

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA

Suallyson Sômston Araújo da Cruz

Observações de oscilações na atmosfera utilizando dados de estações meteorológicas de superfície de aeroportos na Paraíba

Campina Grande, Paraíba, Brasil 18 de maio de 2025

Suallyson Sômston Araújo da Cruz

Observações de oscilações na atmosfera utilizando dados de estações meteorológicas de superfície de aeroportos na Paraíba

Dissertação realizada sob orientação do Prof. Igo Paulino , apresentada à Unidade Acadêmica de Física em complementação aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Professor Igo Paulino

Campina Grande, Paraíba, Brasil 18 de maio de 2025

C957o	 Cruz, Suallyson Sômston da. Observações de oscilações na atmosfera utilizando dados de estações meteorológicas de superfície de aeroportos na Paraíba / Suallyson Sômston da Cruz Campina Grande, 2025. 71 f. : il. color.
	Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Centro de Ciências e Tecnologia, 2025. "Orientação: Prof. Dr. Igo Paulino da Silva." Referências.
	1. Oscilações Atmosféricas. 2. Sazonalidade. 3. Estação EMS. 4. Perturbações Atmosféricas Regional. 5. Variabilidade Atmosférica. 6. Distúrbios Ondulatórios de Leste. I. Silva, Igo Paulino da. II. Título.
	CDU 551.51(043)
FICHA C	CATALOGRAFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECARIA ITAPUANA SOARES DIAS GONÇALVES CRB-15/93



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE POS-GRADUACAO EM FISICA

Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

Suallyson Sômston Araújo da Cruz

Observações de oscilações na atmosfera utilizando dados de estações meteorológicas de superfície de aeroportos na Paraíba

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Física.

Aprovada em: 13/02/2025

Igo Paulino da Silva

Presidente da Comissão e Orientador

Ricardo Arlen Buriti da Costa

Examinador Interno

Luiz Fillip Rodrigues Vital

Examinador Externo



Documento assinado eletronicamente por **JOAO RAFAEL LUCIO DOS SANTOS**, **COORDENADOR(A)**, em 05/05/2025, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8°, caput, da <u>Portaria SEI</u> <u>nº 002, de 25 de outubro de 2018</u>.

Documento assinado eletronicamente por IGO PAULINO DA SILVA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 05/05/2025, às

 $Dedico\ esse\ trabalho\ a\ to dos\ que\ estiveram\ ao\ meu\ lado\ nesse\ caminho$

Agradecimentos

- Ao meu orientador, prof. Igo Paulino, pela colaboração e conhecimento que recebi durante a fase de preparação desta dissertação.
- A todos os professores desta Unidade Acadêmica que contribuíram com a minha formação.
- A Nav brasil, pela prestativa colaboração desse trabalho, fornecendo os dados, sem os quais não seria possível a elaboração.
- Aos meus familiares pelo apoio, confiança e incentivo, em especial a minha mãe Rosimery Francisca e minha companheira Barbara Andrade.
- A Laysa Melo, minha segunda irmã que sempre me ajuda quando preciso.
- Ao meu grande amigo Alexandro Figueiredo, meu profundo agradecimento por todo apoio e incentivo nesse caminho.
- Aos colegas da pós-graduação aos funcionários da Unidade Acadêmica de Física pela grata convivência durante a minha permanência nesta Unidade.
- A todos que direta ou indiretamente possibilitaram a conclusão deste trabalho.
- Aos membros da banca o Prof. Ricardo Allen Buriti da Costa e Prof. Luiz Fillip Rodrigues Vital.

"Escolha sempre o caminho que pareça o melhor, mesmo que seja o mais difícil; o hábito brevemente o tornará fácil e agradável." (Pitágoras)

Resumo

Este estudo investigou a ocorrência de oscilações atmosféricas na região da Paraíba, utilizando dados de vento, pressão atmosférica e temperatura coletados a cada minuto, ao longo de 2023, pelas estações meteorológicas de superfície (EMS) dos aeroportos de João Pessoa (SBJP) e Campina Grande (SBKG). Após pré-processamento dos dados, 80 dias foram selecionados por apresentarem padrões oscilatórios, sendo submetidos a filtragem espectral e análise estatística. Oscilações com periodicidades entre 1 e 7 horas foram identificadas em 94% desses dias. Considerando simultaneidade entre as variáveis analisadas, 35 dias (44,9%) apresentaram oscilações consistentes e estatisticamente significativas. As ocorrências foram mais frequentes nos meses de inverno, indicando um padrão sazonal divergente da literatura, que geralmente associa maior frequência de perturbações atmosféricas aos períodos mais quentes para região. Os sinais detectados apresentaram características compatíveis com Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e ondas de gravidade rápidas, com padrão de propagação leste-oeste observado entre os dois sítios analisados. Os resultados evidenciam a presença de oscilações atmosféricas organizadas na região, com forte correlação entre pressão, temperatura e vento, sugerindo um acoplamento dinâmico local da atmosfera. Esses achados contribuem para o entendimento da variabilidade atmosférica regional e fornecem base para futuras investigações sobre a dinâmica de perturbações atmosféricas em ambientes tropicais.

Palavras-chave: Oscilações Atmosféricas. Sazonalidade. Estação EMS.

Abstract

This study investigated the occurrence of atmospheric oscillations in the Brazilian equatorial region using wind, atmospheric pressure, and temperature data collected every minute during 2023 by surface meteorological stations (EMS) at the airports of João Pessoa (SBJP) and Campina Grande (SBKG). After data preprocessing, 80 days were selected based on the occurrence of oscillatory patterns and spectral filtering and statistical analysis were performed. Oscillations with periodicities between 1 and 7 hours were identified in 94% of these days. Considering simultaneity among the analyzed fields, 35 days (44.9%) exhibited consistent and statistically significant oscillations. These events occurred more frequently during the winter months, indicating a seasonal pattern that diverges from the literature, which correlates the occurrences to warmer periods in the region. The detected signals exhibited characteristics compatible with Easterly Wave Disturbances (DOL) and fast gravity waves, with an east-west propagation pattern observed between the two analyzed sites. The results reveal the occurrence of organized atmospheric oscillations in the region with high correlations among pressure, temperature, and wind, suggesting a local dynamic coupling of the atmosphere. These findings contribute to the understanding of regional atmospheric variability and provide a foundation for future investigations into the dynamics of atmospheric disturbances in tropical environments.

Keywords: Atmospheric Oscillations . Seasonality. Station EMS.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Camadas da atmosfera terrestre, distribuição vertical da temperatura e pressão. Fonte: (BARRY; CHORLEY, 2009)	30
Figura 2 –	Imagem da estação automática, equipamento situado no sitio aeropor-	49
-	tuario SBKG. Fonte: Autoria propria	42
Figura 3 –	Imagem do barômetro, equipamento em questão localizado no sitio	
Figura 4 –	SBKG. Fonte: Autoria própria Mapa de localização Brasil, Paraíba, Campina Grande, Aeroporto de Campina Grande - Presidente João Suassuna, Fonte: (Instituto Brasi-	43
	leiro de Geografia e Estatística, 2024; Google Maps, 2024; Wikipédia,	
	2024), Editada pelo autor	44
Figura 5 –	Mapa de localização América Latina Brasil, Paraíba, joão Pessoa, Aeroporto Internacional de João Pessoa - Presidente Castro Pinto, Fonte:	
	(Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024; Google Maps,	
	2024; Wikipédia, 2024), Editada pelo autor	45
Figura 6 $\ -$	Gráfico da média de distribuição temporal para pressão atmosférica	
	e temperatura no mês de Janeiro de 2023 para o sítio SBKG. Fonte:	
	Autoria própria.	48
Figura 7 $\ -$	Gráfico da média de distribuição temporal para pressão atmosférica	
	e temperatura no mês de Janeiro de 2023 para o sitio SBJP, Fonte:	
	Autoria própria.	48
Figura 8 $\ -$	Gráfico de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura \hfill	
	no 17 de Janeiro de 2023 para o sitio SBKG, Fonte: Autoria própria. $\ .$	49
Figura 9 $\ -$	Gráfico de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura \hfill	
	no 17 de Janeiro de 2023 para o sitio SBJP, Fonte: Autoria própria	49
Figura 10 –	Gráfico de distribuição temporal das componentes Norte-Sul e Leste-	
	Oeste dos vendos para SBJP e SBKG, Fonte: Autoria própria	51
Figura 11 –	Gráfico de distribuição do espectro de pôtencia de Lomb-Scargle para	
	Pressão (A) e Temperatura (B) SBJP e SBKG, Fonte: Autoria própria.	52
Figura 12 –	Gráfico de distribuição do espectro de pôtencia de Lomb-Scargle para	
	vento meridional Norte-Sul (A) e zonal Leste-Oeste (B) SBJP e SBKG,	
	para 17 de janeiro 2023, Fonte: Autoria própria	53
Figura 13 –	Gráfico de distribuição temporal de pressão e temperatura, para o dia	
	29 de janeiro de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria	56
Figura 14 –	Gráfico de distribuição temporal de pressão e temperatura, para o dia	
-	15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria	57

Figura 15 $-$	Gráfico de periodograma de Lomb-Scargle para os parâmetros de pressão	
	e temperatura, para o dia 15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte:	
	Autoria própria	58
Figura 16 –	Periodograma de Lomb-Scargle para os parâmetros de ventos Norte-Sul	
	e Leste-Oeste, para o dia 15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte:	
	Autoria própria	59
Figura 17 –	Histograma de distribuição de oscilações durante o período do ano de	
	2023 para os sítios SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria	60
Figura 18 –	Distribuição normalizada dos eventos ao longo do ano, com a demarcação $\hfill \hfill \hfill$	
	das estações representadas por diferentes cores. Fonte: Autoria própria.	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de variação de variáveis meteorológicas por período para o dia 15 de junho 2023, para os sítios SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria. 60

Lista de abreviaturas e siglas

NAV	Serviço de Navegação Aérea
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UAF	Unidade Acadêmica de Física
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
EMS	Estação Meteorológica de Superfície
VHF	Very High Frequency
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
FFT	Fast Fourier Transform
MJO	Oscilação Madden-Julian
ENSO	El Niño Oscilação do Sul
DOL	Distúrbios ondulatórios de leste

Lista de símbolos

ω	frequência
$X(t_i)$	série temporal
i	índice da série temporal
n	número de frequências independentes
$P_x(\omega)$	potência espectral
τ	constante que ajusta a fase dos dados
cos	função cosseno
sin	função seno
tan	função tangente
ρ	densidade do fluido
v	vetor velocidade
p	pressão
g	aceleração gravitacional
σ	viscosidade cinemática
Ω	vetor de rotação da Terra
$ ho_0$	densidade de referência
Т	temperatura
C_v	capacidade calorífica a volume constante
R	constante universal dos gases
k_x	número de ondas na direção \boldsymbol{x}
k_z	número de ondas na direção \boldsymbol{z}
f	frequência de Coriolis
N	frequência de Brunt-Vaisala

ζ	vorticidade relativa
U	velocidade média do fluxo de fundo
β	parâmetro de Rossby
c_p	velocidade de fase
l	números de onda meridional
k	números de onda zonal
ϕ	geopotencial
Н	profundidade média da camada de água

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Atmosfera Terrestre	29
2.1.1	Camadas da atmosfera	29
2.2	Processos Dinâmicos e Químicos	30
2.2.1	Circulação Atmosférica	31
2.2.2	Reações Químicas	32
2.2.3	Ondas Atmosféricas	32
2.2.3.1	Ondas de Rossby	33
2.2.3.2	Ondas de Kelvin	34
2.2.3.3	Ondas de Gravidade	36
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	41
3.1	Instrumentação	41
3.1.1	Psicrômetro e Anemômetro	41
3.1.2	Barômetro	43
3.1.3	Período e Região de Estudo	44
3.1.4	Metodologia	45
3.1.5	Analise da Temperatura e Pressão	47
3.1.6	Analise dos ventos	50
3.1.7	Analise de Lomb-Scargle para as variáveis Ventos, Temperatura e Pressão .	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Correlação dos dados	55
4.1.1	Perfis de temperatura e pressão	55
5	CONCLUSÕES	65
5.1	Trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	ANEXOS	73

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica atmosférica é regida por uma grande quantidade de processos associados, dentre eles estão os processos oscilatórios, conhecidos como ondas atmosféricas, tais ondas surgem de pertubações no equilíbrio dinâmico da atmosfera e desempenham um papel trivial na redistribuição de energia e *momentum* na atmosfera (HOLTON; HAKIM, 2013).

A descrição matemática desses fenômenos se apoiam em simplificações das equações de movimento, continuidade e energia da atmosférica. Já sua analise teórica é fundamentada no uso de equações de ondas, equação de dispersão e no estudo de modelos normais de ampla configuração de estabilidade atmosférica e topografia (GONÇALVES, 2011).

Na prática, as ondas atmosféricas são observadas de diversas formas, sendo as mais comuns as de sondagem espacial, radares, imageadores. A analise estatística dessas ondas é de suma importância para previsão meteorológicas tanto de curto quanto longo prazo, englobando desde variação de pressão local a fenômenos como o monções ou mesmo o EL $\tilde{N}ino$ e La Niña (SEIKI; TAKAYABU, 2007; AMBRIZZI, 2003). As ondas atmosféricas são objetos de interesse de estudo por serem essenciais para compreender a complexidade de interação da atmosfera, a pertubação naturalmente gerada por elas e a variabilidade climática.

De modo geral, ondas atmosféricas são classificadas e categorizadas baseado-se em sua formação e escala de propagação, sendo as principais:

Ondas de gravidade: caracterizam-se pela restauração da estabilidade atmosférica através da força da gravidade, apresentam escalas menores e estão associadas a fenômenos como frentes frias, convecção e topografia. Possuem períodos que variam de minutos a horas e desempenham um papel importante na transferência vertical de energia (FRITTS; ALEXANDER, 2003).

Ondas planetárias: também conhecidas como ondas de Rossby, possuem grande escala horizontal, influenciadas pela rotação da Terra e pela variação latitudinal da força de Coriolis. Têm períodos que variam de dias a semanas e são essenciais na dinâmica de larga escala da atmosfera, influenciando padrões climáticos e a circulação geral (HOLTON; HAKIM, 2013).

Ondas equatoriais: são caracterizadas pela simetria em torno do equador e incluem tipos como as ondas de Kelvin e Rossby-gravidade. Essas ondas têm escalas de dias a semanas e desempenham um papel relevante na propagação de energia e variabilidade atmosférica nas regiões tropicais (MATSUNO, 1966)

Estudos sobre ondas atmosféricas foram apresentados inicialmente como fenômeno

teóricos no século XIX pelo francês Pierre-Simon Laplace, as contribuições da teoria das circulações atmosféricas e conceitos de interação entre o gradiente de pressão e a força de Coriollis trazidos americano William Ferrel contribuiram com o estudo. Mas, foi só na década de 1939, com o sueco Carl-Gustaf Rossby que as ondas atmosféricas ganharam ênfase, com a descrição matemática de ondas de grande escala, as quais carregam o seu nome, as ondas de Rossby (ROSSBY et al., 1939).

A partir desse período, estudos sobre ondas atmosféricas passaram a emergir com o objetivo de contribuir para o avanço da área. Na década de 1960, pesquisas focadas em ondas de gravidade na atmosfera terrestre ganharam relevância, destacando-se o trabalho pioneiro de (HINES, 1960), que proporcionou uma compreensão mais profunda sobre essas perturbações e seus efeitos na dinâmica atmosférica. As ondas de gravidade demonstraram impacto significativo em diversas áreas, como a previsão do tempo, a navegação aérea, a climatologia, os padrões climáticos e as comunicações por satélite (HOLTON; HAKIM, 2013; FRITTS; ALEXANDER, 2003). Entretanto, apesar da contribuição inicial de (HINES, 1960), o progresso nas pesquisas sobre o tema foi limitado, fato que pode ser atribuído à novidade do assunto e à escassez de técnicas e metodologias disponíveis naquela época.

Somente na década de 1980, com o desenvolvimento de novas metodologias, como o radar MST (BALSLEY; GAGE, 1980), foram realizados novos estudos que investigaram as possíveis consequências e conexões das ondas de gravidade (FRITTS; ALEXANDER, 2003), além da caracterização apresentada pelo estudo (COSTA, 1999). É de conhecimento comum que as ondas de gravidade transportam energia e, portanto, *momentum*, causando perturbações significativas no sistema onde ocorrem (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Por causa disso, essas ondas inspiram estudos e estabelecem conexões com pesquisas anteriores, oferecendo uma nova perspectiva significativa da dinâmica da Terra. Literaturas como (GILL, 2016) trazem outra compreensão mais ampla sobre a evolução dos estudos associados às ondas atmosféricas, além de tratar, também, sobre seus efeitos e causas geradoras.

A evolução da tecnologia não apenas abriu novos caminhos, mas também trouxe novos desafios. As irregularidades nos sistemas estudados, que antes eram vistas de forma mais generalizada, agora podem ser identificadas com maior clareza e precisão. Isso inclui interferências em sistemas de comunicação e de geolocalização, que podem ser afetadas pelas ondas atmosféricas (FORBES; PALO; ZHANG, 2000). Além disso, esses avanços tecnológicos têm ajudado a encontrar respostas a perguntas ainda não respondidas sobre a dinâmica da atmosfera terrestre. As ondas de gravidade podem ser uma maneira de explicar o acoplamento das camadas atmosféricas, segundo (CAZUZA et al.,) e como demonstram os trabalhos de (WU; KILLEEN, 1996; WESSBERG et al., 2000; VINCENT; ALEXANDER, 2000), o estudo das ondas de gravidade tem avançado significativamente.

Uma das principais motivações para os estudos na área é a busca por compreender

as causas, efeitos e consequências dessas ondas atmosféricas. A utilização de novas fontes de dados por meio das EMS (Estações meteorologicas de superfície) presente em aeroportos, pode não só abrir novos caminhos de descobertas e perspectivas sobre a contribuição de tais ondas para o cotidiano da sociedade.

O diferencial dos dados de EMS de aeroportos é sua quantidade massiva de dados de pressão, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, entre outros dados coletados, que variam de minuto a minuto, trazendo muito mais informações que outras estações do mesmo tipo. Além disso, estes dados trazem consigo uma grande confiabilidade em sua aferição, devido ao ambiente que é coletado ser necessariamente existente e frequentemente calibrados.

Com o intuito de alcançar esse objetivo, identificou-se uma informação relevante acerca da sazonalidade das ondas atmosféricas: conforme demonstrado pelos estudos de (WU; KILLEEN, 1996), (ESSIEN et al., 2018) e (AMBRIZZI; SACCO; FERRAZ, 2014), esses fenômenos apresentam maior frequência durante o verão e são menos comuns no inverno. Visando aprofundar essa análise, este estudo propõe a aplicação de métodos aprimorados de detecção para confirmar a ocorrência dessas ondas na área de estudo, caracterizá-las detalhadamente e classificar suas periodicidades por meio de análise espectral. Ademais, pretende-se realizar o cruzamento desses dados com outras fontes, a fim de obter uma compreensão mais abrangente das características e impactos dessas ondas.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: primeiro, apresentaremos uma contextualização teórica para caracterizar e distinguir ondas de atmosféricas, seus efeitos causadores e métodos de aferição; posteriormente, será apresentado o local do estudo, o processo de coleta de dados e os métodos usados; em seguida, explicaremos como processar os dados, fazer gráficos e obter impressões iniciais e, por fim, mostraremos os resultados obtidos e consequências da análise de dados.

1.1 Objetivos

Investigar e caracterizar oscilações atmosféricas nas regiões de João Pessoa (SBJP) e Campina Grande (SBKG), por meio da análise conjunta de parâmetros meteorológicos (pressão, temperatura e vento) coletados em uma estações meteorológicas de superfície (EMS), com a aplicação de técnicas espectrais e estatísticas, buscando identificar padrões oscilatórios relevantes para a dinâmica atmosférica regional.

De forma mais especifica pretende-se:

 Aplicar métodos estatísticos e espectrais às séries temporais dos parâmetros meteorológicos, visando à filtragem de ruídos e à detecção de oscilações atmosféricas com periodicidade inferior a 12 horas;

- Verificar a correlação entre as oscilações detectadas e a simultaneidade entre os parâmetros de pressão, temperatura e vento;
- Avaliar a influência da sazonalidade na ocorrência e intensidade espectral dessas oscilações nos dois sítios de observação;
- Estabelecer possíveis relações entre os padrões observados e fenômenos atmosféricos conhecidos, como ondas atmosféricas e distúrbios oscilatórios da meteorologia, e;
- Contribuir para o avanço do estado da arte sobre oscilações atmosféricas e sua influência na atmosfera terrestre, ampliando e consolidando os resultados obtidos na literatura existente, por meio da análise de novos dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentado os fundamentos teóricos necessários para compreender oscilações na atmosfera. Inicialmente será apresentado a introdução geral ao conceito atmosfera terrestre, suas camadas e processos, em seguida uma abordagem sore oscilações e ondas atmosféricas, suas propriedades básicas e classificações.

2.1 Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é um sistema complexo e dinâmico, essencial para a manutenção da vida e a regulação do clima do planeta e, apesar de envolver a Terra em uma espessura de apenas 1% do raio do planeta (BARRY; CHORLEY, 2009), a evolução da sua composição atual ocorreu nos últimos milhões de anos, e hoje é subdividida por várias camadas distintas, cada uma com suas próprias características e processos físicos. Ademais, a compreensão da atmosfera requer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo a física, a química, a meteorologia e a ciência ambiental.

2.1.1 Camadas da atmosfera

Troposfera é a camada mais próxima da superfície terrestre, estendendo-se até cerca de 8 a 15 km de altitude. É nesse local que ocorrem a maior parte dos fenômenos meteorológicos e onde a temperatura diminui com a altitude. Além disso, contém a maior parte da massa atmosférica e é rica em vapor d'água, o que contribui para a formação de nuvens e precipitações(HOLTON; HAKIM, 2013).

Localizada acima da troposfera, a estratosfera se estende até aproximadamente 50 km de altitude. Nesta camada, a temperatura aumenta com a altitude devido à absorção de radiação ultravioleta pela camada de ozônio. A estratosfera é caracterizada por uma relativa estabilidade em termos de turbulência e mistura de ar (HARRIES, 1976).

A próxima camada, a mesosfera, se estende até cerca de 85 km de altitude. Nela, a temperatura novamente diminui devido à altitude. É a camada onde ocorre a maior parte da queima meteoritos ao entrar na atmosfera, e também é a região onde as ondas atmosféricas, como as ondas de gravidade, têm um maior impacto devido a ser a região onde a, a maior parte da transferência de energia e *momentum* para atmosfera por sua dispersão (PLANE, 2004).

Termosfera, que vai de aproximadamente 85 km a 600 km de altitude, é caracterizada por um aumento acentuado da temperatura com a altitude. A ionização dos gases nesta

camada cria as auroras e é crucial para a propagação de ondas de rádio de alta frequência (ROBLE; DICKINSON; RIDLEY, 1977).

Por fim, a exosfera é a camada mais externa da atmosfera, estendendo-se além da Termosfera, sem um limite bem definido. É uma região onde os gases atmosféricos estão muito espessos e a atmosfera gradualmente se funde com o espaço interplanetário. Aqui, a densidade é extremamente baixa, e devido a isso, as partículas atmosféricas podem escapar para o espaço (HOLTON; HAKIM, 2013).

Tais camadas do parágrafos anteriores são ilustradas na Figura 1.



Figura 1 – Camadas da atmosfera terrestre, distribuição vertical da temperatura e pressão. Fonte: (BARRY; CHORLEY, 2009)

2.2 Processos Dinâmicos e Químicos

A complexidade da atmosfera também decorre dos diversos processos dinâmicos e químicos que nela ocorrem:

2.2.1 Circulação Atmosférica

A circulação atmosférica é impulsionada pela distribuição desigual da radiação solar incidente na superfície terrestre, bem como pelos gradientes de temperatura e pressão. Esses fatores resultam em um significativo transporte de energia das regiões equatoriais para as latitudes polares (BARRY; CHORLEY, 2009), destacando a necessidade de investigações mais aprofundadas sobre o tema. Os principais sistemas de circulação atmosférica, conforme discutido em (JUDD, 1863), incluem a teoria convectiva térmica para a origem das monções na zona equatorial, assim como os modelos de circulação propostos por Ferrel e Polar, abordados em (BARRY; CHORLEY, 2009) e aprofundados em (HOBBS, 1917), desempenham um papel fundamental no clima global e a redistribuição de energia e umidade.

A complexidade da dinâmica terrestre torna os esforços para desenvolver modelos de previsão climática, muitas vezes resultando em limitações na precisão. A maior parte dos modelos climáticos falham em retratar a distribuição das nuvens em escala convectiva, e as configurações desses modelos não são, e possivelmente não possam ser, projetadas para levar em conta todos os processos físicos relacionados (STEPHAN, 2020).

Diante disso, é essencial realizar estudos mais detalhados sobre a distribuição vertical das nuvens na atmosfera para determinar a radiação. Conforme apontado por (ZHAO, 2014), são as convecções úmidas e rasas que mais influenciam a sensibilidade dos modelos de previsão climática.

Ademais, como destacado por (STEPHAN, 2020), as térmicas secas e úmidas presentes nas camadas limites convectivas geram ondas de gravidade que se propagam verticalmente dentro da troposfera, que é estratificada de maneira estável. Essas correntes de gravidade, produzidas de maneira convectiva, estão ligadas à movimentos verticais que podem se propagar por toda a extensão da troposfera, o que afeta diretamente o sistema atmosférico, modificando o espaçamento das nuvens, sua duração e a chance de uma convecção rasa evoluir para uma convecção profunda, conforme demonstrado em pesquisas como as de (CLARK; HAUF; KUETTNER, 1986; STEPHAN et al., 2016; STEPHAN, 2020).

Ainda sobre o trabalho de (STEPHAN, 2020), é apresentado algumas interações pertinentes, são elas dois tipos de estruturas atmosféricas que se formam na camada limite de convecção, que pode variar conforme as condições atmosféricas, de forma geral essa camada de convecção pode variar de 1 a 3 km em condições normais do dia, mas pode ser mais extensa em ambientes mais quentes e instáveis, chegando a 5 km:

 Rolos de camada: são estruturas de grande comprimento e formato cilíndrico de circulação de ar, onde alinham-se na direção do cisalhamento médio do vento no limite de convecção. Ondas de gravidades geradas por atividade convectiva: essas são formadas com a convecção e se propagam verticalmente na troposfera estratificada de forma estável. Estas têm como característica o alinhamento perpendicular à direção do cisalhamento.

Nas análises de simulações bidimensionais com diferentes perfis de ventos apresentadas por (LANE; CLARK, 2002), a escalada horizontal foi atribuída a dois processos: o amortecimento por filtragem de nível crítico, que acontece quando a velocidade de fase das ondas de gravidade na superfície se alinha com a velocidade do vento, e a captura das ondas que se movem contra o fluxo. Portanto, ondas que se propagam em paralelo ao vetor cisalhamento tendem a ser amortecidas ou contidas, resultando em uma assimetria no espectro de velocidade de fase na direção do vetor. (LANE; CLARK, 2002) confirmou a interação ressonante entre as ondas térmicas da camada lisa e as ondas de gravidade retidas.

2.2.2 Reações Químicas

A atmosfera é o local de inúmeras reações químicas, muitas das quais são catalisadas por radiação solar. A fotossíntese, a formação e a destruição do ozônio e as reações envolvendo gases de efeito estufa são exemplos de processos químicos que afetam a composição atmosférica e o clima, bem como as ondas atmosféricas, na qual carrega energia de um ponto a outro, causando a pertubação e alteração química do meio de forma abrupta (GARCIA; SOLOMON, 1985)

2.2.3 Ondas Atmosféricas

As ondas atmosféricas desempenham um papel essencial na redistribuição de energia e momento dentro da atmosfera terrestre, sendo fundamentais para a dinâmica da circulação global e a modulação de padrões meteorológicos. Essas oscilações surgem a partir de perturbações na densidade, temperatura e pressão do ar, propagando-se horizontal e verticalmente e influenciando desde sistemas sinóticos até eventos climáticos globais (HOLTON; HAKIM, 2013; ANDREWS; LEOVY; HOLTON, 1987). Seu impacto se estende à formação e intensificação de sistemas de alta e baixa pressão, tempestades e até fenômenos extremos, como ciclones tropicais e o *El Niño* (VALLIS, 2017; GILL, 2016).

Dentre as principais ondas atmosféricas, destacam-se as ondas de Rossby, que são oscilações de grande escala associadas à conservação do vorticidade potencial e à variação latitudinal do parâmetro de Coriolis (ROSSBY et al., 1939). Essas ondas são responsáveis por modular os padrões de circulação de médias e altas latitudes, exercendo influência sobre o posicionamento das correntes de jato e a propagação de sistemas frontais (HELD; HOSKINS, 1985). Sua dinâmica é amplamente estudada no contexto da variabilidade

climática, pois desempenham um papel fundamental na teleconexão entre diferentes regiões do globo (HOSKINS; KAROLY, 1981).

Além disso, as ondas de Kelvin, diferentemente das ondas de Rossby, são confinadas à região equatorial. Elas se propagam ao longo do equador devido à ausência de força restauradora meridional, característica imposta pela simetria do campo de Coriolis nesse domínio (MATSUNO, 1966; GILL, 1980). Essas ondas desempenham um papel crucial na interação entre a atmosfera e os oceanos, especialmente no contexto da oscilação Madden-Julian (MJO) e do fenômeno *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) (WHEELER; HENDON, 2004).

Por fim, as ondas de gravidade atmosféricas, que serão analisadas em maior profundidade neste estudo, resultam da restauração do equilíbrio hidrostático da atmosfera quando esta sofre perturbações, propagando-se tanto na troposfera quanto na estratosfera (FRITTS; ALEXANDER, 2003). Elas desempenham um papel fundamental na transferência de momento entre diferentes camadas da atmosfera e são particularmente importantes na regulação da circulação de Brewer-Dobson na estratosfera (ANDREWS; LEOVY; HOLTON, 1987; LINDZEN, 1981). Além disso, essas ondas influenciam a organização da convecção tropical e a propagação de sistemas meteorológicos em diversas escalas (LANE; CLARK, 2002).

2.2.3.1 Ondas de Rossby

As ondas de Rossby foram descritas primeiramente por (ROSSBY et al., 1939), e podem ser observadas como grandes oscilações que se propagam para oeste. Essas onda são originadas devido ao efeito de rotação da Terra e do gradiente de vorticidade relativa e/ou absoluta na atmosfera. Esse tipo de onda desempenha um papel essencial na circulação atmosférica e na modulação do clima em médias e altas latitudes (WATANABE, 2016).

Esse tipo de onda, comumente denominado onda planetária, caracteriza-se por possuir escalas temporais significativamente superiores ao período inercial, de modo que a rotação da Terra exerce um papel fundamental na dinâmica do escoamento. Além disso, seu comprimento de onda é consideravelmente maior que o raio de deformação de Rossby, que representa a escala a partir da qual os efeitos da rotação planetária tornam-se dominantes na dinâmica do fluido (WATANABE, 2016; HOLTON; HAKIM, 2013).

Estudo matemático e dinâmico para ondas Rossby

As ondas de Rossby podem ser descritas a partir das equações fundamentais da atmosfera em particular a equação de vorticidade potencial de Rossby.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + U \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \beta v = 0 \tag{2.1}$$

onde:

- ζ representa a **vorticidade relativa**,
- U é a velocidade média do fluxo de fundo (como na corrente de jato),
- v é a componente meridional da velocidade,
- $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$ é o **parâmetro de Rossby**, que descreve a taxa de variação do parâmetro de Coriolis com a latitude y,
- f é o parâmetro de Coriolis.

A velocidade de fase para as ondas de Rossby é dada por:

$$c_p = U - \frac{\beta}{k^2 + l^2} \tag{2.2}$$

onde $k \in l$ são os números de onda zonal e meridional, respectivamente.

Esse comportamento da velocidade de fase inversa em relação ao fluxo de fundo é o que causa o movimento aparente para o oeste das ondas de Rossby em latitudes médias.

Propagação e impactos no clima

A velocidade de grupo da onda Rossby, que é o indicativo da direção e velocidade de propagação da sua energia associada, é o fator de relevância para a precisão de padrões climáticos. Geralmente, as ondas de grande escala que se propagam ao longo da corrente de jato podem gerar bloqueios atmosféricos, que têm consequências no clima de longa duração (NASCIMENTO; AMBRIZZI, 1998). Esses bloqueios podem ser descritos pelas equações de vorticidade e energia potencial (VALLIS, 2017; GILL, 2016), e seus efeitos podem ser observados nas variações de temperatura e precipitação de média e longa duração.

Além disso, as ondas de Rossby desempenham um papel fundamental na transferência de energia meridional, sendo responsáveis pela redistribuição de calor entre as latitudes, o que influencia diretamente a variabilidade térmica em latitudes médias (WATANABE, 2016). O transporte de calor associado a essa onda, propagando-se entre os polos e o equador, torna seu estudo essencial para a compreensão das oscilações climáticas sazonais e da dinâmica da circulação atmosférica global.

2.2.3.2 Ondas de Kelvin

As ondas de Kelvin, ao contrário das ondas de Rossby discutidas no tópico 2.2.3.1, apresentam um mecanismo de propagação distinto, caracterizado pela ausência de deflexão meridional associada ao efeito de Coriolis. Como consequência, essas ondas são confinadas a regiões específicas, como o equador e as zonas costeiras. No Oceano Pacífico, as onda de
Kelvin são tipicamente geradas por ventos de superfície anomalamente ocidentais, os quais podem ser desencadeados por diversos fenômenos atmosféricos (LUTHER; JOHNSON, 1990). Essas ondas desempenham um papel essencial na modificação das estruturas térmicas costeira, tanto na superfície quanto em camadas subsuperficiais, além de influenciar a distribuição da energia cinética (RYDBECK; JENSEN; FLATAU, 2019).

Dinâmica e Equações de Movimento

As ondas de Kelvin atmosféricas correspondem a soluções específicas das equações de ondas em um meio estratificado, sendo derivadas das equações de águas rasas sob a condição de latitude zero. Em regiões próximas ao equador, onde o parâmetro de Coriolis se anula, essas ondas apresentam uma propagação equatorial característica, sem deflexão meridional. As equações fundamentais que descrevem as ondas equatoriais de Kelvin podem ser obtidas a partir das equações de águas rasas, adaptadas para a dinâmica da atmosfera tropical:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{2.4}$$

onde:

- $u \in v$ representam as componentes zonal e meridional da velocidade do vento,
- f é o parâmetro de Coriolis (igual a zero no equador),
- ϕ é o geopotencial.

Ondas de Kelvin Oceânicas e Atmosféricas

As ondas de Kelvin equatoriais, na atmosfera, desempenham um papel crucial na variabilidade intra-sazonal dos trópicos. Essas ondas influenciam a circulação do vento e têm um papel fundamental na formação de padrões de precipitação, Oscilação Madden-Julian (MJO), monções, intrusões extratropicais e ciclones gêmeos (SEIKI; TAKAYABU, 2007). Já no oceano, ondas de Kelvin podem se propagar ao longo do equador ou de margens continentais e são fundamentais para eventos como o *El Niño* e *La Niña*. Durante tais eventos, as ondas de Kelvin oceânicas transportam águas quentes do oeste para o leste, modificando significativamente os padrões de temperatura da superfície dos oceanos e afetando a circulação atmosférica global. Esse movimento é descrito em detalhes por (SEIKI; TAKAYABU, 2007; SEO; XUE, 2005; THOMSON; DAVIS, 2017; SHINODA; ROUNDY; KILADIS, 2008), e pela equação de transporte de calor, que

altera a profundidade termoclima, modificando a circulação atmosférica e provocando irregularidades na precipitação.

Para ondas equatoriais de Kelvin, uma simplificação considerável acontece, já que o termo de Coriolis é nulo e a onda se propaga sem deflexão lateral. A velocidade de fase de uma onda pode ser calculada como:

$$c_p = \sqrt{gH} \tag{2.5}$$

onde:

- g é a aceleração da gravidade,
- H é a profundidade média da camada de água, se estivermos considerando uma onda oceânica.

2.2.3.3 Ondas de Gravidade

As ondas atmosféricas, como ondas em geral, são perturbações que geram um desequilíbrio e alteração no meio o qual foram originadas. São diferenciadas e possibilitadas das demais ondas vistas nos tópicos anteriores, devido ao meio no qual se encontram, possuindo uma dinâmica de restauração oposta ao sentido da perturbação.

Na atmosfera terrestre as ondas, em sua maioria, são regidas pela força gravitacional, onde tem a sua propagação desde alguns quilômetros a milhares de quilômetros e a velocidade é geralmente menor que a propagação sonora, e isso se dá pela variação de densidade do meio na qual ela se encontra.

Devido à conservação de energia e caso não haja dissipação da onda, as ondas na atmosfera se propagam de forma crescente e exponencialmente em amplitude, em razão ao decréscimo exponencial da densidade conforme a altura atmosférica. Quando o ponto onde a amplitude se torna imensamente grande, ocorre a "quebra", ou seja, o rompimento da onda, e a propagação alcança seu ponto crítico.

Quando esse ponto crítico é atingido e a onda sofre dispersão, a energia que ela transportava é transferida para a atmosfera, resultando em modificações na dinâmica do sistema atmosférico. Esse processo pode induzir turbulência devido às variações nos padrões de vento, além de provocar alterações na pressão e, consequentemente, na temperatura (ATAÍDE et al., 2007). Esse fenômeno manifesta-se tanto na baixa quanto na alta atmosfera, influenciando a estrutura e a circulação atmosférica em diferentes escalas.

Em decorrência dos processos físico-químicos associados às altitudes, essas interferências podem ser de maior ou menor intensidade, pois a densidade atmosférica varia conforme a sua altitude, como citado anteriormente e, com isso, temperatura e pressão chegam a níveis extremos. As ondas de gravidades são as responsáveis por esses fenômenos e pela interligação entre as camadas da atmosfera terrestre.

Após a caracterização, procede-se à classificação das ondas com base nas suas características de propagação, podendo elas ser classificadas como ondas propagantes ou evanescentes (ATAÍDE et al., 2007). As ondas propagantes são aquelas que se propagam em duas dimensões, ou seja, em direções distintas, envolvendo tanto a propagação vertical quanto horizontal. Por outro lado, as ondas evanescentes são aquelas cuja propagação ocorre exclusivamente na direção horizontal, sem componente vertical significativa.

Estudo e Solução para Ondas de Gravidade

Com base na Seção 2.2.3.3, e considerando a mistura de gases na atmosfera, podemos simplificar o modelo assumindo um gás ideal com peso molecular constante. A seguir, apresentamos as equações básicas da hidrodinâmica e da termodinâmica aplicáveis a este contexto.

Equação de Continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \tag{2.6}$$

Onde ρ é a densidade do fluído e v é o vetor velocidade que tem a direção tangencial às linhas de corrente do escoamento.

Equação de Movimento (Equação de Navier-Stokes):

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v + 2\Omega \times v = -\frac{1}{\rho}\nabla p + g + \sigma\nabla^2 v$$
(2.7)

Aqui, p é a pressão, g é a aceleração gravitacional, σ é a viscosidade cinemática, e Ω é o vetor de rotação da Terra.

Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dU}{dt} + p\frac{dV}{dt}$$
(2.8)

Esta equação descreve a conservação de energia em um sistema termodinâmico, onde:

- $\frac{dQ}{dt}$ é a **taxa de transferência de calor** para o sistema.
- $p\frac{dV}{dt}$ é a **taxa de trabalho realizado** pelo sistema devido à variação de volume.

Para um gás ideal:

$$dU = C_v dT \tag{2.9}$$

Esta equação descreve a variação da energia interna de um gás ideal:

• *dU* é a variação da energia interna do sistema.

- C_v é a capacidade calorífica a volume constante.
- *dT* é a variação da temperatura do sistema.

$$pdV + Vdp = RdT \tag{2.10}$$

Esta equação descreve a relação entre pressão, volume e temperatura para um gás ideal:

- p é a **pressão** do gás.
- *dV* é a variação infinitesimal do volume.
- Vdp é a variação do trabalho associado a uma mudança na pressão.
- $R \neq a$ constante dos gases ideais.
- dT é a variação infinitesimal da temperatura do sistema.

Ondas de Gravidade na Atmosfera: Considerando pequenas perturbações nas variáveis de estado:

$$\rho = \rho_0 + \rho', \quad p = p_0 + p', \quad v = v_0 + v', \quad T = T_0 + T'$$
(2.11)

Linearização: Equação de Continuidade:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \nabla \cdot v' = 0 \tag{2.12}$$

Equação de Movimento:

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + 2\Omega \times v' = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p' + g \frac{\rho'}{\rho_0}$$
(2.13)

Equação da Energia:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -\frac{R}{C_v} \nabla \cdot v' \tag{2.14}$$

Assumindo uma solução harmônica para as perturbações:

$$\rho' = \hat{\rho}e^{i(kx-\omega t)}, \quad p' = \hat{p}e^{i(kx-\omega t)}, \quad v' = \hat{v}e^{i(kx-\omega t)}, \quad T' = \hat{T}e^{i(kx-\omega t)}$$
 (2.15)

Substituindo essas soluções nas equações linearizadas, obtemos um sistema de equações algébricas para $\hat{\rho}, \hat{p}, \hat{v}, \hat{T}$.

Relação de Dispersão:

$$\omega^2 = \frac{N^2 k_h^2}{k_h^2 + k_z^2} + f^2 \tag{2.16}$$

Onde f é a frequência de Coriolis, N é a frequência de Brunt-Vaisala, k_h é o número de onda horizontal e k_z é o número de onda vertical.

A frequência de Coriolis, f, é dada pela equação:

$$f = 2\Omega\sin(\phi)$$

onde Ω é a taxa de rotação angular da Terra, aproximadamente 7, 292 × 10⁻⁵ rad/s, e ϕ é a latitude. A taxa de rotação angular Ω é calculada como:

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}$$

onde T é o período de rotação da Terra, cerca de 24 horas. A frequência de Coriolis é máxima nos polos ($\phi = 90^{\circ}$) e nula no equador ($\phi = 0^{\circ}$).

A relação de dispersão mostra que a frequência das ondas ω depende das frequências de Brunt-Vaisala e de Coriolis, indicando que a rotação da Terra afeta a propagação das ondas de gravidade na atmosfera (PAULINO, 2012).

Aferição de Ondas de Gravidade

Desde a sua descoberta, as ondas de gravidade têm sido essenciais para novas descobertas e para a compreensão da dinâmica atmosférica. A aferição dessas ondas vem sido aprimorada ao longo dos anos, utilizando diversas técnicas, tanto diretas quanto indiretas. Métodos como radares em *Very High Frequency* (VHF), radar a laser, e instrumentos ópticos como fotômetros, interferômetros e imageadores com CCD são utilizados para caracterizar as ondas de gravidade (WRASSE, 2000).

Esses métodos têm contribuído significativamente para a validação dos modelos teóricos e para o avanço do conhecimento sobre a dinâmica atmosférica.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Neste tópico, será apresentado os instrumentos de coleta de dados, a origem desses dados, sua precisão, e a metodologia de análise a ser utilizada para o tratamento das informações adquiridas, as técnicas utilizadas no tratamento de dados, demonstrando e exemplificando a abordagem utilizada. Para esse fim, iremos seguir algumas etapas: Filtragem de dados: Análise gráfica e escolha de série temporal mais atípicas; Aplicação de periodograma de Lomb-Scargle; Análise Harmônica e Espectro dominante; Classificação por periodicidade; Correlação com dados de ventos associados; Ligação entre dados de ventos, pressão e temperatura; Investigação entre correlação com EMS de outros sítios. Categorização por níveis de oscilações e associação de sazonalidade.

3.1 Instrumentação

As estações meteorológicas desempenham um papel fundamental na coleta de dados com o objetivo de monitorar e compreender o comportamento climático das regiões em que estão localizadas (CARVALHO et al., 2020). Os dados analisados neste estudo foram obtidos nas estações meteorológicas localizadas nos aeroportos SBKG (Aeroporto Presidente João Suassuna, Campina Grande, Paraíba) e SBJP (Aeroporto Internacional Presidente Castro Pinto, João Pessoa, Paraíba), onde estão instaladas estações do tipo EMS (Estação Meteorológica de Superfície).

Diversas variáveis atmosféricas são periodicamente coletadas por essas estações, incluindo a velocidade do vento, umidade relativa, vento instantâneo, pressão atmosférica, temperatura e ponto de orvalho. Para os propósitos deste trabalho, os parâmetros de maior relevância são a pressão, a temperatura e a velocidade do vento, os quais foram aferidos por meio de três instrumentos situados nos respectivos aeroportos: o psicrômetro, o anemômetro e o barômetro, responsáveis, respectivamente, pela medição da temperatura, da velocidade do vento e da pressão atmosférica.

3.1.1 Psicrômetro e Anemômetro

Psicrômetro é um equipamento responsável pela coleta de dados atmosféricos, como umidade relativa, ponto de orvalho e temperatura do ar. O instrumento consiste basicamente em dois termômetros, um permanentemente umedecido por estar imerso em uma tela de captura de umidade do ar, e outro exposto diretamente ao ambiente. Isso gera uma diferença de temperatura entre eles, a qual é analisada, fornecendo diretamente e indiretamente os parâmetros citados. A medida da temperatura é realizada com base na diferença de leituras entre os termômetros. O termômetro úmido, que está em contato com a umidade do ar, apresenta uma temperatura inferior em relação ao termômetro seco, devido ao processo de evaporação que ocorre na superfície da tela úmida. Essa diferença de temperatura é utilizada para calcular a umidade relativa, o ponto de orvalho e outras variáveis atmosféricas relacionadas, por meio de equações termodinâmicas que relacionam essas grandezas com as leituras dos termômetros.

Já o Anemômetro é um dispositivo utilizado para aferir a velocidade e a direção do vento. Podendo variar em formas e tamanhos, ele fica localizado na extremidade das torres meteorológicas.(GANDOLFI, 2020). A Figura 2 mostra a estação meteorológica de superfície, que fica localizada no sitio aeroportuária de Campina Grande, nela é possível observar, a torre onde está localizado os equipamentos de medição citados.



Figura 2 – Imagem da estação automática, equipamento situado no sitio aeroportuário SBKG. Fonte: Autoria própria

3.1.2 Barômetro

O barômetro é um dispositivo utilizado para medir a pressão atmosférica. Devido à variação da pressão atmosférica com a altitude, sendo a pressão mais baixa em altitudes elevadas e mais alta ao nível do mar, esse instrumento também pode ser empregado para determinar a altitude. A relação entre pressão e altitude é inversa, o que significa que uma diminuição na pressão está associada a um aumento na altitude (GANDOLFI, 2020). Na Figura 3, é apresentada uma imagem do repetidor barométrico, onde é possível observar os valores das medições realizadas no dia do registro fotográfico.



Figura 3 – Imagem do barômetro, equipamento em questão localizado no sitio SBKG. Fonte: Autoria própria

3.1.3 Período e Região de Estudo

Para a análise temporal, a quantidade de dados é de suma importância para que haja uma melhor qualidade na verificação e, por consequência, nas análises subsequentes dos fenômenos a serem observados. Para este estudo, os dados utilizados foram fornecidos pela NAV Brasil - Serviço de Navegação Aérea S/A, uma empresa pública brasileira dedicada a promover serviços de navegação aérea (NAV Brasil, 2024). Os dados provêm de duas das suas inúmeras bases, mais especificamente do SBKG – Aeroporto João Suassuna, localizado no município de Campina Grande – PB (7° 16' 11"S, 35° 53' 47"O) e o SBJP - Aeroporto Presidente Castro Pinto, localizado no município de Bayeux - PB (7° 08 54 S, 34° 57 02 O).



Figura 4 – Mapa de localização Brasil, Paraíba, Campina Grande, Aeroporto de Campina Grande - Presidente João Suassuna, Fonte: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024; Google Maps, 2024; Wikipédia, 2024), Editada pelo autor



Figura 5 – Mapa de localização América Latina Brasil, Paraíba, joão Pessoa, Aeroporto Internacional de João Pessoa - Presidente Castro Pinto, Fonte: (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024; Google Maps, 2024; Wikipédia, 2024), Editada pelo autor

A escolha da análise desses dados se deve ao fato de ter sido acompanhado a evolução da pressão atmosférica e da temperatura, provenientes de uma fonte confiável e de equipamentos precisamente calibrados. Os dados estão com resolução temporal de um minuto no período de 01/01/2023 - 00:00 UTC até 31/12/2023 - 23:59 UTC.

3.1.4 Metodologia

Para a análise de uma série temporal, temos diversos métodos usuais, cada um com suas especificidades. Por exemplo, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) requer uma base de dados igualmente espaçada (GRAHAM et al., 2013), enquanto métodos analíticos exigem soluções de um conjunto de equações lineares para cada frequência amostral. Já o periodograma de Lomb-Scargle entrega os espectros dominantes em uma sequência temporal, mesmo que não seja igualmente espaçada como aponta (GLYNN; CHEN; MUSHEGIAN, 2006).

O periodograma de Lomb-Scargle, com base em (LOMB, 1976; SCARGLE, 1982), estima a energia espectral obtida a partir de um periodograma gerado baseado no original, tratando amostras com espaçamento não uniforme, mas mantendo a mesma distribuição exponencial para as amostras igualmente espaçadas. Assim, dada qualquer frequência ω para uma série temporal $X(t_i)$, onde i = 1, 2, 3, ..., n e n é o número de frequências independentes, a potência espectral pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$P_x(\omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{\left[\sum_{j=1}^n X(j) \cos \omega(t_j - \tau)\right]^2}{\sum_{j=1}^n \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^n X(j) \sin \omega(t_j - \tau)\right]^2}{\sum_{j=1}^n \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right)$$

(3.1)

onde τ é definido por:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{n} \sin 2\omega t_j}{\sum_{j=1}^{n} \cos 2\omega t_j}$$

(3.2)

A constante τ ajusta a fase dos dados para maximizar a potência do sinal periódico, corrigindo a posição dos dados irregulares, e o fator $\frac{1}{2}$ garante que a potência seja comparável a um periodograma clássico.

Em síntese, o periodograma de Lomb-Scargle foi selecionado para o tratamento dos dados devido à sua versatilidade na análise de séries temporais irregulares. Esta ferramenta proporciona uma abordagem robusta e detalhada para a identificação de periodicidades em conjuntos de dados nos quais métodos tradicionais falham. No entanto, uma limitação desse método é que, embora seja eficaz na detecção dos picos dominantes na série temporal, ele não leva em consideração o período exato de ocorrência desses picos.

Em outras palavras, o Lomb-Scargle indica a presença de periodicidades, mas não fornece informações sobre a localização precisa dos picos. Em contraste, o método de wavelets oferece uma vantagem adicional, pois permite a determinação da posição dos picos, embora exija uma série temporal igualmente espaçada para sua aplicação eficaz, sendo o motivo da utilização do Lomb-Scargle.

Entretanto, uma limitação intrínseca do método Lomb-Scargle é a tendência de oscilações de baixa amplitude serem mascaradas por componentes de maior amplitude, o que dificulta a identificação de frequências sutis no espectro. Esse fenômeno ocorre quando as frequências dominantes eclipsam a contribuição das oscilações de menor magnitude, resultando na incapacidade de detectar essas últimas com precisão (LOMB, 1976; SCARGLE, 1982).

Para mitigar esse desafio, é possível realizar ajustes no processamento dos dados, como a remoção de interferências provenientes de frequências dominantes antes da análise espectral. Adicionalmente, a comparação de espectros em diferentes escalas de tempo ou a aplicação de metodologias alternativas pode auxiliar na discriminação de oscilações mascaradas.(VANDERPLAS, 2018).

3.1.5 Analise da Temperatura e Pressão

A atmosfera apresenta variações em diferentes escalas temporais e espaciais, sendo influenciada tanto por processos de grande escala quanto por fenômenos locais de mesoescala (HOLTON; HAKIM, 2013). Neste estudo, inicialmente foram analisados dados de pressão atmosférica e temperatura.Nos dois sítios SBKG e SBJP ao longo de um ano, com o objetivo de identificar padrões anômalos e investigar possíveis mecanismos responsáveis por tais perturbações.

A análise da distribuição da pressão e da temperatura atmosféricas possibilita a identificação de padrões dinâmicos amplamente reconhecidos na meteorologia. Um desses padrões é a oscilação semidiurna da pressão, caracterizada por picos recorrentes aproximadamente a cada 12 horas, resultante da interação entre as marés atmosféricas e os processos radiativos (CHAPMAN; LINDZEN, 2012). De maneira semelhante, a temperatura exibe uma variabilidade cíclica ao longo do dia, com mínimas normalmente observadas durante o período noturno, em razão da ausência de radiação solar, e máximas diurnas associadas ao aquecimento radiativo da superfície terrestre (WALLACE; HOBBS, 2006). Ademais, a interdependência entre pressão e temperatura é um fenômeno amplamente documentado na termodinâmica atmosférica, como, em sistemas de alta pressão, é frequente observar-se uma redução na temperatura devido à subsidência do ar e à consequente compressão adiabática, enquanto regiões de baixa pressão tendem a estar associadas a temperaturas mais elevadas, favorecendo processos convectivos e a ascensão do ar (HOLTON; HAKIM, 2013).

As Figuras 6 e 7 apresentam a distribuição temporal da pressão atmosférica e da temperatura para os dois sítios analisados. Nessas representações, observa-se a distribuição média mensal de cada variável, permitindo a identificação do comportamento típico desses parâmetros ao longo do período mensal. A média mensal fornece um referencial estatístico para a análise das variações diárias, evidenciando o padrão climatológico predominante e servindo como base para a identificação de anomalias ou distúrbios na distribuição dos dados.

Destaca-se uma diferença significativa na distribuição da pressão atmosférica e da temperatura entre os dois sítios. Essa discrepância pode ser atribuída à diferença de altitude entre as localidades: enquanto o sítio SBJP está ao nível do mar, o sítio SBKG sugere-se essa diferença de aproximadamente 550 metros de elevação. Essa variação altimétrica influencia diretamente a pressão média registrada e, consequentemente, a temperatura local, mesmo que os dois sítios estejam geograficamente próximos.

Ao analisar os gráficos diários das variáveis meteorológicas para as duas localidades, utilizando as respectivas médias climatológicas como referência para a identificação de padrões típicos, observou-se a ocorrência de ruídos na distribuição dos dados. Essas



Figura 6 – Gráfico da média de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura no mês de Janeiro de 2023 para o sítio SBKG. Fonte: Autoria própria.



Figura 7 – Gráfico da média de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura no mês de Janeiro de 2023 para o sitio SBJP, Fonte: Autoria própria.

ruídos manifestam-se por meio de variações abruptas tanto na pressão atmosférica quanto na temperatura, sugerindo a presença de perturbações transitórias que impactaram o comportamento esperado dessas variáveis ao longo do dia.

A análise foi conduzida para todos os dias do período de estudo, sendo selecionados aqueles nos quais a magnitude dessas oscilações foi mais acentuada. Como ilustrado nas Figuras 8 e 9, nota-se uma significativa variabilidade nas curvas, especialmente em momentos específicos do dia, evidenciando possíveis influências de fatores atmosféricos dinâmicos, como frentes meteorológicas, convecção local intensa ou variações associadas oscilações atmosféricas (RODRIGUES; LOPES; SOUSA, 2020; HOLTON; HAKIM, 2013).



Figura 8 – Gráfico de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura no 17 de Janeiro de 2023 para o sitio SBKG, Fonte: Autoria própria.



Figura 9 – Gráfico de distribuição temporal para pressão atmosférica e temperatura no 17 de Janeiro de 2023 para o sitio SBJP, Fonte: Autoria própria.

Os gráficos apresentados confirmam a existência dessas perturbações. Diferentemente dos gráficos médios mensais, que exibem uma variação mais regular e previsível ao longo do dia, os dados diários mostram flutuações abruptas. Isso é especialmente evidente na curva de temperatura, que apresenta oscilações rápidas em determinados períodos, e na curva de pressão, que exibe descontinuidades e mudanças bruscas de gradiente.

Essas características são indicativas de instabilidades atmosféricas, possivelmente associadas a processos de mesoescala, como a passagem de sistemas convectivos, mudanças no regime de ventos ou variações na cobertura de nuvens ao longo do dia (RODRIGUES; LOPES; SOUSA, 2020; LYRA et al., 2020). A seleção desses dias específicos para análise detalhada é, portanto, uma abordagem válida para compreender a natureza e a frequência dessas perturbações dentro do período estudado.

Foram selecionados 80 dias distribuídos ao longo do ano, durante os quais foram identificadas variações abruptas nas variáveis meteorológicas analisadas. Embora algumas dessas perturbações tenham apresentado maior intensidade, todas foram consideradas significativas, dada sua relevância para a compreensão da variabilidade atmosférica diária.

A seleção dos 80 dias foi realizada com base em critérios estatísticos e observacionais, considerando desvios significativos em relação às médias climatológicas de temperatura e pressão para cada localidade, podemos observar parte desse processo no Anexo A. A análise dos dados seguiu as seguintes etapas:

Cálculo das médias mensais de pressão e temperatura para ambos os sítios, com o objetivo de estabelecer valores de referência. Identificação de eventos anômalos, definidos como aqueles em que as variações diárias ultrapassaram um limiar estatisticamente significativo em relação ao comportamento médio. Classificação das perturbações com base em sua intensidade e padrão de ocorrência, incluindo oscilações abruptas, quedas ou aumentos súbitos, e variabilidades irregulares ao longo do dia. Análise comparativa entre os dois sítios, levando em consideração a influência da altitude, localização geográfica e possíveis mecanismos atmosféricos envolvidos.

3.1.6 Analise dos ventos

O comportamento dos ventos é apresentado na Figura 10, observa-se padrões de interesse que podem fornecer insights sobre a dinâmica atmosférica regional. Apesar das diferenças geográficas entre os dois sítios, incluindo variações de altitude e proximidade com o litoral, os gráficos revelam informações relevantes sobre os eventos meteorológicos registrados no mesmo dia, particularmente em relação à pressão atmosférica e às condições sinóticas predominantes.

No Figura 10 (A), é representada a componente meridional do vento (Norte-Sul), enquanto a Figura 10 (B) exibe a componente zonal (Leste-Oeste). Nota-se que as variações de velocidade do vento apresentam similaridades entre os locais analisados, sugerindo uma possível influência de sistemas meteorológicos mesoescala, como frentes atmosféricas, gradientes de pressão e circulação regional.

Além disso, observa-se um aumento na intensidade do vento ao longo do dia, possivelmente associado ao aquecimento diurno e à intensificação da convecção, que favorece a mistura das camadas mais baixas da atmosfera (STULL, 2012; HOLTON; HAKIM, 2013; WALLACE; HOBBS, 2006). Essa variabilidade horária pode estar relacionada à efeitos dinâmicos da atmosfera como, atuação de brisas terrestres e marítimas, especialmente no sítio SBJP que é mais próximo da costa (SILVA et al., 2022). A análise detalhada dessas oscilações pode contribuir para uma melhor compreensão da interação entre fatores locais e regionais no regime de ventos da área de estudo.



Figura 10 – Gráfico de distribuição temporal das componentes Norte-Sul e Leste-Oeste dos vendos para SBJP e SBKG, Fonte: Autoria própria.

Após a incorporação de novos dados de vento à análise, foi possível realizar uma filtragem mais criteriosa dos dias em que as variações atmosféricas foram mais pronunciadas, com as relações simultâneas das variáveis do sistema. Essa seleção considerou a relação entre o comportamento do vento e as análises prévias de pressão e temperatura, permitindo a redução do conjunto de dias analisados de 80 para 35. Esses dias foram selecionados por apresentarem variações simultâneas nas variáveis meteorológicas estudadas.

Com essa amostragem refinada, prosseguiu-se com as análises espectrais por meio dos periodogramas de Lomb-Scargle para as variáveis observadas nos dois sítios. O objetivo foi identificar as frequências predominantes das oscilações e investigar a existência de simultaneidade entre os sinais no mesmo período, ou pouco deslocadas na distribuição, o que poderia ser um indicativo de possíveis mecanismos de acoplamento atmosférico atuantes na região de estudo.

3.1.7 Analise de Lomb-Scargle para as variáveis Ventos, Temperatura e Pressão

Análise Espectral da Variabilidade Meteorológica nos Sítios SBJP e SBKG em 17/01/2023 A aplicação do periodograma de Lomb-Scargle nos dados de temperatura e vento dos sítios SBJP (Aeroporto Internacional de João Pessoa) e SBKG (Aeroporto de Campina Grande) revelou padrões oscilatórios bem definidos, sugerindo a presença de processos dinâmicos atmosféricos subdiários atuantes na região. O método permite detectar periodicidades mesmo em séries temporais irregulares, garantindo maior confiabilidade na identificação dos ciclos dominantes.



Figura 11 – Gráfico de distribuição do espectro de pôtencia de Lomb-Scargle para Pressão (A) e Temperatura (B) SBJP e SBKG, Fonte: Autoria própria.

Periodograma de Lomb-Scargle para as temperaturas dos sítios amostram os espectros de potência da temperatura, representados na Figura 11 (B), indicam a presença de oscilações significativas com períodos entre 1 e 7 horas, com picos destacados acima do nível de confiança de 99%. Essa variabilidade não pode ser atribuída a ruídos estatísticos, uma vez que a robustez dos picos sugere a influência de processos físicos reais.

No SBJP, há uma distribuição relativamente contínua da densidade de potência espectral, indicando a ocorrência de flutuações térmicas regulares. Já no SBKG, observa-se uma estrutura espectral mais acentuada, com picos de maior amplitude entre 5 e 7 horas, possivelmente associados a efeitos topográficos locais e padrões diferenciados de convecção. Essa diferença entre os sítios reforça a hipótese de que fatores regionais, como altitude e circulação atmosférica, sistemas de massa de ar, atividade oscilatórios locais, exercem um papel determinante na modulação térmica.

Periodograma de Lomb-Scargle para as componentes do Vento gráfico Figura

12, mostra os espectros de potência das componentes zonal (Leste-Oeste) e meridional (Norte-Sul) do vento. A análise revela uma assinatura espectral distinta para cada sítio:



Figura 12 – Gráfico de distribuição do espectro de pôtencia de Lomb-Scargle para vento meridional Norte-Sul (A) e zonal Leste-Oeste (B) SBJP e SBKG, para 17 de janeiro 2023, Fonte: Autoria própria.

- SBJP: Os picos dominantes de potência se concentram entre 5 e 7 horas, principalmente na componente zonal, sugerindo uma resposta atmosférica modulada por padrões de brisa marítima e possíveis interações com sistemas de grande escala.
- SBKG: A presença de oscilações acentuadas na componente meridional, particularmente para períodos acima de 4 horas, indica a influência de processos orográficos e a interação do escoamento com perturbações de pequena escala. A assinatura espectral dos ventos sugere que a dinâmica atmosférica local pode estar modulando as oscilações térmicas observadas, o que reforça a interdependência entre temperatura e circulação atmosférica.
- Análise do vento e temperatura. No panorama geral os gráfico de cada conjunto, onde temperatura e componentes do vento são analisadas conjuntamente, verifica-se uma correlação clara entre os picos espectrais das duas variáveis. Isso demonstra que as oscilações térmicas e dinâmicas não ocorrem de forma isolada, mas sim como parte de um sistema atmosférico acoplado.

Em ambos os sítios, os picos de potência acima do limiar de 99% de confiança ocorrem para períodos semelhantes, o que sugere uma relação direta entre as variações térmicas e a resposta da circulação atmosférica. Esse comportamento reforça a hipótese de que tais oscilações podem estar associadas a ondas atmosféricas internas, padrões de convecção periódica ou interações entre camadas da troposfera inferior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo será apresentado os principais resultados obtidos no decorrer da análise dos dados, seguindo de uma discussão aprofundada sobre as implicações e significado de tais resultados no contexto de estudo. Inicialmente, será apresentado, destacando as predominâncias, correlações e variáveis mais relevantes. Em seguida, comparando-os com as expectativas iniciais, literatura existente e trabalhos similares. Esse processo nos permitirá obter a compreensão mais abrangente dos fenômenos observados e, também, as limitações dessa análise, podendo assim sugerir investigações futuras.

4.1 Correlação dos dados

Inicialmente, ao analisar as variáveis do estado no ambiente natural, é esperado que ocorram flutuações devido à heterogeneidade do meio estudado, conforme discutido em (EINSTEIN,). No entanto, assume-se um comportamento mais regular, com curvas senoidais bem definidas e comportamento sem grandes variações abruptas, apesar das variações diárias, observa-se uma tendência de estabilidade. No estudo das oscilações atmosféricas, contudo, verifica-se um cenário oposto, caracterizado por perturbações que se destacam das pequenas variações naturais. Nesse sentido, busca-se identificar desvios em relação ao padrão esperado.

4.1.1 Perfis de temperatura e pressão

A Figura 13 ilustra a evolução típica dos parâmetros de pressão e temperatura ao longo do tempo, representando um padrão considerado normal. Observa-se que ambas as variáveis apresentam flutuações contínuas durante o período analisado, sendo que as variações de temperatura se mostram mais acentuadas em comparação às de pressão. Esse comportamento é esperado, dado que a temperatura é influenciada diretamente pela variação térmica da atmosfera, a qual resulta de múltiplos fatores, conforme discutido por (HOLTON; HAKIM, 2013; RODRIGUES; LOPES; SOUSA, 2020; HARRIES, 1976; PEIXÓTO; OORT, 1984).

A Figura 14 ilustra um exemplo de um dia analisado em que se observam diferenças significativas em relação ao comportamento típico. Ambas as figuras apresentam uma correlação entre pressão e temperatura, exibindo um padrão senoidal. No entanto, a Figura 14 evidencia uma maior variabilidade. Neste estudo, essa variabilidade é associada aos eventos atmosféricos oscilatórios em especial, à influência das onda atmosféricas. Essas oscilações surgem a partir de perturbações na densidade, temperatura e pressão do ar,



Figura 13 – Gráfico de distribuição temporal de pressão e temperatura, para o dia 29 de janeiro de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria.

propagando-se horizontal e verticalmente e influenciando desde sistemas sinóticos até eventos climáticos globais (HOLTON; HAKIM, 2013; ANDREWS; LEOVY; HOLTON, 1987), será melhor discutido na Seção 2.2.3.

Com base nessa investigação, foi possível quantificar a frequência dos espectros temporais, categorizados em intervalos de 1 a 7 horas, e determinar a distribuição do número de ocorrências por mês. A Figura 15 apresenta, o gráficos de pressão e temperatura referente ao dia 15 de junho de 2023. O primeiro conjunto mostram a potência espectral das variações de pressão Figura 15 (A) e temperatura Figura 15 (B). Cada curva representa os espectros de um local (SBKG e SBJP), enquanto as linhas horizontais indicam os intervalos de confiança de 99%.

Para de pressão, Figura 15 (A), o primeiro pico mais pronunciado ocorre na faixa de 2 a 3 horas, com uma amplitude maior em SBKG do que em SBJP, um segundo pico significativo aparece em torno de 6 a 7 horas, embora com menor potência relativa, assim o fato de os picos excederem a linha de confiança de 99% indica que essas oscilações são estatisticamente significativas.

Já para a temperatura, Figura 15 (B), temos, o espectro de temperatura apresenta um pico claro em torno de 5 a 6 horas, visível em ambos os locais, sendo um pouco mais



Figura 14 – Gráfico de distribuição temporal de pressão e temperatura, para o dia 15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria.

intenso em SBKG, com pequenos picos secundários aparecem na faixa de 2 a 3 horas, menos intenso em comparação com o espectro da pressão, essa relação entre os picos de temperatura e os de pressão sugere que as oscilações térmicas podem estar ligadas a perturbações atmosféricas de mesma escala temporal.

Em sequencia, Figura 16 apresenta, os gráficos dos espectros de potência dos ventos nas direções (A) Norte-Sul e (B) Leste-Oeste no painel. Assim como no Figura 12, observada na seção 3.1.7, as curvas indicam as variações nos dois locais analisados, no dia 15 de junho de 2023.

Observa-se na Figura 16 (A), componente meridional, há um pico dominante forte na faixa de 2 a 3 horas, particularmente destacado em SBKG, e outros picos secundários aparecem em 4 a 5 horas e 6 a 7 horas, embora com menor intensidade. Enquanto na componente zonal, ilustrada na Figura 15 (B), o espectro apresenta um pico bem definido em torno de 6 a 7 horas, que se destaca tanto em SBKG quanto em SBJP, e notamos também a presença de pequenos picos adicionais aparecem na faixa de 2 a 3 horas, mas menos pronunciados em relação a componente meridional.



Figura 15 – Gráfico de periodograma de Lomb-Scargle para os parâmetros de pressão e temperatura, para o dia 15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria

O comportamento dos ventos observados sugere a presença de oscilações atmosféricas organizadas, possivelmente associadas a ondas de gravidade e/ou Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL). Estes fenômenos são conhecidos por modular as flutuações térmicas e de pressão, que impactam diretamente as condições meteorológicas locais (NEVES; ALCÂNTARA; SOUZA, 2016).

Conforme podemos apresentado por (LANE, 2015), as ondas de gravidade atmosférica são geradas devido à interação entre o movimento do ar e a topografia do terreno, o que pode provocar variações na pressão e temperatura. Essas ondas podem se propagar em diferentes escalas espaciais e temporais, influenciando as condições climáticas em várias regiões.

Por outro lado, as (DOL) são caracterizados por variações periódicas na temperatura, umidade e pressão atmosférica, com uma propagação predominantemente de leste para oeste (NEVES; ALCÂNTARA; SOUZA, 2016). Esses distúrbios, frequentemente observados em regiões tropicais, são importantes na modulação dos ventos e em outros fenômenos meteorológicos, como tempestades e variações sazonais (NEVES; ALCÂNTARA; SOUZA, 2016; RODRIGUES; LOPES; SOUSA, 2020).



Figura 16 – Periodograma de Lomb-Scargle para os parâmetros de ventos Norte-Sul e Leste-Oeste, para o dia 15 de junho de 2023, SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria

A Tabela 1, apresenta uma catalogação dos períodos de forma mais objetiva e registrar os picos dominantes em uma tabela de ocorrência, categorizada por períodos de 1 a 7 horas. A Tabela 1 resume as ocorrências dos picos principais em cada variável e local, seguindo a organização: Um pico dominante significa que há um máximo bem definido no espectro; Pequenos picos indicam oscilações menores, mas ainda presentes;

Esse método de organização possibilita a identificação de padrões recorrentes, além de permitir a análise das oscilações atmosféricas e das correlações entre as variáveis investigadas em ambas as localidades estudadas. Ademais, essa abordagem exemplifica o procedimento de categorização adotado para cada um dos dias analisados ao longo desta pesquisa.

A partir da organização e baseada na quantidade de eventos recorrentes, incluindo tanto os picos dominantes quanto os pequenos picos, foi realizada a distribuição da ocorrência em relação ao período do ano. Dessa forma, o histograma de distribuição de eventos, permite-se identificar as regiões temporais com maior frequência de ocorrência ao longo do período de estudo. Na Figura 17, é apresentado esse histograma.

Na análise da Figura 17, observa-se que a maior concentração de eventos ocorre nos

Período (horas)	Pressão (SBKG, SBJP)	Temperatura (SBKG, SBJP)	Vento NS (SBKG, SBJP)	Vento LO (SBKG, SBJP)
1 - 2 h	-	-	Pequeno pico (SBKG)	-
2 - 3 h	Pico forte (SBKG, SBJP)	Pequeno pico (SBKG, SBJP)	Pico dominante (SBKG)	Pequeno pico (SBKG, SBJP)
4 - 5 h	-	-	Pico secundário (SBKG)	-
5 - 6 h	-	Pico dominante (SBKG, SBJP)	-	-
6 - 7 h	Pico secundário (SBKG)	-	Pequeno pico (SBJP)	Pico dominante (SBKG, SBJP)

Tabela 1 – Tabela de variação de variáveis meteorológicas por período para o dia 15 de junho 2023, para os sítios SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria.



Figura 17 – Histograma de distribuição de oscilações durante o período do ano de 2023 para os sítios SBKG e SBJP. Fonte: Autoria própria.

meses de julho e agosto. Esse aumento pode estar relacionado à sazonalidade, caracterizada por variações térmicas mais intensas.

Para investigar essa possível correlação, foi elaborado um gráfico que apresenta a distribuição dos eventos ao longo do ano, incorporando a demarcação das estações do ano. Esse gráfico está representado na Figura 18.



Figura 18 – Distribuição normalizada dos eventos ao longo do ano, com a demarcação das estações representadas por diferentes cores. Fonte: Autoria própria.

Os estudos sobre a ocorrência de ondas atmosféricas e ondas de gravidade associadas à sazonalidade têm sido um foco de pesquisa há muitos anos, como evidenciado em (WU; KILLEEN, 1996; VINCENT; ALEXANDER, 2000). Ao comparar os dados obtidos na Figura 18, nota-se uma similaridade no comportamento geral com os resultados apresentados por (ESSIEN et al., 2018), apesar das diferenças de latitude e altitude entre as localidades analisadas. Entretanto, ao se comparar os resultados quantitativos, há variações significativas.

Por exemplo, (WU; KILLEEN, 1996) observaram que as atividades de ondas de gravidade, a partir de observações da luminescência atmosférica de OH, atingiram seu máximo no verão e apresentaram atividade muito mais fraca no inverno no Observatório *Peach Mountain, Michigan* (42,3 N, 83,7 W), durante o período de 1993 a 1994. Da mesma forma, observações de radiossondas realizadas nas *Ilhas Cocos* (12°S, 97°E), no Oceano Índico, entre setembro de 1992 e junho de 1998, foram utilizadas por (VINCENT; ALEXANDER, 2000) para estudar a variação sazonal e interanual das atividades de ondas de gravidade na estratosfera terrestre (18-20 km).

Neste estudo, os dados indicam maior ocorrência das oscilações atmosféricas nos períodos mais frios do ano. Esse resultado pode estar relacionado a diversos fatores externos, incluindo a localização geográfica analisada, uma vez que os trabalhos citados anteriormente foram realizados em latitudes distintas. Além disso, (NEVES; ALCÂNTARA; SOUZA, 2016) apontam que determinados padrões de vento também podem influenciar a ocorrência e intensidade das oscilações, a depender da latitude estudada, um aspecto que merece investigação adicional.

Outro ponto relevante é a correlação entre as oscilações atmosféricas em duas localidades distintas, separadas por aproximadamente 130 km (SBKG e SBJP). Os dados indicam que essas variabilidades apresentam padrões similares no mesmo período, ainda que com pequenos deslocamentos temporais na distribuição das oscilações.

Em resumo, os dados obtidos, apesar de fazerem uso de métodos e fontes de coleta de dados distintas dos demais trabalhos na área, mostram resultados similares. O vínculo da sazonalidade com a ocorrência das oscilações atmosféricas ou mesmo a correlação existente entre as variáveis analisadas, abre um caminho que possibilita a abrangência do estudo para outras localidades. Um mapeamento mais preciso do fenômeno estudado, proporcionando estudos futuros que oportuniza estudar as causas e efeitos em latitudes distintas, sendo facilitado por utilizar dados coletados presentes em uma vasta localidade.

Os resultados indicam a existência de um regime oscilatório bem definido nos sítios SBJP e SBKG, com períodos dominantes entre 1 e 7 horas. A presença de picos espectrais consistentes em temperatura e vento sugere que a variabilidade atmosférica na região é modulada por processos físicos bem estabelecidos, como: Oscilações associadas à circulação de brisa terrestre-marítima (RODRIGUES; LOPES; SOUSA, 2020). Influências topográficas, particularmente no SBKG; Propagação de ondas de gravidade e interações com a camadas superiores da atmosfera e padrões de convecção modulados por circulação regional (LANE, 2015; KLEIDON, 2016).

A robustez estatística dos espectros, aliada à coerência entre os resultados dos dois sítios, reforça a confiabilidade dos resultados e destaca a importância da análise espectral na caracterização de padrões subsidiários da atmosfera. Trabalhos futuros podem aprofundar essa investigação por meio da comparação com modelos numéricos de previsão do tempo e medições da atmosfera.

Ao comparar os gráficos referentes ao sítio SBKG com aqueles do SBJP, observa-se uma correlação significativa entre os eventos registrados, seja na mesma escala temporal ou com pequenos deslocamentos nas séries de uma ou mais variáveis. Essa correspondência, identificada na maioria dos 35 dias analisados, sugere uma interdependência entre as variações dos parâmetros meteorológicos tanto em nível local quanto regional. Tal padrão indica que o fenômeno em questão manifestou-se em ambos os locais estudados, podendo, portanto, ter impactos em uma escala mais ampla. Por fim, os resultados obtidos sugerem a possível presença de ondas atmosféricas, com destaque para DOL, onda de Kelvin ou onda gravitacionais rápidas, cujas assinaturas podem ser inferidas a partir das configurações observadas nos gráficos. Ademais, as características atmosféricas e topográficas dos sítios analisados reforçam essa hipótese, tornando-se, assim, um ponto de partida relevante para investigações mais aprofundadas. Entre os desdobramentos potenciais dessa análise, destacam-se a determinação da origem dessas oscilações por meio de triangulação, a avaliação dos efeitos climáticos associados e a investigação das possíveis repercussões de uma intensificação da variabilidade dos parâmetros meteorológicos examinados.

5 Conclusões

Este estudo realizou uma análise de dados empíricos provenientes das Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) dos aeroportos de João Pessoa (SBJP) e Campina Grande (SBKG), no estado da Paraíba, ao longo do ano de 2023. Foram investigadas as variáveis de pressão atmosférica, temperatura e vento, com o objetivo de identificar oscilações atmosféricas de curta periodicidade e avaliar sua associação com distúrbios atmosféricos conhecidos. Para tanto, aplicaram-se técnicas de filtragem espectral e métodos estatísticos, permitindo eliminar ruídos e destacar padrões oscilatórios relevantes.

A análise espectral revelou a ocorrência de oscilações atmosféricas com periodicidades entre 1 e 7 horas em 94% dos dias inicialmente analisados (80 dias), com base nos dados de pressão e temperatura. A inclusão do parâmetro vento e a exigência de simultaneidade entre as três variáveis reduziram essa ocorrência a 35 dias (44,9% da amostra), nos quais foram detectadas oscilações consistentes e estatisticamente significativas, com nível de confiança superior a 99%. Essa abordagem reforça a importância da correlação entre os parâmetros como critério para validação dos eventos detectados.

A distribuição temporal das ocorrências indicou maior frequência dessas oscilações nos meses de inverno, o que contrasta com a tendência registrada na literatura, segundo a qual tais fenômenos ocorrem preferencialmente em períodos mais quentes. Essa divergência pode estar relacionada às particularidades da região estudada, como localização na zona equatorial, e à metodologia adotada, ressaltando-se, portanto, o papel da sazonalidade regional na modulação dessas oscilações.

As perturbações identificadas apresentaram características compatíveis com Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e ondas de gravidade rápidas, tanto em periodicidade quanto em direção de propagação. Observou-se, inclusive, um deslocamento sistemático dos sinais atmosféricos de leste para oeste, evidenciado pela defasagem temporal entre os registros dos dois sítios, o que reforça a hipótese de uma propagação coerente e organizada dessas perturbações.

Dessa forma, conclui-se que oscilações atmosféricas de curta duração ocorrem de forma recorrente na região estudada, manifestando-se de maneira simultânea nos dados de pressão, temperatura e vento. A forte correlação entre essas variáveis, especialmente entre pressão e temperatura, associada ao comportamento dos ventos, evidencia um acoplamento dinâmico local da atmosfera. Esse padrão de variação não se deve a flutuações aleatórias, mas sim à atuação de distúrbios atmosféricos coerentes, organizados e com características oscilatórias bem definidas.

Por fim, este trabalho contribui significativamente para o entendimento da dinâmica

atmosférica regional, ao fornecer evidências empíricas e estatísticas da presença de oscilações compatíveis com DOL e ondas de gravidade rápidas, além de demonstrar sua ocorrência predominante nos períodos mais frios do ano. Esses achados fortalecem a base científica sobre a variabilidade atmosférica de mesoescala na região estudada.

5.1 Trabalhos futuros

A continuidade desta pesquisa pode se beneficiar da incorporação de outras variáveis atmosféricas, como precipitação e umidade, visando ampliar a compreensão sobre a relação entre oscilações de curta duração e os processos convectivos regionais. Tais análises podem esclarecer, por exemplo, o impacto dessas perturbações na formação de chuvas ou na variabilidade climática sazonal.

Além disso, emerge uma questão relevante: o aumento da temperatura média global poderá alterar a frequência e a intensidade desses eventos atmosféricos? Investigações futuras nesse sentido poderão contribuir para entender como as mudanças climáticas influenciam a dinâmica das oscilações atmosféricas em escala local e regional.

Por fim, recomenda-se expandir a análise para outras localidades do Nordeste brasileiro, outras regiões tropicais ou outras latitudes maiores, a fim de mapear espacialmente a ocorrência dessas perturbações. Tal mapeamento contribuiria para identificar padrões comuns e diferenças regionais, fornecendo subsídios para políticas de monitoramento meteorológico, planejamento ambiental e gestão de riscos associados à variabilidade atmosférica.

Referências

AMBRIZZI, T. El nino/oscilações sul e teleconexões atmosféricas no hemisfério austral. 2003.

AMBRIZZI, T.; SACCO, M. A. L.; FERRAZ, S. E. T. A importância das teleconexões para a previsão sazonal. *Ciência e Natura*, Universidade Federal de Santa Maria, v. 36, p. 137–148, 2014.

ANDREWS, D. G.; LEOVY, C. B.; HOLTON, J. R. *Middle atmosphere dynamics*. [S.l.]: Academic press, 1987. v. 40.

ATAÍDE, J. S. P. d. et al. Caracterização do movimento vertical de ondas de gravidade através de dados de radar meteórico e imageador de aeroluminescência. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

BALSLEY, B.; GAGE, K. The mst radar technique: Potential for middle atmospheric studies. *Pure and Applied Geophysics*, Springer, v. 118, p. 452–493, 1980.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. Atmosfera, tempo e clima. [S.l.]: Bookman Editora, 2009.

CARVALHO, M. W. L. et al. Comparação de dados meteorológicos e estimativa da radiação líquida e evapotranspiração de referência utilizando estações convencional e automática. *Agrometeoros*, v. 27, n. 2, 2020.

CAZUZA, E. P. et al. Possíveis evidências de acoplamento estratosfera-mesosferatermosfera através de ondas de gravidade: Estudo de caso. *Nome do Jornal*.

CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. Atmospheric tides: thermal and gravitational. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

CLARK, T. L.; HAUF, T.; KUETTNER, J. P. Convectively forced internal gravity waves: Results from two-dimensional numerical experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 112, n. 474, p. 899–925, 1986.

COSTA, R. A. B. d. Estudo de parâmetros de ondas de gravidade por medidas simultâneas de radar mu e fotômetro em shigaraki (350 n, 1360 l), japão. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 17, p. 95–96, 1999.

EINSTEIN, A. Física e realidade. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 1.

ESSIEN, P. et al. Seasonal characteristics of small- and medium-scale gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere over the brazilian equatorial region. *Annales Geophysicae*, Copernicus Publications, Göttingen, Germany, v. 36, n. 3, p. 899–914, 2018.

FORBES, J. M.; PALO, S. E.; ZHANG, X. Variability of the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Elsevier, v. 62, n. 8, p. 685–693, 2000.

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

GANDOLFI, V. T. *Guia Básico de Instrumentos Meteorológicos.* Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2020.

GARCIA, R. R.; SOLOMON, S. The effect of breaking gravity waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 90, n. D2, p. 3850–3868, 1985.

GILL, A. E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal* of the Royal Meteorological Society, Wiley Online Library, v. 106, n. 449, p. 447–462, 1980.

GILL, A. E. Atmosphere—ocean dynamics. [S.l.]: Elsevier, 2016.

GLYNN, E. F.; CHEN, J.; MUSHEGIAN, A. R. Detecting periodic patterns in unevenly spaced gene expression time series using lomb-scargle periodograms. *Bioinformatics*, Oxford University Press, v. 22, n. 3, p. 310–316, 2006.

GONÇALVES, A. R. Refinamento estatístico das previsões de vento do modelo eta aplicado ao setor eólio-elétrico do nordeste brasileiro. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE*, 2011.

Google Maps. *Pesquisa de rotas e locais*. 2024. Acesso em: 16 nov. 2024. Disponível em: https://maps.google.com>.

GRAHAM, M. J. et al. A comparison of period finding algorithms. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, The Royal Astronomical Society, v. 434, n. 4, p. 3423–3444, 2013.

HARRIES, J. E. The distribution of water vapor in the stratosphere. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 565–575, 1976.

HELD, I. M.; HOSKINS, B. J. Large-scale eddies and the general circulation of the troposphere. In: *Advances in geophysics*. [S.l.]: Elsevier, 1985. v. 28, p. 3–31.

HINES, C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 38, n. 11, p. 1441–1481, 1960.

HOBBS, W. H. The ferrel doctrine of polar calms and its disproof in recent observations. *(section II) Astronomy, meteorology, and seismology. RS Woodward, chairman*, US Government Printing Office, v. 2, p. 179, 1917.

HOLTON, J. R.; HAKIM, G. J. An introduction to dynamic meteorology. [S.l.]: Academic press, 2013. v. 88.

HOSKINS, B. J.; KAROLY, D. J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *Journal of the atmospheric sciences*, American Meteorological Society, v. 38, n. 6, p. 1179–1196, 1981.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Página oficial do IBGE*. 2024. Acesso em: 16 nov. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br.

JUDD, S. History of Hadley: Including the Early History of Hatfield, South Hadley, Amherst and Granby, Massachusetts. Amherst, MA: Metcalf, 1863.

KLEIDON, A. *Thermodynamic foundations of the Earth system*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016.

LANE, T. Convectively generated gravity waves. In: NORTH, G. R.; PYLE, J.; ZHANG, F. (Ed.). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*. [S.l.]: Academic Press, 2015. p. 171–179.

LANE, T. P.; CLARK, T. L. Gravity waves generated by the dry convective boundary layer: Two-dimensional scale selection and boundary-layer feedback. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, Wiley Online Library, v. 128, n. 583, p. 1543–1570, 2002.

LINDZEN, R. Turbulence and stress due to gravity wave and tidal breakdown, d. J. Geophys. Res, v. 86, p. 9701–9714, 1981.

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science*, Springer, v. 39, p. 447–462, 1976.

LUTHER, D. S.; JOHNSON, E. S. Eddy energetics in the upper equatorial pacific during the hawaii-to-tahiti shuttle experiment. *Journal of Physical Oceanography*, v. 20, n. 7, p. 913–944, 1990.

LYRA, M. J. A. et al. Características dos complexos convectivos de mesoescala no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 35, p. 727–734, 2020.

MATSUNO, T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, Meteorological Society of Japan, v. 44, n. 1, p. 25–43, 1966.

NASCIMENTO, E. d. L.; AMBRIZZI, T. Influência dos bloqueios atmosféricos na propagação de ondas de rossby em escoamentos de inverno no hemisfério sul. 1998.

NAV Brasil. Sobre a Empresa. 2024. Disponível em: https://navbrasil.gov.br/a-empresa/ sobre-a-empresa/>.

NEVES, D. J. D.; ALCÂNTARA, C. R.; SOUZA, E. P. d. Estudo de caso de um distúrbio ondulatório de leste sobre o estado do rio grande do norte-brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 31, p. 490–505, 2016.

PAULINO, I. Estudo da propagação de ondas de gravidade na termosféra-ionosféra. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012.

PEIXÓTO, J. P.; OORT, A. H. Physics of climate. *Reviews of Modern Physics*, APS, v. 56, n. 3, p. 365, 1984.

PLANE, J. M. C. A time-resolved model of the mesospheric na layer: constraints on the meteor input function. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 4, n. 3, p. 627–638, 2004. Disponível em: ">https://acp.copernicus.org/articles/4/627/2004/>.

ROBLE, R.; DICKINSON, R. E.; RIDLEY, E. Seasonal and solar cycle variations of the zonal mean circulation in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, v. 82, n. 35, p. 5493–5504, 1977.

RODRIGUES, E. L.; LOPES, R. F. C.; SOUSA, F. d. A. S. de. Variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial no estado da paraíba. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 12, p. 100233–100251, 2020.

ROSSBY, C. et al. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the permanent centers of action atmosphere and the displacements of the permanent centers of action. 1939.

RYDBECK, A.; JENSEN, T.; FLATAU, M. Characterization of intraseasonal kelvin waves in the equatorial pacific ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 124, n. 3, p. 2028–2053, 2019.

SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. ii-statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 263, Dec. 15, 1982, p. 835-853.*, v. 263, p. 835–853, 1982.

SEIKI, A.; TAKAYABU, Y. N. Westerly wind bursts and their relationship with intraseasonal variations and enso. part ii: Energetics over the western and central pacific. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, v. 135, n. 10, p. 3346–3361, 2007.

SEO, K.-H.; XUE, Y. Mjo-related oceanic kelvin waves and the enso cycle: A study with the ncep global ocean data assimilation system. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 32, n. 7, 2005.

SHINODA, T.; ROUNDY, P. E.; KILADIS, G. N. Variability of intraseasonal kelvin waves in the equatorial pacific ocean. *Journal of Physical Oceanography*, American Meteorological Society, v. 38, n. 5, p. 921–944, 2008.

SILVA, K. M. R. d. et al. Climatologia das brisas marítima e terrestre no estado de alagoas. Universidade Federal de Alagoas, 2022.

STEPHAN, C. C. Seasonal modulation of trapped gravity waves and their imprints on trade wind clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 77, n. 9, p. 2993–3009, 2020.

STEPHAN, C. C. et al. A case study on the far-field properties of propagating tropospheric gravity waves. *Monthly Weather Review*, v. 144, n. 8, p. 2947–2961, 2016.

STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 13.

THOMSON, R. E.; DAVIS, E. E. Equatorial k elvin waves generated in the western tropical p acific o cean trigger mass and heat transport within the m iddle a merica t rench off c osta r ica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 122, n. 7, p. 5850–5869, 2017.

VALLIS, G. K. Atmospheric and oceanic fluid dynamics. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017.

VANDERPLAS, J. T. Understanding the lomb-scargle periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, IOP Publishing, v. 236, n. 1, p. 16, 2018.
VINCENT, R. A.; ALEXANDER, M. J. Gravity waves in the tropical lower stratosphere: An observational study of seasonal and interannual variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 105, n. D14, p. 17971–17982, 2000.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric science: an introductory survey. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 92.

WATANABE, W. d. B. *Propagação de ondas de Rossby em dois modelos quase-geostróficos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

WESSBERG, J. et al. Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 408, n. 6810, p. 361–365, 2000.

WHEELER, M. C.; HENDON, H. H. An all-season real-time multivariate mjo index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, American Meteorological Society, v. 132, n. 8, p. 1917–1932, 2004.

Wikipédia. *Título do artigo.* 2024. Acesso em: 16 nov. 2024. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%ADtulo_do_artigo.

WRASSE, C. M. Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre. *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais–INPE-8003-TDI/751*, 2000.

WU, Q.; KILLEEN, T. L. Seasonal dependence of mesospheric gravity waves (<100 km) at peach mountain observatory, michigan. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 23, n. 17, p. 2211–2214, 1996.

ZHAO, M. An investigation of the connections among convection, clouds, and climate sensitivity in a global climate model. *Journal of Climate*, American Meteorological Society, v. 27, n. 5, p. 1845–1862, 2014.

Anexos

ANEXO A – Recorte de alguns dias analisados

O código carrega, processa e plota gráficos para analisar a variância da pressão e temperatura para datas específicas. A pressão é representada no eixo esquerdo (em azul) e a temperatura no eixo direito (em laranja), com os dados representados em gráficos temporais para cada dia selecionado.

Abaixo, apresenta-se uma das partes da análise que consiste na variância dos dias analisados. Esta variância é obtida por meio da subtração dos valores diários em relação à média mensal, o que permite uma visualização mais nítida das flutuações. Dessa forma, é possível observar de maneira mais clara as mudanças abruptas que ocorrem ao longo do dia. A barra horizontal indica o período de ocorrência dos eventos, com a referência temporal em UTC. Assim, é possível associar os picos de variância aos períodos temporais específicos, conforme realizado para os dias selecionados.

Estes são alguns exemplos dos dias analisados, nos quais é notória a correlação entre a pressão e a temperatura ao longo da série temporal. Ao examinarmos esses poucos dias, é possível observar a relação entre os períodos de ocorrência e as similaridades entre os dois sítios analisados.

```
In [1]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from datetime import datetime, timedelta
import matplotlib.dates as mdates
from astropy.timeseries import LombScargle
import os
```

COD abaixo código se trata da variância do cada dia selecionado do ano de 2023 para os dados do SBKG

```
In [9]: dados1 = pd.read_csv('resultado_subtracao0.csv', sep=';', decimal=',', encoding='la
        dados1 = dados1.T.reset index(drop=True).T
        dados1 = dados1.rename(columns={0: "Time", 1: 'Temp', 2: 'Pres'})
        dados1["Time"] = pd to_datetime(dados1["Time"], format="%d/%m/%Y %H:%M", dayfirst=T
        dados1['Temp'] = pd.to_numeric(dados1['Temp'], errors='coerce')
        dados1['Pres'] = pd.to_numeric(dados1['Pres'], errors='coerce')
        dados1 = dados1[['Time', 'Temp', 'Pres']]
        dados1 = dados1.dropna()
        datas_plotar1 = ['2023-01-02','2023-03-08','2023-05-05','2023-09-02','2023-09-09']
        fig1, axs1 = plt.subplots(len(datas_plotar1), 1, figsize=(10, len(datas_plotar1) *
        for i, data_str in enumerate(datas_plotar1):
            data = datetime.strptime(data_str, "%Y-%m-%d")
            subset = dados1[dados1['Time'].dt.date == data.date()]
            ax = axs1[i] if len(datas_plotar1) > 1 else axs1
            ax.plot(subset['Time'], subset['Pres'], 'b-', label='Pressão (hPa)', linewidth=
            ax.set xlabel('Hora (UTC)', fontsize=12)
            ax.set_ylabel('Pressão (hPa)', color='blue', fontsize=12)
            ax2 = ax.twinx()
            ax2.plot(subset['Time'], subset['Temp'], color='orange', linestyle='-', label='
            ax2.set_ylabel('Temperatura (°C)', color='orange', fontsize=12)
            ax.set_title(f'Gráfico variância pressão e temperatura para ({data_str}) SBKG',
            ax.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
            ax.xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=2))
            plt.setp(ax.xaxis.get_majorticklabels(), rotation=0, fontsize=10)
            ax.grid(True)
        plt.tight_layout()
        plt.show()
```





COD abaixo código se trata da variância do cada dia selecionado do ano de 2023 para os dados do SBJP

In [10]: dadosresultado sub23 = pd.read csv('RESULTADO SUBJPA23 35DAY.csv', sep=';', decimal dadosresultado_sub23 = dadosresultado_sub23.T.reset_index(drop=True).T dadosresultado_sub23 = dadosresultado_sub23.rename(columns={0: "TIME", 1: 'PRES', 2 dadosresultado_sub23["TIME"] = pd.to_datetime(dadosresultado_sub23["TIME"], format= dadosresultado_sub23['TEMP'] = pd.to_numeric(dadosresultado_sub23['TEMP'], errors=' dadosresultado_sub23['PRES'] = pd.to_numeric(dadosresultado_sub23['PRES'], errors=' dadosresultado_sub23 = dadosresultado_sub23[['TIME', 'PRES', 'TEMP']] dadosresultado_sub23 = dadosresultado_sub23.dropna() datas_plotar2 = ['2023-01-02','2023-03-08','2023-05-05','2023-09-02','2023-09-09'] fig2, axs2 = plt.subplots(len(datas_plotar2), 1, figsize=(10, len(datas_plotar2) * for i, data str in enumerate(datas plotar2): data = datetime.strptime(data_str, "%Y-%m-%d") subset = dadosresultado_sub23[dadosresultado_sub23['TIME'].dt.date == data.date ax = axs2[i] if len(datas_plotar2) > 1 else axs2 ax.plot(subset['TIME'], subset['PRES'], 'b-', label='Pressão (hPa)', linewidth= ax.set_xlabel('Hora (UTC)', fontsize=12) ax.set_ylabel('Pressão (hPa)', color='blue', fontsize=12) ax2 = ax.twinx()ax2.plot(subset['TIME'], subset['TEMP'], color='orange', linestyle='-', label=' ax2.set_ylabel('Temperatura (°C)', color='orange', fontsize=12) ax.set_title(f'Gráfico variância pressão e temperatura para ({data_str}) SBJP', ax.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M')) ax.xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=2)) plt.setp(ax.xaxis.get majorticklabels(), rotation=0, fontsize=10) ax.grid(True) plt.tight_layout() plt.show()



