



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.13.17.35-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE DE
MÉDIA ESCALA OBSERVADAS SIMULTANEAMENTE
EM DIFERENTES CAMADAS DA
AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA**

Anderson Vestena Bilibio

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Cristiano Max Wrasse, e Igo Paulino da Silva, aprovada em 05 de abril de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48MREJE>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.13.17.35-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE DE
MÉDIA ESCALA OBSERVADAS SIMULTANEAMENTE
EM DIFERENTES CAMADAS DA
AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA**

Anderson Vestena Bilibio

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Cristiano Max Wrasse, e Igo Paulino da Silva, aprovada em 05 de abril de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48MREJE>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bilibio, Anderson Vestena.

B494c Caracterização de ondas de gravidade de média escala observadas simultaneamente em diferentes camadas da aeroluminescência noturna / Anderson Vestena Bilibio. – São José dos Campos : INPE, 2023.
xxiv + 132 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/03.13.17.35-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadores : Drs. Cristiano Max Wrasse, e Igo Paulino da Silva.

1. Ondas de gravidade de média escala. 2. Aeroluminescência. 3. Mesosfera. 4. Termosfera. 5. Ray tracing. I.Título.

CDU 535.241.44



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE ANDERSON VESTENA BILIBIO
REG. 135410/2017, BANCA Nº 064/2023

No dia 05 de abril de 2023, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: "CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA OBSERVADAS SIMULTANEAMENTE EM DIFERENTES CAMADAS DA AEROLUMINESCÊNCIA NOTURNA."

Membros da banca:

Dra. Maria Paulete Pereira Martins - Presidente - INPE

Dr. Cristiano Max Wrasse - Orientador - INPE

Dr. Igo Paulino da Silva - Orientador - UFCG/Departamento de Física

Dr. Delano Gobbi - Membro Interno - INPE

Dr. Ricardo Arlen Buriti da Costa - Membro Externo - UFCG/Departamento de Física

Dra. Amélia Naomi Onohara - Membro Externo - AEB



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Max Wrasse, Pesquisador**, em 11/04/2023, às 14:17 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Paulete Pereira Martins, Pesquisadora**, em 11/04/2023, às 16:28 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo arlen Buriti da costa (E), Usuário Externo**, em 11/04/2023, às 18:02 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Igo paulino da silva (E), Usuário Externo**, em 11/04/2023, às 18:56 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Amelia naomi onohara (E), Usuário Externo**, em 11/04/2023, às 22:07 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

JOSÉ DE ALENCAR

*À meus pais Luiz Carlos Bilibio e Suzana T. Vestena Bilibio,
meu irmão Andreos e minha companheira Nicole de Oliveira*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais Luiz Carlos Bilibio e Suzana Terezinha Vestena Bilibio pela perseverança em meu desenvolvimento pessoal. Graças a eles pude direcionar meu foco e dedicação aos estudos, tendo sido sempre incentivado, ainda que meus pais não tivessem tido a mesma oportunidade e mesmo desprovidos de grandes condições.

Estendo meu agradecimento ao apoio e dedicação dispensados a mim pelo Professor Orientador Dr. Cristiano Max Wrasse, Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas (INPE). Em especial, pela paciência e orientação em minha formação de pesquisador brasileiro. Agradeço por ter acreditado em minha pessoa, por sua dedicação tanto pessoal, como profissional, também, por ter me proporcionado participar de seu grupo de pesquisa, dentre os poucos Pesquisadores brasileiros que compõe esta área de estudos.

Ao Professor Dr. Igo Paulino da Silva, Professor da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba. Agradeço por ter se disponibilizado para comigo, na orientação e formação profissional. Igualmente, por ter me proporcionado participar da interação com os professores e pesquisadores da UFCG, e região nordeste do país. Tal como, Professor Ricardo Buriti, por ter me recepcionado muito bem à minha ida a UFCG, em processo de aprendizagem. Adicionalmente, agradeço ao Professor Igo, por seus ensinamentos e por ter acreditado em minha pessoa.

Em especial, agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, em Santa Maria (RS) pelo incentivo e profissionalismo como orientador e por sua amizade, mas principalmente pelas orientações fundamentais para minha carreira profissional, no início do meu contato com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, proporcionando-me grande crescimento pessoal e profissional.

Aos professores e pesquisadores Dr. Delano Gobbi e Dr. Hisao Takahashi, da Divisão de Clima Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pelas instruções e ensinamentos no decorrer dos estudos e pesquisas no INPE. Ainda, aos demais Professores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, que de alguma maneira contribuíram em meu desenvolvimento profissional, como também para atingir o presente trabalho.

A todos os colegas e ex-colegas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais,

com quem tive e tenho o prazer de conviver e trabalhar. Em especial aqueles com quem pude aprofundar a amizade, essas relações têm sido muito importantes para o meu desenvolvimento. Assim como, aos colegas de grupo de pesquisa, como, Cosme, Diego, Solomon, Patrick, Tunde, Prosper, pela força, união e ajuda, deste grupo sólido. Ainda, aos colegas mais recentes, Gabriel, Luiz e Rogério. Agradeço também, a meus amigos e familiares próximos.

Agradeço em especial ao mais novo colega, Luiz, o qual não se deteve em me tirar dúvidas direcionadas a linguagem de programação, mesmo que, em períodos não tão oportunos e em detrimento de suas horas vagas.

Estendo os agradecimentos ao apoio financeiro e institucional do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), visto que, sem este suporte financeiro, se tornaria insustentável meu acesso ao conhecimento e desenvolvimento científico, pessoal e profissionalmente. Ainda, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por ter me proporcionado acesso abrangente para desenvolvimento científico e tecnológico profissionalmente, de maneira, nacional e internacional.

Finalmente, a todos que de alguma forma colaboraram com a execução deste trabalho científico da tese de doutoramento.

RESUMO

No presente trabalho de tese foram investigadas ondas de gravidade de média escala observadas a partir de imagens obtidas de múltiplas camadas de emissão da aeroluminescência noturna (OH, O₂ e OI 557,7 nm). As observações foram realizadas nos observatórios de Cachoeira Paulista (22,7°S; 45,0°O) e São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O) entre os anos de 1998 e 2013. Uma nova técnica de análise das ondas foi empregada, a qual consiste em produzir um keograma na direção de propagação da onda de gravidade e determinar a propagação da fase da onda em múltiplas camadas da aeroluminescência. Desta forma, foi possível investigar a propagação vertical das ondas de gravidade de média escala. Os resultados obtidos para os 38 eventos de onda encontrados mostram que a maioria das ondas de gravidade observadas possui comprimentos de onda horizontal entre 150 e 300 km, velocidade de fase horizontal que varia entre 40 e 70 m/s, período entre 30 e 70 min e se propagando principalmente para as direções nordeste, leste e sudeste. A análise da propagação de fase das ondas, através das múltiplas camadas da aeroluminescência, possibilitou identificar que 66% das ondas de gravidade de média escala observadas possuem propagação de fase ascendente, isto implica em afirmar que a energia da onda se propaga de forma descendente. Por outro lado, apenas 34% das ondas de gravidade de média escala observadas possuem propagação de fase descendente, o que significa que a energia da onda se propaga de forma ascendente. Este foi um dos resultados mais importantes obtidos na presente tese. As características das ondas de gravidade foram então utilizadas como parâmetros de entrada no modelo *ray tracing* para investigar a propagação das ondas através da atmosfera. Para compor os campos de temperatura, densidade e vento da atmosfera, foram utilizados os modelos NRLMSISE-00 e HWM-14. Os resultados obtidos pelo modelo *ray tracing* mostraram que as ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, possuem sua origem em diversas camadas da atmosfera, a saber: 16% na mesosfera, 56% na baixa termosfera e 28% na termosfera. Por outro lado, as ondas de gravidade com propagação de fase descendente possuem sua origem majoritariamente na baixa troposfera (93%) e apenas 7% na região da mesosfera. Além disso, dois estudos de caso também foram conduzidos para investigar a propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente. Os resultados sugerem que a origem termosférica das ondas de média escala, com propagação de fase ascendente, podem ser via deposição de *momentum* e energia de ondas primárias ou secundárias, ou até mesmo da reflexão de ondas com propagação de fase descendente. Por outro lado, um estudo de caso para uma onda de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, também foi realizado. Os resultados obtidos indicam que esta onda teve sua origem, na baixa troposfera, sobre uma região montanhosa, sem a presença de convecções profundas. Uma análise preliminar indicou que o escoamento do vento horizontal em 850 hPa ($\sim 1,5$ km de altitude) não poderia ser capaz de gerar ondas de montanhas desta natureza.

Palavras-chave: Ondas de gravidade de média escala. Aeroluminescência. Mesosfera. Termosfera. *Ray tracing*. Dinâmica da atmosfera.

CHARACTERIZATION OF MEDIUM-SCALE GRAVITY WAVES SIMULTANEOUSLY OBSERVED IN DIFFERENT LAYERS OF NIGHT AEROLUMINESCENCE

ABSTRACT

The present thesis investigated medium-scale gravity waves observed from images obtained of multiple airglow emission layers (OH, O₂ e OI 557,7 nm). The observations were conducted at Cachoeira Paulista (22.7°S; 45.0°W) and São João do Cariri (7.4°S; 36.5°W) from 1998 to 2013. A new wave analysis technique was employed, producing keograms in the propagation direction of the gravity wave and determining the wave's phase propagation through multiple airglow layers. It was possible to investigate the vertical propagation of medium-scale gravity waves. The results obtained for the 38 wave events found showed that most of the observed gravity waves have horizontal wavelengths between 150 and 300 km, horizontal phase velocity ranging between 40 and 70 m/s, period between 30 and 70 min, and propagating mainly to the northeast, east and southeast directions. The analysis of the phase propagation of the waves through the multiple airglow layers made it possible to identify that 66% of the observed medium-scale gravity waves have upward phase propagation; this implies that the wave energy propagates downward. On the other hand, only 34% of the observed medium-scale gravity waves have downward phase propagation, which means that the wave energy propagates upwards. This result is one of the most important ones obtained in the thesis. The characteristics of the gravity waves were then used as input parameters in the ray tracing model to investigate the propagation of the waves through the atmosphere. The NRLMSISE-00 and HWM-14 models provided the atmosphere's temperature, density, and wind fields. The results obtained by the ray tracing model showed that the medium-scale gravity waves, with upward phase propagation, originated in several layers of the atmosphere, namely: 16% in the mesosphere, 56% in the lower thermosphere, and 28 % in the thermosphere. On the other hand, the gravity waves with the downward phase propagation originate mostly in the low troposphere (93%) and only 7% in the mesosphere region. Furthermore, two case studies were also conducted to investigate the propagation of medium-scale gravity waves with upward phase propagation. The results suggest that the thermospheric origin of medium-scale waves with upward phase propagation can be via the deposition of momentum and energy of primary or secondary waves or even the reflection of waves with downward phase propagation. On the other hand, a case study for a medium-scale gravity wave with downward phase propagation was also carried out. The results show that the wave originated in the low troposphere over a mountainous region without deep convections. A preliminary analysis indicated that horizontal wind flow at 850 hPa level (~ 1.5 km altitude) would not be able to generate wave mountains of this nature.

Keywords: Medium-scale gravity waves. Airglow. Mesosphere. Thermosphere. Ray tracing. Dynamics of the atmosphere.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Representação surrealista das ondas de gravidade na atmosfera.	1
2.1 Representação pictórica das camadas de emissões da aeroluminescência. .	10
2.2 Representação de propagação da onda de gravidade na atmosfera terrestre.	20
2.3 Representação do nível de reflexão para onda de gravidade.	23
2.4 Representação do processo de canalização das ondas de gravidade.	25
2.5 Representação do processo de absorção das ondas de gravidade.	26
2.6 Ilustração do mecanismo de acoplamento vertical de várias etapas.	32
3.1 Representação esquemática dos imageadores utilizados no presente trabalho para observar as emissões da aeroluminescência noturna.	34
3.2 Ilustração das etapas do pré-processamento das imagens da aeroluminescência para a emissão do OH.	38
3.3 Ilustração das etapas do pré-processamento das imagens da aeroluminescência para a emissão do O ₂	39
3.4 Representação ilustrativa das regiões nas imagens da aeroluminescência onde são obtidas as amostras ao longo de uma noite de observação para construir um keograma.	40
3.5 Keogramas filtrados para a noite de 14 de setembro de 2004, mostrando as observações simultâneas nas camadas de emissão do OH e O ₂	42
3.6 Keogramas filtrados para as emissões do OH e O ₂ , para a noite de 14 de setembro de 2004, indicando as regiões nas quais foram observadas as ondas de gravidade de média escala.	42
3.7 Resultados da aplicação da técnica de análise espectral nos keogramas. .	45
3.8 Ilustração da formação do keograma na direção de propagação da onda de gravidade.	48
3.9 Resultados da aplicação da técnica do keograma na direção de propagação da onda de gravidade de média escala.	51
3.10 Fluxograma do modelo <i>ray tracing</i>	57
4.1 Distribuição dos parâmetros de todos os eventos de ondas de gravidade de média escala.	64
4.2 Exemplo de uma onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, observada nas camadas de emissão do OH e O ₂	65
4.3 Distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.	68

4.4	Exemplo de uma onda de gravidade de média escala com propagação de fase descendente, observada nas camadas de emissão do OH e OI 557,7 nm.	69
4.5	Distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.	71
4.6	Distribuição das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.	76
4.7	Distribuição das posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.	77
4.8	Representação da distribuição das posições finais das ondas com fase descendente.	81
4.9	Distribuição das posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente. As regiões indicadas são os possíveis locais no qual as ondas foram geradas.	84
4.10	Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 21 de outubro de 2003.	89
4.11	Trajetoória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 23 h 30 min.	90
4.12	Retrotrajetoória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 17 h 30 min. Neste caso, supôs-se que a onda possuiu propagação de fase descendente, com sua origem na troposfera.	91
4.13	Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 16 de julho de 2009.	92
4.14	Trajetoória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 02 h 45 min.	94
4.15	Retrotrajetoória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 11 h 45 min. Neste caso, supôs-se que a onda possuiu propagação de fase descendente, com sua origem na troposfera.	95
4.16	Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 24 de novembro de 2006.	96

4.17	Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens às 19 h 30 min.	97
4.18	Mapa topográfico do Brasil.	98
4.19	Isolinhas do vento horizontal sobre a América do Sul e Oceano Atlântico para a noite de 24/11/2006 às 0 h 42 min.	99
A.1	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 21/10/1998, em Cachoeira Paulista (SP).	113
A.2	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 01/10/2000, em São João do Cariri (PB).	114
A.3	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 18/11/2000, em São João do Cariri (PB).	114
A.4	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 23/01/2001, em São João do Cariri (PB).	115
A.5	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 22/04/2001, em São João do Cariri (PB).	115
A.6	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 18/10/2001, em São João do Cariri (PB).	116
A.7	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 07/02/2002, em São João do Cariri (PB).	116
A.8	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 05/02/2003, em São João do Cariri (PB).	117
A.9	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 28/04/2003, em São João do Cariri (PB).	117
A.10	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 22/07/2003, em São João do Cariri (PB).	118
A.11	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 21/10/2003, em São João do Cariri (PB).	118
A.12	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 22/10/2003, em São João do Cariri (PB).	119
A.13	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 26/10/2003, em São João do Cariri (PB).	119
A.14	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 13/03/2004, em São João do Cariri (PB).	120
A.15	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 20/03/2004, em São João do Cariri (PB).	120
A.16	Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 06/09/2004, em São João do Cariri (PB).	121

A.17 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 14/09/2004, em São João do Cariri (PB).	121
A.18 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 19/09/2004, em São João do Cariri (PB).	122
A.19 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 08/03/2005, em São João do Cariri (PB).	122
A.20 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 03/06/2005, em São João do Cariri (PB).	123
A.21 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 28/10/2005, em São João do Cariri (PB).	123
A.22 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 28/05/2006, em São João do Cariri (PB).	124
A.23 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 26/08/2006, em São João do Cariri (PB).	124
A.24 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 24/11/2006, em São João do Cariri (PB).	125
A.25 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 09/11/2007, em São João do Cariri (PB).	125
A.26 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 08/01/2008, em São João do Cariri (PB).	126
A.27 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 02/02/2008, em São João do Cariri (PB).	126
A.28 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 08/06/2008, em São João do Cariri (PB).	127
A.29 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 24/11/2008, em São João do Cariri (PB).	127
A.30 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 24/02/2009, em São João do Cariri (PB).	128
A.31 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 20/03/2009, em São João do Cariri (PB).	128
A.32 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 22/03/2009, em São João do Cariri (PB).	129
A.33 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 30/03/2009, em São João do Cariri (PB).	129
A.34 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 18/06/2009, em São João do Cariri (PB).	130
A.35 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 18/06/2009, em São João do Cariri (PB).	130

A.36 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O ₂ e OH, na noite de 21/06/2009, em São João do Cariri (PB).	131
A.37 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 16/07/2009, em São João do Cariri (PB).	131
A.38 Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O ₂ , na noite de 16/08/2009, em São João do Cariri (PB).	132

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Classificação das ondas de gravidade atmosféricas.	28
3.1 Características espectrais dos filtros de interferência utilizados nos imageadores <i>all-sky</i> para a observação da aeroluminescência noturna.	35
3.2 Ilustração da definição das direções de propagação das ondas de gravidade.	46
3.3 Descrição das técnicas utilizadas para determinar a diferença de fase entre as camadas de emissão do O ₂ e do OH.	52
3.4 Sumário dos resultados da aplicação da técnica de análise de keogramas para o evento de onda observado na noite de 14/09/2004.	53
4.1 Eventos de ondas de gravidade de média escala observadas em duas ou mais camadas de emissão da aeroluminescência noturna.	63
4.2 Principais parâmetros das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.	66
4.3 Parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.	70
4.4 Posição final das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação das ondas de fase ascendente.	75
4.5 Posição final das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.	78
4.6 Tempo de propagação das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase através da atmosfera.	79
4.7 Posição final das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.	82
4.8 Comparação dos tempos de propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, entre as regiões da atmosfera.	86

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Estrutura da tese	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Emissões da aeroluminescência	7
2.2 Ondas de gravidade	10
2.2.1 Descrição matemática das ondas de gravidade	11
2.2.1.1 Simplificações e linearizações das equações básicas	14
2.2.1.2 Relação de dispersão	15
2.2.2 Geração das ondas de gravidade	19
2.2.3 Condições de propagação vertical das ondas de gravidade	20
2.2.4 Ondas de gravidade de pequena, média e grande escala	28
2.2.5 Ondas de gravidade primárias, secundárias e terciárias	29
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	33
3.1 Imageador <i>all-sky</i>	33
3.2 Pré-processamento das imagens de aeroluminescência	37
3.3 Técnica de keograma	40
3.3.1 Técnica de keograma na direção de propagação da onda de gravidade	47
3.3.2 Determinação da propagação vertical das ondas de gravidade de média escala	49
3.4 Modelo <i>ray tracing</i>	53
3.4.1 Modelos de vento e temperatura	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Características gerais das ondas de gravidade de média escala	61
4.1.1 Características das ondas de gravidade com propagação de fase ascen- dente	64
4.1.2 Características das ondas de gravidade com propagação de fase des- cendente	68
4.2 Trajetórias das ondas de gravidade de média escala	73
4.2.1 Ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente	75

4.2.2	Ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente	80
4.3	Fontes de ondas de gravidade de média escala: estudos de casos	87
4.3.1	Estudo de caso: fonte de onda de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente	87
4.3.2	Estudo de caso: fonte de onda de gravidade de média escala com propagação de fase descendente	96
5	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A - RESULTADO DA ANÁLISE DE KEOGRAMA NA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA	113

1 INTRODUÇÃO

As ondas de gravidade começaram a ter maior destaque na comunidade científica a partir da década de 1960, quando [Hines \(1960\)](#) publicou uma série de trabalhos explicando as oscilações periódicas observadas nos ventos da região da mesosfera e baixa termosfera, região esta conhecida como MLT (do inglês, *Mesosphere and Lower Thermosphere*).

As oscilações na atmosfera possuem diferentes velocidades de fase em uma ampla variedade de ondas que se propagam em diversas direções ([HINES, 1974](#)). Uma ilustração dessas ondas é apresentada na [Figura 1.1](#), na qual se observa as diferentes escalas de ondas e as várias formas de propagação e dissipação. A medida que as ondas de gravidade se propagam através da atmosfera elas podem sofrer algum tipo de interação com o vento médio de fundo, também descrito como fluxo básico.

Nesse sentido, as ondas podem ser refletidas, canalizadas e sua amplitude pode crescer de tal forma que podem sofrer um processo de quebra, gerando assim turbulência e acelerando ou desacelerando o fluxo básico. O processo de quebra também pode gerar outros tipos de ondas que se propagam na atmosfera. O estudo sobre as ondas de gravidade são de suma importância, pois as mesmas transportam energia e *momentum* através da atmosfera, geram turbulência, misturam seus constituintes e interagem com o fluxo básico da atmosfera ([BEER, 1976](#); [FRITTS, 1984](#); [FRITTS](#); [ALEXANDER, 2003](#)).

Figura 1.1 - Representação surrealista das ondas de gravidade na atmosfera.



Representação ilustrando a grande variedade de ondas de gravidade que se propagam na atmosfera.

Fonte: Adaptada de [Nappo \(2012\)](#).

O papel das ondas de gravidade na região da MLT ganhou grande destaque quando Lindzen (1981) detalhou os aspectos das interações destas com o vento médio de fundo, sugerindo que ondas de gravidade atmosféricas com escalas horizontais de ~ 1.000 km eram as responsáveis pela transferência de *momentum* para a atmosfera nesta região (LINDZEN, 1981). Essa característica das ondas de gravidade é determinante na circulação em grande escala para os estados térmicos e dinâmicos da baixa, média e alta atmosfera.

As ondas de gravidade atmosféricas são perturbações no campo de pressão e densidade da atmosfera que se propagam verticalmente. Elas podem ser classificadas em três escalas, pequena, média e grande (GOSSARD; HOOKE, 1975; NAPPO, 2012).

As ondas de gravidade de pequena escala possuem comprimentos de onda curto, geralmente inferiores a 100 km, e são influenciadas por efeitos locais, como topografia irregular, turbulência atmosférica e instabilidades térmicas de pequena escala. Alguns exemplos de ondas de gravidade de pequena escala incluem ondas orográficas, que são geradas pelo fluxo de ar sobre montanhas, e ondas térmicas, que são causadas por diferenças de temperatura (VADAS; BECKER, 2019).

Por sua vez, as ondas de gravidade de média escala têm comprimentos de onda na faixa de 100 a 1.000 km e são afetadas por fatores como a estabilidade vertical da atmosfera e as interações entre a dinâmica atmosférica de larga escala e processos de menor escala. Além disso, as ondas de gravidade de média escala podem ser observadas após diversos fenômenos meteorológicos e desempenham um papel importante na transferência de energia e *momentum* na atmosfera (VADAS; BECKER, 2019).

Adicionalmente, as ondas de gravidade de grande escala têm comprimentos de onda maiores que 1.000 km e estão associadas a fenômenos de larga escala, como sistemas meteorológicos globais e padrões de circulação atmosférica de grande escala. Além disso, essas ondas podem ter impactos significativos no clima e na circulação atmosférica em diferentes regiões do mundo (VADAS; BECKER, 2019).

As ondas de gravidade de diversas escalas também foram observadas em mais de uma camada de emissão da aeroluminescência. Ejiri et al. (2002) apresentaram um estudo de ondas de gravidade de pequena escala sobre o Japão, utilizaram quatro imageadores *all-sky* para observar as emissões do OH e OI 557,7 nm. Com os dados observados nas noites de 26 e 30 de janeiro de 1998, os autores conseguiram caracterizar as ondas de gravidade de pequena escala e determinar a sua propagação vertical na MLT.

Sato et al. (2012) investigaram as ondas de gravidade de média escala geradas por montanhas. Os autores encontraram uma correlação entre o fluxo de energia estratosférico descendente com as atividades de ondas de gravidade associadas à orografia dos Andes, no Chile. Eles concluíram que se tratavam de ondas de gravidade secundárias geradas pelo processo de reflexão e quebra das ondas primárias (geradas por montanhas) na região da estratosfera e da MLT.

Huang et al. (2017) utilizaram o modelo KMCM (do inglês, *Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model*) em seus estudos sobre as ondas de gravidade. Neste trabalho, os autores estudaram simultaneamente ondas de gravidade com propagação de fase ascendente e descendente utilizando dados de vento e temperatura obtidos por um radar de laser de sódio, no Observatório dos Andes, Chile. Em especial, este estudo concentrou-se em caracterizar as ondas de gravidade inerciais com propagação de fase descendente na região MLT da atmosfera.

Nyassor et al. (2018) investigaram a propagação de ondas de gravidade analisando a fase da onda em três camadas distintas da aeroluminescência, OH, NaD e O₂. Os autores utilizaram medidas de imageador *all-sky*, fotômetro e radar meteórico e encontram o mesmo padrão de onda em mais de uma camada de emissão. O resultado dessa investigação levou a conclusão da existência de uma onda de gravidade com propagação de fase ascendente, observada na noite de 14 de outubro de 2006, e outra descendente, em 18 de dezembro de 2006, no Observatório Espacial de São João do Cariri (PB).

Vadas e Becker (2018) modelaram a propagação ondas de gravidade através da atmosfera e mostraram que ondas de gravidade secundárias podem ser originadas a partir de um forçante local (em inglês, *body force*). O forçante local é uma força que está localizada no espaço e no tempo, a qual acelera o fluxo médio na direção de propagação da onda de gravidade primária, fazendo com que o fluxo médio fique desequilibrado. Desta forma, ocorre o transporte de *momentum* e o depósito de energia em diferentes camadas da atmosfera.

Vadas e Becker (2019) realizaram um estudo onde modelaram a propagação de ondas de montanhas sobre a região dos Andes, no Chile. Os autores identificaram a presença de ondas de gravidade em diferentes camadas da atmosfera. As ondas de montanhas, geradas pelo fluxo de ar sobre a cordilheira dos Andes, quebram entre a troposfera e estratosfera (50 e 70 km), gerando assim ondas de gravidade secundárias. Estas ondas secundárias são geradas a partir de um forçante local, por meio do depósito de energia da quebra das ondas de montanhas (primárias).

As ondas de gravidade secundárias, por sua vez, se propagam até a mesosfera e baixa termosfera (80 e 130 km) e quebram, gerando desta forma ondas de gravidade terciárias.

Portanto, no estudo de [Vadas e Becker \(2019\)](#), os autores identificaram a presença de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente e ascendente na região entre 50 e 70 km de altitude. A identificação destas ondas com propagação de fase descendentes foi possível devido ao espectro de ondas de gravidade secundárias geradas pelo modelo KMCM. Segundo os autores, as ondas descendentes nesta região eram ondas de gravidade terciárias geradas pela quebra das ondas de gravidade secundárias de média escala.

Vários estudos sobre ondas de gravidade de média escala foram publicados ao longo dos últimos anos ([TAKAHASHI et al., 2009](#); [TAYLOR et al., 2009](#); [VADAS](#); [LIU, 2009](#); [PAULINO et al., 2012](#); [SATO et al., 2012](#); [ESSIEN, 2015](#)). Contudo, até o presente momento, não foram conduzidos estudos de longo prazo sobre observações simultâneas, em diferentes camadas da aeroluminescência, e sobre as condições de propagação vertical das ondas de gravidade de média escala.

Neste sentido, a presente tese de doutorado visa investigar as ondas de gravidade de média escala observadas em diferentes camadas da aeroluminescência, na região da MLT. Este estudo dará continuidade às investigações iniciadas por [Bilibio \(2017\)](#) em seu mestrado, que caracterizou as ondas de gravidade de média escala observadas em Cachoeira Paulista (SP). Assim sendo, o presente trabalho visa contribuir para o entendimento do acoplamento dinâmico da atmosfera, bem como caracterizar as ondas de gravidade que foram observadas na região sudeste e nordeste brasileira.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta tese de doutorado foi investigar as características das ondas de gravidade de média escala observadas simultaneamente em diferentes camadas de emissão da aeroluminescência noturna.

Para atingir o objetivo principal, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- I. Caracterizar os parâmetros horizontais (comprimento de onda horizontal, período, velocidade de fase e direção de propagação) das ondas de gravidade de média escala, observadas simultaneamente em diferentes camadas de emissão da aeroluminescência.

- II. Definir uma metodologia para a construção dos keogramas na direção de propagação das ondas de gravidade de média escala.
- III. Definir uma metodologia para calcular a fase das ondas de gravidade de média escala e determinar o seu comprimento de onda vertical e a sua condição de propagação vertical.
- IV. Caracterizar ondas de gravidade de média escala observadas simultaneamente em função da propagação de fase (descendente ou ascendente) na região MLT.
- V. Determinar a região de origem das ondas de gravidade de média escala utilizando o modelo *ray tracing*.
- VI. Investigar as fontes de geração das ondas de gravidade de média escala.

1.2 Estrutura da tese

A tese de doutoramento está estruturada conforme descrito a seguir. O Capítulo 2 apresenta, de maneira sucinta, as principais emissões de aeroluminescência utilizadas neste estudo. Além disso, é apresentada a descrição matemática sobre a teoria linear das ondas de gravidade atmosféricas. Neste contexto, foram levados em consideração os termos dissipativos, bem como uma descrição das principais fontes de geração e das condições de propagação vertical das ondas de gravidade através da atmosfera. Adicionalmente, é apresentada uma classificação para as ondas de gravidade em função das características físicas destas ondas publicadas na literatura. Por fim, o capítulo se encerra com uma descrição sobre as ondas de gravidade primárias, secundárias e terciárias observadas na atmosfera, com base nas publicações nos últimos anos.

O Capítulo 3 apresenta a descrição do imageador *all-sky* utilizado neste estudo, bem como as etapas do pré-processamento das imagens da aeroluminescência. Em seguida, é apresentada a técnica de keograma e a metodologia para se determinar os parâmetros das ondas de gravidade de média escala. A técnica de keograma na direção de propagação da onda também é descrita, bem como a metodologia para determinar o comprimento de onda vertical das ondas de gravidade e a sua propagação vertical, em termos da análise de fase das ondas em ascendentes e descendentes. O capítulo ainda descreve o modelo *ray tracing*, suas principais características, a teoria envolvida, e as condições utilizadas para o estudo da propagação das ondas de gravidade de média escala através da atmosfera. Por fim, também são apresen-

tados os modelos atmosféricos utilizados para descrever a temperatura, a densidade atmosférica e o vento de fundo empregados nos estudos das ondas de gravidade.

O Capítulo 4 apresenta os principais resultados sobre as ondas de gravidade de média escala observados. Os resultados são apresentados em função da propagação de fase das ondas em ascendentes e descendentes. Os principais parâmetros das ondas são apresentados para cada uma das condições de propagação vertical. Por fim, os resultados são discutidos em função da localização das fontes de geração das ondas de gravidade, obtidos pelo modelo *ray tracing*.

No Capítulo 5, são sumarizados os principais resultados encontrados neste trabalho, bem como as conclusões. Algumas sugestões para trabalhos futuros também são delineados neste capítulo. Por fim, no Apêndice A, são apresentados todos os resultados da análise de keogramas na direção de propagação das ondas de ondas de gravidade de média escala utilizados nesse trabalho de tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A primeira parte deste capítulo apresenta uma breve revisão teórica sobre as principais camadas de emissão da aeroluminescência que são utilizadas nesta tese. A segunda parte do capítulo apresenta a teoria linear das ondas de gravidade, na qual são descritos os termos dissipativos, como a viscosidade molecular e a difusividade térmica.

Os termos dissipativos são importantes para descrever uma onda de gravidade que se propaga até a baixa termosfera. Além disso, o capítulo também apresenta, de forma sucinta, as principais condições de propagação das ondas de gravidade através da atmosfera, desde a troposfera, passando pela estratosfera, mesosfera, até chegar na termosfera.

2.1 Emissões da aeroluminescência

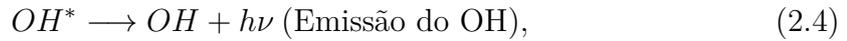
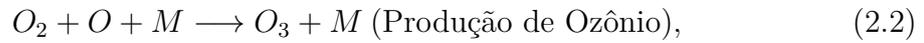
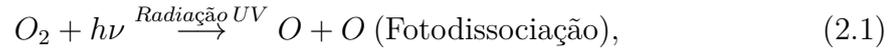
O fenômeno óptico chamado de aeroluminescência é causado pela emissão de fótons por átomos e moléculas, os quais são excitados pela absorção da radiação solar ou por processos químicos existentes na atmosfera superior. Aeroluminescência ou *airglow*, caracteriza-se por ser uma radiação tênue e de extensa faixa espectral, que se estende desde a região do ultravioleta ($\lambda \approx 250$ nm) até ao infravermelho ($\lambda \approx 4$ μ m) (CHAMBERLAIN; HUNTEN, 1990; MEDEIROS, 2001). A unidade para mensurar essa emissão de luz é o *Rayleigh* (R).

A aeroluminescência pode ser classificada segundo o ângulo zenital da radiação solar em diurna ou em inglês, *dayglow*, na qual é a emissão atmosférica que ocorre durante o dia; crepuscular ou em inglês, *twilight* que ocorre apenas quando a alta atmosfera é iluminada durante o crepúsculo ou ocaso; noturna ou em inglês, *nightglow* que ocorre durante a noite devido a quimiluminescência. Contudo, no período noturno fica mais fácil separar as emissões da aeroluminescência do espectro de radiação solar. As emissões da aeroluminescência que foram utilizadas neste estudo compreendem as emissões da hidroxila (OH), do oxigênio molecular ($O_2(0 - 1)$) e do oxigênio atômico (OI 557,7 nm).

As emissões de luz advindas da molécula da hidroxila (OH), também conhecidas como as bandas de Meinel, variam em uma ampla faixa espectral, desde a região do visível até o infravermelho (MEINEL, 1950). A altura do pico da camada de emissão do OH ocorre em aproximada 87 km de altura, com uma intensidade que varia entre 1.000 R e 3.000 R. Seu brilho, é devido às transições vibro-rotacionais do

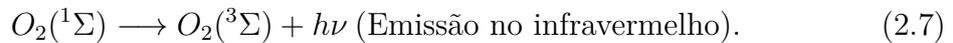
OH dentro de um mesmo estado eletrônico (MERIWETHER, 1989), mais detalhes sobre esta emissão também pode ser encontrado nos trabalhos de Buriti (1997), Medeiros (2001), Pimenta (2002), Wrasse (2004), Paulino (2012), Nyassor (2017), Antunes (2018).

As reações fotoquímicas envolvidas na emissão da hidroxila são apresentadas a seguir (MERIWETHER, 1989):

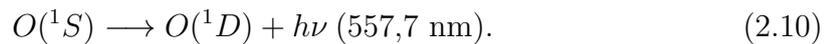
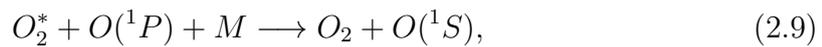
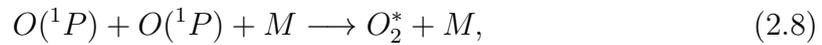


onde, M representa as moléculas do O_2 ou N_2 , enquanto que o símbolo $*$ significa o estado excitado da molécula ou átomo.

A emissão do oxigênio molecular (O_2), também é composta por várias bandas, com transição vibro-rotacionais. A banda do $O_2(0 - 1)$, com comprimento da onda em torno de 864 nm, tem seu pico de concentração entorno de 94 km de altitude na atmosfera. Essa emissão possui uma intensidade entre 300 R e 600 R. As principais reações químicas responsáveis pela produção do $O_2(0 - 1)$ são dados por:



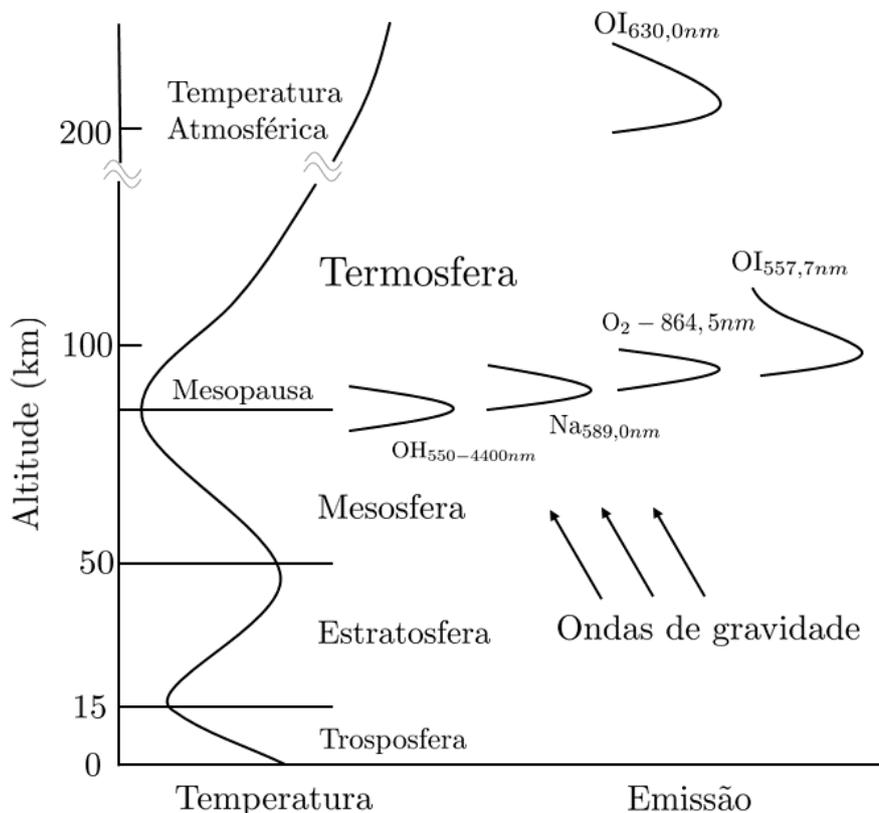
Já a emissão do oxigênio atômico (OI 557,7 nm), também chamada de linha verde, ocorre entre 90 e 110 km de altitude, na mesosfera, e entre 250 e 300 km de altura, na termosfera, (PIMENTA, 2002; HUANG; GEORGE, 2014). O pico de concentração de emissão na região da mesosfera é em torno de 96 km de altura. A linha verde é emitida quando um elétron no estado 1S volta para o estado 1D , o qual possui uma transição curta, cerca de 0,74 s. Uma transição mais longa também pode acontecer, a qual partiria do estado 1S passando pelo 1D e chegando ao seu estado fundamental 3P , isso, resulta na emissão da linha vermelha do oxigênio atômico. Porém, tanto a emissão da linha verde, na região da termosfera, como a emissão da linha vermelha e do oxigênio atômico, não serão estudadas neste trabalho. Desta forma, o mecanismo de excitação do OI 557,7 nm na região da mesosfera é (CHAPMAN, 1951; BARTH et al., 1962; BARTH, 1964):



As camadas de emissão descritas acima podem ser vistas na [Figura 2.1](#), na qual pode-se observar as regiões de concentração que correspondem a cada uma das camadas de emissão da aeroluminescência utilizadas no estudo do presente trabalho. Além disso, também são apresentadas as emissões do sódio e da linha vermelha do oxigênio atômico.

As emissões da aeroluminescência noturna são utilizadas para monitorar a dinâmica da mesosfera, e desta forma, é possível observar a propagação de ondas de gravidade e estudar a região de sua origem, bem como a sua forma de propagação através da atmosfera.

Figura 2.1 - Representação pictórica das camadas de emissões da aeroluminescência.



Apresentação das regiões de concentrações das emissões da aeroluminescência atmosférica em função da altura.

Fonte: Adaptada de Maekawa (2000).

2.2 Ondas de gravidade

As ondas de gravidade são resultantes do desequilíbrio entre o gradiente de pressão e a força de gravidade. Elas apresentam um período entre 270 s e 8 h e as suas principais fontes são a convecção profundas, as marés atmosféricas, o cisalhamento de vento, os sistemas meteorológicos frontais, a topografia, os ajustes de escoamentos em estados de desequilíbrio, os forçantes acompanhando a dissipação local de ondas e as interações onda-onda (FRITTS; ALEXANDER, 2003).

Com o decaimento exponencial da densidade atmosférica em função da altura e a conservação de energia a amplitude das ondas de gravidade aumentam de forma exponencial, à medida que elas se propagam de forma ascendente na atmosfera. Em contra partida, a atmosfera responde aos efeitos de propagação das ondas de

gravidade para retornar ao seu estado de equilíbrio normal, a resposta da atmosfera é dada por meio dos processos dissipativos sobre a propagação de ondas de gravidade. O processo de saturação ou quebra da onda de gravidade limitará o crescimento da amplitude da onda na atmosfera terrestre (ANDREWS et al., 1987).

Assim sendo, para entendermos melhor o processo de propagação de ondas de gravidade na atmosfera terrestre, nesta seção é apresentado e discutido a teoria linear de ondas de gravidade. Neste tratamento matemático são incluídos os termos dissipativos nas equações básicas a fim de se obter uma relação de dispersão que descreva os efeitos do aumento da viscosidade molecular e da difusividade térmica na região da termosfera.

2.2.1 Descrição matemática das ondas de gravidade

O processo de propagação das ondas de gravidade na região MLT da atmosfera terrestre tem mostrado ondas com estruturas policromáticas complexas, mas pode ser simplificado, em muitos dos casos, em uma onda de gravidade que se aproxima da estrutura monocromática, ou seja, sem perder muito sua essência. Sendo assim, o tratamento matemático para as ondas se torna menos complexo, logo, é possível quantizar as características de propagação das ondas de gravidade.

A primeira simplificação que pode ser feita na teoria das ondas de gravidade neste trabalho é a suposição de ondas monocromáticas. Adicionalmente, para modelar as ondas serão mantidos três princípios de conservação, de massa, do *momentum* e da energia. Devido ao estudo de oscilações na atmosfera neutra, a conservação de carga pode ser desconsiderada neste estudo. Assim, a equação de conservação de massa e/ou da continuidade pode ser descrita por:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0, \quad (2.11)$$

em que $D/Dt = \partial/\partial t + \vec{V} \cdot \nabla$ é a derivada Euleriana, onde, ∇ é o operador gradiente, ρ é a densidade do fluido e $\vec{V} = (u, v, w)$, sendo, velocidade do vento zonal (velocidade para leste), meridional (velocidade para norte) e vertical (velocidade para cima), respectivamente.

Logo, a equação da continuidade nesta forma mostra a variação substantiva da massa de ar (fluido atmosférico), por unidade de volume, onde, é igual a própria advecção do fluido. Isto é, o fluido não possui fonte e nem sumidouro de massa. As descrições matemáticas da equação da continuidade, como também, as equações para

as principais forças que atuam na atmosfera podem ser encontradas em (GOSSARD; HOOKE, 1975).

Ao considerar os efeitos dissipativos na atmosfera, a equação da conservação do *momentum* pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} + \frac{\mu}{\rho} \left[\nabla^2 \vec{V}' + \frac{1}{3}\nabla(\nabla \cdot \vec{V}') \right], \quad (2.12)$$

em que p é a pressão do fluido, \vec{g} é a aceleração da gravidade, μ é a viscosidade molecular (VADAS, 2007) e os apóstrofos representam as quantidades perturbadas. O primeiro termo do lado direito da equação é a força (por unidade de massa) do gradiente de pressão e o terceiro termo é a força devido a viscosidade (por unidade de massa). Além disso, o fluido também pode sofrer a ação da força de Coriolis, forças de fricção, forças hidromagnéticas, dentre outras. Contudo, neste trabalho tais forças não serão levada em consideração.

Adicionalmente, a viscosidade molecular μ é a medida de resistência à tensão de cisalhamento de um fluido. Matematicamente ela representa a razão entre a tensão de cisalhamento sofrida pelo fluido durante o escoamento e o seu respectivo gradiente de velocidade, sendo a sua unidade de medida o *Poise*, em que, $1 \text{ Poise} = 0.1 \text{ Nm}^{-2}\text{s}$.

Ao se dividir a viscosidade molecular pela densidade do fluido, obtém-se a viscosidade cinemática ν , dada por $\nu = \mu/\rho$. Como a densidade atmosférica decresce exponencialmente com a altitude, a viscosidade cinemática cresce com a altitude. O termo devido à força viscosa da equação acima possui dois termos (KUNDU; COHEN, 2004), onde o segundo termo ($1/3\nabla(\nabla \cdot \vec{V}')$) pode ser desprezado em relação ao primeiro para o estudo de ondas de gravidade (VADAS; FRITTS, 2005). Sendo assim, a equação de conservação do *momentum* pode ser reescrita por:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2 \vec{V}'. \quad (2.13)$$

A conservação de energia pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{\varkappa\theta}{C_p\rho T}\nabla^2 T', \quad (2.14)$$

onde \varkappa é a condutividade térmica, T a temperatura, C_p a capacidade calorífica a

pressão constante e θ a temperatura potencial que será definida na [Subseção 2.2.1.1](#).

O termo de condutividade térmica é uma propriedade física que mede a habilidade de um fluido em conduzir calor. Assim sendo, fisicamente, a condutividade térmica é a variação temporal de calor transmitida através de uma determinada distância do fluido, por unidade de área, devido a um gradiente de temperatura. O gás atmosférico não é um bom condutor de calor. Como a condutividade térmica é pequena, o termo do lado direito da [Equação 2.14](#) pode ser desprezado na baixa e média atmosfera. Contudo, na termosfera, a densidade diminui muito e esse termo passa a ser bastante significativo no processo dissipativo das ondas de gravidade na atmosfera terrestre ([PAULINO, 2012](#)).

Adicionalmente, a [Equação 2.14](#) pode ser reescrita em termos da difusividade térmica. A difusividade térmica é a medida da variação temporal de temperatura de um fluido e pode ser escrita por:

$$\kappa = \frac{\alpha}{C_p \rho} = \frac{\mu}{Pr \rho} = \frac{\nu}{Pr}, \quad (2.15)$$

onde Pr é o número de *Prandtl* que é a razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica. Para os gases, o número de *Prandtl* é da ordem da unidade, indicando que a capacidade de difundir calor é praticamente a mesma de difundir *momentum*. Para a atmosfera o número de *Prandtl* é aproximadamente 0.7 ([KUNDU; COHEN, 2004](#)) e variações do número de *Prandtl* com a temperatura serão desprezadas no estudo de ondas de gravidade ([VADAS, 2007](#)).

Finalmente, para completar o conjunto de equações básicas será utilizada a lei dos gases ideais, isto é:

$$p = \rho RT, \quad (2.16)$$

em que $R = 8314,5/X_{MW}$ é a constante dos gases, a qual vai depender da massa molecular média em cada nível (X_{MW}).

O conjunto de seis equações apresentado acima, entre [2.11](#) e [2.16](#), e seis incógnitas não admite solução analítica. Além disso, soluções numéricas são difíceis de serem obtidas, porque o estado termodinâmico da atmosfera e os termos de dissipação não são muito bem conhecidos. Contudo, para estudar a propagação de ondas de

gravidade não será necessário solucionar esse sistema de equações. Isso significa que, serão feitas simplificações e serão impostas soluções tipo ondas planas para o sistema, de tal maneira que se possa extrair informações sobre as famílias de ondas permitidas para esse sistema de equações.

2.2.1.1 Simplificações e linearizações das equações básicas

A temperatura potencial é definida como sendo a temperatura na qual uma parcela de ar teria, se fosse transportada por um caminho adiabático até um nível de referência. Esse nível de referência em estudos atmosféricos é geralmente escolhido como sendo a superfície. Partindo da primeira lei da termodinâmica e supondo um processo adiabático, pode-se obter a expressão para a temperatura potencial, da seguinte forma (VADAS; FRITTS, 2005),

$$\theta = T \left(\frac{p_s}{\rho} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (2.17)$$

onde p_s é a pressão no nível de referência.

Usando a temperatura potencial e a lei dos gases ideais, é possível eliminar os termos p e θ das Equação 2.13 e Equação 2.14, de forma a obter-se:

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{RT}{p}\nabla\rho - R\nabla T + \vec{g} + \nu\nabla^2\vec{V}', \quad (2.18)$$

$$\frac{DT}{Dt} = -(\gamma - 1)T\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\gamma\nu}{Pr}\nabla^2 T', \quad (2.19)$$

na qual $\frac{\gamma}{\gamma-1} \equiv \frac{c_p}{R}$.

Adicionalmente, outra simplificação importante é ajustar o sistema de coordenadas de tal maneira que o eixo horizontal coincida com a direção de propagação da onda. Logo, uma das equações do sistema é suprimida sem perdas de informações (Equação 2.13). Ainda, a solução pode ser generalizada para o caso tridimensional de forma trivial, decompondo apenas a onda de gravidade em duas componentes horizontais. Portanto, os campos atmosféricos podem ser escritos como sendo a soma do valor médio (representado pelas barras ou letra maiúscula) e uma perturbação (apóstrofos):

$$u = \bar{U} + u', \quad (2.20)$$

$$\omega = \omega', \quad (2.21)$$

$$T = \bar{T} + T', \quad (2.22)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho', \quad (2.23)$$

onde o vento médio horizontal na direção da onda de gravidade é representado por \bar{U} .

A próxima etapa é a linearização das [Equação 2.12](#), [Equação 2.18](#) e [Equação 2.19](#). O processo de linearização consiste em desprezar o produto entre duas grandezas perturbadas, isto é, os termos de ordem superior. De tal maneira que, a linearização não prejudica a solução do sistema quando a perturbação é suposta muito pequena em relação ao valor médio do campo atmosférico. No presente estudo, o processo de linearização fornece resultados interessantes para o estudo da propagação de ondas de gravidade, entretanto a inclusão dos termos não lineares certamente tornaria o modelo de ondas de gravidade mais próximo da realidade. Todavia, realizando algumas manipulações algébricas, as equações linearizadas podem ser descritas por:

$$\frac{Du'}{Dt} = -R \frac{\partial T'}{\partial x} - \frac{C_s^2}{\gamma \bar{\rho}} \frac{\partial \rho'}{\partial x} + \nu \nabla^2 u', \quad (2.24)$$

$$\frac{Dw'}{Dt} = -R \frac{\partial T'}{\partial z} - \frac{C_s^2}{\gamma \bar{\rho}} \frac{\partial \rho'}{\partial z} + \frac{C_s^2}{\gamma H} \left(\frac{T'}{\bar{T}} - \frac{\rho'}{\bar{\rho}} \right) + \nu \nabla^2 w', \quad (2.25)$$

$$\frac{DT'}{Dt} = -(\gamma - 1) \bar{T} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right) + \frac{\gamma \nu}{Pr} \nabla^2 T', \quad (2.26)$$

$$\frac{D\rho'}{Dt} = \frac{\bar{\rho}}{H} \omega' - \bar{\rho} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w'}{\partial z} \right), \quad (2.27)$$

onde H é a altura de escala local, definida por $\frac{d\bar{p}}{dz} \equiv -\frac{\bar{p}}{H}$ e $C_s = \sqrt{\gamma RT}$ é a velocidade do som na atmosfera terrestre.

2.2.1.2 Relação de dispersão

Com a finalidade de considerar o crescimento da amplitude da onda de gravidade em função da altitude devido ao decréscimo da densidade, emprega-se a mesma metodologia adotada por [Pitteway e Hines \(1963\)](#), isto é,

$$\tilde{u} = \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} u', \quad (2.28)$$

$$\tilde{\omega} = \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} \omega', \quad (2.29)$$

$$\tilde{T} = \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{2}} T', \quad (2.30)$$

$$\tilde{\rho} = \left(\frac{\rho_s}{\bar{\rho}} \right)^{\frac{1}{2}} \rho', \quad (2.31)$$

onde ρ_s é a densidade na superfície.

Contudo, a solução exata desse sistema só pode ser obtida numericamente. Se forem considerados comprimentos de ondas verticais pequenos ($\lambda_z \leq 2\pi H$) e se os coeficientes do sistema de (Equação 2.16 - Equação 2.19) forem supostos localmente constantes, o sistema admite soluções oscilatórias do tipo:

$$\frac{\tilde{u}}{\tilde{u}_0} = \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0} = \frac{\tilde{T}}{\tilde{T}_0} = \frac{\tilde{\rho}}{\tilde{\rho}_0} e^{i(kx+mz-\omega t)}, \quad (2.32)$$

no qual ω seria a frequência da onda em relação ao solo, k e m são os números de onda horizontal e vertical, x e z representam a posição horizontal e vertical da onda num dado instante de tempo t . Estas soluções são tipo ondas planas porque as regiões de fase constante são planos. Além disso, generalizando para o caso tridimensional, substitui-se k^2 por $k_H^2 = k^2 + l^2$ e $\omega - kU$ por $\omega - kU - lV$, neste caso, o vento não perturbado é $(U, V, 0)$. Considerando a solução não trivial desse sistema, obtém-se a relação de dispersão para ondas acústicas de gravidade amortecidas pela viscosidade molecular e difusividade térmica que é dada por:

$$\frac{-\omega_I^2}{C_s^2} (\omega_I - i\alpha\nu)^2 \left(1 - \frac{i\gamma\alpha\nu}{Pr\omega_I} \right) (\omega_I - i\alpha\nu) \left(\omega_I - \frac{i\gamma\alpha}{Pr} \right) \left(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2} \right) = k_H^2 N^2, \quad (2.33)$$

onde $\vec{k}^2 = k_H^2 + m^2$ é o quadrado do vetor de ondas e ω_I é a frequência intrínseca que é dada pela equação,

$$\omega_I = \omega - kU - lV, \quad (2.34)$$

em que N é a frequência de Brünt-Väisälä ou de flutuabilidade, que matematicamente é dado por:

$$N^2 \equiv \left(\frac{g}{\theta} \right) \frac{d\bar{\theta}}{dz}, \quad (2.35)$$

$$\alpha \equiv -\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2} + \frac{im}{H}. \quad (2.36)$$

No limite em que a viscosidade molecular e a difusidade térmica passam a ser desprezíveis, a relação de dispersão fica:

$$\frac{-\omega_I^4}{C_s^2} + \omega_I^2 \left(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2} \right) = k_H^2 N^2, \quad (2.37)$$

a qual, é a relação de dispersão usual para ondas acústicas de gravidade (HINES, 1960). Além disso, como o interesse nesse presente trabalho é estudar apenas ondas de gravidade interna, os termos da ordem (ω_I/c_s) na Equação 2.33 são desprezados. O resultado disto é a relação de dispersão inelástica para ondas de gravidade sob a influência da viscosidade molecular e da difusidade térmica, logo,

$$(\omega_I - i\alpha\nu) \left(\omega_I - \frac{i\alpha\nu}{Pr} \right) = \frac{k_H^2 N^2}{\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}}. \quad (2.38)$$

Para o caso das altitudes inferiores à região da MLT os termos da difusividade térmica e da viscosidade molecular podem ser desprezados e a Equação 2.38 torna-se a bem conhecida relação de dispersão inelástica para propagação livre de ondas de gravidade internas de altas frequências (GOSSARD; HOOKE, 1975), que é,

$$\omega_I^2 \cong \frac{k_H^2 N^2}{\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}}, \quad (2.39)$$

de uma forma mais usual,

$$m^2 \cong \frac{k_H^2 N^2}{\omega_I^2} - k_H^2 - \frac{1}{4H^2}. \quad (2.40)$$

Essa equação é amplamente utilizada para estudar as ondas de gravidade na região MLT onde a dissipação não é tão importante (GOSSARD; HOOKE, 1975). Entretanto, para ondas que se propagam acima da turbopausa (~ 110 km de altitude) o amortecimento de ondas de gravidade devido à viscosidade cinemática e à difusividade térmica torna-se crescentemente importante porque a densidade da atmosfera diminui com a altitude. Logo, estes dois processos são muito dependentes dos parâmetros das ondas de gravidade, por isso, ondas com grandes comprimentos de onda vertical e velocidades de grupo vertical altas se propagam para maiores altitudes dentro da termosfera antes de se dissiparem (VADAS; FRITTS, 2005).

Para a formulação clássica da relação de dispersão de onda de gravidade por viscosidade molecular e difusividade térmica, Pitteway e Hines (1963) supuseram um número de onda vertical complexo. Essa suposição resulta em um decaimento da

amplitude das ondas de gravidade com a altitude. Como a viscosidade cresce com a altitude, as soluções apresentadas são válidas apenas para altitudes a partir da qual a dissipação não é desprezível. De outra maneira, [Midgley e Liemohn \(1966\)](#) perceberam que desprezando os termos não lineares das perturbações atinge-se resultados satisfatórios sempre que $\lambda_z < H$.

Por outro lado, se forem considerados uma frequência intrínseca complexa e um número de onda vertical real dentro da relação de dispersão, o resultado será a amplitude das ondas de gravidade decaindo no tempo e pode-se obter soluções para qualquer valor de viscosidade cinemática e difusividade térmica. Desta forma pode-se descrever o caminho que as ondas fazem na atmosfera durante e depois da dissipação. Além disso, essa suposição permite que as amplitudes das ondas decaiam explicitamente no tempo (implicitamente em altitude) ou explicitamente em altitudes (implicitamente no tempo).

Supondo que as amplitudes das ondas de gravidade decaiam com o tempo, escreve-se a frequência intrínseca como a soma de uma parte real e outra imaginária, isto é,

$$\omega_I = \omega_{Ir} + i\omega_{Ii}. \quad (2.41)$$

Onde o termo ω_{Ir} é real e relaciona a frequência intrínseca à estrutura da onda e ω_{Ii} é real e expressa o inverso do decaimento da amplitude da onda com o tempo devido à viscosidade cinemática e à difusividade térmica. A componente imaginária de ω pode ir então até o solo, porém abaixo de ~ 100 km de altitude, esse termo pode ser desprezado porque a viscosidade molecular e a difusividade térmica são muito pequenas. Nesses níveis, a dissipação das ondas de gravidade não é muito efetiva. Substituindo a [Equação 2.41](#) na [Equação 2.38](#), obtém-se o inverso da taxa de decaimento, ou seja,

$$\omega_{Ii} = \frac{\nu}{2} \left(\vec{k} - \frac{1}{4H} \right) \frac{1 + \frac{1+2\delta}{Pr}}{1 + \frac{\delta_{\pm}}{2}} \quad (2.42)$$

e a relação de dispersão que será utilizada nesse trabalho,

$$\omega_{Ir}^2 + \frac{\nu^2}{4} \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{Pr} \right)^2 \frac{1 + \frac{\delta_{\pm}}{Pr}}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^2} + \frac{\nu_+ m \omega_{Ir}}{H} + \frac{\nu^2 m^2}{PrH} = \frac{k_H^2 N^2}{\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}}, \quad (2.43)$$

onde $\delta_+ = \delta(1 + Pr^{-1})$, $\nu_+ = \nu(1 + Pr^{-1})$ e $\delta = \nu m / H\omega_{Ir}$. Contudo, essa relação de dispersão não é hidrostática e compressível, mas exclui ondas acústicas, de maneira similar a de Marks e Eckermann (1995).

Adicionalmente, a Equação 2.43 será muito útil no modelo *ray tracing* por dois motivos: (1°) para calcular diretamente a frequência intrínseca que deverá ser derivada em relação às coordenadas espaciais e (2°) para determinar o número de onda vertical (m) que será avaliado nas condições de parada do modelo (mais detalhes na Capítulo 3).

2.2.2 Geração das ondas de gravidade

As fontes geradoras de ondas de gravidade consideradas dominantes para as regiões mais baixas na atmosfera são as convectivas e a de cisalhamento de vento (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Já as fontes responsáveis por gerar ondas de gravidade na região da alta atmosfera, mais importantes, são o aquecimento auroral e interação onda-onda (SOFKO; HUANG, 2000).

O trabalho de Medeiros (2001) utilizou imagens de satélite e dados de um sensor de relâmpagos, e encontrou uma forte correlação entre a frequência de ocorrência de relâmpagos com as atividades de ondas de gravidade na atmosfera. Desta maneira, as tempestades elétricas também são responsáveis por gerarem ondas de gravidade, na média atmosfera. Além disso, atualmente, o trabalho de Nyassor (2021) conseguiu correlacionar e comprovar a frequência de ocorrência de relâmpagos com atividades ondulatórias de gravidade na mesosfera.

Por sua vez, Wrasse (2004) utilizou a técnica de *ray tracing* para ondas de gravidade e identificou que as principais fontes geradoras de ondas de gravidade de pequena escala na média atmosfera eram sistemas frontais (frentes frias) e convectivos, para Cachoeira Paulista (SP) e São João do Cariri (PB).

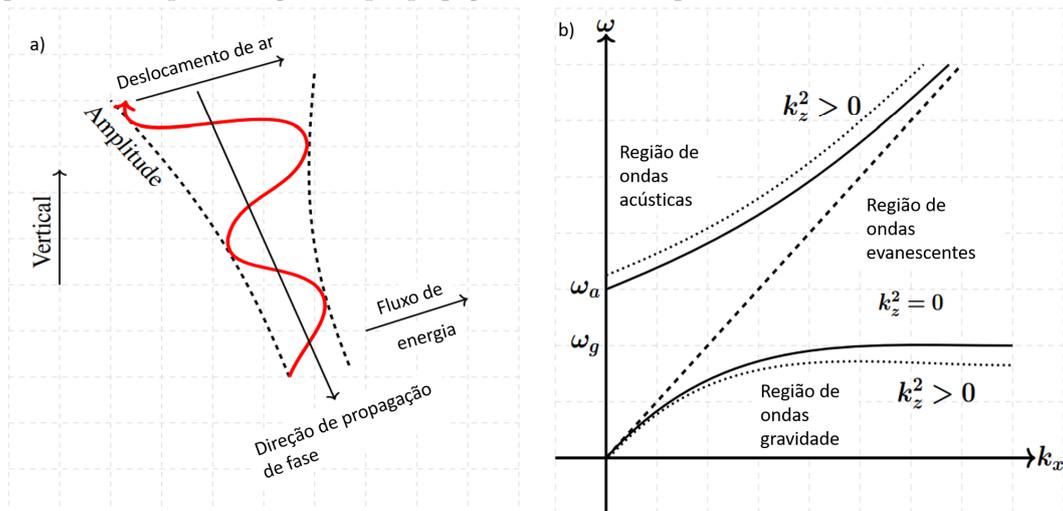
Adicionalmente, Vadas e Liu (2009) investigaram as prováveis fontes das ondas de gravidade de média escala observadas próximo de Brasília (DF). Utilizando a técnica de *ray tracing* e imagens de satélite, eles associaram as prováveis fontes geradoras dessas ondas às convecções profundas e aglomerados convectivos.

De maneira geral, as ondas de gravidade de pequena e média escala, podem ser geradas por regiões convectivas, tempestades, frentes frias e quentes, cisalhamento de vento, vento sob montanhas, interação onda-onda (WRASSE, 2004).

2.2.3 Condições de propagação vertical das ondas de gravidade

As ondas de gravidade atmosféricas podem ser classificadas como propagantes ou evanescentes. Ondas propagantes são ondas que se propagam horizontalmente e verticalmente, enquanto, ondas evanescentes são ondas que não se propagam verticalmente, mas apenas horizontalmente. As ondas propagantes, das quais estão incluídas as ondas de gravidade internas, propagam-se verticalmente para cima com amplitude crescente devido a uma diminuição da densidade com a altitude, conforme ilustrado na Figura 2.2(a). Caso não ocorra dissipação, a amplitude da onda torna-se tão grande que pode sofrer o processo de quebra e transferir momento e energia para a atmosfera de fundo, acelerando ou desacelerando assim o fluxo médio de fundo e causando turbulência. A Figura 2.2(b) ilustra as regiões onde se encontram as ondas acústicas, evanescentes e de gravidade atmosférica, em função do número de onda e da frequência.

Figura 2.2 - Representação de propagação da onda de gravidade na atmosfera terrestre.



Em (a), diagrama esquemático ilustrando a propagação da onda de gravidade com o aumento amplitude a medida que se propaga verticalmente. Em (b), apresenta o diagrama de dispersão mostrando as regiões de existência de ondas acústicas, evanescentes e de gravidade a k_z constante, mas ω e k_x variáveis.

Fonte: (a) Adaptado de Hargreaves (1992) e (b) adaptado de Gossard e Hooke (1975).

Com a finalidade de analisar os efeitos de propagação, refração, reflexão e absorção das ondas de gravidade na atmosfera, utiliza-se a relação de dispersão de Gossard e Hooke (1975), Equação 2.40. Esta simplificação ocorre porque, os outros termos

da Equação 2.43 serão mais importantes no processo de dissipação da onda. Sendo assim, para que a onda de gravidade se propague verticalmente é necessário que o número de onda vertical m seja real, pela orientação adotada aqui:

- I. $m < 0$, propagação para cima;
- II. $m > 0$, propagação para baixo.

Ainda, caso m seja complexo, parte da onda de gravidade será refratada e a onda não será propagante.

Ondas de gravidade evanescentes

As ondas de gravidade evanescentes são aquelas em que a energia é rapidamente dissipada à medida que a onda se propaga verticalmente. Elas ocorrem em regiões atmosféricas com estabilidade vertical, como em camadas onde a temperatura aumenta com a altitude (inversões térmicas). Nessas condições, a onda de gravidade é incapaz de propagar-se horizontalmente e, em vez disso, suas perturbações se espalham verticalmente, diminuindo rapidamente em amplitude e energia. Essas ondas evanescentes não são capazes de se propagar por longas distâncias e geralmente desempenham um papel importante na transferência vertical de energia e *momentum* na atmosfera (NAPPO, 2012).

Por outro lado, as ondas de gravidade propagantes são aquelas nas quais a energia é suficiente para que haja propagação horizontal e vertical. Elas ocorrem em regiões atmosféricas onde a estabilidade vertical é menor, permitindo que as perturbações da onda se propaguem horizontalmente sem dissipação significativa. As ondas de gravidade propagantes podem ser observadas em diferentes escalas na atmosfera, desde ondas de escala planetárias até ondas de pequena escala, como ondas de gravidade de montanha. Essas ondas têm a capacidade de transportar energia e *momentum* ao longo de grandes distâncias horizontais e podem desempenhar um papel importante na dinâmica atmosférica, incluindo a formação de padrões climáticos, a modulação dos ventos e a ocorrência de fenômenos meteorológicos (FRITTS; ALEXANDER, 2003).

Resumidamente, as ondas de gravidade atmosféricas evanescentes são caracterizadas pela rápida dissipação de energia à medida que se propagam verticalmente em regiões atmosféricas estáveis, enquanto as ondas de gravidade atmosféricas propagantes são capazes de se propagar horizontalmente por longas distâncias, transportando energia

e *momentum* pela atmosfera (NAPPO, 2012).

Contudo, no presente trabalho ondas de gravidade evanescentes não serão investigadas. Porém, ambos os tipos de ondas desempenham papéis importantes na dinâmica atmosférica e no transporte de energia na atmosfera terrestre.

Reflexão das ondas de gravidade

Quando uma onda de gravidade encontrar na atmosfera um nível de reflexão, acontecerá a reflexão da onda. Estes níveis de reflexões surgem na atmosfera entre uma região propagante ($m^2 > 0$) e uma evanescente ($m^2 < 0$). Contudo, uma condição necessária para que a onda de gravidade seja propagante é que a frequência de fluatibilidade seja maior que a frequência intrínseca da onda, ou seja, o termo N/ω_{Ir} deve ser maior que a unidade.

Mas, caso a frequência intrínseca da onda se aproxima da frequência de fluatibilidade, o número de onda vertical tende a zero, logo, comprimento de onda vertical torna-se muito grande ($\lambda_z \rightarrow \infty$). Além disso, se a região anterior ao nível de reflexão continuar fornecendo condições de propagação, ela é refletida e conseqüentemente, m muda de sinal.

Na ilustração apresentada na [Figura 2.3](#), pode-se observar um nível de reflexão na atmosfera. A linha tracejada separa uma região evanescente ($m^2 < 0$) de uma região propagante ($m^2 > 0$). Quando uma onda de gravidade (representada pelo conjunto de três linhas contínuas paralelas) se aproximar de um nível de reflexão, sua estrutura de fase tende a ficar praticamente alinhada com a vertical, isto é, a componente (o número de onda) vertical tende a zero ($m \rightarrow 0$).

Portanto, quando a onda não encontra condições necessárias de propagação acima desse nível ela é refletida e passa a se propagar em uma direção oposta. Um nível de reflexão para uma onda de gravidade pode ser alcançado de duas formas:

- I. Aumentando a frequência intrínseca da onda;
- II. Diminuindo a frequência de fluatibilidade do meio.

Partindo do princípio de que a frequência intrínseca sofra um grande aumento ($\omega_{Ir} \rightarrow \infty$), o número de onda vertical tenderá a zero e a onda será refletida. A frequência intrínseca de uma onda de gravidade também pode ser modificada pela ação das variações verticais do vento horizontal. Além disso, quando o vento soprar

na direção contrária à propagação horizontal da onda de gravidade, sua frequência intrínseca aumentará proporcionalmente à intensidade desse vento. Logo, a frequência intrínseca elevada implica em período intrínseco menor que o período observado, ou seja, o vento atua freando a propagação da onda de gravidade atmosférica (PAULINO, 2012).

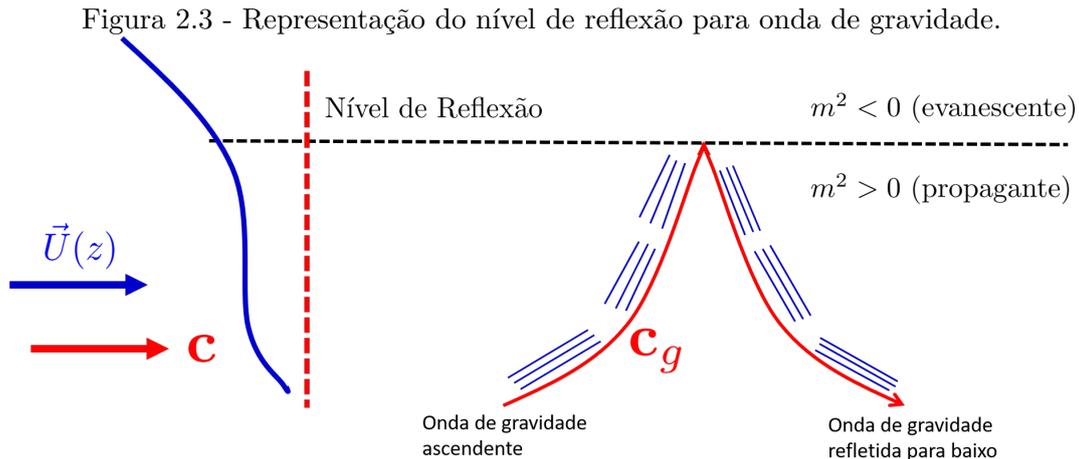


Ilustração esquemática mostrando um nível de reflexão para uma onda de gravidade. Uma região evanescente é mostrada na parte superior ($m^2 < 0$) e uma região propagante na parte inferior ($m^2 > 0$). A linha contínua (vermelho) mostra a direção de propagação da energia (c_g) que é paralela às isolinhas de fase constantes. As fases da onda são representadas pelo conjunto de três linhas contínuas paralelas (barras azuis). A linha tracejada (preto) separando as regiões evanescente e propagante representa o nível de reflexão. Um perfil arbitrário de vento (\vec{U}) é mostrado no lado esquerdo pela linha contínua (azul) e a velocidade horizontal de fase (c) pela linha pontilhada (vermelha).

Fonte: Adaptado de Vargas (2007).

No caso em que a frequência de flutuabilidade diminui, de tal forma que, se aproxima da frequência intrínseca, o número de onda vertical também tenderá a zero. A frequência de flutuabilidade é inversamente proporcional à temperatura potencial e diretamente proporcional ao seu gradiente vertical. A temperatura potencial possui um perfil crescente para praticamente toda a atmosfera.

Outra forma de identificarmos níveis de reflexão, é quando o gradiente de temperatura potencial muda de forma brusca. Abaixo destas regiões é mais fácil que surjam níveis de reflexão como uma consequência às mudanças no temperatura potencial e também na temperatura da atmosfera. Desta forma, os níveis de reflexão para ondas

de gravidade são mais propícios de surgirem na atmosfera quando:

- I. Ocorrerem fortes ventos horizontais na direção anti-paralela à propagação horizontal de uma onda de gravidade;
- II. Ocorrerem mudanças verticais bruscas na temperatura.

Portanto, esses efeitos podem criar níveis de reflexão pela ação isolada de cada um, como também pelo efeito combinado de ambos.

Canalização das ondas de gravidade

O processo de canalização de uma onda de gravidade ocorre quando a onda fica presa entre dois níveis de reflexão. Isto é, quando a onda de gravidade que se propaga de forma ascendente atinge um nível de reflexão, depois é refletida e passa a se propagar de forma descendente até atingir outro nível de reflexão em altitude inferior, que será novamente refletida para cima. Esta situação se caracteriza como duto e pode ser visualizada na [Figura 2.4\(b\)](#).

Adicionalmente, caso a onda se propagar por um longo período de tempo entre os dois níveis de reflexão e o comprimento de onda horizontal possuir uma extensão relativamente grande, comparada com a extensão do duto, então podemos afirmar, que a onda de gravidade atmosférica estará se propagando por grandes distâncias horizontais.

Caso a espessura do duto seja múltiplo do número de onda vertical, poderá ocorrer interferência construtiva entre a onda incidente e a onda refletida, fazendo com que a distância horizontal de propagação da onda seja ainda maior, como pode ser visto na [Figura 2.4\(a\)](#). Além disso, se o duto não for múltiplo do comprimento de onda vertical, a onda pode sofrer interferência destrutiva ([NAPPO, 2002](#)).

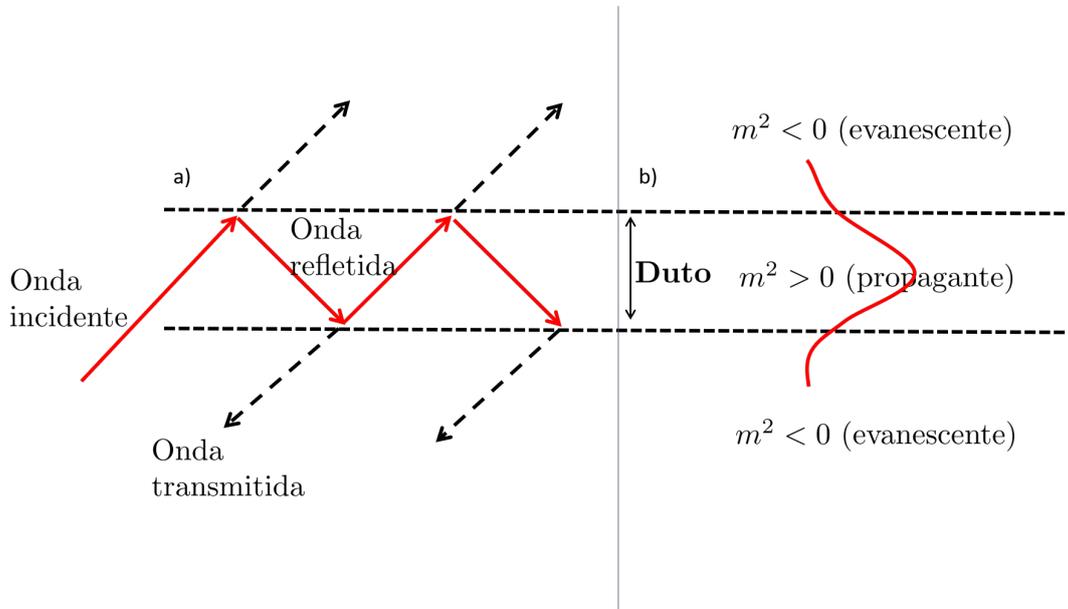
Ao visualizar a representação ilustrativa da [Figura 2.4\(b\)](#), um duto se forma a partir de uma região de $m^2 > 0$ (propagante) confinada entre duas regiões evanescentes ($m^2 < 0$), isto é, regiões de propagação vertical proibidas.

Ainda, se o mecanismo responsável pela formação do duto for o gradiente vertical de temperatura, o duto é chamado de duto térmico. Mas, se o gradiente vertical do vento horizontal favorecer a formação do canal, ele é chamado duto Doppler.

Para finalizar, o duto pode ser originado pela ação combinada do gradiente vertical

de temperatura e de vento, logo, é caracterizado como duto dual (ISLER et al., 1997). Adicionalmente, os parâmetros das ondas de gravidade são importantes para a formação do processo de canalização (FECHINE, 2007).

Figura 2.4 - Representação do processo de canalização das ondas de gravidade.



Em (a), ilustração de uma reflexão e transmissão de onda entre dois níveis. Se a ondas incidente e as ondas refletidas estiverem em fase, então a onda poderá ser canalizada. Em (b), perfil do número de onda vertical para o caso de uma canalização. As regiões onde a onda é propagante ($m^2 > 0$) e evanescente ($m^2 < 0$) são mostradas neste painel.

Fonte: Adaptada de [Fechine \(2007\)](#).

Absorção das ondas de gravidade

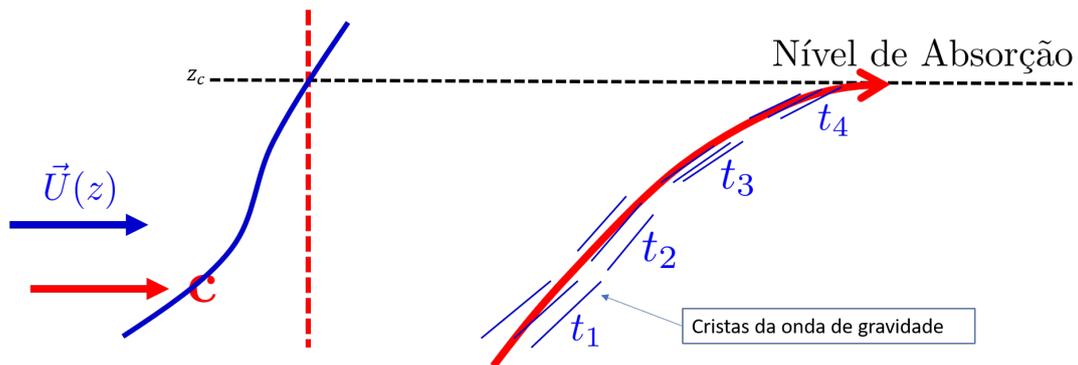
O instante de tempo em que a onda de gravidade encontra, na atmosfera, uma região em que o vento básico horizontal é exatamente igual à sua velocidade de fase horizontal, a frequência intrínseca da onda tende a zero ($\omega_{Ir} \rightarrow 0$) e o período intrínseco da onda será muito grande ($\tau \rightarrow \infty$). A região onde isto ocorre é conhecida como nível crítico (z_c) ou nível de absorção.

A absorção da onda de gravidade acontece quando a propagação vertical da onda passa a ser muito lenta e, além disso, a onda não consegue se propagar verticalmente porque $m \rightarrow \infty$. Nesta condição, a onda será rapidamente absorvida pela atmosfera.

A [Figura 2.5](#) apresenta uma ilustração de uma onda de gravidade se aproximando de

um nível crítico. Observa-se que quando a onda de gravidade se aproxima do nível crítico, as estruturas de fase se aproximam e tendem a ficar paralelas à componente horizontal.

Figura 2.5 - Representação do processo de absorção das ondas de gravidade.



Representação ilustrativa de uma onda de gravidade se aproximando de um nível crítico ou nível de absorção. A representação dos elementos desta figura é a mesma que a Figura 2.3. Mas, nesta figura é possível perceber que o nível de absorção acontece justamente quando a velocidade de fase horizontal da onda (c) (linha contínua em vermelho) coincide com o vento horizontal (U) (linha contínua em azul).

Fonte: Adaptada de Vargas (2007).

Filtragem das ondas de gravidade

Os níveis críticos e de reflexão atuam como filtros naturais para as ondas de gravidade atmosféricas, pois limitam consideravelmente o espectro de ondas de gravidade que se propagam desde suas fontes de origem na troposfera até a região da mesosfera e baixa termosfera. As ondas de gravidade com baixas velocidades de fase horizontal são mais propícias a serem absorvidas (MEDEIROS et al., 2003).

Assim sendo, as ondas de gravidade atmosféricas mais rápidas tendem a serem refletidas com mais facilidade (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Contudo, isso significa que as ondas de gravidade com características intermediárias são melhores candidatas para alcançarem altitudes mais elevadas na termosfera-ionosfera .

Dissipação e quebra das ondas de gravidade

A dissipação das ondas de gravidade na atmosfera acontecem principalmente pelo

termos de viscosidade molecular e difusividade térmica, os quais, se intensificam em dadas altitudes, em torno de ~ 110 e 120 km. Isto é devido ao decréscimo da densidade atmosférica. O fluxo de *momentum* por unidade de massa para uma onda de gravidade gerada em uma altitude $z = z_i$ e em um tempo $t = t_i$ é dado por (VADAS; FRITTS, 2009):

$$\tilde{u}_{GW}\tilde{\omega}_{GW}^*(\vec{x}, t) = |\overline{\tilde{u}_{GW}\tilde{\omega}_{GW}^*}|_{t_i} \frac{\bar{\rho}(z_i)}{\bar{\rho}(z)} e^{-2\int_{t_i}^t |\omega_{Ii}| dt'}, \quad (2.44)$$

onde o termo $|\overline{\tilde{u}_{GW}\tilde{\omega}_{GW}^*}|_{t_i}$ é o módulo do fluxo de *momentum* médio (por unidade de massa) de uma onda de gravidade em um instante t_i . O termo \vec{x} indica a posição da onda, * representa o conjugado complexo e ω_{Ii} é o inverso da taxa de decaimento devido à viscosidade molecular também, à difusividade térmica, que é dado pela Equação 2.42.

Ao analisar a Equação 2.44, percebe-se que o fluxo de *momentum* é inversamente proporcional a densidade atmosférica e diretamente proporcional ao exponencial do negativo da integral temporal de ω_{Ii} . Sabendo que, a densidade cai quase que exponencialmente com a altitude, o termo da densidade atmosférica faz com que o fluxo de *momentum* cresça com a altitude. Mas, ω_{Ii} cresce também exponencialmente com a altitude e o termo do exponencial negativo contribui para reduzir o fluxo de *momentum*. Portanto, o resultante final será uma competição entre esses dois termos, fazendo com que o fluxo de *momentum* atinja um valor máximo em uma determinada altitude dentro da termosfera-ionosfera e depois decresça rapidamente nas altitudes acima desse nível (ANDREWS et al., 1987).

Adicionalmente, supondo um evento de onda de gravidade qualquer, com seus respectivos parâmetros, ao se propagar na atmosfera esta onda irá sofrer processos dissipativos de tal forma que, o fluxo de *momentum* é máximo quando ocorre o início da dissipação da onda, isso fará com que a próxima resultante da amplitude da onda de gravidade efetivamente será menor. A altitude na qual o fluxo de *momentum* é reduzido para menos que 10% do valor calculado na altitude da camada do OH, O₂ e OI 557,7 nm (~ 87 km, ~ 94 km e ~ 96 km) pode ser considerada a altitude na qual a onda praticamente se dissipou e dá uma ideia de como a onda de gravidade está perdendo energia ao longo da sua propagação na atmosfera.

Importante lembrar que, além da densidade, o fluxo de *momentum* depende do vento atuando sobre as ondas (Equação 2.42). Isso significa que o vento pode modificar consideravelmente a altitude de início de dissipação e de penetração da onda de

gravidade ao longo da atmosfera terrestre.

2.2.4 Ondas de gravidade de pequena, média e grande escala

O estudo e a observação de ondas de gravidade nos últimos 60 anos aumentou de forma considerável. Vários trabalhos foram publicados tais como Paulino et al. (2011), Nyassor et al. (2018), Vadas e Becker (2018), ??) e Vadas e Becker (2019), descrevendo as características dos parâmetros de ondas observados. Neste sentido, as ondas de gravidade também podem ser classificadas de acordo com as suas características físicas em:

- I. Ondas de Gravidade de Pequena Escala (OGPE): são as ondas que apresentam $\tau < 30$ min e $\lambda_H < 80$ km (BURITI, 1997; MEDEIROS, 2001; VARGAS, 2007; ALMEIDA, 2010; BAGESTON, 2010).
- II. Ondas de Gravidade de Média Escala (OGME): são as ondas que apresentam $30 < \tau < 120$ min e $\lambda_H > 80$ km (VADAS; FRITTS, 2005; VADAS, 2007; TAYLOR et al., 2009; PAULINO, 2012).
- III. Ondas de Gravidade de Grande Escala (OGGE): são as ondas que apresentam $\tau > 120$ min e $\lambda_H > 1.000$ km (VADAS; BECKER, 2018; VADAS; BECKER, 2019).

A Tabela 2.1 apresenta a classificação das ondas de gravidade em função do período observado e do comprimento de onda horizontal. Estes resultados foram obtidos dos vários trabalhos publicados na literatura.

Tabela 2.1 - Classificação das ondas de gravidade atmosféricas.

Classes das ondas de gravidade	τ (min)	λ_H (km)
Pequena escala (OGPE)	$\tau < 30$	$\lambda_H < 80$
Média escala (OGME)	$30 < \tau < 120$	$\lambda_H > 80$
Grande escala (OGGE)	$\tau > 120$	$\lambda_H > 1000$

Classificação das ondas de gravidade atmosféricas em função do período e comprimento de onda horizontal.

2.2.5 Ondas de gravidade primárias, secundárias e terciárias

Em uma atmosfera estratificada de forma estável, existem apenas dois tipos de ondas lineares internas, além das ondas quase geostróficas e equatoriais de grande escala: ondas de gravidade atmosférica e ondas acústicas (HINES, 1960). Embora as ondas acústicas possam ser utilizadas como rastreadores para fenômenos como terremotos ou tsunamis, elas normalmente carregam muito pouca energia e *momentum* e, portanto, não contribuem substancialmente para o controle dinâmico da média atmosfera. Isso ocorre porque os processos meteorológicos típicos (como o fluxo do vento sobre as montanhas, correntes ascendentes dentro da convecção profunda e quebra de vórtices climáticos) têm velocidades do vento muito menores do que a velocidade do som. As ondas de gravidade geradas a partir desses processos têm amplitudes muito maiores e, portanto, representam a maior parte do transporte vertical de energia e momento da troposfera para a atmosfera média (VADAS; BECKER, 2018).

Como a amplitude de uma onda de gravidade cresce quase exponencialmente com a altitude, uma onda de gravidade pode sofrer efeitos importantes em altitudes mais altas, mesmo que sua amplitude inicial seja pequena. Desta forma, alguns importantes processos de amortecimento das ondas de gravidade em altitudes mais altas incluem o seguinte (FRITTS; ALEXANDER, 2003):

- I. Uma onda de gravidade primária atinge um nível crítico e se dissipa quando $\omega_{Ir} \rightarrow 0$ e $\lambda_z \rightarrow 0$, onde ω_{Ir} é a frequência intrínseca.
- II. Uma onda de gravidade primária quebra quando se aproxima da condição de instabilidade convectiva, que é dada por $|U'_H/(c_H - U_H)| \sim 0.7 - 1.0$. Neste caso, $U'_H = \sqrt{(U')^2 + (V')^2}$, $c_H = \omega_r/k_H$, onde U_H é o vento horizontal na direção de propagação da onda, c_H é a velocidade de fase horizontal e $\omega_r = 2\pi/\tau_r$ é a frequência observada (baseada no solo). O comprimento de onda horizontal é dado por λ_H e o número de onda horizontal K_H , onde $K_H = \sqrt{k^2 + l^2} = 2\pi/\lambda_H$, no qual k, l, m são o número de onda zonal, meridional e vertical, respectivamente. $U_H = (k\bar{U} + l\bar{V})/K_H$, \bar{U} e \bar{V} são os componentes zonal e meridional do vento de fundo, respectivamente, logo a frequência intrínseca da onda pode ser dada por $\omega_{Ir} = \omega_r - (k\bar{U} + l\bar{V}) = \omega_r - K_H U_H$ (VADAS; BECKER, 2018).

Ambos os processos são altamente não lineares e resultam em (1) uma cascata de energia e *momentum* para escalas menores e (2) uma eventual transição para a turbulência. Além disso, ondas de gravidade secundárias de pequena escala também são

excitadas. Essas ondas secundárias possuem λ_H e $|\lambda_z|$ menores que as das ondas de gravidade primárias, além de apresentarem velocidades de fase horizontal pequenas (de até dezenas de metros por segundo). Conseqüentemente, essas ondas secundárias de pequena escala geralmente não podem se propagar muito longe antes de serem reabsorvidas no fluido; embora possam carregar e transportar um fluxo de momento significativo no processo (BOSSERT et al., 2017). As ondas de gravidade secundárias podem ser vagamente consideradas como parte da transição para a turbulência. Por causa de suas pequenas velocidades de fase horizontal, essas ondas secundárias de pequena escala se dissiparão rapidamente perto da turbopausa ~ 105 km de altura) devido à viscosidade molecular e a difusividade térmica (VADAS, 2007).

Durante a transição para a turbulência, *momentum* e energia são depositados no fluxo médio (tais como na temperatura, vento e densidade atmosférica). Essa deposição resulta em uma aceleração horizontal localizada (no espaço e no tempo) do fluxo médio (de fundo), chamada de “forçante local” (VADAS et al., 2003; VADAS; FRITTS, 2006; VADAS; BECKER, 2018). O forçante local refere-se ao fato de que essa força está localizada no espaço e no tempo em relação ao fluxo médio. Esse forçante acelera o fluxo médio na direção de propagação das ondas de gravidade primárias, fazendo com que o fluxo médio fique desequilibrado. Desta forma, o fluido responde (1) criando um fluxo médio 3-D que consiste em duas células em contra-rotação (VADAS; LIU, 2009) e (2) excitando ondas de gravidade secundárias de média e grande escala com λ_H muito maior que do que as ondas de gravidade primárias (VADAS; BECKER, 2018).

Além disso, as ondas de gravidade secundárias de grande escala se propagam para cima e para baixo, e para frente e para trás, afastando-se do forçante (VADAS et al., 2003). Por exemplo, em uma atmosfera idealizada (ou seja, isotérmica e com vento constante em z e t), 50% das ondas secundárias se propagam para cima (para baixo) e 50% se propagam para frente (para trás) longe do forçante local (VADAS et al., 2003). Embora essas ondas de gravidade secundárias se propaguem em todas as direções, exceto perpendiculares à direção do forçante, elas têm as maiores amplitudes paralelas e antiparalelas à direção da força. Por outro lado, as amplitudes, das ondas de gravidade secundárias com propagação descendente, diminuem rapidamente em função da altura. Contudo, as amplitudes das ondas de gravidade secundárias de propagação ascendente aumentam rapidamente com $\sim \exp(z/2H)$, sugerindo assim que elas poderiam afetar de forma significativa a variabilidade e dinâmica da atmosfera em altitudes mais elevadas (VADAS; BECKER, 2018).

Vadas e Becker (2019) investigaram os efeitos na mesosfera e termosfera de um forte evento de ondas geradas por montanhas sobre no sul da Cordilheira dos Andes. As ondas de montanha se propagaram até as altitudes de ~ 50 e 75 km, onde quebraram e se atenuaram criando assim forçantes locais que geraram ondas de gravidade secundárias de grande escala e com estrutura de anel concêntricos ($500 < \lambda_H < 2.000$ km, $70 < c_H < 100$ m/s e $3 < \tau < 10$ h). Essas ondas de gravidade secundárias se dissipam na mesosfera superior e na termosfera, criando assim forçantes locais. Os forçantes possuem dimensões horizontais de 180 a 800 km, dependendo da interferência construtiva/destrutiva entre os pacotes de ondas e os tamanhos gerais dos pacotes de ondas. O maior forçante local ocorre entre 80 e 130 km de altura e excita ondas de gravidade terciárias de média e grande escala com estrutura de anel concêntrico. A densidade de energia potencial das ondas de gravidade aumentam exponencialmente entre 95 e 115 km de altitude, diminuem entre 115 e 125 km de altitude, onde a maioria das ondas de gravidade secundárias se dissipam e tornam a aumentar novamente acima de 125 km devido à geração das ondas de gravidade terciárias. Desta forma, os autores mostraram que um forte evento de ondas de montanha resultam na geração de ondas de gravidade terciárias de média a grande escala na mesosfera e na termosfera por meio do mecanismo de acoplamento vertical de várias etapas.

A Figura 2.6 apresenta um esquema mostrando o mecanismo de acoplamento vertical de várias etapas que liga eventos de ondas de montanha às ondas de gravidade terciárias na termosfera. Os forçantes locais (setas pretas horizontais) são criados onde as ondas de montanha quebram e se atenuam entre ~ 50 e 70 km de altura. Ondas de gravidade secundárias são então geradas por esses forçantes locais, as quais se propagam verticalmente e se dissipam criando novos forçantes locais entre ~ 80 e 130 km de altura, gerando as ondas de gravidade terciárias. Embora muitas ondas se propaguem para altitudes maiores, algumas ondas de gravidade terciárias começam a se dissipar acima de 110 km de altitude. Apenas as ondas de gravidade secundárias e terciárias de propagação ascendentes e descendente são apresentadas na nesta figura (VADAS; BECKER, 2019).

Figura 2.6 - Ilustração do mecanismo de acoplamento vertical de várias etapas.

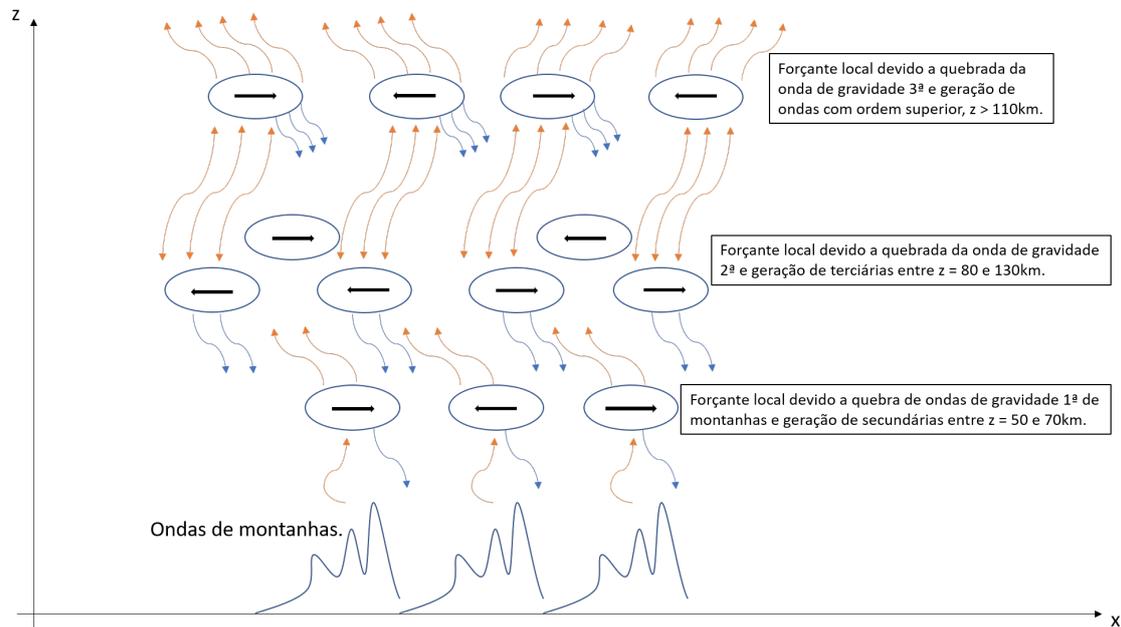


Ilustração das regiões onde as ondas de montanha quebram, gerando ondas de gravidade secundária. As ondas de gravidade secundárias se propagam verticalmente e se dissipam gerando ondas de gravidade terciárias (e de ordens superiores).

Fonte: Adaptada de Vadas e Becker (2019).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada uma breve descrição do imageador *all-sky* utilizado neste trabalho de tese, bem com a metodologia desenvolvida para o estudo das ondas de gravidade de média escala observadas por meio das emissões da aeroluminescência noturna. O processo de tratamento das imagens da aeroluminescência também é apresentado juntamente com a descrição da técnica de keograma.

Uma nova metodologia foi implementada para gerar keogramas na direção de propagação das ondas de gravidade. Esse novo keograma é então utilizado para comparar uma mesma onda de gravidade observada em múltiplas camadas da aeroluminescência e determinar a condição de propagação vertical da onda, por meio da análise de fase da mesma. Por fim, para investigar as condições de propagação e as possíveis fontes de geração das ondas de gravidade de média escala é apresentada a técnica de *ray tracing*.

3.1 Imageador *all-sky*

O imageador *all-sky* é um equipamento óptico formado por uma lente do tipo olho de peixe (*fisheye*) e um conjunto de lentes que formam o sistema telecêntrico. Filtros de interferências também integram o imageador e são utilizados para observar as diferentes camadas de emissões da aeroluminescência. Além disso, um sistema de lentes é utilizado para a reconstrução da imagem e uma lente objetiva focaliza a imagem formada sobre o sensor da câmera do tipo CCD (do inglês, *Charge Coupled Device*) (MEDEIROS, 2001).

A Figura 3.1 ilustra o imageador *all-sky* utilizado para observar aeroluminescência noturna. O imageador também possui um sistema de refrigerado para diminuir o ruído térmico da CCD. Uma fonte externa fornece energia ao equipamento e um microcomputador controla todo o sistema e gerencia a aquisição e armazenamento das imagens obtidas.

Figura 3.1 - Representação esquemática dos imageadores utilizados no presente trabalho para observar as emissões da aeroluminescência noturna.

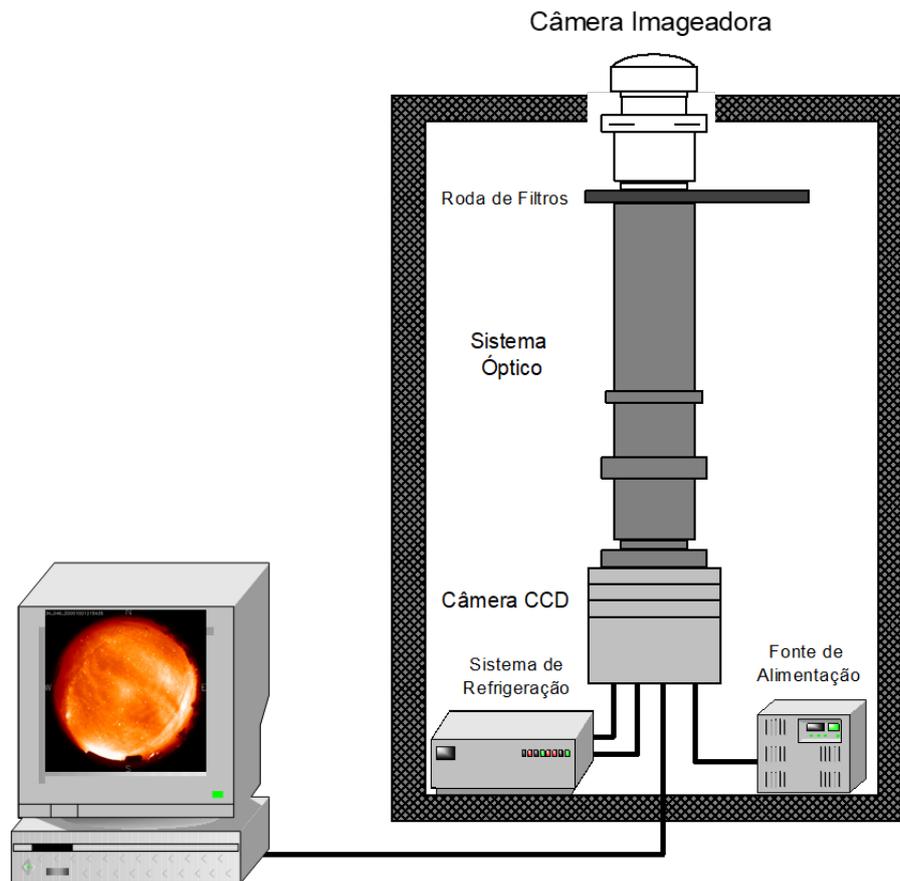


Ilustração dos imageadores utilizados para medir as emissões da aeroluminescência noturna nos sítios de observação de Cachoeira Paulista (SP) e São João do Cariri (PB). O imageador é formado por um sistema óptico, filtros de interferência, câmera CCD, sistema de refrigeração e pela fonte de alimentação do instrumento.

Fonte: Wrasse (2004).

O imageador é capaz de detectar padrões de ondas nas camadas de emissões da aeroluminescência noturna. Neste trabalho, foram utilizadas as camadas de emissões do oxigênio atômico (OI 557,7 nm), do oxigênio molecular (O_2) e da molécula de hidroxila (OH). Para observar a luz proveniente de cada uma destas camadas de emissões, são utilizados filtros de interferência, com características espectrais específicas.

A Tabela 3.1 apresenta as principais características espectrais dos filtros de interferência, tais como o comprimento de onda central e a largura de banda. Além disso, também são apresentadas as características das camadas de emissões, a espécie fo-

toquímica, a altura média do pico da camada de emissão e o tempo de integração para se obter uma imagem da aeroluminescência.

Tabela 3.1 - Características espectrais dos filtros de interferência utilizados nos imageadores *all-sky* para a observação da aeroluminescência noturna.

Espécie fotoquímica (Filtro)	Comprimento de onda (nm)	Largura de banda do filtro ($\Delta\lambda$ nm)	Altura média do pico da camada de emissão (km)	Tempo de integração (s)
OI	557,7	2,65	~96	90
OI	630,0	3,3	~275	90
O ₂ (0-1)	865,5	12	~94	90
OH	715-930 ¹	215	~87	15
Fundo luminoso	578,0	2,67	-	90

Fonte: Adaptada de Medeiros (2001).

A luz proveniente da aeroluminescência noturna incide na lente olho de peixe, a qual é responsável pelo campo de visão de 180° do equipamento. O feixe de luz passa então por um conjunto de lentes denominado sistema telecêntrico, que é responsável por projetar a luz perpendicularmente sobre os filtros de interferência. Os filtros de interferência transmitem apenas uma faixa desejável do espectro de luz. Uma descrição mais detalhada do sistema óptico pode ser encontrada em Wrasse (2004). A roda de filtros posiciona os filtros de interferência no caminho óptico da luz. Este dispositivo também pode armazenar outros filtros, conforme descritos na Tabela 3.1, como por exemplo, a linha vermelha do oxigênio atômico (OI 630, 0 nm) e o fundo luminoso (578, 0 nm).

Após a luz ser filtrada, essa passa por um sistema de lentes que faz a reconstrução da imagem, a qual é então focalizada sobre a câmera CCD por uma lente objetiva. O tempo de integração da imagem depende diretamente da intensidade média de cada emissão, por exemplo, costuma-se utilizar 15 s de exposição para se obter as imagens do OH e 90 s para as demais emissões da aeroluminescência. As imagens registradas pela câmera CCD são então transferidas para o microcomputador que finaliza o processo de armazenamento em memórias físicas. Mais detalhes sobre o funcionamento do sistema óptico pode ser encontrada em Wrasse (2004).

¹Com interceptação em 865, 5 nm, que corresponde às emissões da banda Atmosférica do O₂ (0-1).

A função do dispositivo CCD é converter as informações luminosas em elétrons que depois são convertidos e armazenados em forma de imagens no microcomputador. De forma simplificada, as principais etapas para a geração de uma imagem na CCD são: 1) gerar e armazenar cargas elétricas; 2) transferir as cargas elétricas para o processo de leitura; 3) converter o sinal analógico proveniente da contagem das cargas elétricas em digital; 4) armazenar os dados digitais em forma matricial para compor as imagens. A CCD possui uma eficiência quântica em torno de 80% no visível, 0,5 elétrons/pixel de corrente escura, 15 elétrons *rms* de ruído de leitura, e uma linearidade de 0,05%. As imagens registradas são agrupadas em 512×512 pixels para melhorar a relação sinal-ruído (MEDEIROS, 2001).

É importante destacar que no observatório de Cachoeira Paulista (SP) ($22,7^\circ$ S; $45,0^\circ$ O) foram utilizados dois imageadores entre os anos de 1998 e 2013. O primeiro imageador foi instalado em Cachoeira Paulista em outubro de 1998, fruto de uma cooperação científica internacional entre o INPE e a *Utah State University* (EUA). O segundo imageador, com características similares ao primeiro, foi adquirido pelo INPE em 2001 e operou de forma contínua no observatório de Cachoeira Paulista entre junho de 2004 e julho de 2013. A descrição apresentada anteriormente refere-se ao primeiro imageador instalado em Cachoeira Paulista. Também é importante ressaltar que os filtros de interferência utilizados pelos dois imageadores apresentam as mesmas características (BILIBIO, 2017).

Contudo, as CCDs utilizadas pelos imageadores apresentavam pequenas diferenças, enquanto a CCD do primeiro imageador possuía uma área coletora de $6,45 \text{ cm}^2$, com uma matriz de 1024×1024 pixels, a CCD do segundo imageador possuía uma área coletora de $6,95 \text{ cm}^2$ com uma matriz de 1340×1300 pixels. Para melhorar a relação sinal-ruído as imagens registradas são agrupadas em 512×512 pixels e 670×650 pixels, respectivamente. Ambas CCDs utilizavam de um sistema de refrigeração por líquido refrigerante para reduzir o ruído térmico (MEDEIROS, 2001; BILIBIO, 2017).

O imageador destinado ao observatório de São João do Cariri (PB) ($7,4^\circ$ S; $36,5^\circ$ O) foi adquirido pelo INPE nos anos de 1999. O equipamento foi instalado por meio de uma cooperação científica entre o INPE e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e se manteve em operação entre os anos de 2000 e 2011. Este imageador apresentava as mesmas características descritas nesta seção e a CCD utilizada possuía uma área coletora de $6,45 \text{ cm}^2$, com uma matriz de 1024×1024 pixels, as quais eram agrupadas em 512×512 pixels (MEDEIROS et al., 2007).

3.2 Pré-processamento das imagens de aeroluminescência

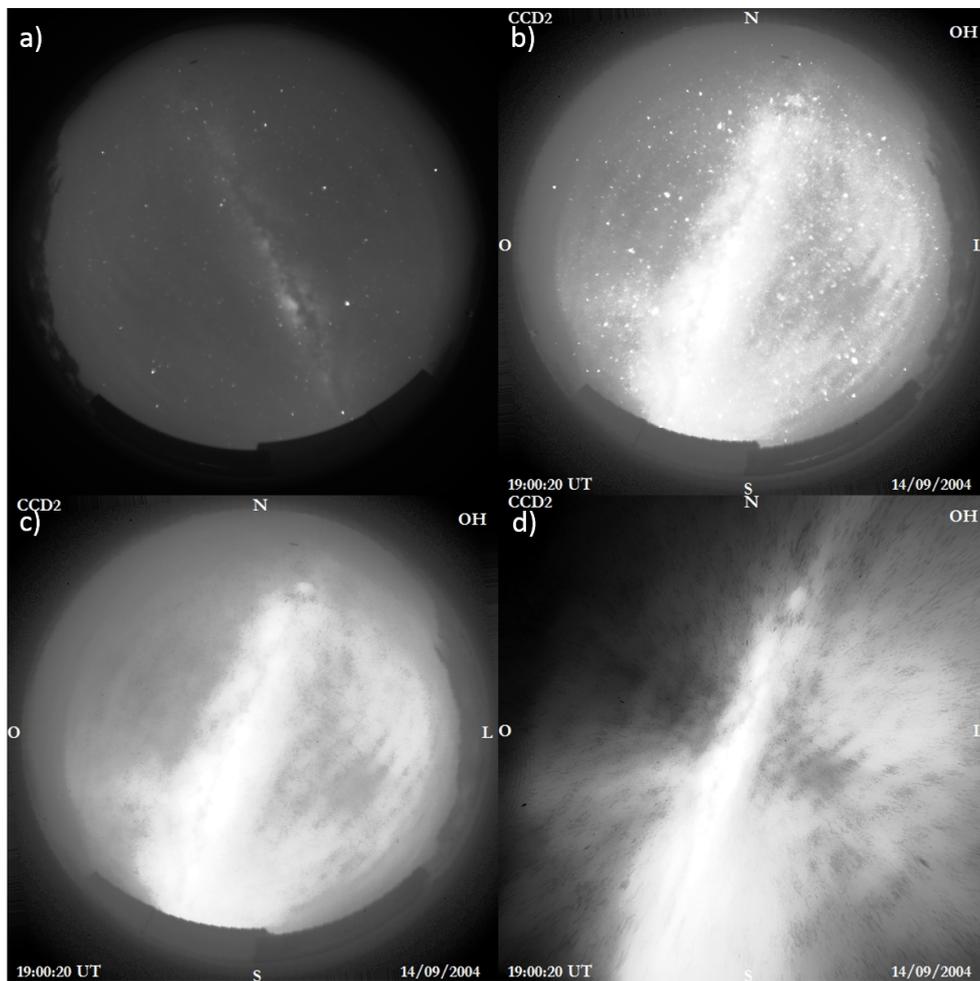
As imagens obtidas das camadas da aeroluminescência noturna pelo imageador são utilizadas para caracterizar as ondas de gravidade observadas na região da mesosfera. Contudo, devido às características da lente olho de peixe, as imagens possuem distorções devido ao campo de visão do imageador. Neste sentido, é necessário realizar um processo de transformação de coordenadas de forma que a imagem possa ser utilizada na análise espectral e as características das ondas de gravidade serem determinadas.

Para isto, o método utilizado para transformar as coordenadas da imagem original para coordenadas geográficas é conhecido como calibração espacial. Esta transformação de coordenadas é utilizada para relacionar a distância entre os pixels na imagem original com uma distância física na altura da camada de emissão. O método baseia-se no mapeamento das estrelas mais brilhantes da imagem original para a coordenada geográfica, em termos de azimute e elevação (GARCIA et al., 1997).

Este procedimento é realizado manualmente e envolve softwares que forneçam um mapa celeste para o mesmo local e horário da observação da aeroluminescência (BILIBIO, 2017). Contudo, Wrasse e Rodrigues (2008) desenvolveram um software denominado *All-Sky Calibration* que executa as principais etapas do processo de mapeamento de coordenadas. As calibrações espaciais das imagens utilizadas no presente trabalho foram realizadas com o software *All-sky calibration* (BILIBIO, 2017). Maiores informações sobre o processo de calibração espacial utilizando o software *All-sky calibration* pode ser encontrado no trabalho de Almeida (2010).

A Figura 3.2 apresenta as principais etapas do pré-processamento das imagens antes da construção dos keogramas, a saber: (a) aquisição da imagem da emissão da aeroluminescência obtida via imageador *all-sky*; (b) alinhamento do topo da imagem original com o norte geográfico; (c) remoção das estrelas da imagem (MAEKAWA, 2000); (d) mapear as imagens da coordenada padrão para a coordenada geográfica (km/pixel).

Figura 3.2 - Ilustração das etapas do pré-processamento das imagens da aeroluminescência para a emissão do OH.



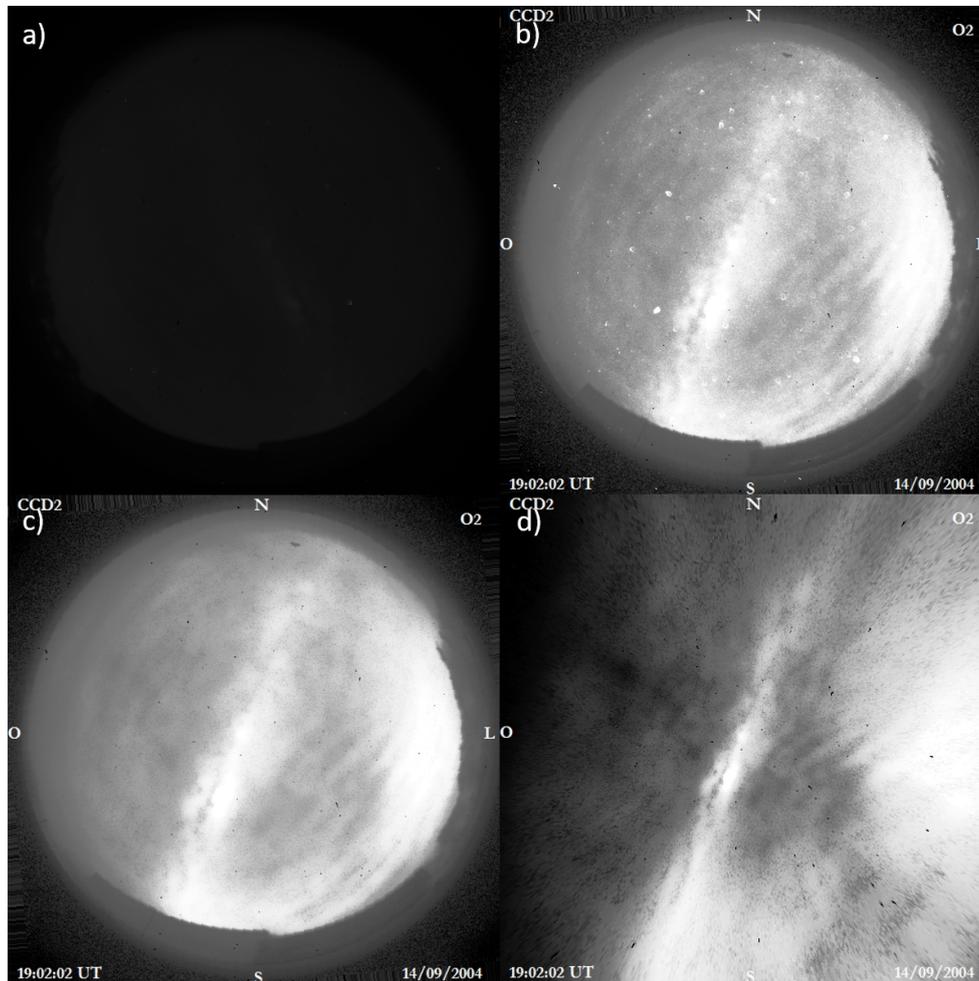
(a) Imagem original; (b) imagem alinhada com o norte geográfico; (c) imagem com as estrelas removidas e (d) imagem mapeada em coordenadas geográficas. A imagem apresenta uma onda de gravidade observada na camada de emissão do OH, observada em 14 de Setembro de 2004, às 19 h 00 min (LT) no observatório de São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção do autor.

Para investigar as ondas de gravidade em diferentes camadas da aeroluminescência, deve-se realizar o mesmo pré-processamento das imagens oriundas das demais camadas de emissões que se deseja investigar. Desta forma, a [Figura 3.3](#) mostra um novo conjunto de imagens obtidas pelo imageador *all-sky*, onde também foi realizado o pré-processamento das imagens. Neste caso, a emissão de aeroluminescência utilizada foi a camada do O₂. Observa-se que o mesmo padrão de ondas de gravidade

de média escala são observadas nas emissões do OH e do O₂.

Figura 3.3 - Ilustração das etapas do pré-processamento das imagens da aeroluminescência para a emissão do O₂.



(a) Imagem original; (b) imagem alinhada com o norte geográfico; (c) imagem com as estrelas removidas e (d) imagem mapeada em coordenadas geográficas. A imagem apresenta uma onda de gravidade observada na camada de emissão do O₂, observada em 14 de Setembro de 2004, às 19 h 00 min (LT) no observatório de São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção do autor.

Após o pré-processamento das imagens as mesmas estão aptas para serem utilizadas na construção dos keogramas. O uso da técnica de keograma é muito útil para identificar oscilações de onda de gravidade de média escala. Ondas de gravidade que possuem comprimento de onda horizontal maior ou igual a 50 km ($\lambda_H > 50$ km) são difíceis de serem caracterizadas com uma única imagem de aeroluminescência.

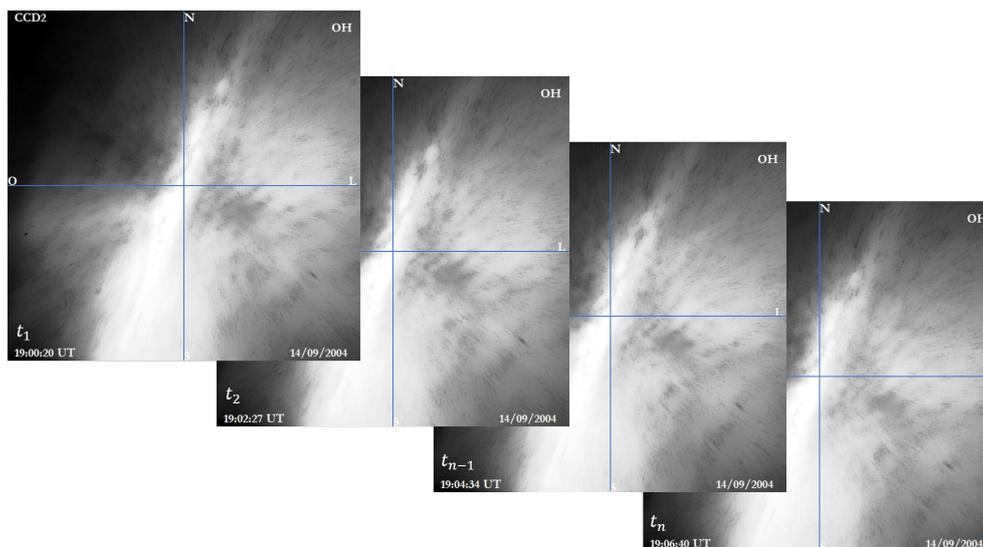
Assim sendo, a técnica de keogramas é uma metodologia viável para análises as ondas de gravidade de média escala (TAYLOR et al., 2009; PAULINO et al., 2011; PAULINO, 2012; ESSIEN, 2015; BILIBIO, 2017).

3.3 Técnica de keograma

A técnica de keograma consiste na amostragem de imagens da aeroluminescência em função do tempo. Um keograma é produzido por amostras zonais e meridionais de imagens em função do tempo (PAULINO, 2012). Cada amostra é obtida a partir do centro desta imagem, onde as informações armazenadas em uma linha (componente zonal) e em uma coluna (componente meridional) de uma imagem são utilizadas para compor o keograma ao longo de uma noite de observação.

A Figura 3.4 apresenta de forma ilustrativa o processo utilizado para a construção de um keograma. As amostras (representadas pelas linhas azuis) de cada imagem obtidas ao longo de uma noite de observação são utilizadas para compor os keogramas nas componentes zonal (Leste - Oeste) e meridional (Norte - Sul). Nessa figura foram utilizadas as imagens da emissão do OH, para a noite de 14 de setembro de 2004, obtidas no Observatório de São João do Cariri (PB).

Figura 3.4 - Representação ilustrativa das regiões nas imagens da aeroluminescência onde são obtidas as amostras ao longo de uma noite de observação para construir um keograma.



Imagens da aeroluminescência linearizadas ao longo de uma noite de observação, a fim de obter amostras zonais e meridionais do centro das imagens em função do tempo.

Fonte: Produção do autor.

Utilizando então, a técnica de keogramas, é possível caracterizar e estudar separadamente as ondas de gravidade em cada uma das componentes Norte - Sul e Leste - Oeste. Desta forma, pode-se obter os parâmetros da onda de gravidade de média escala por relações geométricas entre as componentes (PAULINO, 2012).

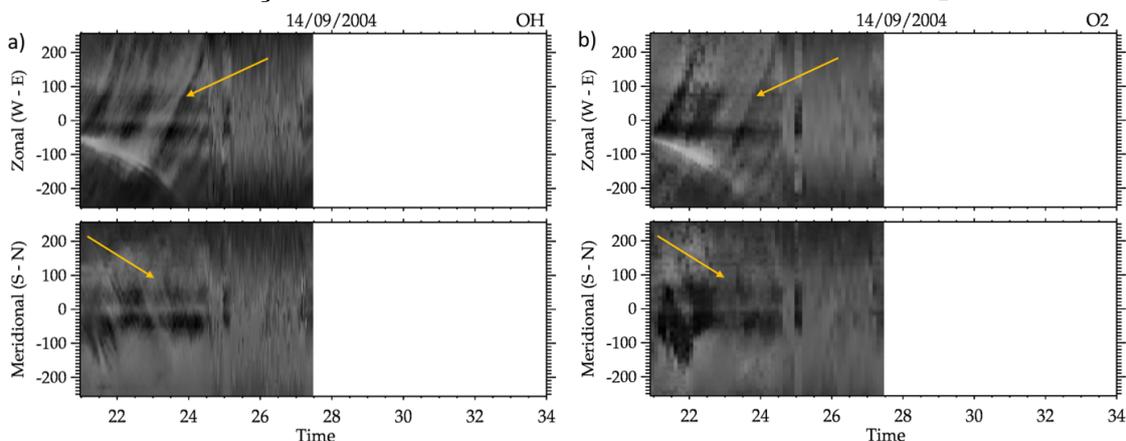
Paulino (2012) desenvolveu a metodologia de análise de ondas de gravidade de média escala a partir da técnica de keogramas. Uma das dificuldades em se trabalhar com a técnica de keogramas é a identificação dos padrões de uma mesma onda nas duas componentes do keograma. Outra dificuldade apontada por Paulino (2012) é a pequena amplitude das oscilações ($< 10\%$) o que dificulta a separação espectral das ondas de gravidade de média escala. Um modo de enfatizar as ondas de gravidade de média escala encontradas em um conjunto de imagens é por meio da aplicação de filtros digitais (PAULINO, 2012).

Neste trabalho, foram utilizados filtros do tipo passa banda para comprimentos de onda horizontal entre 5 km e 384 km e entre 5 km e 256 km. Esses intervalos foram escolhidos em função da projeção empregada ($768 \times 768 \text{ km}^2$ ou $512 \times 512 \text{ km}^2$) para as imagens durante a análise espectral. Além disso, também foi aplicada uma suavização de 11 km e 16,5 km em função da projeção, $768 \times 768 \text{ km}^2$ ou $512 \times 512 \text{ km}^2$, respectivamente. Mais detalhes sobre a escolha dos filtros passa banda e o processo de filtragem podem ser encontrados em Paulino (2012) e Bilibio (2017).

A Figura 3.5(a) e a Figura 3.5(b) apresentam os resultados dos keogramas com a aplicação dos filtros do tipo passa banda. Em (a), apresenta o keograma para a emissão do OH e em (b), o keograma para a emissão do O_2 , respectivamente. É possível identificar as estruturas oscilatórias de média escala tanto na componente zonal, quanto na componente meridional presentes em ambos os keogramas e nas diferentes camadas de emissões de aeroluminescência. Nos keogramas das emissões do OH e do O_2 foi utilizado um filtro passa banda com comprimentos de onda horizontal entre 5 km e 256 km e uma suavização de 16,5 km, para a projeção de $512 \times 512 \text{ km}^2$.

Para obter os parâmetros da onda de gravidade de média escala a partir da análise dos keogramas, deve-se selecionar uma região de interesse, (retângulos brancos na Figura 3.6), contendo, algum padrão oscilatório e então aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta metodologia foi desenvolvida por Paulino (2012) e modificada por Figueiredo (2017).

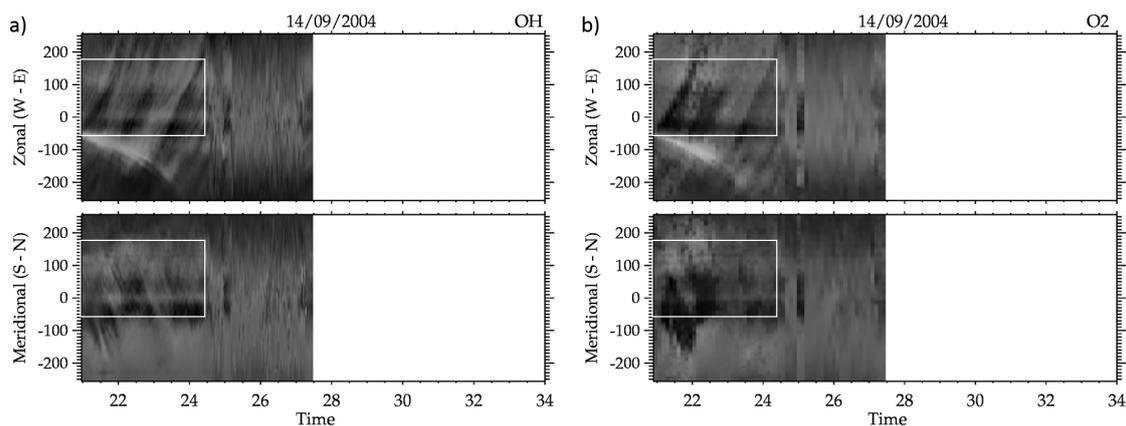
Figura 3.5 - Keogramas filtrados para a noite de 14 de setembro de 2004, mostrando as observações simultâneas nas camadas de emissão do OH e O₂.



Em (a), Keograma filtrado para a emissão do OH e (b) para a emissão do O₂. As imagens foram adquiridas no observatório de São João do Cariri (PB), para a noite de 14 de setembro de 2004. As regiões destacadas pelas setas indicam os padrões oscilatórios característicos da propagação de ondas de gravidade de média escala.

Fonte: Produção do autor.

Figura 3.6 - Keogramas filtrados para as emissões do OH e O₂, para a noite de 14 de setembro de 2004, indicando as regiões nas quais foram observadas as ondas de gravidade de média escala.



Em (a), Keograma filtrado para a emissão do OH e (b) para a emissão do O₂. As imagens foram adquiridas no observatório de São João do Cariri (PB), para a noite de 14 de setembro de 2004. Os retângulos brancos indicam as regiões de interesse onde será aplicada a análise espectral.

Fonte: Produção do autor.

A FFT, dada pela [Equação 3.1](#), pode ser aplicada para cada uma das amostras contidas nas regiões de interesse selecionadas.

$$F(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t)e^{\left(\frac{-2\pi\omega n}{N}i\right)}, \quad (3.1)$$

onde $F(\omega)$ é a transformada de Fourier da função $f(t)$, $\omega = 0, \dots, N - 1$ é o índice de frequência e N é o número de pontos da série temporal nas regiões selecionadas.

Utilizando a transformada de Fourier, calcula-se o espectro cruzado, definido na [Equação 3.2](#),

$$C(\omega) = F_S(\omega) * F_{S+1}^*(\omega), \quad (3.2)$$

onde $C(\omega)$ é o espectro cruzado entre duas séries temporais, $F_S(\omega)$ e F_{S+1}^* representam as transformadas de Fourier das séries $f_S(t)$ e $f_{S+1}(t)$, respectivamente, e F_{S+1}^* é o complexo conjugado de $F_{S+1}(\omega)$.

O espectro cruzado de potência unidimensional é definido pelo módulo quadrático, $|C^2|$. Se o número de séries temporais selecionadas for S , o espectro resultante será a média aritmética de todo o conjunto dos $S - 1$ espectros computados ([WRASSE, 2004](#); [FIGUEIREDO, 2017](#)).

A amplitude do espectro pode ser expressa por $2\sqrt{|C(\omega)|}$, com a fase do espectro cruzado sendo definida por ([WRASSE, 2004](#)):

$$\Delta\psi = \tan^{-1} \left\{ \frac{Im(C(\omega))}{Re(C(\omega))} \right\}, \quad -\pi \leq \phi \leq \pi. \quad (3.3)$$

Para a frequência ω , na qual a amplitude é máxima, a fase do espectro cruzado representa a diferença de fase causada pela propagação da onda entre as séries temporais.

Portanto, o procedimento para determinar os parâmetros característicos das ondas de gravidade segue as seguintes etapas:

a) Calcular do período:

$$\tau = \frac{1}{f(\omega)} \text{ (min)}, \quad (3.4)$$

b) Calcular do comprimento de onda para as componentes zonal e meridional ($\lambda_{NS,LO}$).

$$\lambda_{NS,LO} = \frac{\Delta d}{\frac{\Delta\psi}{360^\circ}} \text{ (km)}, \quad (3.5)$$

onde Δd representa a distância entre as amostras da componente horizontal do keograma.

c) Determinar o comprimento de onda horizontal (PAULINO, 2012):

$$\lambda_H = \frac{\lambda_{NS}\lambda_{LO}}{\sqrt{\lambda_{NS}^2 + \lambda_{LO}^2}} \text{ (km)}. \quad (3.6)$$

d) Calcular da velocidade de fase horizontal c_H e a direção de propagação de fase ϕ (PAULINO, 2012), as quais podem ser obtidas por:

$$c_H = \frac{\lambda_H}{\tau} \text{ (m/s)}, \quad (3.7)$$

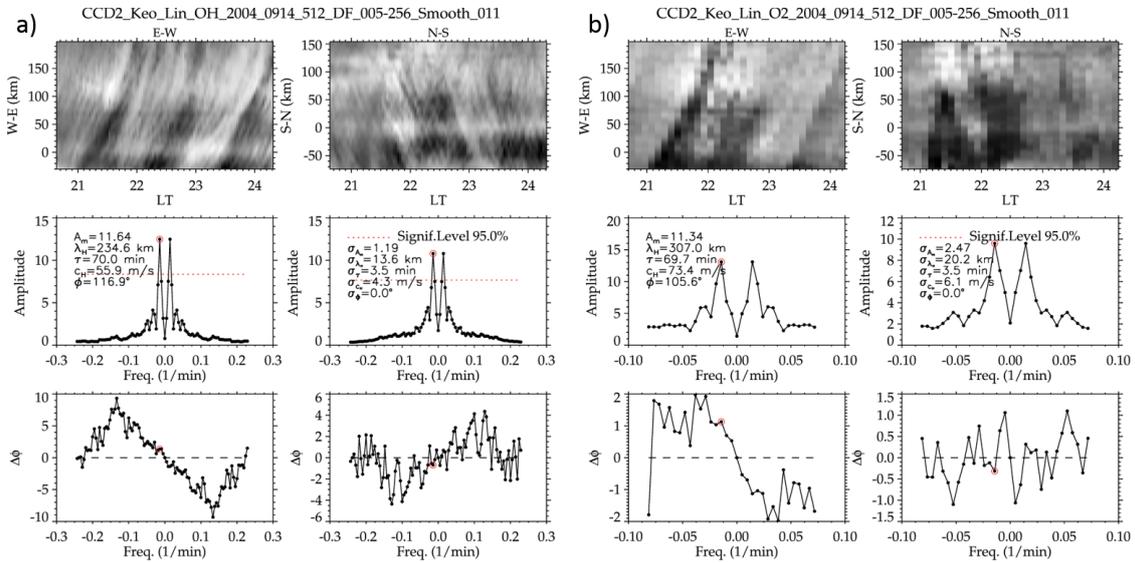
$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_{NS}} \right) \text{ (}^\circ\text{)}. \quad (3.8)$$

A Figura 3.7 apresenta os resultados da aplicação da análise espectral nos keogramas das emissões do OH e do O₂. Nas Figura 3.7 (a) e Figura 3.7(b), a primeira linha representa a região selecionada pelo retângulo branco nos keogramas, para ambas as emissões. Na segunda linha, encontra-se os resultados da frequência em função da amplitude da onda, para cada uma das componentes do keograma. A última linha representa a diferença de fase média calculada por meio do espectro cruzado e utilizado para determinar os comprimentos de onda, para cada uma das componentes dos keogramas. Desta forma, a partir do resultado da frequência e da diferença de fase média, pode-se obter todos os parâmetros da onda de gravidade.

Também é importante mencionar que utilizando apenas as imagens obtidas pela observação da aeroluminescência não é possível determinar as características intrín-

secas das ondas de gravidade. Para tal, é necessária a observação do vento básico de fundo na região da mesosfera e baixa termosfera.

Figura 3.7 - Resultados da aplicação da técnica de análise espectral nos keogramas.



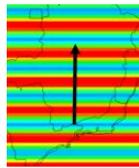
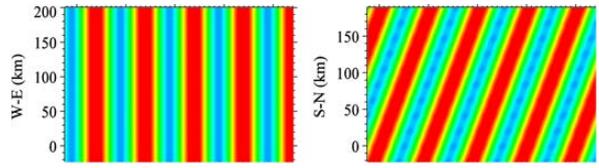
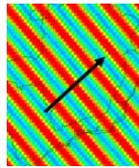
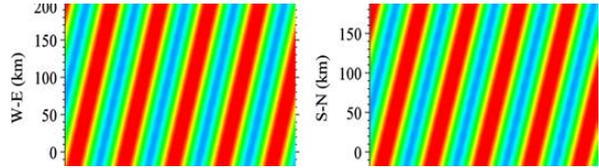
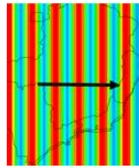
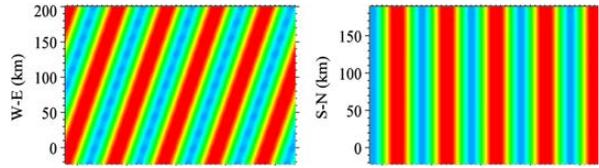
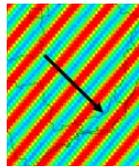
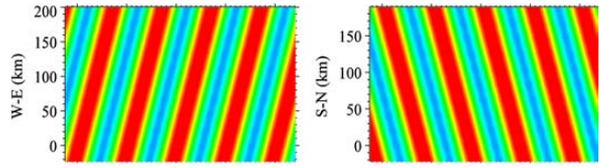
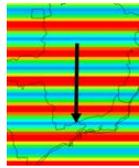
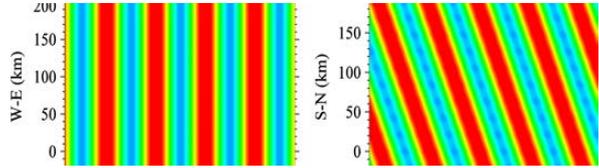
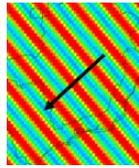
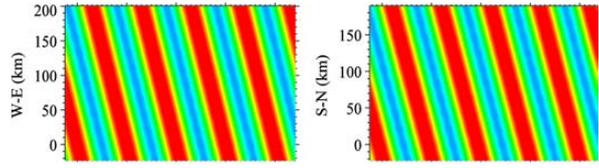
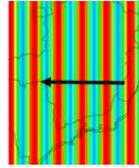
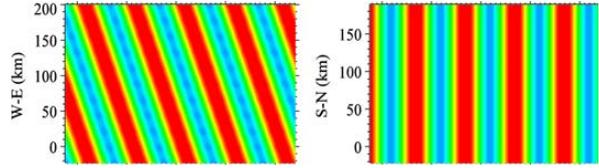
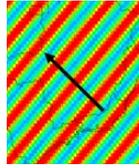
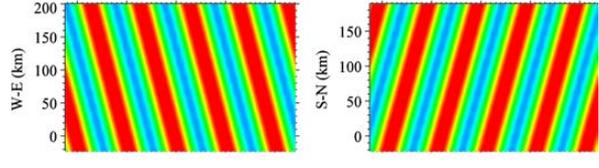
Resultado da análise espectral para as emissões de aeroluminescência do OH e do O₂, respectivamente. Os parâmetros de onda calculados para a emissão do OH foram: $\lambda_H = 234,6$ km, $\tau = 70$ min, $c_H = 55,9$ m/s e $\phi = 116,9^\circ$ (sudeste). Os resultados encontrados para a emissão do O₂ foram: $\lambda_H = 307$ km, $\tau = 69,7$ min, $c_H = 73,4$ m/s e $\phi = 105,6^\circ$ (sudeste).

Fonte: Produção do autor.

Observando os keogramas também é possível identificar a direção de propagação das ondas de gravidade, pela visualização da inclinação da fase da onda nas componentes do keograma. A Tabela 3.3 apresenta um resumo das possíveis direções de propagação das ondas de gravidade obtidas pela técnica de keogramas (FIGUEIREDO, 2017, p. 68).

Bilibio (2017) avaliou as incertezas nos cálculos dos parâmetros das ondas de gravidade de média escala, determinados utilizando a técnica de keogramas. Os resultados encontrados mostram que a incerteza nos cálculos do comprimento de onda horizontal, para as ondas de gravidade de média escala, foi menor do que 3%, enquanto que a incerteza para o período, foi menor do que 5%. As incertezas na direção de propagação das ondas de gravidade de média escala foram menores do que 10%.

Tabela 3.2 - Ilustração da definição das direções de propagação das ondas de gravidade.

Onda	Keogramas	Direção de Propagação
		Norte (0°)
		Nordeste (45°)
		Leste (90°)
		Sudoeste (225°)
		Sul (180°)
		Noroeste (315°)
		Oeste (270°)
		Sudeste (135°)

Definição das direções de propagação das ondas de gravidade obtidas a partir da visualização das fases das ondas presentes nos keogramas. Os eixos verticais dos keogramas representam as componentes zonal e meridional das imagens, enquanto que o eixo horizontal representa o tempo.

Fonte: Figueiredo (2017, p.68).

De forma análoga a [Figueiredo \(2017\)](#), no presente estudo também foi utilizado uma incerteza de 5% no período, como consequência do nível de significância² de 95% para o espectro de frequência.

Assim, para se observar a mesma onda de gravidade de média escala em diferentes camadas de emissões da aeroluminescência, deve-se garantir que a região de interesse selecionada nos keogramas seja a mesma. Desta forma, pode-se assumir que a onda de gravidade analisada é a mesma nas diferentes camadas. Neste estudo, diferenças menores do que 10% entre os parâmetros das ondas observados em mais de uma camada de emissão serão consideradas como sendo a mesma onda de gravidade.

3.3.1 Técnica de keograma na direção de propagação da onda de gravidade

Para estudar a propagação vertical das ondas de gravidade de média escala é importante construir um novo keograma na direção de propagação da onda. Desta forma, é possível analisar e comparar o comportamento da fase da onda de gravidade observada nas diferentes camadas de emissões da aeroluminescência.

A partir da região de interesse selecionada nos keogramas, como apresentado nas [Figura 3.6\(a\)](#) e [\(b\)](#), um novo keograma na direção de propagação da onda pode então ser construído. Conforme mencionado, deve-se assegurar que a região a ser analisada seja a mesma e que esta região contenha a informação da mesma onda de gravidade observada nas diferentes camadas de emissões da aeroluminescência. Desta maneira, a região de interesse, demarcadas pelos retângulos brancos nos keogramas, é utilizada para que as informações da onda de gravidade, tanto no espaço quanto no tempo, sejam recuperadas para cada uma das componentes do keograma.

As informações relacionadas ao espaço e ao tempo são necessárias para que a região (espaço) nas imagens mapeadas, em coordenadas geográficas, sejam novamente selecionadas para serem amostradas de forma a compor o keograma na direção da onda de gravidade. A informação do tempo também é importante para selecionar o intervalo de imagens em que a onda de gravidade foi analisada. A [Figura 3.8](#) apresenta a criação do keograma na direção de propagação da onda.

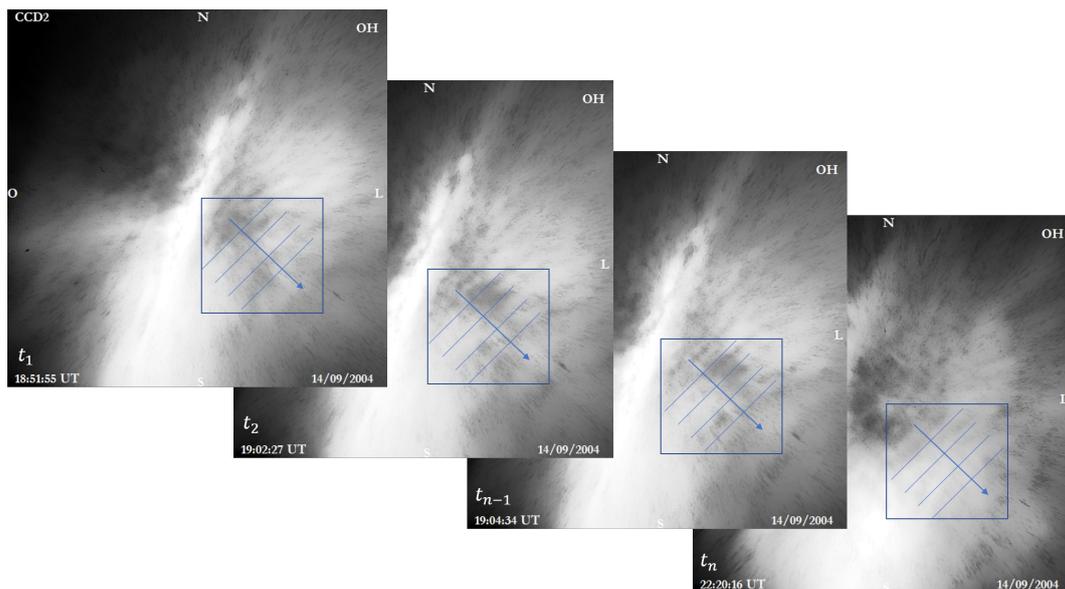
As informações da onda de gravidade, calculada utilizando o keograma original, são importantes para determinar a direção e o sentido de propagação da onda em

²Nível de significância: é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula, mesmo que ela seja verdadeira. A hipótese nula é de $1 - 0,95 = 0,05$, isto é, há uma probabilidade de 5% de escolher um pico na amplitude acima do espectro de fundo devido a um ruído.

cada imagem de aeroluminescência e assim criar o keograma na direção da onda. O keograma é construído apenas com as informações contidas dentro da região selecionada.

A direção de propagação da onda de gravidade de média escala é utilizada para criar o keograma na direção de propagação da onda. Assim, para determinar o ângulo desta direção, utiliza-se o parâmetro de inclinação (m) da equação da reta $(y - y_0) = m(x - x_0)$. Desta forma, o keograma na direção de propagação da onda de gravidade de média escala é construído a partir das imagens mapeadas em coordenadas geográficas. As amostras dessas imagens são obtidas dos pontos que compõem a reta. A Figura 3.8 ilustra o processo de criação do keograma na direção de propagação da onda.

Figura 3.8 - Ilustração da formação do keograma na direção de propagação da onda de gravidade.



Sequência de imagens utilizadas para construir o keograma na direção de propagação da onda de gravidade de média escala. As informações contidas no retângulo são essenciais para a construção do keograma. A seta representa a região onde as imagens serão amostradas para criar o keograma. Neste exemplo, foram utilizadas imagens obtidas para a noite de 14 de setembro de 2004, no observatório de São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção do autor.

Uma das dificuldades encontradas para construir o keograma na direção de propagação da onda é a diferente taxa de amostragem das imagens da aeroluminescência.

O intervalo de tempo entre as imagens de diferentes emissões da aeroluminescência apresenta valores distintos. Essa diferença de tempo está relacionada com os interesses científicos dos grupos de pesquisas, que muitas vezes dão prioridade a uma dada espécie fotoquímica a ser amostrada, em detrimento das demais emissões.

Um ponto importante a ser considerado é o número de filtros, ou a quantidade de camadas da aeroluminescência a serem amostradas ao longo da noite. Dessa forma, os intervalos de tempo entre as séries temporais para as diferentes emissões são distintas. Portanto, para realizar a análise da fase da onda de gravidade de média escala, é necessário realizar uma interpolação temporal para garantir que as séries de dados, das diferentes camadas de emissões, estejam no mesmo referencial de tempo.

Outro problema enfrentado durante a realização deste estudo diz respeito à qualidade das imagens obtidas ao longo dos anos. Sabe-se que as características espectrais dos filtros de interferência são afetadas pelo uso prolongado dos mesmos. Desta forma, a transmitância e a largura de banda dos filtros não obedecem mais suas características, isso pode significar que a quantidade de luz transmitida diminua ao longo do tempo, causando uma degradação na qualidade das imagens obtidas. Esta degradação das imagens prejudica a identificação e a análise das ondas, pois introduz uma componente de ruído maior que o desejável. Para contornar esses problemas, foram utilizadas apenas imagens de boa qualidade.

3.3.2 Determinação da propagação vertical das ondas de gravidade de média escala

A condição de propagação vertical de uma onda de gravidade de média escala é determinada utilizando as informações obtidas dos keogramas na direção de propagação da onda. Assim, é possível analisar o comportamento da fase da onda nas distintas camadas de emissões da aeroluminescência.

Para se obter a informação da fase das ondas de gravidade, em mais de uma camada de emissão, é utilizada uma expansão em séries de Fourier. Esta expansão em séries é aplicada em uma dimensão (tempo) para cada uma das amostras contidas no keograma da direção de propagação da onda de gravidade de média escala. A Equação 3.9 representa a expansão da série de Fourier discreta com seus coeficientes, A_m , B_m e R_m , respectivamente (JENKINS; WATTS, 1969).

$$f(x) = A_0 + 2 \sum_{m=1}^{n-1} (A_m \cos(2\pi m f r) + B_m \sin(2\pi m f r)). \quad (3.9)$$

Onde A_m e B_m são:

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{n-1} f(x) \cos\left(\frac{2\pi mr}{N}\right), \quad (3.10)$$

$$B_m = \frac{1}{N} \sum_{r=-n}^{L-1} f(x) \sin\left(\frac{2\pi mr}{N}\right). \quad (3.11)$$

Os coeficientes A_m e B_m da série de Fourier são as amplitudes correspondente a função cosseno e seno e seus harmônicos, respectivamente, $m = 0, 1, 2, \dots$, são inteiros, $r = -n, 0, 1, 2, \dots, n - 1$ e $f = 1/N$ é a frequência fundamental de amostragem. R_m é a amplitude média da soma de todas as funções cossenos e senos da série de Fourier, definida por:

$$R_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2}. \quad (3.12)$$

Desta forma, a fase pode ser obtida pela seguinte relação:

$$\Phi_m = \tan^{-1}\left(\frac{-B_m}{A_m}\right). \quad (3.13)$$

Portanto, com a aplicação da expansão em séries de Fourier no keograma na direção de propagação da onda, pode-se determinar os períodos para cada onda analisada, nas diferentes emissões de aeroluminescência. Da mesma forma, pode-se estimar a fase para cada um destes períodos.

O filtro de Lanczos (DUCHON, 1979) foi utilizado para ressaltar as oscilações observadas nos keogramas na direção de propagação da onda de gravidade. Matematicamente, o filtro do tipo passa banda de Lanczos é definido pela seguinte expressão:

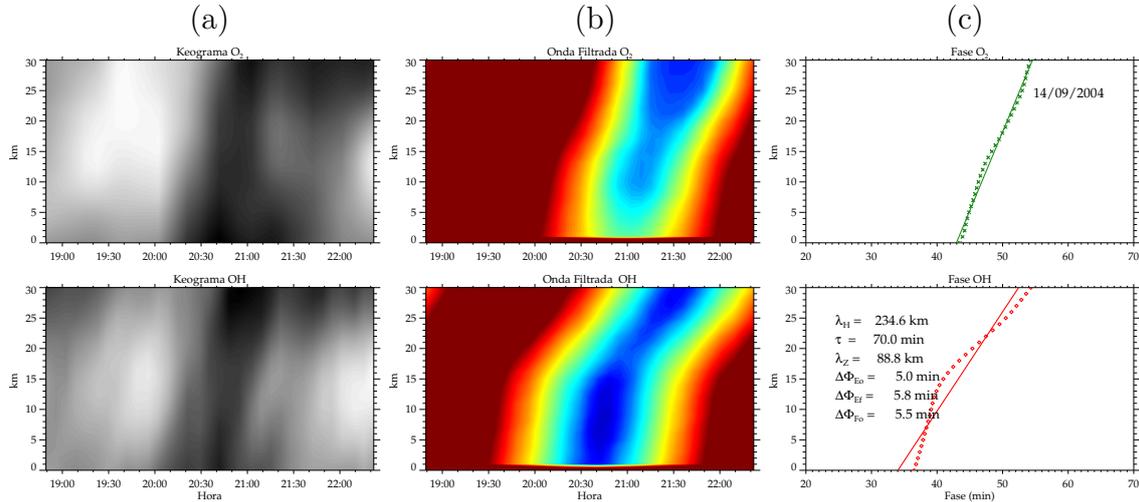
$$w_t = \left(\frac{\text{sen}(2\pi f_{c_2} t)}{\pi t} - \frac{\text{sen}(2\pi f_{c_1} t)}{\pi t} \right) \frac{\text{sen}(\pi t/n)}{\pi t/n}, \quad (3.14)$$

onde t representa o tempo, n é o parâmetro que determina a largura do filtro e $f_{c_{1,2}}$ são as frequências de corte.

A Figura 3.9(a) apresenta os keogramas interpolados, em função do tempo, na direção de propagação da onda para as emissões do O₂ e OH para a noite de 14/09/2004.

Por sua vez, a Figura 3.9(b) apresenta os keogramas na direção de propagação da onda filtrados. O filtro passa banda de Lanczos, centrado no período de oscilação da onda de $\tau = 70 \pm 3,5$ min, foi empregado para destacar as regiões de cristas (vermelho) e vales (azul) da onda em questão. Por fim, a Figura 3.9(c) apresenta a fase da onda calculada por meio da expansão em séries de Fourier para as emissões do O_2 e do OH. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase. A determinação do comprimento de onda vertical é obtida pela diferença entre a altura média dos picos das camadas de emissão do O_2 e do OH e a diferença de fase da onda (NYASSOR et al., 2018), que para este evento resultou em $\lambda_z = 88,8$ km.

Figura 3.9 - Resultados da aplicação da técnica do keograma na direção de propagação da onda de gravidade de média escala.



Em (a), coluna dos keogramas interpolados na direção de propagação da onda de gravidade de média escala, para as emissões do O_2 e do OH, respectivamente. Na coluna (b) estão os mesmos keogramas na direção de propagação da onda, porém, com a aplicação de um filtro passa banda. Em (c), são apresentadas as fases da onda de gravidade de média escala, obtidos via expansão em séries de Fourier, observadas nas emissões do O_2 e do OH, bem como os valores da diferença de fase da onda, entre as duas camadas de emissão. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

A diferença de fase entre as duas camadas de emissões foi calculada utilizando duas técnicas distintas. A primeira delas foi por meio da expansão em séries de Fourier ($\Delta\Phi_F$), descrita pela Equação 3.13. A segunda técnica empregada foi a diferença de fase utilizando o espectro cruzado ($\Delta\Phi_E$), conforme descrito pela Equação 3.3.

Deste modo, foram estimadas as diferenças de fase da onda utilizando os keogramas na direção de propagação da onda, por meio da técnica de espectro cruzado ($\Delta\Phi_{Eo}$) e pela expansão em séries de Fourier ($\Delta\Phi_{Fo}$). A diferença de fase da onda utilizando o keograma na direção de propagação da onda filtrado também foi estimado pela técnica do espectro cruzado ($\Delta\Phi_{Ef}$).

A [Tabela 3.3](#) apresenta uma breve descrição das técnicas utilizadas para determinar a diferença de fase entre duas camadas de emissões, bem como os keogramas utilizados, os símbolos empregados e os resultados encontrados para a diferença de fase. Observa-se que os valores da diferença de fase variam entre 5,0 e 5,8 min conforme a técnica adotada. No presente estudo, o valor da diferença de fase obtido por meio da expansão em séries de Fourier ($\Delta\Phi_F$) será utilizado para determinar o comprimento de onda vertical das ondas de gravidade. A diferença de fase determinada pela técnica do espectro cruzado ($\Delta\Phi_E$) foi utilizada para comparação e validação dos resultados.

Tabela 3.3 - Descrição das técnicas utilizadas para determinar a diferença de fase entre as camadas de emissão do O₂ e do OH.

Técnica utilizada	Tipo de keograma	Símbolo	Diferença de fase
Espectro cruzados	Direção da onda original	$\Delta\Phi_{Eo}$	5,0 min
Espectro cruzado	Direção da onda filtrado	$\Delta\Phi_{Ef}$	5,8 min
Série de Fourier	Direção da onda original	$\Delta\Phi_{Fo}$	5,5 min

Fonte: Produção do autor.

A comparação dos resultados dos parâmetros da onda de gravidade de média escala, calculados a partir das camadas de emissão do O₂ e do OH, são apresentados na [Tabela 3.4](#). Os parâmetros da onda de gravidade foram determinados por meio das técnicas de keograma e keograma na direção de propagação da onda, conforme apresentado na [Figura 3.7](#).

Os parâmetros característicos da onda de gravidade de média escala foram obtidos de duas formas distintas neste trabalho, a saber: 1) quando a onda de gravidade foi observada nas camadas do OH e O₂ (ou OH e OI 557,7 nm), o comprimento de onda horizontal, período, velocidade de fase e direção de propagação foram obtidos a partir dos resultados da análise da camada do OH, uma vez que esta emissão apresenta a maior taxa de amostragem de imagens, e por consequência, os resultados dos parâmetros de onda apresentam uma maior significância estatística; 2) quando

a onda de gravidade foi observada nas camadas do O₂ e OI 557,7 nm, os parâmetros da onda foram obtidos a partir da média aritmética do comprimento de onda obtido entre essas camadas, assim como a velocidade de fase da onda e a direção de propagação. Neste caso, o período da onda foi obtido diretamente do keograma na direção de propagação da onda.

Tabela 3.4 - Sumário dos resultados da aplicação da técnica de análise de keogramas para o evento de onda observado na noite de 14/09/2004.

Parâmetros da onda	λ_H (km)	τ (min)	c_H (m/s)	ϕ (°)	λ_Z (km)
Camada do OH	234,6	70,0	55,9	116,9	-
Camada do O ₂	307,0	69,8	73,4	105,6	-
Resultado final	234,6	70,0	55,9	116,9	88,8

Fonte: Produção do autor.

Na [Figura 3.9\(c\)](#), pode-se observar as principais características da onda de gravidade como comprimento de onda horizontal, período e comprimento de onda vertical, além dos valores da diferença de fase. Além disso, nota-se a partir da inclinação da fase da onda nas camadas do O₂ e do OH que essa onda apresenta uma propagação de fase ascendente, o que indica que a energia da onda propaga-se de forma descendente.

Portanto, a observação simultânea de uma mesma onda de gravidade em diferentes camadas de emissão pode indicar se a onda apresenta uma propagação de fase ascendente ou descendente. Como consequência, se a onda apresentar uma propagação de fase descendente (ascendente) isto implica dizer que a energia da onda está se propagando de modo ascendente (descendente) na região MLT.

3.4 Modelo *ray tracing*

O modelo *ray tracing* utilizado nesse trabalho é baseado no formalismo matemático descrito por [Lighthill \(1978\)](#). Assim sendo, quando um pacote de onda se propaga em uma atmosfera sujeita a um vento $\vec{V} = (U, V, W)$, a sua evolução temporal e espacial é descrita por,

$$\frac{dx_i}{dt} = V_i + \frac{\partial \omega_{Ir}}{\partial k_i} = V_i + c_{g_i}, \quad (3.15)$$

$$\frac{dk_i}{dt} = -k_j \frac{\partial V_j}{\partial x_i} - \frac{\partial \omega_{Ir}}{\partial x_i}, \quad (3.16)$$

em que $i, j = 1, 2, 3$ indicam as componentes das quantidades $\vec{x}, \vec{k}, \vec{V}$ e \vec{c}_g . Os índices repetidos significam uma soma. A velocidade de grupo da onda é representado por \vec{c}_g . ω_{Ir} é a parte real da frequência intrínseca da onda, que é dada pela [Equação 3.17](#) ([VADAS; FRITTS, 2005](#)), isto é:

$$\omega_{Ir}^2 + \frac{\nu^2}{4} \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{P_r} \right)^2 \frac{1 + \delta_+ + \frac{\delta^2}{P_r}}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^2} + \frac{\nu_+ m \omega_{Ir}}{H} + \frac{\nu^2 m^2}{P_r H} = \frac{k_H^2 N^2}{\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}}. \quad (3.17)$$

Utilizando essa relação de dispersão, [Equação 3.17](#), pode-se obter as componentes da velocidade de grupo (c_{gx}, c_{gy}, c_{gz}) e as derivadas da frequência intrínseca ($\frac{\partial \omega_{Ir}}{\partial x_i}$) com relação a posição da onda, dadas pelas seguintes equações:

$$c_{gx} = \frac{k}{\omega_{Ir} B} \left[\frac{N^2 (m^2 + \frac{1}{4H^2})}{(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2})^2} - \frac{\nu^2}{2} \left(1 - \frac{1}{P_r} \right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2} \right) \frac{\left(1 + \delta_+ + \frac{\delta^2}{P_r} \right)}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^2} \right], \quad (3.18)$$

$$c_{yx} = \frac{l}{\omega_{Ir} B} \left[\frac{N^2 (m^2 + \frac{1}{4H^2})}{(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2})^2} - \frac{\nu^2}{2} \left(1 - \frac{1}{P_r} \right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2} \right) \frac{\left(1 + \delta_+ + \frac{\delta^2}{P_r} \right)}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^2} \right], \quad (3.19)$$

$$c_{gz} = -\frac{m}{\omega_{Ir} B} \frac{K_H^2 N^2}{\left(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2} \right)^2} - \frac{m}{\omega_{Ir} B} \frac{\nu^2}{2} \left(1 - \frac{1}{P_r} \right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2} \right) \frac{\left(1 + \delta_+ + \frac{\delta^2}{P_r} \right)}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^2} +$$

$$\frac{m}{\omega_{Ir} B} \frac{\nu^4 \left(1 - \frac{1}{P_r} \right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2} \right)^2}{16H^2 \omega_{Ir}^2 \left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2} \right)^3} - \frac{m}{\omega_{Ir} B} \frac{\nu^2}{P_r H^2} - \frac{1}{\omega_{Ir} B} \frac{\nu_+ \omega_{Ir}}{2H} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \omega_{Ir}}{\partial x_i} = & \frac{1}{\omega_{Ir} B} \frac{K_H^2 N^2}{\left(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}\right)^2} \left(\frac{\partial N}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{\omega_{Ir} B} \frac{K_H^2 N^2}{4\left(\vec{k}^2 + \frac{1}{4H^2}\right)^2} \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial H}{\partial x_i}\right) - \\
& - \frac{1}{\omega_{Ir} B} \frac{\nu}{8} \left(1 - \frac{1}{Pr}\right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2}\right) \frac{\left(1 + \delta_+ + \frac{\delta^2}{Pr}\right)}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2}\right)^2} \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial H}{\partial x_i}\right) - \\
& - \frac{1}{\omega_{Ir} B} \frac{\delta^2 \nu^2 H^2 \left(1 - \frac{1}{Pr}\right)^4 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2}\right)^2}{16 \left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2}\right)^3} \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial H}{\partial x_i}\right) + \\
& + \frac{1}{\omega_{Ir} B} \left(\frac{\nu_+ m \omega_{Ir} H}{2} + \frac{\nu^2 m^2}{Pr}\right) \left(\frac{1}{H^3} \frac{\partial H}{\partial x_i}\right) - \\
& - \frac{\nu \left(1 - \frac{1}{Pr}\right)^2 \left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2}\right)^2}{16 \omega_{Ir} B \left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2}\right)^3} \left[4 + 6\delta_+ + \left(1 + \frac{10}{Pr} + \frac{1}{Pr^2}\right) \delta^2 + \frac{2\left(1 + \frac{1}{Pr}\right)}{Pr} \delta^3\right] \left(\frac{\partial \nu}{\partial x_i}\right) - \\
& - \frac{1}{\omega_{Ir} B} \left[\frac{m \omega_{Ir} \left(1 + \frac{1}{Pr}\right)}{2H} + \frac{\nu m^2}{Pr H^2}\right] \left(\frac{\partial \nu}{\partial x_i}\right).
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Em que,

$$B = \left[1 + \frac{\delta_+}{2} + \frac{\delta^2 \nu^2}{16 \omega_{Ir}^2} \left(1 - \frac{1}{Pr}\right)^4 \frac{\left(\vec{k}^2 - \frac{1}{4H^2}\right)^2}{\left(1 + \frac{\delta_{\pm}}{2}\right)^3}\right]. \tag{3.22}$$

As soluções dessas equações descrevem a evolução temporal e espacial de uma onda de gravidade. O método adotado para solucionar o conjunto das seis equações diferenciais ordinárias [Equação 3.15](#) e [Equação 3.16](#) foi o Runge-Kutta de quarta ordem com dupla precisão ([PAULINO, 2012](#)). Este método numérico também está disponível na biblioteca do *Interactive Data Language* (IDL) que foi a linguagem computacional utilizada para implementar o modelo *ray tracing*.

A posição inicial e a altitude da onda são assumidas como a localização (longitude/latitude) da primeira crista/cava visível na altitude de 87 km quando a onda foi observada e as características da onda são usadas como parâmetros de entrada para o modelo. Na determinação da próxima posição (longitude, latitude, altitude) e tempo, a técnica utilizada para resolver as seis equações diferenciais ordinárias foi a quarta ordem Runge-Kutta ([PRESS, 2007](#)).

A posição da onda e o vetor de onda são as variáveis dependentes. O tempo inicial é dado a partir da observação da onda de gravidade nas camadas da aeroluminescência. A posição da onda de gravidade é ajustada para as coordenadas geográficas do observatório e a altura adotada foi de 87 km, 94 km ou 96 km, altura média da camada de emissão do OH, O₂ e OI 557,7 nm. O vetor de onda é obtido pela composição do comprimento de onda horizontal da onda de gravidade observada nas componentes zonal e meridional. Já a componente vertical do número de onda é obtida utilizando a seguinte relação de dispersão (GOSSARD; HOOKE, 1975):

$$m^2 = \frac{N^2}{(c - u_0)^2} - k^2 - \frac{1}{4H^2}. \quad (3.23)$$

O fluxo de *momentum* inicial para as ondas de gravidade depende da amplitude relativa da onda em relação a emissão média registrada nas imagens. A modelagem do fluxo de momentum na emissão da aeroluminescência é baseado no trabalho de Vadas et al. (2009) e pode ser visto em detalhe em Paulino (2012).

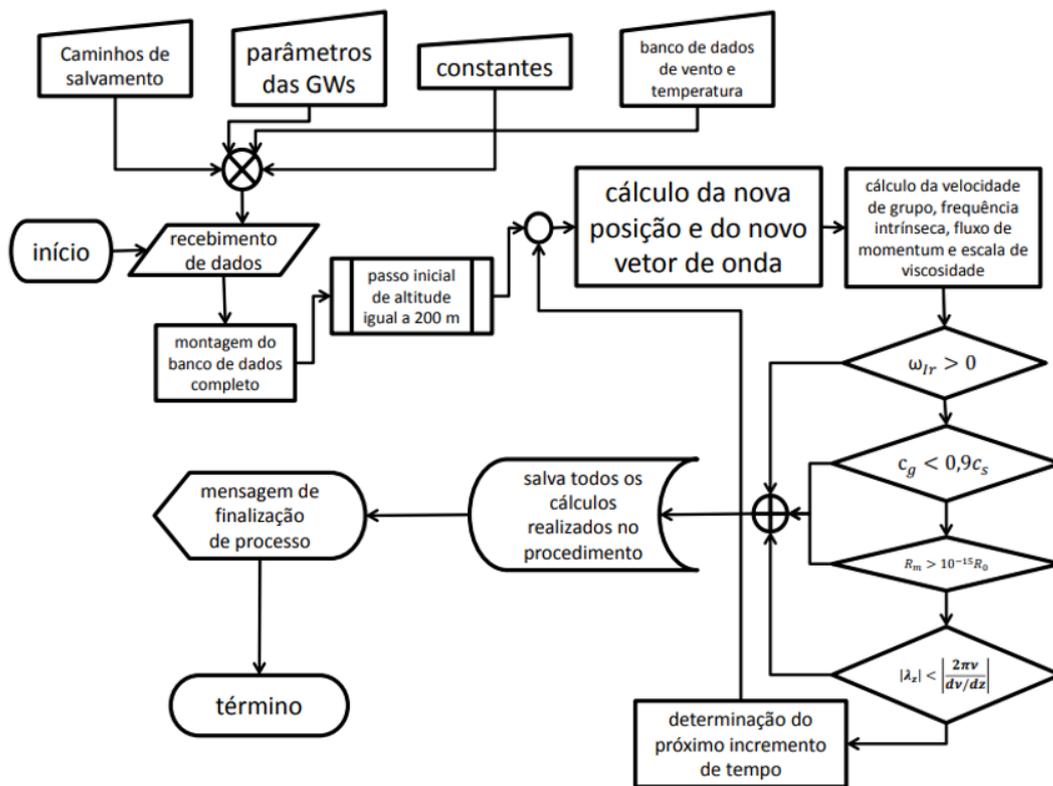
Um tamanho de passo inicial de 200 m foi escolhido, que pode ser para cima ou para baixo dependendo da propagação de fase da onda. Se a trajetória for direta, o incremento temporal é positivo, se for uma retrotrajetória, o incremento temporal é negativo. Os passos subsequentes foram estimados usando a relação $z = c_{gz}t$, com as condições de contorno descritas por Paulino (2012). Para realizar a iteração da próxima etapa, as seguintes condições de parada foram definidas:

- I. velocidade de grupo deve ser $c_g \leq 0,9C_s$;
- II. frequência intrínseca da onda deve satisfazer a condição de $\omega_{Ir} > 0$;
- III. fluxo de *momentum* deve satisfazer a seguinte condição: $R_m > 10^{-15}R_0$, onde R_m é o fluxo de *momentum* a cada altitude e R_0 é o fluxo de *momentum* na altitude de referência. O fator 10^{-15} foi escolhido de forma arbitrária;
- IV. comprimento de onda vertical deve satisfazer a condição: $|\lambda_z| = \frac{2\pi}{\frac{dv}{dz}}$.

Para determinar o próximo incremento em função do tempo no modelo *ray tracing* as ondas de gravidade devem satisfazer uma das condições listadas acima. Se alguma das condições for violada, o procedimento será interrompido e todos os cálculos serão salvos. Mais detalhes sobre as condições de parada são discutidos em Vadas e Fritts (2009) e Paulino (2012).

A Figura 3.10 apresenta o fluxograma do modelo *ray tracing*. Os parâmetros das ondas de gravidade ($\lambda_H, \lambda_z, \tau, c_H, t$) os perfis de vento e temperatura são as variáveis de entrada iniciais usadas para iniciar o modelo. Outras variáveis independentes e suas derivadas verticais são calculadas até que uma das condições de contorno seja violada e o processo é interrompido. Mais detalhes sobre o modelo *ray tracing* pode ser encontrado em Paulino (2012).

Figura 3.10 - Fluxograma do modelo *ray tracing*.



Fluxograma do modelo *ray tracing*. A descrição serve tanto para a condição de cálculo da trajetória direta, quanto reversa.

Fonte: Adaptada de Paulino (2012).

3.4.1 Modelos de vento e temperatura

Para se obter um resultado mais realístico do modelo *ray tracing* é fundamental conhecer alguns parâmetros atmosféricos tais como a temperatura, a frequência de Brunt-Väisälä, o vento neutro. Entretanto, os dados observacionais correspondentes

ao vento básico e a temperatura próxima ao local de observação não estão disponíveis ou não fornecem todas as informações necessárias. Além disso, caso estes parâmetros fossem observados, eles apenas representam as condições atmosféricas em uma região adjacente ao observatório (WRASSE, 2004). Este estudo requer informações dos parâmetros atmosféricos em uma região com ± 20 graus de latitude e longitude em torno do observatório e, portanto, um modelo climatológico é empregado para conhecer estas condições atmosféricas.

Os modelos atmosféricos utilizados para compor os campos de vento e temperatura foram o modelo *Horizontal Wind Model* (HWM-14) (DROB et al., 2015) e *Naval Research laboratory Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar 2000 NRLMSISE-00* (PICONE et al., 2002b), respectivamente.

O HWM-14 é um modelo empírico do vento neutro horizontal na termosfera superior, baseado em dados de vento obtidos pelos satélites *Atmosphere Explorer-E* (AE-E) e o *Dynamics Explorer-2* (DE-2). As componentes do vento zonal e meridional são descritas por um conjunto de harmônicos esféricos vetoriais. A primeira versão do modelo foi lançada em 1987 (HWM-87) e era destinada a ventos acima 220 km. O HWM evoluiu com o passar dos anos e mais atualizações foram incorporadas, incluindo observações terrestres, como radar de dispersão incoerente e interferômetros ópticos *Fabry-Perot* nos anos de 1990. Além disso, também foi incluída a influência das atividades solar e magnética. Na versão de 1993 (HWM-93), foram incluídos ventos observados de meteoros e radares de média frequência (MF) (HEDIN et al., 1996) e como resultado, a faixa de altitude do modelo foi estendida para a superfície da Terra. O HWM-93 descreve a transição da predominância de variações diurnas na termosfera superior para variações semidiurnas na termosfera inferior. O modelo também retrata as principais variações temporais e das componentes das marés em toda a atmosfera.

No modelo HWM-14, baseado no HWM-07, foram incorporados mais dados observacionais produzindo assim um perfil de vento mais realista. Os detalhes sobre o HWM, desde a versão de 1987 até a versão de 2014 podem ser encontrados em Drob et al. (2008) e Drob et al. (2015). As entradas do modelo incluem dia do ano, hora local, latitude, longitude, altitude, fluxo solar (F10.7) e atividade geomagnética (Ap). A saída do modelo é o vento horizontal em duas componentes: zonal e meridional (NYASSOR, 2021).

O NRLMSISE-00 é um modelo empírico da atmosfera adaptado pelo *Naval Research Laboratory* (NRL) a partir do modelo *Mass Spectrometer and Incoherent Scat-*

ter Radar (MSIS) (PICONE et al., 2002a). A letra E na sigla indica que o modelo estende-se do solo ao espaço. Este modelo calcula a composição, temperatura e densidade de massa total da atmosfera neutra. O modelo inclui os principais agentes da atmosfera superior, que são o fluxo solar no ultravioleta extremo (EUV) e o aquecimento da atmosfera devido aos efeitos das atividades magnéticas. O fluxo solar em 10,7 cm (F10.7) é usado como padrão para o EUV, enquanto o índice geomagnético diário (Ap) indica a atividade magnética. Este modelo foi desenvolvido com base nas versões anteriores dos modelos MSIS-86 e MSISE-90. O conjunto de dados deste modelo inclui medições de instrumentos terrestres, satélites e foguetes (PICONE et al., 2002a).

As entradas do modelo são: ano, dia, hora, altitude, latitude geodésica, longitude geodésica, tempo solar local aparente, média de 81 dias de F10.7, fluxo solar diário F10.7 do dia anterior e índice magnético diário. As saídas do modelo são perfis verticais de densidade numérica dos constituintes He, O, O₂, N, N₂, Ar e H. Além disso, densidade de massa total, temperatura exosférica e temperatura neutra e altura da escala de densidade são perfis de saída (NYASSOR, 2021). Neste trabalho, apenas temperatura neutra, densidade de massa total e altura da escala foram utilizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo apresenta os principais resultados obtidos sobre as ondas de gravidade de média escala, nos sítios de São João do Cariri entre 2000 e 2011, como também em Cachoeira Paulista entre 1998 e 2013. Inicialmente, é apresentada uma caracterização geral das ondas a partir dos parâmetros observados em diferentes camadas da aeroluminescência. Em seguida, são descritas as características físicas das ondas de gravidade com propagação de fase ascendentes e descendentes. As discussões das características das ondas de gravidade de média escala são apresentadas para cada uma das seções de resultados.

Os resultados sobre a propagação vertical das ondas que foram obtidos pela técnica de *ray tracing* também são apresentados, tanto para as ondas com propagação de fase ascendente quanto para as descendentes. Finalmente são apresentados e discutidos dois estudos de casos para as ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente, e um estudo de caso para uma onda de gravidade com propagação de fase descendente.

4.1 Características gerais das ondas de gravidade de média escala

Observações quase simultâneas, de diferentes camadas da aeroluminescência noturna, tornou possível identificar e caracterizar 37 eventos de ondas de gravidade de média escala obtidos no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba, em São João do Cariri (PB), e 01 evento de onda de gravidade de média escala obtido no Observatório Espacial de Cachoeira Paulista (SP).

A caracterização das ondas de gravidade de média escala foi possível devido às observações de longo prazo da aeroluminescência noturna nos dois sítios de observação. Mais informações sobre as condições de observação, como por exemplo o período de observação, horas de céu claro (sem nuvens) podem ser encontradas nos trabalhos de [Essien \(2015\)](#) e [Bilibio \(2017\)](#), para os observatórios de São João do Cariri e Cachoeira Paulista, respectivamente.

É importante ressaltar que apenas um caso de onda de gravidade de média escala foi observado no observatório de Cachoeira Paulista. Problemas técnicos como a degradação dos filtros de interferência e posteriormente da câmera CCD do imageador *all-sky* impossibilitaram a detecção de mais eventos de ondas de gravidade em múltiplas camadas da aeroluminescência. As imagens obtidas se mostraram muito ruidosas, desta forma, impossibilitaram a identificação de estruturas ondulatórias ao

longo das noites de observação. Bilibio (2017) e Antunes (2018) apresentaram uma análise sobre as condições dos equipamentos e da qualidade dos filtros de interferências utilizados nas medidas da aeroluminescência.

Os principais parâmetros observados das ondas de gravidade de média escala foram: o comprimento de onda horizontal (λ_H), a velocidade de fase horizontal (c_H), o período (τ) e a direção de propagação (ϕ). A Tabela 4.1 apresenta todos os resultados que foram obtidos entre setembro de 2000 e dezembro de 2010 para o sítio de São João do Cariri, e entre dezembro de 1998 e março de 2010 para o Observatório de Cachoeira Paulista. Para facilitar as comparações entre as camadas de emissão da aeroluminescência nas tabelas, desse ponto em diante a camada do OI 557,7 nm será representado apenas por OI.

A Figura 4.1 apresenta os histogramas com a distribuição dos parâmetros observados de todos os eventos de ondas de gravidade de média escala estudados. O valor médio e o desvio padrão de cada um dos parâmetros foram obtidos a partir da distribuição gaussiana apresentada em cada um dos painéis. A Figura 4.1(a) apresenta a distribuição dos comprimentos de onda horizontais (λ_H) das ondas, que variam principalmente entre 150 e 300 km, com média de 257 ± 94 km.

A velocidade de fase horizontal (c_H), mostrada na Figura 4.1(b), se concentra entre 40 e 70 m/s, com valor médio de 66 ± 25 m/s. Nota-se também que foram observadas ondas de gravidade rápidas, com velocidade de fase horizontal superior a 100 m/s. Os períodos observados (τ) são mostrados na Figura 4.1(c), e se distribuíram entre 30 e 70 min, com média de 69 ± 28 min. Observa-se algumas ondas com períodos superiores a 100 min. Por fim, na Figura 4.1(d) são apresentadas as direções de propagação horizontais das ondas (ϕ), que mostram uma direção preferencial de propagação para nordeste, leste e sudeste.

Além das características horizontais das ondas de gravidade de média escala, também foi possível estimar a fase da onda em cada camada de emissão. Desta forma, foi possível classificar as ondas em termos da propagação de fase em ascendentes e descendentes. Assim sendo, nas duas próximas subseções serão apresentados os parâmetros das ondas de gravidade de média escala em função da classificação de sua propagação de fase.

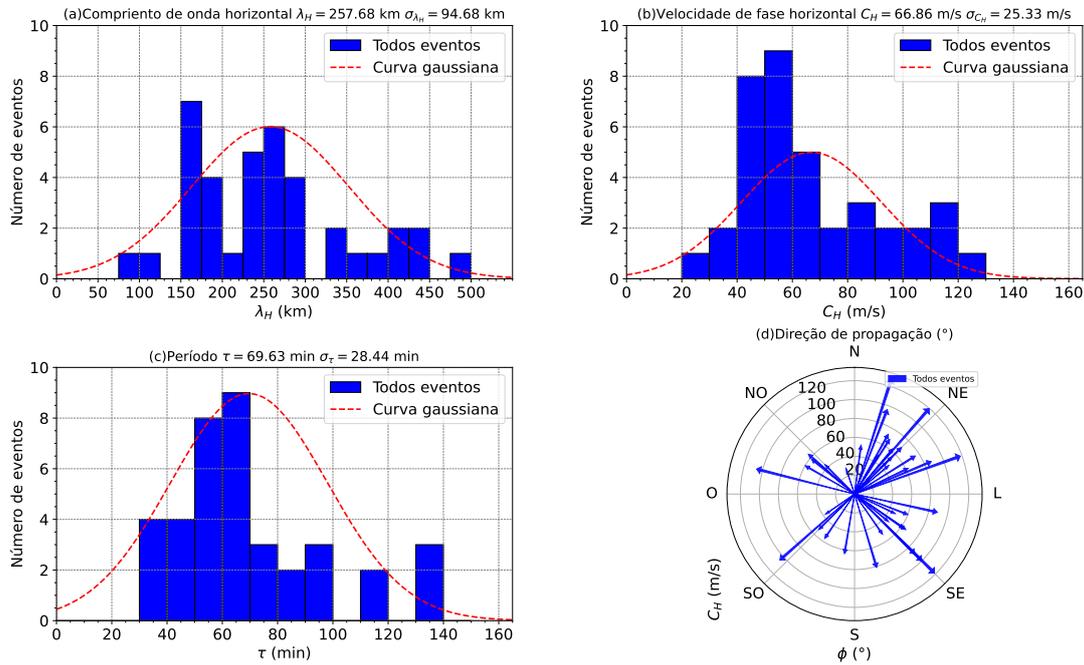
Tabela 4.1 - Eventos de ondas de gravidade de média escala observadas em duas ou mais camadas de emissão da aeroluminescência noturna.

Evento	Região	Sítio	Data	Emissões	λ_H	c_H	τ	ϕ
1	Sudeste	CP	21/10/1998	OH e OI	278,4	47,5	97,7	145,4
2	Nordeste	CA	01/10/2000	OH e O ₂	325,0	43,8	139,2	31,0
3	Nordeste	CA	18/11/2000	OH e O ₂	429,2	102,1	78,7	284,4
4	Nordeste	CA	23/01/2001	O ₂ e OI	225,8	68,3	55,1	29,3
5	Nordeste	CA	22/04/2001	OH e O ₂	124,5	47,9	42,1	7,5
6	Nordeste	CA	18/10/2001	OH e O ₂	279,1	65,4	70,8	45,0
7	Nordeste	CA	07/02/2002	OH e O ₂	383,7	42,8	134,1	50,0
8	Nordeste	CA	05/02/2003	OH e O ₂	172,1	58,3	48,5	40,0
9	Nordeste	CA	28/04/2003	OH e O ₂	270,8	76,9	59,5	163,4
10	Nordeste	CA	22/07/2003	OH e OI	96,6	24,3	64,8	341,7
11	Nordeste	CA	21/10/2003	OH e O ₂	429,3	114,0	62,8	70,1
12	Nordeste	CA	22/10/2003	OH e O ₂	191,5	58,8	60,5	125,0
13	Nordeste	CA	26/10/2003	OH e O ₂	255,9	61,5	65,4	125,0
14	Nordeste	CA	13/03/2004	OH e O ₂	164,6	51,5	53,1	45,0
15	Nordeste	CA	20/03/2004	OH e O ₂	234,6	55,6	69,2	300,0
16	Nordeste	CA	06/09/2004	O ₂ e OI	177,5	95,7	30,9	135,0
17	Nordeste	CA	14/09/2004	OH e O ₂	234,6	55,9	70,0	116,9
18	Nordeste	CA	19/09/2004	OH e O ₂	295,9	84,9	57,5	102,5
19	Nordeste	CA	08/03/2005	OH e OI	185,2	49,0	63,2	225,0
20	Nordeste	CA	03/06/2005	OH e OI	280,7	123,5	37,5	17,6
21	Nordeste	CA	28/10/2005	OH e OI	414,0	115,5	62,5	40,9
22	Nordeste	CA	28/05/2006	OH e OI	221,1	43,2	61,3	116,0
23	Nordeste	CA	26/08/2006	OH e OI	166,4	64,4	42,6	32,5
24	Nordeste	CA	24/11/2006	OH e OI	155,5	43,6	59,4	45,0
25	Nordeste	CA	09/11/2007	OH e OI	333,3	58,3	80,5	64,2
26	Nordeste	CA	08/01/2008	OH e OI	357,9	114,4	50,8	134,9
27	Nordeste	CA	02/02/2008	OH e OI	488,2	71,2	114,5	57,7
28	Nordeste	CA	08/06/2008	O ₂ e OI	419,3	59,8	116,8	189,5
29	Nordeste	CA	24/11/2008	OH e O ₂	272,8	42,0	95,4	129,3
30	Nordeste	CA	24/02/2009	O ₂ e OI	254,5	33,0	134,2	235,0
31	Nordeste	CA	20/03/2009	OH e O ₂	169,3	91,6	36,0	21,0
32	Nordeste	CA	22/03/2009	O ₂ e OI	251,7	83,4	50,3	66,9
33	Nordeste	CA	30/03/2009	OH e O ₅	174,7	85,3	32,3	57,7
34	Nordeste	CA	18/06/2009	OH e O ₂	183,2	60,1	60,9	311,0
35	Nordeste	CA	18/06/2009	OH e OI	231,3	39,7	97,8	315,0
36	Nordeste	CA	21/06/2009	OH e O ₂	155,7	54,2	50,5	309,2
37	Nordeste	CA	16/07/2009	O ₂ e OI	241,7	52,3	76,9	213,7
38	Nordeste	CA	16/08/2009	O ₂ e OI	266,1	100,9	44,0	228,3

A tabela apresenta o número de eventos de ondas observados, a região na qual foi possível observar a onda, o sítio de observação, sendo a terminologia CA para São João do Cariri (PB) e CP para Cachoeira Paulista (SP). Além disso, são apresentadas as datas em que ocorreram as observações, as camadas de emissão na qual a onda foi observada, bem como os parâmetros físicos das ondas de gravidade de média escala (λ_H , c_H , τ e ϕ).

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.1 - Distribuição dos parâmetros de todos os eventos de ondas de gravidade de média escala.



Parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala, observadas nas emissões do OH, O₂ e OI 557,7 nm. Os painéis apresentam o comprimento de onda horizontal (λ_H), a velocidade de fase (c_H), o período (τ) e direção de propagação (ϕ) das ondas.

Fonte: Produção do autor.

4.1.1 Características das ondas de gravidade com propagação de fase ascendente

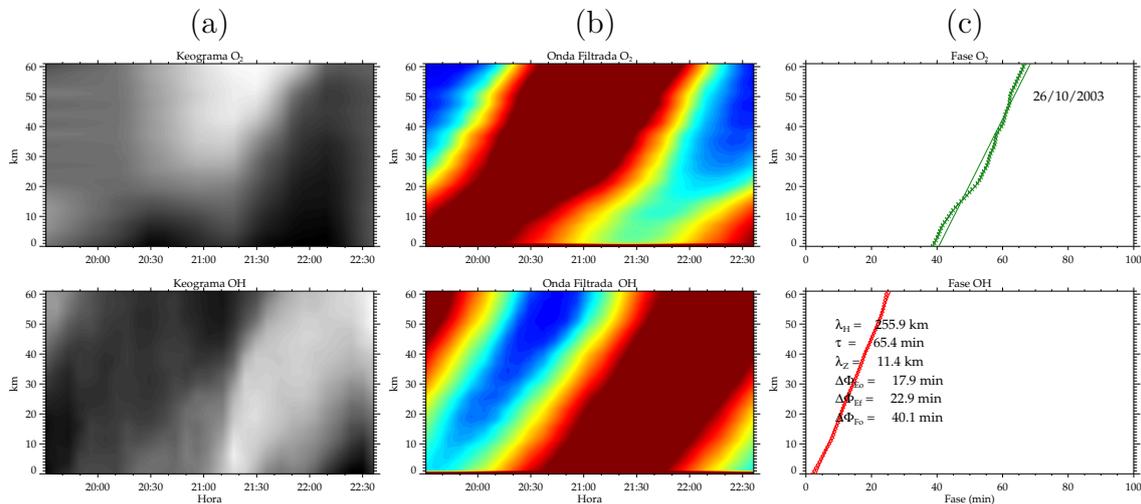
A caracterização das ondas de gravidade de média escala em função da propagação de fase foi realizada com a aplicação da técnica de construção de keograma na direção de propagação da onda. A partir dessa técnica, foi possível determinar a fase da onda em cada uma das camadas de emissão, e assim definir a sua fase, e por consequência a sua propagação vertical.

Embora já existam na literatura estudos sobre ondas de gravidade de média escala observadas na região sudeste (BILIBIO, 2017) e na região nordeste (ESSIEN, 2015) do Brasil, esta é a primeira vez que se reporta as características da propagação vertical das ondas de gravidade de média escala a partir de observações de múltiplas camadas da aeroluminescência noturna na região da MLT.

A Figura 4.2(a) apresenta o keograma na direção de propagação da onda de gravi-

dade de média escala observada na noite de 26 de outubro de 2003, nas emissões do OH e O₂, em São João do Cariri (PB). Na Figura 4.2(b), é possível observar o keograma na direção de propagação da onda com a aplicação de um filtro do tipo passa banda, no qual é possível observar com mais clareza as cristas da onda. A fase da onda é apresentada na Figura 4.2(c), para ambas as emissões. Na Figura 4.2(c), é possível observar a diferença de fase causada pela propagação da onda através das duas camadas de emissão. Observa-se que a diferença de fase ($\Delta\Phi_{F_0}$) é de ~ 40 min, onde a crista da onda fica visível primeiramente na camada de emissão do OH e depois na camada do O₂.

Figura 4.2 - Exemplo de uma onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, observada nas camadas de emissão do OH e O₂.



Onda de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente. A onda foi observada no sítio de São João do Cariri (PB), na noite de 26 de outubro de 2003, nas camadas de emissão do O₂ e OH. Observa-se uma diferença de fase ($\Delta\Phi_{F_0}$) entre as camadas de ~ 40 min. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

O uso da técnica de keograma na direção de propagação da onda propiciou a identificação de 25 eventos de ondas com propagação de fase ascendente, o que representa 66% de todas as ondas observadas. As características dessas ondas estão listadas na Tabela 4.2. Nota-se que a maioria delas foram observadas entre as camadas de emissão do OH e O₂.

Observa-se na Tabela 4.2 que todos os eventos de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente foram obtidos no sítio de São João do

Cariri (PB). Observa-se que essas ondas estão distribuídas, principalmente nos anos de 2003 e 2009.

Tabela 4.2 - Principais parâmetros das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.

Evento	Sítio	Data	Emissão	λ_H (km)	λ_z (km)	c_H (m/s)	τ (min)	ϕ (°)
1	CA	18/11/2000	OH e O ₂	429,2	55,6	102,1	78,7	284,4
2	CA	23/01/2001	O ₂ e OI	225,8	25,6	68,3	55,1	29,3
3	CA	22/04/2001	OH e O ₂	124,5	147,3	47,9	42,1	7,5
4	CA	18/10/2001	OH e O ₂	279,1	11,1	65,4	70,8	45,0
5	CA	07/02/2002	OH e O ₂	383,7	159,1	42,8	134,1	50,0
6	CA	05/02/2003	OH e O ₂	172,1	11,9	58,3	48,5	40,0
7	CA	28/04/2003	OH e O ₂	270,8	198,3	76,9	59,5	163,4
8	CA	22/07/2003	OH e OI	96,6	37,4	24,3	64,8	341,7
9	CA	21/10/2003	OH e O ₂	429,9	17,5	114,0	62,8	70,1
10	CA	22/10/2003	OH e O ₂	191,5	48,7	58,8	60,5	125,0
11	CA	26/10/2003	OH e O ₂	255,9	11,4	61,5	65,4	125,0
12	CA	14/09/2004	OH e O ₂	234,6	88,8	55,9	70,0	116,9
13	CA	19/09/2004	OH e O ₂	295,9	503,2	84,9	57,5	102,5
14	CA	08/03/2005	OH e OI	185,2	75,8	49,0	63,2	225,0
15	CA	28/10/2005	OH e OI	414,0	25,2	115,5	62,5	40,9
16	CA	28/05/2006	OH e OI	221,1	41,8	43,2	61,3	116,0
17	CA	08/01/2008	OH e OI	357,9	36,6	114,4	50,8	134,9
18	CA	02/02/2008	OH e OI	488,2	12,9	71,2	114,5	57,7
19	CA	08/06/2008	O ₂ e OI	419,3	38,9	59,8	116,8	189,5
20	CA	24/11/2008	OH e O ₂	272,8	58,1	42,0	95,4	129,3
21	CA	20/03/2009	OH e O ₂	169,3	63,0	91,6	36,0	21,0
22	CA	22/03/2009	O ₂ e OI	251,7	59,2	83,4	50,3	66,9
23	CA	30/03/2009	OH e OI	174,7	10,6	85,3	32,3	57,7
24	CA	21/06/2009	OH e O ₂	155,7	20,8	54,2	50,5	309,2
25	CA	16/07/2009	O ₂ e OI	241,7	46,6	52,3	76,9	213,7

Parâmetros característicos (λ_H , λ_z , c_H , τ , ϕ) dos 25 eventos de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.

Fonte: Produção do autor.

Nota-se ainda na [Tabela 4.2](#) que os comprimentos de onda verticais são praticamente todos inferiores aos comprimentos de onda horizontais. Isto é uma característica de ondas de gravidade inclinadas se propagando com estruturas de fase tendendo a se alinhar horizontalmente. Este tipo de onda é facilmente observado nas emissões da aeroluminescência e pode ser visto se propagando entre as camadas. No entanto, há cinco eventos que apresentaram comprimentos de onda verticais elevados chegando até ser da mesma ordem ou maior que os comprimentos de ondas horizontais.

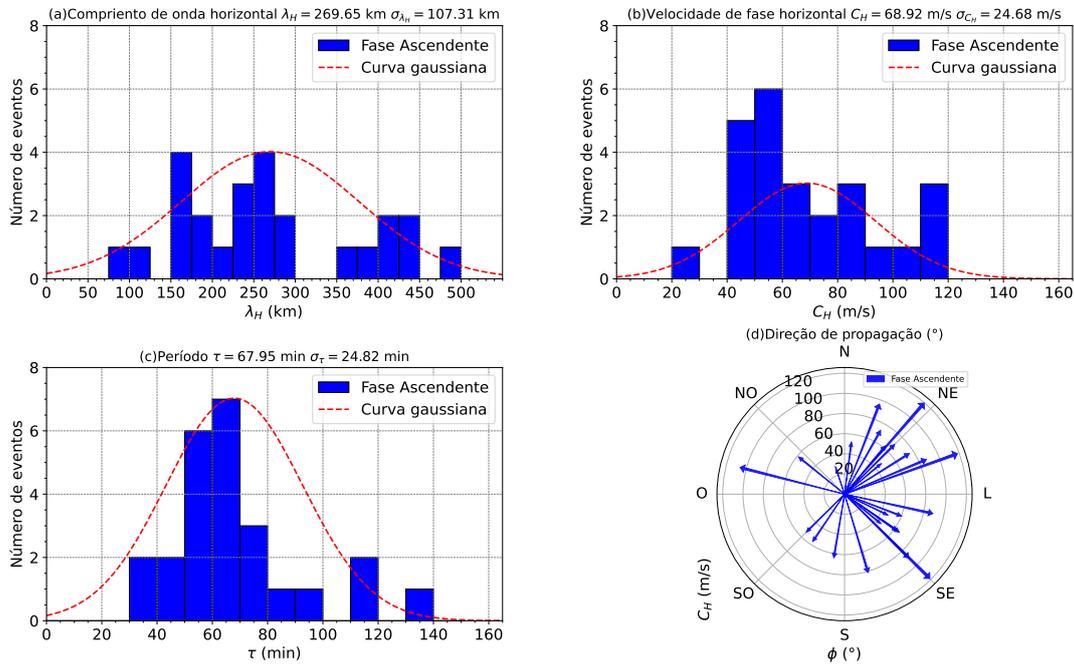
Nestes casos, as ondas estão tendendo a alinhar suas estruturas de fase verticalmente. Isto acontece quando ondas de gravidade tendem a encontrar níveis de reflexão ou são ondas aprisionadas. Comprimentos de ondas verticais grandes são alcançados ou quando a frequência intrínseca da onda aumenta ou quando a frequência de flutuabilidade do meio diminui. No primeiro caso, o agente causado é a estrutura vertical do vento horizontal mudando a medida que as ondas se propagam. A segunda possibilidade vem da diminuição da frequência de flutuabilidade do meio, que está relacionado a mudanças no perfil vertical da temperatura potencial.

A distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente são apresentados na [Figura 4.3](#). O comprimento de onda horizontal, apresentado na [Figura 4.3\(a\)](#), está distribuído principalmente entre 150 e 300 km, com um valor médio de 269 ± 107 km. Observa-se também que alguns eventos de ondas apresentaram comprimento de onda horizontal superiores a 350 km.

A velocidade de fase, apresentado na [Figura 4.3\(b\)](#), das ondas com propagação de fase ascendente concentra-se entre 40 e 90 m/s, e seu valor médio é de 68 ± 24 m/s. Nota-se que alguns eventos de ondas ultrapassam a velocidade de 100 m/s. O período das ondas com propagação de fase ascendente possui um valor médio de 67 ± 24 min, e apresenta maior concentração entre 50 e 80 min. Em alguns casos, as ondas apresentam período superiores a 110 min, como ser observado na [Figura 4.3\(c\)](#).

Por sua vez, na [Figura 4.3\(d\)](#), a distribuição da direção de propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase descendentes, é quase isotrópica. A grande maioria das ondas apresenta propagação para as regiões nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste e noroeste. Contudo, não foram observadas ondas se propagando para oeste e norte. Outro ponto a se destacar, são as ondas com velocidade de fase entre 50 e 90 m/s, propagando-se para nordeste, leste, sudeste, sul e sudoeste.

Figura 4.3 - Distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.



Distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente. Os valores médios e os desvios padrões foram obtidos a partir da distribuição da curva gaussiana. Todos os eventos de ondas de gravidade com propagação de fase ascendente foram observados em São João do Cariri (PB).

Fonte: Produção do autor.

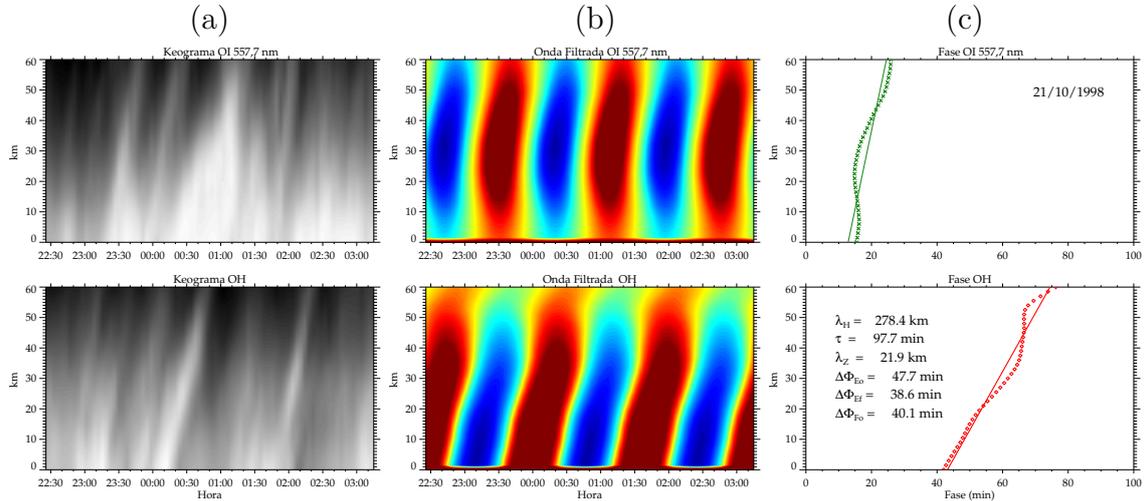
4.1.2 Características das ondas de gravidade com propagação de fase descendente

O único evento de onda de gravidade de média escala que foi possível observar no Observatório de Cachoeira Paulista (SP) é apresentado na Figura 4.4. Esse evento de onda é um caso típico de uma onda de gravidade com propagação de fase descendente, que apresentou um comprimento de onda horizontal de ~ 278 km, um período de ~ 98 min e comprimento de onda vertical de ~ 22 km. O painel (a) apresenta o keograma na direção de propagação da onda observada na noite de 21 de outubro de 1998, nas camadas de emissão do OH e OI 557,7 nm.

Na Figura 4.4(b), é possível visualizar o keograma na direção da onda, filtrado por um filtro do tipo passa banda, que destaca as cristas da onda. A fase da onda é apresentada na Figura 4.4(c), pelas linhas vermelha e verde, respectivamente, para as

emissões do OH e OI 557,7 nm. A diferença de fase ($\Delta\Phi_{Fo}$) causada pela propagação da onda entre as duas camadas foi de ~ 40 min.

Figura 4.4 - Exemplo de uma onda de gravidade de média escala com propagação de fase descendente, observada nas camadas de emissão do OH e OI 557,7 nm.



Onda de gravidade de média escala com propagação de fase descendente observada no sítio de Cachoeira Paulista (SP), na noite de 21 de outubro de 1998. Observa-se que a diferença de fase ($\Delta\Phi_{Fo}$) causada pela propagação da onda entre as camadas da aeroluminescência é de ~ 40 min. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

Os resultados obtidos para as ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendentes são apresentados na Tabela 4.3. Foram identificados 13 eventos (34% do total) de ondas com propagação de fase descendente, sendo a grande parte deles, 77%, observados entre as camadas de emissão do OH e OI 557,7 nm. Contudo, apenas 3 eventos, o que representa 23%, foram detectados entre as camadas do O₂ e OI 557,7 nm.

Tabela 4.3 - Parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.

Evento	Sítio	Data	Emissão	λ_H (km)	λ_z (km)	c_H (m/s)	τ (min)	ϕ (°)
1	CP	21/10/1998	OH e OI	278,4	21,9	47,5	97,7	145,3
2	CA	01/10/2000	OH e O ₂	325,0	64,1	43,8	139,0	31,0
3	CA	13/03/2004	OH e O ₂	164,6	35,7	51,5	53,1	45,0
4	CA	20/03/2004	OH e O ₂	234,6	88,1	55,6	69,2	300,0
5	CA	06/09/2004	O ₂ e OI	177,5	9,4	95,7	30,9	135,0
6	CA	03/06/2005	OH e OI	280,7	80,4	123,5	37,5	17,6
7	CA	26/08/2006	OH e OI	166,4	153,4	64,4	42,6	32,5
8	CA	24/11/2006	OH e OI	155,5	10,4	43,6	59,4	45,0
9	CA	09/11/2007	OH e OI	333,3	134,2	58,3	80,5	64,2
10	CA	24/02/2009	O ₂ e OI	254,5	9,7	33,0	134,2	235,0
11	CA	18/06/2009	OH e O ₂	183,2	125,4	60,1	60,9	311,0
12	CA	18/06/2009	OH e OI	231,3	382,7	39,7	97,8	315,0
13	CA	16/08/2009	O ₂ e OI	266,1	9,9	100,9	44,0	228,3

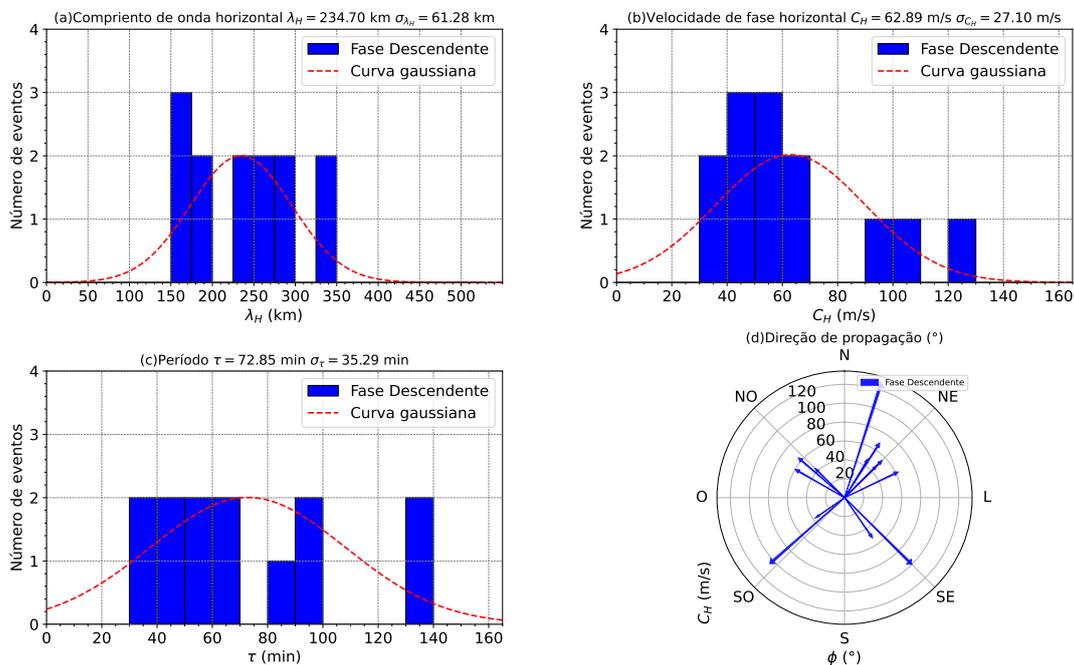
Principais parâmetros físicos (λ_H , λ_z , c_H , τ , ϕ) dos 13 eventos de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.

Fonte: Produção do autor.

A distribuição dos parâmetros das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente são apresentados na [Figura 4.5](#). O comprimento de onda horizontal das ondas é apresentado na [Figura 4.5\(a\)](#) e distribuem-se entre 150 e 350 km, com um valor médio de 234 ± 61 km.

A velocidade de fase horizontal, apresentada na [Figura 4.5\(b\)](#) varia entre 30 e 70 m/s, com um valor médio de 62 ± 27 m/s. Nota-se também velocidades de fase horizontal superiores a 100 m/s. Já a distribuição dos períodos observados, painel (c), distribuem-se entre 30 e 140 min, com média de 72 ± 35 min. No painel (d) são mostradas as direções de propagação das ondas, para as quais, nota-se uma tendência de eventos se propagando para nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste.

Figura 4.5 - Distribuição dos parâmetros característicos das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.



Parâmetros característicos dos 13 eventos de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente. Apenas 1 evento de onda de gravidade com propagação de fase descendente foi obtido no sítio de Cachoeira Paulista (SP).

Fonte: Produção do autor.

As características das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente e descendente, apresentadas nesta tese, corroboram com os estudos já publicados na literatura (DING et al., 2004; SUZUKI et al., 2009; TAYLOR et al., 2009; PAULINO et al., 2011; BILIBIO, 2017; ESSIEN, 2015). É importante mencionar que alguns estudos de caso sobre ondas de gravidade com propagação de fase ascendente e descendente também foram publicados, como por exemplo o trabalho de Nyassor et al. (2018). Os autores reportaram ondas de gravidade de média escala tanto com propagação de fase ascendente quanto descendente, as quais apresentaram características semelhantes aos encontrados nesta tese. Contudo, Nyassor et al. (2018) utilizaram dados de fotômetro, imageador *all-sky* e radar meteorológico para caracterizar tais ondas.

Na observação de ondas de gravidade através de imagens de aeroluminescência, a técnica de keogramas apresenta algumas vantagens em relação à análise harmônica

bidimensional das imagens, a saber: (i) é possível caracterizar ondas de gravidade com comprimento de onda horizontal de poucos até algumas centenas de quilômetros; (ii) consegue-se estimar períodos observados de alguns minutos até algumas horas; (iii) pode-se monitorar qualitativamente de forma rápida a atividade de ondas de gravidade ao longo da noite e (iv) comparar a atividade de ondas de gravidade também de forma eficiente em camadas de emissões adjacentes da aeroluminescência.

No vasto espectro de onda de gravidade, destaca-se as ondas de gravidade de média escala, que são estruturas com comprimento de onda horizontal superiores a 100 km e com períodos maiores que meia hora (VADAS et al., 2009). Essa porção do espectro de ondas de gravidade apresenta interesse científico relevante pois as ondas podem ter velocidades de fase horizontal maior que 60-70 m/s. Ondas com velocidade de fase elevadas são importantes porque se propagarem através da atmosfera sem sofrerem processos de filtragem pelo sistema de ventos (VADAS, 2007). Além disto, ondas de gravidade com dimensões espaciais grandes podem ser elementos decisivos para o processo de acoplamento das atmosferas neutra e ionizada e, na região equatorial, podem ser um agente iniciador de bolhas de plasma ionosféricas (FRITTS et al., 2008). Além disto, a disposição espectral das ondas de gravidade de média escala possibilita com que elas sejam candidatas a serem classificadas como ondas secundárias ou terciárias, que têm suas origens na termosfera-ionosfera a partir de uma quebra de onda de gravidade primária oriunda da baixa termosfera (VADAS; BECKER, 2019).

A motivação fundamental deste trabalho foi investigar características físicas de ondas de gravidade de média escala propagantes observadas a partir de múltiplas emissões da aeroluminescência. Com isto é possível saber a direção vertical de propagação das ondas de gravidade e saber se a fase das ondas é ascendente, o que implica em fluxo de energia descendente ou vice e versa. Ondas de gravidade primárias são excepcionalmente verticalmente propagantes para cima, a menos que haja uma reflexão da onda na atmosfera e as mesmas invertam a direção de propagação. Por outro lado, é mais provável que ondas de gravidade secundárias e terciárias sejam verticalmente propagantes para baixo, a menos que as ondas tenham experimentado reflexões ou no solo ou na própria atmosfera.

Neste sentido, as ondas de gravidade de média escala destacam-se nesta investigação porque são menos susceptíveis às reflexões dentro da atmosfera, sendo assim, candidatas fortes para classificar ondas de gravidade como primárias, secundárias ou terciárias, etc.

É importante mencionar também que o espectro de ondas de gravidade evanescentes também pode existir na região da MLT, onde se situam as camadas da aeroluminescência estudadas neste trabalho. Portanto, é relevante destacar que modos evanescentes de ondas podem ter sido apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, e isto se deve ao longo comprimento de onda vertical de alguns eventos de ondas de gravidade de média escala. No entanto, é necessário analisar cada caso individualmente para determinar matematicamente se a onda de gravidade está evanescendo, uma vez que o comprimento de onda vertical por si só não é suficiente para caracterizá-la como tal.

Os resultados mostraram que de 38 eventos de ondas de gravidade de média escala observadas em São João do Cariri e Cachoeira Paulista, 25 apresentaram padrões de fase ascendentes (fluxo de energia descendentes), o que representa aproximadamente 66% da totalidade dos eventos. Esse número é bastante expressivo, embora não seja estatisticamente significativo devido à dimensão pequena da amostra.

Esta é, portanto, a primeira grande contribuição deste trabalho de tese que provoca uma porcentagem de ondas de gravidade com propagação de fase ascendente e descende (fluxo de energia descendentes e ascendente, respectivamente). Seria isto, uma especificidade da técnica utilizada? Já que para um volume de quase um ciclo solar, apenas 38 eventos foram registrados. Ou de fato, há mais ondas de gravidade com propagação de fase ascendente do que se pensava? É difícil responder a essas questões pela limitação experimental apresentada. Porém, pode-se avançar mais cientificamente discutindo as características físicas destas ondas, conforme apresentado nesta seção.

4.2 Trajetórias das ondas de gravidade de média escala

O modelo *ray tracing* para ondas de gravidade de média escala consiste em resolver simultaneamente o conjunto de equações diferenciais da taxa de variação temporal da posição da onda e do vetor de onda. Para solucionar o conjunto de equações é preciso fornecer a posição e vetor de onda inicial. A posição inicial se obtém a partir das coordenadas geográficas do observatório e a altura média da camada da aeroluminescência que se observa a onda. O vetor de onda inicial obtém-se a partir das componentes do comprimento de onda horizontal obtido da imagem da camada da aeroluminescência e a componente vertical advém da relação de dispersão de Gossard e Hooke (1975). A solução do sistema de equações carece de um passo inicial, a partir do passo inicial, é preciso conhecer o vento e a temperatura da atmosfera. Os passos podem ser ascendente ou descendente e, em cada passo, é

preciso testar as condições de parada do modelo (VADAS; FRITTS, 2005).

Em relação ao *ray tracing*, o mesmo pode ser utilizado para (a) identificação de fontes de ondas de gravidade, a partir da análise das retrotrajetórias (WRASSE, 2004); (b) estudar a penetração das ondas de gravidade na região da termosfera-ionosfera (PAULINO, 2012) e (c) investigar o processo de filtragem de ondas de gravidade na atmosfera devido ao sistema de vento e das estruturas térmicas (BAGSTON, 2010).

No presente trabalho, foram calculadas as trajetórias de todos os eventos de ondas observados. Como a trajetória das ondas de gravidade depende diretamente da sua fonte de geração e das condições termodinâmicas da atmosfera, as ondas estudadas poderão ser refletidas, refratadas, canalizadas ou absorvidas, conforme discutido no Capítulo 2. Caso as ondas de gravidade de média escala sobrevivam a todo esse processo de filtragem, elas certamente serão dissipadas devido à ação da viscosidade molecular e difusividade térmica na atmosfera (VADAS; FRITTS, 2005).

Os resultados do modelo *ray tracing* para as ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente e descendente, serão apresentados em função da posição final da sua trajetória e retrotrajetória alcançada na atmosfera. É importante mencionar que, nos resultados das trajetórias das ondas dois pontos foram destacados os quais representam o fluxo de momento máximo da onda, e o fluxo de momento menor do que 10% da condição anterior. Assim sendo, a altitude de dissipação da onda com fase descendente é dada no local onde o fluxo de momento é máximo. Contudo, o *ray tracing* continuará os cálculos até que fluxo de momento seja menor do que 10% do fluxo máximo.

Ainda nessa seção, serão mostrados os resultados das posições finais das ondas de gravidade, em função da altura, utilizando o modelo *ray tracing*. A posição final das ondas dependem das condições termodinâmicas da atmosfera e de como as ondas de gravidade respondem às condições de parada do modelo. É importante perceber que foram adotadas as altitudes médias das camadas da aeroluminescência como pontos de partida para o modelo *ray tracing*. Nesse caso, o ponto de partida foi escolhido como sendo a camada de emissão mais alta (baixa) quando a onda possui propagação de fase descendente (ascendente). Os resultados serão apresentados apenas para o caso do vento modelo pelo HWM-14, enquanto que a condição sem vento foi utilizado apenas para efeitos de comparação e validação do método.

4.2.1 Ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente

A Tabela 4.4 apresenta as posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente. Estes resultados incluem apenas ondas de gravidade de média escala observadas em São João do Cariri (PB). Os resultados mostram que 76% destas ondas chegam até o solo e o restante (24%) tiveram sua trajetória finalizada próximo a tropopausa. Pela teoria, as ondas de gravidade devem refletir de forma especular ou no solo ou na troposfera e continuar a se propagar com fase descendente em direção as altitudes superiores (VADAS, 2007).

Na Figura 4.6(a), são apresentadas as posições finais das trajetórias das ondas com propagação de fase ascendentes. Os círculos demarcam as regiões com raios de 300, 700, 1.100 e 1.500 km, e podem ser usados como referências para as distâncias que as ondas se propagaram. Essas trajetórias foram calculadas pelo modelo de *ray tracing* utilizando o modelo de vento HWM-14, e são representadas pelas linhas sólidas. O triângulo violeta e o círculo rosa representam a localização dos sítios de observação de São João do Cariri (PB) e Cachoeira Paulista (SP), respectivamente. Nota-se que a maioria dos eventos de ondas de gravidade com propagação de fase ascendente consegue se propagar até alturas na troposfera e próximas ao solo. Os painéis (b) e (c) da Figura 4.6 mostram as altitudes em que a trajetória da onda foi finalizada, em função da latitude e longitude, respectivamente.

As posições finais das trajetórias das ondas de gravidade com fase ascendente ficaram concentradas entre 0° e 20°S de latitude, 35°O e 25°O de longitude, e praticamente todas abaixo de 15 km de altura após percorrerem distâncias horizontais entre 500 e 1.000 km. Em 16% dos casos as ondas de gravidade se propagaram horizontalmente por mais de 1.500 km.

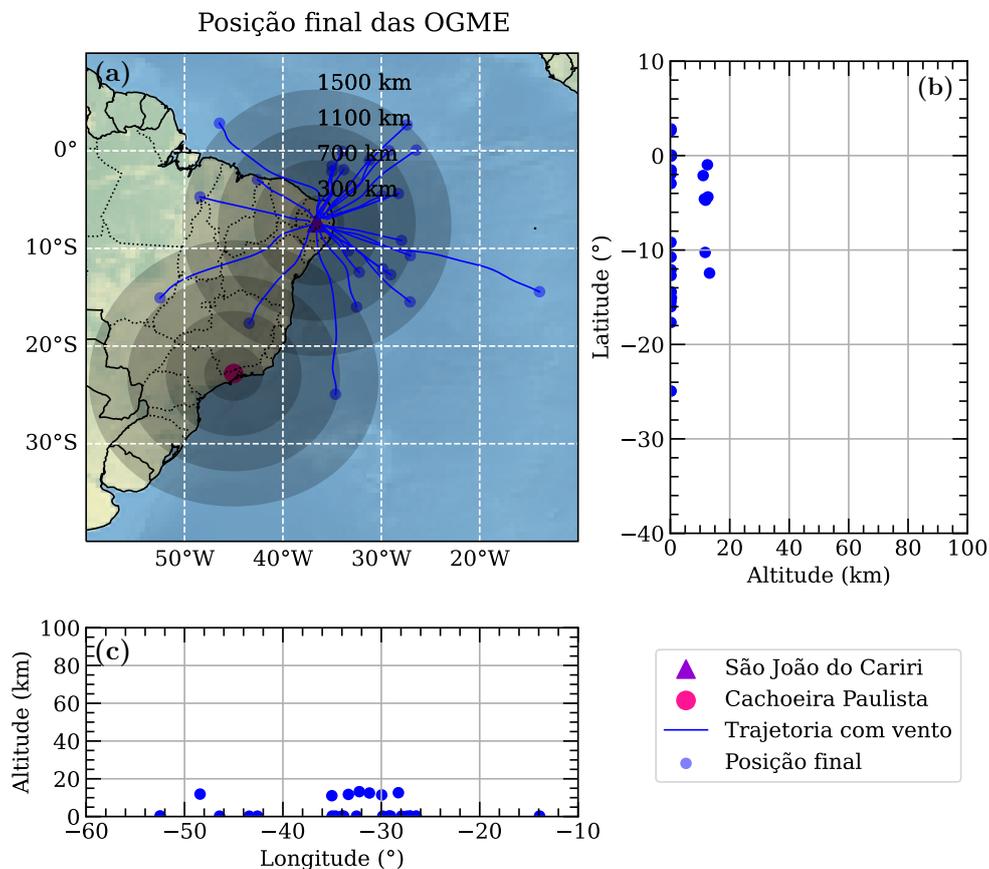
Tabela 4.4 - Posição final das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação das ondas de fase ascendente.

Posição final	Altitude (km)	Quantidade
Solo	0	76%
Troposfera	10 - 20	24%

Distribuição das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente em função da altura final de propagação.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 - Distribuição das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.

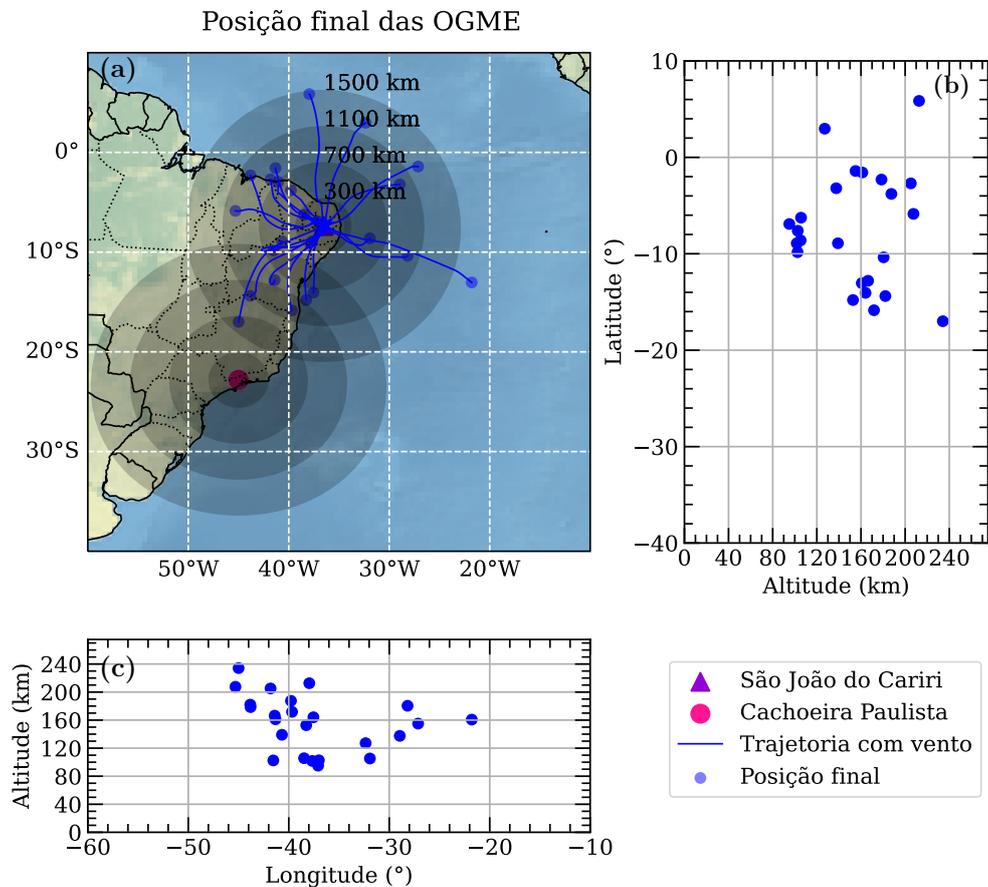


Posição final das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente na atmosfera. As regiões indicam os locais onde as ondas observadas pararam.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.7 apresenta a distribuição das posições finais das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente. Isto indica que estas posições são os possíveis locais nas quais as ondas foram geradas. Note que estas posições estão situadas acima das alturas das camadas da aeroluminescência, isto é acima da mesosfera e na baixa termosfera.

Figura 4.7 - Distribuição das posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.



Posição final das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente. As regiões indicam os possíveis locais de origem das ondas observadas.

Fonte: Produção do autor.

Os elementos presentes na Figura 4.7 são os mesmos da figura anterior. As posições em que os eventos de ondas de gravidade se concentraram foram entre 25°O e 45°O de longitude, 0° e 15°S de latitude, entre 100 e 200 km de altitude e entre 300 e 700 km de distância horizontal do sítio de observação. Observa-se que 24% dos eventos de ondas com fase ascendente tiveram sua origem em altitudes na mesosfera (80 - 110 km de altitude), 56% na baixa termosfera (110 - 200 km de altitude) e 20% na termosfera (acima de 200 km de altitude).

Nota-se na Figura 4.7(a) que algumas ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente percorrem mais de 1.100 km horizontalmente desde a termosfera até a região de observação na aeroluminescência. Em um caso, essa

distância foi superior a 1.500 km.

A Tabela 4.5 apresenta um sumário das posições finais das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente, em função da sua possível região de origem na atmosfera.

Tabela 4.5 - Posição final das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente.

Regiões da atmosfera	Altitude (km)	Quantidade
Mesosfera	80 - 110	24%
Baixa termosfera	110 - 200	56%
Termosfera	> 200	20%

Distribuição das posições finais das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente em função da altura. As regiões da atmosfera indicam o possível local de origem das ondas.

Fonte: Produção do autor.

Outro fator importante, é o tempo que as ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, levam para se propagar entre a termosfera e a troposfera. Utilizando os resultados do modelo de *ray tracing* o tempo de propagação foi estimado entre a mesosfera/termosfera (local onde o fluxo de *momentum* é máximo) e a troposfera. Estas ondas com propagação de fase ascendente, levam em média de 4 h a 7 h 36 min para se propagarem de sua região de origem, até a troposfera, ou até mesmo tocar o solo. A Tabela 4.6 apresenta os resultados do tempo de propagação das ondas de gravidade de média escala. Observe que as ondas com origem da baixa termosfera apresentaram um maior tempo de propagação até a troposfera. Isto se deve à ação do vento que faz com que a onda percorra grandes distâncias horizontais até atingir a baixa atmosfera.

Tabela 4.6 - Tempo de propagação das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase através da atmosfera.

Região de origem da onda	Posição final da onda	Tempo
Mesosfera	Baixa troposfera	4 h 25 min
Baixa termosfera	Baixa troposfera	7 h 36 min
Termosfera	Baixa troposfera	5 h 10 min

Tempo de propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, entre as diferentes regiões de origem e a sua posição final na baixa troposfera.

Fonte: Produção do autor.

Na construção da retrotrajetória da onda em direção à termosfera, observa-se efeitos dissipativos devido à viscosidade molecular e a difusividade térmica nesta região (VADAS; FRITTS, 2005). As condições de parada do modelo incluem (i) níveis críticos, quando a frequência da onda tende a zero, o que leva a onda a evanescer; (ii) velocidade de fase da onda menor que a velocidade do som na termosfera, para garantir que a onda seja do tipo gravidade sem contribuições de ondas acústicas; (iii) o comprimento de onda de viscosidade menor que o comprimento de onda vertical, como garantia que a onda não será totalmente dissipada dentro de um ciclo ($|\lambda_z| = \frac{2\pi}{\frac{d\nu}{dz}}$) e (iv) dissipação devido à viscosidade molecular e difusividade térmica, quando a amplitude da onda diminui a um valor demasiadamente pequeno, a onda é considerada dissipada.

Ao analisar as retrotrajetórias das ondas, percebeu-se que a maioria delas (89,4%) param devido à condição de nível crítico. Estes níveis críticos podem estar associados às possíveis fontes devido à aceleração do fluido atmosférico. Uma onda alcança um nível crítico na atmosfera quando o vento horizontal se torna igual ou superior à velocidade de fase da onda. Note que a velocidade de fase da onda precisa estar também na mesma direção do vento para ocorrer a absorção (FRITTS et al., 2008). Uma onda de gravidade pode ser gerada na atmosfera devido ao aceleração do fluido após um depósito de *momentum* e energia nesta parcela do fluido. Quando uma onda de gravidade primária quebra esta pode gerar ondas secundárias (VADAS; BECKER, 2019). Lembrando que uma onda primária tem sua origem na baixa atmosfera por processos convectivos, cisalhamento de vento ou elevação do escoamento sobre montanhas.

Takahashi et al. (2011) apresentaram os resultados de ondas de gravidade obser-

vadas no Brasil, no qual, os autores sugeriram que essas ondas possam ser ondas de gravidade secundárias. [Vadas e Becker \(2018\)](#) mostraram as revisões teóricas e os resultados observacionais de possíveis ondas de gravidade secundárias. [Heale et al. \(2020\)](#) também discutiram um caso de estudo interessante considerando uma onda de gravidade oriunda de montanha sobre a Europa como sendo uma onda de gravidade secundária. [Heale et al. \(2021\)](#) apresentaram as características espectrais de ondas primárias e secundárias a partir dos resultados de simulações numéricas. Comparando os parâmetros das ondas com os apresentados nesse trabalho de tese, nota-se uma grande compatibilidade espectral, o que implica que os casos apresentados aqui são candidatos a ondas de gravidade secundárias.

Outro ponto que precisa ser analisado é a possível reflexão das ondas de gravidade dentro da termosfera ionosfera. Se uma onda sofre uma reflexão na termosfera, a mesma pode se propagar com fase ascendente assemelhando-se às ondas secundárias. Os níveis de reflexão são atingidos quando as ondas de gravidade encontram ventos horizontais intensos e com direção oposta às suas propagações. De acordo com as previsões numéricas, o vento horizontal é bem comportado nos altos níveis da termosfera, contudo sofre mudanças bruscas na mesosfera e baixa termosfera. As regiões onde ocorrem essas mudanças bruscas são candidatas a promoverem reflexão nas ondas de gravidade.

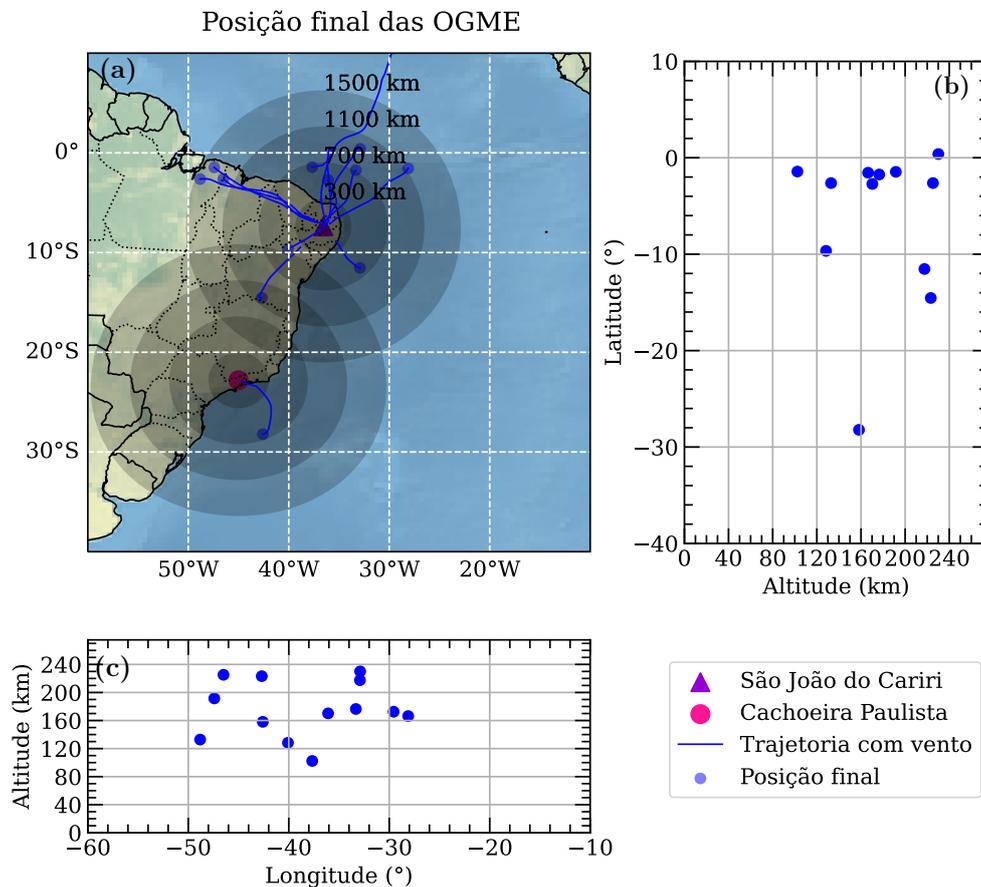
De acordo com os resultados da [Figura 4.7](#), pode-se perceber que a maior parte dos eventos são oriundos de altitudes superiores a 150 km, o que fortemente sugere que a maioria das ondas observadas tem compatibilidade para serem secundárias. Por sua vez, as ondas vindas da baixa termosfera e da própria mesosfera, poderiam ter experimentado uma reflexão. No entanto, para garantir mais confiabilidade nos resultados seria preciso perfis de vento e temperatura mais realísticos para estudar as condições de propagação das ondas através da atmosfera.

4.2.2 Ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente

A [Figura 4.8\(a\)](#) apresenta a distribuição das posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente, representada no mapa em função da latitude e longitude. Os círculos em tons de cinza representam as distâncias horizontais a partir dos observatórios. Os círculos em azul representam os pontos nos quais as ondas de gravidade com fase descendente praticamente se dissiparam. Os painéis (b) e (c) mostram a altitude em função da latitude e longitude, respectivamente. Nota-se que a grande maioria das ondas estão localizadas a nordeste do

observatório de São João do Cariri (PB), todavia, também são observadas ondas a noroeste, sudoeste e sudeste do observatório. Nota-se que a maior parte das ondas observadas em São João do Cariri se concentraram entre as latitudes de 0° à 15°S e entre as longitudes de 30°O a 50°O . Em relação a distribuição altitudinal, a maior parte das ondas atingiram alturas entre 160 e 200 km, contudo, os resultados do modelo de *ray tracing* mostram que algumas ondas de gravidade conseguem se propagar até alturas acima de 200 km. Observou-se eventos de ondas de gravidade que se propagaram um pouco acima de 100 km de altitude.

Figura 4.8 - Representação da distribuição das posições finais das ondas com fase descendente.



Posição final das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.8(a) também apresenta a trajetória da onda de gravidade observada em Cachoeira Paulista (SP), onde é possível notar que a onda se propaga até aproxi-

madamente 160 km de altitude. Analisando a [Figura 4.8\(a\)](#), cabe ainda mencionar que a grande maioria das ondas de gravidade com propagação de fase descendente, percorrem uma distância média entre 300 e 700 km em relação ao sítio de observação. Nota-se também que algumas ondas percorrem uma distância aproximada de 1.000 km, e uma onda em específico propagou-se por mais de 1.500 km. Por outro lado, houve eventos que não passaram de 700 km de propagação horizontal.

A [Tabela 4.7](#) apresenta um sumário das posições finais das trajetórias das ondas de gravidade de média, escala com propagação de fase descendente. Observa-se que apenas 8% das ondas se propagam até a mesosfera, por outro lado, a grande maioria (62%) das ondas se propagaram até a baixa termosfera, sendo que 31% delas conseguem atingir altitudes maiores que 200 km.

Tabela 4.7 - Posição final das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente.

Regiões da atmosfera	Altitude (km)	Quantidade
Mesosfera	80 - 110	8%
Baixa termosfera	110 - 200	62%
Termosfera	> 200	31%

Distribuição das posições finais das trajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente em função da altura.

Fonte: Produção do autor.

[Paulino \(2012\)](#) fez um estudo para 26 eventos de ondas de gravidade de média escala observadas sobre São João do Cariri (PB). Naquele trabalho, o autor utilizou dados de vento horizontal, para a região da mesosfera e baixa termosfera, obtidos por um radar meteorológico, além da utilização do modelo *Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model* (TIE-CGM) para a região da termosfera e do modelo HWM-07 para as demais altitudes. Já os perfis de temperatura reuniram observações do instrumento *Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry* (SABER) a bordo do satélite *Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics* (TIMED) entre 20 km e ~ 120 km de altitude e modelagem do TIE-GCM para altitudes da baixa termosfera. Naquele trabalho, os eventos de ondas de gravidade não conseguiram penetrar em altitudes muito elevadas na termosfera-ionosfera. Na média, as altitudes de dissipação das ondas de gravidade de média escala do presente trabalho são compatíveis com as altitudes

apresentadas por [Paulino \(2012\)](#). Aqui observou-se algumas ondas de média escala atingindo altitudes superiores a 200 km de altitude.

Ondas de gravidade de média escala atingindo altitudes elevadas são interessantes para o processo de acoplamento entre a atmosfera neutra e ionizada ([FRITTS et al., 2008](#)). Principalmente, para a geração de bolhas de plasma ionosféricas através do mecanismo de instabilidade Rayleigh-Taylor ([TAKAHASHI et al., 2018](#)). Ondas de gravidade atingindo a base da região F da ionosfera ([TAKAHASHI et al., 2018](#)) podem contribuir como iniciadoras para esse processo de instabilidade. No entanto, ao longo do percurso vertical, as ondas de gravidade vão experimentando processos dissipativos, principalmente devido à ação combinada da difusividade térmica e da viscosidade molecular ([VADAS; FRITTS, 2005](#)). Esses processos dissipativos competem entre si e produzem atenuação na amplitude das ondas de gravidade, que a princípio, se não fosse a dissipação, tenderiam a saturar devido à diminuição acentuada da densidade atmosférica. De acordo com [Vadas \(2007\)](#), ondas de gravidade com períodos inferiores a uma hora e comprimento de onda horizontais de centenas de quilômetros são mais prováveis de atingir altitudes da base da região F da ionosfera. Esta porção espectral está presente nestes resultados e exatamente coincide com as ondas que ultrapassam 200 km de altitude.

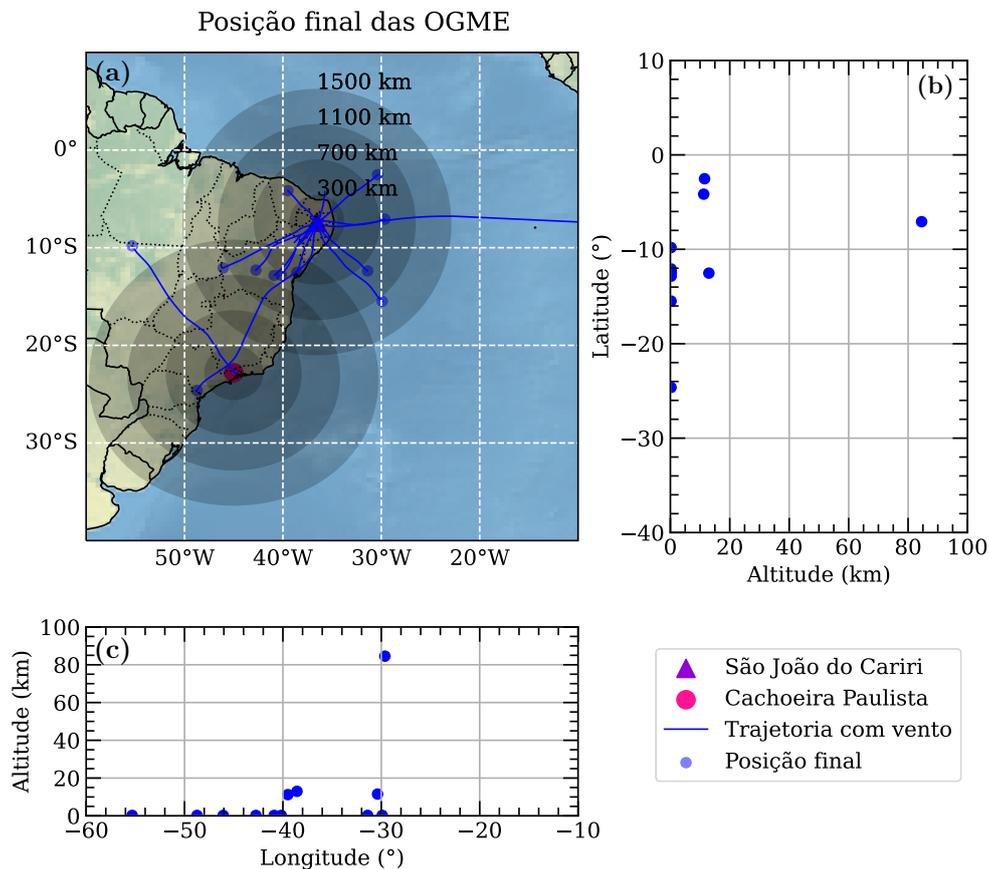
A penetração de ondas de gravidade na termosfera ionosfera também contribui para variação de curto período do vento termosférico. Como a onda de gravidade cresce em amplitude, a medida que se propaga vai contribuindo para o vento termosférico de forma acentuada ([PAULINO, 2012](#)). A amplitude da onda pode chegar até dezenas de metros por segundo em torno de 130-150 km de altitude. O vento termosférico nestas altitudes pode atingir centenas de metros por segundo. Portanto, as ondas de gravidade oriundas da baixa termosfera são capazes de introduzir até 10% de variabilidade no vento termosférico.

Uma importância significativa dos resultados apresentados aqui é que praticamente todas as ondas de gravidade chegam a baixa termosfera e isto se repete em trabalhos anteriores também ([PAULINO et al., 2011](#); [TAKAHASHI et al., 2011](#); [SIVAKAN-DAN et al., 2019](#); [TAKAHASHI et al., 2022](#)).

Agora, a [Figura 4.9](#) apresenta os resultados das posições finais das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente. A distância percorrida pela onda compreende o observatório no qual a onda foi observada até a possível região de origem das ondas, na baixa atmosfera. Os painéis (b) e (c) apresentados nesta figura têm a mesma conotação dos painéis das figuras anteriores.

A partir da Figura 4.9, observa-se que a maior parte dos eventos de ondas de gravidade observado em São João do Cariri (PB) tiveram suas posições finais da retrotrajetória entre -25° e 0 de latitude, -50° e -30° de longitude, abaixo de 20 km de altitude. As ondas possuem sua possível fonte de origem entre 700 e 1.100 km de distância em torno do observatório. Nota-se que alguns eventos de onda se propagaram por grandes distâncias horizontais (> 1.500 km) e que pararam na região da mesosfera. Em termos percentuais, cerca de 69% das ondas tiveram sua retrotrajetória interrompida entre 1 e 4 km de altitude, 23% dos eventos de onda entre 10 e 15 km de altitude, e o restante 8% das ondas tiveram origem da mesosfera.

Figura 4.9 - Distribuição das posições finais das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente. As regiões indicadas são os possíveis locais no qual as ondas foram geradas.



Posição final das ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendente. Estas são as possíveis regiões de origem das ondas.

Fonte: Produção do autor.

Apenas um evento de onda de gravidade, com propagação de fase descendente, teve

sua posição final na região da mesosfera (veja [Figura 4.9](#)). Este caso corrobora com o estudo apresentado por [Wrasse \(2004\)](#), para o Observatório de São João do Cariri (PB). Neste estudo, em alguns casos, as retrotrajetórias das ondas de gravidade de pequena escala foram interrompidas na região da mesosfera. Segundo o autor, entre as altitudes de 80 e 90 km, apresentam-se túneis de vento intensos em que a perturbação do vento básico, ou até mesmo a influência da maré diurna podem levar a onda atingir seu nível crítico.

[Wrasse \(2004\)](#) também mostrou que 30% das ondas de gravidade de pequena escala tiveram a posição final de sua retrotrajetória na troposfera. Isto significa que a fonte de geração das ondas está localizada na baixa atmosfera, sendo associada a algum fenômeno meteorológico. O autor também mostrou que para os resultados encontrados para o sítio de Cachoeira Paulista as ondas se propagaram por mais de 1.000 km de distância, até atingirem sua posição final na troposfera. Desta forma, os resultados encontrados na presente tese, corroboram com os resultados apresentados por [Wrasse \(2004\)](#), pois os resultados mostram que algumas ondas se propagaram por mais de 1.100 km antes de atingirem sua posição final na região da troposfera.

Comparando os resultados de [Paulino \(2012\)](#) com o presente trabalho, nota-se que as características gerais das retrotrajetórias se assemelham. O que é um bom indicativo que a modelagem utilizada no presente trabalho responde adequadamente à construção da retrotrajetória das ondas de média escala. Há também semelhanças nas retrotrajetórias das ondas de gravidade, mesmo comparando com outras localidades fora do Brasil, como por exemplo, para o setor Indiano ([SIVAKANDAN et al., 2016](#)).

Isto acontece porque as ondas de gravidade de média escala, em geral, apresentam velocidade de fase elevadas, i.e., a grande maioria dos eventos possuem velocidade de fase acima de 60 m/s. Velocidades de fase elevadas contribuem para que as ondas de gravidade escapem de níveis críticos e de reflexão e, com isso, tornam-se menos susceptíveis às variações do vento horizontal. As trajetórias destas ondas são pouco distorcidas devido ao vento horizontal e tendem a se assemelhar às trajetórias calculadas com vento nulo.

Os resultados encontrados por [Wrasse \(2004\)](#) sustentam ainda mais essa argumentação. Naquele trabalho, foram calculadas retrotrajetórias das ondas de gravidade de pequena escala que, em geral, apresentam velocidades de fases menores que as ondas de média escala. O autor observou, por exemplo, que 78% dos eventos pararam na região da mesosfera devido à ação, principalmente, do vento.

Tabela 4.8 - Comparação dos tempos de propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, entre as regiões da atmosfera.

Estudos	Ondas	Troposfera \leftrightarrow Mesosfera	Troposfera \leftrightarrow Termosfera
Presente trabalho	OGME	2h	5h
Paulino 2012	OGME	-	5h
Wrasse 2004	OGPE	4h	-

Tempo de propagação das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, entre a troposfera e mesosfera e entre a troposfera e termosfera. As siglas OGME e OGPE significam Onda de Gravidade de Média Escala e Onda de Gravidade de Pequena Escala, respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

Um ponto importante para ser analisado na retrotrajetória das ondas de gravidade é o tempo de propagação da onda, entre a sua possível origem até a mesosfera. A [Tabela 4.8](#) apresenta um resumo dos resultados encontrados para os intervalos de tempo resultantes das retrotrajetórias das ondas de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, entre diferentes trabalhos da literatura. Este tempo é importante porque como se utiliza o vento modelado nos cálculos das retrotrajetórias, esse vento não reproduz variações de curto período, que são observadas na atmosfera e que poderiam induzir níveis críticos e/ou de reflexão. Se o tempo de propagação das ondas de gravidade é pequeno, isto diminui a probabilidade da onda de encontrar bruscas variações do vento horizontal. Nota-se que em média, o tempo de propagação das ondas de média escala do presente trabalho é menor quando comparado com as ondas de pequena escala.

No trabalho de [Paulino \(2012\)](#), foi sugerido complexos convectivos de média escala como as principais fontes para as ondas de média escala. Frente fria e linhas de instabilidades também estavam entre sugestões de fontes destas ondas.

Para complementar a discussão sobre o tempo de propagação das ondas de média escala, é feita uma comparação com o tempo total da trajetória das ondas entre o presente trabalho e o trabalho [Paulino \(2012\)](#). Há perfeita compatibilidade entre as previsões temporais, sendo que a maioria dos eventos de ondas, em ambos trabalhos, precisaram de 1h a 5h para se propagar da troposfera até atingir a termosfera. Isto reforça ainda mais que o modelo HWM-14 é interessante para esse tipo de estudos envolvendo ondas de gravidade de média escala.

4.3 Fontes de ondas de gravidade de média escala: estudos de casos

Nesta seção, são apresentados estudos de casos de possíveis fontes de ondas de gravidade de média escala. As principais fontes de ondas de gravidade são oscilações no fluido atmosférico. Estas oscilações podem acontecer por convecção ou por cisalhamento do vento horizontal, como desdobramento do cisalhamento horizontal, que aparece nos efeitos topográficos do relevo submetido a um escoamento. Quaisquer outras manifestações desses mecanismos surgem como possíveis fontes de ondas de gravidade (FRITTS; ALEXANDER, 2003), como por exemplo, frentes frias, correntes de jato, ventos incidindo sobre montanhas ou depressões, explosões na atmosfera, etc. Conforme mencionado, o *ray tracing* é uma ferramenta interessante para inferir as regiões onde as possíveis fontes de geração das ondas estão localizadas.

Para auxiliar na identificação de possíveis fontes, dados de satélites geoestacionários como o *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e o *Meteorological Satellite* (METEOSAT) serão utilizados. Esses dados encontram-se disponíveis no portal do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INPE (CPTEC, 2022). As imagens, coletadas em diferentes canais, ajudam a identificar a presença de nuvens, bem como a temperatura do topo de nuvem, que é um indicador da altitude aproximada do ponto mais alto da nuvem e serve como referência para saber se está acontecendo convecção profunda.

Outra ferramenta útil para identificação de possíveis fontes são mapas geográficos que dão informação sobre o relevo. O mapa topográfico para o Brasil foi obtido em TOPOGRAPHIC (2022). Neste trabalho, foram investigados os eventos estudados em 21 de outubro de 2003, 24 de novembro de 2006 e 16 de julho de 2009.

4.3.1 Estudo de caso: fonte de onda de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente

Com base nas imagens de temperatura do topo de nuvem, obtidas dos satélites GOES-12 e METEOSAT, busca-se aqui também identificar zonas de convecções troposféricas, ou fenômenos meteorológicos associados nas regiões próximas das trajetórias das ondas de gravidade de média escala. Espera-se que estas ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente possam ser geradas por ondas de gravidade primárias que depositam energia e *momentum* na região da termosfera. Essas ondas com energia descendente (fase ascendente) podem ser ondas secundárias ou terciárias geradas pelo *body force* atmosférico quando a onda geradora faz a deposição de *momentum* em altitudes termosféricas. Espera-se que as

fontes destas ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente estejam associadas às ondas primárias com propagação de fase descendente geradas na região da troposfera, ou até mesmo ondas secundárias.

É importante esclarecer que não é o objetivo deste trabalho realizar uma descrição mais detalhada sobre o *body force*. Além disso, é importante mencionar que não temos modelos sofisticados que possam caracterizar e identificar com clareza esses forçantes localizados na região da baixa termosfera, por exemplo, como é o caso aqui neste trabalho, em que a maioria das ondas com propagação de fase ascendente se originam, ver Tabela 4.5.

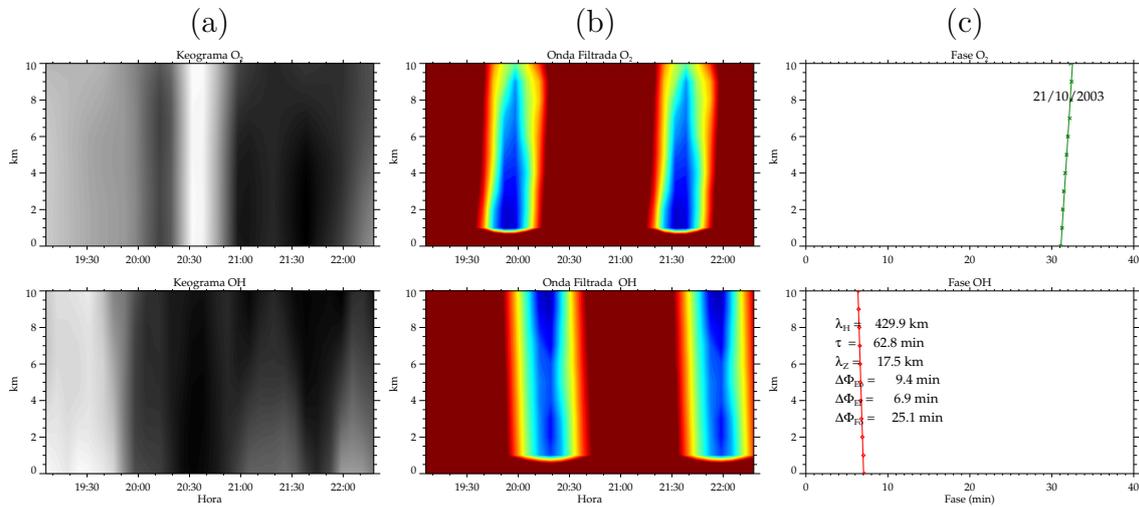
Na Figura 4.10, consegue-se identificar a propagação de fase para uma onda de gravidade de média escala observada em 21 de outubro de 2003, sobre São João do Cariri (PB). Nota-se a partir da análise de keogramas que a onda tem fase ascendente, isto é, aparece primeiro na camada de emissão do OH e, aproximadamente 25 min depois, aparece na emissão do O₂.

A Figura 4.11 apresenta o resultado da trajetória da onda de gravidade de média escala com propagação de fase ascendente sob o mapa do Brasil. No painel (a), são apresentados os parâmetros característicos observados da onda: $\lambda_H = 429,9$ km, $\tau = 62,8$ min, $c_H = 114,0$ m/s, $\phi = 70,1^\circ$. A trajetória da onda também é apresentada em função do tempo, onde a linha sólida horizontal representa a altura da camada de emissão da aeroluminescência. Os quadrados preenchidos representam os pontos onde o fluxo de *momentum* da onda é máximo; os quadrados vazios representam os pontos onde o fluxo de *momentum* cai para 10% do valor máximo do fluxo. O painel (b) apresenta o mapa do Brasil com a trajetória da onda de gravidade os contornos denotam a temperatura de brilho no topo de nuvens. As convecções profundas são observadas nas regiões onde a temperatura é menor do que -70°C . A “cruz” representa a região onde ocorre a reflexão da trajetória da onda.

Uma análise no entorno da posição final da onda na região da troposfera não mostra nenhuma possível fonte convectiva próxima (veja Figura 4.11(b)). Por outro lado, a posição termosférica da onda de média escala é rodeada de sistemas convectivos que poderiam gerar ondas primárias. Estas ondas primárias se propagando dentro da termosfera-ionosfera poderiam ser capazes de gerar essa onda (VADAS; BECKER, 2018). Ao analisar a propagação vertical da onda e, considerando a velocidade de fase horizontal elevada da onda, é improvável que a mesma possa ter experimentado uma reflexão na termosfera para produzir o padrão de fase descendente que foi observado. Isto nos leva a concluir que a onda observada, muito provavelmente, teve sua fonte

na termosfera e, portanto, deve ser uma onda secundária ou terciária.

Figura 4.10 - Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 21 de outubro de 2003.



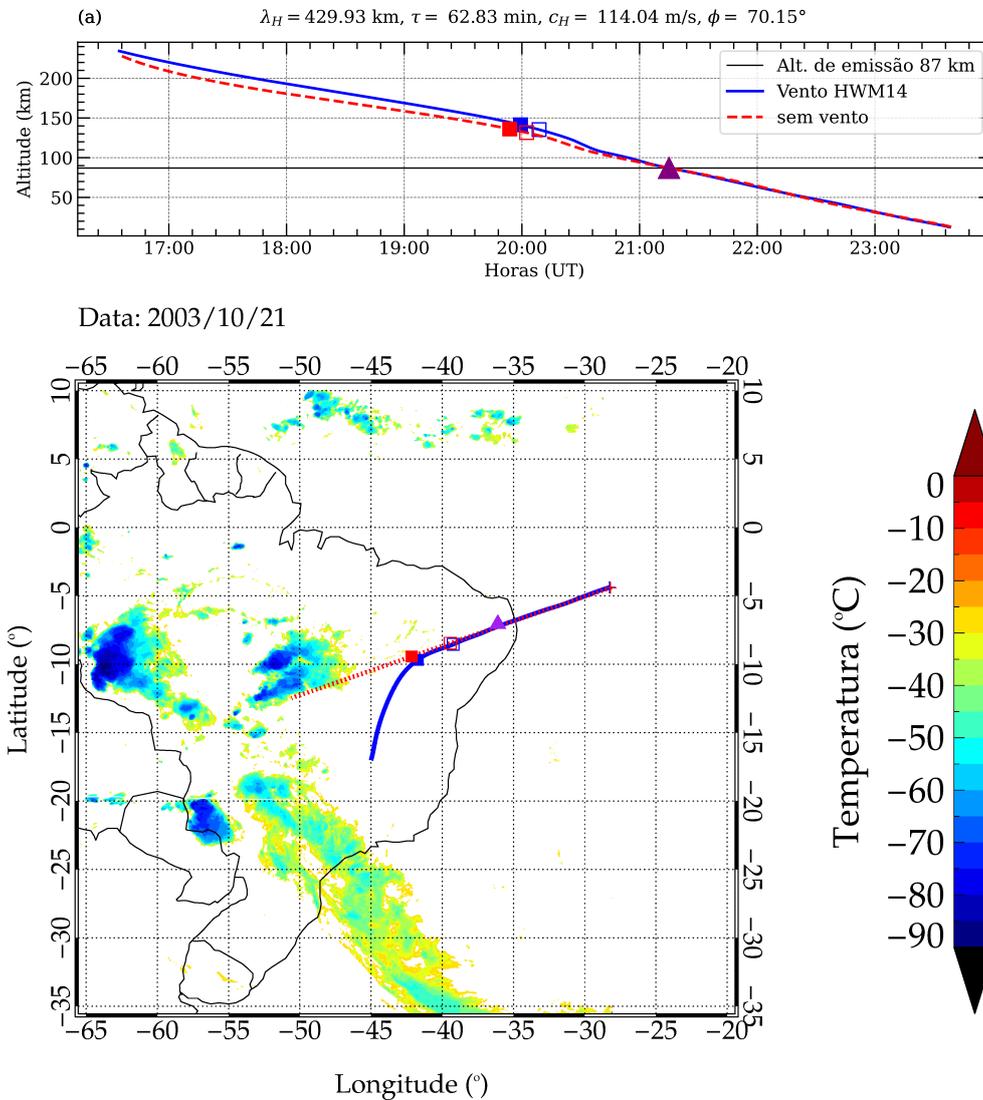
Em (a), coluna dos keogramas interpolados na direção de propagação da onda de gravidade de média escala. Na coluna (b), estão os mesmos keogramas na direção de propagação da onda, porém, com a aplicação de um filtro passa banda. Na coluna (c), observa-se a fase da onda na emissão do O₂ e do OH, bem como os valores resultantes da análise de keograma na direção de propagação da onda, tais como, λ_H , τ , λ_Z , e $\Delta\Phi$. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

Para se ter uma ideia da contribuição desta técnica de observação de ondas de gravidade com múltiplas imagens da aeroluminescência, repetiu-se o exemplo anterior, supondo que a fase da onda fosse descendente. Isto é uma premissa utilizada para aplicação do modelo *ray tracing* por todos os trabalhos publicados na literatura. A trajetória hipotética da onda é mostrada na Figura 4.12. Percebe-se claramente que a posição troposférica da onda coincide com um complexo convectivo. Comparando as situações com e sem vento no modelo do *ray tracing*, não houve mudanças significativas da posição troposférica. A conclusão seria óbvia, a fonte desta onda de gravidade seria muito provavelmente aquele sistema convectivo mostrado na Figura 4.12. Porém, isto não é verdade para a presente onda.

Desta forma, pode-se concluir que, para uma aplicação mais precisa da técnica de *ray tracing*, é interessante conhecer a propagação vertical da fase da onda. Ainda porque, pelos resultados apresentados nesse trabalho de tese, parece existir uma parcela significativa de ondas com propagação de fase ascendentes.

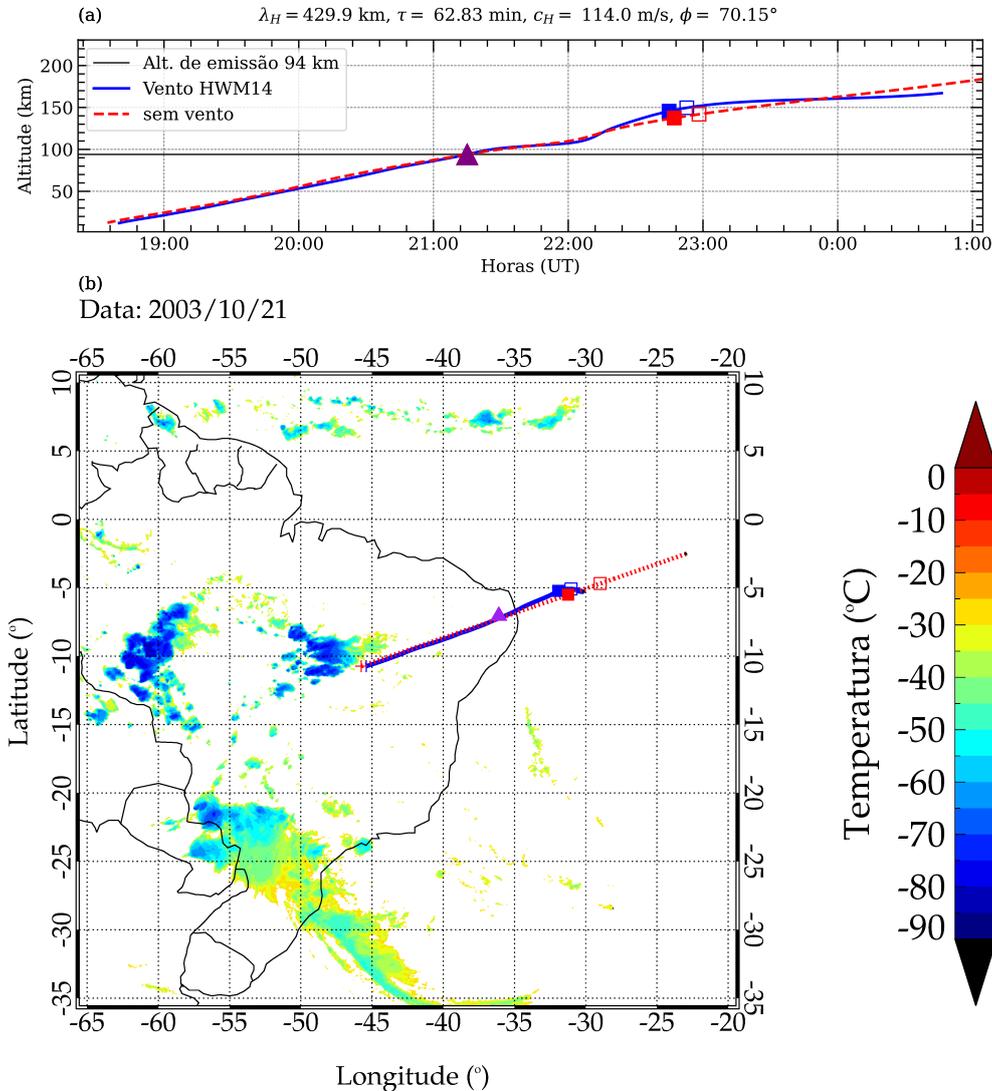
Figura 4.11 - Trajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 23 h 30 min.



(a) Trajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo. (b) Mapa do Brasil com a trajetória da onda de gravidade e a sobreposição da temperatura de brilho do topo de nuvens, obtidos pelo satélite GOES-12, para o dia 21 de outubro de 2003, às 23 h 30 min. Os quadrados preenchidos representam o fluxo de *momentum* máximo da onda (azul com vento modelado e vermelho sem vento). Os quadrados vazios representam os pontos da trajetória onde o fluxo de *momentum* é menor do que 10% do fluxo máximo.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.12 - Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 17 h 30 min. Neste caso, supôs-se que a onda possui propagação de fase descendente, com sua origem na troposfera.

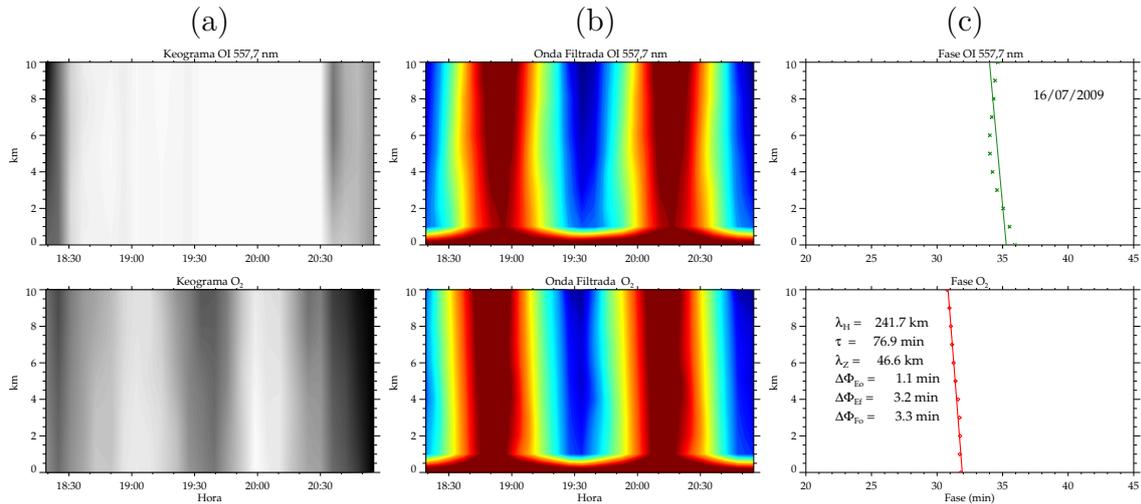


(a) Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala em função do tempo. (b) Mapa do Brasil com a retrotrajetória da onda de gravidade e a sobreposição da temperatura de brilho do topo de nuvens, obtidos pelo satélite GOES-12 para o dia 21 de outubro de 2003. Aqui assumiu-se que a onda possui propagação de fase descendente, i.e., com origem na troposfera. Os quadrados preenchidos representam o fluxo de *momentum* máximo (azul com vento modelado e vermelho sem vento). Os quadrados vazios representam os locais onde o fluxo de *momentum* é menor do que 10% do fluxo máximo.

Fonte: Produção do autor.

Outro caso de estudo interessante, que reforça o que está sendo discutido, foi identificado em 16 de julho de 2009 sobre São João do Cariri (PB). A propagação de fase da onda é mostrado na Figura 4.13. Claramente, a onda de gravidade de média escala aparece primeiro na emissão do O₂ e depois na camada de emissão do OI 557,7 nm. Os parâmetros observados para esta onda de gravidade foram: comprimento de onda horizontal de 241,7 km, período observado de 76,9 min, velocidade de fase horizontal de 52,3 m/s, e se propagando 213° a partir do norte. Note que este evento não é tão rápido quanto o evento de onda observado em 21 de outubro de 2003. Como consequência, esse evento está mais susceptível à ação de mudanças bruscas no vento.

Figura 4.13 - Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 16 de julho de 2009.



Em (a), coluna dos keogramas interpolados na direção de propagação da onda de gravidade de média escala. Na coluna (b), estão os mesmos keogramas na direção de propagação da onda, porém, com a aplicação de um filtro passa banda. Na coluna (c), observa-se a fase da onda na emissão do OI 557,7 nm e do OH, bem como os valores resultantes da análise de keograma na direção de propagação da onda, tais como, λ_H , τ , λ_Z , e $\Delta\Phi$. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.14 mostra a previsão da trajetória da onda. Basicamente o que difere estas próximas duas figuras das figuras das trajetória do evento de 21 de outubro de 2003 é a projeção das imagens do satélite GOES-12. Nesse exemplo, é mostrado uma

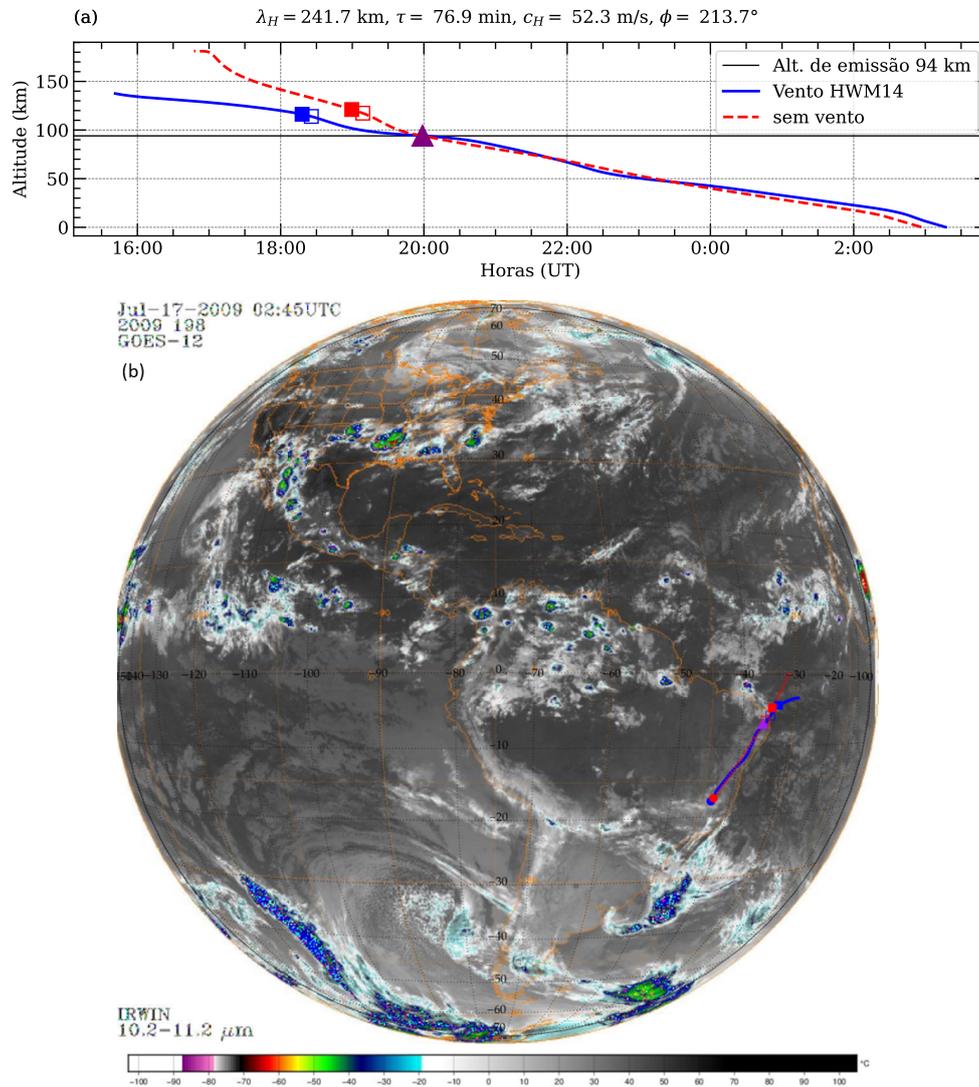
área geográfica maior de observação. Nota-se que a retrotrajetória da onda sugere que ela venha de uma região da baixa termosfera, em torno de 130 km de altitude. Horizontalmente, próximo a essa região, há um núcleo convectivo à nordeste do Rio Grande do Norte e também há forte convecção na zona de convergência intertropical. Estes fenômenos meteorológicos podem gerar possíveis ondas primárias que, ao se propagarem para a região da baixa termosfera, gerariam ondas secundárias com características espectrais do evento observado em 16 de julho de 2009.

Outra possibilidade razoável seria uma onda primária produzida em algum dos sistemas convectivos mencionados acima e que sofreria uma reflexão vertical. Com isto, a assinatura da onda teria o padrão de fase consistente com o que foi observado nas emissões da aeroluminescência (WALTERSCHEID et al., 2000).

Supondo que a onda de gravidade observada tivesse propagação de fase descendente, a trajetória da onda teria as características mostradas na Figura 4.15 e, certamente, processos convectivos encontrados na zona de convergência intertropical, denunciados pela convecção profunda inferida na temperatura de brilho do topo de nuvens, seriam sugeridos como possíveis fontes para este evento. Note, que embora a posição troposférica da onda não coincida perfeitamente com as fontes troposféricas, mesmo assim estão dentro do raio de excitação do fenômeno meteorológico (VADAS; FRITTS, 2009).

Estes dois estudos de caso fortemente sugerem que é fundamental conhecer o sentido de propagação vertical da fase das ondas de gravidade para que se possa aplicar o modelo *ray tracing* para ondas de gravidade na atmosfera de forma mais assertiva. Conseqüentemente, a metodologia apresentada neste trabalho de tese é relevante e importante para investigações sobre ondas de gravidade de média escala utilizando imagens da aeroluminescência.

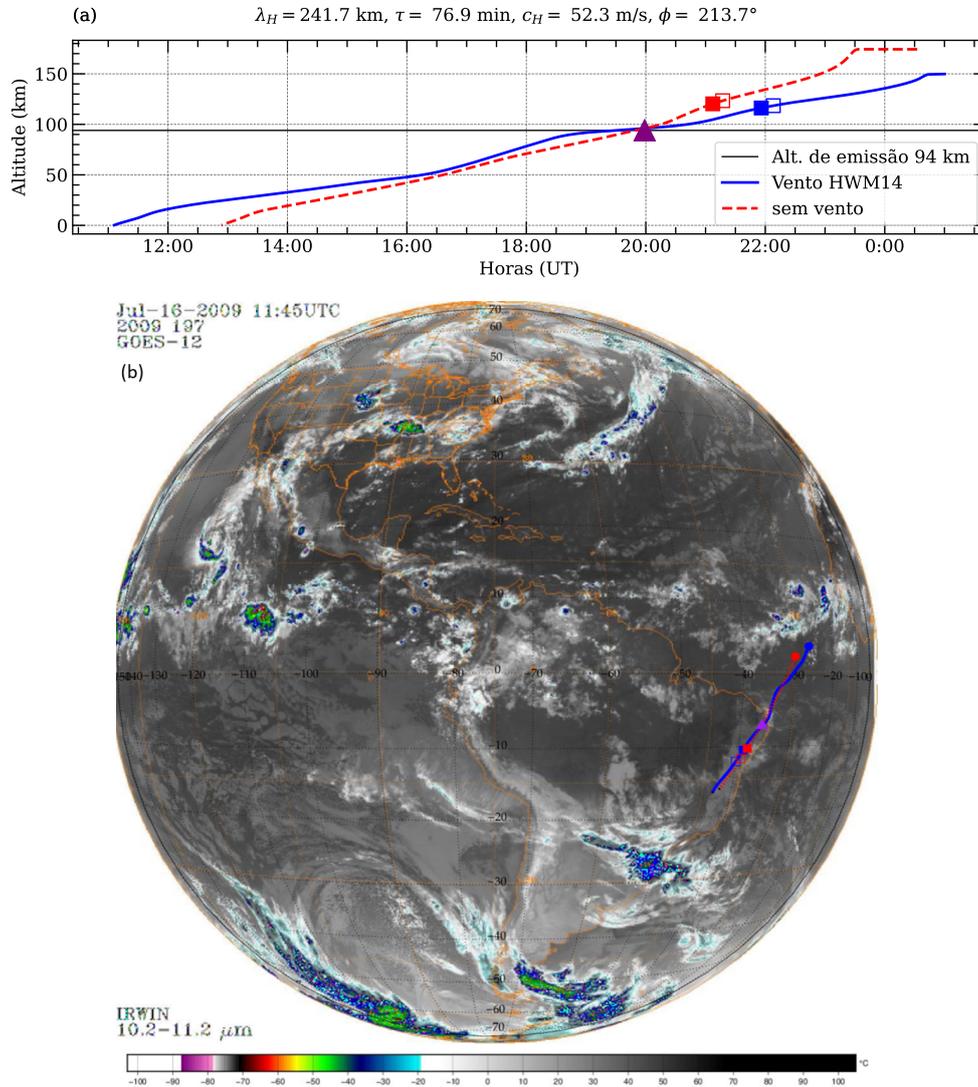
Figura 4.14 - Trajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 02 h 45 min.



(a) Trajetória da onda de gravidade de média escala em função do tempo. (b) Mapa global com a sobreposição da temperatura de brilho do topo de nuvens, obtidos pelo satélite GOES-12 para o dia 16 de julho de 2009, e a trajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente. Os quadrados preenchidos representam o fluxo de *momentum* máximo (azul com vento modelado e vermelho sem vento). Os quadrados vazios representam os locais onde o fluxo de *momentum* é menor do que 10% do fluxo máximo.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.15 - Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase ascendente, em função do tempo, sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens para às 11 h 45 min. Neste caso, supôs-se que a onda possui propagação de fase descendente, com sua origem na troposfera.



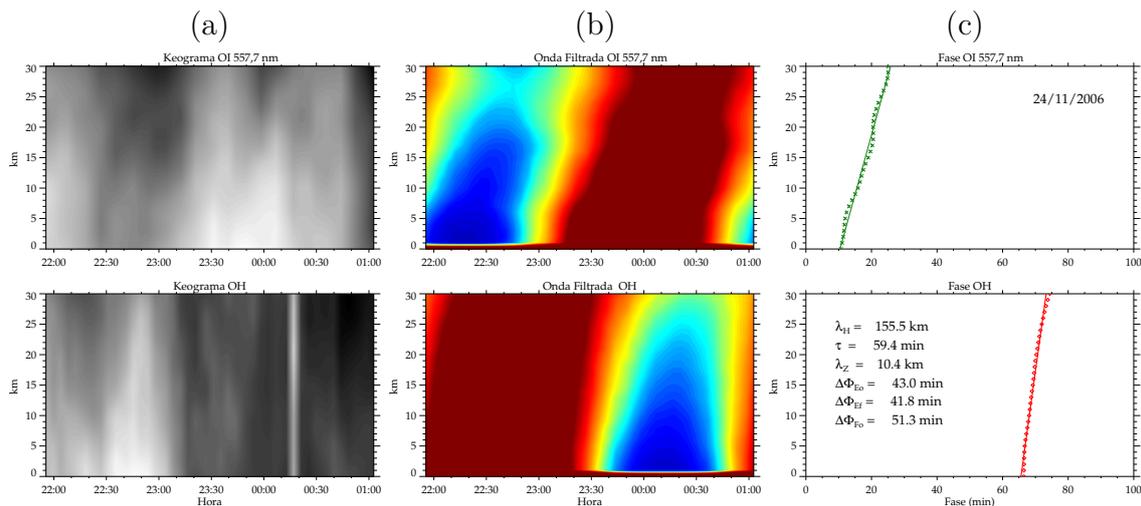
(a) Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala em função do tempo. (b) Mapa do globo com a retrotrajetória da onda de gravidade e a sobreposição da temperatura de brilho do topo de nuvens, obtidos pelo satélite GOES-12 para o dia 16 de julho de 2009. Aqui assumiu-se que a onda possui propagação de fase descendente, i.e., com origem na troposfera. Os quadrados preenchidos representam o fluxo de *momentum* máximo (azul com vento modelado e vermelho sem vento). Os quadrados vazios representam os locais, onde o fluxo de *momentum* é menor do que 10% do fluxo máximo.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2 Estudo de caso: fonte de onda de gravidade de média escala com propagação de fase descendente

Ondas de gravidade com propagação de fase descendentes possuem fluxo de energia ascendente e transportam energia e *momentum* dos baixos para os altos níveis da atmosfera. Na Figura 4.16, pode-se verificar o resultado da aplicação da técnica de keograma na direção de propagação de uma onda de gravidade observada em 24 de novembro de 2006. Observa-se a fase com propagação descendente, ou seja, a onda perturba primeiro a emissão do OI 557,7 nm e depois a emissão do OH. Esta onda apresenta comprimento de onda horizontal de 155,5 km, período observado de 59,4 min, velocidade de fase de 43,6 m/s e se propagando a 45° a partir do norte.

Figura 4.16 - Representação da fase da onda de gravidade de média escala observada na noite de 24 de novembro de 2006.

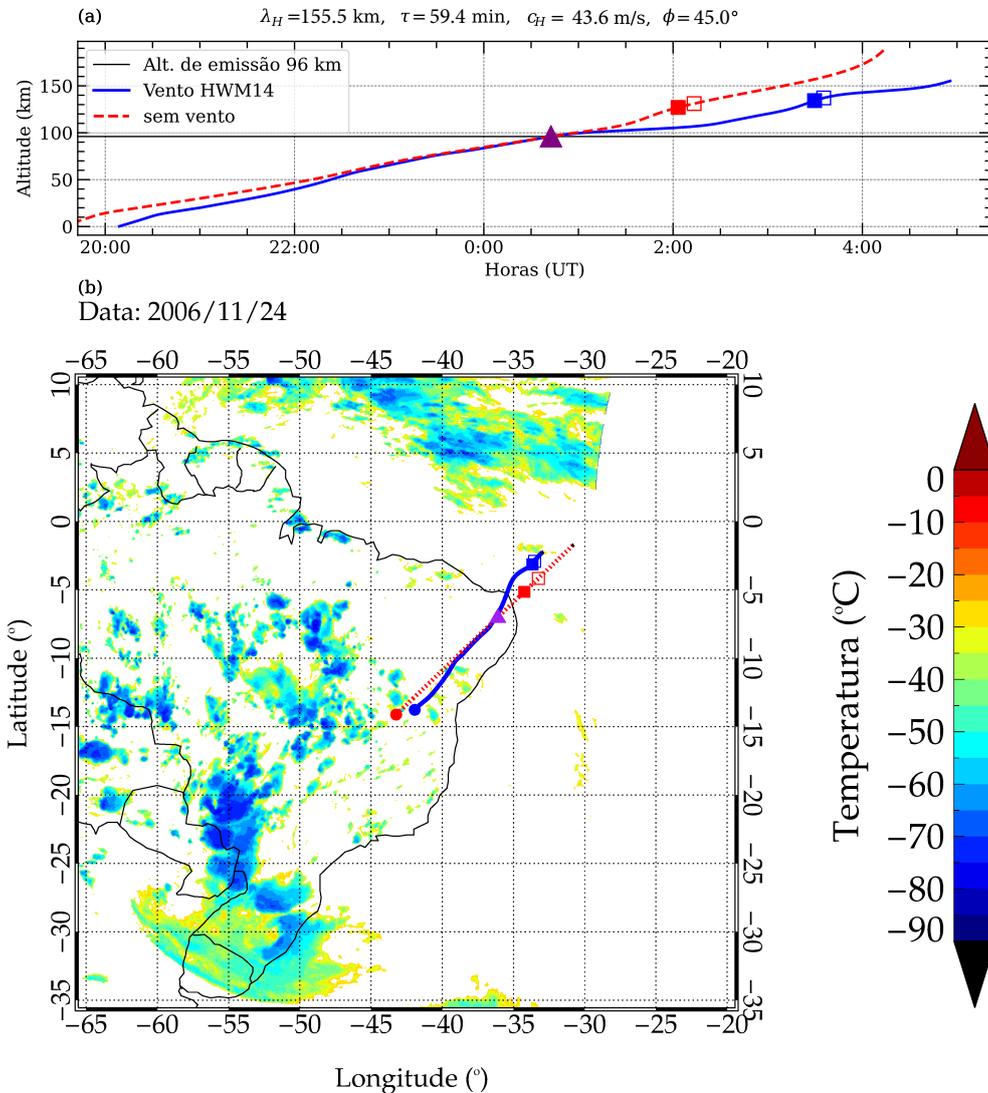


Em (a), coluna dos keogramas interpolados na direção de propagação da onda de gravidade de média escala. Na coluna (b) estão os mesmos keogramas na direção de propagação da onda, porém, com a aplicação de um filtro passa banda. Na coluna (c) observa-se a fase da onda na emissão do OI 557,7 nm e do OH, bem como os valores resultantes da análise de keograma na direção de propagação da onda, tais como, λ_H , τ , λ_Z , e $\Delta\Phi$. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.17 apresenta a retrotrajetória de um caso interessante da onda de gravidade observada em São João do Cariri (PB) na noite de 24 de novembro de 2006.

Figura 4.17 - Retrotrajetória da onda de gravidade de média escala, com propagação de fase descendente, em função do tempo, e sobre o mapa da temperatura de brilho do topo de nuvens às 19 h 30 min.



Em (a), retrotrajetória da onda de gravidade de média escala em função do tempo. Em (b), mapa do Brasil com a retrotrajetória da onda de gravidade e a sobreposição da temperatura de brilho do topo de nuvens, obtidos pelo satélite GOES-12 para o dia 24 de novembro de 2006. Os quadrados preenchidos representam o fluxo de *momentum* máximo (azul com vento modelado e vermelho sem vento). Os quadrados vazios representam o local onde o fluxo de *momentum* é menor do que 10% do fluxo máximo.

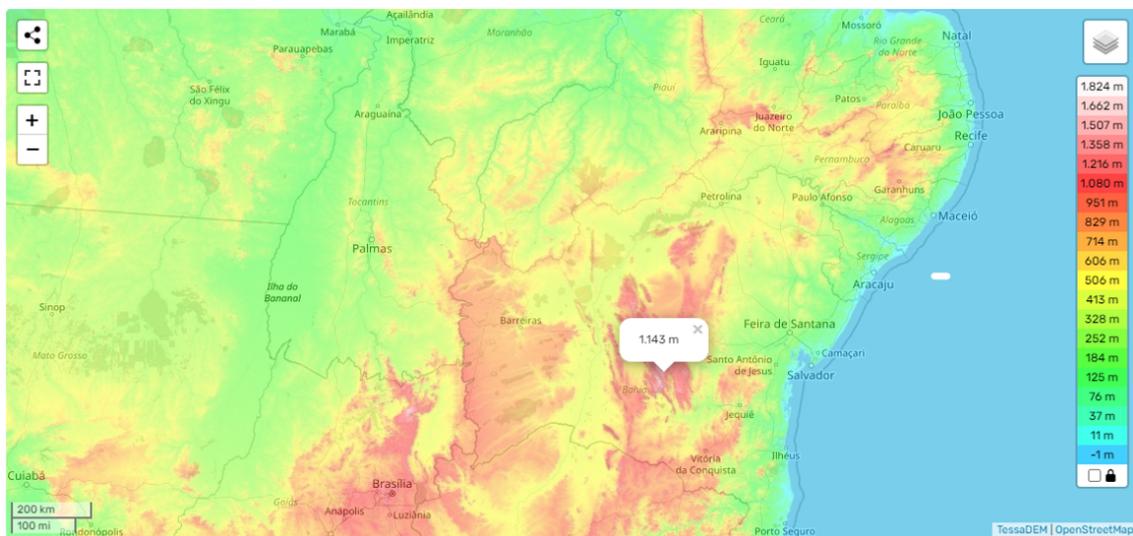
Fonte: Produção do autor.

A onda levou $\sim 5 \text{ h}$ para se propagar da troposfera até ser observada nas camadas da aeroluminescência. Analisando o mapa, percebe-se que na região de parada da retrotrajetória não há sistemas convectivos profundos (temperaturas de brilho do topo de nuvem bem baixas), como aparece mais no interior do Brasil. Alguns núcleos

convectivos próximos poderiam até excitar esse estrutura de onda, mas as convecções mais intensas estão posicionadas em distâncias horizontais iguais ou superiores a 500 km.

O evento estudado, por sua vez, apresentou a posição de parada no solo e em uma região montanhosa como pode ser vista na carta de relevo da [Figura 4.18](#). O escoamento ao cruzar regiões montanhosas é capaz de gerar ondas de gravidade como já foi discutido oportunamente ao longo desta tese. Adicionalmente, tomou-se curvas de escoamento do fluido horizontal na [Figura 4.19](#) em um nível de pressão de 850 hPa. Percebe-se que o escoamento é ortogonal às frentes de onda de gravidade observadas. Este escoamento ao subir a cadeia de montanhas mostradas na [Figura 4.18](#) poderia produzir ondas de gravidade. Sendo portanto, uma alternativa plausível e consistente para ser sugerida como possível fonte de onda. Percebe-se apenas que o escoamento não estava tão intenso no instante em que a onda estaria próxima destes níveis.

Figura 4.18 - Mapa topográfico do Brasil.



Mapa topográfico do Brasil indicando a altitude do relevo nas regiões brasileiras, dada pela escala de cores a direita do mapa.

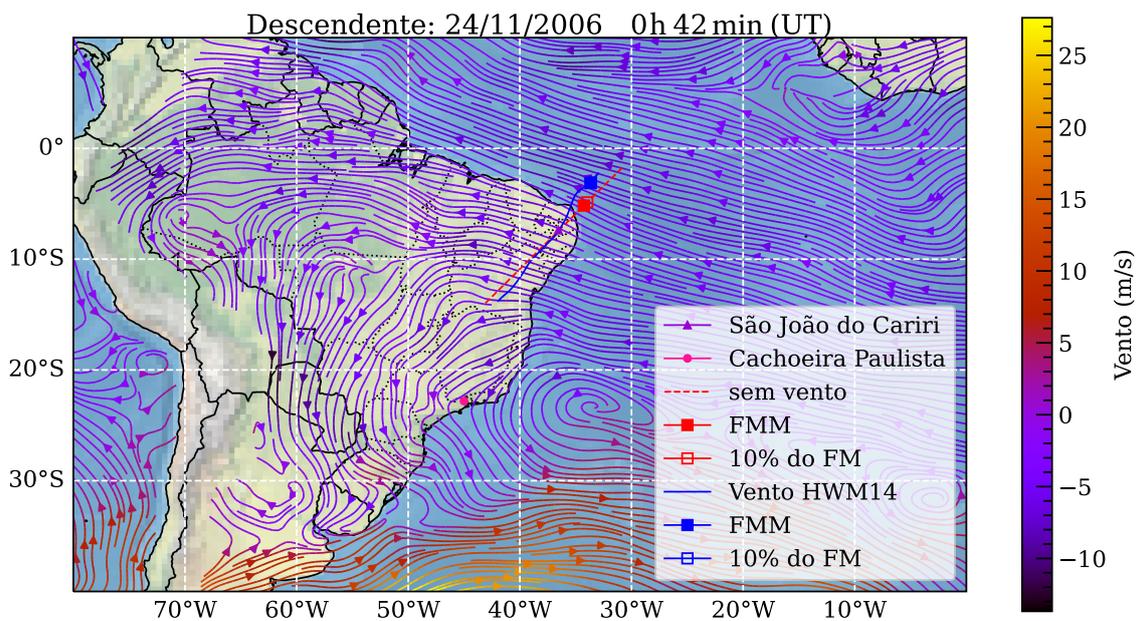
Fonte: Disponível em [TOPOGRAPHIC \(2022\)](#).

Uma terceira possibilidade de fonte seria a onda encontrar em algum nível crítico ao longo da sua trajetória devido a um cisalhamento do vento horizontal. No entanto, a velocidade de fase da onda é relativamente elevada comparada com os ventos

observados na homosfera. Portanto, essa terceira possibilidade de fonte seria a menos provável de todas.

Para essa onda investigada, surgem duas possibilidades de fontes troposféricas, ambas sem muita expressividade teórica para a sua geração. Ainda que o vento utilizado fosse um vento real medido, isto não interferiria tanto na trajetória da onda. A comparação da trajetória com (azul) e sem vento (vermelha) fornece esta noção qualitativa. A contribuição da técnica de *ray tracing* em ampliar as possibilidades para as fontes de geração de ondas de gravidade chama a atenção para um melhor aprofundamento sobre suas possíveis fontes, até porque casos como esse aparecem com certa frequência nas observações de aeroluminescência (TAKAHASHI et al., 2011; PAULINO, 2012).

Figura 4.19 - Isolinhas do vento horizontal sobre a América do Sul e Oceano Atlântico para a noite de 24/11/2006 às 0 h 42 min.



Escoamento do vento horizontal em 850 hPa, em torno de 1,5 km de altitude.

Fonte: Produção do autor.

A trajetória da onda de gravidade em estudo que adentra a região da termosfera, sugere que a onda se dissipa na baixa termosfera isto potencializa as ondas de gravidade como agente de acoplamento entre as atmosferas neutra e ionizada. Estes aspectos foram discutidos em mais detalhes por Paulino (2012) e estão fora do escopo deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram estudadas ondas de gravidade de média escala observadas a partir das imagens de múltiplas emissões de aeroluminescência noturna. As observações foram realizadas em São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O) e em Cachoeira Paulista (22,7°S; 45,0°O), no período de 1998 até 2013. O objetivo geral do trabalho foi caracterizar os parâmetros horizontais das ondas de gravidade de média escala, observadas simultaneamente em diferentes camadas de emissão da aeroluminescência. Assim, para atingir este objetivo foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- I. Definir uma metodologia para a construção dos keogramas na direção de propagação das ondas de gravidade de média escala;
- II. Definir uma metodologia para calcular a fase das ondas de gravidade de média escala e determinar o seu comprimento de onda vertical e a sua condição de propagação vertical;
- III. Caracterizar ondas de gravidade de média escala observadas simultaneamente em função da propagação de fase (descendente ou ascendente) na região MLT;
- IV. Determinar a região de origem das ondas de gravidade de média escala utilizando o modelo *ray tracing*;
- V. Investigar as fontes de geração das ondas de gravidade de média escala.

A metodologia para construir os keogramas na direção de propagação das ondas de gravidade foi desenvolvida e empregada para investigar a propagação vertical das fases da onda considerando que as emissões são provenientes de altitudes médias diferentes na região da mesosfera e baixa termosfera. Também foi desenvolvida uma metodologia para determinar a diferença de fase causada pela propagação das ondas de gravidade através das camadas da aeroluminescência. A defasagem das ondas em diferentes camadas da aeroluminescência permitiu inferir se a onda possui propagação de fase ascendente ou descendente. A importância desta técnica é que, de acordo com a teoria, o sentido vertical de propagação do fluxo de energia e *momentum* é praticamente perpendicular à propagação da fase, o que resulta verticalmente, em sentidos opostos de propagação de energia e de fase da onda.

No total, 38 eventos de ondas de gravidade de média escala foram observados, sendo que 25 eventos (66%) foram identificados com propagação de fase ascendentes, isto

é, verticalmente propagantes para baixo; e 13 eventos (34%) com propagação de fase descendentes, isto é, verticalmente propagantes para cima. Estes são um dos principais resultados obtidos na execução desta tese. Nos eventos estudados foi aplicada a técnica de *ray tracing* para entender as propriedades de propagações deles na atmosfera neutra e ionizada, bem como, inferir possíveis fontes geradoras dos eventos e discutir efeitos dissipativos causados pela viscosidade molecular e a difusividade térmica. Ao longo do trabalho, comparações entre os eventos com propagação de fase ascendentes e descendentes foram feitas e também comparações com trabalhos publicados na literatura. Os principais resultados encontrados neste trabalho de tese foram:

- I. As características das ondas de gravidade de média escala: comprimento de onda horizontal entre 150 e 300 km, velocidade de fase horizontal entre 40 e 70 m/s, período entre 30 e 70 min e direção de propagação preferencial para nordeste, leste e sudeste;
- II. Os resultados do modelo *ray tracing* mostrou que as ondas de gravidade com propagação de fase ascendente são oriundas da mesosfera (16%), baixa termosfera (56%) e da termosfera (28%);
- III. As ondas de gravidade com propagação de fase descendente na sua grande maioria possuem sua origem na baixa troposfera (93%) e apenas 7% na região da mesosfera.
- IV. Dois estudos de caso para as ondas com propagação de fase ascendentes foram realizados, os quais mostram que estas ondas podem ter sua origem na baixa termosfera devido ao depósito de *momentum* e energia de ondas primárias ou secundárias. Contudo mais investigações são necessárias;
- V. Um estudo de caso de ondas de gravidade com propagação de fase descendente mostrou que a onda foi gerada na baixa troposfera numa área sem a presença de convecções profundas, mas sobre uma região montanhosa. Contudo, uma análise preliminar mostra que o escoamento do vento horizontal em baixos níveis (850 hPa, $\sim 1,5$ km de altitude) não seria capaz de gerar ondas de montanhas. Desta forma, mais investigações são necessárias para elucidar os mecanismos de geração dessas ondas.

As principais conclusões obtidas com o presente trabalho são: (1) o método de keogramas na direção de propagação da onda é eficiente para inferir a direção de

propagação da fase das ondas de gravidade de média escala, quando há pelo menos a observação em duas camadas de emissão simultâneas da aeroluminescência; (2) há um número significativo de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendentes que são possíveis de se observar na região da mesosfera e baixa termosfera; (3) as ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendentes possuem características espectrais bem semelhantes às ondas de gravidade de média escala com propagação de fase descendentes, o que torna esta porção do espectro de ondas de gravidade praticamente indistinguível para se observar a partir de técnicas que só observam a estrutura horizontal das ondas; (4) como consequência da semelhança espectral das ondas, a propagação vertical das ondas com propagação de fase ascendente produz praticamente os mesmos resultados quando comparadas às ondas com propagação de fase descendentes, i.e., a altitude de penetração, tempo e distância de propagação, o que sugere que os processos dissipativos atuam da mesma forma para ambas as formas de propagação das ondas de gravidade; (5) as origens termosféricas das ondas de média escala com propagação de fase ascendentes podem ser via a deposição de *momentum* e energia de ondas primárias ou secundárias, ou até mesmo da reflexão de ondas outrora com propagação de fase descendentes; (6) o sucesso da aplicação da técnica de *ray tracing*, para investigar as fontes de ondas de gravidade na troposfera, depende do conhecimento de como a fase da onda se propaga verticalmente e (7) o uso da técnica de *ray tracing* para localizar as regiões das fontes de ondas de gravidade de média escala podem levar a múltiplas possibilidades, o que sugere um olhar mais crítico sobre as possíveis fontes desses eventos.

A análise e a interpretação dos resultados revelaram pelo menos três questões científicas relacionadas ao tema abordado necessita de investigações adicionais, e que não puderam ser resolvidas durante a execução deste trabalho de tese, a saber:

- I. A porcentagem das ondas de gravidade de média escala presentes nas imagens da aeroluminescência mostrada neste trabalho constitui um parâmetro estatístico para a região da MLT? Sugestão de investigação: aplicar a técnica desenvolvida nesta tese para um banco de dados mais robusto a fim de garantir a confiabilidade estatística necessária;
- II. O número expressivo de ondas de gravidade de média escala com fase ascendente também se reproduz para ondas de pequena escala? Sugestão de investigação: refinar a técnica de análise bidimensional de ondas de gravidade para tentar fazer análise espectral unidimensional na direção das ondas e conse-

quentemente determinar as defasagens nas imagens da aeroluminescência em múltiplas camadas de emissão;

- III. Qual seria a proporção entre as ondas de gravidade de média escala secundárias ou terciárias e as ondas de gravidade refletidas na termosfera? Sugestão de investigação: aplicar a técnica de *ray tracing* em um conjunto maior de ondas de gravidade de média escala com propagação de fase ascendentes para tentar inferir as altitudes de penetração na termosfera-ionosfera e, a partir deste mapeamento, saber o quantitativo de ondas oriundas da baixa termosfera. Ondas advindas destas altitudes são mais propícias de reflexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, L. M. **Características das ondas de gravidade observadas na região central do Brasil**. 81 p. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) — Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2010. 28, 37
- ANDREWS, D. G.; LEOVY, C. B.; HOLTON, J. R. **Middle atmosphere dynamics**. [S.l.]: Academic Press, 1987. 11, 27
- ANTUNES, C. E. **Estudo de ondas de gravidade-acústica observadas na MLT na Região Amazônica e no Sul do Brasil**. 181 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2018. 8, 62
- BAGESTON, J. V. **Caracterização de ondas de gravidade mesosféricas na Estação Antártica Comandante Ferraz**. 148 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010. 28, 74
- BARTH, C. A. Three-body reactions. **Annales Geophysicae**, v. 20, p. 182–198, 1964. 9
- BARTH, C. A.; HILDEBRANDT, A. F.; PATAPOFF, M. Atomic oxygen and nitrogen density measurements with epr. **Discussions of the Faraday Society**, v. 33, p. 162–172, 1962. 9
- BEER, T. **Atmospheric Waves (Book Review)**. 1976. 1
- BILIBIO, A. V. **Ondas de gravidade de média escala observadas na aeroluminescência noturna sobre Cachoeira Paulista**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos (SP), 2017. 4, 36, 37, 40, 41, 45, 61, 62, 64, 71
- BOSSERT, K.; KRUSE, C. G.; HEALE, C. J.; FRITTS, D. C.; WILLIAMS, B. P.; SNIVELY, J. B.; PAUTET, P.-D.; TAYLOR, M. J. Secondary gravity wave generation over new zealand during the deepwave campaign. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 15, p. 7834–7850, 2017. 30
- BURITI, R. A. C. **Estudo de parâmetros de ondas de gravidade por medidas simultâneas de radar MU e fotômetro em Shigaraki (35° N, 136° L), Japão**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 1997. 8, 28
- CHAMBERLAIN, J. W.; HUNTEN, D. M. **Theory of planetary atmospheres: an introduction to their physics and chemistry**. [S.l.]: Academic Press, 1990. 7
- CHAPMAN, S. Some phenomena of the upper atmosphere. **Proceedings of the Physical Society. Section B**, v. 64, n. 10, p. 833, 1951. 9

CPTEC, C. de Previsão de Tempo e E. C. **INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Banco de dados de imagens.** Novembro 2022. Disponível em: <<<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/>>>. 87

DING, F.; YUAN, H.; WAN, W.; REID, I. M.; WOITHE, J. M. Occurrence characteristics of medium-scale gravity waves observed in oh and oi nightglow over adelaide (34.5° s, 138.5° e). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 109, n. D14, 2004. 71

DROB, D. P.; EMMERT, J. T.; MERIWETHER, J. W.; MAKELA, J. J.; DOORNBOS, E.; CONDE, M.; HERNANDEZ, G.; NOTO, J.; ZAWDIE, K. A.; MCDONALD, S. E.; HUBA, J. D.; KLENZING, J. H. An update to the horizontal wind model (hwm): the quiet time thermosphere. **Earth and Space Science**, v. 2, n. 7, p. 301–319, 2015. Disponível em: <<<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014EA000089>>>. 58

DROB, D. P. et al. An empirical model of the earth's horizontal wind fields: Hwm07. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A12, 2008. 58

_____. An update to the horizontal wind model (hwm): the quiet time thermosphere. **Earth and Space Science**, v. 2, n. 7, p. 301–319, 2015. 58

DUCHON, C. E. Lanczos filtering in one and two dimensions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, n. 8, p. 1016–1022, ago. 1979. 50

EJIRI, M.; SHIOKAWA, K.; OGAWA, T.; KUBOTA, M.; NAKAMURA, T.; TSUDA, T. Dual-site imaging observations of small-scale wave structures through oh and oi nightglow emissions. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 10, p. 85–1, 2002. 2

ESSIEN, P. **Observações de longo prazo de ondas de gravidade de média escala sobre a região equatorial brasileira.** 65 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba - PB, 2015. 4, 40, 61, 64, 71

FECHINE, d. A. F. J. **Estudo de frentes mesosféricas na região equatorial.** 313 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2007. Disponível em: <<<http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/SodpS>>>. Acesso em: 21 dez. 2022. 25

FIGUEIREDO, C. A. O. B. **Estudo de distúrbios ionosféricos propagantes no continente Sul Americano.** 201 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2017. 41, 43, 45, 46, 47

FRITTS, D. C. Gravity wave saturation in the middle atmosphere: a review of theory and observations. **Reviews of Geophysics**, v. 22, n. 3, p. 275–308, 1984. 1

FRITTS, D. C.; ALEXANDER, M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. **Reviews of Geophysics**, v. 41, n. 1, 2003. 1, 10, 19, 21, 26, 29, 87

FRITTS, D. C.; VADAS, S. L.; RIGGIN, D. M.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.; KAMALABADI, F.; LIU, H.-L.; FEJER, B. G.; TAYLOR, M. J. Gravity wave and tidal influences on equatorial spread f based on observations during the spread f experiment (SpreadFEx). **Annales Geophysicae**, v. 26, n. 11, p. 3235–3252, oct 2008. Disponível em: <<<https://angeo.copernicus.org/articles/26/3235/2008/>>>. 72, 79, 83

GARCIA, F.; TAYLOR, M. J.; KELLEY, M. Two-dimensional spectral analysis of mesospheric airglow image data. **Applied Optics**, v. 36, n. 29, p. 7374–7385, 1997. 37

GOSSARD, E. E.; HOOKE, W. H. **Waves in the atmosphere: atmospheric infrasound and gravity waves-their generation and propagation**. [S.l.]: Atmospheric Science, 1975. 2, 12, 17, 20, 56, 73

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 20

HEALE, C. J.; BOSSERT, K.; VADAS, S. L.; HOFFMANN, L.; DÖRNBRACK, A.; STOBER, G.; SNIVELY, J. B.; JACOBI, C. Secondary gravity waves generated by breaking mountain waves over europe. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 5, mar 2020. 80

HEALE, C. J.; INCHIN, P. A.; SNIVELY, J. B. Primary versus secondary gravity wave responses at f-region heights generated by a convective source. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 127, n. 1, dec 2021. 80

HEDIN, A. E. et al. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 13, p. 1421–1447, 1996. 58

HINES, C. Propagation velocities and speeds in ionospheric waves: a review. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 36, n. 7, p. 1179–1204, 1974. ISSN 0021-9169. Disponível em: <<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002191697490107X>>>. 1

HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. **Canadian Journal of Physics**, v. 38, n. 11, p. 1441–1481, 1960. 1, 17, 29

HUANG, K. M.; LIU, A. Z.; ZHANG, S. D.; YI, F.; HUANG, C. M.; GONG, Y.; GAN, Q.; ZHANG, Y. H.; WANG, R. Simultaneous upward and downward propagating inertia-gravity waves in the mlt observed at andes lidar observatory. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 5, p. 2812–2830, 2017. 3

HUANG, T.-Y.; GEORGE, R. Simulations of gravity wave-induced variations of the oh (8, 3), o₂ (0, 1), and o (1s) airglow emissions in the mlt region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 3, p. 2149–2159, 2014. 9

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, p. 26301–26313, 1997. 25

JENKINS, G. M.; WATTS, D. G. **Spectral analysis and its applications**. Holden-Day, 1969. (Holden-Day series in time series analysis and digital signal processing). ISBN 9780816244645. Disponível em: <<<https://books.google.com.br/books?id=1kBMAAAAMAAJ>>>. 49

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid mechanics**. [S.l.: s.n.], 2004. 12, 13

LIGHTHILL, J. **Waves in fluids**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1978. 53

LINDZEN, R. S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 86, n. C10, p. 9707–9714, 1981. 2

MAEKAWA, R. **Observations of gravity waves in the mesopause region by multicolor airglow imaging**. Thesis (Master) - Kyoto University, 2000. 10, 37

MARKS, C. J.; ECKERMANN, S. D. A three-dimensional nonhydrostatic ray-tracing model for gravity waves: formulation and preliminary results for the middle atmosphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 11, p. 1959–1984, 1995. 19

MEDEIROS, A.; TAKAHASHI, H.; BURITI, R.; FECHINE, J.; WRASSE, C.; GOBBI, D. Mlt gravity wave climatology in the south america equatorial region observed by airglow imager. **Annales Geophysicae**, v. 25, 03 2007. 36

MEDEIROS, A.; TAYLOR, M. J.; TAKAHASHI, H.; BATISTA, P.; GOBBI, D. An investigation of gravity wave activity in the low-latitude upper mesosphere: propagation direction and wind filtering. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D14, 2003. 26

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 189 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2001. 7, 8, 19, 28, 33, 35, 36

MEINEL, I. A. B. Oh emission bands in the spectrum of the night sky. **The Astrophysical Journal**, v. 111, p. 555, 1950. 7

MERIWETHER, J. W. J. A review of the photochemistry of selected nightglow emissions from the mesopause. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 94, n. D12, p. 14629–14646, 1989. 8

MIDGLEY, J.; LIEMOHN, H. Gravity waves in a realistic atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 15, p. 3729–3748, 1966. 18

NAPPO, C. **An introduction to atmospheric gravity waves**. Elsevier Science, 2012. (ISSN). ISBN 9780123852243. Disponível em: <<<https://books.google.com.br/books?id=P3g3HAK-CTkC>>>. 1, 2, 21, 22

NAPPO, C. J. **An introduction to atmospheric gravity waves**. [S.l.]: Academic Press, 2002. 24

NYASSOR, K. P. **Observações de oscilações na aeroluminescência noturna na região equatorial**. 108 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade de Campina Grande, Paraíba (PB), Brasil., 2017. 8

NYASSOR, K. P. **A study on the generation and propagation of concentric gravity waver over Brazil**. 194 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP), 2021. 19, 58, 59

NYASSOR, P. K.; BURITI, R. A.; PAULINO, I.; MEDEIROS, A. F.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; GOBBI, D. Determination of gravity wave parameters in the airglow combining photometer and imager data. **Annales Geophysicae**, v. 36, n. 3, p. 705–715, 2018. Disponível em: <<<https://www.ann-geophys.net/36/705/2018/>>>. 3, 28, 51, 71

PAULINO, I. **Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosfera - ionosfera**. 274 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2012. 8, 13, 23, 28, 40, 41, 44, 55, 56, 57, 74, 82, 83, 85, 86, 99

PAULINO, I.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.; WRASSE, C.; BURITI, R.; SOBRAL, J.; GOBBI, D. Mesospheric gravity waves and ionospheric plasma bubbles observed during the copex campaign. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 11-12, p. 1575–1580, 2011. 28, 40, 71, 83

PAULINO, I.; TAKAHASHI, H.; VADAS, S.; WRASSE, C.; SOBRAL, J.; MEDEIROS, A.; BURITI, R.; GOBBI, D. Forward ray-tracing for medium-scale gravity waves observed during the copex campaign. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 90, p. 117–123, 2012. 4

PICONE, J.; HEDIN, A.; DROB, D. P.; AIKIN, A. Nrlmsise-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 107, n. A12, p. SIA–15, 2002. 59

PICONE, J. M.; HEDIN, A. E.; DROB, D. P.; AIKIN, A. C. Nrlmsise-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 107, n. A12, p. SIA 15–1–SIA 15–16, 2002. Disponível em:

<<<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002JA009430>>>.

58

PIMENTA, A. A. **Estudos da deriva zonal e Dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical**. 194 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2002. 8, 9

PITTEWAY, M.; HINES, C. The viscous damping of atmospheric gravity waves. **Canadian Journal of Physics**, v. 41, n. 12, p. 1935–1948, 1963. 15, 17

PRESS, W. H. **Numerical recipes: the art of scientific computing**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007. 55

SATO, K.; TATENO, S.; WATANABE, S.; KAWATANI, Y. Gravity wave characteristics in the southern hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 4, p. 1378–1396, 2012. 3, 4

SIVAKANDAN, M.; PAULINO, I.; RAMKUMAR, T.; TAORI, A.; PATRA, A.; SRIPATHI, S.; NIRANJAN, K.; BILIBIO, A. Multi-instrument investigation of troposphere-ionosphere coupling and the role of gravity waves in the formation of equatorial plasma bubble. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 189, p. 65–79, aug 2019. 83

SIVAKANDAN, M.; PAULINO, I.; TAORI, A.; NIRANJAN, K. Mesospheric gravity wave characteristics and identification of their sources around spring equinox over indian low latitudes. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, n. 1, p. 93–102, jan 2016. 85

SOFKO, G. J.; HUANG, C.-S. Superdarn observations of medium-scale gravity wave pairs generated by joule heating in the auroral zone. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 4, p. 485–488, 2000. 19

SUZUKI, S.; SHIOKAWA, K.; HOSOKAWA, K.; NAKAMURA, K.; HOCKING, W. K. Statistical characteristics of polar cap mesospheric gravity waves observed by an all-sky airglow imager at resolute bay, canada. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A1, 2009. 71

TAKAHASHI, H.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; ESSIEN, P.; WRASSE, C. M.; BARROS, D.; NYASSOR, P. K.; PAULINO, I.; EGITO, F.; ROSA, G. M.; SAMPAIO, A. H. R. Signature of gravity wave propagations from the troposphere to ionosphere. **Annales Geophysicae**, v. 40, n. 6, p. 665–672, dec 2022. 83

TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; MEDEIROS, A. F.; GOBBI, D.; WRASSE, C. M.; FECHINE, J.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; PAULA, E.; SOBRAL, J. H. A.; ARRUDA, D.; VADAS, S. L.; SABBAS, F. S.; FRITTS, D. C. Simultaneous observation of ionospheric plasma bubbles and mesospheric gravity waves during the spreadfex campaign. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 4, p. 1477–1487, 2009. Disponível em:

<<<https://angeo.copernicus.org/articles/27/1477/2009/>>>. 4

TAKAHASHI, H.; VADAS, S. L.; WRASSE, C.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; MEDEIROS, A.; BURITI, R.; PAULA, E. R. de; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; PAULINO, I.; STAMUS, P.; FRITTS, D. C. Mesosphere–ionosphere coupling processes observed in the f layer bottom-side oscillation. In: _____. **Aeronomy of the Earth’s Atmosphere and Ionosphere**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p. 163–175. ISBN 978-94-007-0326-1. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-94-007-0326-1_11>>. 79, 83, 99

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. B.; BARROS, D.; ABDU, M. A.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K. Equatorial plasma bubble seeding by MSTIDs in the ionosphere. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 5, n. 1, jun 2018. 83

TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R.; FECHINE, J.; FRITTS, D. C.; VADAS, S. L.; TAKAHASHI, H.; SABBAS, F. T. S. Characteristics of mesospheric gravity waves near the magnetic equator, brazil, during the spreadfex campaign. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 2, p. 461–472, 2009. 4, 28, 40, 71

TOPOGRAPHIC, M. **Mapa Topográfico do Brasil**. Novembro 2022. Disponível em: <<<https://pt-br.topographic-map.com/map-g825k/Brasil/>>>. 87, 98

VADAS, S.; FRITTS, D. Reconstruction of the gravity wave field from convective plumes via ray tracing. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 1, p. 147–177, 2009. 27, 56, 93

VADAS, S. L. Horizontal and vertical propagation and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 112, n. A6, 2007. 12, 13, 28, 30, 72, 75, 83

VADAS, S. L.; BECKER, E. Numerical modeling of the excitation, propagation, and dissipation of primary and secondary gravity waves during wintertime at mcmurdo station in the antarctic. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 17, p. 9326–9369, 2018. 3, 28, 29, 30, 80, 88

_____. Numerical modeling of the generation of tertiary gravity waves in the mesosphere and thermosphere during strong mountain wave events over the southern andes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 9, p. 7687–7718, 2019. 2, 3, 4, 28, 31, 32, 72, 79

VADAS, S. L.; FRITTS, D. C. Thermospheric responses to gravity waves: influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D15, 2005. 12, 14, 17, 28, 54, 74, 79, 83

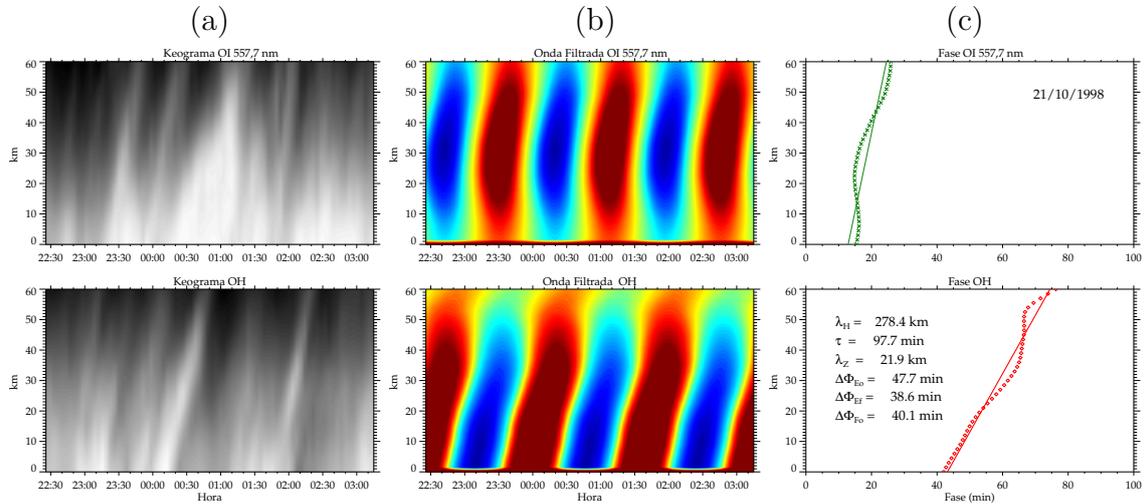
_____. Influence of solar variability on gravity wave structure and dissipation in the thermosphere from tropospheric convection. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 111, n. A10, 2006. 30

- VADAS, S. L.; FRITTS, D. C.; ALEXANDER, M. J. Mechanism for the generation of secondary waves in wave breaking regions. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 60, n. 1, p. 194–214, 2003. 30
- VADAS, S. L.; LIU, H.-l. Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A10, 2009. 4, 19, 30
- VADAS, S. L.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; STAMUS, P.; FRITTS, D. C.; LIU, H.-L.; SABBAS, F. S.; RAMPINELLI, V.; BATISTA, P.; TAKAHASHI, H. Convection: the likely source of the medium-scale gravity waves observed in the oh airglow layer near brasilia, brazil, during the spreadfex campaign. **Annales Geophysicae**, v. 27, n. 1, p. 231–259, 2009. 56, 72
- VARGAS, d. S. F. A. **Investigação do fluxo de momento das ondas de gravidade na alta atmosfera através da aeroluminescência**. 217 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2007. Disponível em: <<<http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZGivnK2Y/QMLF6>>>. Acesso em: 21 dez. 2022. 23, 26, 28
- WALTERSCHEID, R. L.; HECHT, J. H.; DJUTH, F. T.; TEPLY, C. A. Evidence of reflection of a long-period gravity wave in observations of the nightglow over arecibo on may 8-9, 1989. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D5, p. 6927–6934, mar 2000. 93
- WRASSE, C. M. **Estudo de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. 253 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 2004. 8, 19, 34, 35, 43, 58, 74, 85
- WRASSE, C. M.; RODRIGUES, I. **All-sky calibration**. São José dos Campos: (INPE), 2008. Processo de mapeamento de coordenadas originais da imagem para coordenadas geográficas utilizando a linguagem de programação *Interactive Data Language* (IDL). 37

APÊNDICE A - RESULTADO DA ANÁLISE DE KEOGRAMA NA DIREÇÃO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE GRAVIDADE DE MÉDIA ESCALA

Neste apêndice, são apresentados os resultados obtidos para todos os eventos de ondas de gravidade de média escala observados nos observatórios de Cachoeira Paulista (SP) e São João do Cariri (PB). As ondas de gravidade são apresentados em ordem cronológica, conforme apresentado na Tabela 4.1.

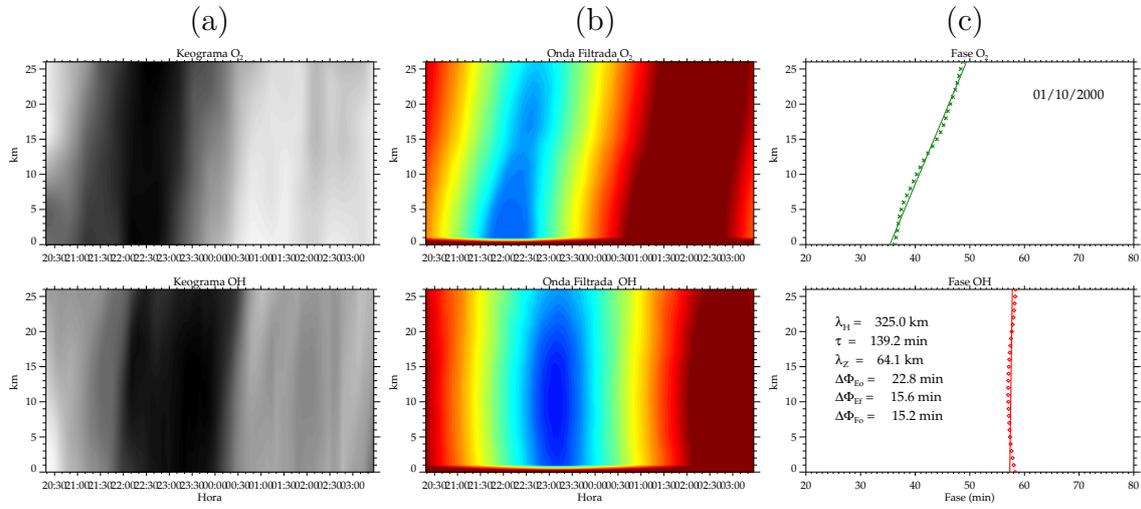
Figura A.1 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 21/10/1998, em Cachoeira Paulista (SP).



Em (a), coluna dos keogramas interpolados na direção de propagação da onda de gravidade de média escala. Na coluna (b), estão os mesmos keogramas na direção de propagação da onda, porém, com a aplicação de um filtro passa banda. Em (c), são apresentadas as fases da onda de gravidade de média escala, obtidos via expansão em séries de Fourier ($\Delta\Phi_{FO}$), bem como os valores da diferença de fase da onda, entre as duas camadas de emissão. A curva pontilhada indica a fase da onda calculada para cada emissão, enquanto que a linha contínua representa o ajuste linear da fase.

Fonte: Produção do autor.

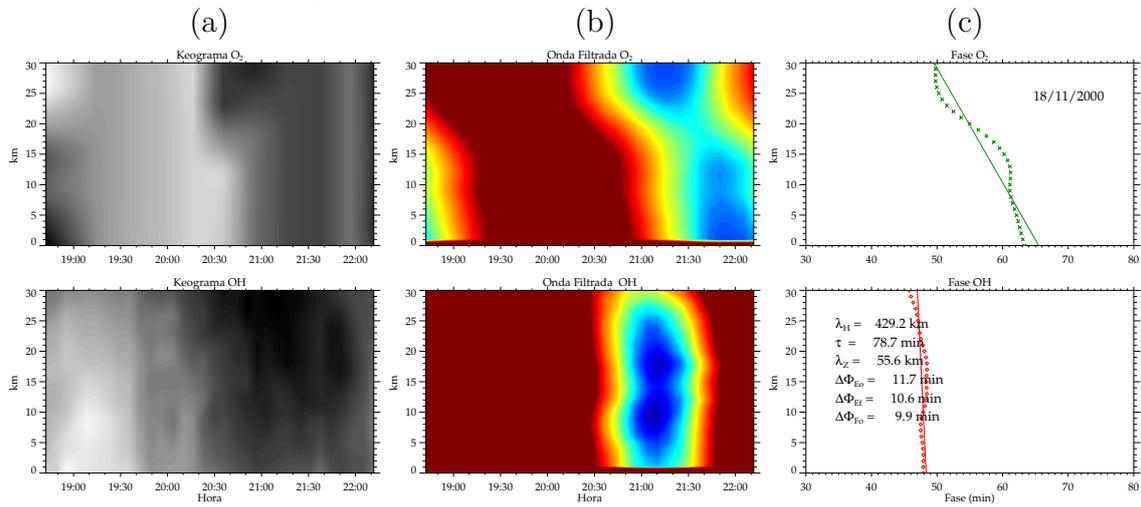
Figura A.2 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 01/10/2000, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

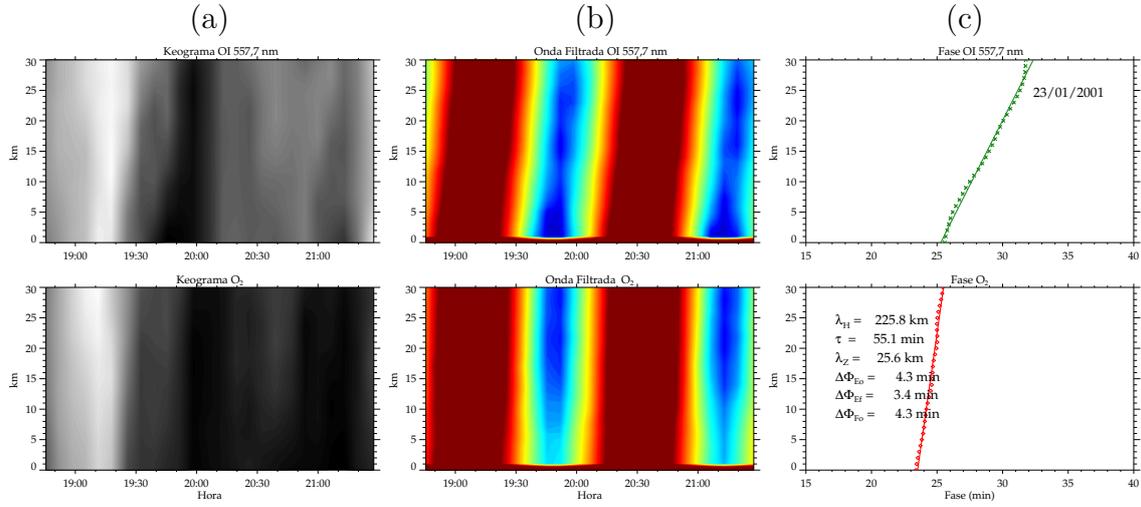
Figura A.3 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 18/11/2000, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

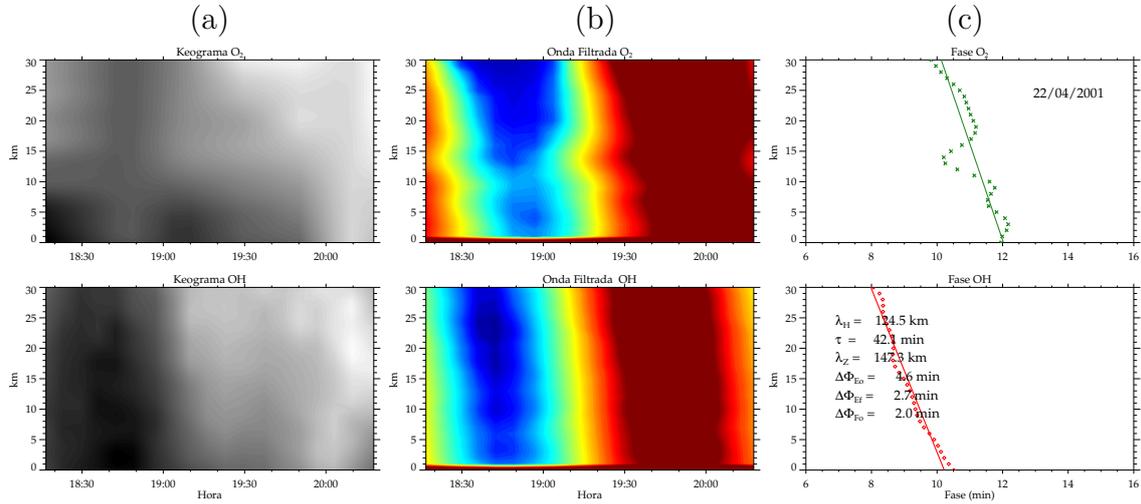
Figura A.4 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 23/01/2001, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

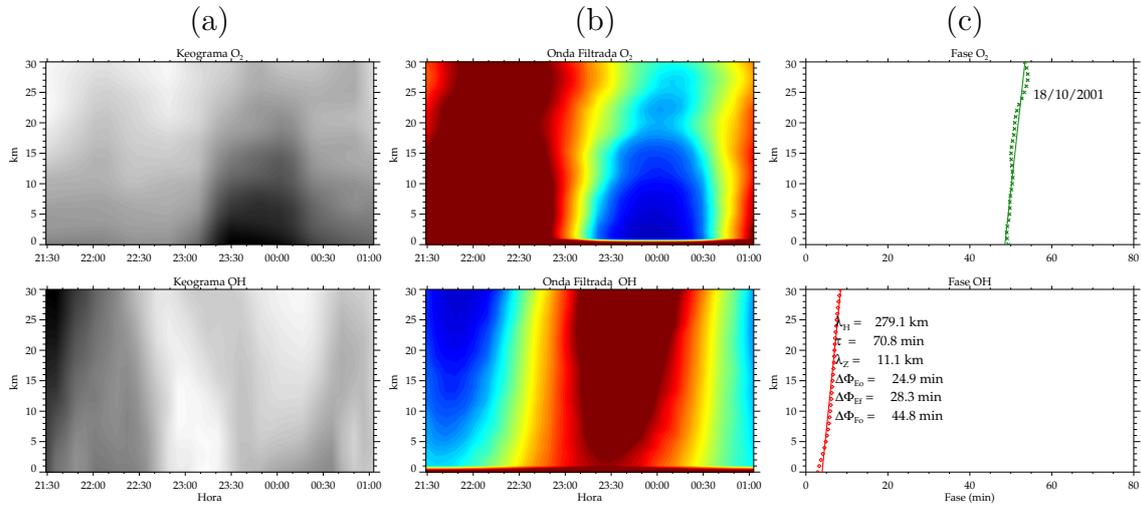
Figura A.5 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 22/04/2001, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

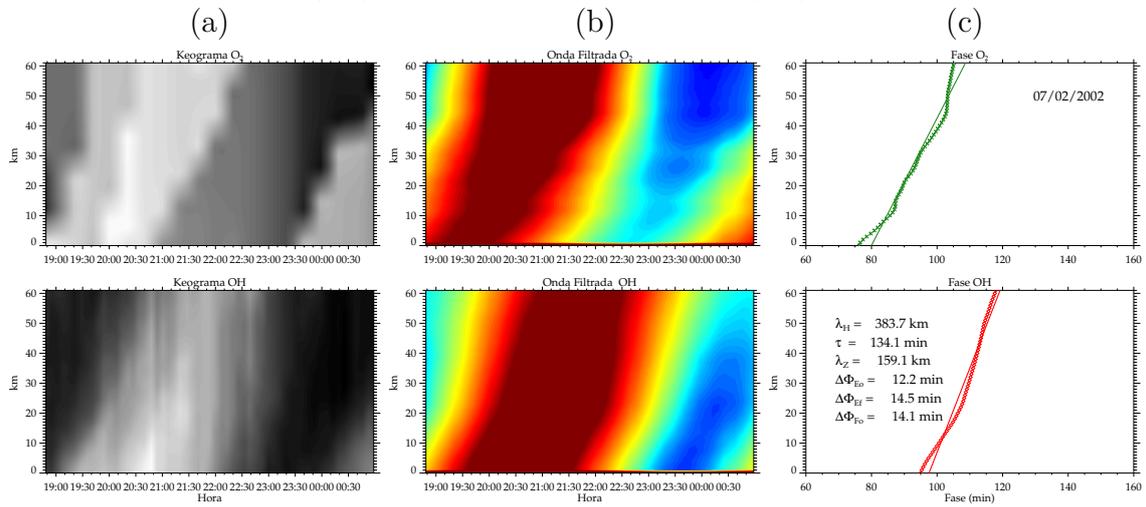
Figura A.6 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 18/10/2001, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

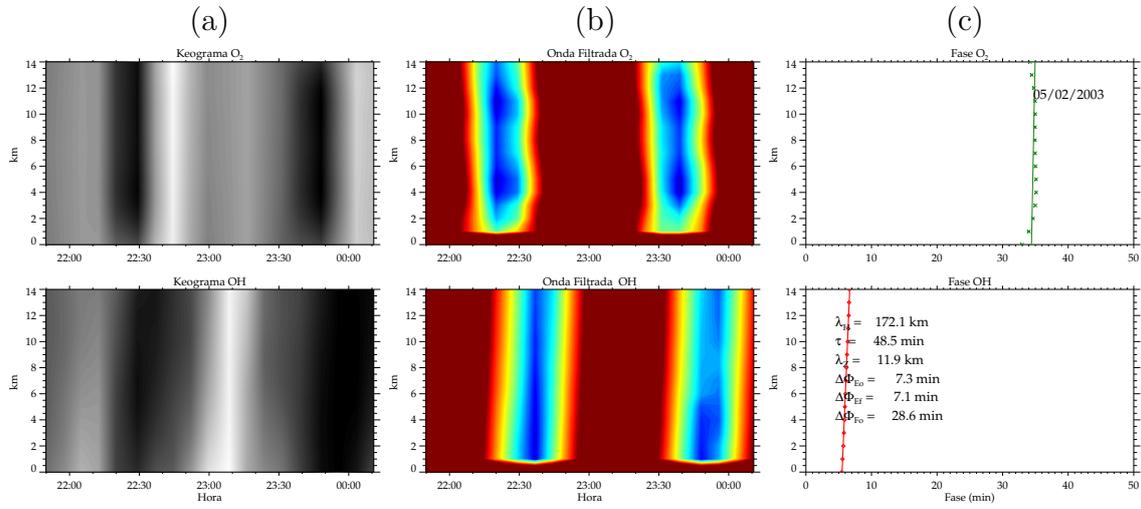
Figura A.7 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 07/02/2002, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

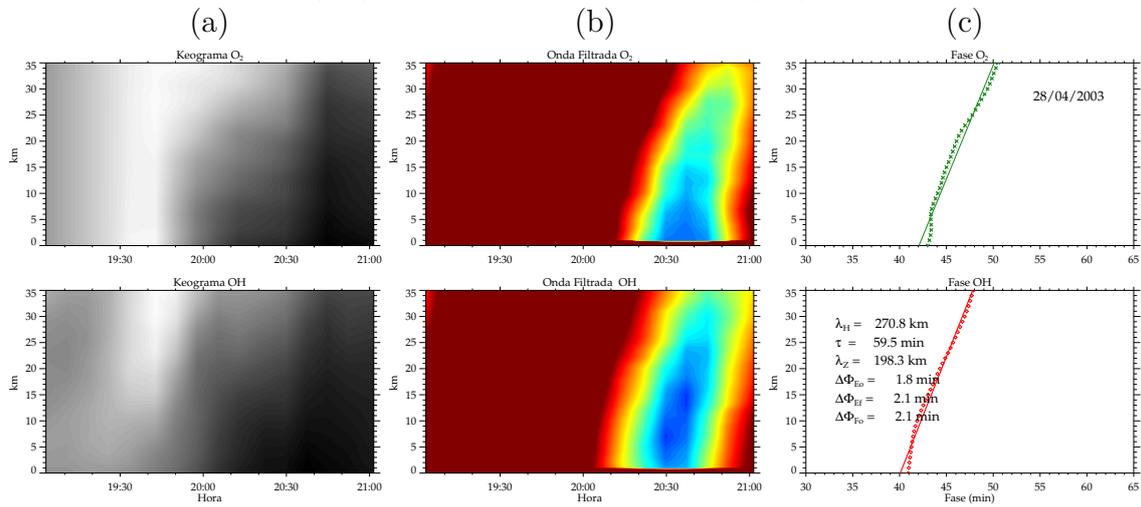
Figura A.8 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 05/02/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

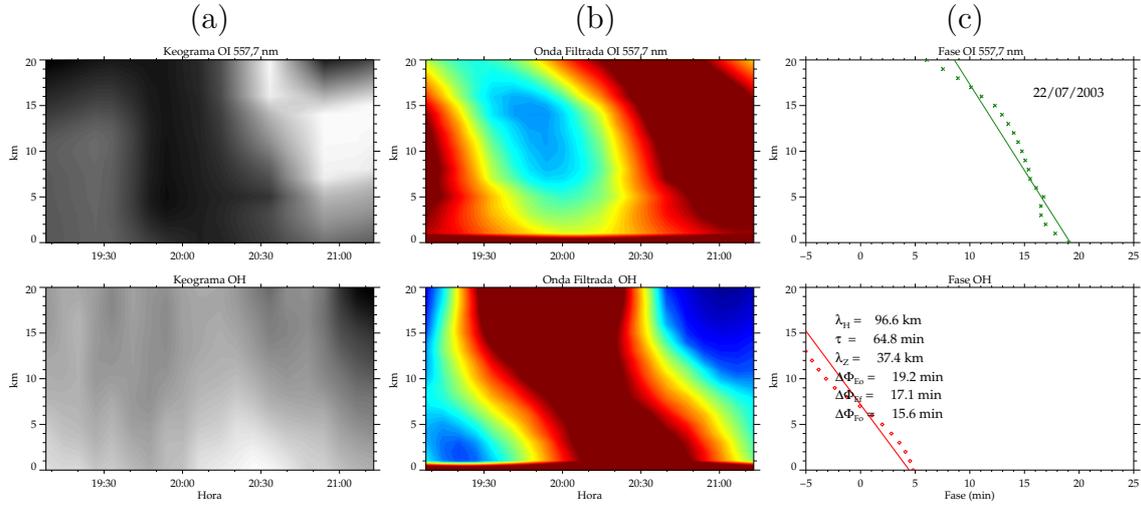
Figura A.9 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 28/04/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

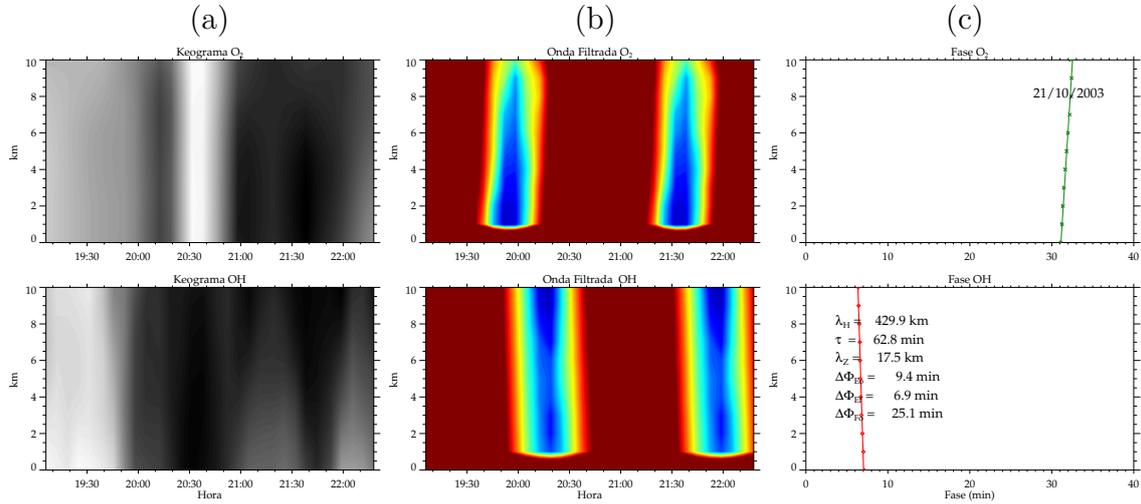
Figura A.10 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 22/07/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

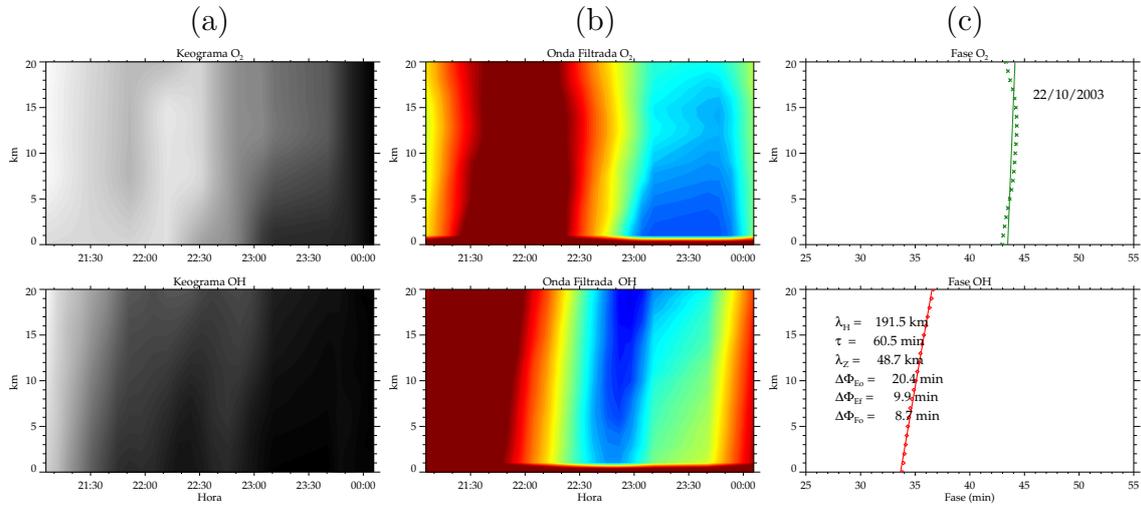
Figura A.11 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 21/10/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

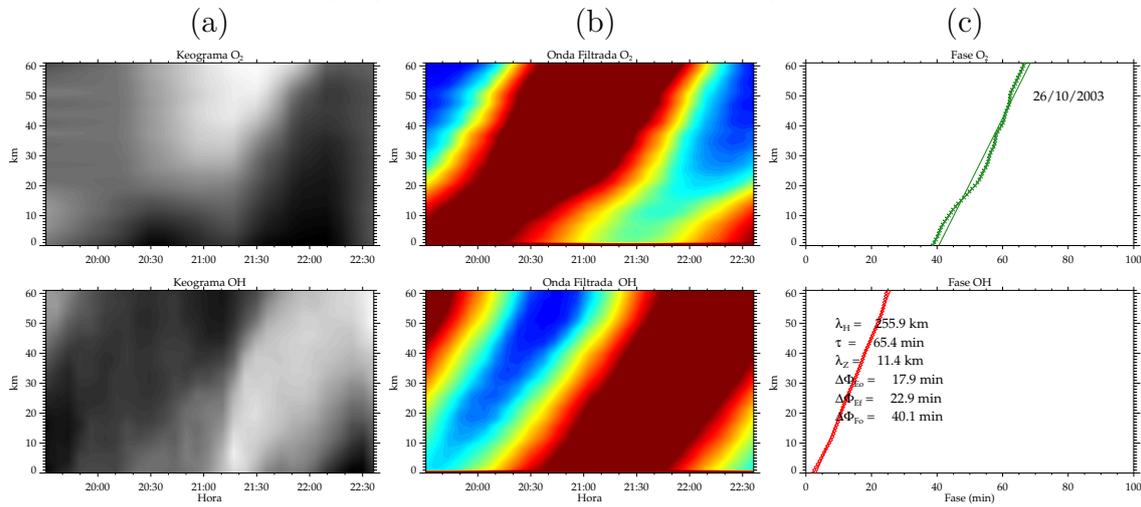
Figura A.12 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 22/10/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

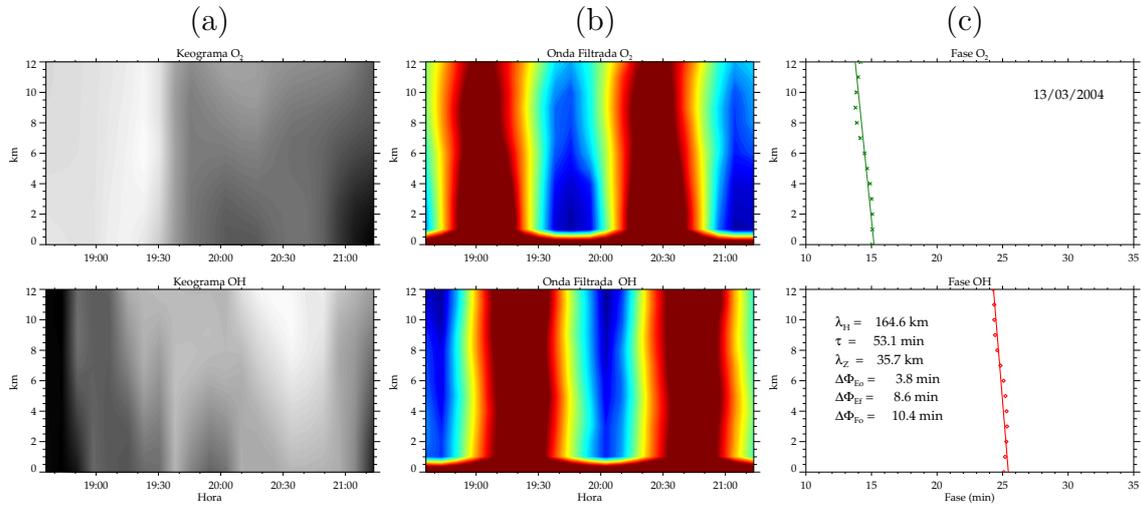
Figura A.13 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 26/10/2003, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

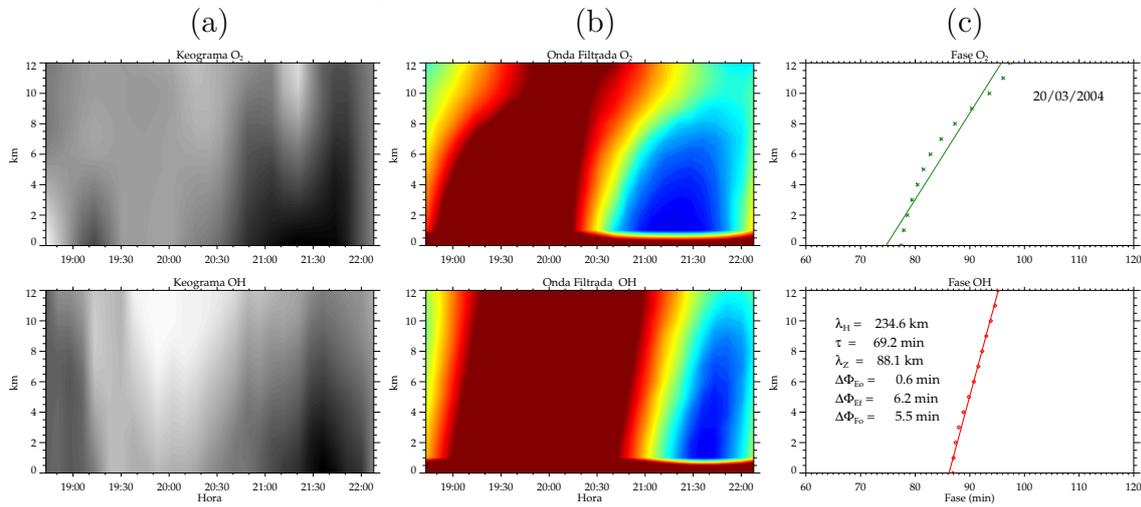
Figura A.14 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 13/03/2004, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

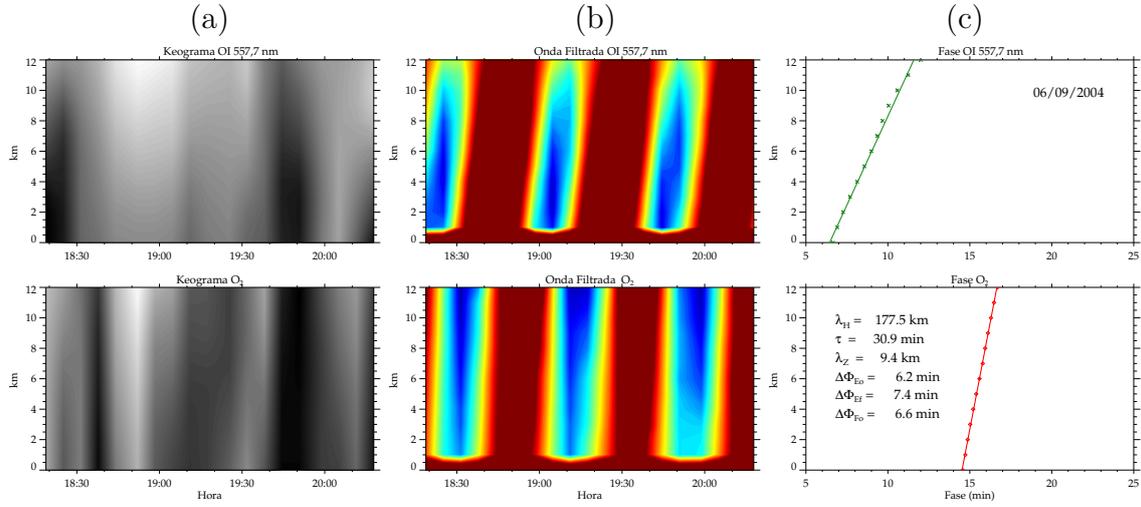
Figura A.15 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 20/03/2004, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

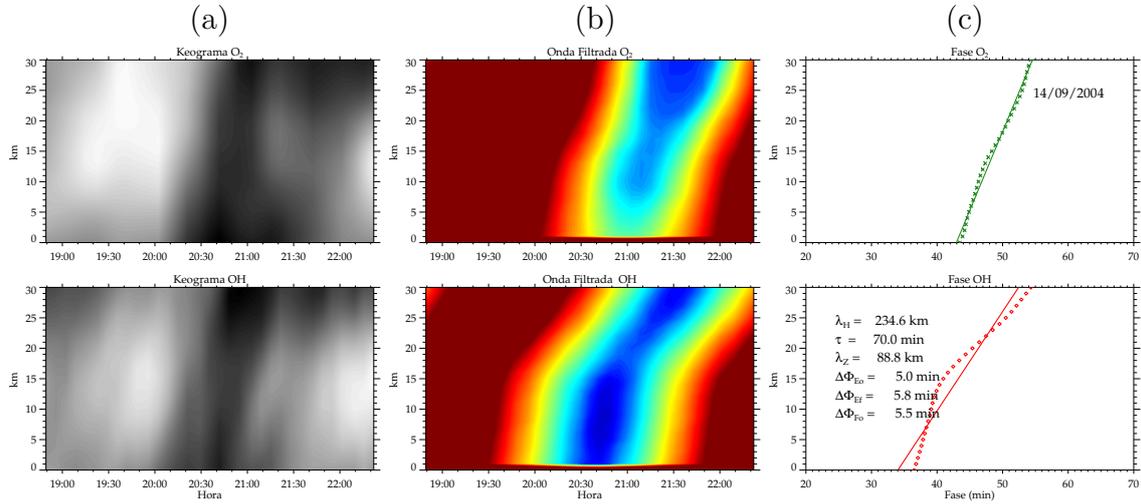
Figura A.16 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 06/09/2004, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

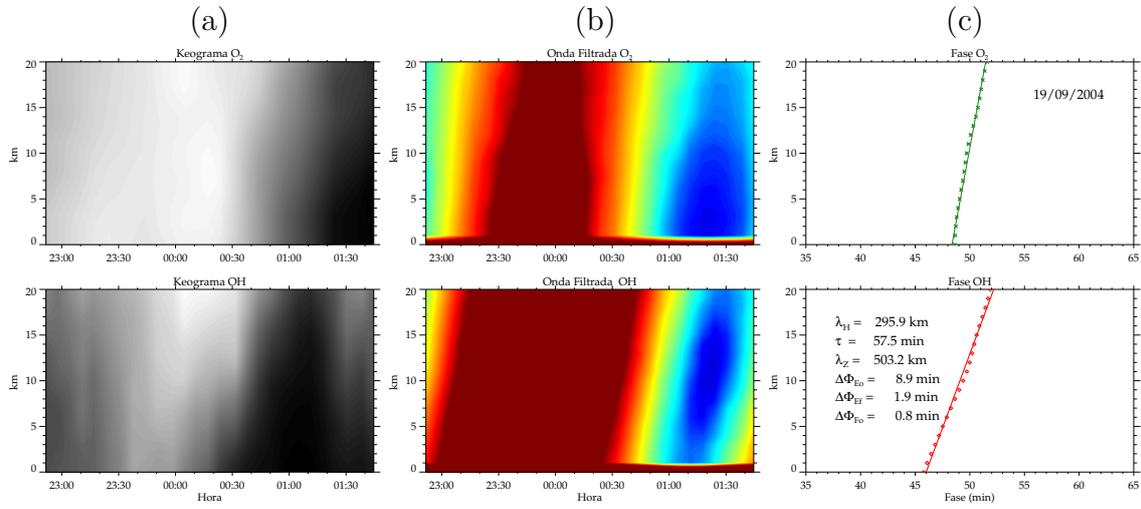
Figura A.17 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 14/09/2004, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

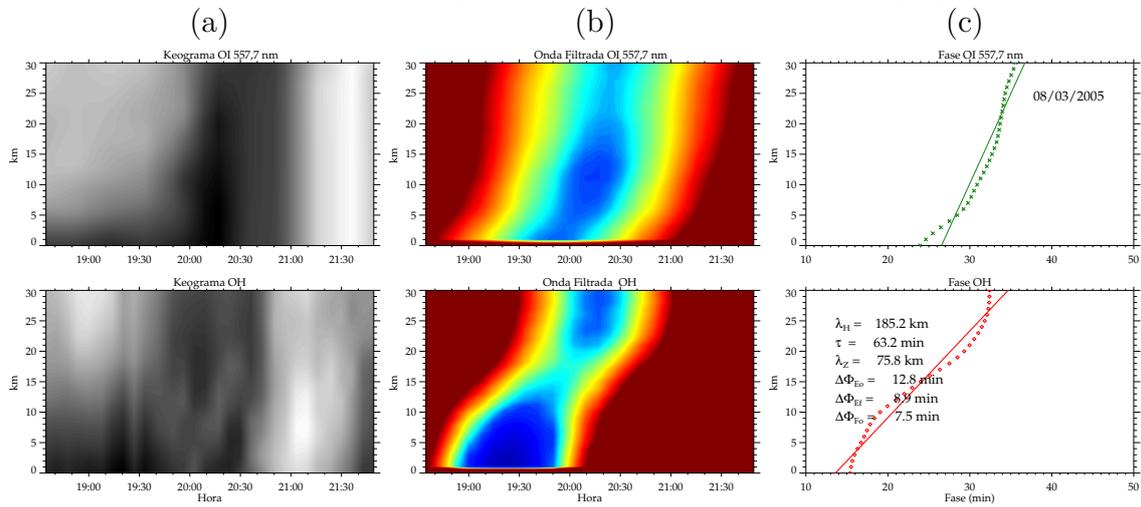
Figura A.18 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 19/09/2004, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

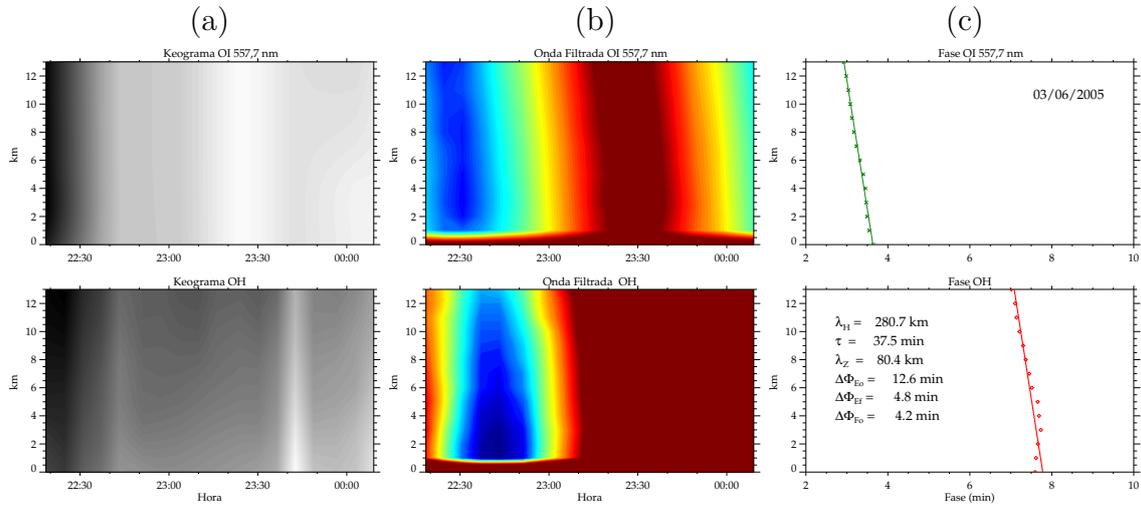
Figura A.19 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 08/03/2005, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

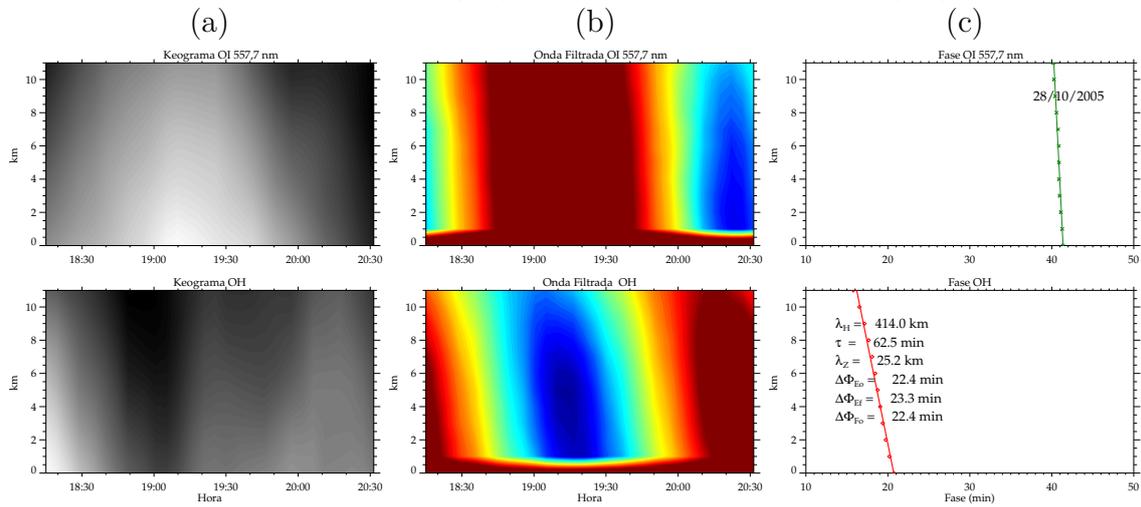
Figura A.20 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 03/06/2005, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

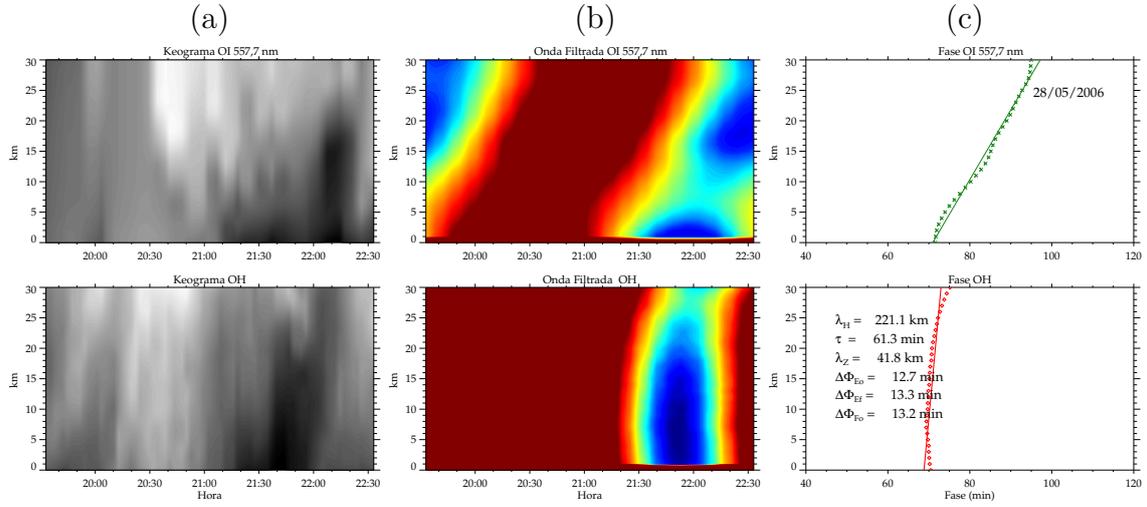
Figura A.21 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 28/10/2005, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

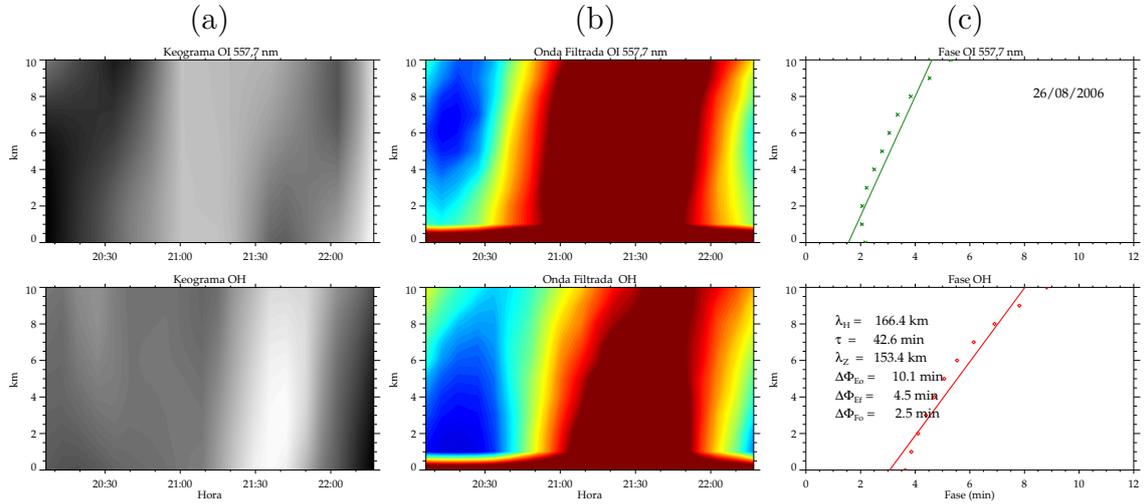
Figura A.22 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 28/05/2006, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

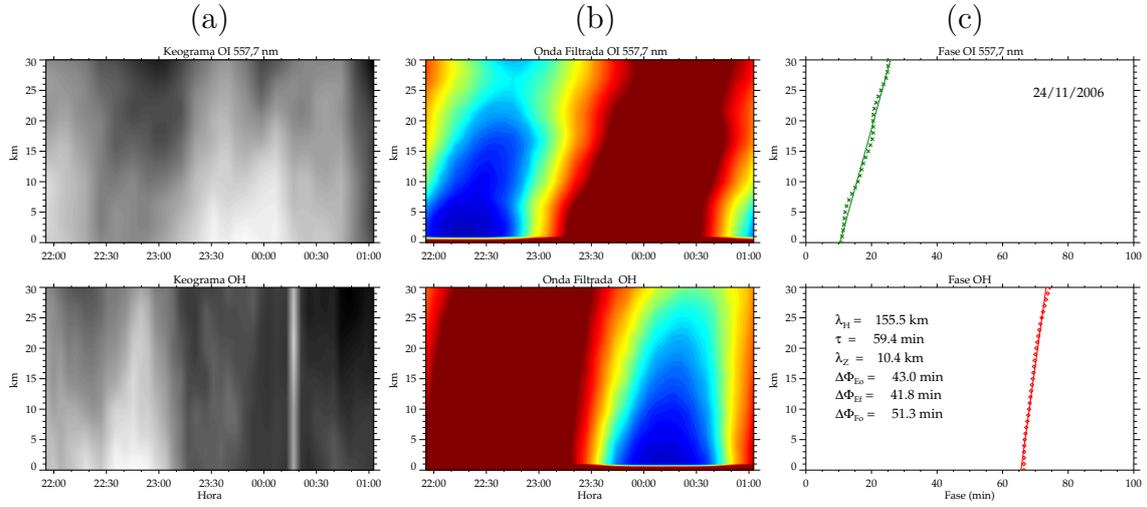
Figura A.23 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 26/08/2006, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

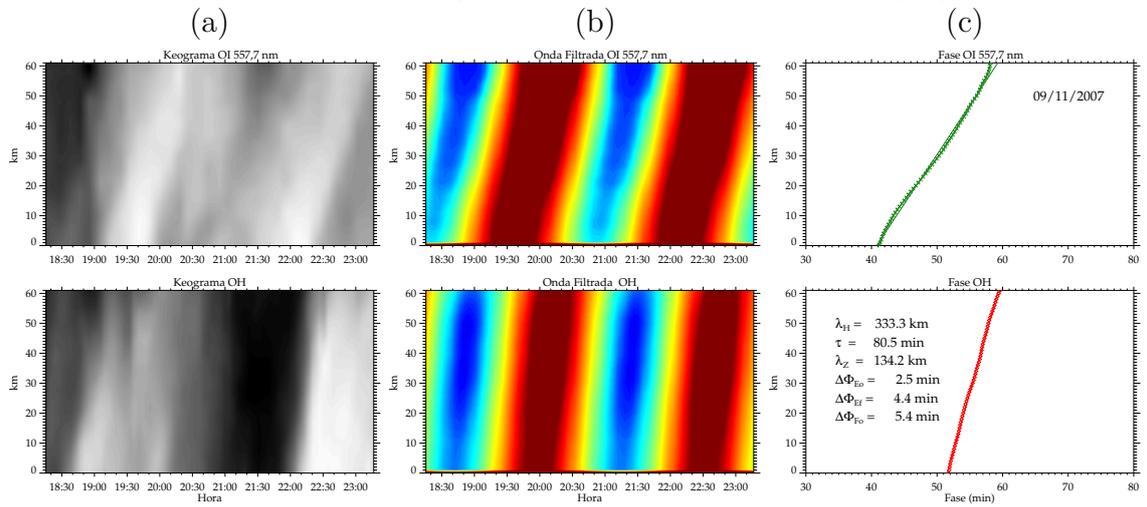
Figura A.24 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 24/11/2006, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

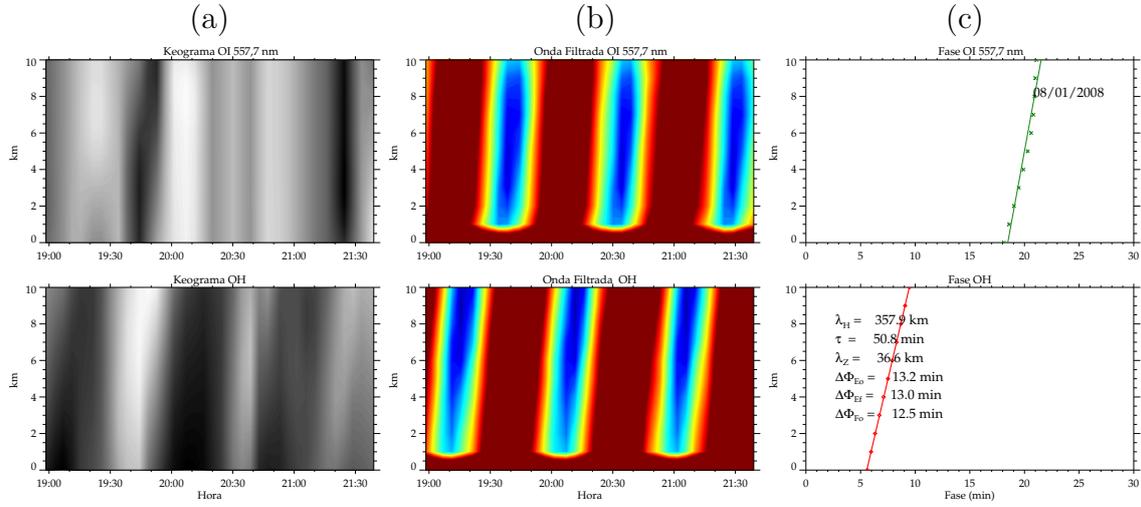
Figura A.25 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 09/11/2007, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

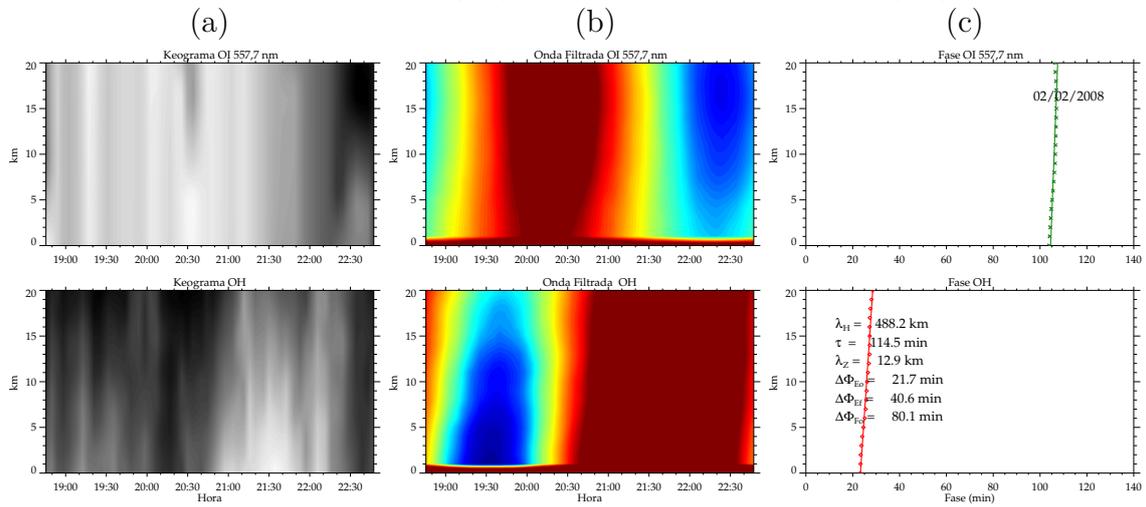
Figura A.26 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 08/01/2008, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

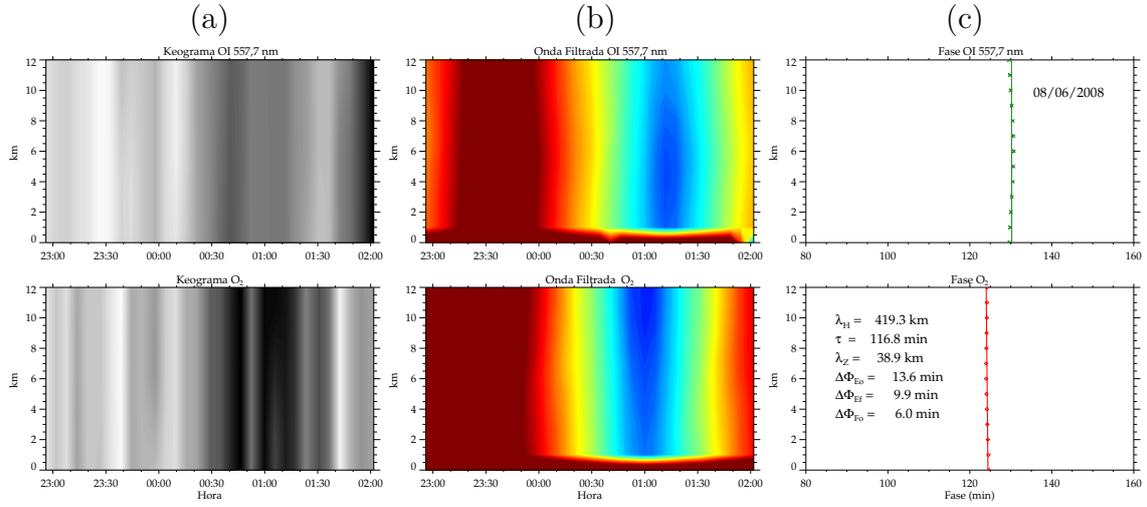
Figura A.27 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 02/02/2008, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

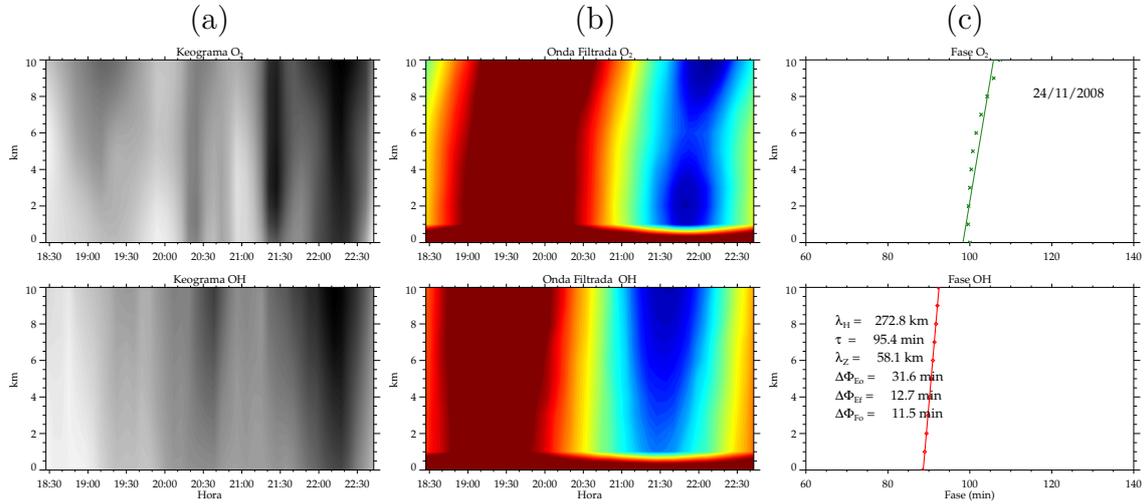
Figura A.28 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 08/06/2008, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

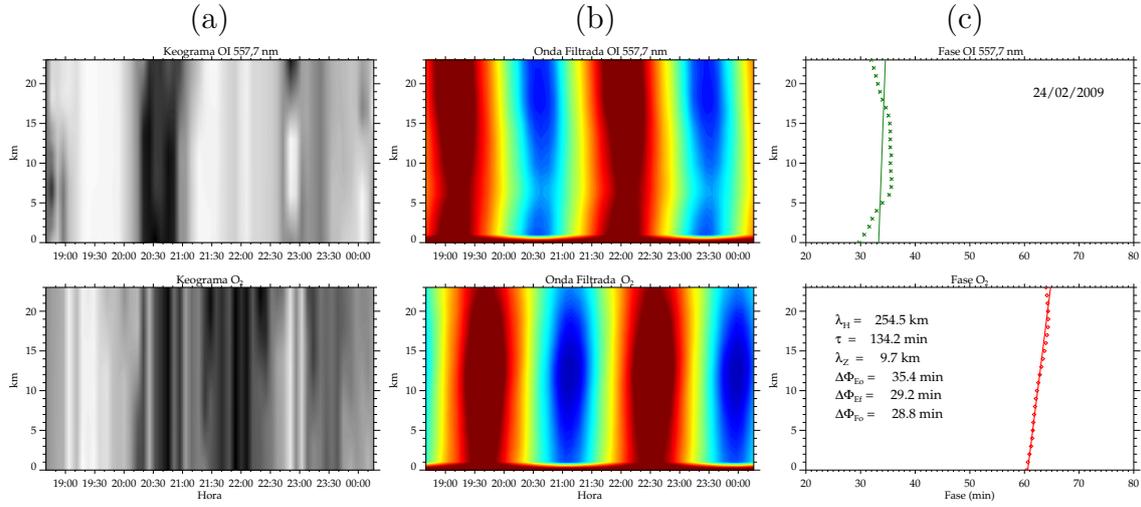
Figura A.29 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 24/11/2008, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

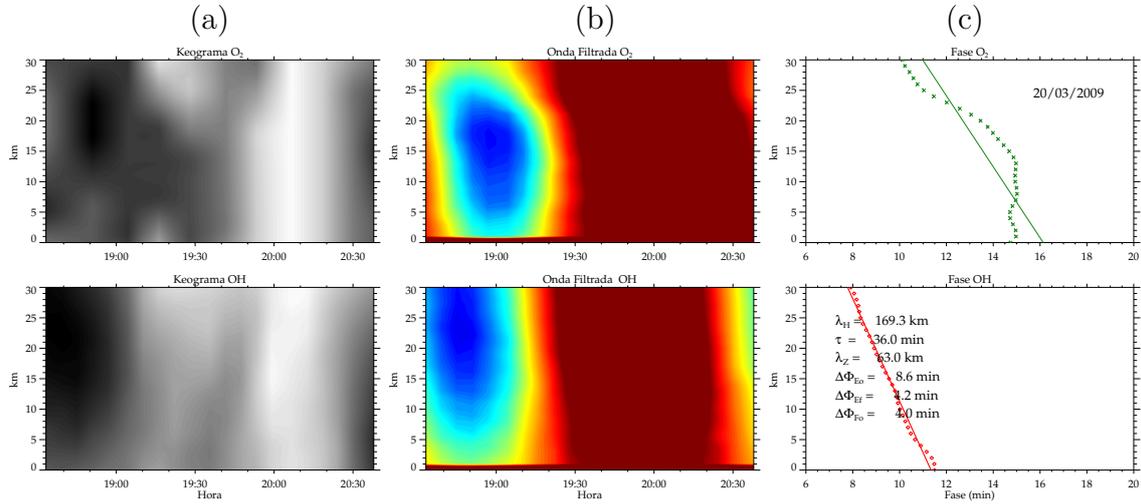
Figura A.30 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 24/02/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

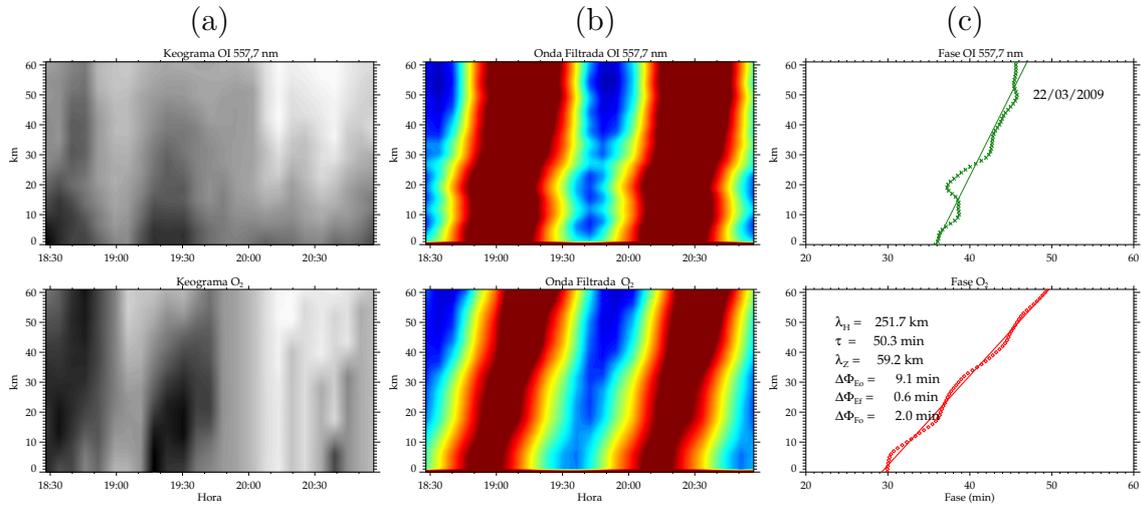
Figura A.31 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 20/03/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

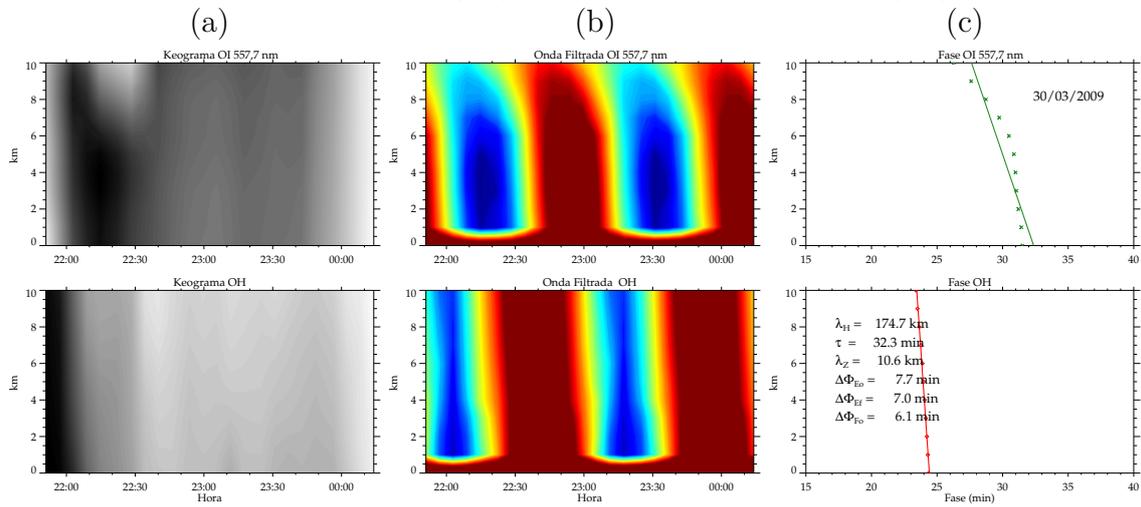
Figura A.32 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 22/03/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

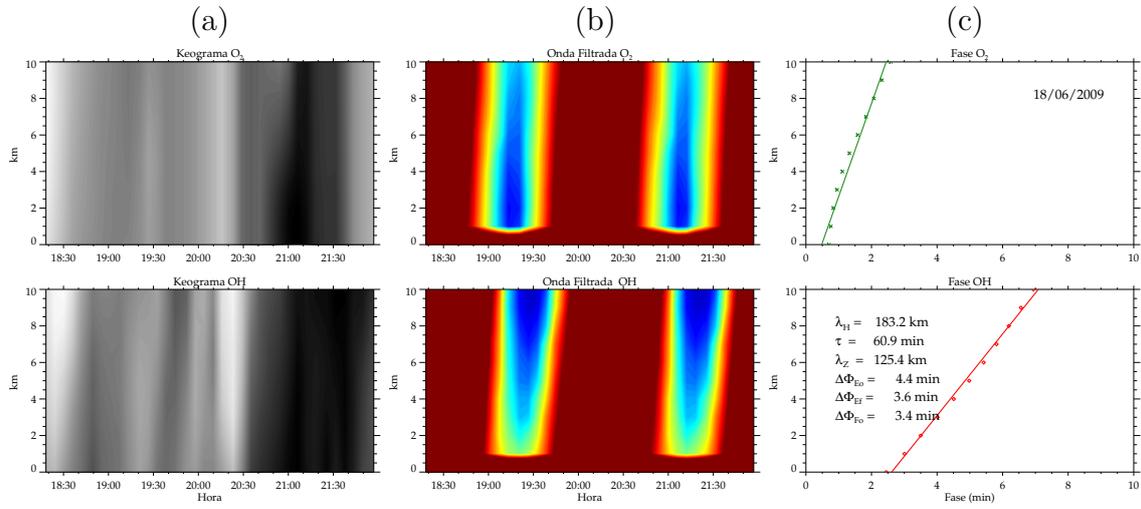
Figura A.33 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 30/03/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

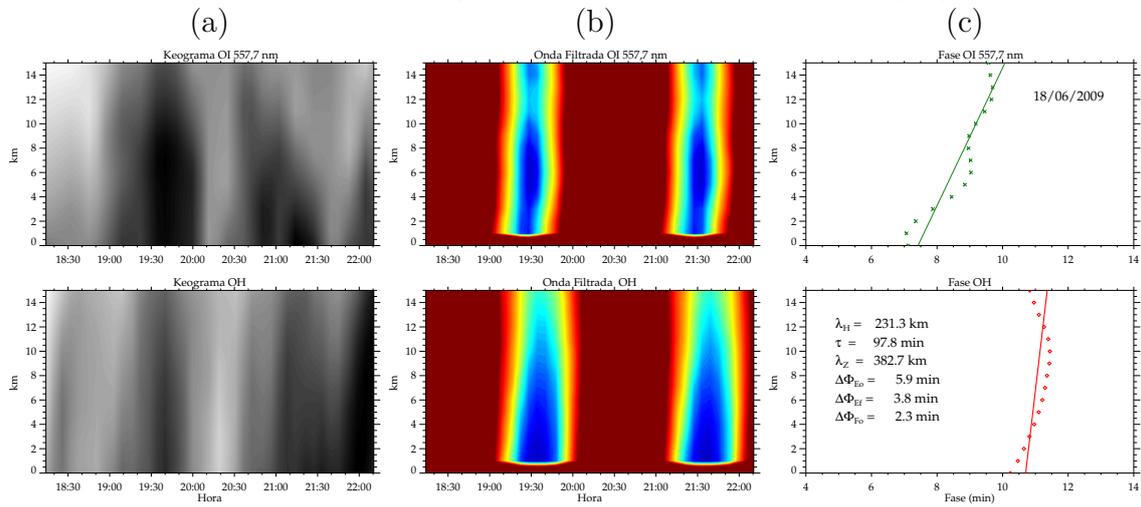
Figura A.34 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O₂ e OH, na noite de 18/06/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

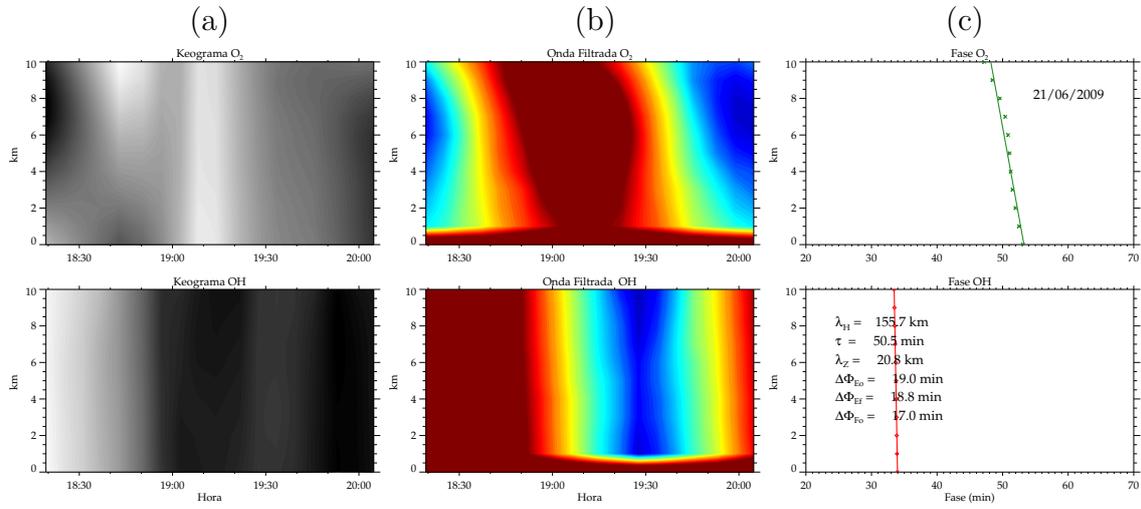
Figura A.35 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e OH, na noite de 18/06/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

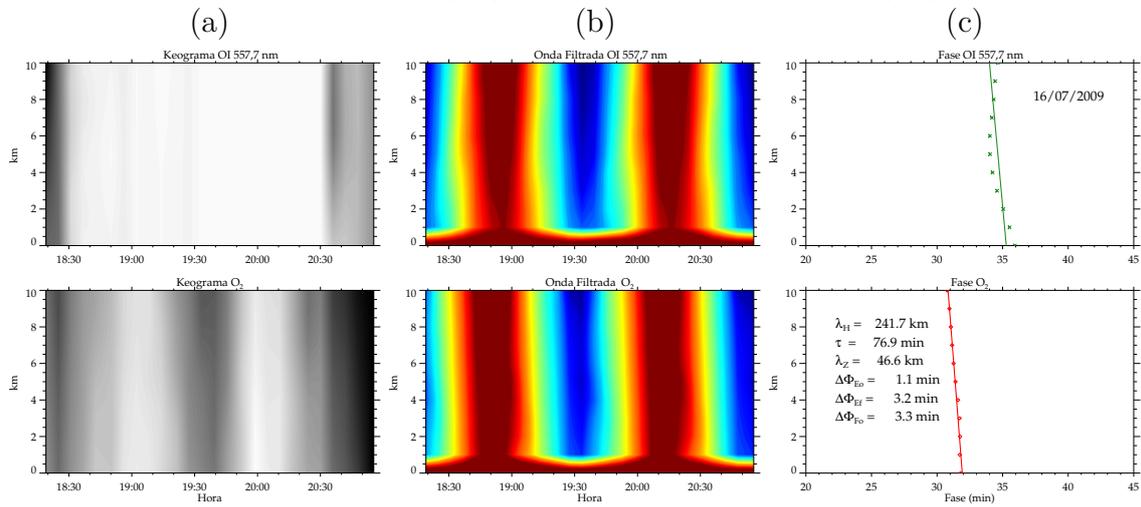
Figura A.36 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do O_2 e OH, na noite de 21/06/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

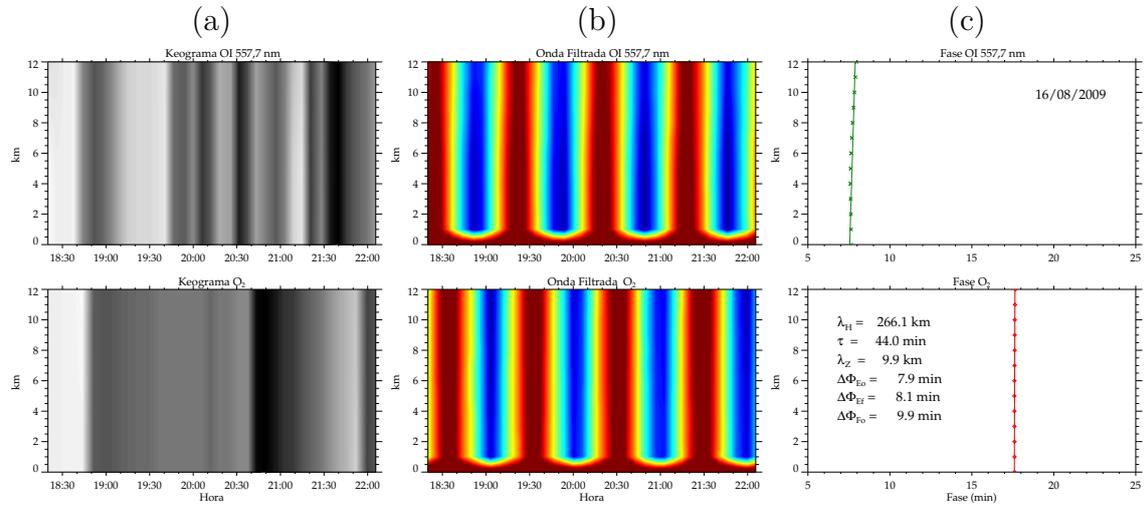
Figura A.37 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O_2 , na noite de 16/07/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

Figura A.38 - Onda de gravidade de média escala observada nas emissões do OI 557,7 nm e O₂, na noite de 16/08/2009, em São João do Cariri (PB).



Idem a Figura A.1.

Fonte: Produção do autor.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.