam-se ascendentemente na atmosfera e crescem em amplitude de forma exponencial, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura. Este crescimento ocorre até alcançar um nível crítico, onde a maior parte das ondas quebra e transfere energia e momentum para o fluxo básico (BEER, 1974).

As ondas de gravidade atmosféricas constituem uma área de intensa atividade de pesquisa nos últimos anos, devido à variedade de efeitos e contribuições destas ondas na circulação, estrutura e variabilidade atmosférica (FRITTS e ALEXANDER, 2003).

As ondas de gravidade podem ser descritas através de uma teoria de perturbação de primeira ordem que é válida para movimentos ondulatórios de pequena amplitude. Porém, nesta aproximação a velocidade do fluido deve ser muito menor que a velocidade de fase da onda, o que resulta na filtragem de todas as interações de ordem superior entre as ondas de diferentes comprimentos de onda e períodos (FECHINE, 2007).

De acordo com a equação de Taylor-Goldstein (ALMEIDA, 2010, P.28), principal equação que descreve a propagação das ondas de gravidade, as ondas podem ser classificadas como propagantes ou evanescentes. As ondas propagantes são caracterizadas por se propagarem tanto na horizontal quanto na vertical, enquanto que as ondas evanescentes se propagam apenas horizontalmente. As ondas propagantes incluem as ondas internas de gravidade, que, ao se deslocarem ascendentemente na atmosfera aumentam sua amplitude, devido ao decréscimo da densidade atmosférica, de forma a manter a conservação da energia (BAGESTON, 2010).

A Figura 2 mostra uma onda de gravidade se propagando. Observa-se na figura que a energia da onda se propaga em um ângulo reto em relação à velocidade de fase da onda e a amplitude da onda aumenta com a altitude (HARGREAVES, 1992).

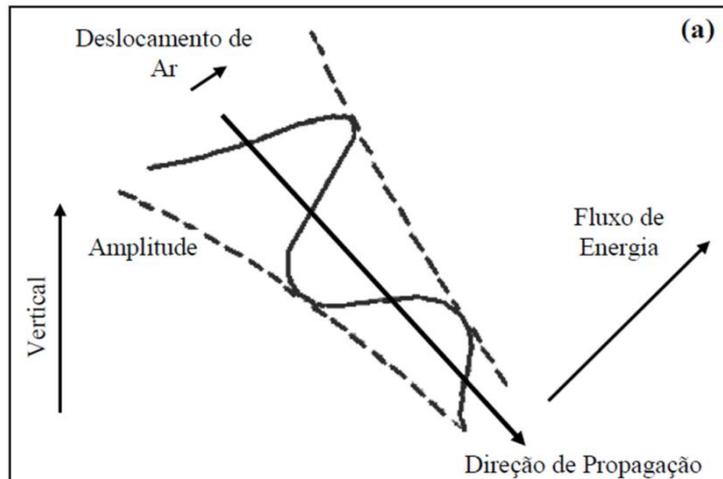


Figura 2: Esquema de propagação de uma onda de gravidade, que demonstra que a amplitude e a velocidade de fase crescem com a altitude. Fonte: Adaptado de Hargreaves (1992, p.126)

Uma onda de gravidade, ao se propagar na atmosfera, pode encontrar uma região onde o vento médio apresenta a mesma velocidade de fase (mesma magnitude, direção e sentido) da onda (BAGESTON, 2010). Quando isso acontece, chama-se esta região de nível crítico.

Diversos campos atmosféricos podem influenciar na propagação das ondas de gravidade, sendo que os principais campos são os de ventos e de temperatura. A variação desses campos na atmosfera podem causar reflexão das ondas ou formar canais onde estas podem se propagar. Estes canais são conhecidos como ducto térmico, devido a gradientes de temperatura, ou ducto Doppler, causado por gradientes de vento (ISLER et al., 1997).

O surgimento destes canais na atmosfera limita a propagação vertical das ondas de gravidade e restringe o transporte de energia e momentum destas ondas para a área confinada pelo canal, podendo a onda se deslocar grandes distâncias horizontais nesses canais (WRASSE, 2004).

A geração das ondas de gravidade depende da condição de estabilidade atmosférica e da presença de algum distúrbio que possa gerar tais instabilidades e levar a formação da onda (WRASSE, 2004). 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).

Em relação aos efeitos na fotoquímica da mesosfera, pode-se dizer que as ondas de gravidade são de grande interesse para as flutuações das emissões de airglow, uma vez que estas são afetadas pelas ondas de gravidade que se propagam através das camadas de emissão, causando flutuações no brilho (intensidade) das emissões e nas temperaturas medidas (HINES e TARASICK, 1994).



4 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A luminescência atmosférica ou aeroluminescência (do inglês *airglow*) é definida como a luz continuamente emitida pela atmosfera da Terra (CHAMBERLAIN, 1961). Essa emissão é causada pelas reações químicas dos constituintes atmosféricos, devido à excitação ao absorver a radiação proveniente do sol, ou de outras fontes cósmicas. Esses constituintes, ao relaxarem emitem uma tênue luz, mas de extensa faixa espectral, que denominamos de aeroluminescência.

A aeroluminescência ocorre durante todo o dia e em qualquer latitude, mas é durante a noite que ela se torna útil para o estudo das ondas de gravidade, pois é mais fácil separar as emissões da aeroluminescência do espectro de radiação celeste.

Inicialmente, a aeroluminescência era confundida com as auroras, que ocorrem nas regiões polares durante a noite. Posteriormente, análises mais cuidadosas do espectro emitido pelo céu noturno levaram a uma boa diferenciação desses dois tipos de radiação (BAGESTON, 2005).

No início do século XX, sabia-se que o oxigênio era o responsável pela emissão das linhas nos comprimentos de onda 557,7 nm e 630,0 nm. Rayleigh (1930), que foi um grande estudioso da linha 557,7 nm, conseguiu distinguir as auroras da aeroluminescência, chamando esta última de “aurora não-polar”, que mais tarde passou a se chamar de *airglow* ou aeroluminescência. Em homenagem a este pesquisador deve-se o nome da unidade de intensidade absoluta, normalmente utilizado em Aeronomia, o Rayleigh (R), já definido anteriormente (BAGESTON, 2005).

Algumas das linhas mais importantes da emissão da aeroluminescência, do ponto de vista da Aeronomia, são as linhas espectrais do oxigênio atômico em 557,7 nm (verde) e 630,0 nm (vermelha); o duplete de sódio, em 589,3 nm; as bandas de emissão do radical hidroxila, OH, ditas bandas de Meinel, e as bandas do oxigênio molecular (BAGESTON, 2005).

A aeroluminescência atmosférica é utilizada para se estudar ondas de gravidade devido à perturbação que estas ondas causam sobre as camadas emissoras. Parte-se do princípio que, a passagem de ondas pela região emissora pode elevar ou baixar a altura destas camadas adiabaticamente. Assim, é possível relacionar a perturbação na altura da camada também com mudanças de temperaturas pelo processo adiabático. Enquanto a mudança na densidade é responsável pela mudança na intensidade, as mudanças de temperatura irão afetar os coeficientes de taxa de reação nos processos que produzem as camadas, e então a intensidade de luz radiada irá mudar (MEDEIROS, 2001).

5 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

5.1 Imageador *All-Sky*

O imageador é um equipamento basicamente constituído por um sistema óptico e por uma câmara com detector CCD, sigla em inglês para *Charge Coupled Device*, que é capaz de detectar as variações na intensidade das emissões de aeroluminescência noturna na região mesosférica e registrá-las por meio de imagens (MEDEIROS, 2001).

O sistema óptico do imageador é constituído de uma lente *all-sky*, ou *fish eye*, com um campo de visão de 180°, que capta toda a luz do céu noturno local; um sistema de lentes telecêntricas e uma roda de filtros que seleciona as linhas ou bandas da luminescência atmosférica (como por exemplo, a banda OH NIR). O imageador também conta com um sistema de refrigeração na própria CCD e uma fonte de alimentação.

A Figura 3 mostra esquematicamente um imageador *all-sky* como os que estão instalados na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), e em São Martinho da Serra-RS.

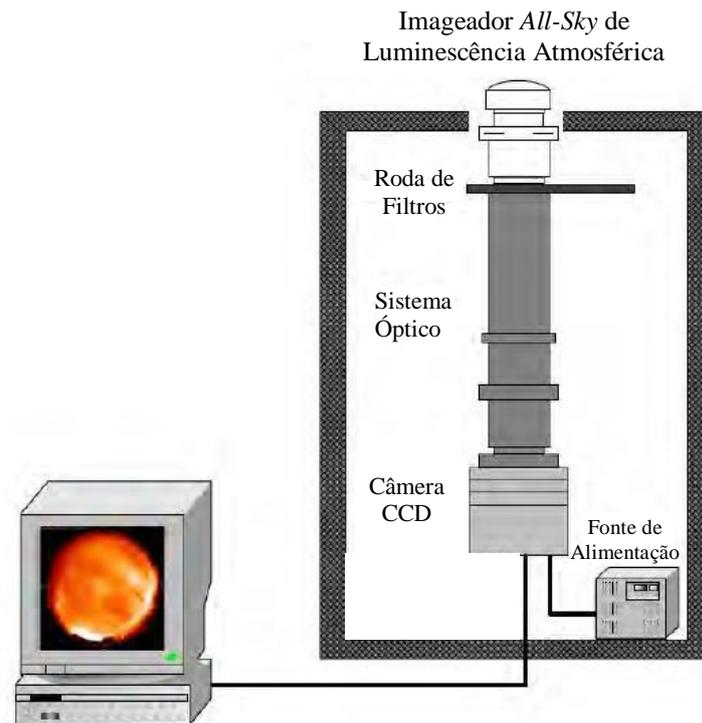


Figura 3: Esquema de um imageador utilizado para medir as emissões da luminescência atmosférica noturna na EACF e em Cacheira Paulista-SP. Fonte: Adaptado de Wrasse (2004).

A seguir, na Figura 4 é apresentada, à esquerda, uma foto que mostra uma visão geral do módulo de Punta Plaza e seus arredores (a aproximadamente 1 km de distância à Oeste da EACF), onde se encontra instalado um imageador *all-sky*. A foto à direita na Figura 4 mostra a cúpula de observação com a parte superior do imageador e sua lente *fish-eye* no interior da cúpula.



Figura 4: (A) Fotografia do módulo de observações de airglow, na EACF, onde se encontra o imageador all-sky. (B) Cúpula onde está instalada a câmera imageadora de ondas de gravidade, destacando-se no interior dela parte do sistema telecêntrico e a lente fish-eye.

As principais vantagens na técnica do imageamento no estudo da dinâmica da atmosfera, incluindo os estudos das ondas de gravidade, é a grande área espacial visualizada nas imagens, sendo possível a visualização simultânea de diferentes estruturas ondulatórias nas imagens; a possibilidade de investigar a propagação vertical de ondas com a utilização de dois ou mais filtros de interferência e a investigação de estruturas de ondas com alguns quilômetros (~6 km) até estruturas de dezenas de quilômetros (MEDEIROS, 2001).

A Figura 5 apresenta dois exemplos de imagens obtidas pelo imageador *all-sky* da EACF, na banda de emissão do OH NIR. Na imagem à direita da Figura 5, apresentamos duas caixas que estão identificando duas de ondas de gravidade presentes nas imagens e setas que estão indicando a direção de propagação das ondas.

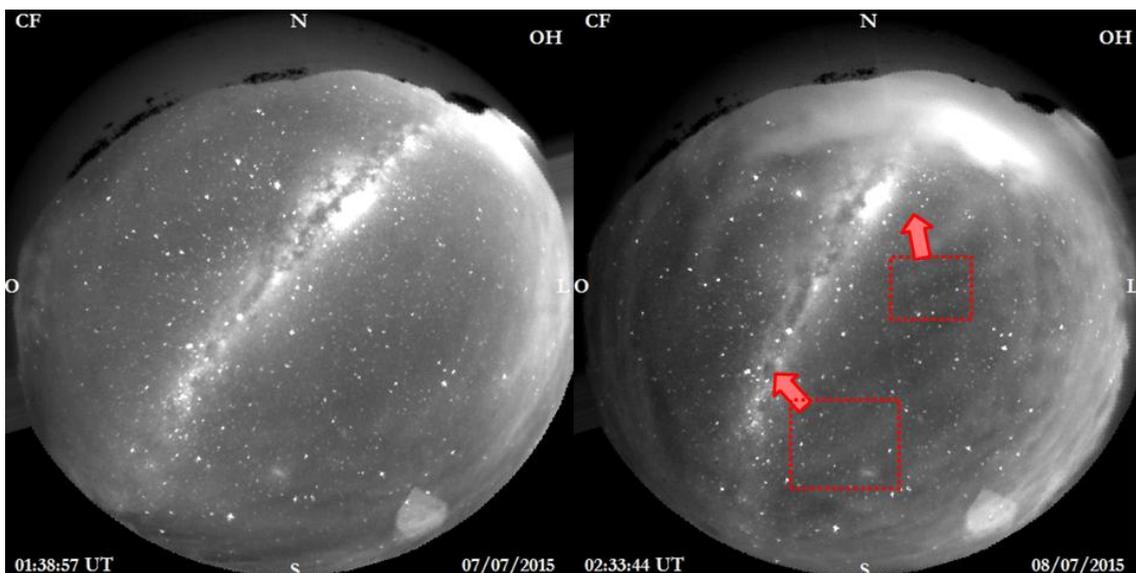


Figura 5: Exemplos de imagens obtidas com o imageador all-sky na emissão do OH NIR na península antártica. A esquerda imagem do dia 07/07/2015 as 01:38 UT, e, a direita, imagem do dia 12/08/2015 as 05:50 UT, em que identifica-se a presença de oscilações. Na figura a direita, há duas caixas sobre as ondas indicando sua posição e setas indicando a direção de propagação.



A partir de observações do airglow por imageadores é possível investigar a estrutura horizontal e as características das ondas de gravidade por meio de técnica de análise espectral. Em geral, as emissões de airglow utilizadas para esse fim são as provenientes da região da Mesosfera (~80–100 km), ou seja, as emissões do OH NIR; do OI 557,7 nm; do Na (²P) e do O₂(0-1). Os imageadores de airglow são mais adequados para observar ondas de gravidade com curtos períodos (tipicamente menores que 1 hora) e com pequenos comprimentos de onda horizontal (<100 km) (BAGESTON, 2010).

A espessura das camadas de emissão da Mesosfera e baixa Termosfera são tipicamente de 6 a 10 km e possibilita estudar ondas de gravidade com comprimentos de onda verticais maiores que estes limiares. Além disso, também é possível detectar e estudar ondas de gravidade de grandes dimensões horizontais (comprimentos de onda horizontais de centenas de quilômetros) por meio da técnica dos *keogramas* (detalhes na Seção 5.4).

5.2 Linearizações das Imagens

A linearização, ou ajuste das imagens para remover os efeitos de borda, é de extrema importância para determinar as características das ondas de gravidade de forma correta, onde os pixels (sistema de referência da CCD) nas imagens linearizadas podem ser relacionados com o sistema de coordenadas geográficas (GARCIA et al., 1997).

A transformação de coordenadas tem como objetivo mapear as coordenadas da imagem original em coordenadas geográficas, para só então aplicar a análise espectral e determinar o comprimento de onda horizontal, período, velocidade de fase e a direção de propagação das ondas de gravidade (ALMEIDA, 2010).

A metodologia utilizada baseia-se no processo de transformação de coordenadas da imagem original para as coordenadas geográficas (HAPGOOD; TAYLOR, 1982; GARCIA et al., 1997). O método utilizado introduz um sistema de coordenada padrão, que é uma transformação linear das coordenadas da imagem original. Esse novo sistema é representado em termos das coordenadas de azimute e elevação, representadas na calibração por cada estrela que foi identificada na imagem. A partir das coordenadas de azimute e elevação, a imagem é então projetada no sistema de coordenadas geográficas. Nesse último sistema, o zênite é localizado no centro da imagem e x e y correspondem aos eixos leste-oeste e norte-sul, respectivamente (MEDEIROS, 2001).

Com a função da lente determinada é possível mapear as coordenadas da imagem padrão da aeroluminescência em coordenadas geográficas (ALMEIDA, 2010). O algoritmo empregado nesta transformação foi desenvolvido por Maekawa (1998) e descrito em detalhes por Medeiros (2001) em sua tese de doutorado.

A transformação de coordenada da imagem original para coordenada geográfica é na prática, um processo moroso, pois envolve o mapeamento das estrelas mais brilhantes da imagem original (i, j) para a coordenada de azimute e elevação (az,el) .

Este procedimento em geral é feito manualmente e necessita de algum software comercial ou livre que forneça uma carta celeste para o mesmo instante em que a imagem da aeroluminescência foi adquirida. Além disto, este mapeamento requer o maior número de estrelas visíveis na imagem da aeroluminescência, em geral em torno de 40 a 50 estrelas, de forma a minimizar os erros na determinação da função da lente. Todo este processo exige paciência e tempo para que se obtenha um resultado mais preciso possível. A cada mudança no posicionamento do imageador é necessário realizar uma nova calibração espacial (ALMEIDA, 2010).

A próxima etapa da calibração consiste em determinar a função da lente em função da elevação de cada estrela selecionada na etapa anterior (ALMEIDA, 2010). A função de lente para o imageador que se encontra atualmente na EACF é apresentada na Figura 6, nela também pode ser visto a posição do zênite real do local e a rotação inicial que deve ser aplicado á imagem, antes de ela ser utilizada para o processamento e análise.

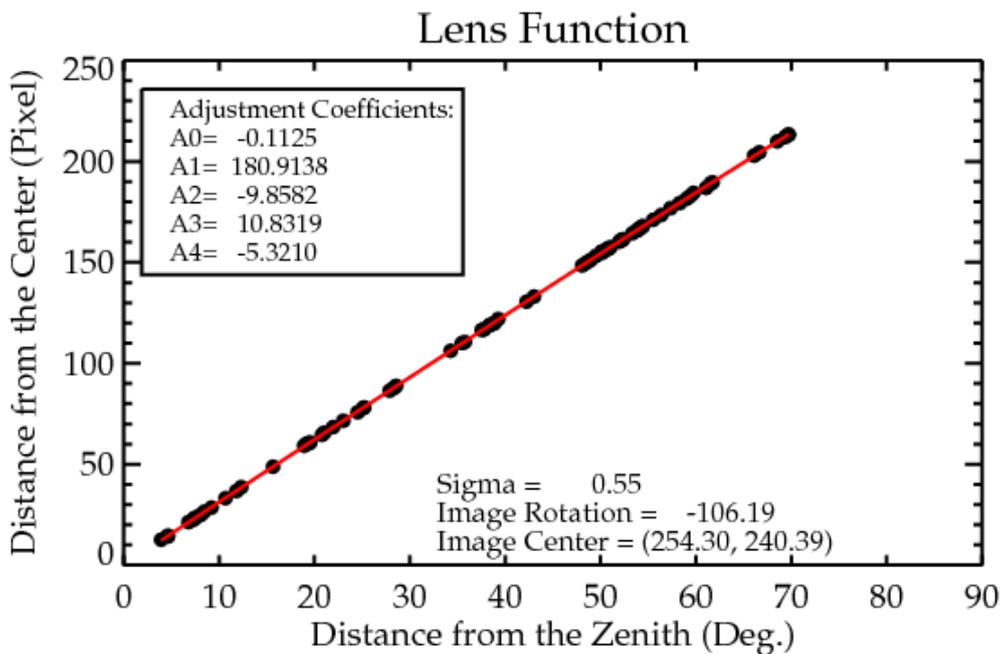


Figura 6: Função de lente do imageador all-sky instalado na Estação Antártica Comandante Ferraz.

A partir dos resultados obtidos no cálculo da função de lente a imagem de airglow é alinhada de modo que seu topo fique para o norte e, posteriormente ela é projetada numa área plana, em coordenadas geográficas, na altura da emissão correspondente. Após a linearização é feita a remoção de estrelas, importante para remover os picos de luminosidade acentuados, e a aplicação de um filtro passa alta com frequência de corte de 5 km.

A Figura 7 mostra a mesma imagem da à direita da Figura 5, onde podemos visualizar duas ondas, mas nesse caso a imagem esta linearizada, filtrada e com as estrelas removidas. Novamente temos setas representando a posição e direção de propagação das ondas.

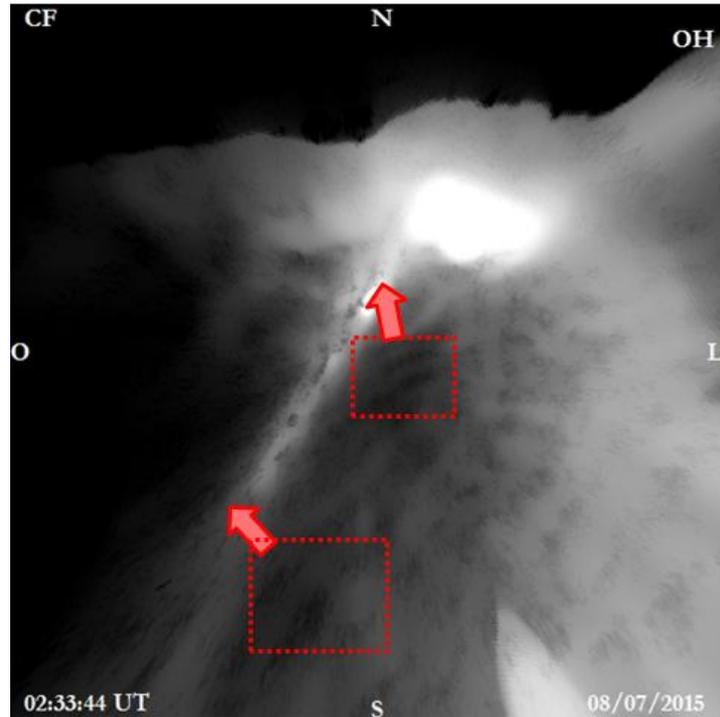


Figura 7: Mesma imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas. A foto contém as caixas indicando a posição das ondas e as setas indicando a direção de propagação das ondas.

5.3 Análises das Ondas de Pequena Escala

Após a identificação dos eventos de onda e o pré-processamento, aplica-se a análise espectral a uma sequência de imagens previamente selecionadas. A Figura 8 mostra a tela do programa desenvolvido para a análise espectral das imagens, em que podemos ver algumas imagens selecionadas, com um evento a ser analisado selecionado com uma 'caixa'. Nessa imagem podemos ver todo o pré-processamento feito com as imagens, antes de se fazer a análise propriamente dita.

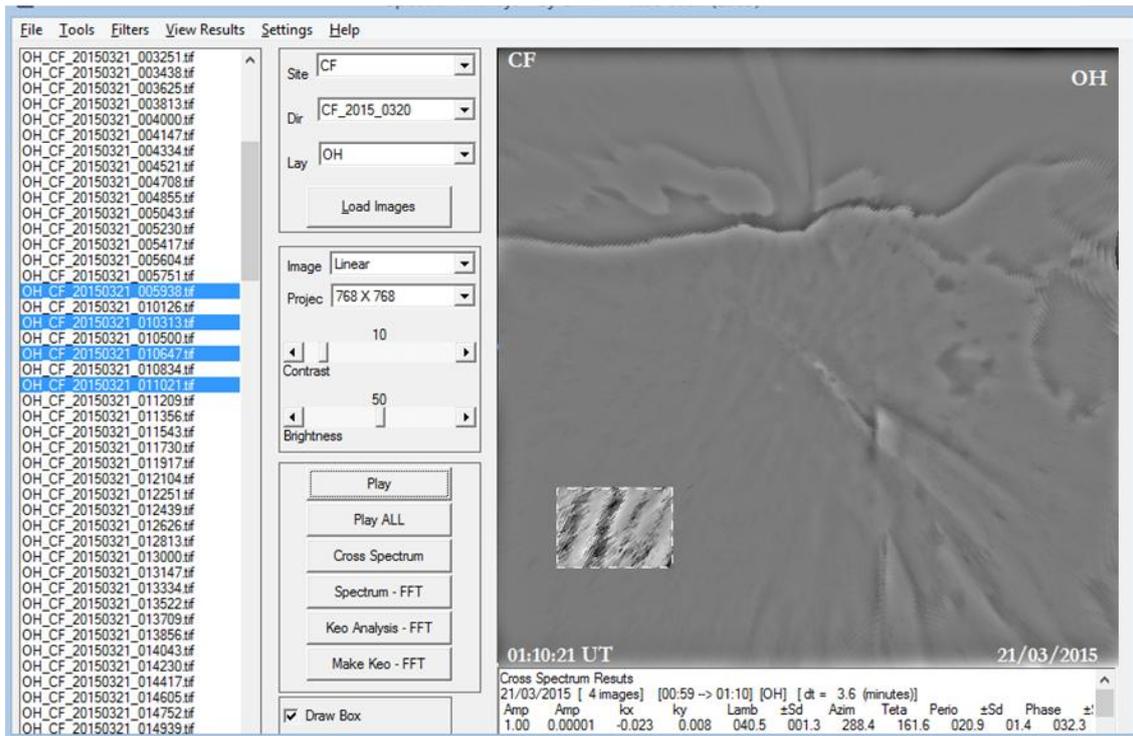


Figura 8: Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral. Nele podemos ver uma sequencia de imagens pré-processadas com uma 'caixa' selecionada no evento a ser analisado.

A análise espectral empregada consiste na aplicação da transformada de Fourier discreta ao conjunto de imagens (BAGESTON, 2010). A descrição completa da aplicação dessa análise nas imagens de airglow pode ser encontrada em Wrasse et al. (2007).

O espectro de potência em duas dimensões é definido pelo módulo quadrático, $|F(k,l)|^2$, da Transformada de Fourier Discreta em duas dimensões (TFD-2D). O espectro de potência é aplicado à região de interesse em todo o conjunto de imagens e então é feito o espectro cruzado, que contém informações sobre a amplitude e fase dos sinais e remove a ambiguidade do sentido de propagação do espectro de potencia.

A amplitude do espectro de potencia é expressa pelo módulo do espectro cruzado e a fase é calculada geometricamente (WRASSE, 2004). Para o número de onda na qual a amplitude é máxima, a fase do espectro cruzado representa a diferença de fase causada pela propagação da onda entre estas imagens. Maekawa (2000) também descreve o procedimento utilizado para determinar os parâmetros das ondas de gravidade utilizando os resultados do espectro cruzado. Wrasse et al. (2007) e Bageston (2010) apresentam exemplos práticos, juntamente com o conjunto de equações da TFD-2D, da aplicação dessa técnica para obter os parâmetros físicos das ondas de gravidade. Se existirem medidas do vento na altura da camada de emissão observada, como as medidas de radar meteorico ou de Média Frequência (MF), simultaneamente às observações das ondas, pode-se determinar o período intrínseco e a velocidade de fase intrínseca das ondas.

A Figura 9, à esquerda, mostra o espectro cruzado de cinco imagens sucessivas da onda indicada na parte inferior da Figura 7. Nele podemos extrair a direção de propagação da onda e o comprimento de onda horizontal. A direita da Figura 9 mostra o espectro de fase médio associado ao espectro cruzado médio a sua esquerda. Com ele podemos calcular a velocidade de fase da onda, e juntamente com o comprimento de onda extraído do espectro de potencia é calculado o período da onda.

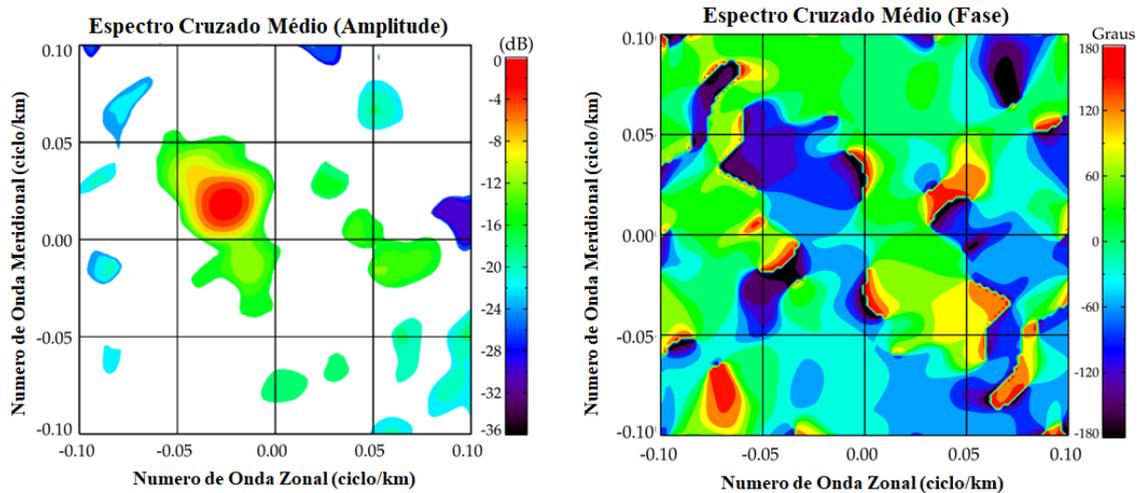


Figura 9: Espectros médios da transformada de Fourier aplicada no quadro selecionado para a análise da onda no canto inferior da Figura 7. À esquerda, Espectro de potencia médio, e a direita, espectro de fase médio.

5.4 Análises das Ondas de Média Escala

A melhor técnica para a análise das ondas de gravidade de média escala é a dos *Keogramas*. Essa técnica consiste, basicamente, de cortes meridionais (norte-sul) e zonais (leste-oeste) nas imagens de aeroluminescência, no final de todos os cortes é formado um mosaico ao longo do tempo, sendo mais simples a visualização das oscilações, pois a mesmas estão estáticas (FIGUEIREDO, 2015).

Os cortes utilizados, em geral, atravessam as imagens inteiras e passam pelo centro da imagem (zênite local). Com a utilização de *Keogramas* é possível estudar separadamente as oscilações que ocorrem exclusivamente em cada direção (zonal e meridional) e depois os parâmetros da onda são obtidos por relações geométricas entre as componentes (PAULINO, 2012).

A Figura 11 apresenta um exemplo de *keograma* da noite de 27/08/2011, nela são apresentados os *keogramas* zonal (painel superior), e meridional (painel inferior), os eixos horizontais indicam o tempo em horas UT. As ‘caixas’ em branco indicam a seleção de um evento de onda a ser analisado.

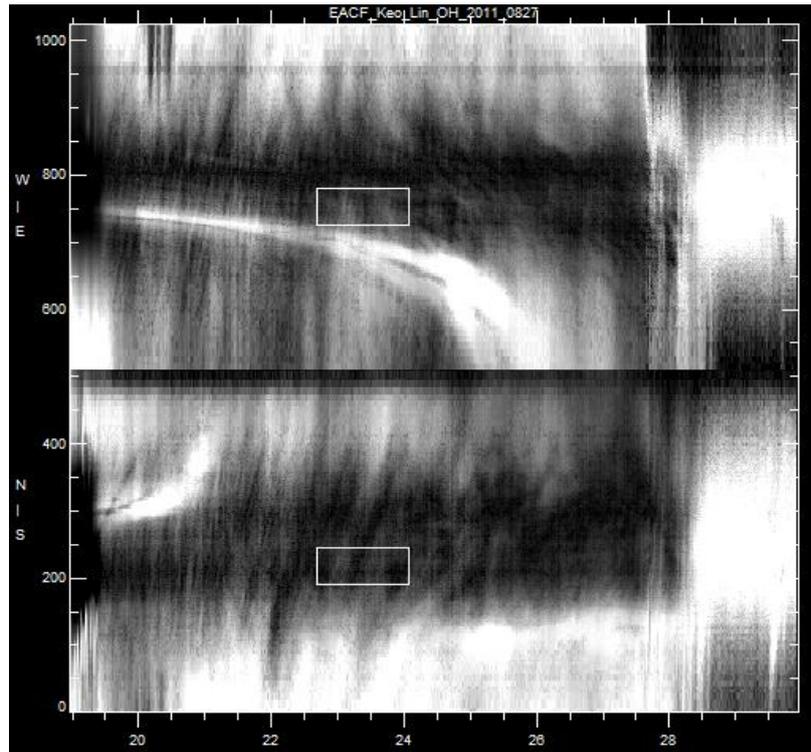


Figura 10: Exemplo de keograma, obtido da noite de 27/08/2011. O painel superior apresenta o keograma zonal (E-O) e o inferior o keograma meridional (N-S), e o eixo horizontal representa o tempo. A ‘caixa’ branca mostra a seleção de um evento de onda de gravidade de média escala.

Para realizar a análise espectral dos *keogramas* é escolhida uma região que contenha a oscilação de interesse tanto na componente zonal como na componente meridional, assim como na Figura 11, ressaltando que a dimensão da seleção deve ser igual nos dois *keogramas* (FIGUEIREDO, 2017). Então é aplicada a transformada de Fourier discreta, em seguida é calculado o espectro cruzado. Com o espectro cruzado de potencia unidimensional tem se a amplitude e a fase do mesmo, e então segue o procedimento:

- Definido a frequência a partir da amplitude máxima, determina-se o período
- Depois, calcula-se a velocidade das componentes zonais e meridionais
- Em seguida, determina-se o comprimento de onda para as componentes zonais e meridionais.
- Por fim, o calculo do comprimento de onda horizontal, a velocidade de fase horizontal e a direção de propagação podem ser obtidas geometricamente.

A Figura 12 mostra o resultado da análise feita para a onda selecionada no *keograma* da Figura 11, nela podemos ver em destaque as ‘caixas’ selecionadas nos *keogramas*, que claramente demonstram um movimento ondulatório. Podemos ver também a amplitude do espectro cruzado das respectivas ‘caixas’ e os parâmetros calculados para a onda selecionada. A onda analisada teve um comprimento de onda de 184,3 km, período de 41,5 min, velocidade de fase de 73,9 m/s, e direção de propagação de 311,1°.

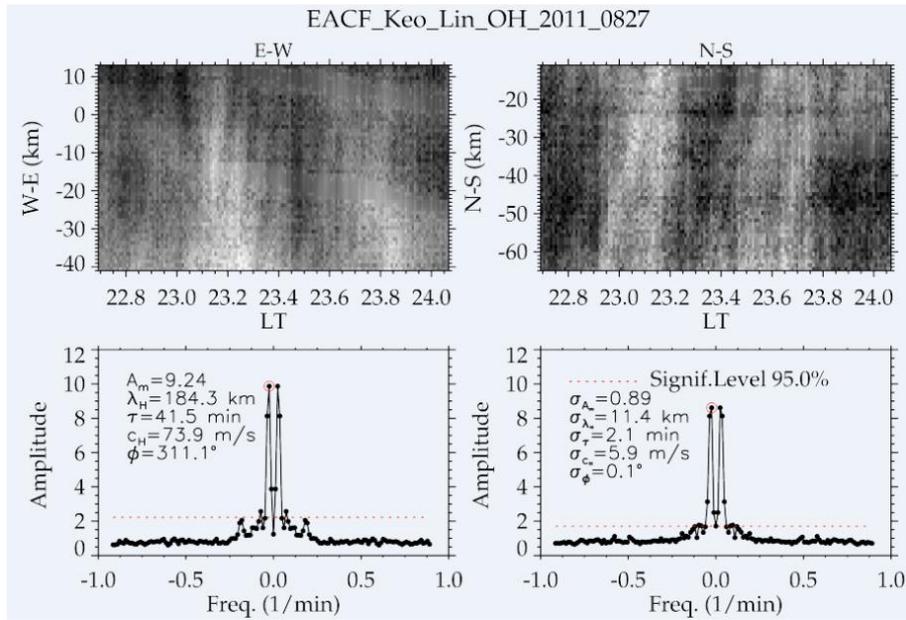


Figura 11: Resultado da análise do keograma mostrado na Figura 11. As imagens superiores mostram em destaque as ‘caixas’ selecionadas nos keogramas zonal e meridional. As imagens inferiores mostram a amplitude do espectro cruzado das respectivas ‘caixas’, também vemos os parâmetros calculados para a onda, e os valores de desvio padrão.

Um ponto que se deve atentar é na hora de selecionar a ‘caixa’. Preocupar-se em escolher a região que tenha a oscilação bem definida e, sobretudo selecionar uma região, no tempo, que englobe o dobro do tamanho da oscilação, porque isso é um fator preponderante no cálculo do período e no restante dos parâmetros da oscilação (FIGUEIREDO, 2015).



6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As primeiras atividades previstas para o decorrer do projeto era a revisão bibliográfica do assunto relacionado. Foi feita uma revisão mais aprofundada sobre a calibração e o pré- processamento das imagens de aeroluminescência, assim como a instrumentação envolvida, e o uso de programas computacionais desenvolvidos em IDL. Também foram realizados seminários semanais em que participaram os alunos bolsistas e estagiários e pesquisadores do CRS/INPE.

Na primeira parte deste projeto foram adquiridos os resultados, apresentados no relatório do período anterior desse projeto, referentes apenas às observações realizadas na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) para os anos de 2014 e 2015, para o caso das ondas de pequena escala.

Na segunda parte deste projeto focou-se na análise das ondas de média escala observadas através dos *keogramas* gerados para os anos citados, e para anos anteriores, também da Estação Antártica Comandante Ferraz. Também foi apresentado no relatório do período anterior, a instalação do imageador no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE) em São Martinho da Serra-RS, e a calibração das imagens obtidas através deste.

Neste período, as principais atividades foram: Um melhor processamento dos resultados das ondas de média escala, que inclui uma análise dos parâmetros ano a ano, assim como o número de eventos por ano; e a publicação de um artigo em uma revista internacional.

Assim, nesse relatório serão apresentados os resultados para as ondas de média escala mais detalhados que no relatório do período anterior. A instalação do imageador será apresentada de forma mais breve, assim como será também omitido os resultados para as ondas de pequena escala, já descrito em detalhes no relatório anterior. E por fim, será descrito os resultados principais do artigo já publicado.

6.1 Resultados Para as Ondas de Média Escala

Foram gerados *keogramas* das imagens de airglow da EACF para os anos de 2007, 2010, 2011, 2014, 2015 e 2016, cujos dias tiveram mais de duas horas de observação. Dentre estes foram úteis somente aqueles em que o céu estava limpo e sem contaminação luminosa. Nestes *keogramas* foram identificados eventos de ondas de gravidade de média escala, em que foi feita a análise espectral conforme descrita na seção anterior.

No total, foram 146 eventos de ondas de gravidade de média escala identificados e analisados. Estes eventos foram classificados de acordo com seus parâmetros físicos: comprimento de onda, período, velocidade de fase e direção de propagação.

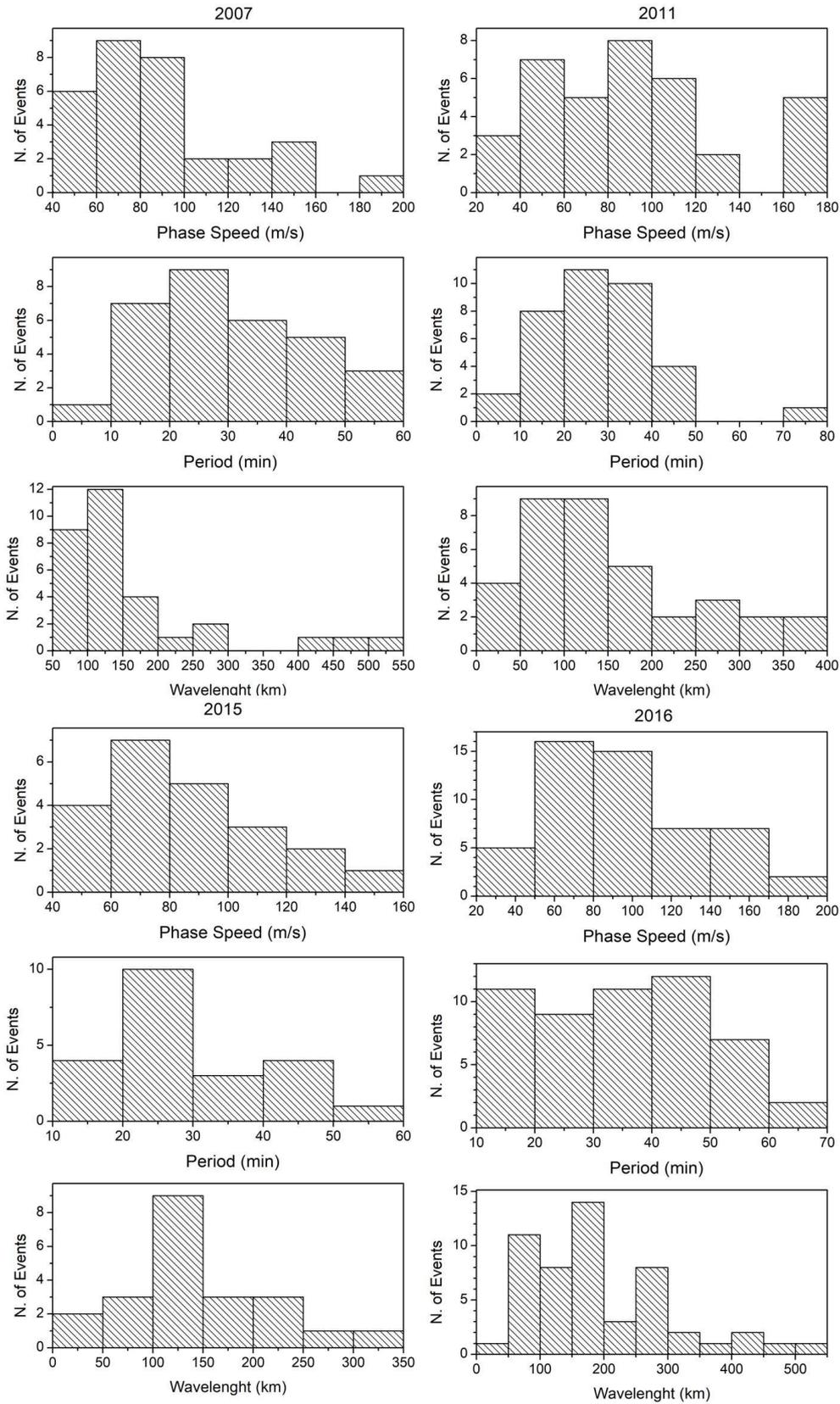


Figura 12: Número de eventos de ondas de gravidade de média escala observados na EACF em função dos parâmetros físicos, e do ano de observação.

A Figura 12 mostra os histogramas da distribuição do número de ondas em função de determinado parâmetro físico e do ano de observação. Para cada ano, há 3 histogramas: o histograma superior mostra o número de ondas em função da velocidade de fase horizontal, o histograma do meio em função do período, e o histograma inferior em função do comprimento de onda horizontal. Apenas 4 dos anos citados aparecem na Figura 12, os demais anos foram omitidos por possuírem um número muito pequeno de ondas identificadas (< 5 eventos) e não conseguem representar uma distribuição anual.

As ondas de média escala analisadas em 2007, um total de 31 eventos, ocorreram com velocidades principalmente entre 40 e 100 m/s, períodos entre 10 e 50 min, e comprimento de onda entre 50 a 150 km. Para o ano de 2011, em que foram identificados 36 eventos, os histogramas demonstram um comportamento semelhante a 2007, velocidades de fase entre 40 e 150 m/s, períodos entre 10 e 50 min, e comprimento de onda entre 50 e 200 km.

Os anos de 2015 e 2016 foram mais distintos, nos quais foram identificados 22 e 52 eventos, respectivamente. Em 2015 as ondas ocorreram com velocidades entre 40 e 120 m/s, períodos entre 20 e 50 min, e comprimento de onda entre 50 e 250 km. Já em 2016, os eventos foram observados com velocidades entre 50 e 170 m/s, períodos entre 10 e 60 min, e comprimento de onda principalmente entre 50 a 300 km.

Em geral, ou seja, levando em conta todos os eventos, as ondas tiveram velocidade de fase abrangendo um intervalo desde aproximadamente 50 m/s até alguns casos com quase 200 m/s, mas com uma concentração principal menor que 110 m/s. Períodos variando de 5 min a 60 min, com maior ocorrência entre 15 a 35 min. E quanto ao comprimento de onda, variaram de 5 a aproximadamente 500 km, com maior ocorrência entre 50 e 200 km.

Quanto às direções de propagação das ondas de média escala, tivemos eventos se propagando em todas as direções, mas com a maioria dos eventos se propagando para leste e sul. A Figura 13 mostra um gráfico do número de eventos em função da direção de propagação, onde podemos ver que se identifica uma maior quantidade de eventos, na direção sul e sudeste, 57 eventos, e na direção leste e nordeste, 52 eventos.

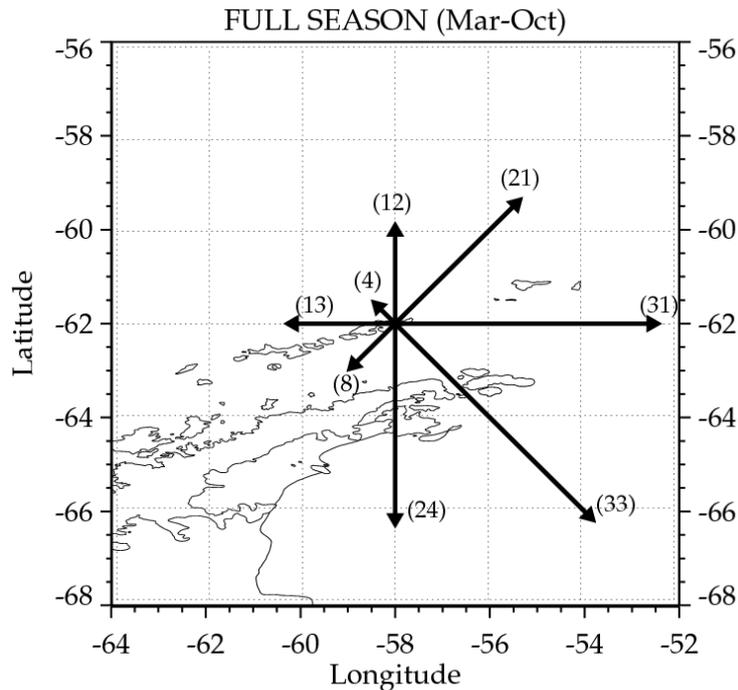


Figura 13: Gráfico do numero de eventos em função da direção de propagação para os eventos de ondas de gravidade de média escala analisadas.

6.2 Instalação do Imageador no Observatório Espacial do Sul (OES/INPE)

No início do ano passado (2017) foi feita a instalação de um imageador *all-sky* de baixo custo no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE-MCTIC), em que o aluno ajudou na colocação do aparelho e na regulagem do foco, assim como na calibração das imagens.

Foram necessárias varias tentativas da equipe para se conseguir ajustar o foco, e várias dessas vezes o aluno foi ajudar no ajuste. O empecilho que a equipe teve é que o tubo de lentes utilizado não é o tubo próprio da câmera, portanto foi necessário remover o equipamento e fazer algumas partes extras para o tubo telecêntrico até que se conseguiu o ajuste.

A Figura 14 é uma foto do imageador que foi instalado na sua “versão final”, com os tubos e lentes que se conseguiu ajustar o foco das imagens. Já a Figura 15 é uma foto do imageador instalado em seu suporte, mas sem a cúpula e o sistema de proteção automático que foi desenvolvido.



Figura 14: Foto do imageador que foi instalado no OES.



Figura 15: Imageador instalado no OES.

Após o sucesso na instalação e regulagem do imageador foi utilizada a primeira imagem de céu limpo, ainda na mesma noite que conseguimos regular o foco, para fazer a calibração.

A calibração é feita com a ajuda do programa *all-sky calibration* desenvolvido por C. M. Wrasse e I. Rodrigues. Nesse programa é necessário ajustar a imagem de acordo com o mapa celeste, fazendo com que as estrelas da imagem coincidam com as estrelas do mapa celeste.

Após o ajuste o programa automaticamente detecta as estrelas e sumariza as coordenadas da imagem e da carta celeste, com isso calcula a função de lente. A função de lente calculada é avaliada, se for necessário retirar alguma estrela, isso pode ser feito manualmente, e se for necessário colocar mais alguma para aumentar a qualidade, também pode ser feito. É calculada novamente a função de lente e avaliada, repete-se o procedimento até que a função esteja o melhor o possível.

Na Figura 16 temos á esquerda, a imagem com as estrelas que foram usadas no calculo da lente em destaque por círculos vermelhos, e á direita da Figura 16 a função que foi calculada.

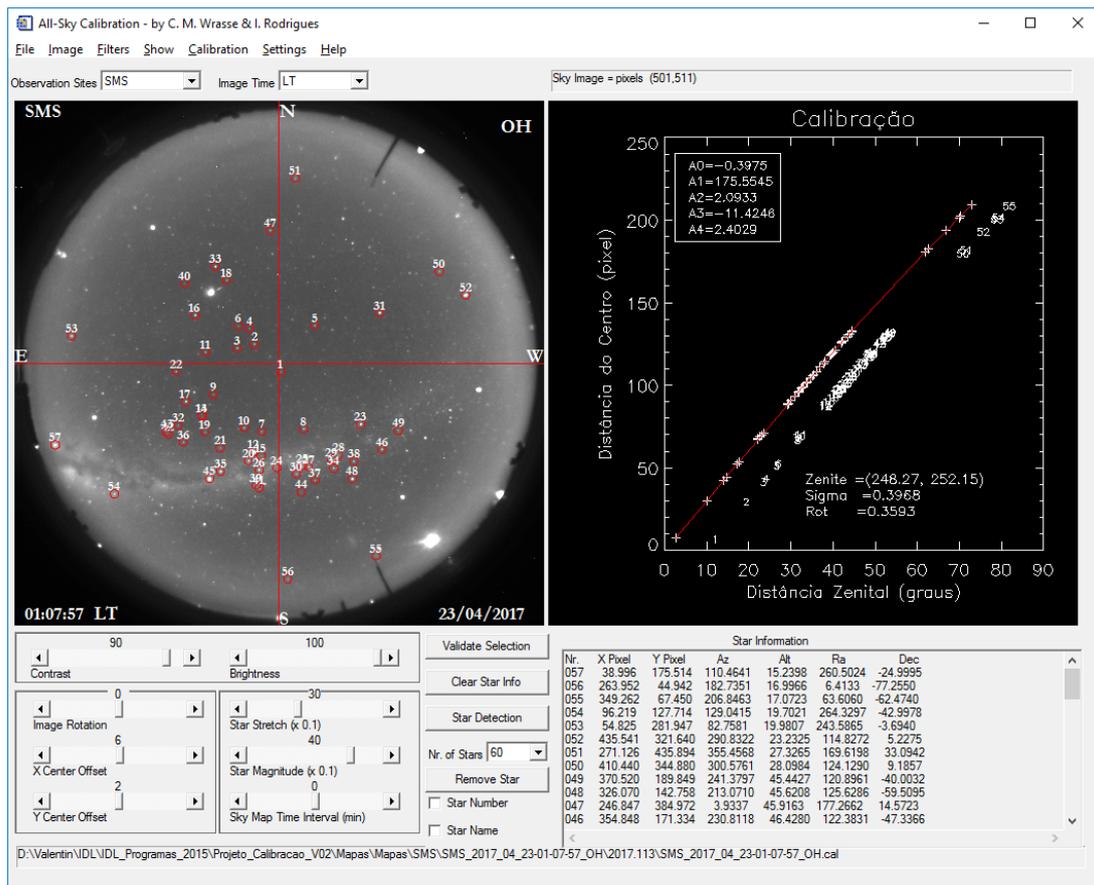


Figura 16: Tela do programa utilizado na calibração após o calculo da função de lente. Na parte da esquerda vemos a imagem all-sky com as estrelas utilizadas no calculo da função de lente em destaque com círculos vermelhos, e na parte da direita vemos a função de lente calculada.

E finalmente o programa gera os mapas, para todas as projeções usualmente utilizadas, e para todas as alturas. Como só tem o filtro da hidroxila (OH NIR), no imageador que instalamos no OES, descartamos todas as projeções em alturas diferentes de 87 km, que é a altura média de emissão do OH NIR.

A Figura 17 mostra as imagens linearizadas com a utilização dos mapas gerados para a altura de 87 km nas projeções de 512x512 e 768x768.

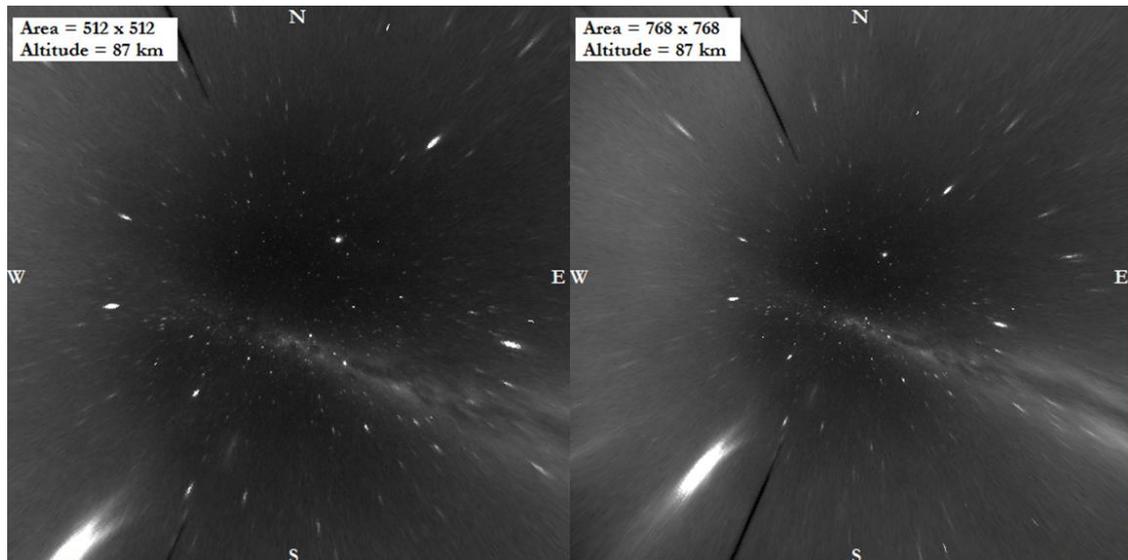


Figura 17: Mapas gerados na calibração do imageador instalado no OES.

6.3 Publicação de Artigo

Foi publicado um artigo na revista *Annales Geophysicae* (<https://doi.org/10.5194/angeo-36-253-2018>) detalhando diversas investigações de quatro frentes mesosféricas observadas em 2011 sobre a EACF (GIONGO et al., 2018). No trabalho, além de analisarmos as características visuais de cada um dos eventos, e seus parâmetros físicos, da mesma forma que fizemos para as ondas de gravidade de pequena escala (bandas e alguns ripples), fizemos um estudo do ambiente em que essa onda se propagou. Para isso usamos dados de temperatura, que foram obtidos por meio do instrumento SABER, a bordo do satélite TIMED, e dados de vento obtidos por meio do radar meteorológico, que em 2011 estava operacional na EACF.

Um exemplo de ambiente atmosférico analisado para um caso de frente mesosférica é mostrado na Figura 18. Em (a), é mostrado o perfil de temperatura em instantes próximos a ocorrência do evento, (b) é o perfil da frequência de flutuabilidade, um parâmetro para a condição de propagação vertical da onda, em (c), o perfil de vento médio no horário de ocorrência do evento, e (d) é o número de onda vertical (m^2) associado à onda, sendo este o parâmetro que determina a condição de propagação vertical da onda.

Analisando estes gráficos, podemos ver que o m^2 fica negativo em 81 km e 94 km, isso significa que a onda estava confinada entre estas duas altitudes naqueles instantes. Também nota-se que o perfil do número de onda é muito parecido com a

frequência de fluabilidade, e que o vento não influenciou essa condição, então, podemos concluir que a temperatura ocasionou a condição de ducto.

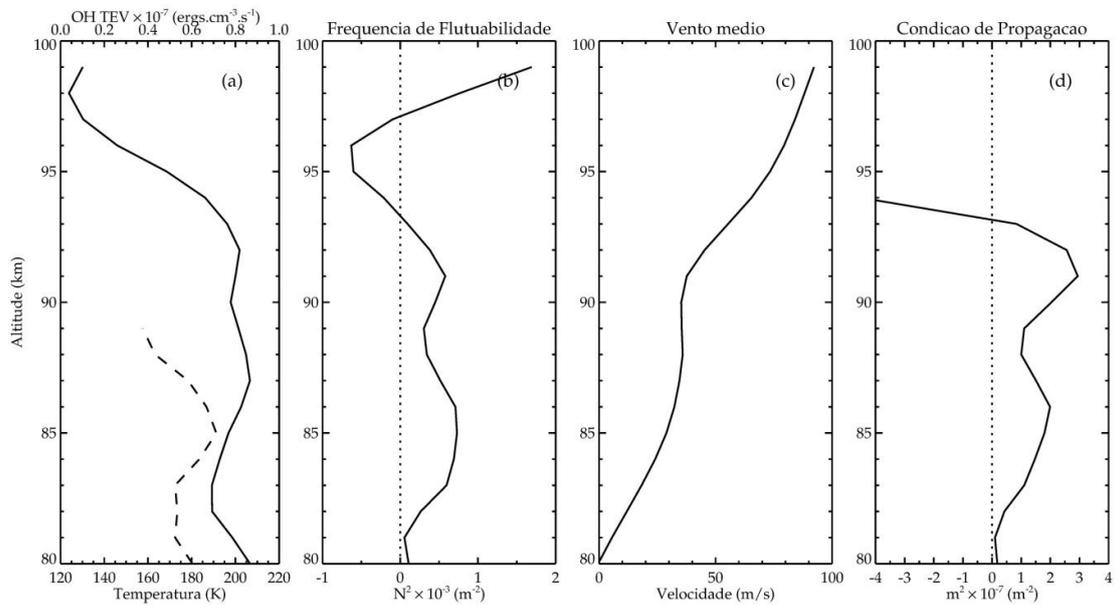


Figura 18: Ambiente atmosférico no momento de ocorrência de uma frente mesosférica sobre a EACF. (a) temperatura em função da altitude, (b) frequência de fluabilidade em função da altitude, (c) velocidade na direção de propagação da onda em função da altitude, e (d) número de onda vertical ao quadrado em função da altitude.



7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tinha como objetivo o estudo e a caracterização dos eventos de ondas de gravidade atmosférica, sobre a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF). Para a observação foi feito o uso de um imageador *all-sky* instalado na estação, na banda de emissão do OH NIR, em que as imagens obtidas foram processadas com o uso de programas computacionais desenvolvidos em IDL.

Para a obtenção de resultados das ondas de média escala, foi feita a geração dos *keogramas* para todos os anos com dados de imagens de airglow, e todos foram analisados com a técnica recentemente desenvolvida, descrita na seção 5.4. Essa técnica consiste na aplicação da transformada de Fourier discreta a uma região de ambos os *keogramas*, e com o espectro da transformada obteve-se os parâmetros das ondas. Então, se analisou as ondas caracterizadas com a análise espectral de acordo com suas características, em histogramas e gráficos. Nisso foram identificados e analisados um total de 146 eventos de onda de média escala.

O aluno também ajudou na instalação e regulagem de um imageador de baixo custo no Observatório Espacial do Sul, tendo adquirido aprendizado prático da instrumentação utilizada no projeto. Também ajudou no processo de calibração das imagens, aprendendo a importância do aprendizado da metodologia.

Por fim, foi redigido um artigo, que foi aceito e publicado em uma revista internacional. Nesse trabalho, foram estudadas as características visuais de 4 frentes mesosféricas, e as condições de propagação vertical desses eventos, com dados de temperatura obtidos por satélites, e dados de vento obtidos através de radar meteorológico. Na análise de propagação vertical, foi constatado que 3 casos de frentes estavam confinadas, duas devido à temperatura, e uma devido ao vento.



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. M. **Características das ondas de gravidade observadas na região central do Brasil**. Dissertação Mestrado Universidade do Vale da Paraíba, São José dos Campos, 2010.

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. (INPE-15179-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.

FIGUEIREDO, C. A. O. B.. **Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes no continente sul americano**. Proposta de Doutorado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Comunicação privada.

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

GARCIA, F. J.; TAYLOR, M. J.; KELLEY, M. C. **Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data**. Applied Optics, v. 36, n. 29, 1997.

GIONGO, G. A.; BAGESTON, J. V.; BATISTA, P. P.; WRASSE, C. M.; BITTENCOURT, G. D.; PAULINO, I.; PAES LEME, N. M.; FRITTS, D. C.; JANCHES, D.; HOCKING, W.; SCHUCH, N. J. Mesospheric front observations by the OH airglow imager carried out at Ferraz Station on King George Island, Antarctic Peninsula, in 2011, Annales Geophysicae, v.36, 253-264, <https://doi.org/10.5194/angeo-36-253-2018>, 2018.

HAPGOOD, M. A.; TAYLOR, M. J. **Analysis of airglow image data**. Annales De Geophysique, v. 38, n. 6, 1982.



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

ISLER, J. R.; TAYLOR, M. J.; FRITTS, D. C. **Observational evidence of wave ducting and evanescence in the mesosphere**. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, v. 102, n. D22, 1997.

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

MAEKAWA, R. **Observations of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging**. 64 p. Dissertação (Master Thesis) — Kyoto University, 2000.

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.

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.