



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA
OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE
FERRAZ (EACF) E NO BRASIL (SÃO MARTINHO DA SERRA-RS
E CACHOEIRA PAULISTA-SP).**

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

Gabriel Augusto Giongo

(UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)

CRS/INPE - MCTIC

E-mail: gabrielgiongo@hotmail.com

Dr. José Valentin Bageston

(Pesquisador do CRS/INPE – MCTIC, Orientador).

E-mail: bageston@gmail.com

COLABORADORES

Dr. Cristiano Max Wrasse (DAE/INPE)

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/INPE)

Msc. Cosme Barros Figueiredo (DAE/INPE)

Junho de 2016



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Título:

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA
OBSERVADAS NA ESTAÇÃO ANTÁRTICA COMANDANTE
FERRAZ (EACF) E NO BRASIL (SÃO MARTINHO DA SERRA-RS
E CACHOEIRA PAULISTA-SP).**

Processo: 122389/2015-8

Aluno Bolsista no período de agosto/2015 a Julho/2016:

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/INPE – MCTIC

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

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

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica – CRS/INPE - MCTIC

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCTIC – UFSM, através do Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica - LMLA/CRS/INPE – MCTIC com o 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/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/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/INPE-MCTIC), meus sinceros agradecimentos.

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 2015 a Julho de 2016, no Projeto de Pesquisa: **“Estudo Das Ondas De Gravidade De Média Escala Observadas Na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e No Brasil (São Martinho Da Serra-RS e Cachoeira Paulista-SP)”**. O objetivo deste trabalho é o estudo dos eventos de ondas de gravidade atmosféricas de média e pequena 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 os anos 2014 e 2015. 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). As ondas de pequena escala observadas no ano de 2015 apresentaram comprimentos de onda variando entre 10 e 50 km, períodos observados principalmente entre 5 e 15 minutos e a velocidade abrangendo um grande intervalo, desde 5 a 100 m/s, com concentração principal entre 15 e 60 m/s. As direções de propagação das ondas foram em todos os quadrantes, mas com a maioria dos eventos propagando-se para noroeste e as ondas mais rápidas para sul e leste. As ondas de média escala observadas na EACF apresentaram comprimentos de onda acima de 100 km e 300 km, velocidades em um grande intervalo, mas muitas ondas com velocidades acima de 100m/s, e períodos da ordem de 30 minutos até no máximo 1 hora.



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 A ATMOSFERA TERRESTRE	8
3 ONDAS DE GRAVIDADE	10
4 LUMINESCENCIA ATMOSFÉRICA	12
5 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	13
5.1 Imageador <i>All-Sky</i>	13
5.2 Linearização das Imagens	15
5.3 Análise das Ondas de Pequena Escala	17
5.4 Análise das Ondas de Média Escala	19
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
6.1 Resultados para as Ondas de Pequena Escala	21
6.2 Resultados Para as Ondas de Média Escala	24
7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
8 TRABALHOS FUTUROS	28
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: As camadas de emissão de aeroluminescência e o perfil de temperatura da atmosfera da Terra.	8
Figura 2: Esquema de propagação de uma onda de gravidade	11
Figura 3: Esquema de um imageador utilizado para medir as emissões da aeroluminescência atmosférica noturna.	13
Figura 4: Local onde se encontra o imageador <i>all-sky</i> na EACF.	14
Figura 5: Exemplos de imagens obtidas com o imageador <i>all-sky</i> na emissão do OH NIR na península antártica	14
Figura 6: Imagem obtida na noite de 08/07/2015 as 02:33 UT	15
Figura 7: Função de lente do imageador <i>all-sky</i> instalado na Estação Antartica Comandante Ferraz.	16
Figura 8: Imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas	17
Figura 9: Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral.	18
Figura 10: Espectro cruzado da onda indicada no canto inferior da Figura 8.	19
Figura 11: Exemplo de <i>keograma</i> , obtido da noite de 17/07/2015	20
Figura 12: Distribuição de horas totais e horas uteis de observação	22
Figura 13: Número de eventos de ondas de gravidade observados para o ano de 2015 em função dos parâmetros físicos.	23
Figura 14: Diagramas dos eventos de onda de gravidade de pequena escala observados para o ano de 2015	24
Figura 15: <i>Keograma</i> de parte da noite de 17/07/2015	25
Figura 16: Resultados obtidos para a análise da onda de gravidade de média escala a partir dos <i>Keogramas</i> da noite de 17/07/2015.	26



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 deslocar-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 atmosféricas podem se manifestar na variabilidade de vários campos da atmosfera neutra, tais como na velocidade dos ventos, na densidade, na pressão, na temperatura e na radiancia das emissões de airglow (BAGESTON, 2010).

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.

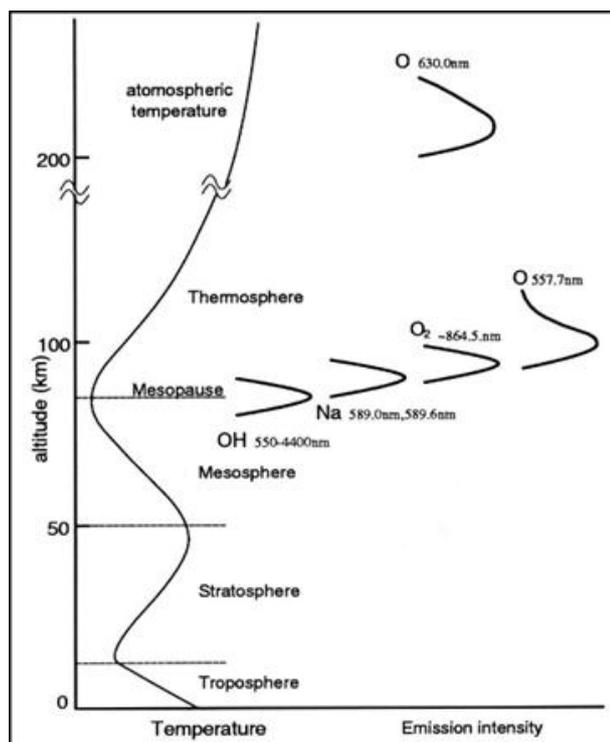


Figura 1: As camadas de emissão de aeroluminescência estão representadas esquematicamente, juntamente com o perfil de temperatura da atmosfera da Terra. **Fonte:** MAEKAWA (2000, p.4).

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 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).

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).

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).

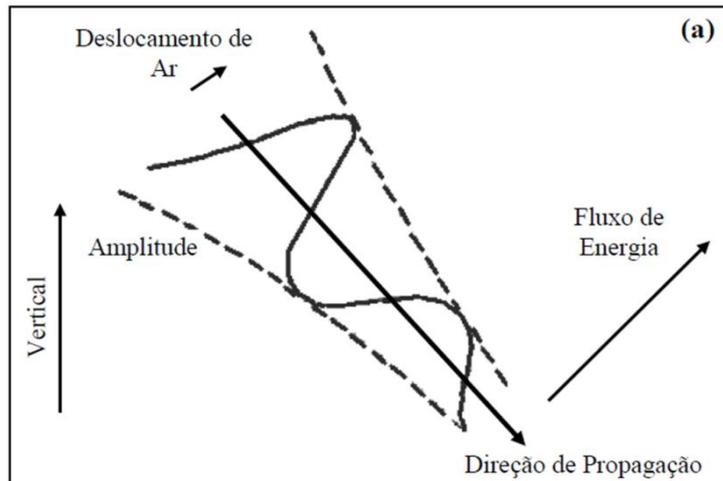


Figura 2: Esquema de propagação de uma onda de gravidade, que demonstra que a amplitude e a velocidade de fase crescem com a altitude. Fonte: Hargreaves (1992, p.126)

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. Quando isso acontece, chama-se esta região de nível crítico (BAGESTON, 2010).

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 deslocar-se grandes distâncias horizontais nesses canais (WRASSE, 2004).

4 LUMINESCENCIA 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 de alinhamento óptico e de uma câmara 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 ótico é constituído de uma lente *all-sky*, ou *fish eye*, com um campo de visão de 180°, ou seja, ele capta a luz de todo o céu do local, um sistema de lentes telecêntricas, uma roda de filtros de interferência que selecionam determinadas linhas e bandas da luminescência atmosférica, como por exemplo, a emissão do OH NIR (*Near Infra Red*). O imageador também conta com um dispositivo CCD (*Charge Coupled Device*) um sistema de refrigeração e uma fonte de alimentação.

A Figura 3 mostra esquematicamente um imageador *all-sky* como os que estão na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e em Cachoeira Paulista-SP, utilizados para este trabalho.

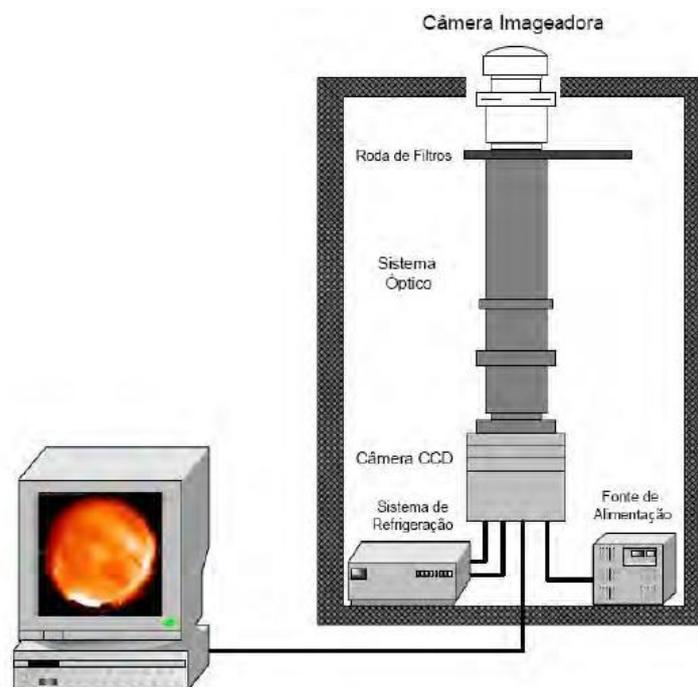


Figura 3: Esquema de um imageador utilizado para medir as emissões da aeroluminescência atmosférica noturna na EACF e em Cacheira Paulista-SP. Fonte: Wrasse (2004).

Na figura 4 à esquerda, é uma foto do módulo onde se encontra o imageador *all-sky* da EACF e à direita a cúpula da lente do imageador instalado no módulo.



Figura 4: (A) Fotografia do modulo de observações de airglow, onde se encontra o imageador all-sky. (B) Cúpula da lente all-sky.

As principais vantagens na técnica do imageamento no estudo da dinâmica da aeroluminescência e na observação e estudo das ondas de gravidade é a alta resolução espacial na visualização de uma grande área horizontal coberta pelo imageador (MEDEIROS, 2001).

As Figuras 5 a seguir demonstram exemplos de imagens capturadas pelo imageador all-sky da EACF, na banda de emissão do OH NIR. Na figura 6 temos exemplos de ondas de gravidade observadas na imagem dessa emissão e podemos ver as oscilações de intensidade nas imagens, na foto à direita que é a mesma da esquerda, esta representado setas que mostram a posição e a direção de propagação das ondas presentes na imagem.

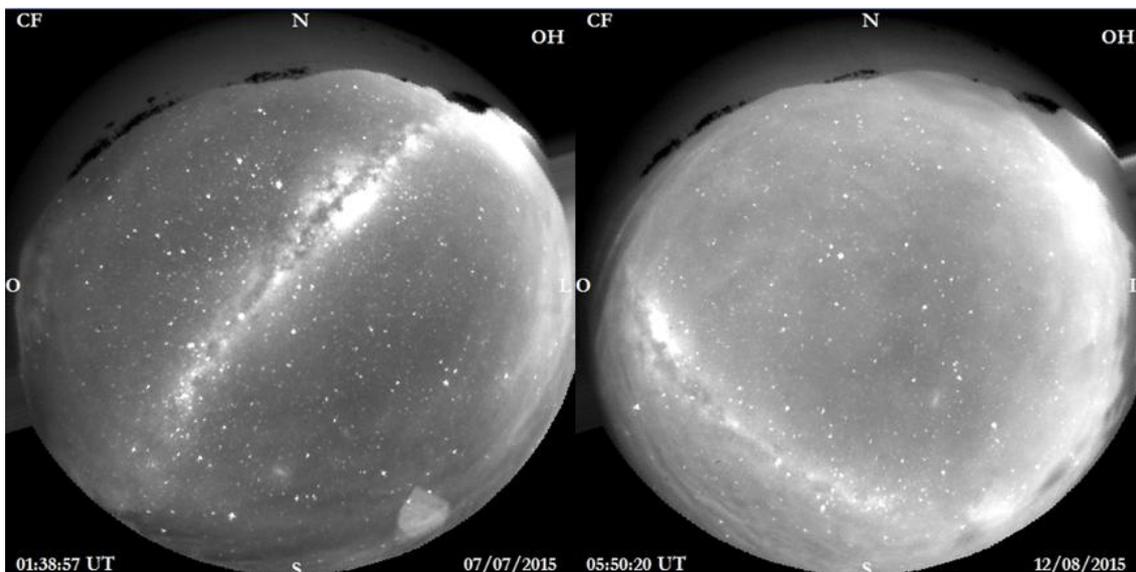


Figura 5: Exemplos de imagens obtidas com o imageador all-sky na emissão do OH NIR na península antártica. A esquerda imagem do dia 07/07/2015 as 01:38 UT, e a direita imagem do dia 12/08/2015 as 05:50 UT.

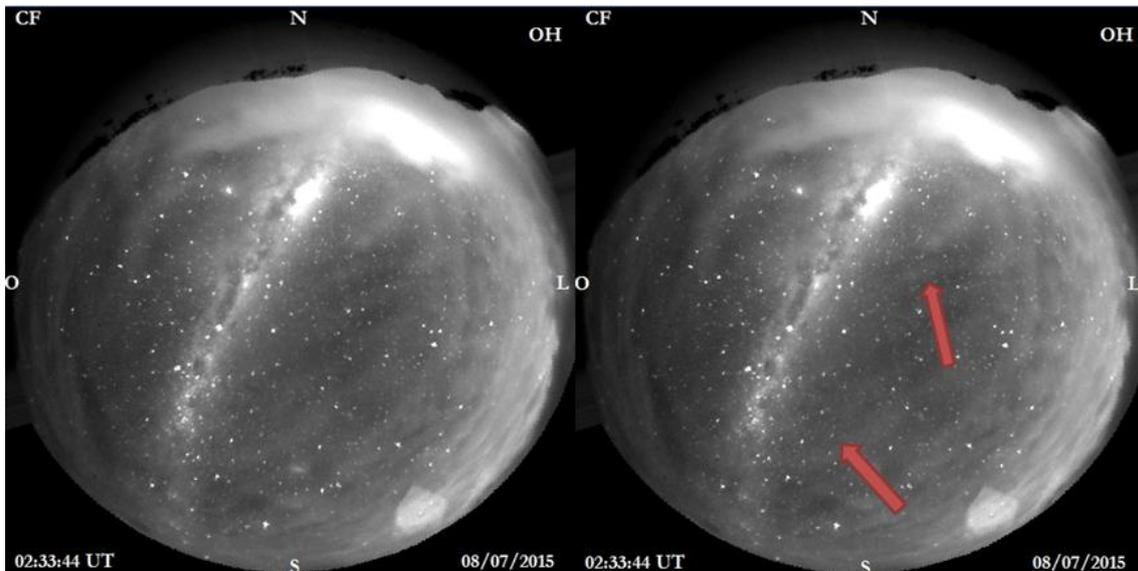


Figura 6: Imagem obtida na noite de 08/07/2015 as 02:33 UT na banda do OH NIR em que podemos ver a presença de oscilações na camada. Na figura a direita esta representada duas seta sobre as ondas indicando sua posição e direção de propagação.

A partir de observações do airglow por imageadores é possível investigar a estrutura horizontal e as características das ondas de gravidade diretamente. Em geral, as emissões de airglow utilizadas para esse fim são as provenientes da região da mesosfera (~80–100 km), estas emissões são: OH NIR; OI 557,7 nm; Na (²P) e O₂(0-1). Os imageadores de airglow são mais adequados para observar ondas de gravidade com curtos períodos (< 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 6-10 km e possibilita estudar ondas de gravidade com comprimentos de onda verticais maiores que estes limites. Além disso, se for obtida uma imagem fotográfica de uma extensão considerável do céu, é possível detectar e estudar ondas de gravidade de grandes dimensões horizontais (comprimentos de onda horizontais de dezenas a centenas de quilômetros).

5.2 Linearização 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 facilmente no sistema de coordenadas geográficas (GARCIA et al., 1997).

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 ultimo sistema, o zênite é localizado no centro da imagem e x e y correspondem aos eixos leste-oeste e norte-sul, respectivamente (MEDEIROS, 2001).

A partir dos resultados obtidos no calculo 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. A função de lente para o imageador que encontra-se atualmente na EACF é apresentada na Figura 7. Após a linearização a 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.

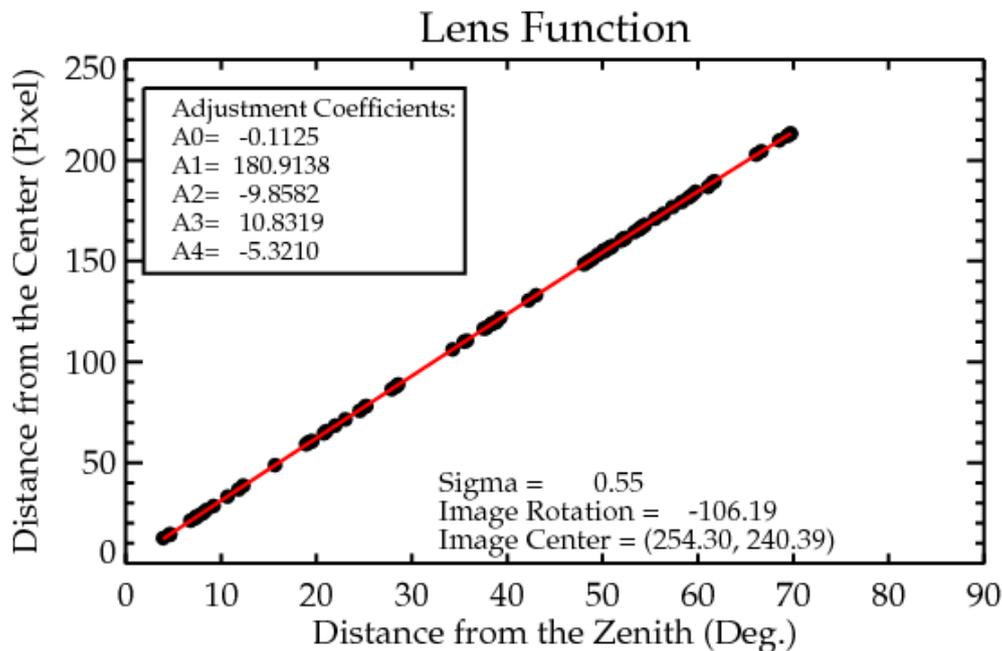


Figura 7: Função de lente do imageador all-sky instalado na Estação Antartica Comandante Ferraz.

A Figura 8 mostra a mesma imagem da Figura 6 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.

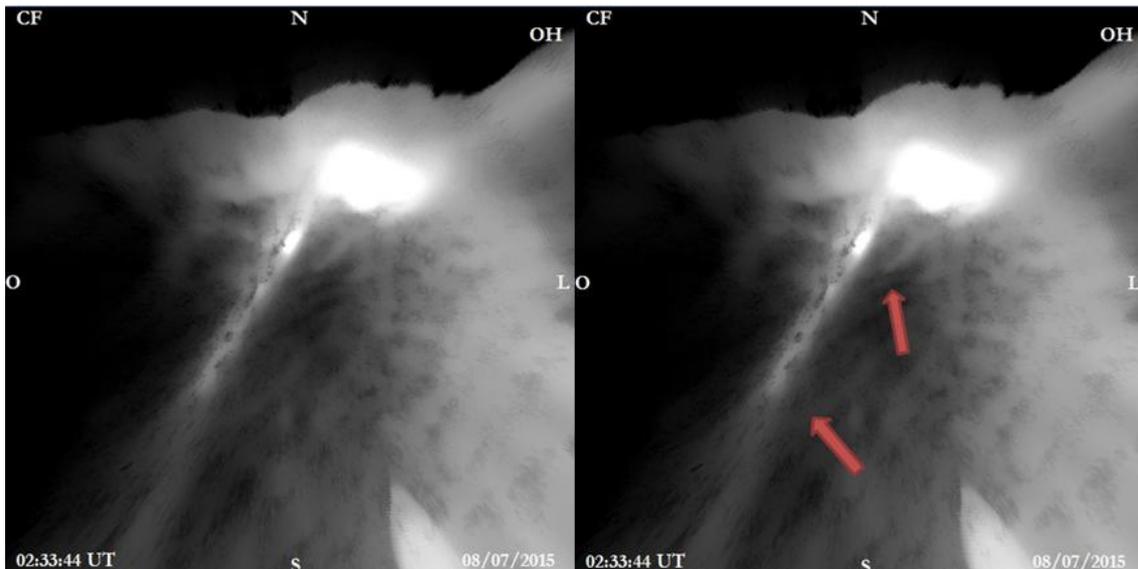


Figura 8: Mesma imagem da figura 6, linearizada, filtrada e com as estrelas removidas. Na foto a direita contem as setas indicando a posição e direção de propagação das ondas indicadas na figura 6.

5.3 Análise 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 9 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 um 'box'. Nessa imagem podemos ver todo o pré-processamento feito com as imagens, antes de se fazer a análise propriamente dita.

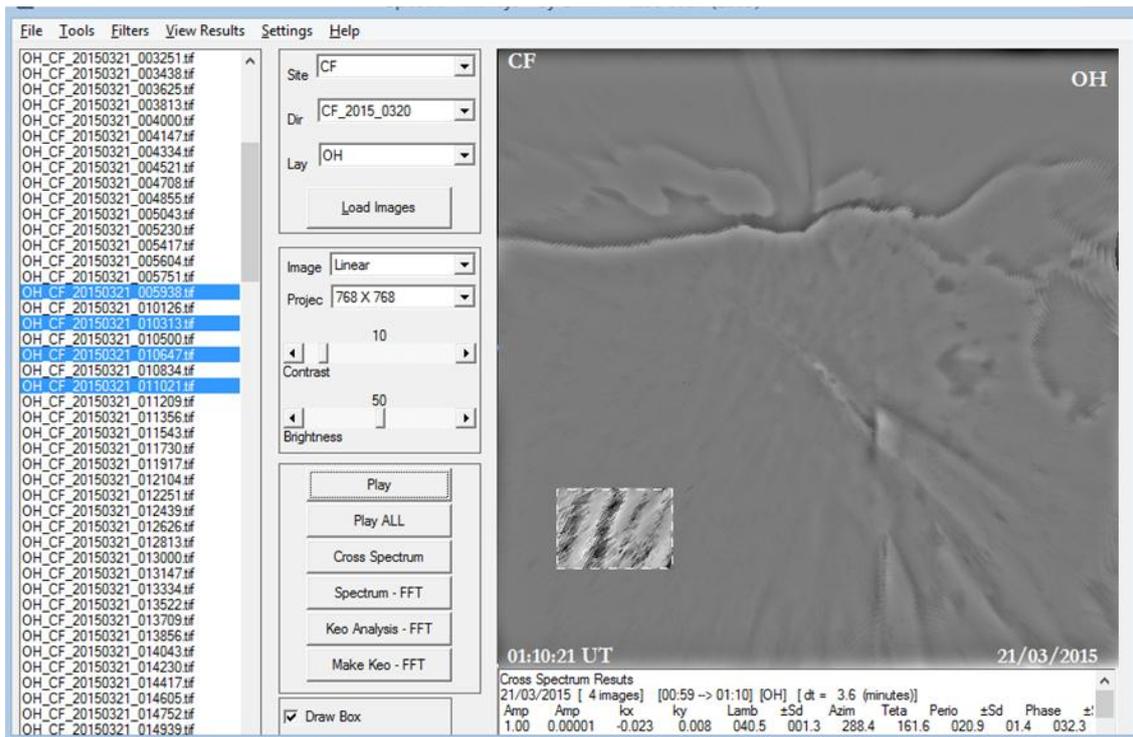


Figura 9: Tela do programa desenvolvido em IDL para a análise espectral. Nele podemos ver uma sequencia de imagens pré-processadas com um 'Box' selecionado no evento a ser analisado.

A análise espectral empregada consiste na aplicação da transformada de Fourier discreta ao conjunto de imagens. O espectro de potência em duas dimensões é definido pelo modulo 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 contem informações sobre a amplitude e fase dos sinais e remove a ambiguidade do sentido de propagação do espectro de potencia.

A figura 10 mostra o espectro cruzado de 5 imagens sucessivas da onda indicada na parte inferior da figura 8. Nele podemos extrair a direção de propagação da onda a fase e a amplitude.

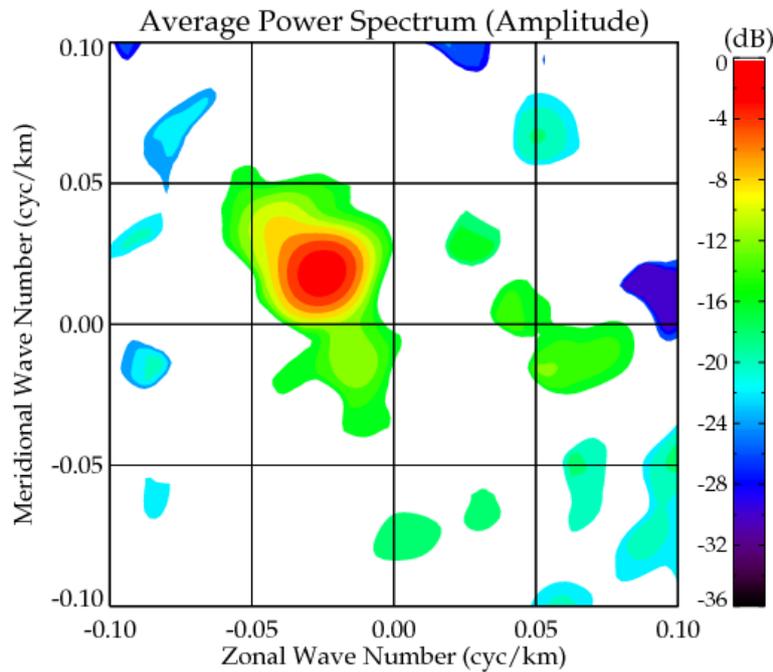


Figura 10 Espectro cruzado da onda indicada no canto inferior da Figura 8

5.4 Análise 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, 2017).

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 traz um exemplo de *keograma* da noite de 17/07/2015, nela são apresentados os *keogramas* zonal (painel superior), e meridional (painel inferior), os eixos horizontais indicam o tempo em horas UT. Os 'box' em branco indicam a seleção de um evento de onda a ser analisado.

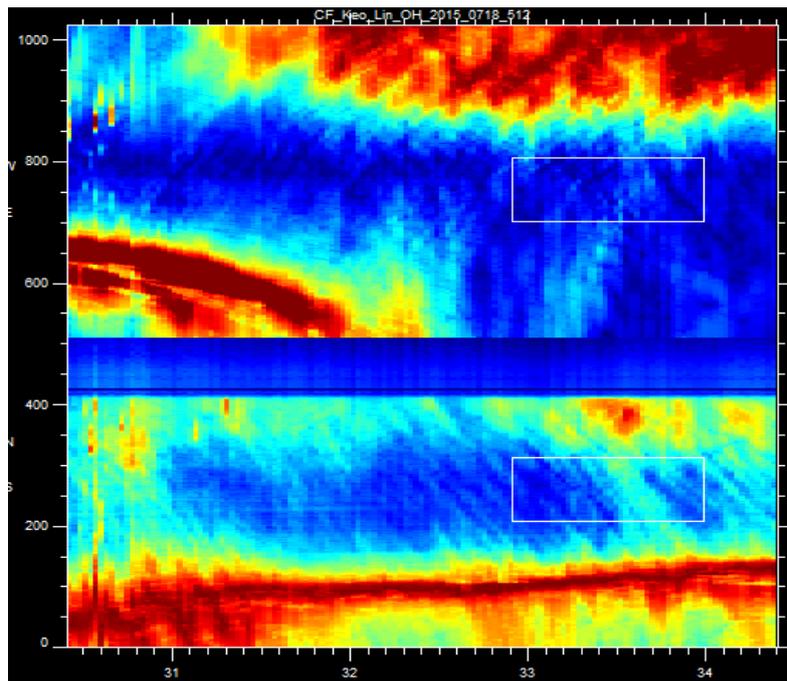


Figura 11: Exemplo de *keograma*, obtido da noite de 17/07/2015. O painel superior apresenta o *keograma* zonal (E-O) e o inferior o *keograma* meridional (N-S), e o eixo horizontal representa o tempo. O ‘box’ branco mostra a seleção de um evento de onda de gravidade de média escala.

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 cálculo do comprimento de onda horizontal, a velocidade de fase horizontal e a direção de propagação podem ser obtidas geometricamente.

Um ponto que se deve atentar é na hora de selecionar o ‘box’. 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, 2017).

6 RESUSTADOS 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.

Os resultados aqui apresentados são referentes apenas às observações realizadas na Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) para os anos de 2014 e 2015. Isso se deve ao fato dos dados de São Martinho da Serra não apresentarem uma boa resolução temporal para a emissão do OH, onde identifica-se facilmente as ondas de gravidade propagantes na Mesosfera, além da série de dados ter muitas falhas. Os dados de Cachoeira Paulista e outros sites do Brasil não foram analisados neste período de bolsa devido à orientação do supervisor deste projeto para concentrar as análises nos dados da Antártica, onde houve dados muito bons para o ano de 2015. Para a prorrogação deste projeto planeja-se focar apenas nos dados da Antártica e analisar dados anteriores (2007, 2010 e 2011) para estudo focado nas ondas de média escala.

6.1 Resultados para as Ondas de Pequena Escala

Foram analisados os dados obtidos do imageador da EACF na banda de emissão do OH NIR, correspondentes aos anos de 2014 e 2015. Para o ano de 2015 tivemos 228 dias de observação, desse total apenas 101 dias são uteis para a observação das ondas de gravidade, ou seja, o céu não está totalmente nublado, e sem contaminação luminosa, como o sol ou a lua. Ao todo são aproximadamente 700 horas de observação uteis.

A Figura 12 mostra o gráfico da distribuição de horas totais e uteis de observações distribuídas de acordo com os meses correspondentes. Nele podemos ver que o mês junho foi o mês com mais horas de observação, mas em horas uteis foi um mês de quantidade razoável, já o mês de agosto foi o mês com o maior numero de contagem de horas uteis de observação.

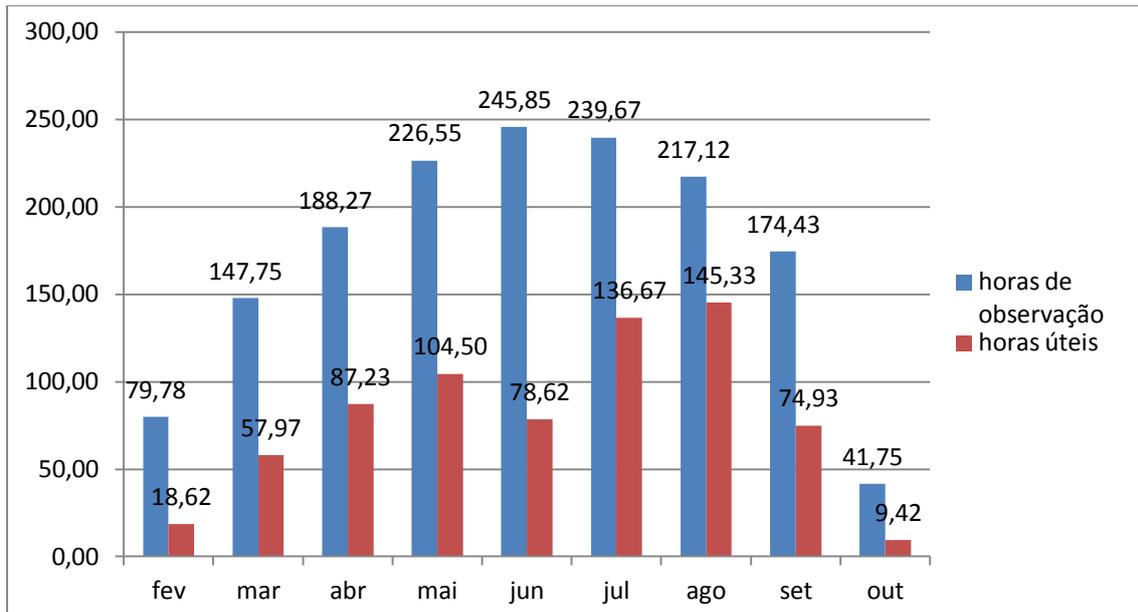


Figura 12: Distribuição de horas totais e horas uteis de observação em função dos meses, os números acima das barras são o valor correspondente em horas.

A maior quantidade de eventos observados no ano de 2015 foi de ondas de gravidade de pequena escala, aproximadamente 100 eventos já foram identificados e classificados, mas espera-se encontrar ainda mais. Esses eventos foram classificados de acordo com seus parâmetros físicos: comprimento de onda, período, velocidade de fase e direção de propagação.

A Figura 13 mostra os histogramas da distribuição do número de ondas em função de determinado parâmetro físico. O gráfico superior (A) mostra o número de ondas por comprimento de onda horizontal, o gráfico do meio (B) em função do período, e o gráfico inferior (C) em função da velocidade de fase horizontal.

Como vemos no primeiro gráfico, os comprimentos de onda horizontal variaram de 10 a 50 km, com maior ocorrência entre 20 e 30 km. Período variando de 5 mim ate alguns casos com mais de 35 mim, com maior ocorrência entre 5 a 15 mim. A velocidade de fase abrangendo um grande intervalo desde 5 a 100 m/s, mas com uma concentração principal entre 15 e 60 m/s.

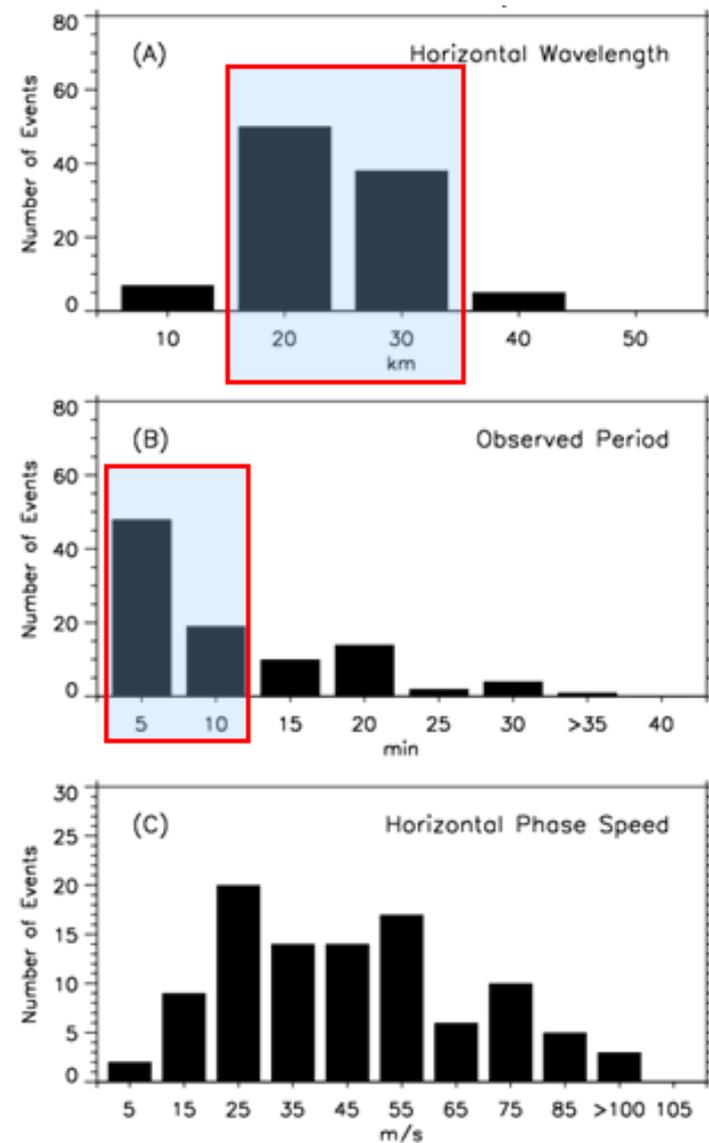


Figura 13: Número de eventos de ondas de gravidade observados para o ano de 2015 em função dos parâmetros físicos. (A) número de eventos por comprimento de onda horizontal. (B) Número de eventos por período. (C) Número de eventos por velocidade de fase horizontal.

Quanto a direção de propagação das ondas de gravidade, foram observados eventos se propagando em todas as direções, mas com a maioria dos eventos na direção noroeste, e na direção sul.

A Figura 14 mostra diagramas da direção de propagação das ondas de gravidade observadas. No diagrama da esquerda vemos o número de eventos identificados em função de sua direção de propagação em que estão representados em seu respectivo quadrante. Identificam-se uma maior quantidade de eventos na direção noroeste, 36 eventos, e na direção sul, 35 eventos.

No diagrama da direita da Figura 14 é mostrada a dispersão das ondas em função de sua direção de propagação e de sua velocidade. Novamente vemos que o maior número de eventos observados se propaga na direção noroeste, mas dos eventos de

maior velocidade, acima de 60 m/s, 16 dos 20 propagam-se preferencialmente na direção sul e leste.

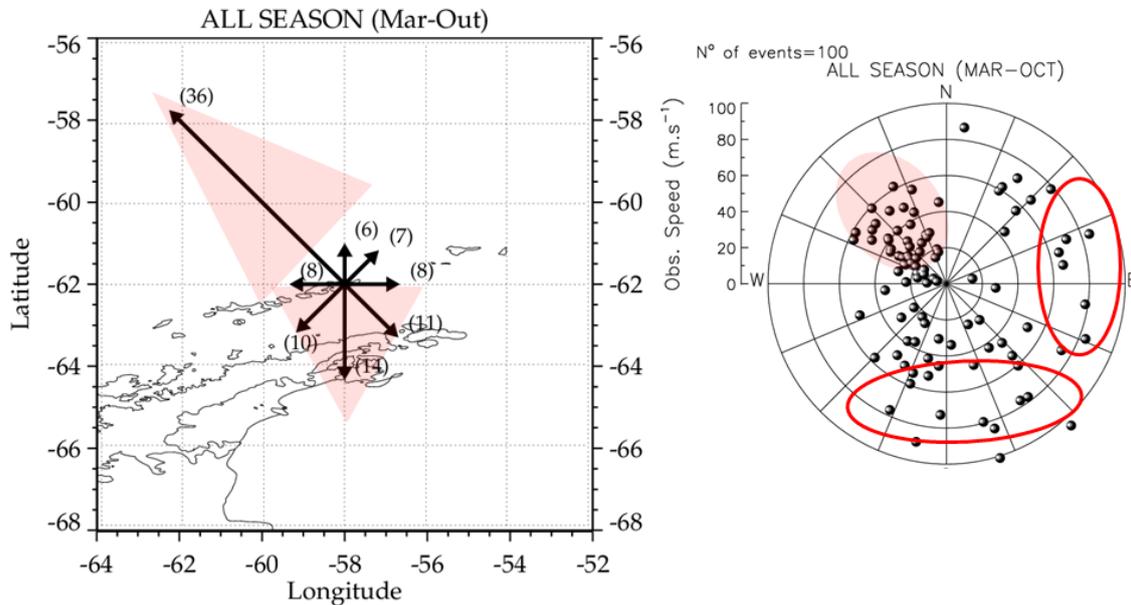


Figura 14: Diagramas das direções dos eventos de onda de gravidade de pequena escala observados para o ano de 2015. A esquerda é representado o numero de eventos em função do quadrante de sua orientação. A direita é representado a dispersão dos eventos observados em função da direção e da velocidade.

6.2 Resultados Para as Ondas de Média Escala

Foi identificado um evento de onda de gravidade de média escala na noite de 17/07/2015, que foi observada por aproximadamente uma hora. A Figura 15 mostra o *keograma* gerado para esta noite, em que podemos ver as ondulações no ‘box’ vermelho em ambos os *Keogramas*.

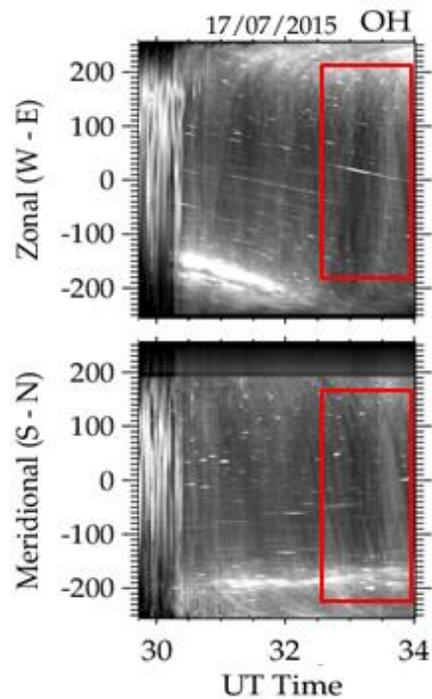


Figura 15: Keograma de parte da noite de 17/07/2015. A figura superior mostra o keograma zonal e a inferior o keograma meridional, o eixo horizontal representa o tempo em horas UT. O ‘box’ vermelho em ambas as componentes mostra o evento selecionado.

A Figura 16 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.

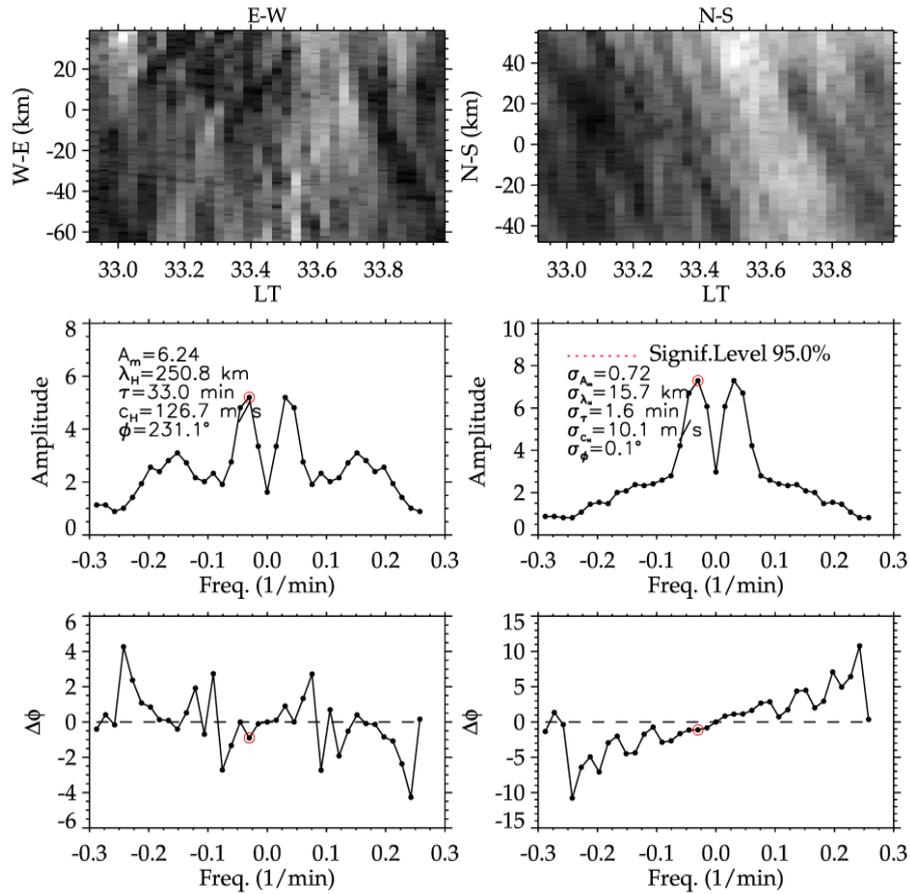


Figura 16: Resultados obtidos para a análise da onda de gravidade de média escala a partir dos Keogramas da noite de 17/07/2015. As figuras superiores mostram o ‘Box’ selecionado para a análise, as figuras do meio mostram a amplitude em função da frequência, assim como os parâmetros calculados do evento de onda e os níveis de significância, e as figuras inferiores mostram a fase do espectro cruzado em função da frequência.

Como mostrado nas figuras do meio da Figura 16, os parâmetros calculados dessa onda foram: comprimento de onda de 250,8 km, período de 33 min, velocidade de 126,7 m/s e direção de propagação de $231,1^\circ$.



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.

Após redução das imagens, foi feita a identificação dos eventos de ondas dos dados correspondentes ao ano de 2015. Nisso foram identificados 100 eventos de onda de pequena escala e um evento de média escala. Ainda falta finalizar a identificação dos eventos de média escala para o ano de 2015.

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, tais como a velocidade de fase, o período, o comprimento de onda e a direção de propagação da onda. Então se analisou as ondas caracterizadas com a análise espectral de acordo com suas características, em histogramas e gráficos.

O tratamento e redução dos dados ainda está por ser concluído, sendo necessárias mais análises de ondas de média escala, que é o foco do projeto, e a comparação com dados de outros sítios de aeroluminescência no Brasil.



8 TRABALHOS FUTUROS

Em relação a trabalhos futuros deste projeto é ainda necessário fazer a geração dos *keogramas* para mais noites do ano de 2015, assim como para os anos anteriores (2007, 2010, 2011), a fim de um estudo mais focado nas ondas de gravidade de média escala sobre a região da Península Antártica. Também pretende-se comparar os resultados para ondas de média escala para os anos acima citados com resultados de outros sítios do Brasil. Também planeja-se realizar um estudo de caso de dois eventos de frentes mesosféricas observadas em 2011 na Antártica.

Em relação a planos futuros, com os resultados esperados, temos a intenção de publicar dois artigos científicos em revistas internacionais.



9 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.

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.

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.