



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

LUCAS JOSÉ SILVA DE OLIVEIRA

**IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE 2 DIAS NAS MEDIDAS DE VENTO POR RADAR
METEÓRICO**

**CAMPINA GRANDE
2024**

LUCAS JOSÉ SILVA DE OLIVEIRA

**IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE 2 DIAS NAS MEDIDAS DE VENTO POR RADAR
METEÓRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Área de concentração: Aeronomia

Orientador: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima.

**CAMPINA GRANDE
2024**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48 Oliveira, Lucas Jose Silva de.
Identificação da onda de 2 dias nas medidas de vento por radar meteorológico [manuscrito] / Lucas Jose Silva de Oliveira. - 2024.
34 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.
"Orientação : Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Física - CCT. "
1. Oscilações atmosféricas. 2. Onda de dois dias . 3. Radar meteorológico. I. Título

21. ed. CDD 530

LUCAS JOSÉ SILVA DE OLIVEIRA

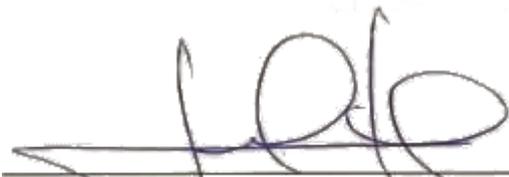
IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE 2 DIAS NAS MEDIDAS DE VENTO POR RADAR
METEÓRICO

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado à Coordenação do Curso Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

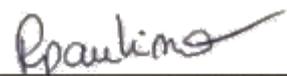
Área de concentração: Aeronomia.

Aprovado em: 13/03/2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Ana Roberta da Silva Paulino
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Thiago Silva Araújo
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação esquemática do Perfil vertical anual médio da temperatura e da pressão atmosférica em 20° S.....	12
Figura 2 -	Localidades de Cachoeira Paulista–SP e São João do Cariri–PB.....	14
Figura 3 -	Disposição das antenas transmissora e receptoras do radar SKiYMET, bem como o edifício onde os dados são processados e armazenados.....	15
Figura 4 -	Imagem de uma parte do local onde o radar meteórico está instalado em São João do Cariri.....	16
Figura 5 -	Antena transmissora do tipo Yang de 3 elementos.....	17
Figura 6 -	Hardware com receptores, transmissor e o computador que processa e armazena os dados coletados.....	17
Figura 7 -	Distribuição da componente meridional conforme a altitude entre 99km(topo) e 81km(base) para localidade de São João do Cariri no ano de 2005.....	18
Figura 8 -	Distribuição da componente zonal conforme a altitude entre 99km(topo) e 81km(base) para localidade de São João do Cariri no ano de 2005.....	18
Figura 9 -	Representação do funcionamento da análise multirresolução....	20
Figura 10 -	Representação gráfica da parte real da Wavelet base de Morlet.....	20
Figura 11 -	Espectros de Potência para a componente meridional de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2005...	23
Figura 12 -	Espectros de Potência para a componente zonal de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2005.....	24
Figura 13 -	Espectros de Potência para a componente meridional de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2005.....	25
Figura 14 -	Espectros de Potência para a componente zonal de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2005.....	26
Figura 15 -	Espectros de Potência para a componente meridional de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2006...	27
Figura 16	Espectros de Potência para a componente meridional de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2006.....	28
Figura 17	Estruturas verticais das amplitudes da onda de dois dias entre os meses de janeiro e fevereiro para a localidade de Cachoeira Paulista.....	29

Figura 18	Estruturas verticais das amplitudes da onda de dois dias entre os meses de janeiro e fevereiro para a localidade de São João do Cariri.....	30
-----------	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Mer	Meridional.
MLT	Upper Mesosphere and low Thermosphere region (Região da alta Mesosfera e baixa Termosfera).
Radar	Radio Detection And Ranging (Detecção e Medição por Rádio).
SKiYMET	All-Sky Interferometric Meteor Radar(Radar Meteórico Interferométrico de Cobertura Total).
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba.
Zon	Zonal.

LISTA DE SÍMBOLOS

m/s	Metros por segundo
μs	Microsegundos
pps	Pulsos por segundo
°	Grau
T	Período
ω	Frequência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivos	9
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	9
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	Atmosfera Terrestre	10
2.2	Oscilações na Atmosfera	12
2.2.1	<i>Ondas Planetárias e a Onda de Quase 2 dias</i>	13
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	14
3.1	Radar Meteorológico	14
3.1.1	<i>Funcionamento do Radar Meteorológico SKiYMET</i>	15
3.2	Técnicas utilizadas na análise das oscilações planetárias	19
3.2.1	<i>Transformada de Ondaletas</i>	19
3.2.2	<i>Análise Harmônica</i>	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1	Espectros de Potências	22
4.2	Amplitudes da Onda de Dois dias	28
5	CONCLUSÕES	30
	REFERÊNCIAS	31

IDENTIFICAÇÃO DA ONDA DE 2 DIAS NAS MEDIDAS DE VENTO POR RADAR METEÓRICO

2-DAY WAVE IDENTIFICATION IN THE WIND FROM METEOR RADAR MEASUREMENTS

Lucas José Silva de Oliveira¹

RESUMO

Dados horários de vento da região MLT obtidos por radares de meteoros nas localidades de São João do Cariri–PB (7,4°S; 36,5°O) e Cachoeira Paulista–SP (22,7°S; 45°O) foram utilizados no presente estudo. O período analisado corresponde aos anos de 2005 e 2006, especificamente aos meses de janeiro e fevereiro. Oscilações, especialmente aquelas com período próximo de dois dias, foram analisadas utilizando técnicas como espectro de potência e métodos dos mínimos quadrados. Os resultados indicaram uma presença consistente da onda de dois dias em ambas as localidades, com destaque para o mês de janeiro. As amplitudes das oscilações foram mais altas na componente meridional do vento, especialmente em São João do Cariri em 2006, onde atingiram 80 m/s. Em Cachoeira Paulista, altas amplitudes foram registradas entre as altitudes de 84 km e 87 km, também em 2006, na componente meridional.

Palavras-chave: oscilações Atmosféricas; onda de dois dias; radar meteórico.

ABSTRACT

Hourly wind data from the MLT region obtained by meteors radars in the localities of São João do Cariri–PB (7.4°S; 36.5°W) and Cachoeira Paulista–SP (22.7°S; 45°W) were used in the present study. The analyzed period corresponds to the years 2005 and 2006, specifically the months of January and February. Oscillations, especially those with a period close to two days, were analyzed using techniques such as power spectrum and least squares methods. The results indicated a consistent presence of the two-day wave in both locations, with emphasis on the month of January. The amplitudes of the oscillations were higher in the meridional component of the wind, especially in São João do Cariri in 2006, where they reached 80 m/s. In Cachoeira Paulista, high amplitudes were recorded between altitudes of 84 km and 87 km, also in 2006, in the meridional component.

Keywords: atmospheric oscillations; two-day wave; meteoric radar.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das civilizações humanas, buscamos padrões na natureza. Essa busca decorre do nosso desejo de compreender o que ocorre, como ocorre e se existem repetições nesses fenômenos naturais, visando, sempre que possível, a capacidade de previsão. Para explorar esses padrões, foram desenvolvidos inúmeros estudos e observações de fenômenos naturais que podem

¹ Graduando em Licenciatura em Física pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB
lj912290@gmail.com

ser descritos, em algum nível de abstração, por modelos oscilatórios. A atmosfera terrestre é um exemplo paradigmático dessa complexidade. Considerada um fluido, com uma composição de aproximadamente 78% de Nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de argônio (MOZETO, 2001), ela se constitui em um ambiente que comporta diversos tipos de fenômenos, muitos deles de caráter ondulatório, com diferentes escalas temporais e espaciais (LIMA, 2004).

A energia utilizada para alimentar os sistemas atmosféricos é proveniente da conversão da energia oriunda do Sol em energia mecânica (VIANELLO E ALVES, 1991). De acordo com Ahrens (2001), devido à incidência de radiação solar não ser uniforme em torno do globo, verifica-se um acúmulo desigual de energia em pontos distintos da atmosfera. Essa variação energética aumenta a complexidade do estudo da atmosfera terrestre, pois influencia a formação e manutenção de diferentes estruturas físicas, como as ondas atmosféricas.

Com o intuito de facilitar o estudo dos fenômenos atmosféricos, a atmosfera é frequentemente dividida em camadas. A divisão mais comum é baseada na variação da temperatura com a altitude, sendo a região da alta mesosfera e baixa termosfera (MLT - Mesosphere and Lower Thermosphere) aquela que suscita considerável interesse acadêmico e científico. Essa camada serve como cenário para uma variedade de eventos físico-químicos, muitos dos quais continuam sendo investigados.

A dinâmica da região da mesosfera é composta por uma variedade de oscilações, que abrangem um largo espectro de frequências, e que estão superpostas no estado básico (vento, temperatura, pressão, altura geopotencial). Além das oscilações citadas, existem os ventos médios, que são oscilações de períodos longos, quase estacionários, e que compõem a atmosfera de fundo (BORGES, 2010). Um melhor entendimento dessa camada permite um controle mais efetivo sobre diversas atividades humanas que envolvem a região da MLT e regiões vizinhas, como, por exemplo, a transmissão de sinais via satélite (ARAÚJO, 2012).

Diante desse cenário, visando um entendimento sobre as oscilações na camada MLT, o presente trabalho teve como tema central a identificação da oscilação da onda de dois dias, bem como a determinação das amplitudes da mesma nesta região. A metodologia e instrumentação basearam-se em dados obtidos por radares de meteoros instalados em duas localidades do Brasil. Essa abordagem se justifica pela necessidade de aprimorar a compreensão desses fenômenos, dada a sua relevância tanto do ponto de vista físico quanto tecnológico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho teve como objetivo geral a identificação e determinação de parâmetros ondulatórios na região MLT. Parâmetros estes representados pelas amplitudes e energias associadas a onda atmosférica de quase 2 dias.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar os dados de ventos da região MLT em busca de padrões de oscilação referente a onda de dois dias;
- Estimar a amplitude da onda atmosférica de 2 dias na região MLT;

- Investigar o comportamento das amplitudes identificadas para a onda de dois dias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é um fluido que se mantém ao redor da Terra devido à força gravitacional do planeta. Com uma dinâmica bastante complexa, ela comporta uma diversidade de fenômenos de várias naturezas, tais como: fenômenos ópticos, termodinâmicos, eletromagnéticos, ondulatórios, entre outros. A existência desses agentes impacta direta ou indiretamente na vida dos seres vivos. Sua complexidade advém do fato de ser um sistema caótico, pois a diversidade de agentes físicos e químicos que ela engloba podem se interconectar em alguma escala temporal ou espacial. Basta uma alteração em um desses fenômenos para ocorrer uma mudança local ou globalmente. Por sistemas caóticos, entendem-se sistemas que possuem sensibilidade às condições iniciais e um comportamento não linear de previsibilidade (SANTOS, 2021, p. 236 - 237), como as turbulências.

Para facilitar o estudo desse sistema complexo, são adotadas diferentes abordagens para as mais diversas áreas de interesse presentes em várias partes da atmosfera. O modelo mais comumente adotado, que será utilizado no presente trabalho, é baseado na divisão em camadas com base na variação vertical da temperatura. Dentro dessa divisão, as camadas possuem regiões que funcionam como divisas entre uma camada e outra, as quais recebem o nome de pausas. As camadas mais recorrentes são: Troposfera, Tropopausa, Estratosfera, Estratopausa, Mesosfera, Mesopausa e Termosfera. As divisões são descritas a seguir.

Troposfera - Na troposfera, a camada mais baixa da atmosfera, ocorrem os principais fenômenos meteorológicos. A temperatura diminui gradualmente com a altitude, iniciando em cerca de 290 K na superfície e reduzindo a uma média de aproximadamente 6,5 K por quilômetro de altura. Nas regiões polares, a temperatura atinge cerca de 220 K a uma altitude de aproximadamente 11 km, enquanto nas regiões equatoriais esse valor é alcançado em torno de 16 km, variando conforme a estação do ano. Esse declínio na temperatura com a altura é causado pela radiação solar que aquece a Terra, aquecendo o ar próximo à superfície. O ar aquecido tende a subir enquanto o ar mais frio tende a descer, gerando processos convectivos e turbulentos nessa camada. O principal processo de aquecimento na troposfera é a absorção direta da radiação solar pela superfície terrestre, com a absorção de radiação infravermelha pelos gases atmosféricos, como dióxido de carbono, metano, vapor d'água e outros, contribuindo como um processo secundário de aquecimento. (LIMA, 2004).

Tropopausa - Região que marca a passagem da Troposfera para a Estratosfera. Sua principal característica é a isotermia, o que significa que há pouca variação de temperatura na vertical. Geralmente tem uma espessura de 3 a 5 km, podendo variar até 1 km em um único dia (ARAÚJO, 2012.).

Estratosfera - Localizada acima da tropopausa, apresenta aumento de temperatura com a altitude, chegando a aproximadamente 270 K em torno de 50 km. Esse aumento é resultado da absorção da radiação ultravioleta solar pelo ozônio, cuja concentração máxima ocorre em torno dos 35 km de altitude. A absorção dessa radiação aumenta a energia das moléculas de ozônio, elevando a temperatura da

região. A camada de ozônio é importante para manter o equilíbrio térmico e reduzir a quantidade de radiação ultravioleta que atinge a superfície terrestre (LIMA, 2004).

Estratopausa - Região localizada entre a parte superior da Estratosfera e a parte inferior da Mesosfera, situada em cerca de 50 km de altitude, onde a temperatura é aproximadamente de 270 K. O gradiente vertical de temperatura é quase nulo nessa região (ARAÚJO, 2012.).

Mesosfera - Situada acima da estratopausa, é uma região onde a radiação é essencial na remoção de calor, resultando em temperaturas extremamente frias, especialmente na mesopausa, que pode atingir menos de 180 K em torno de 100 km de altitude. Além da radiação, os processos dinâmicos de movimentos ondulatórios e transferência de momentum também desempenham um papel importante na determinação das temperaturas nessa camada. Acima da mesopausa, encontra-se a termosfera, onde a temperatura aumenta rapidamente com a altitude devido à absorção direta da radiação solar no ultravioleta e extremo ultravioleta pelo oxigênio atômico (LIMA, 2004).

Na mesosfera, diversas fontes de energia contribuem para seu funcionamento: a absorção de radiação ultravioleta solar pelo ozônio nas bandas de Hartley (entre 242 e 310 nm); a desativação colisional do oxigênio atômico no nível 1D, resultante da fotólise do O_3 e O_2 ; a liberação de energia potencial química da recombinação de três corpos do oxigênio atômico e da reação exotérmica que envolve o hidrogênio (H) e o O_3 . Além disso, interações dinâmicas, como ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias, dissipam energia. O resfriamento na mesosfera decorre principalmente dos processos radiativos envolvendo óxido nítrico (NO), O, O_3 e do CO_2 , sendo este último o principal contribuinte. Na baixa termosfera, a absorção de radiação no extremo ultravioleta, a precipitação de partículas magnetosféricas aurorais e a dissipação de correntes elétricas na ionosfera local resultam na deposição de energia na região (LIMA, 2004).

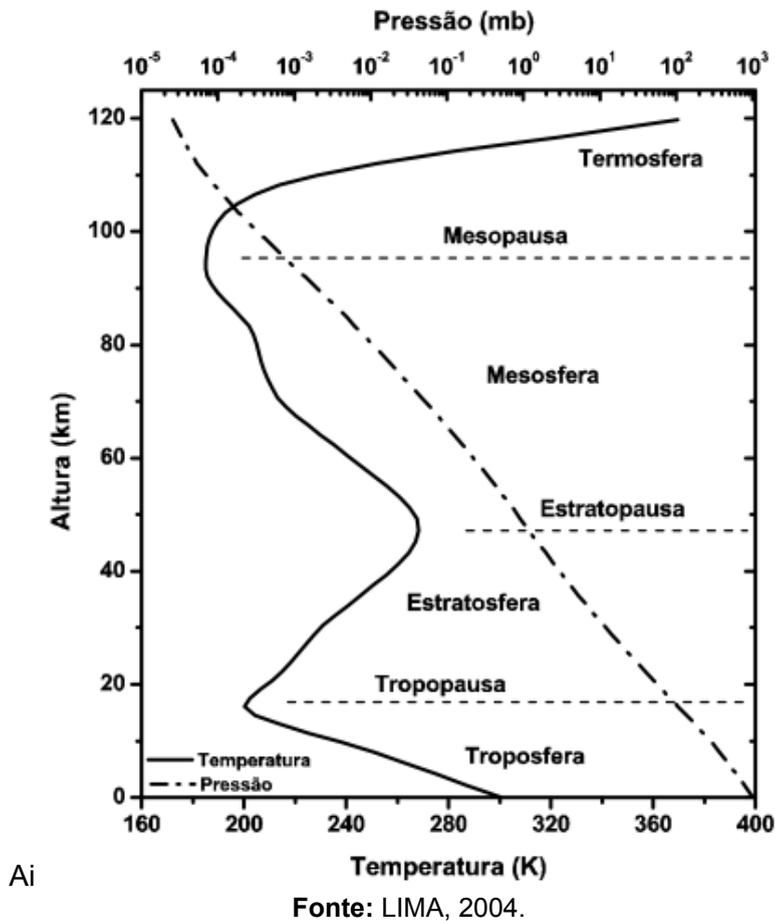
Mesopausa - Localizada acima da Mesosfera, a Mesopausa tem uma espessura que pode exceder os 10 km. É praticamente isotérmica, com temperatura variando entre 180 a 220K, dependendo das estações do ano (ARAÚJO, 2012.).

Termosfera - Na camada superior da atmosfera, denominada Termosfera, a temperatura aumenta com a altitude, principalmente devido à exposição direta aos raios solares. Nessa região, as principais fontes de energia incluem a absorção de ultravioleta extremo pelo oxigênio molecular, a precipitação de partículas magnetosféricas aurorais e a dissipação de correntes elétricas na ionosfera local.

Devido à variação na intensidade da radiação solar ultravioleta extremo, a Termosfera pode ser dominada por diferentes fontes de energia, como o Sol, a magnetosfera ou camadas atmosféricas inferiores, especialmente em latitudes elevadas, onde os processos magnetosféricos frequentemente prevalecem (HARGREAVES, 1992).

Na **Figura 1**, temos a representação esquemática das divisões da atmosfera com base na variação vertical da temperatura.

Figura 1 - Representação esquemática do Perfil vertical anual médio da temperatura e da pressão atmosférica em 20° S.



Ai

Além da variação de temperatura conforme a altitude, a atmosfera também é afetada pelo movimento de rotação da Terra, resultando em distribuição desigual de energia em diferentes regiões durante o dia e a noite. Isso contribui para a ocorrência de padrões complexos de movimento na atmosfera. Entre os principais fenômenos de grande escala na atmosfera estão os ventos médios, as ondas planetárias e as marés atmosféricas. Embora em uma escala menor, as ondas de gravidade também desempenham um papel significativo (ANDRIOLI, 2008).

2.2 Oscilações na Atmosfera

De acordo com Beer (1974), o fenômeno das ondas na atmosfera pode ser compreendido como uma composição de três categorias distintas: as ondas que se movem horizontalmente com variações verticais, definidas como ondas verticais ortogonais à direção de propagação; ondas horizontais transversais, caracterizadas por movimentos horizontais e perpendiculares à direção de propagação; e ondas longitudinais, que se deslocam na mesma direção da propagação.

As oscilações em fluidos surgem de mudanças na pressão, alternando entre regiões de compressão e expansão, impulsionadas por forças externas e restauradoras. Quando um elemento desse fluido é sujeito a essa vibração, ele oscila em torno de uma posição de equilíbrio de forma harmônica, graças às forças restauradoras. Dessa forma, as ondas na atmosfera carregam energia e momento sem transportar matéria (ANDRIOLI, 2008). De acordo com Lima (2004), na

atmosfera terrestre, diferentes tipos de ondas são governadas por diferentes forças: as ondas acústicas são influenciadas pela compressibilidade do ar, as ondas de gravidade são causadas pela força da gravidade, e as ondas de escala planetária Rossby são resultados das forças rotacionais. As principais ondas atmosféricas de interesse geofísico são classificadas conforme seu período em ondas de gravidade, marés atmosféricas e ondas planetárias.

2.2.1 Ondas Planetárias e a Onda de Quase 2 dias

Processos convectivos, interações não lineares entre marés atmosféricas e ondas de gravidade, variações isoladas na topografia e aquecimento diferencial entre continentes e oceanos são considerados geradores de ondas planetárias (BEER, 1974).

As ondas planetárias, originadas tipicamente na camada inferior da atmosfera (troposfera), podem se propagar verticalmente. Isso resulta no transporte de energia e momento, além de facilitar a conexão dinâmica entre a parte inferior (troposfera) e as camadas médias da atmosfera (estratosfera e mesosfera). Observações confirmaram a presença de modos normais de oscilação previstos teoricamente em vários níveis de altitude. Essas observações concordam geralmente com a teoria quando consideram o vento de fundo e o perfil vertical básico da temperatura (GOMES, 2013).

As ondas planetárias também possuem uma extensa estrutura horizontal, aproximadamente do tamanho do diâmetro da Terra, e têm períodos que excedem um dia. A influência variável da força de Coriolis com a latitude atua sobre a atmosfera como uma força externa, gerando ondas rotacionais horizontalmente transversais com comprimentos de milhares de quilômetros, conhecidas como ondas planetárias de ROSSBY (BEER, 1974; HOLTON, 2004).

A onda com um período próximo a 2 dias, referida como onda de quase 2 dias, é uma característica marcante da região da alta mesosfera e baixa termosfera. Esta perturbação está associada a uma oscilação de escala planetária, cuja predominância é verificada nos meses após os solstícios. As amplitudes da onda de 2 dias na componente meridional dos ventos são, em geral, o dobro das amplitudes observadas na componente do vento zonal e são mais intensas no hemisfério sul. Diferenças também são observadas no período médio da onda, em que medidas de vento realizadas durante o verão do hemisfério norte, indicaram períodos entre 44 e 56 horas (MEEK et al., 1996). Já para o verão do hemisfério sul, os períodos ficaram próximos de 48 horas (CRAIG e ELFORD, 1981). Observações realizadas em latitudes baixas revelaram a presença destas perturbações tanto durante o verão austral como no boreal bem como durante outras épocas do ano (LIMA, 2004).

A rápida amplificação da onda de 2 dias é acompanhada de um decréscimo da amplitude da maré diurna, indicando uma correlação negativa entre elas (PALO et al., 1999; LIMA et al., 2004).

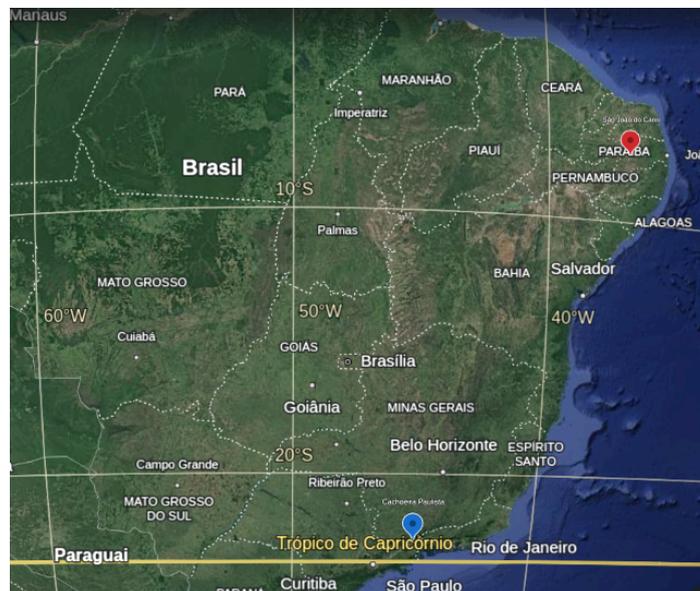
De acordo com Salby (1981) a onda de 2 dias seria uma manifestação do modo normal de número de onda zonal três. Para tanto, um modelo mecanicista baseado nas equações de perturbações linearizadas foi usado, utilizando campos básicos de ventos e temperaturas analíticas. Com este tratamento a onda de 2 dias foi interpretada como uma manifestação do modo normal de Rossby (3, -3). Entretanto, usando análises de estabilidade atmosférica, Plumb (1983) e Pfister (1985) sugeriram que a onda de 2 dias seria gerada por zonas de instabilidade baroclínica acima do jato leste-oeste estratosférico no hemisfério de verão. A

possibilidade da onda de 2 dias ter como causa uma combinação dos dois mecanismos, foi sugerida por Randel (1994) e por Norton e Thurn (1996) e confirmada mediante modelagem por Salby e Callaghan (2001).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Dados de ventos horários obtidos por radares de meteoros foram utilizados na presente pesquisa. A detecção e registro das medidas dos ventos foram obtidas por meio de dois radares instalados em dois municípios brasileiros: São João do Cariri–PB (7,4°S; 36,5°O), e Cachoeira Paulista–SP (22,7°S; 45°O), os quais estão marcados no mapa da **Figura 2** nas cores vermelho e azul, respectivamente. Os dados coletados pelo radar encontram-se à disposição do Grupo de Física da Atmosfera da UEPB. O período considerado foi entre 1 de janeiro a 28 de fevereiro nos anos de 2005 e 2006, totalizando 59 dias analisados para cada ano.

Figura 2 - Localidades de Cachoeira Paulista–SP e São João do Cariri–PB.



Fonte: Google Earth, 2024.

3.1 Radar Meteorológico

Ao ingressarem na atmosfera terrestre, os meteoroides, que podem ser rochosos ou metálicos, colidem com as moléculas gasosas à sua frente e acabam sofrendo um processo denominado de ablação. Esse processo consiste na perda de material devido à vaporização dos meteoroides, resultando no surgimento de uma cauda gasosa de íons e elétrons livres, os quais podem ser utilizados para a reflexão de ondas de rádio emitidas pelo radar, de volta para o local de emissão do sinal. Essa reflexão depende da densidade de elétrons livres presentes na trilha meteórica (LIMA, 2004). O rastro de luz gerado durante o processo é conhecido como meteoro ou, de forma mais popular, estrela-cadente. Vale salientar que nem todo meteoróide será consumido durante o processo de vaporização de seus constituintes na atmosfera. Caso possua um tamanho significativo, um meteoróide pode resistir à entrada na atmosfera e atingir a superfície terrestre. Quando atinge o solo, é denominado como meteorito.

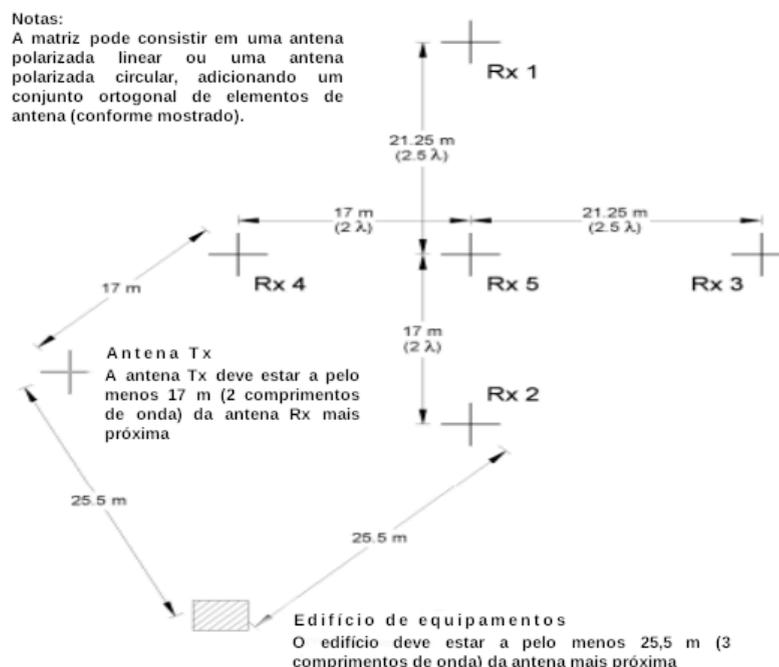
3.1.1 Funcionamento do Radar Meteorológico SKiYMET

O radar meteorológico tem seu funcionamento explicado por meio do entendimento da técnica do sensoriamento remoto, que consiste em medir algo, sem de fato estar diretamente em contato com ele, a medida é realizada à distância. Para ser possível seu funcionamento, é preciso que ele absorva a energia emitida, ou refletida pelo objeto que está sendo estudado (FLORENZANO, 2007).

Os sistemas comerciais conhecidos como SKiYMET em São João do Cariri e Cachoeira Paulista consistem em radares meteorológicos que oferecem uma visão abrangente do céu. Esses radares foram projetados para operar com uma alta taxa de repetição de pulso. Cada radar é equipado com uma única antena transmissora Yagi de três elementos, juntamente com cinco antenas receptoras dispostas no solo, formando uma configuração assimétrica em cruz (ARAÚJO, 2012).

A disposição do sistema de antenas receptoras, transmissora e o edifício onde os dados coletados são processados e armazenados pode ser visualizada na **Figura 3**. Na **Figura 3**, os valores "Rx" representam cada uma das antenas receptoras, e o valor "Tx" representa a antena transmissora. Podemos observar os espaçamentos entre cada uma das antenas, dado pelo valor de cada λ , bem como o distanciamento do edifício onde está localizado o hardware com os receptores, transmissor e o computador responsável pelo processamento e armazenamento dos dados.

Figura 3 - Disposição das antenas transmissora e receptoras do radar SKiYMET, bem como o edifício onde os dados são processados e armazenados.



Fonte: Genesis Pty. Ltd (com adaptações).

Ao serem emitidos os pulsos eletromagnéticos em direção à região MLT, o sinal viaja até essa camada, e após encontrar a trilha meteórica, parte da energia transmitida é absorvida pela trilha e reemitida em todas as direções (LIMA, 2004). As diferenças de fases dos sinais recebidos pelas antenas receptoras são usadas para

determinar a localização da trilha meteórica no céu e a configuração interferométrica reduz a ambiguidade no ângulo de chegada (HOCKING et al., 2001). O sistema opera numa frequência de 35,24 MHz, transmitindo radiação com pulso de 13 μ s, proporcionando uma resolução de 2 km, numa taxa de repetição de 2144 pps (pulsos por segundo). O pico de potência transmitida é 12 kW.

O sistema foi concebido para operar de forma automática durante 24 horas por dia, e a detecção do sinal meteorítico ocorre por meio de processos sequenciais. A qualidade do sinal é avaliada por meio da análise de coerência de fase. Esses sinais são posteriormente examinados minuciosamente e confirmados como sendo sinais meteoríticos ou não (ARAÚJO, 2012). O sistema guarda as informações em um arquivo de texto com extensão *.mpd. Tais informações incluem a velocidade radial do rastro meteórico, a distância e os ângulos (ANDRIOLI, 2008).

As medidas realizadas pelo radar permitem determinar a distância até o meteoro ao medir o tempo entre a transmissão de um pulso curto de radiação eletromagnética e a chegada do eco desse pulso. A duração do pulso transmitido permite uma precisão espacial de aproximadamente dois quilômetros. Através da interferometria, é possível determinar a direção do eco com uma precisão de cerca de 1 grau, tanto em azimute quanto em zênite. O deslocamento Doppler do sinal recebido, causado pelo movimento do rastro ionizado em relação ao radar, pode ser usado para medir sua posição e velocidade radial com boa precisão, considerando o referencial em que o radar está fixo (ANDRIOLI, 2008).

Na **Figura 4**, temos a imagem de duas antenas receptoras, bem como o edifício onde estão localizados o transmissor, os receptores e o computador que processa e armazena os dados.

Figura 4 - Imagem de uma parte do local onde o radar meteórico está instalado em São João do Cariri.



Fonte: Repositório do Grupo de Pesquisa em Física da Alta Atmosfera da UEPB.

Na **Figura 5**, podemos observar a antena do tipo Yang constituída por três elementos(hastes). Ela é responsável por emitir os pulsos eletromagnéticos em direção à região MLT.

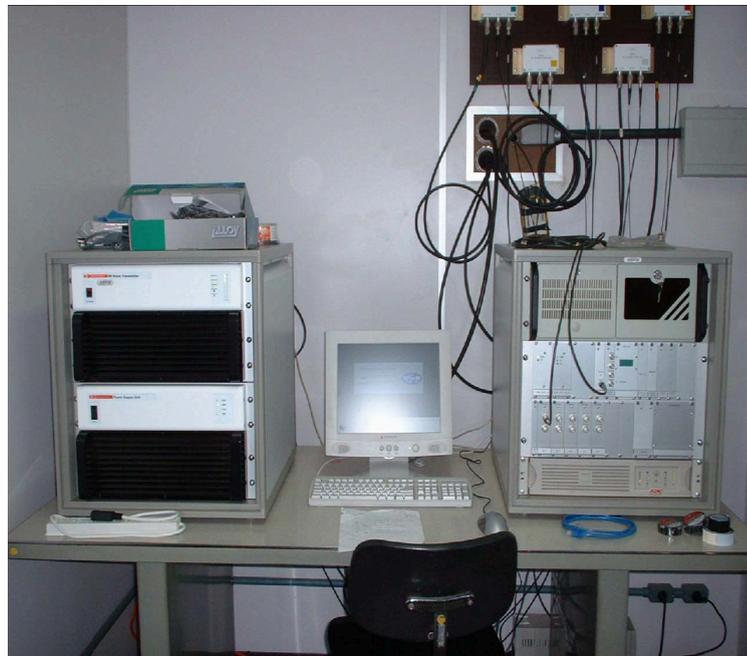
Figura 5- Antena transmissora do tipo Yang de 3 elementos.



Fonte: Repositório do Grupo de Pesquisa em Física da Alta Atmosfera da UEPB.

O transmissor e os receptores, bem como o computador onde é feito o processamento e o armazenamento dos dados coletados, podem ser visualizados na **Figura 6**.

Figura 6 - Hardware com receptores, transmissor e o computador que processa e armazena os dados coletados.

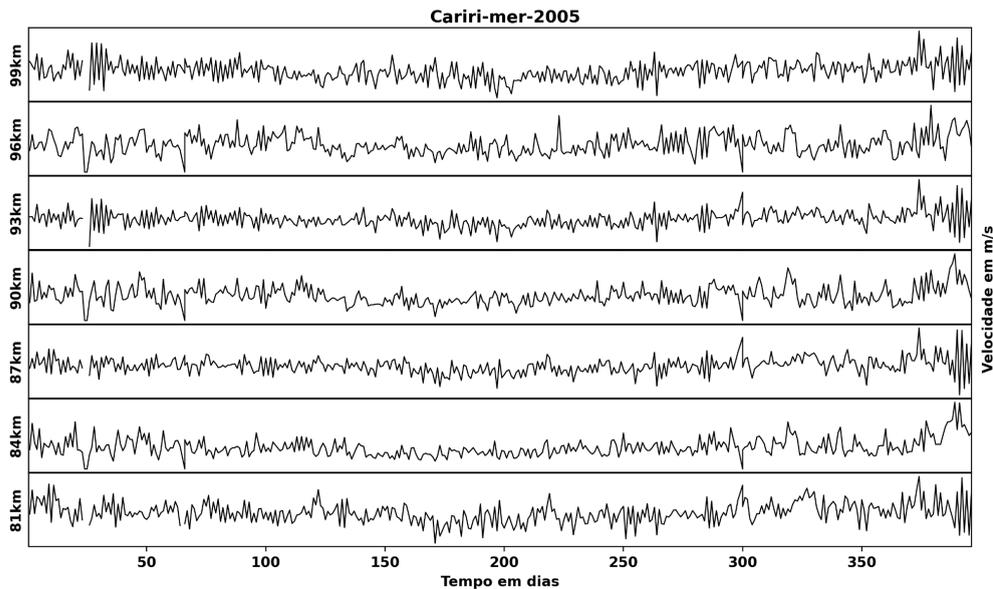


Fonte: Repositório do Grupo de Pesquisa em Física da Alta Atmosfera da UEPB.

Ao processar o arquivo (*.mpd) contendo os dados, são gerados dois arquivos: um correspondente à componente zonal do vento, direção leste-oeste, e outro correspondente à componente meridional do vento, direção norte-sul. Cada componente apresenta a distribuição dos dados em sete camadas atmosféricas de 4 km de espessura, centradas em 81, 84, 87, 90, 93, 96 e 99 km de altura, como pode

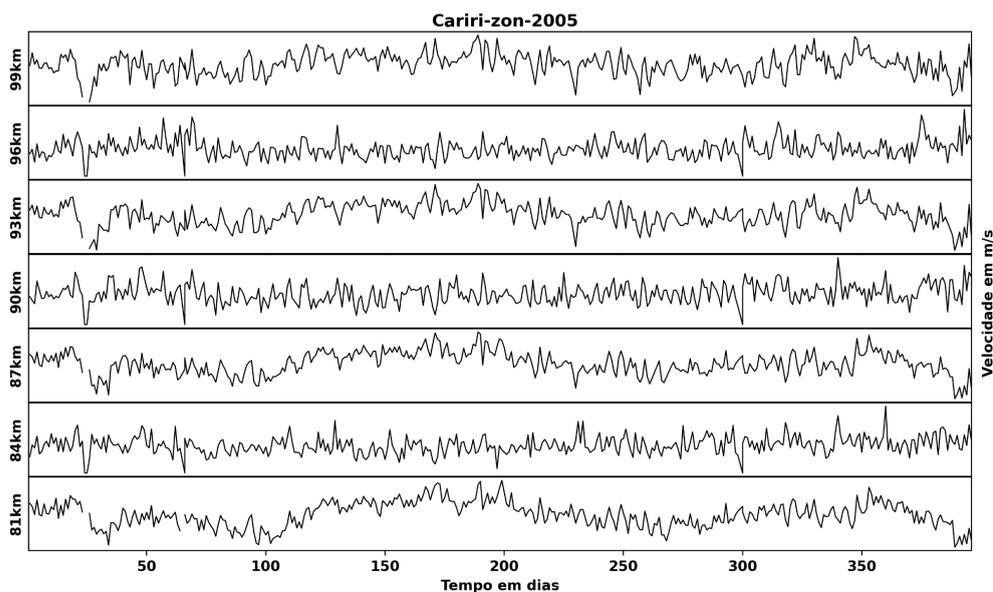
ser visto na **Figura 7** para as localidades de Cachoeira Paulista e São João do Cariri, componente meridional, e na **Figura 8** para a componente zonal do vento para ambas as cidades. A determinação das amplitudes e fases pode ser obtida pela análise harmônica. Para o estudo da variação temporal do espectro de frequências, será aplicada a Transformada de Wavelet de Morlet.

Figura 7 – Distribuição da componente meridional conforme a altitude entre 99km(topo) e 81km(base) para localidade de São João do Cariri no ano de 2005.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Figura 8 – Distribuição da componente zonal do vento em São João do Cariri em 2005. O gráfico mostra sete linhas de tempo empilhadas, cada uma representando uma altitude diferente: 99km, 96km, 93km, 90km, 87km, 84km e 81km. O eixo horizontal representa o tempo em dias, variando de 0 a 350. O eixo vertical representa a velocidade em m/s. As linhas mostram oscilações complexas e correlacionadas entre as altitudes.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

3.2 Técnicas utilizadas na análise das oscilações planetárias

Os dados das componentes zonal e meridional obtidas ao final do processamento dos dados brutos constituem séries temporais não estacionárias. A não estacionariedade das séries temporais dos ventos, assim como qualquer outro sistema físico, possuem seus momentos estatísticos, como média, variância, entre outros, variando em diferentes segmentos da série temporal (BOLZAN, 2004). Assim, o estudo de sinais não estacionários exige análise com abordagens matemáticas robustas para que se possam compreender os fenômenos físicos que estão agindo em qualquer sistema natural. Na análise de séries temporais o objetivo básico é o de aproximar uma função do tempo por uma combinação linear de harmônicos (MORETTIN, 1999).

3.2.1 Transformada de Ondaletas

A tradicional Análise de Fourier, usada para extrair componentes de frequência em séries temporais de dados atmosféricos, torna-se inviável em muitas situações, pois não fornece informações sobre como esses componentes variam ao longo do tempo. Para contornar essa limitação, uma abordagem comum é dividir a série de dados em segmentos de tempo e aplicar a transformada de Fourier ou outra técnica em cada segmento individualmente, conhecida como Transformada Janelada de Fourier. No entanto, essa abordagem utiliza uma janela fixa, o que impede a detecção simultânea de variações em frequências altas e baixas (ARAÚJO, 2012).

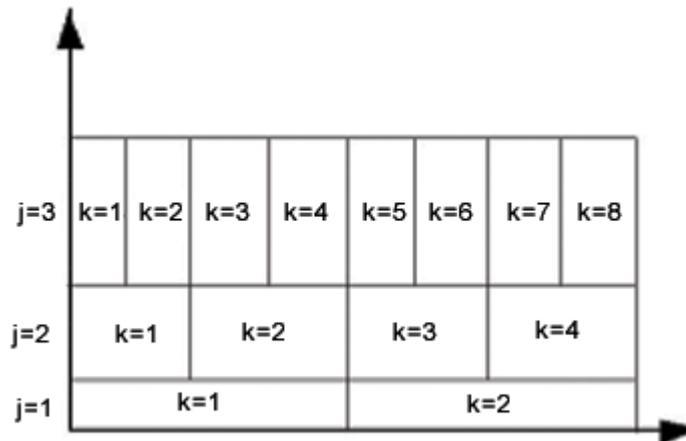
Dentre as várias técnicas existentes, a Transformada de wavelet permite o estudo de sistemas físicos dos mais variados tipos de uma maneira mais simplificada sem perder a robustez que outras análises oferecem, como a Transformada de Fourier (TF), com a vantagem de a Transformada de Ondaletas ser localizada no tempo, ao contrário da TF.

O conceito principal por trás da análise utilizando ondaletas é decompor um sinal em vários níveis de detalhes, o que é conhecido como Multirresolução. Essa abordagem oferece uma estrutura hierárquica que simplifica a interpretação das informações contidas no sinal. Em diferentes níveis de resolução, os detalhes do sinal tendem a representar diversas estruturas físicas. Em níveis de resolução mais baixos, esses detalhes descrevem geralmente as grandes estruturas que fornecem o contexto geral, enquanto em níveis mais altos de resolução, esses detalhes se tornam mais refinados (BOLZAN, 2004). Na **Figura 9**, temos uma representação do funcionamento da análise multirresolução da wavelet, sendo os valores de "j" e "k" responsáveis pelo achatamento e transladação da função, respectivamente. A análise consiste na variação desses parâmetros, ajustando o tamanho da wavelet para caber dentro dos segmentos gerados. O sinal segmentado é então varrido pela wavelet modificada.

As wavelets são categorizadas em dois grupos: discretas e contínuas. De interesse substancial para o presente trabalho por suas características mais condizentes com sistemas físicos, as wavelets contínuas são utilizadas para analisar a relação entre as diferentes frequências de um sinal ao longo do tempo, sendo essas relações classificadas como não-lineares. Elas fornecem uma abordagem matemática apropriada para investigar essas relações por meio de um diagrama. Nessa representação gráfica de uma série temporal, os eixos y e x representam, respectivamente, a escala de frequências e a escala de tempo, enquanto um terceiro eixo é dedicado à intensidade de energia, frequentemente representada por cores (BOLZAN, 2004).

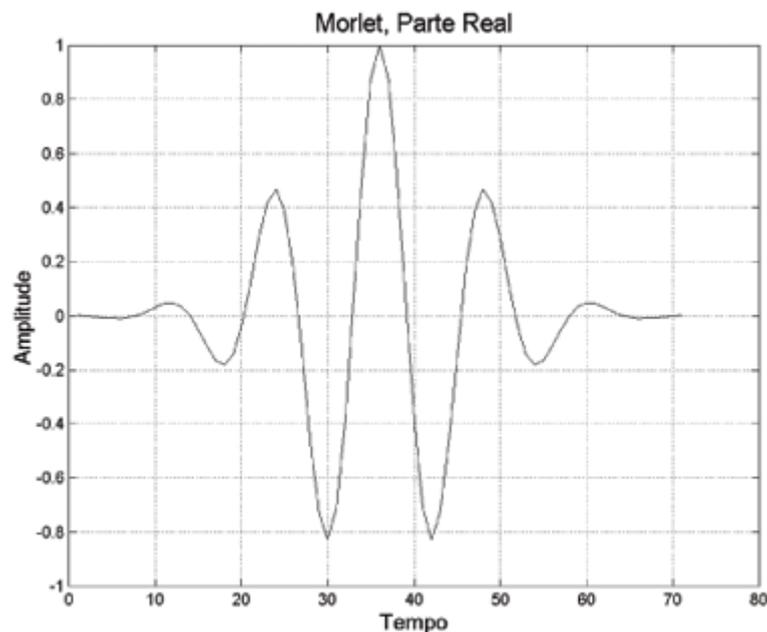
Dentre as várias funções Wavelets, a utilizada durante o presente estudo foi a Wavelet base de Morlet, que pode ser representada pela **Figura 10**. No trabalho em questão, o programa utilizado foi escrito originalmente em MATLAB por Torrence e Compo (1995-2021).

Figura 9 – Representação do funcionamento da análise multirresolução.



Fonte: BOLZAN, 2006.

Figura 10 – Representação gráfica da parte real da wavelet base de Morlet.



Fonte: BOLZAN, 2004.

3.2.2 Análise Harmônica

Se um sinal periódico é identificado em uma série temporal, então é possível analisar a amplitude e a fase deste sinal periódico via um ajuste empregando-se o método dos mínimos quadrados. Para tanto, o seguinte modelo será considerado (BLOOMFIELD, 2000).

$$x_t = A \cos(2T\pi\omega) + B \sin(2T\pi\omega) + e_t \quad (1.2)$$

Entendendo o sinal como uma composição de outros sinais base e ruídos, a equação acima possibilita a reconstrução de uma das componentes que formam o sinal real. Os valores de A e B são determinados para cada componente do sinal, onde representam os coeficientes do ajuste. O valor de ω dependerá da frequência escolhida, sendo o T período. Para um ajuste mais preciso que se aproxime do sinal real, é essencial o conhecimento dos possíveis elementos que o constituem. Isso pode ser alcançado através da compreensão dos fenômenos que o moldam ou por meio de ferramentas matemáticas que realizam a decomposição do sinal nas frequências envolvidas.

Ao aplicarmos o método da minimização dos mínimos quadrados, o objetivo é encontrar valores de A e B, que aplicados na equação 1.1, tenham um melhor ajuste no sinal. O valor e_t representa a média dos valores do sinal. Tal minimização é obtida por:

$$S(A, B) = \sum_{t=0}^{n-1} [x_t - A \cos(2T\pi\omega) - B \sin(2T\pi\omega)]^2 \quad (1.3)$$

A função $S(A, B)$ é resolvida mantendo ω e resolvendo o sistema de equações diferenciais parciais em termos de A e B. Assim os valores dos coeficientes de A e B que melhor se ajustem ao sinal são dados por:

$$A = \frac{1}{\Delta} (\sum x_t \cos(2T\pi\omega) \sum [\sin(2T\pi\omega)]^2 - \sum x_t \sin(2T\pi\omega) \sum \cos(2T\pi\omega) \sin(2T\pi\omega))$$

$$B = \frac{1}{\Delta} (\sum x_t \sin(2T\pi\omega) \sum [\cos(2T\pi\omega)]^2 - \sum x_t \cos(2T\pi\omega) \sum \cos(2T\pi\omega) \sin(2T\pi\omega))$$

Sendo Δ dado por:

$$\Delta = \sum [\cos(2T\pi\omega)]^2 \sum [\sin(2T\pi\omega)]^2 - [\sum \cos(2T\pi\omega) \sin(2T\pi\omega)]^2$$

A amplitude R e a fase ϕ são estimadas a partir das equações:

$$A = R \cos(2\pi\phi) \quad \text{e} \quad B = -R \sin(2\pi\phi)$$

A amplitude é obtida tomando a raiz quadrada de $A^2 + B^2$.

$$R = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (1.4)$$

A estimativa dos coeficientes de A e B, bem como os valores das fases, pode ser realizada manualmente. No entanto, trata-se de um processo desgastante e repetitivo, uma vez que seria necessário repetir o procedimento para cada ponto do sinal que representa a série temporal. O uso de ferramentas computacionais se torna crucial para processos de natureza monótona, tornando o procedimento mais eficiente e rápido. A automação dos cálculos das amplitudes, assim como a geração dos gráficos neste trabalho, foram realizados por meio de rotinas (scripts) criados com a linguagem de programação Python. Os códigos criados e adaptados encontram-se hospedados no endereço eletrônico: <https://github.com/Lucas-fisica/TCC.git>.

Para o caso do programa que calcula as amplitudes, seu funcionamento se dá de forma janelada, ou seja, durante a sua execução, é criada uma janela móvel de largura definida de $5 \cdot T$, onde T representa o período da onda atmosférica

analisada e o valor 5 é utilizado para poder ter uma melhor resolução, uma vez que serão contemplados 5 ciclos completos da oscilação. Essa janela é deslocada no sinal, calculando valores dos coeficientes de ajuste A e B, utilizados na determinação da amplitude do sinal. É de crucial importância que seja uma análise janelada, já que aplicar a rotina em todo o sinal de uma única vez resultaria em únicos valores de amplitude e fase para todo o sinal, perdendo informações temporais do comportamento do sinal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

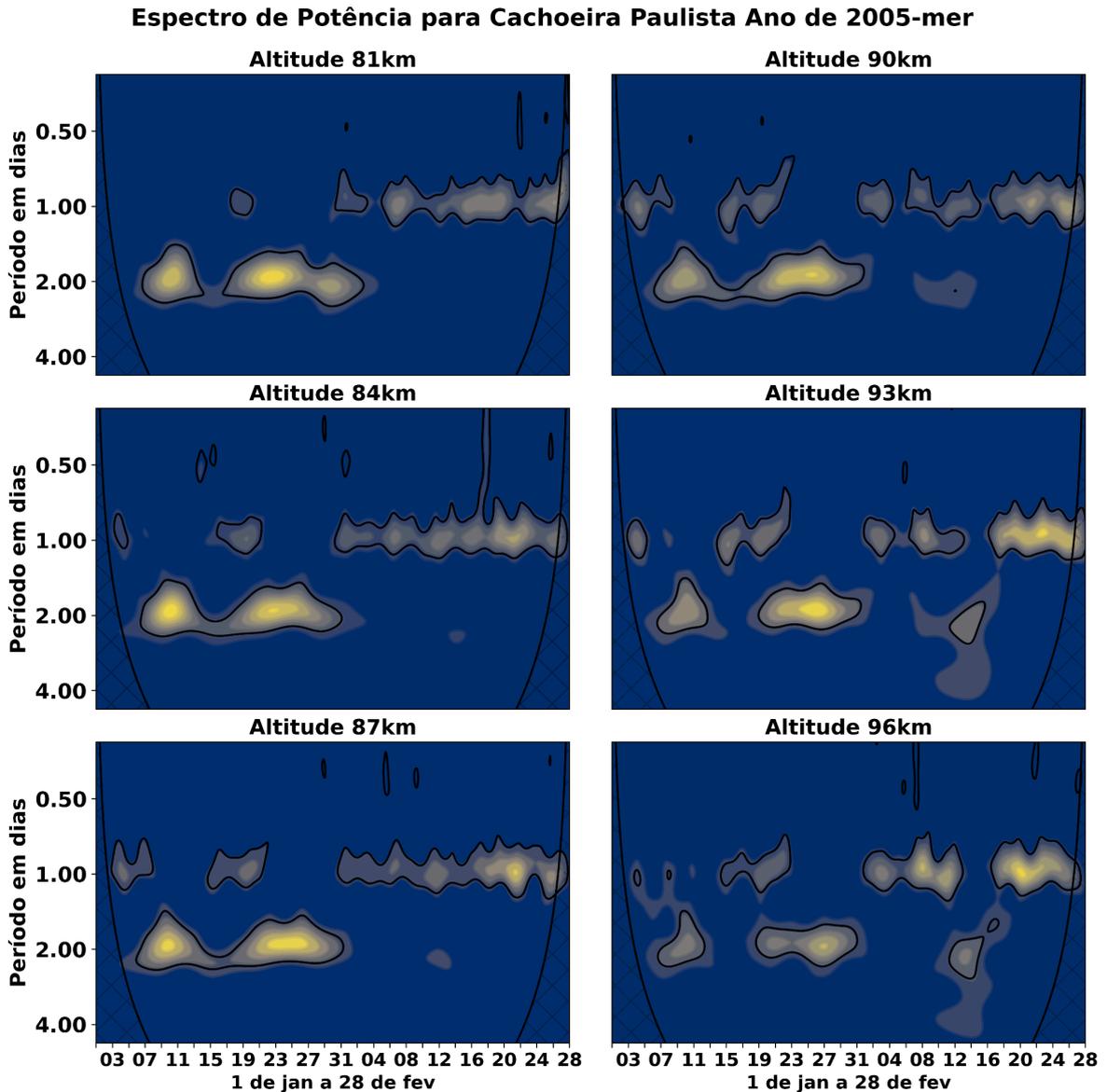
Visando avaliar a presença da oscilação da onda de dois dias nos dados de ventos atmosféricos da região MLT, a análise do espectro de potência foi realizada para ambas as localidades. Os valores da série temporal foram considerados para os meses de janeiro e fevereiro nos anos 2005 e 2006. Tanto no espectro de potência para a componente zonal quanto para a componente meridional, é possível perceber a presença da onda de dois dias, assim como a maré diurna e outras oscilações, embora não sejam o foco deste trabalho.

Com intuito de avaliar a variabilidade da amplitude da onda planetária com período de 2 dias, durante o período analisado, foi empregado o método dos mínimos quadrados para cada altitude, e os valores das amplitudes encontrados foram dispostos numa estrutura vertical, correspondente às respectivas altitudes analisadas. O cálculo das amplitudes foi realizado para as componentes zonal e meridional de ambas as localidades.

4.1 Espectros de Potências

A **Figura 11** apresenta o espectro de potência para as altitudes entre 81 e 96 km, referente à componente meridional em Cachoeira Paulista durante o ano de 2005. Destaca-se a marcante presença da onda de dois dias nas altitudes entre 81 km e 93 km, observada entre os dias 6 e 31 de janeiro, com os maiores picos próximos aos dias 10 e 25 de janeiro. Notavelmente, a altitude de 96 km revela uma presença menos significativa da onda de dois dias em comparação com as altitudes inferiores.

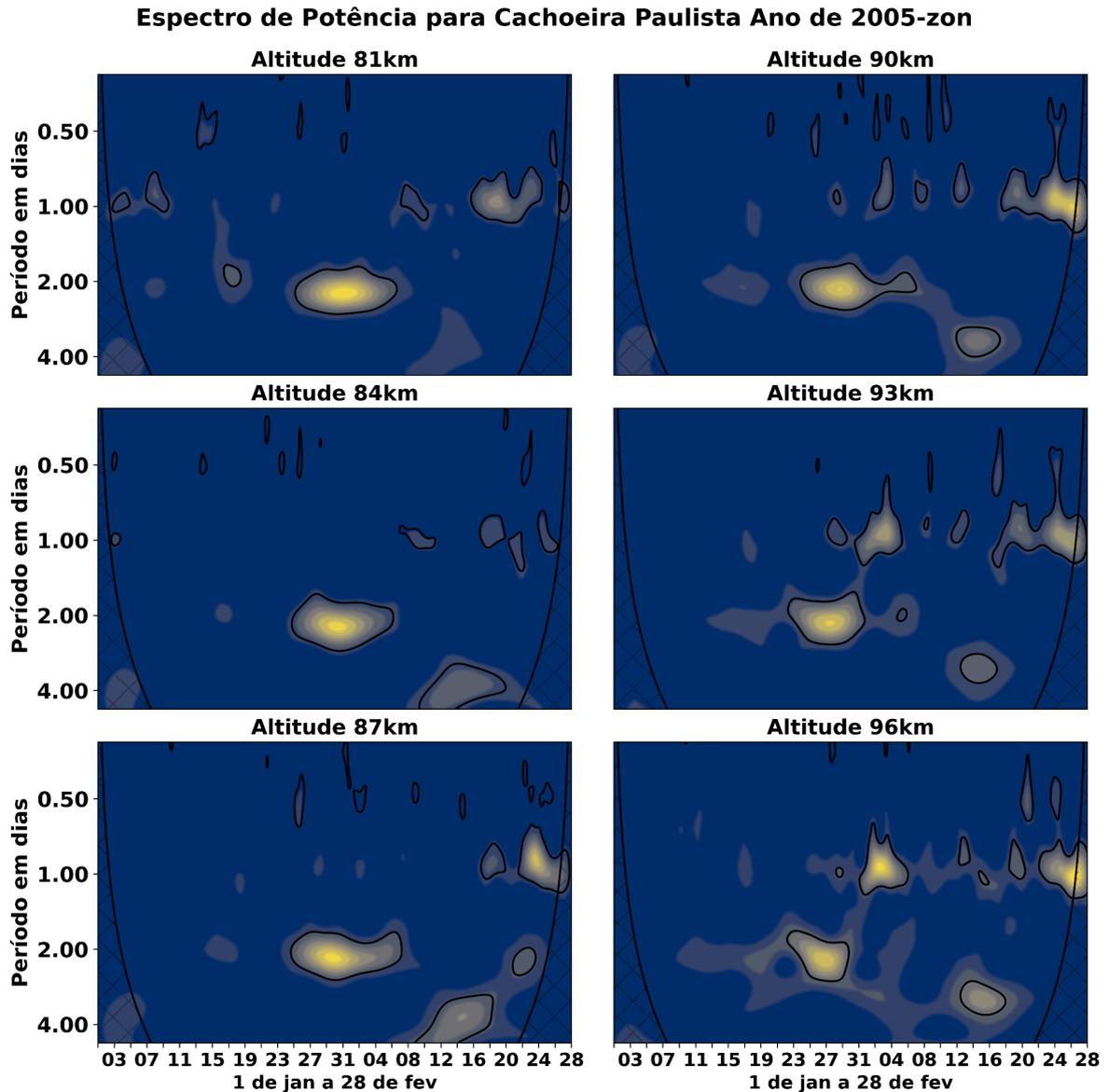
Figura 11 – Espectros de Potência para a componente meridional de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2005.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Para a componente zonal de Cachoeira Paulista no ano de 2005, representada na **Figura 12**, observamos uma presença mais fraca das oscilações com períodos próximos à onda de dois dias. A ocorrência mais significativa acontece entre os dias 25 de janeiro e 5 de fevereiro, para as altitudes de 81 a 90 km, e entre os dias 23 de janeiro e 2 de fevereiro, para as altitudes de 93 a 96 km. O maior nível energético foi observado próximo ao dia 29 de janeiro.

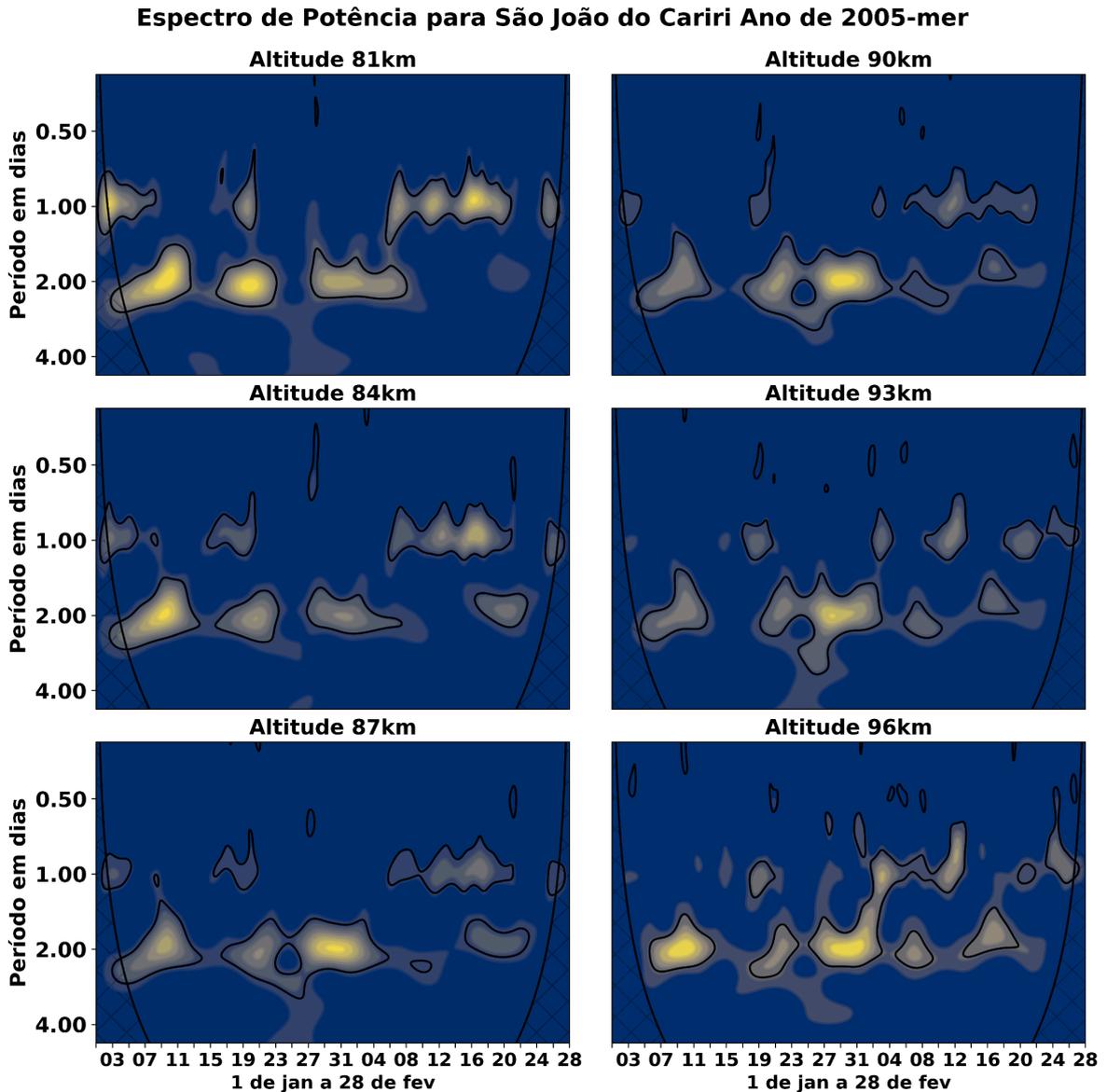
Figura 12 - Espectros de Potência para a componente zonal de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2005.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Na **Figura 13**, correspondente à componente meridional, temos os espectros de potência para a localidade de São João do Cariri no ano de 2005. Há uma presença notável das oscilações de período próximo à onda de dois dias ao longo dos meses de janeiro e fevereiro. Entre as altitudes de 81 km a 93 km, os picos mais evidentes estão próximos dos dias 10, 21 e 31 de janeiro, enquanto na altitude de 96 km, temos picos notáveis próximos aos dias 10, 21 e 31 de janeiro, e dois picos menores em fevereiro, próximos aos dias 8 e 16.

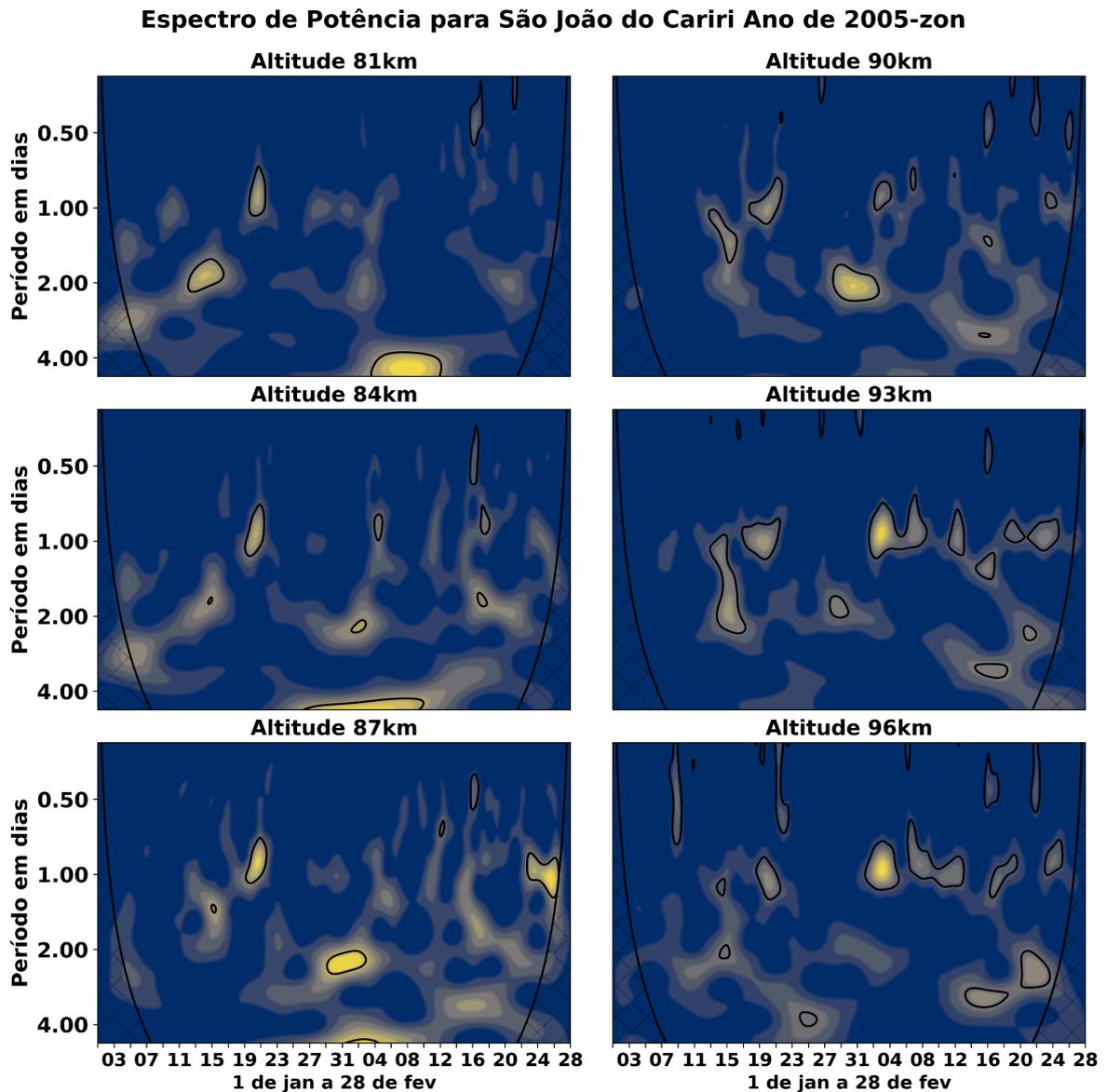
Figura 13 – Espectros de Potência para a componente meridional de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2005.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

A **Figura 14** apresenta os espectros de potência da componente zonal para o ano de 2005, na localidade de São João do Cariri. Em comparação com a componente meridional, as oscilações com períodos próximos a dois dias na componente zonal mostraram-se menos energéticas. O maior pico é observado próximo ao dia 31 de janeiro, nas camadas de 87 e 90 km de altitude.

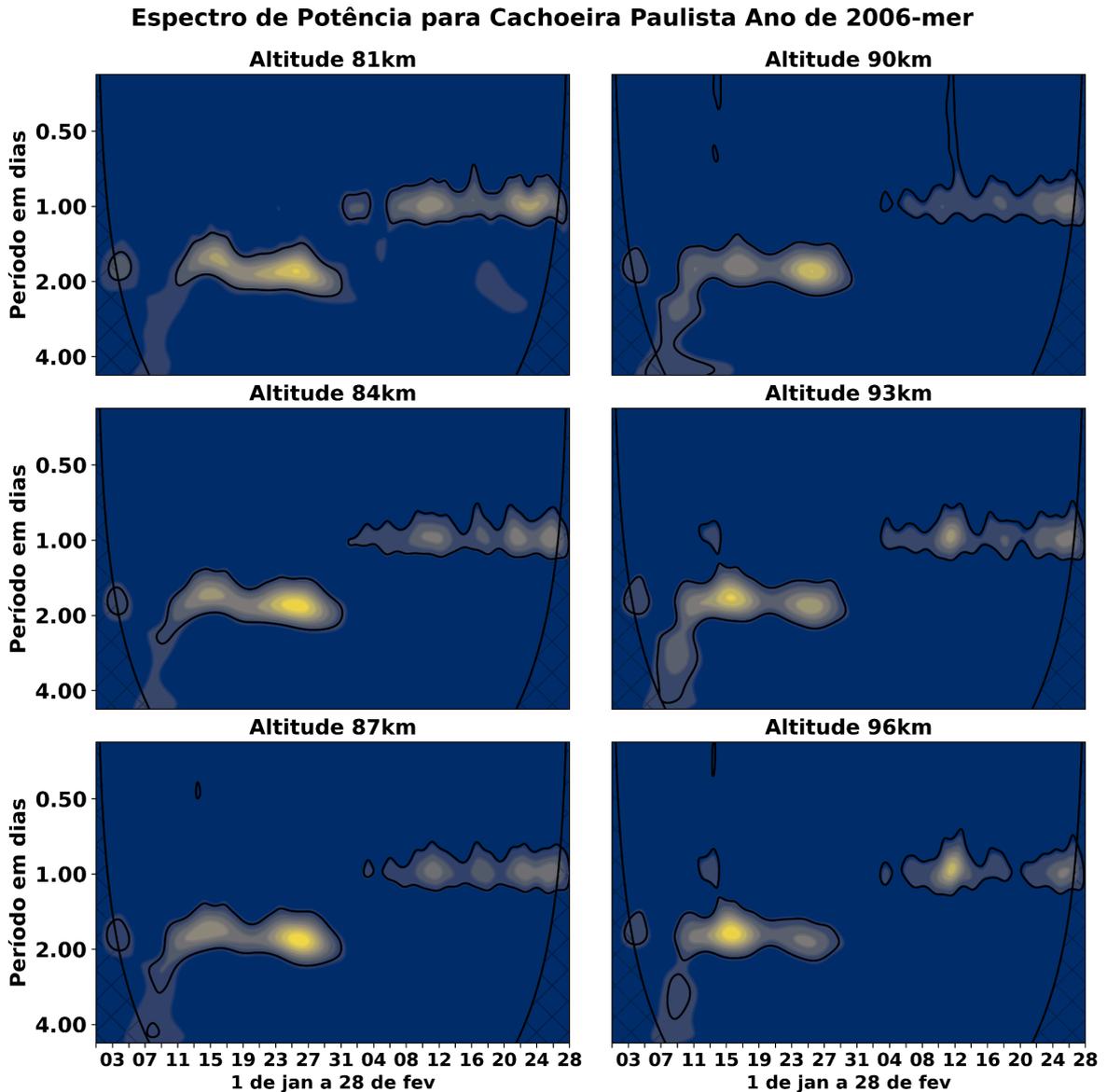
Figura 14 - Espectros de Potência para a componente zonal de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2005.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

No ano de 2006, ambas as localidades experimentaram fortes oscilações com períodos próximos à onda de dois dias nas componentes meridionais do vento atmosférico. A **Figura 15** representa a componente meridional do vento para a localidade de Cachoeira Paulista. Como observado, as oscilações com períodos próximos a 2 dias são fortemente evidenciadas ao longo de quase todo o mês de janeiro. O pico de energia máxima, para as camadas entre 81 e 90 km, é identificado próximo ao dia 27 de janeiro. Já nas camadas de 93 km e 96 km, os maiores níveis energéticos foram registrados próximos ao dia 15 de fevereiro.

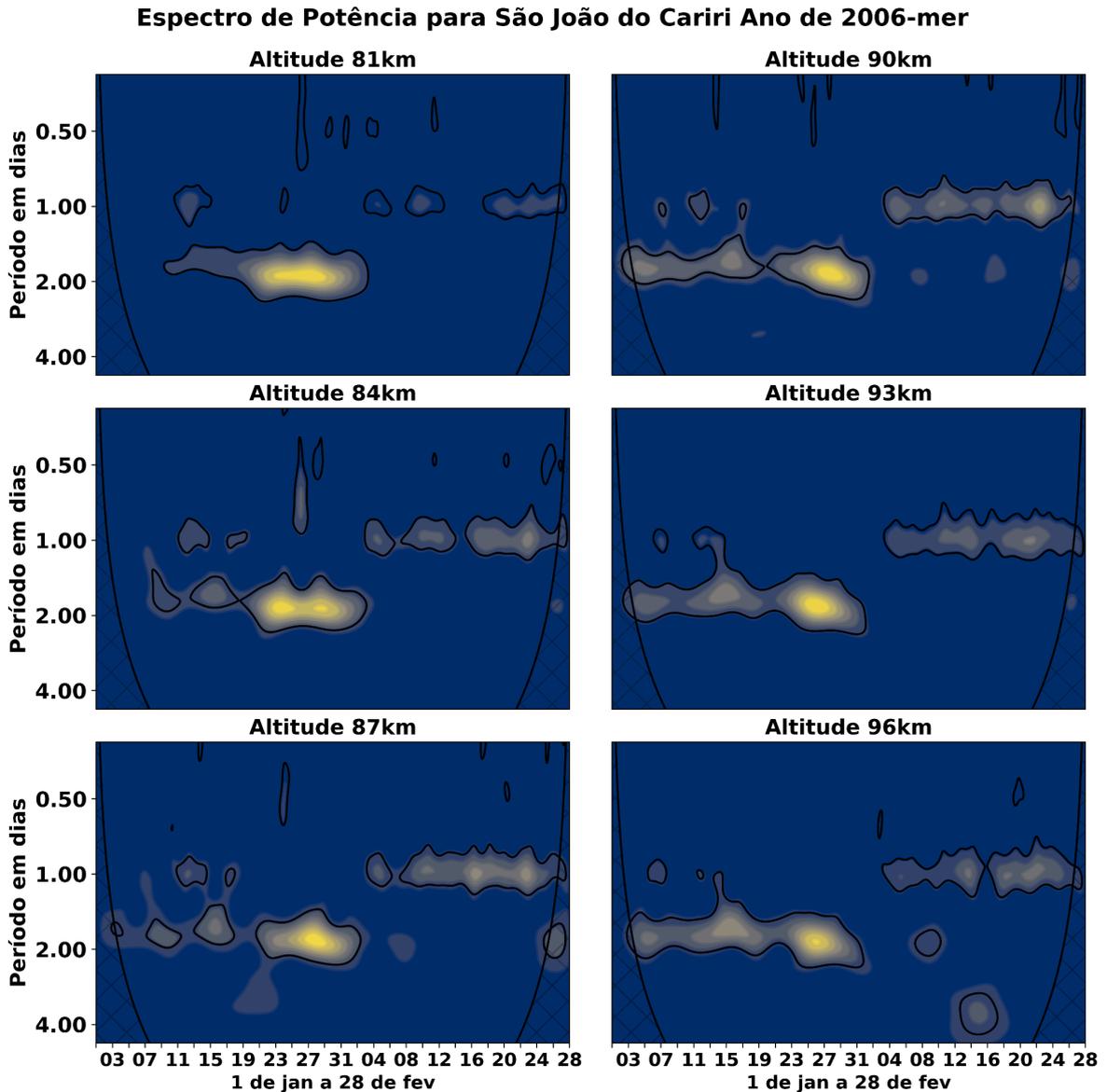
Figura 15 - Espectros de Potência para a componente meridional de Cachoeira Paulista, no período de janeiro a fevereiro de 2006.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Na componente meridional da localidade de São João do Cariri, conforme ilustrado na **Figura 16**, observa-se uma forte presença de oscilações com períodos próximos a dois dias, ocorrendo entre os dias 21 de janeiro e 4 de fevereiro, nas altitudes entre 81 km e 87 km. Os maiores níveis energéticos são registrados próximo ao dia 27 de janeiro. Para as demais altitudes, a ocorrência é notável ao longo de quase todo o mês de janeiro, embora com níveis energéticos menores. A presença é mais marcante entre os dias 23 e 31 de janeiro, com os valores energéticos mais altos também ocorrendo próximo ao dia 27 de janeiro.

Figura 16 - Espectros de Potência para a componente meridional de São João do Cariri, no período de janeiro a fevereiro de 2006.

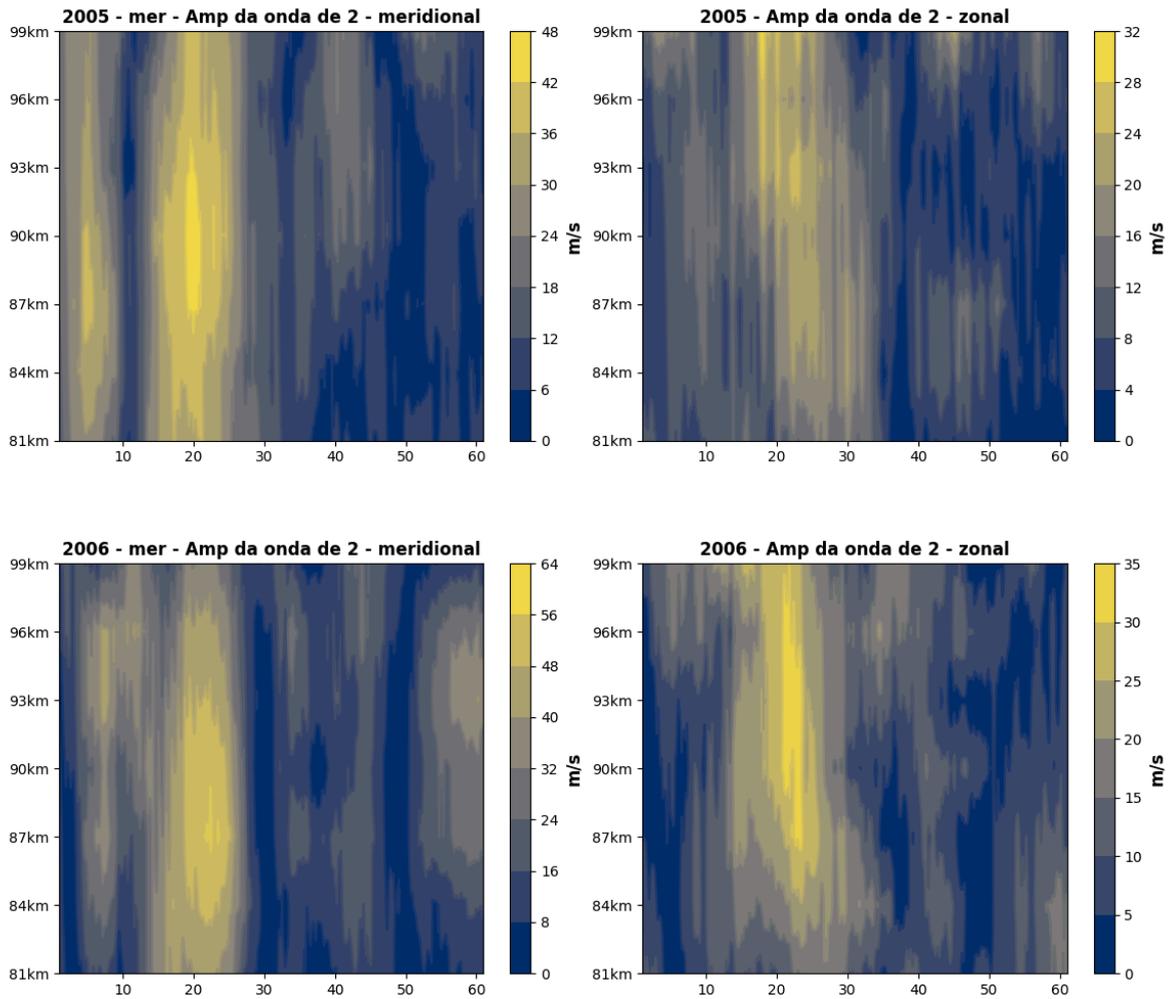


Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

4.2 Amplitudes da Onda de Dois dias

Durante o período analisado, as maiores amplitudes foram registradas no mês de janeiro, próximo ao dia 20, para ambas as localidades. Nas **Figuras 17** e **Figura 18**, podemos observar a variabilidade das amplitudes. Conforme pode ser visto na estrutura vertical para a componente meridional no ano de 2005, na localidade de Cachoeira Paulista, os maiores valores das amplitudes são encontrados entre 87 km e 93 km, atingindo valores próximos a 48 m/s. Os maiores valores de amplitude foram registrados no ano de 2006, na componente meridional, com valores próximos a 64 m/s, entre as altitudes de 84 km e 87 km. Já as componentes zonais apresentam os valores mais baixos, com os máximos próximos a 30 m/s.

Figura 17 – Estruturas verticais das amplitudes da onda de dois dias entre os meses de janeiro e fevereiro para a localidade de Cachoeira Paulista.

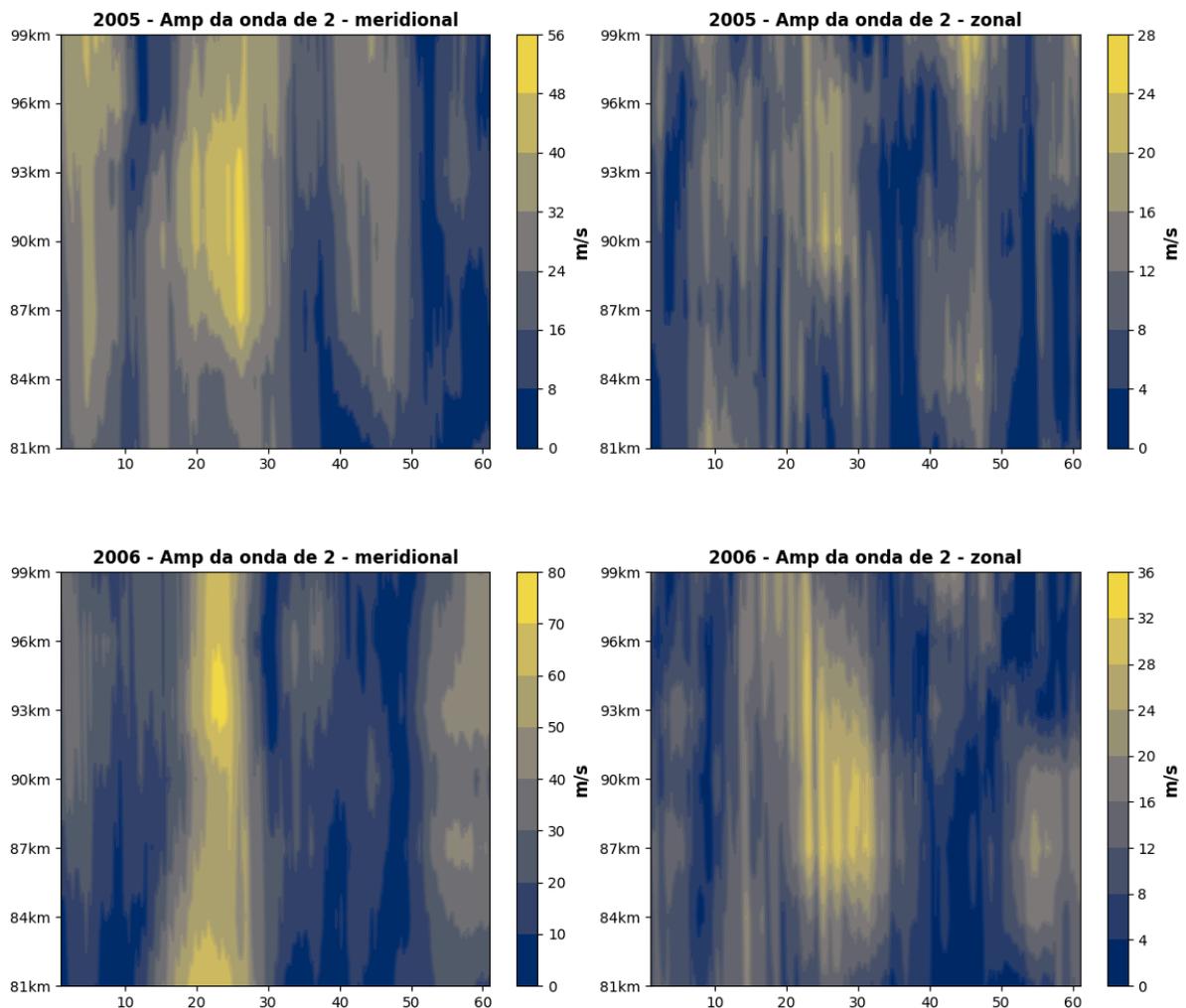


Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

A localidade de São João do Cariri, representada na **Figura 18**, foi a que registrou a maior amplitude da onda de dois dias, alcançando o valor máximo de 80 m/s no ano de 2006, na componente meridional. Mais uma vez, observamos os maiores valores sendo registrados na componente meridional, como relatado em estudos anteriores, como os de LIMA (2004) e ARAÚJO (2012).

Para o ano de 2005, na componente meridional, os maiores valores de amplitudes da onda foram observados entre as altitudes de 87 km e 93 km, atingindo valores próximos a 56 m/s. Já a componente zonal apresentou uma fraca presença da onda de dois dias, com as amplitudes máximas próximas a 28 m/s.

Figura 18 - Estruturas verticais das amplitudes da onda de dois dias entre os meses de janeiro e fevereiro para a localidade de São João do Cariri.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2024.

Com base nas estruturas verticais das amplitudes para ambas as localidades, podemos perceber que as amplitudes da componente meridional alcançam aproximadamente o dobro das da componente zonal, o que está de acordo com estudos já realizados sobre a diferença de amplitude da onda de dois dias entre as componentes meridional e zonal do vento.

5 CONCLUSÕES

Dados de vento horário, coletados por meio de medições por radar meteorológico em São João do Cariri-PB e Cachoeira Paulista-SP, foram utilizados para identificar oscilações com período próximo a dois dias na região da alta mesosfera e baixa termosfera (MLT), durante o período de 1º de janeiro a 28 de fevereiro nos anos de 2005 e 2006.

Utilizando o espectro de potência como ferramenta analítica, conseguimos detectar a presença da onda de dois dias em todas as altitudes estudadas, tanto em São João do Cariri-PB quanto em Cachoeira Paulista-SP. Observamos que essas oscilações, com período próximo a dois dias, apresentaram maior frequência no mês

de janeiro. Além disso, notamos a marcante presença da maré diurna, embora este fenômeno não tenha sido o foco principal de nossa pesquisa.

Por meio da análise harmônica, aplicando o método dos mínimos quadrados, determinamos as amplitudes da onda de dois dias para ambas as localidades. As maiores amplitudes sempre foram observadas na componente meridional do vento, chegando a valores 2 vezes maiores que a componente zonal no mesmo período. As amplitudes mais altas foram registradas no ano de 2006, atingindo um valor máximo de 80 m/s.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology: an invitation to the atmosphere**. 3. ed. New York: Brooks Cole, 2001. 463 p.

ANDRIOLI, Vânia Fátima. **Estudo dos ventos entre 80 e 100 km de altitude, utilizando radar meteorológico na região de Santa Maria (29,7 S; 53,8 O)**. 2008. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

ARAÚJO, Luciana Rodrigues de et al. **Sazonalidade de ondas planetárias nos ventos meteorológicos observados em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP**. 2012.

BEER, T. **Atmospheric waves**. Londres: Adam Hilder, 1974. 300 p.

BLOOMFIELD, P. **Fourier analysis of time series: an introduction**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

BOLZAN, Maurício José Alves. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 37-41, 2004.

BOLZAN, Maurício José Alves. Transformada em ondeleta: Uma necessidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, p. 563-567, 2006.

BORGES, Fabrício Batista. **Variações nas marés atmosféricas e nos ventos meteorológicos observados em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP**. 2010.

CRAIG, R. L.; ELFORD, W. G. Observations of the quasi 2-day wave near 90 km altitude at Adelaide (35° S). **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 41, n. 10, p. 1051-1056, out. 1981.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. Oficina de textos, 2007.

GOMES, Fábio do Egito. **Efeitos das Ondas Planetárias na Aeroluminescência**. São José dos Campos (INPE), 2013.

HARGREAVES, John Keith. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. Cambridge university press, 1992.

HARRIS, T. J.; VINCENT, R. A. The quasi-two-day observed in the equatorial middle atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D6, p. 10.481-10.490, jun. 1993.

HOLTON, J. R. **An Introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 529 p.

LIMA, L. M. **Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul**. São José dos Campos (INPE), 2004.

MEEK, C. E.; MANSON, A. H.; FRANKE, S. J.; SINGER, W.; HOFFMANN, P.; CLARK, R. R.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T.; TSUTSUMI, M.; HAGAN, M.; FRITTS, D. C.; ISLER, J.; PORTNYAGIN, Yu. I. Global study of northern hemisphere quasi 2-day wave events in recent summers near 90 km altitude. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 58, n. 13, p. 1401-1412, set. 1996.

MORETTIN, Pedro Alberto. **Ondas e Ondaletas Vol. 23**. Edusp, 1999.

MOZETO, Antonio A. **Química atmosférica: a química sobre nossas cabeças**. 2001.

NORTON, W. A.; THUBURN, J.. The two-day wave in a middle atmosphere GCM. **Geophysical Research Letters**, v. 23, n. 16, p. 2113-2116, ago. 1996.

PALO, Scott E.; ROBLE, Raymond G.; HAGAN, Maura E. Middle atmosphere effects of the quasi-two-day wave determined from a General Circulation Model. **Earth, Planets and Space**, v. 51, n. 7-8, p. 629-647, Jul. 1999.

PFISTER, Leonhard. Baroclinic instability of easterly jets with applications to the summer mesosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 4, p. 313-330, Fev. 1985.

PLUMB, R. Alan. Baroclinic instability of the summer mesosphere: a mechanism for the quasi-two-day wave?. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 40, n. 1, p. 262-270, Jan. 1983.

RANDEL, William J. Observations of the 2-day wave in NMC stratospheric analyses. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 2, p. 306-313, Jan. 1994.

SALBY, Murry L. The 2-day wave in the middle atmosphere - observations and theory. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. C10, p. 9654-9660, Out. 1981.

SALBY, M. L.; CALLAGHAN, P. F. Seasonal Amplification of the 2-Day Wave: Relationship between Normal Mode and Instability. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 58, n. 14, p. 1858-1869, Jul. 2001

SANTOS, Elinei. **Mecânica Clássica I para o nosso tempo: Uma abordagem computacional utilizando o mathematica**. 1. ed. São Paulo: livraria da física, 2021. 430 p. ISBN 9786555630466.

TORRENCE, Christopher; COMPO, Gilbert P. Um guia prático para análise wavelet. **Boletim da Sociedade Meteorológica Americana** v. 79, n. 1, pág. 61-78, 1998.
VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os eventos que me precederam e que, em algum nível, moldaram a carne e os ossos dos meus antepassados. Certamente, nem todos os eventos foram agradáveis para a espécie humana.

Agradeço ao Professor Dr. Lourivaldo Mota Lima por todos os ensinamentos, sua motivação e por sua imensa paciência ao longo de todos esses anos de orientação em diversos trabalhos.

Agradeço aos membros da Banca, Professora Dra. Ana Roberta e Professor Dr. Thiago Silva, por suas contribuições para este trabalho.

Agradeço à Universidade Estadual da Paraíba pela oportunidade de aprendizado e pelo apoio financeiro, que sem dúvida foram cruciais para a continuação e conclusão desta jornada acadêmica. Não posso esquecer, claro, da coordenação do Curso de Física, que sempre foi prestativa e atenciosa.

Agradeço aos meus pais, José Augusto e Josefa Lima, por toda a paciência e incentivo ao longo de todos esses anos. Se me pedirem uma definição de alguém corajoso, paciente e bondoso, direi sem sombra de dúvida o nome do meu pai. Se me perguntarem sobre alguém forte, guerreira e destemida, sem hesitar, direi o nome da minha mãe. Heróis não usam capa. Vocês são a prova viva disso.

Agradeço aos meus dois irmãos e minha irmã, que me fizeram trocar suas fraldas nas diversas vezes que seus organismos decidiram ejetar quase tudo o que ingeriram. Obrigado por suportarem este ser caótico. Não esquecendo, claro, do meu sobrinho, que enquanto aprendia seus primeiros passos, me arrancou diversos risos durante toda construção do trabalho.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos que participaram direta e indiretamente desta longa jornada, alguns no início, outros no meio e alguns no fim. Farei a audácia de escolher um pouco mais que uma dúzia deles: Alisson José, Barbara Turin, Clevia Oliveira, Delis Otildes, Edineide Santos, Emanuel Silva, Erica Lino, Flávia Danielly, João Henrique, Joseferson Barreto, Josinaldo Ferreira, José Anderson, Kennedy Evaristo, Liliane Barbosa, Luciano Antunes, Maercio Cunha, Matheus Souza, Raquel Cardoso, Sanzia Nayara, Wandson Nunes, Yan Barbosa. Agradeço por cada momento compartilhado. Mesmo os nomes aqui não citados, saibam que cada um faz parte das minhas memórias.

Agradeço a todos os meus professores que fizeram parte da minha jornada ao longo desses vários anos de curso, que nos mais diversos contextos, compartilharam comigo um pouco de seus preciosos tempos de existência, experiências e conhecimentos.

Agradeço ao mais habilidoso motorista que conheço, Sr. Marinaldo, que guiou o veículo de transporte para as universidades de Campina Grande ao longo de quase todos esses anos de jornada acadêmica.

Agradeço a todos os seres curiosos. Para aqueles que estão em busca, desejo que encontrem o que procuram. E, ao encontrarem, que sigam explorando ainda mais.