



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE MESOSFÉRICAS
DE PEQUENA ESCALA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL
DO SUL (OES/CRS-INPE)**

Paulo Henrique de O. Gomes

INPE
São José dos Campos
2020



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DAS ONDAS DE GRAVIDADE MESOSFÉRICAS
DE PEQUENA ESCALA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL
DO SUL (OES/CRS-INPE)**

Paulo Henrique de O. Gomes

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr.
José Valentin Bageston.

INPE
São José dos Campos
2020

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

TÍTULO: Estudo das ondas de gravidade mesosférica de pequena escala no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS-INPE)

PROCESSO: 800353/2018-8

BOLSISTA:

Paulo Henrique de O. Gomes

Acadêmico da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Aluno do curso superior em Meteorologia e do técnico/profissionalizante em Eletrônica

ORIENTADOR:

Dr. José Valentin Bageston

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE - MCTIC

CO-ORIENTADOR:

Dr. Juliano Moro

China-Brazil Joint Laboratory for Space Weather - CBJLSW/NSSC/CAS

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRCRS/COCRE/INPE - MCTIC

COLABORADORES:

Dr. Cristiano Max Wrasse

Divisão de Aeronomia – DIDAE/CGCEA/INPE – MCTIC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – MCTIC

Dr. Nelson Jorge Schuch

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

Bel. Gabriel Augusto Giongo

Programa de Pós Graduação em Meteorologia – PPGMet/UFSM – CRCRS

LOCAL DE TRABALHO/EXECUÇÃO DO PROJETO:

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRCRS/INPE/MCTIC;

Laboratório de Mesosfera e Luminescência Atmosférica – CRCRS/INPE;

Observatório Espacial do Sul – OES/CRCRS/INPE.

“O Esclarecimento é a saída do homem da condição de menoridade autoimposta. Menoridade é a incapacidade de servir-se de seu entendimento sem a orientação de outro. Essa menoridade é autoimposta quando a causa da mesma reside na carência não do entendimento, mas de decisão e coragem em fazer uso de seu próprio entendimento sem orientação alheia. SAPERE AUDE! Tenha coragem em servir-se de teu próprio entendimento! Esse é o mote do Esclarecimento”

Kant, Immanuel

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha amada mãe e professora Salete Regina de Oliveira, por desde cedo, mesmo que inconscientemente, incentivar-me a seguir na carreira acadêmica e fazer da ciência minha vida. Fixando os fundamentos que regem hoje meu caráter e princípios e por ter dado importância ao desenvolvimento de meu senso crítico e criativo.

A todos aqueles que vieram antes de mim, movidos pela mesma curiosidade questionaram a natureza do Universo e na busca pela verdade não deixaram-se enganar por falácias, profetas ou tiranos.

Ao Dr. José Valentin Bageston, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC), que disponibilizou seu tempo e conhecimento na orientação de minhas atividades de Iniciação Científica.

Ao Dr. Juliano Moro (CRCRS/INPE – MCTIC, CBJLSW/NSSC/CAS) por demonstrar, com tamanha simplicidade e sutileza, atenção a meus projetos e carreira.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC), por ser uma referência acadêmica e possibilitar a existência do CRCRS/INPE, fortalecendo a interiorização do conhecimento.

Ao CNPq/MCTI por financiar a execução deste projeto e ao CRCRS/INPE por disponibilizar suas instalações assim sediando minhas atividades. No geral, agradeço a todos aqueles que de alguma maneira auxiliaram na constituição deste projeto.

RESUMO

O presente trabalho apresenta as atividades desenvolvidas pelo acadêmico Paulo Henrique de Oliveira Gomes, durante o período de agosto de 2018 a julho de 2020. Discente do curso superior em Meteorologia e do técnico/profissionalizante em Eletrônica, ambos pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – Brasil e bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC. O acadêmico possui área de concentração em Geofísica Espacial com enfoque em Aeronomia e linha de pesquisa em luminescência atmosférica e instrumentação aeronômica. O objetivo principal deste trabalho é estudar as ondas de gravidade atmosféricas de pequena escala na Mesosfera e baixa Termosfera (MLT), observadas através de um imageador *all-sky*, e o tratamento das imagens obtidas, visto o caráter vital do tratamento das imagens para a correta determinação dos parâmetros das ondas de gravidade. A faixa de interesse na atmosfera para este estudo é localizada entre 80 e 100 km de altitude, entre a Mesosfera e baixa Termosfera (MLT), dividindo ambas em uma camada com largura aproximada de 6 a 10 km, onde há uma grande fonte de emissões de luminescência atmosférica. O estudo transcorreu inicialmente pelo embasamento bibliográfico e familiarização com instrumentos e técnicas, seguido de obtenção e análise de dados ópticos, objetivando classificação e caracterização de eventos do fenômeno em discussão. Os dados utilizados neste estudo são oriundos de uma câmera imageadora alocadas no Observatório Espacial do Sul (OES/CRCRS/INPE). As atividades teóricas foram seguidas pela realização de trabalhos de campo, ou seja, observações rotineiras de luminescência atmosférica no OES, possibilitando contato direto com a instrumentação utilizada. O desenvolvimento das atividades do projeto ocorreram no Centro Regional Sul do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRCRS/INPE – MCTIC) em Santa Maria, RS e no OES em São Martinho da Serra, RS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Divisões da atmosfera terrestre.....	10
Figura 2 - Perfil vertical da atmosfera segundo a temperatura.....	11
Figura 3 - Perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera.....	13
Figura 4 - A Magnetosfera Terrestre.....	14
Figura 5 - Desequilíbrio entre o gradiente de pressão e a gravidade.....	19
Figura 6 - Desenho esquemático de um imageador <i>all-sky</i>	22
Figura 7 - Diagrama ilustrando o sistema óptico e de filtros de um imageador <i>all-sky</i>	23
Figura 8 - A esquerda imagem obtida com um imageador <i>all-sky</i> , a direita mesma imagem já linearizada.....	25
Figura 9 - Imagem da aeroluminescência linearizada e com box para análise espectral.....	26
Figura 10 - Histograma das observações para os anos de 2017 à 2020.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 A atmosfera terrestre.....	12
2.1.1 Divisões da atmosfera terrestre.....	12
2.1.1.1 Perfil vertical segundo a temperatura.....	13
2.1.1.2 Perfil vertical segundo a composição química.....	14
2.1.1.3 Perfil vertical segundo o escape gasoso.....	15
2.1.1.4 Perfil vertical segundo a composição iônica.....	15
2.2 O vento solar.....	17
2.3 A dinâmica da atmosfera neutra.....	18
2.3.1 Ventos Termosféricos.....	18
2.3.2 Ondas Planetárias.....	19
2.3.3 Marés Atmosféricas.....	19
2.3.4 Ondas de Gravidade.....	19
2.4 Luminescência Atmosférica.....	20
2.5 Ondas de gravidade atmosféricas.....	22
3 INSTRUMENTOS E MÉTODOS.....	25
3.1 O imageador de luminescência atmosférica.....	25
3.2 Imagens da luminescência atmosférica.....	26
3.3 Processamento das imagens.....	27
3.4 Análise espectral de imagens de aeroluminescência.....	28
4 RESULTADOS.....	30
5 CONCLUSÃO.....	32
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

Em nosso Sistema Solar todos os planetas, e certos satélites naturais, possuem atmosfera. Esses envoltórios gasosos são distinguíveis por apresentarem propriedades intimamente relacionadas às suas condições iniciais de formação e evolução. A atual atmosfera da Terra é secundária, ou seja, não foi constituída nos primórdios da formação da Terra, e originou-se por processos vulcânicos com consecutiva liberação de gases, como CO_2 , H_2O e SO_2 , do interior do planeta.

Na atmosfera primordial, os gases mais abundantes eram provavelmente o gás carbônico, o vapor d'água e o hidrogênio, liberados por erupções vulcânicas. A única fonte de produção de oxigênio era a dissociação do vapor d'água pela radiação solar. O oxigênio liberado era rapidamente consumido em outras reações, especialmente com rochas da superfície, oxidando os materiais nela presentes. A quantidade de oxigênio na atmosfera passou a ser significativa com o surgimento das algas e pequenos microrganismos, que sintetizam suas moléculas orgânicas usando gás carbônico e água nos processos de fotossíntese e, assim, liberando o oxigênio. Esta produção de oxigênio superou as perdas, por oxidação, e permitiu assim um acúmulo desse gás na atmosfera, tornando possível a existência de vida na Terra (KIRCHHOFF, 1991).

A atmosfera terrestre é caracterizada como um fluido, suportando a propagação de oscilações mecânicas das mais diversas escalas espaciais e temporais. As ondas de gravidade atmosféricas são oscilações mecânicas geradas pelo desequilíbrio entre as forças de gravidade e do gradiente de pressão, resultante de uma perturbação em uma atmosfera estável e estratificada, com a gravidade atuando como força restauradora. Ondas de gravidade transportam momentum e energia entre as diferentes camadas da atmosfera e ao propagarem-se pelas camadas de emissão da luminescência atmosférica deixam assinaturas típicas, sendo a luminescência um meio traçador das ondas de gravidade. Para detectar essas variações na luminescência e analisar bidimensionalmente as ondas de gravidade utiliza-se os imageadores *all-sky* de alta sensibilidade, instrumentação tipicamente usada na Aeronomia. Além da observação da luminescência atmosférica outros métodos observacionais tais como radares e satélites também são muito utilizados para estudos das ondas de gravidade na alta atmosfera e suas relações com a Ionosfera e baixa atmosfera.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

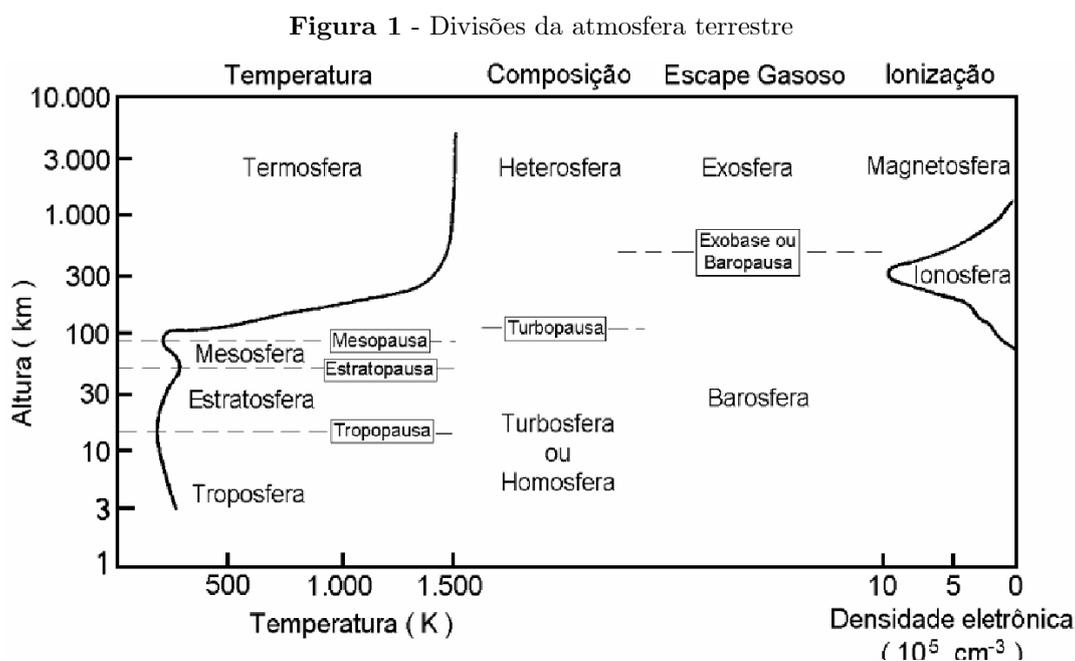
2.1 A atmosfera terrestre

A atmosfera terrestre é uma mistura de gases dos quais o nitrogênio (N) é o mais abundante. Até ± 100 km de altitude a mistura dos gases é praticamente constante, ou seja, a proporção de mistura de um gás em relação ao todo se mantém invariável. Esta porção da atmosfera é conhecida como Homosfera. Os gases, a partir de 100 km de altitude, se distribuem de acordo com suas próprias alturas, e não há mais a mistura proporcional. Esta região superior da atmosfera é chamada de Heterosfera (KIRCHHOFF, 1991).

A atmosfera é uma camada relativamente fina de gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra. Apenas 99% da massa da atmosfera está contida numa camada de $\pm 0,25\%$ do diâmetro da Terra (± 32 km). A composição do ar não é constante no tempo e espaço. Porém tirando partículas suspensas, vapor d'água e certos gases de baixa concentração temos uma composição muito estável sobre a Terra até uma altitude de ± 80 km (GRIMM, 1999).

2.1.1 Divisões da atmosfera terrestre

Para o estudo da atmosfera da terrestres é comum dividi-la em camadas, segundo esquemas de classificação que levam em conta a temperatura, o grau de ionização, a mistura dos constituintes e a composição da atmosfera (HARGREAVES, 1992). A atmosfera pode ser dividida em função de parâmetros físicos e químicos, organizando-a em camadas com características próprias. A Figura 01 ilustra as divisões propostas segundo a temperatura, composição, escape gasoso e ionização para a atmosfera terrestre.

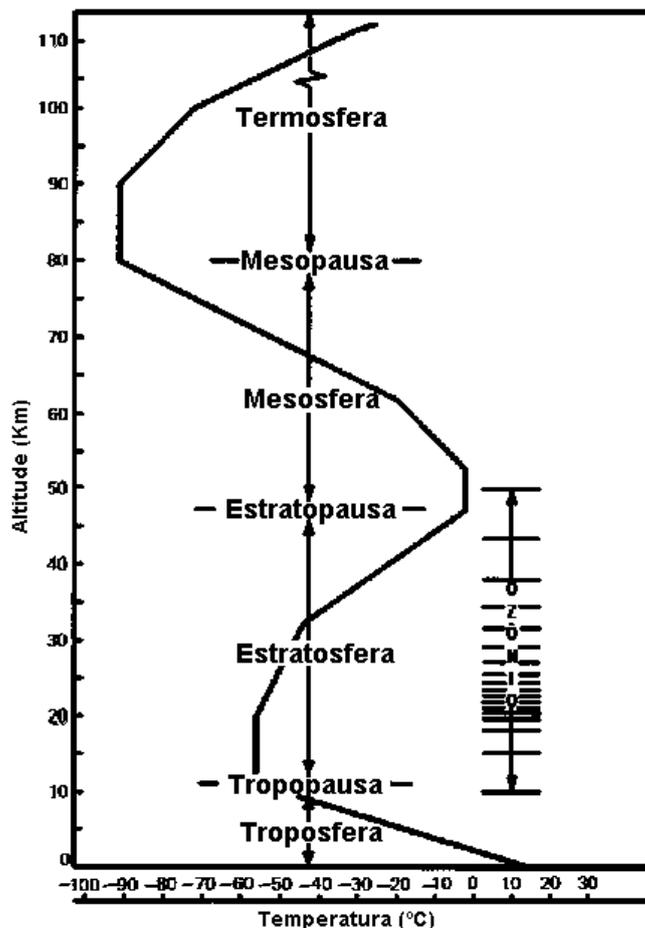


Fonte: adaptado de Hargreaves (1992)

2.1.1.1 Perfil vertical segundo a temperatura

Os processos físicos que influenciam a variação da temperatura com a altura são: a) Convecção; b) Absorção; c) Radiação e d) Condução. O perfil vertical segundo a temperatura é baseado na temperatura média predominantemente em certas regiões da atmosfera, as camadas são nomeadas, respectivamente, como: a) Troposfera; b) Estratosfera; c) Mesosfera e d) Termosfera. Com regiões de transição, inflexões ou gradientes nulos de temperatura conhecidas por “pausas”, são elas: a) Tropopausa; b) Estratopausa e c) Mesopausa. A Figura 02 ilustra a divisão propostas segundo o perfil térmico.

Figura 2 - Perfil vertical da atmosfera segundo a temperatura



Fonte: adaptado de GRIMM (1999)

A **Troposfera** estende-se da superfície até uma altitude média de 12 km (± 20 km no Equador e ± 8 km nos polos). Esta é a camada mais inferior da atmosfera terrestre e sua temperatura decresce com a altitude devido a redução da concentração de gases. Na Troposfera ocorre os fenômenos atmosféricos que condicionam o Tempo. Transferências verticais de ar são concluídas rapidamente, por turbulências, na escala de horas a dias. O limite superior da Troposfera é a Tropopausa.

A **Estratosfera** estende-se até ± 50 km e é caracterizada pelo gradativo aumento da temperatura até ± 20 km de altitude relativamente constante, e posteriormente crescente até seu limite superior (a estratopausa). Esse aumento de temperatura, próprio da camada, é explicado pela presença concentrada de ozônio (O_3), que absorve radiação ultravioleta no processo de fotodissociação, logo a Estratosfera é aquecida nessa região.

Na **Mesosfera**, assim como na Troposfera, a temperatura decresce com a altitude até seu limite superior, a Mesopausa (± 80 km), onde a temperatura atinge aproximadamente 90°C . A temperatura na Mesosfera diminui com a altitude pois a atmosfera se tornar rarefeita, reduzindo a absorção da radiação solar, e pelas emissões radioativas do CO_2 . A Mesopausa é caracterizada pela menor temperatura de toda a atmosfera terrestre, da ordem de 190 K. A Mesosfera e a Estratosfera são chamadas de média atmosfera, por abrangerem regiões de altitude entre 12 e 80 km. (WRASSE, 2000).

Acima da Mesosfera localiza-se a **Termosfera**, a qual não possui limite superior definido e inicialmente sua temperatura é isotérmica, crescendo rapidamente com o aumento da altitude. Nesta camada a temperatura cresce indefinidamente com a altitude até um valor assintótico, chamado temperatura exosférica (KIRCHHOFF, 1991). O perfil térmico apresenta tal comportamento devido a absorção de fótons altamente energéticos, provenientes do Sol, por átomos de oxigênio e nitrogênio (GRIMM, 1999).

2.1.1.2 Perfil vertical segundo a composição química

A atmosfera pode ser dividida quanto a composição química em **Homosfera** e **Heterosfera**. A Homosfera estende-se até ± 100 km de altitude, e esse limite superior é delimitado pela Turbopausa. Como já mencionado na sessão anterior, na Homosfera a razão de mistura dos componentes atmosféricos não apresenta uma grande variação com a altitude, sendo o oxigênio e nitrogênio moleculares os constituintes majoritários. Nessa região, a proporção volumétrica é de 78% de N_2 e 21% de O_2 , sendo o restante argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2), os gases nobres, e outros, em proporções ainda menores. Embora pouco abundantes, CO_2 , H_2O e O_3 têm grande importância devido a sua capacidade de absorver a radiação solar diretamente incidente na atmosfera terrestre (KIRCHHOFF, 1991).

Acima dos 100 km localiza-se a Heterosfera, região onde cada gás, molécula ou átomo tem sua própria altura definida. A Heterosfera pode ser subdividida em Protonosfera, onde ocorre o predomínio de oxigênio e a Heliosfera onde o elemento hélio domina a constituição atmosférica.

2.1.1.3 Perfil vertical segundo o escape gasoso

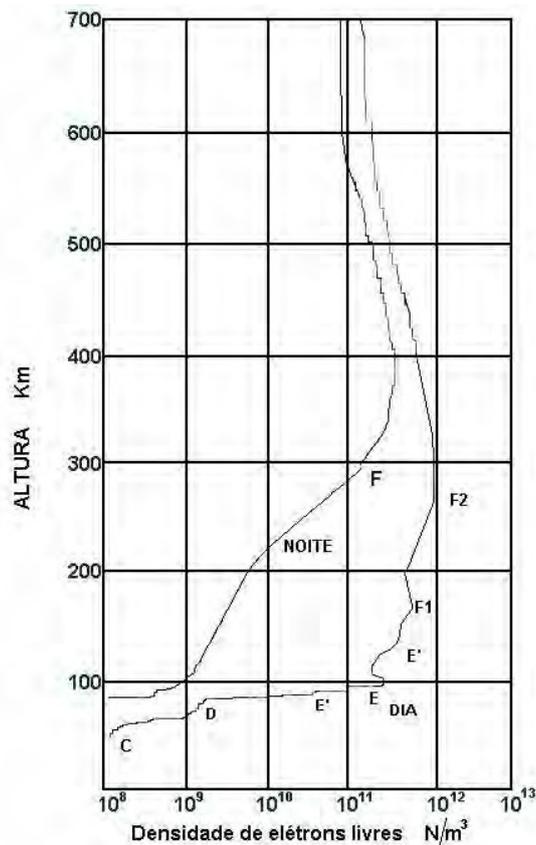
Segundo o escape gasoso a atmosfera neutra pode ser dividida em **Barosfera** e a **Exosfera**. Na Barosfera ocorre a concentração dos constituintes atmosféricos por ação do campo gravitacional terrestre. Sua delimitação superior é a Baropausa, localizada em 600 km. A Exosfera, é a região

acima de 600 km, caracterizada pelo constante escape de constituintes para o espaço exterior, resultado do enfraquecimento da força gravitacional com a altitude.

2.1.1.4 Perfil vertical segundo a composição iônica

A atmosfera terrestre pode ser dividida segundo o perfil de densidade eletrônica em atmosfera neutra, Ionosfera e Magnetosfera (SÃO SABBAS, 1999). A **atmosfera neutra** é a camada entre a superfície da Terra e a Ionosfera, se estende até ± 60 km e nela esta inclusa a Troposfera, Tropopausa, Estratosfera e parte da Estratopausa. É caracterizada como a região onde há pouca incidência de fótons, capazes de promover a ionização dos átomos e moléculas da atmosfera, isso ocorre pois as camadas anteriores da atmosfera absorvem grande parte da radiação solar incidente. A **Ionosfera** é caracterizada por ser a camada ionizada da atmosfera terrestre. É subdividida, considerando os picos do perfil de densidade eletrônica, em camadas concêntricas. Com extensão de ± 60 à 1000 km de altitude, é caracterizada pela ocorrência de ionização parcial dos constituintes atmosféricos pela radiação solar incidente na faixa do ultravioleta, dos raios X e raios cósmicos. Esta absorção da radiação solar por átomos e moléculas, por meio do processo de fotoionização, da origem ao plasma ionosférico. A Figura 03 ilustra o perfil vertical da densidade eletrônica da Ionosfera.

Figura 3 - Perfil vertical da densidade eletrônica da ionosfera



Fonte: adaptado de Lia (2013)

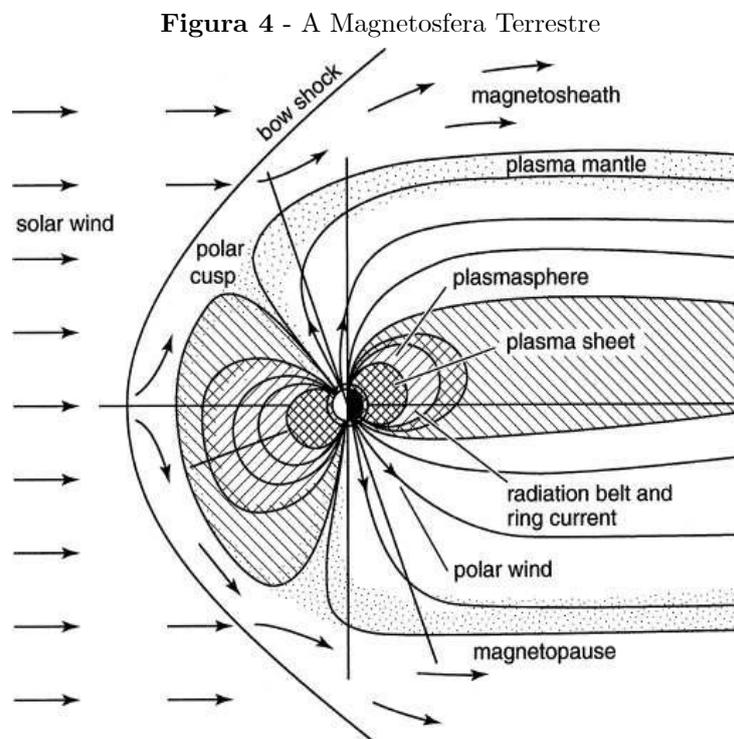
Suas subdivisões são:

a) **Região D:** Considerada a baixa Ionosfera, localiza-se entre ± 60 e 90 km, é dentre todas as regiões a com menor densidade eletrônica. Sua ionização é intensamente dependente da radiação solar, durante a noite a região D praticamente desaparece;

b) **Região E:** Situada entre ± 90 e 150 km, é a região com maior condutividade elétrica da ionosférica. Subdivide-se em duas outras camadas a E2, com maior densidade, e Es, instável. Tem como fonte de ionização a radiação X e ultravioleta.

c) **Região F:** Localizada entre ± 150 e 1000 km de altitude, a região F configura-se como o limite superior da ionosfera. Subdividida nas respectivas camadas concêntricas F1, F2 e F3, cada uma dotada de características próprias. A camada F1, entre ± 150 e 250 km, tem como fonte para ionização de seus constituintes a radiação solar incidente no espectro do ultravioleta. Localizada entre ± 250 e 1000 km, na camada F2 ocorre o pico da concentração iônica, a camada é caracterizada pelos processos dinâmicos fortemente interligados e influenciados pela Ionosfera superior e ventos termosféricos. A camada F3 tem sua altitude fortemente interligada as condições solares e atmosféricas.

Logo após a Ionosfera localiza-se a **Magnetosfera Terrestre**, nesta região do espaço o campo geomagnético predomina sobre o campo magnético do espaço interplanetário. A Magnetosfera rege a dinâmica das partículas eletricamente carregadas próximas ao planeta e protege a Terra do vento solar. É formada pela interação do vento solar com o campo geomagnético. A Figura 04 ilustra esquematicamente a Magnetosfera terrestre.



Fonte: Rycroft et al. (2000)

2.2 O vento solar

Fluindo continuamente do Sol o **vento solar** é constituído de partículas ionizadas, predominantemente de núcleos de hélio ionizado e elétrons. Sendo um plasma altamente condutor o vento solar transporta consigo linhas do campo magnético solar, para este fenômeno dá-se o nome de congelamento das linhas de campo magnético. Como resultado da grande diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário, o vento solar é expulso para longe do Sol, mesmo com a grande atração gravitacional exercida pelo Sol sobre ele, predominando em uma região conhecida como Heliosfera e expandindo-se até o limite do domínio do Sol, a Heliopausa. Como resultado esse plasma com origem no Sol interage frequentemente com o ambiente espacial próximo da Terra, produzindo efeitos diretos como as auroras.

O vento solar é formado pela camada superficial do Sol que sopra dentro do espaço preenchido de campos magnéticos ainda presos ao Sol. O vento arrasta o campo magnético externo, formando o que é chamado de *campo magnético interplanetário*. A região do espaço na qual o campo magnético solar domina é chamada *heliosfera*. O vento solar de plasmas consiste principalmente de elétrons e prótons quentes com uma fração pequena de hélio e alguns outros íons pesados (TAVARES, 2000).

O vento solar possui suas características intensamente relacionadas com a atividade solar e a região do Sol de sua origem, por não ser uniforme quanto a velocidade e densidade, pode ser dividido em **vento solar rápido** e **lento**. O vento solar rápido é proveniente dos buracos coronais, porções da coroa solar mais frias e menos densas, já o vento solar lento tem origem nas baixas latitudes, mais próximas ao equador solar. No plano da órbita terrestre o vento solar que interage com a Terra e outros corpos do sistema solar possui baixa velocidade (± 400 km/s).

O vento solar modifica constantemente a forma e o tamanho do campo geomagnético. Quando Ludwig Biermann (1907-1986) estudou por qual motivo a cauda dos cometas estão opostamente direcionadas ao Sol, Biermann concluiu que o Sol deveria emitir o hoje nomeado vento solar. A pressão do vento solar sobre o campo geomagnético comprime-o no lado diurno da Terra e estende-o, na forma de uma cauda, no lado noturno. No lado diurno da Terra, o campo geomagnético está contido em ± 10 raios terrestres, já no lado noturno o campo se estende por centenas de raios da Terra, indo muito além de sua órbita. O limite entre o vento solar e o campo geomagnético é denominado Magnetopausa, esse limite está em constante movimento enquanto a Terra é atingida pelo vento solar.

Embora a Magnetopausa proteja a Terra do vento solar, essa não é impenetrável. Energia, massa e momentum são transferidos constantemente do vento solar para o interior da Magnetosfera terrestre. Interações entre o vento solar e o campo geomagnético, juntos a Ionosfera e atmosfera neutra, condicionam a existência, dentro da Magnetosfera, da Plasmasfera e dos cinturões de radiação. O clima espacial é resultado dessa grande dinâmica no interior da

Magnetosfera. Em situações onde partículas altamente energizadas penetram e alcançam regiões mais interiores da atmosfera terrestre, ocorrem tempestades magnéticas, as quais podem resultar em graves problemas para satélites, redes de comunicação e de transmissão de energia elétrica.

2.3 A dinâmica da atmosfera neutra

Os ventos caracterizam a dinâmica atmosférica, suas origens estão sempre relacionadas a variações de pressão e conseqüentemente a variações de temperatura e densidade. A atmosfera verticalmente se encontra em equilíbrio hidrostático, logo os ventos são em sua maioria movimentos horizontais de parcelas do ar, gerados por variações horizontais de pressão. O movimento atmosférico na vertical ocorre apenas em pequenas faixas e para concluir o fluxo horizontal de ventos. Os ventos de interesse da Aeronáutica são os ocorrentes na Alta Atmosfera e diferentemente da Meteorologia em Aeronáutica a direção do vento é definido em relação a direção para onde ele sopra (KIRCHHOFF, 1991).

2.3.1 Ventos Termosféricos

Originários dos gradientes de pressão horizontais promovidos pelo aquecimento da Termosfera no período diurno pelo Sol. Estes ventos são importantes acima de 120 km de altura por seus efeitos na Ionosfera.

2.3.2 Ondas Planetárias

São movimentos com períodos da ordem de dias, importantes abaixo da Mesosfera.

2.3.3 Marés Atmosféricas

São oscilações com períodos e sub-períodos do dia solar e lunar. Esta associada à absorção da energia solar direta, principalmente pelo Ozônio e vapor d'água. São importantes da Mesosfera para baixo e o seu estudo requer um tratamento especializado, conhecido como teoria das marés.

2.3.4 Ondas de Gravidade

Oscilações com curto período, da escala de minutos a horas. Uma fonte qualquer, como frentes meteorológicas, jatos de correntes e interações de ventos com cadeias de montanhas, que gere um distúrbio na atmosfera pode dar origem a ondas de gravidade observadas na atmosfera.

2.4 Luminescência Atmosférica

A Luminescência Atmosférica ou Aeroluminescência (*Airglow* do inglês “brilho do ar”) é um fenômeno óptico da alta atmosfera resultante das emissões de fótons por componentes atmosféricos excitados, direta ou indiretamente pela radiação solar, como o oxigênio atômico (OI) e molecular (O_2), hidroxila (OH) e sódio (Na). Esse excitação deve-se principalmente a absorção de energia solar durante o período diurno, sendo mais tarde reemitida, porém também pode ser originada pela colisão entre átomos. A partir do processo de relaxação energética os constituintes atmosféricos excitados acima de seus níveis normais de energia emitem uma tênue radiação de longa faixa espectral, abrangendo bandas do ultravioleta ($\lambda = \pm 250$ nm) ao infravermelho ($\lambda = \pm 4$ μ m). Estes constituintes são encontrados de forma estratificada na Mesosfera e baixa Termosfera (± 80 -100 km) e na Ionosfera (± 250 km).

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. 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 (BAGESTON, 2005).

A luminescência atmosférica deve ser distinguida da Aurora. A Aurora é uma radiação variável, encontrada em latitudes elevadas e tem origem em partículas altamente energizadas advindas do Sol. As Auroras são resultado de elétrons colidindo com a parte superior da atmosfera. Os elétrons são energizados por processos de aceleração no lado noturno da Magnetosfera e em altitudes mais baixas ao longo das linhas de campo auroral.

Diferentemente das Auroras, cuja origem está ligada à interação do vento solar com a atmosfera terrestre, a fonte da aeroluminescência está ligada principalmente a reações químicas que ocorrem entre constituintes atmosféricos (GOMES, 2013). As Auroras são originárias da excitação de átomos e moléculas por partículas energéticas oriundas do vento solar. Ocorrem entre 100 e 1000 km de altitude, são visível a olho nu e predominam nas altas latitudes, regiões da Oval Auroral. Porém, durante fortes tempestades magnéticas, podem ser vistas em latitudes mais baixas (de $\pm 70^\circ$ até $\pm 60^\circ$ N/S) . Diferentemente das auroras, a luminescência atmosférica não é visível a olho nu, por ser uma emissão muito tênue.

Foi Galileu Galilei (1564-1642) quem nomeou esse fenômeno para o hemisfério norte, em referência a deusa grega do amanhecer, Aurora, e ao deus grego relacionado ao vento norte, Bóreas. O nome para a Aurora no hemisfério sul (austral), foi dado pelo explorador, cartógrafo e capitão inglês da *Royal Navy* (Marinha Real Britânica) James Cook (1728-1779), relacionando diretamente a sua ocorrência ao sul. Entretanto descrições a respeito de Auroras datam de 400 A.E.C, em seu tratado *Meteorologia* Aristóteles (385-323 A.E.C) é um dos primeiros ocidentais

a relatar este fenômeno. Foi só em 1958, muito depois de Edmond Halley (1656-1742) associar a existência de Auroras com o campo geomagnético e Elias Loomis (1811-1889) relacionar a ocorrência de Auroras com Erupções Solares, que o satélite *Explorer 1* comprovou a origem das Auroras pelo vento solar. Quando partículas advindas do vento solar são capturadas pelo campo geomagnético, estas são lançadas para nossa atmosfera, e ao interagir com o oxigênio e nitrogênio na alta atmosfera emitem radiação na forma de luz.

Os processos pelos quais ocorre a luminescência atmosférica são: a) Ressonância; b) Fluorescência; c) Fotoionização; d) Fotodissociação; e) Colisões inelásticas; f) Quimiluminescência e g) Excitação por radiação cósmica. Dentre diferentes processos responsáveis pelos fenômenos de luminescência, estão relacionados à reações fotoquímicas, exemplo: fluorescência e quimiluminescência, ressonância e excitação por colisões.

A luminescência atmosférica pode ser classificada conforme o ângulo zenital (z) da radiação solar: a) Diurna (*dayglow*), cuja origem são processos ressonantes e fluorescentes; b) Crepuscular (*twilight*), quando apenas a alta atmosfera é iluminada no nascer ou pôr do Sol ou c) Noturna (*nightglow*), devido à quimiluminescência. A luminescência atmosférica ocorre durante todo o dia e em qualquer latitude, entretanto as observações da luminescência atmosférica ocorrem durante a noite, já que a incidência direta da radiação solar torna o espectro diurno e crepuscular muito ruidoso.

Entre 80 e 100 km de altitude existe três camadas principais de emissão na região mesosférica, que são da hidroxila (OH), oxigênio molecular (O_2) e oxigênio atômico (OI). A camada de emissão da hidroxila se localiza a ± 87 km de altitude, possui uma extensão vertical em torno de 7 a 10 km, do Oxigênio molecular a ± 94 km e do oxigênio atômico ± 96 km. Na Mesosfera o átomo de sódio tem origem na pulverização de meteoroides, se concentrando entre 80 km e 120 km de altura. A aeroluminescência do sódio é observada na linha D, centrada em $\lambda = 589.3$ nm, quando o átomo de sódio decai do estado excitado 2P para o estado 2S (EGITO et al., 2007).

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); do 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).

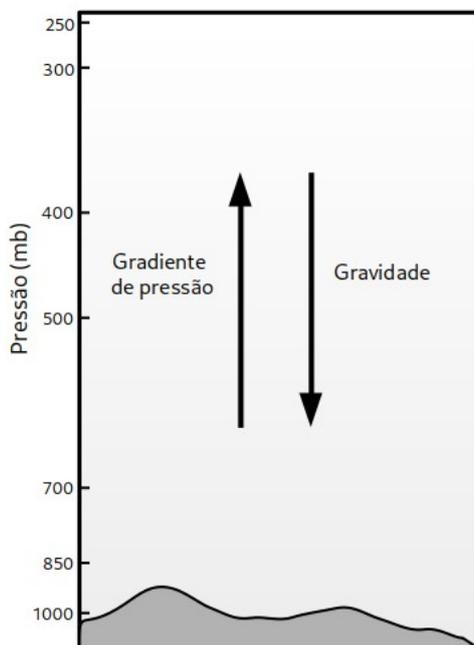
O estudo da luminescência atmosférica tem agregado constantes contribuições a pesquisa da dinâmica da mesosfera e baixa termosfera, da Ionosfera, e aplicabilidades para o aumento da precisão de sistemas GNSS, previsão do clima espacial e proteção de equipamentos e pessoal em sistemas aeroespaciais.

2.5 Ondas de gravidade atmosféricas

Como já foi mencionado, a atmosfera terrestre se comporta como um fluido e pode suportar a propagação de ondas mecânicas de várias escalas espaciais e temporais. As Ondas de Gravidade Atmosféricas transportam energia e momentum de uma região para outra. São exemplos de diferentes tipos de ondas na atmosfera: a) Ondas acústicas (longitudinais), o deslocamento ocorre na mesma direção da propagação; b) Ondas de gravidade (vertical transversa), a propagação ocorre horizontalmente e é composta de deslocamentos verticais; c) Ondas de Rossby (horizontalmente transversas), são ondas planetárias que se propagam horizontalmente, são compostas de deslocamentos horizontais perpendiculares à direção de propagação (WRASSE, 2000).

Ondas de gravidade são perturbações mecânicas que se propagam em uma atmosfera estável e estratificada. Resultam do desequilíbrio entre o gradiente de pressão e a gravidade, tendo a força gravitacional como força restauradora. A Figura 05 ilustra a força do gradiente de pressão atuando (para cima) em uma parcela de ar, movendo-a de regiões com maior pressão (próximo a superfície) para de menor pressão (maior altitude) e a gravidade forçando (para baixo) o retorno desta parcela de ar para superfície. Quando ocorre um desbalanço entre essas duas forças, pequenas ondas, com períodos de 5 minutos à 8 horas surgem nessa região.

Figura 5 - Desequilíbrio entre o gradiente de pressão e a gravidade.



Fonte: produção do autor

Os estudos sobre as ondas de gravidade na alta atmosfera iniciaram-se com o advento do lançamento de foguetes nos anos 50, onde as medidas de vento nesta região da atmosfera apresentavam características de intensidade e direção bastante diferentes dos ventos observados na baixa atmosfera. Os ventos na alta atmosfera apresentavam valores intensos e grande

variação em função da altura. Por este motivo, estes foram inicialmente chamados de “ventos irregulares”. Porém, a partir do trabalho de Hines (1960) e de uma série de artigos publicados desde os anos 50 até a década de 90, explicaram-se que estes ventos não eram tão irregulares assim, mas podiam ser interpretados como sendo provenientes de uma soma de modos de propagação de ondas de gravidade internas (BAGESTON, 2010).

Ondas de Gravidade ao propagarem-se deixam assinaturas bem definidas nas camadas da luminescência atmosférica, devido ao movimento adiabático nas camadas de emissão. A luminescência atmosférica serve como um meio traçador para estimar a temperatura mesosférica e para acompanhar a atividade de Ondas de Gravidade.

Estas ondas se propagam 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). Pode-se classificar Ondas de Gravidade em **propagante** e **evanescente**. O que as diferencia concerne na orientação da propagação, ondas propagantes propagam-se tanto na horizontal quanto na vertical, já as ondas evanescentes 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). 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).

O monitoramento da atividade de ondas de gravidade é importante aliado no estudo das irregularidades ionosféricas ou bolhas de plasma. Ondas de gravidade transportam momento e energia da baixa para média atmosfera, e ao alcançarem ± 100 km de altura, essas quebram e dão origem a ondas secundárias, que ao se propagarem podem atingir a base da ionosfera e iniciar essas irregularidades no plasma ionosférico, que por sua vez, podem causar interferências em sinais de GPS e nas telecomunicações (WRASSE, 2005).

Bolhas de plasma ionosférico são irregularidades, áreas em que a densidade do plasma ionosférico é extremamente reduzida, geradas após o pôr do sol na região do equador magnético devido a instabilidades no plasma. Essas irregularidades de grande escala ocorrem na região F da ionosfera. O plasma ionosférico tem origem no efeito de dissociação provocado pela radiação solar incidente. O estudo das bolhas de plasmas é muito importante para o melhor entendimento dos processos dinâmicos da alta atmosfera e é um elemento determinante na previsão do clima espacial (PAULINO et al., 2007)

A aeroluminescência atmosférica é utilizada para 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 emissões, e então a intensidade de luz irradiada irá mudar (MEDEIROS, 2001).

Alguns exemplos de tipos de ondas de gravidade atmosféricas, de acordo com sua extensão horizontal e duração nas imagens.

- a) Bandas: série de ondas quase monocromáticas, possuem grande extensão horizontal e duração nas imagens de várias horas;
- b) Ripples e Ladders: onda de pequena escala, com pouco quilômetro (± 5 até 15 à 20 km) horizontal e com duração de poucos minutos;
- c) Pororoca: frente de onda, bem definida, seguida as vezes por várias ondas (trem de ondas), normalmente ocupando vasta área em extensão.

As típicas fontes de geração das ondas de gravidade incluem os efeitos orográficos, a convecção térmica e o cisalhamento local de ventos. No entanto, outras fontes podem também ser significativas em locais preferenciais ou em associação com a dinâmica específica de larga escala (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Outros exemplos de fontes importantes são as correntes de jatos (*jet streams*) na troposfera e os sistemas frontais. Interações entre ondas de pequena escala também podem gerar ondas de maior escala (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Em altas latitudes, as ondas de gravidade podem ser geradas por efeito Joule, na região da Oval Auroral, durante intensas tempestades magnéticas, e pelo eletrojato auroral (TAYLOR; HAPGOOD, 1988). Os trabalhos de Taylor e Hapgood (1988) e Taylor et al. (1995a), por exemplo, mostram que as atividades de tempestades elétricas na atmosfera, associadas às nuvens Cumulonimbus, também podem ser geradoras das ondas de gravidade observadas na Mesosfera. A geração dessas ondas ocorre a partir das intensas convecções no interior dessas nuvens (BAGESTON, 2010).

A técnica de *Ray Tracing* é muito utilizada para estimar a fonte geradora de uma onda. A partir da observação com imageador de uma onda na região mesosférica são calculados os parâmetros dessa onda e junto as informações de temperatura, vento e densidade, é estimando a trajetória da onda e sua posição de origem. Ondas com pequeno comprimento de onda ($\lambda_h = 50$ km) possuem origem principalmente em instabilidades. Grande parte dos eventos observados na Mesosfera possui ligação direta com a Troposfera, ou seja, com origem em eventos meteorológicos como as frentes frias, regiões convectivas e tempestades elétricas.

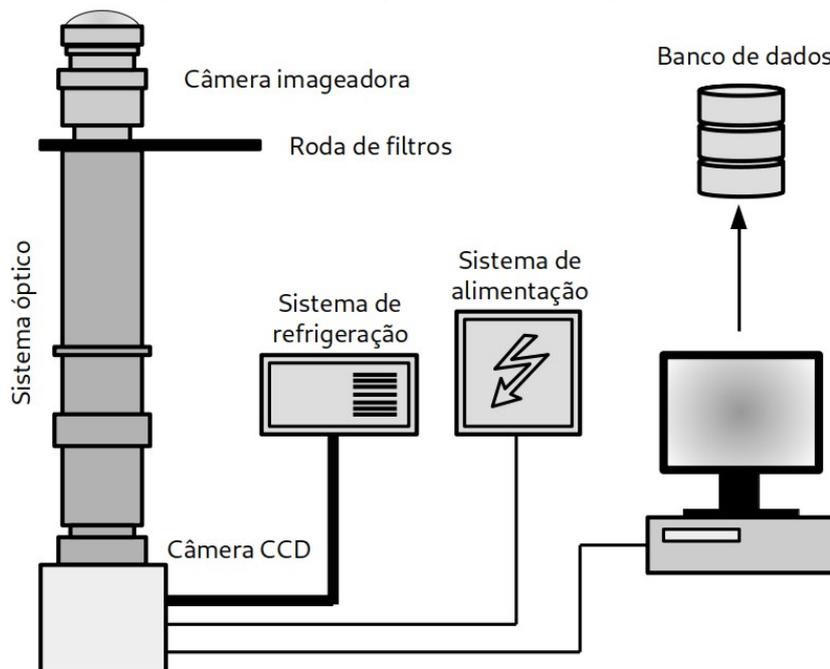
3 INSTRUMENTOS E MÉTODOS

3.1 O imageador de luminescência atmosférica

Um imageador *all-sky* é um dispositivo projetado para registrar uma grande quantidade de imagens do céu em um ângulo de 180° e durante certo período de tempo. É muito útil no monitoramento de eventos meteorológicos, chuvas de meteoros e fenômenos astronômicos. A incorporação de imageadores no estudo da dinâmica da Mesosfera iniciou-se com a introdução de dispositivos CCD (*Charge Coupled Device*), capazes de realizar registros remotamente da aeroluminescência com grande resolução espacial e temporal.

O imageador, basicamente, é constituído por: a) uma lente olho de peixe, com campo de visão de 180° , capaz de captar todo céu noturno observável (abóboda celeste); b) um sistema de lentes telecêtricas, visando eliminar distorções e criar uma condição em que a luz monocromática incida perpendicularmente sobre o detector CCD; c) um conjunto de filtros de interferência, utilizado para selecionar linhas de emissão de interesse da luminescência atmosférica; d) um dispositivo CCD (*Charge Coupled Device*), composto por uma matriz de células fotossensíveis responsáveis pela captura de imagens, quando exposto diferentes seções do CCD geram cargas elétricas proporcional à intensidade da luz incidente, permitindo a partir dessas cargas quantificar com precisão a incidência radiativa de cada fração da imagem; e) um sistema de refrigeração e f) uma fonte de alimentação. A Figura 06 ilustra esquematicamente um imageador *all-sky*.

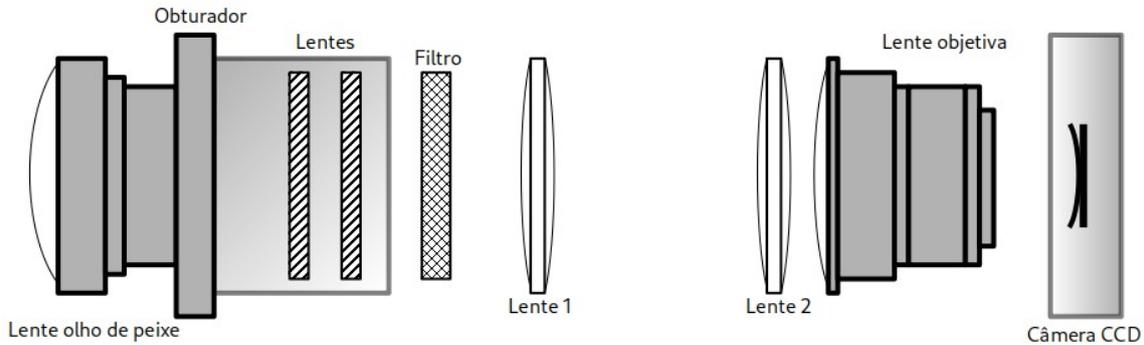
Figura 6 - Desenho esquemático de um imageador *all-sky*.



Fonte: produção do autor

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).

Figura 7 - Diagrama ilustrando o sistema óptico e de filtros de um imageador *all-sky*



Fonte: produção do autor

A emissão incidente sobre o sistema óptico primeiramente atravessará a lente olho de peixe, para assim gerar uma imagem de tamanho igualmente proporcional ao do filtro (nomeada como imagem primária). Ao passar o obturador (dispositivo mecânico para controle do tempo de exposição), um conjunto de lentes telecênicas atuaram para que a emissão da luminescência tornem-se paralelas ao eixo do sistema óptico. Posteriormente a emissão será incidida sobre um determinado filtro de interferência, específico para o comprimento de onda da espécie fotoquímica de interesse, presente no conjunto da roda de filtros. Por fim a emissão filtrada passará por um sistema de lentes com o objetivo de reconstruir a imagem, a tornando proporcional ao tamanho do detector CCD. Como resultado a emissão incidente inicialmente sobre a lente olho de peixe deve ser projetada sobre toda área do detector CCD.

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).

3.2 Imagens da luminescência atmosférica

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 ($\pm 80-100$ 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).

3.3 Processamento das imagens

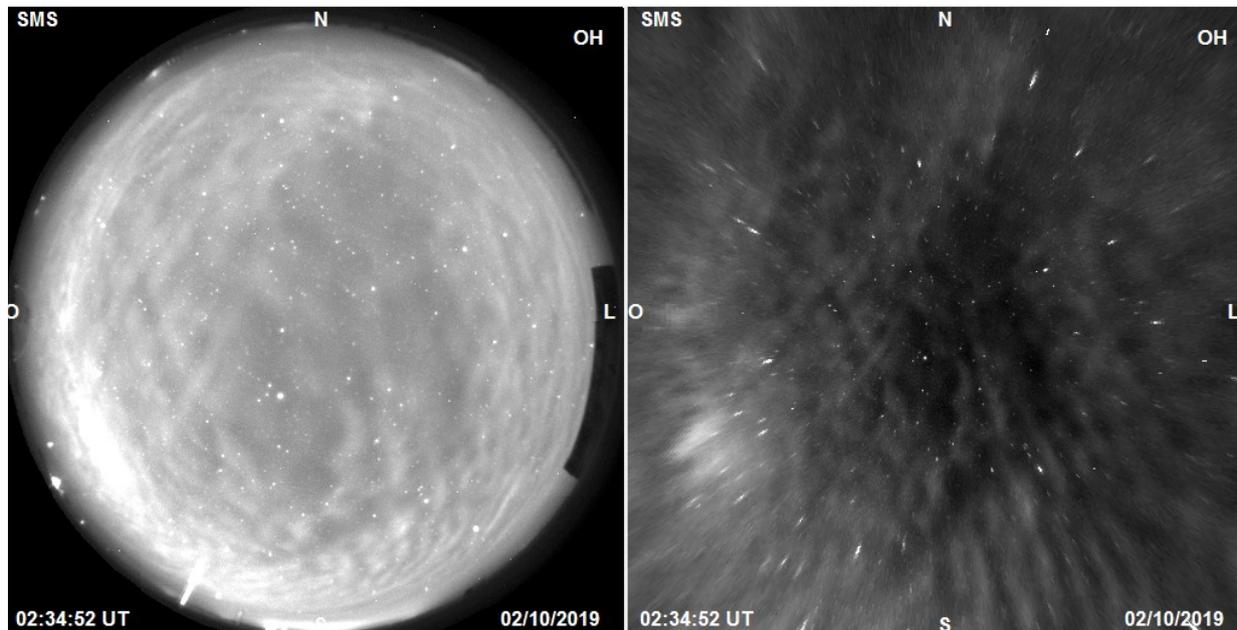
Para analisar as imagens de aeroluminescência e extrair os parâmetros das ondas de gravidade é necessária a realização do pré-processamento das imagens. A técnica do pré-processamento transforma o sistema de coordenadas da CCD para um novo sistema de coordenadas geográficas. A primeira etapa do pré-processamento visa alinhar o topo da imagem com o norte geográfico, para isso a imagem deve sofrer uma transformação de rotação em um ângulo adequado. Na segunda etapa objetiva-se remover as estrelas das imagens, visto a contaminação luminosa do espectro das ondas. A terceira etapa consiste em mapear as imagens originais para um novo sistema de coordenadas, pois a projeção do céu noturno sobre a câmera CCD é distorcida devido ao formato da lente, neste novo sistema de coordenadas o zênite encontra-se na origem do sistema. Na quarta etapa determina-se a fração da flutuação de intensidade das imagens de aeroluminescência, assim é possível medir a variação de intensidade de um certo pixel em determinado instante. A quinta etapa consiste na filtragem das imagens e na sexta etapa as imagens são submetidas a uma função de ponderação para minimizar os lóbulos laterais dos picos significantes do espectro (WRASSE et al., 2007).

A análise computacional das imagens obtidas pelo imageador e a determinação das características das ondas de gravidade depende da utilização de um sistema de coordenadas que relacione a distância entre pixels na imagem original com uma distância física na camada de luminescência. Por meio da linearização (ou ajuste de imagens para remoção dos efeitos de borda) os pixels das imagens linearizadas podem ser relacionadas com o sistema de coordenadas geográficas. Esse procedimento é muito importante para a correta determinação das características das ondas de gravidade atmosféricas (GARCIA et al., 1997). Na transformação de coordenadas se mapeia as coordenadas originais da imagem, uma matriz de pixels, em um sistema de coordenadas geográficas, e só depois disto se aplica a análise espectral (ALMEIDA, 2010). Através da transformação de coordenadas se obtêm uma função da curvatura da lente, chamada de função de lente (coordenadas azimutais e de elevação) e agora, então, a imagem é projetada no sistema de coordenadas geográficas (MEDEIROS, 2001).

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 Figura 08 mostra um exemplo de imagem obtida pelo imageador *all-sky* do OES na noite de de 02 de Novembro de 2017 para o filtro OH (esquerda) e a mesma linearizada, já em coordenadas geográficas, em 512 x 512 km e com as estrelas removidas (direita).

Figura 8 - A esquerda imagem obtida com um imageador all-sky, a direita mesma imagem já linearizada



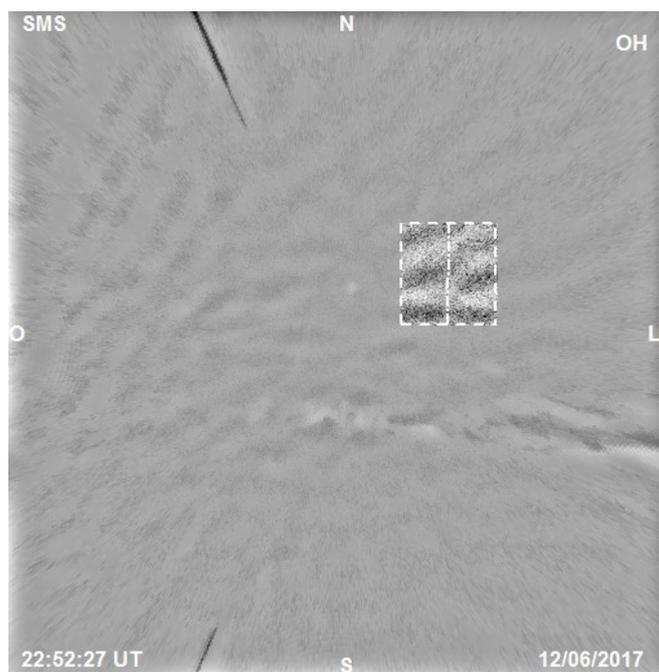
Fonte: produção do autor

3.4 Análise espectral de imagens de aeroluminescência

Para a análise espectral das imagens de aeroluminescência inicialmente identifica-se o evento da onda de gravidade de interesse. Com os eventos de onda já identificados e o pré-processamento realizado, as imagens são pré-processadas conforme as etapas descritas anteriormente, pode-se aplicar a análise espectral em uma sequência de imagens selecionadas. A análise espectral consiste da transformada de Fourier discreta aplicada ao conjunto de imagens selecionadas (BAGESTON, 2010). O pré-processamento, assim como, a análise espectral é encontrada descrita detalhadamente no trabalho de Wrasse et al. (2007). Para a aplicação da análise espectral, é necessário ter um ou mais eventos de onda de gravidade nas imagens, assim, escolhe-se uma sequência de imagens com as informações de determinado evento, para o reconhecimento e delimitação da região de interesse anima-se o conjunto de imagens e por ultimo é aplicado a transformada de Fourier na região delimitada da sequencia de imagens (ALMEIDA, 2010).

A Figura 09 mostra uma imagem da aeroluminescência em coordenadas geográficas, mapeada para uma área de 512 x 512 km, e com as estrelas removidas. O box sobre a imagem indica a região onde a análise espectral será aplicada, dessa forma as características das onda de gravidade que atravessam essa delimitação são obtidas.

Figura 9 - Imagem da aeroluminescência linearizada e com box para análise espectral.



Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS

Os resultados mais relevantes obtidos até o momento estão relacionados aos avanços em conhecimentos teóricos dentro da grande área de Geofísica Espacial, mas especificadamente, no campo da Aeronomia. Destaca-se o conhecimento técnico obtido a respeito de imageadores *all-sky*, do processamento de imagens e da análise espectral de eventos de ondas. Assim como da aplicação dos conhecimentos adquiridos ao longo dos cursos de graduação e técnico, e no aprimoramento de novos conhecimentos.

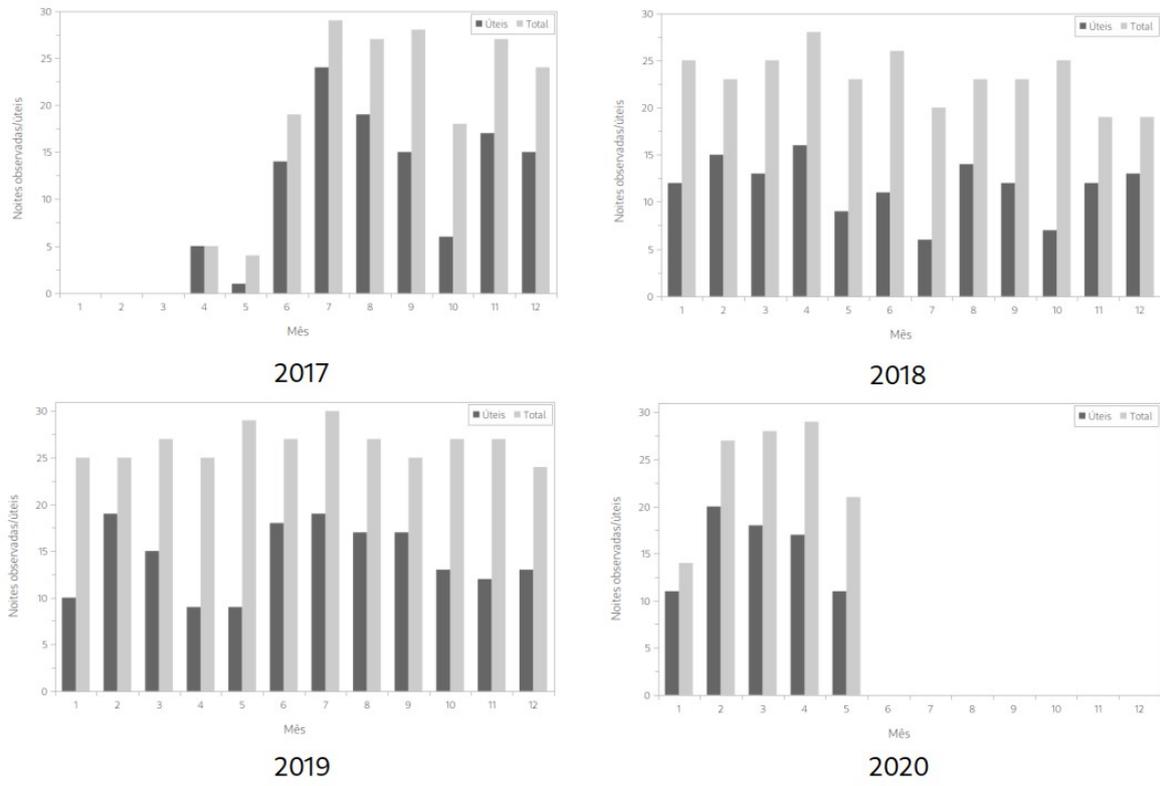
Eventos de onda foram identificados e parcialmente analisados. Estatísticas das observações para os anos de 2017 à 2020 foram parcialmente concluídas. O bolsista está aprimorando conhecimentos para domínio de softwares livres, como a Suíte *LibreOffice*, e linguagens de programação, como *IDL*, *Python*, *R* e *Shell*, tanto para análise de dados como automação de instruções. Devido a atual pandemia de Covid-19 os resultados, logo a conclusão de alguns objetivos propostos, sofreram um atraso. A realização do processamento de imagens e análise espectral de eventos de Onda encontrados, para obtenção dos parâmetros físicos das Ondas de Gravidade de pequena escala, serão concluídas e publicadas futuramente.

Resultados preliminares da campanha de observações, realizada de 01/01/2017 a 30/07/2020, resultaram em 897 noites observadas¹. Foram classificadas “úteis” 504 noites e “inútil” 393. Do total 485 não foram observadas, sendo 306 devido à inatividade do sistema imageador e 179 por presença de falhas.

Estatísticas mais específicas das observações para o ano de 2020, de 01/01/20 à 02/07/20, resultaram em 101 noites observadas consideradas úteis, segundo critérios de visibilidade e tempo de duração da observação. Neste intervalo de tempo ocorreram 16 falhas técnicas na instrumentação e 12 noites sem observação, totalizando 28 noites de observação perdidas. Observou-se um total de 172 noites, totalizando 1064 horas de filmagem ou ± 44 dias corridos. A Figura 10 mostra histogramas das observações para os anos de 2017 à 2020.

¹ Noites em que o sistema imageador, ativo, realizou observações da aeroluminescência.

Figura 10 - Histograma das observações para os anos de 2017 à 2020



Fonte: produção do autor

5 CONCLUSÃO

Durante o transcorrer do projeto o acadêmico realizou estudos teóricos, em literatura científica especializada, na grande área de física espacial, com devida atenção a alta atmosfera terrestre e seus fenômenos, fundamentalmente de luminescência atmosférica e das ondas de gravidade na mesosfera e baixa termosfera. Como perspectivas futuras o bolsista irá finalizar as estatísticas para as observações noturnas e concluirá o processamento de imagens e análise espectral de eventos das ondas encontradas, para obtenção dos parâmetros físicos das ondas de gravidade de pequena escala, as quais irão ser publicadas. As atividades de iniciação científica continuaram sendo realizadas pelo acadêmico na situação de voluntário.

6 REFERÊNCIAS 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.

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.

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, 2010.

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

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

GARDNER, C. S.; Taylor, M. J., Observational limits for lidar, radar, and airglow imager measurements of gravity parameters, **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. 6, p. 6427-6437, 1998.

GOMES, Fábio do Egito. **Efeitos das ondas planetárias na aeroluminescência** / Fábio do Egito Gomes. – São José dos Campos : INPE, 2013. xxviii + 213 p.; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.24.13.54-TDI)

GOODY, R.M.; WALKER, J.C.G. **Atmosferas planetárias**. São Paulo: Edgard Blücher, 1975, 138p.

GRIMM, A. M. **Meteorologia Básica - Notas de Aula**. Disponível em: <http://sica.ufpr.br/grimm/aposmeteo>. Primeira versão: 1999. Acesso em: 12 de março de 2019.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. Cambridge University Press, 1992. 420 p.

Cambridge: HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Canadian Journal of Physics**, v. 38, n. 11, p. 1441–1481, 1960.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 141 p.

LIA, Claudia Vogel. **Estudo da ionosfera da região brasileira com dados dos satélites FORMOSAT-3 / COSMIC e de Digissondas** / Claudia Vogel Ely. - São José dos Campos: INPE, 2010. xxiv + 123 p. ; (INPE-16695-TDI/163)

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência** / A.F. Medeiros. – São José dos Campos: INPE, 2001. 187p. – (INPE-10478-TDI/932).

MERIWETHER, J. W. A Review of the photochemistry of selected Nightglow emissions from the mesopause. **J. Geophys. Res.**, v.94, n.D12, p.14629- 14646, 1989.

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.

SÃO SABBAS, F. T. **Estudo da relação entre sprites e os relâmpagos das tempestades associadas**. 142 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.

OLIVEIRA, D. M.; SILVEIRA, M. V. D. Clima espacial e choques interplanetários. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 38, n. 1, 2016

TAVARES, M.; Santiago, M. A. M. Eletricidade atmosférica e fenômenos correlatos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, n. 4, 2002.

TAVARES, M. Meteorologia Espacial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, n. 4, 2000.

TAVARES, M. Aprendendo sobre o Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 22, n. 1, 2000.

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.