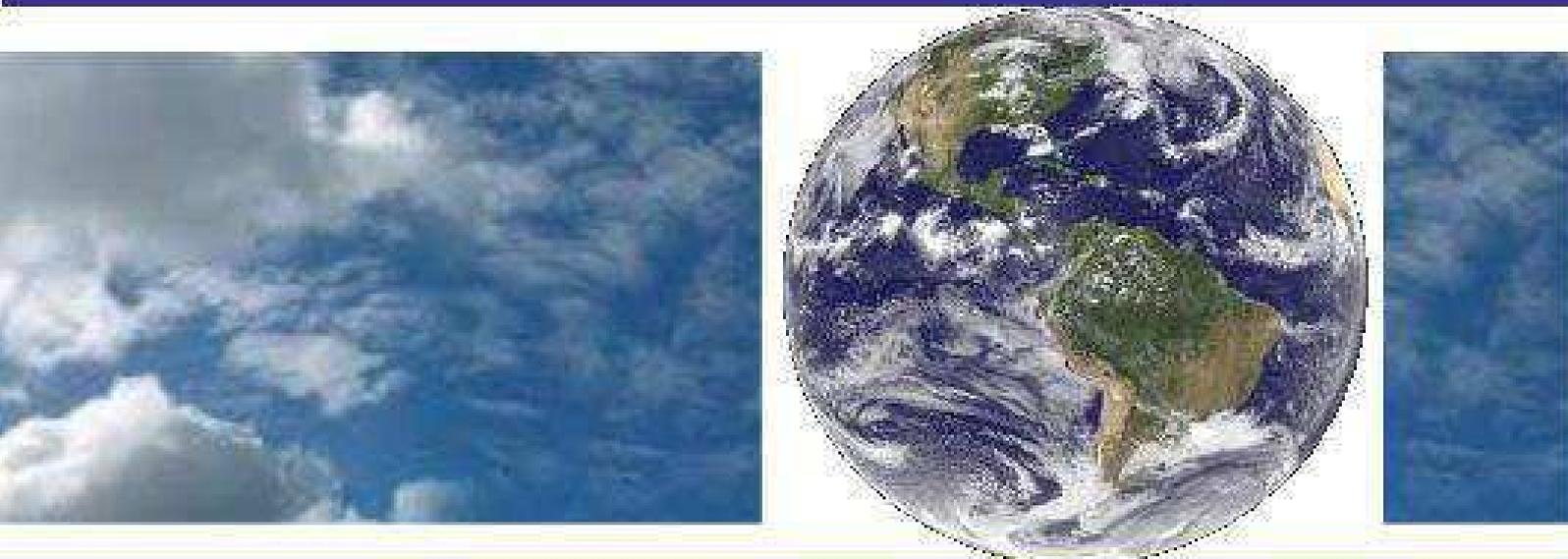


UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI

EPISÓDIOS SIGNIFICATIVOS DE VENTOS DE
TRAVÉS NO AEROPORTO DE PETROLINA: UM
ESTUDO DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS
ADVERSAS EM OPERAÇÕES DE POUSO E
DECOLAGEM

Campina Grande – PB
Fevereiro de 2016



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – CTRN
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia – PPGMet

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**EPISÓDIOS SIGNIFICATIVOS DE VENTOS DE TRAVÉS NO AEROPORTO DE
PETROLINA: UM ESTUDO DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS
EM OPERAÇÕES DE POUSO E DECOLAGEM**

LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI

Campina Grande – PB
Fevereiro de 2016

LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI

**EPISÓDIOS SIGNIFICATIVOS DE VENTOS DE TRAVÉS NO AEROPORTO DE
PETROLINA: UM ESTUDO DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS
EM OPERAÇÕES DE POUSO E DECOLAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escala

Sub-área: Sinótica-Dinâmica da Atmosfera Tropical

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Magaly de Fatima Correia

Campina Grande – PB
Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B237e Barbieri, Leonardo Fagner Ponciano.
Episódios significativos de ventos de través no aeroporto de Petrolina : um estudo de condições meteorológicas adversas em operações de pouso e decolagem / Leonardo Fagner Ponciano Barbieri. – Campina Grande-PB, 2016.

62 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.

"Orientação: Profª. Dra. Magaly de Fátima Correia".

Referências.

1. Vento de Través. 2. Pouso – Condições Meteorológicas. 3. Decolagem – Condições Meteorológicas. 4. VCAN. 5. ACP. I. Correia, Magaly de Fátima Correia. II. Título.

CDU 551.5(043.3)

LEONARDO FAGNER PONCIANO BARBIERI

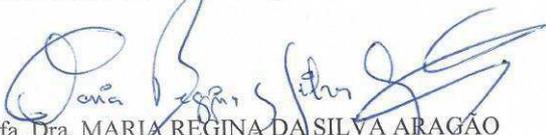
EPISÓDIOS SIGNIFICATIVOS DE VENTOS DE TRAVÉS NO AEROPORTO DE
PETROLINA: UM ESTUDO DE CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS ADVERSAS EM
OPERAÇÕES DE POUSO E DECOLAGEM

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2016

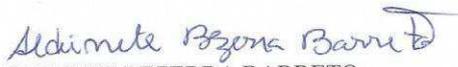
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dra. ALDINETE BEZERRA BARRETO
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido
Universidade Federal de Campina Grande

*Dedico este trabalho à pessoa mais importante da minha vida: minha mãe!
Com todo o meu amor, respeito e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e à influência dos bons espíritos que sempre estiveram ao meu lado, em todos os momentos desta jornada. Sem esse suporte, não teria chegado até aqui.

À minha mãe, Teresinha Ponciano, a quem devo tudo, que me apoia em todas as minhas decisões e que vibra com cada nova conquista alcançada.

À professora e orientadora Dr^a. Magaly de Fátima Correia, a quem considero uma verdadeira mãe, pelos ensinamentos transmitidos, orientação, paciência, amizade e dedicação. Serei eternamente grato por nunca ter desistido de mim.

Às professoras Dr^a Maria Regina da Silva Aragão e Dr^a Aldinete Bezerra Barreto pelas preciosas colaborações e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus queridos e amados irmãos de coração, Davi e Felipe, por todo o apoio, companheirismo, amizade e paciência em todas as fases deste trabalho.

Aos meus preciosos amigos, Julliana, Jaqueline, Milena, Rafaella, Leydson, Milla, Alessandra, Edvânia e Samira, que de forma direta ou indireta, estiveram presentes durante todo esse tempo, desde a graduação, pela amizade sincera e desinteressada, pelas risadas, pelos compartilhamentos de conquistas e dificuldades, pela confiança e consideração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo que possibilitou a realização desta pesquisa.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) e da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), fundamentais em todo o processo de aprendizado até aqui.

Enfim, a todos que contribuíram na realização desta dissertação e que torcem pelo meu sucesso.

RESUMO

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo caracterizar o regime de vento em superfície na área do Aeroporto Internacional de Petrolina (Senador Nilo Coelho) e identificar condições meteorológicas adversas cruciais às operações de pouso e decolagem. Enfoque especial foi dado aos episódios de vento cruzado, também denominado vento de través (vento perpendicular à pista de pouso). Os principais dados utilizados são as mensagens METAR do período 2003 - 2014. Um aumento significativo na frequência de vento de través, que chega a 100% no mês de julho, é informação importante a ser considerada pelos pilotos que atuam na Região. A Análise Fatorial por Componentes Principais (ACP) foi utilizada para identificar mecanismos físicos associados com mudanças significativas no vento local. Foram retidos três fatores que explicaram 94,9% da variabilidade dos dados no mês de abril. Os episódios mais significativos de vento de través do quadrante Nordeste (TRV_NE) ocorreram no ano de 2012 em condições atmosféricas influenciadas pela atuação de VCAN (Vórtice Ciclônico de Altos Níveis). Movimentos descendentes no centro do VCAN, redução na umidade atmosférica e um número maior de nuvens mais altas estão entre as principais características desses eventos. As análises mostram ainda uma relação positiva entre o número de registros de VCAN e a frequência de TRV_NE, e que a circulação da brisa lacustre induzida pela implantação do Lago de Sobradinho ao sul do aeroporto de Petrolina contribuiu para o aumento na frequência de vento de través do quadrante Sudoeste (TRV_SW).

Palavras-chave: vento de través, pouso, decolagem, VCAN, ACP

ABSTRACT

The development of this work aimed to characterize the surface wind regime in the Petrolina International Airport area (Senator Nilo Coelho) and to identify adverse weather conditions crucial to landing and takeoff operations. Special focus was given to cross-wind (wind perpendicular to the runway) episodes. The main data used are the METAR messages for the period 2003 – 2014. A significant increase in cross-wind frequency, that reaches 100% in the month of July, is important information to be considered by the pilots that operate in the region. The Factor Analysis by Principal Components (PCA) was used to identify physical mechanisms associated with significant changes in the local wind. Three factors explaining 94.9% of the variance in the month of April were retained. The most significant episodes of cross-wind on the Northeast quadrant (TRV_NE) occurred in 2012 under atmospheric conditions influenced by UTCV (Upper Tropospheric Cyclonic Vortex). Descending motion in the UTCV center, reduction in atmospheric humidity and a larger number of higher base clouds are among the main characteristics of these events. The analyses show also a positive relationship between the number of UTCV reports and the frequency of TRV_NE, and that the lake breeze circulation induced by the implantation of the Sobradinho Lake to the south of the Petrolina airport contributed for the increase in the frequency of cross-wind on the Southwest quadrant (TRV_SW).

Keywords: cross-wind, landing, takeoff, UTCV, PCA

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

I – Lista de Figuras	i
II – Lista de Tabelas	v
III – Lista de Quadros	vi
IV – Lista de Siglas e Abreviaturas	vii
V – Lista de Símbolos	ix
1 – Introdução	01
2 – Objetivos	03
2.1 – Objetivo Geral	03
2.2 – Objetivos Específicos	03
3 – Revisão da Literatura	04
4 – Material e Métodos	08
4.1 – Área de Estudo	08
4.1.1 – Município de Petrolina	08
4.1.2 – O Aeroporto de Petrolina	10
4.2 – Dados	12
4.3 – Metodologia	13
4.3.1 – Processamento de Dados	13
4.3.2 – Impactos do Vento na Aviação	14
4.3.3 – Definição de Critérios e Variáveis Calculadas	20
4.3.4 – Análise Multivariada	24

4.3.4.1 – Análise de Componentes Principais (ACP)	25
4.3.4.1.1 – Descrição do Método	26
4.3.5 – Teste T-Student	30
5 – Resultados e Discussão	33
5.1 – Vento Médio em Superfície na Área do Aeroporto de Petrolina-PE	34
5.2 – Frequência dos Ventos na Área do Aeroporto de Petrolina-PE	36
5.3 – Análise Fatorial por Componentes Principais para o Mês Abril de 2003 a 2014	39
5.3.1 – Influência da Variabilidade Interanual	40
5.3.2 – Influência de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)	46
5.3.3 – Influência do Ciclo Diurno (Manhã e Tarde)	51
6 – Conclusões	55
7 – Referências Bibliográficas	56

I – LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1** – Divisão política do Nordeste, destacando a localização do município de Petrolina no Estado de Pernambuco e a delimitação, em negrito, da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco na Região. Em que: 1 é a parte do Médio da BHSF na Região Nordeste; 2 e 3 são o Submédio e Baixo São Francisco, respectivamente. 08
- Figura 4.2** – Esquema de um corte vertical do Vórtice Ciclônico no Atlântico Sul. As setas verticais representam o sentido do movimento vertical. A abreviação DIV e CONV indicam divergência e convergência respectivamente. Fonte: adaptado de Kousky e Gan, (1981) 10
- Figura 4.3** – Localização geográfica do Aeroporto de Petrolina-PE, com destaque para a pista de pousos e decolagens e a vegetação nas proximidades. Fonte: Google Maps, 2015. 11
- Figura 4.4** – Registro da movimentação de cargas no Aeroporto de Petrolina-PE, entre 2004 e 2014. Fonte de dados: INFRAERO CARGO, 2015. 12
- Figura 4.5** – Distribuição de frequência dos meses que: sem dados (SD) disponíveis (azul); menos de 70% de informações válidas (vermelho); entre 70 e 90% de informações válidas (verde); acima de 90% de informações válidas (roxo). 14
- Figura 4.6** – Efeitos do vento calmo, vento de cauda e vento lateral na aeronave durante o voo. 15
- Figura 4.7** – Campo de vento (m/s) da brisa lacustre na área do lago de Sobradinho. (a) simulação com atmosfera úmida (abril de 1985); (b) simulação atmosfera seca. A escala do vento é vista abaixo de cada ilustração (setembro de 1999). Fonte: adaptado de Correia (2001). 16
- Figura 4.8** – Efeito do vento de través durante o pouso, sem a intervenção do piloto no Aeroporto de Petrolina. (a) devido ao aumento do vento de direita; (b) devido à diminuição do vento de direita. Fonte: adaptado de Fogaccia, 2001. 17

- Figura 4.9** – Efeitos de correntes descendentes intensas e explosão divergente do ar próxima à superfície na aproximação final de uma aeronave. (Fonte: adaptado de National Weather Service – National and Oceanic Atmospheric Administration, 2014). 18
- Figura 4.10** – Ilustração de uma bússola, indicando a relação entre o NV (norte verdadeiro) e o NM (norte magnético), com DM (declinação magnética) positiva e negativa. 19
- Figura 4.11** – Alinhamento da pista do Aeroporto de Petrolina em relação: (a) ao NV (norte verdadeiro); (b) ao NM (norte magnético); (c) aos eixos em um plano de coordenadas cartesianas. 20
- Figura 5.1** – Normais climatológicas da: (a) precipitação (mm); (b) temperatura média do ar (°C); (c) pressão atmosférica (hPa); (d) velocidade média do vento (V_m) e suas componentes zonal (u) e meridional (v) (nós). Fonte: INMET, 2009. 33
- Figura 5.2** – Valores médios em superfície para 1967-1975 (laranja) e 2003-2014 (azul) da: (a) velocidade do vetor-vento (nós); (b) velocidade escalar (nós); (c) persistência do vento (%); (d) direção predominante do vento (graus). Fonte: Centro Técnico Aeroespacial (1994); REDEMET. 35
- Figura 5.3** – Frequência relativa média mensal dos ventos em superfície atuantes na área do aeroporto de Petrolina-PE, para os períodos 1967-1975 (verde) e 2003-2014 (azul): (a) ao longo da pista (PST13); (b) contrário a direção predominante (PST31); (c) ventos calmos; (d) ventos de través. Fonte: Centro Técnico Aeroespacial (1994); REDEMET. 37
- Figura 5.4** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014. 41
- Figura 5.5** – Frequência de ventos de través dos quadrantes nordeste (TRV_NE) e sudoeste (TRV_SW) entre 2003 e 2014. 42
- Figura 5.6** – (a) Estrutura vertical da razão de mistura (g/kg) para abril de 2012; (b) Temperatura média do topo das nuvens para o período de 26 a 30/04/2012. 43

- Figura 5.7** – (a) Configuração do VCAN registrado em 29/04/2012; (b) Imagem do GOES-13 no canal do infravermelho realçado 29/04/2012 às 06h UTC. 44
- Figura 5.8** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014. 45
- Figura 5.9** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014. 45
- Figura 5.10** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014. 49
- Figura 5.11** – Número de ocorrências de TRV_NE para o mês de abril de 2012. 49
- Figura 5.12** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014. 50
- Figura 5.13** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014. 51
- Figura 5.14** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014. 52
- Figura 5.15** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014. 53
- Figura 5.16** – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014. 53

Figura 5.17 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do quarto fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014. 54

II – LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Estrutura dos dados para uma amostra pareada.	31
Tabela 5.1 – Autovalores e porcentagens de variância acumulada.	40
Tabela 5.2 – Número de dias de VCAN, ventos de través e total mensal de precipitação registrado no mês de abril, no período de 2003 a 2014.	47
Tabela 5.3 – Frequência de ventos significativos por quadrantes e suas velocidades médias associadas. Em que: NE, SE, SO e NO representam os quadrantes Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste, respectivamente.	48

III – LISTA DE QUADROS

- Quadro 5.1** – Resultados estatísticos da velocidade do vento em superfície, persistência e direção predominante no Aeroporto de Petrolina (teste t de Student). Em que: (+) aumento significativo. 36
- Quadro 5.2** – Resultados estatísticos do vento em superfície no Aeroporto de Petrolina (teste t de Student). Em que: (+) aumento significativo; (-) redução significativa; (>) aumento não significativo; (<) redução não significativa. 39
- Quadro 5.3** – Resultados estatísticos da ocorrência de TRV_NE no Aeroporto de Petrolina em abril de 2012 (teste t de Student). Em que: (>) indica aumento significativo. 50

IV – LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Análise de Agrupamento

ACP – Análise em Componentes Principais

ANA – Agência Nacional de Águas

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

CB – Cumulonimbus

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CTA – Centro Técnico Aeroespacial

DM – Declinação Magnética

DOL – Distúrbio Ondulatório de Leste

DPV – Déficit de Pressão de Vapor

DSA – Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais

IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

KMO – Kaiser-Meyer-Olkin

LI – Linhas de Instabilidade

MAS – Measure of Sampling Adequacy

N – Norte

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NCEP – National Centers for Environmental Predictions

NE – Nordeste

NEB – Nordeste do Brasil

NM – Norte Magnético

NO – Noroeste

NV – Norte Verdadeiro

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

SAR – Sistema de Acompanhamento de Reservatórios

SD – Sem Dados

SE – Sudeste

SF – Sistemas Frontais

SW – Sudoeste

UTC – Universal Time Cordinated

VCAN – Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

IV – LISTA DE SÍMBOLOS

- u – componente zonal do vento
- v – componente meridional do vento
- % - porcentagem
- ° - grau
- °S – grau Sul
- °W – grau Oeste
- km² - quilômetro quadrado
- mm – milímetro
- °C – grau Célsius
- m – metro
- < - menor
- ≥ - maior igual
- hPa – hecto Pascal
- V – intensidade do vento
- Θ - direção do vento
- $\bar{\vec{V}}$ – vento vetorial médio
- \bar{V} – velocidade escalar média do vento
- P – persistência
- Θ_p – direção predominante
- σ² - variância da população
- S² - variância amostral

1 – INTRODUÇÃO

Intervenções no ciclo hidrológico, decorrentes de atividades agrícolas (áreas de pastagem e cultivo), construção de represas e urbanização, podem causar uma série de alterações microclimáticas. Os efeitos são particularmente intensos em regiões de terrenos acidentados (irregulares) e as mudanças são mais evidentes na temperatura do ar, vento e umidade atmosférica (BARBIERI et al., 2013; CORREIA et al., 2013; MELO et al., 2013).

Áreas de clima semiárido, situadas no Nordeste do Brasil (NEB), têm como características marcantes a irregularidade do regime pluviométrico, temperaturas elevadas na maior parte do ano e a grande incidência de radiação solar. No entanto, alterações nas características naturais dessas áreas podem causar variações no padrão de comportamento de variáveis atmosféricas, como temperatura e umidade, contribuindo com mudanças no clima regional e, na medida do possível, essas áreas devem ser monitoradas de forma contínua. Esse tipo de informação é importante no gerenciamento dos recursos naturais, além de auxiliar na gestão de empreendimentos agrícolas e no planejamento de projetos ambientais elaborados com vistas no desenvolvimento sustentável, tais como, na geração e distribuição de energia elétrica, construção de portos e aeroportos e instalação de empresas na região (BARBIERI et al., 2013).

O Aeroporto de Petrolina, foco desse estudo, tornou-se importante devido ao polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro, que se desenvolveu com a construção da represa de Sobradinho, na década de 1970. As mudanças na cobertura e uso do solo, decorrentes da implantação de Sobradinho, alterou o clima local, principalmente em relação à umidade, à temperatura do ar e ao vento.

Em áreas próximas a aeroportos, o vento é uma das variáveis mais importantes a serem monitoradas, devido à sua influência nas operações de pouso e decolagem de aeronaves. O padrão de comportamento dessa variável em um local, considerando sua intensidade e direção, pode variar em função do desenvolvimento e persistência de circulações induzidas termicamente e que se manifestam na forma de brisas do tipo vale/montanha, lacustres, fluviais ou mesmo do tipo não convencional, quando associadas com descontinuidades na cobertura do solo. Contudo, o grau de variabilidade depende não apenas de processos associados com interação biosfera-atmosfera, incluindo aquecimento radiativo, evapotranspiração e fluxos de água e energia, em escala local, mas, em muitos casos, pela atuação conjunta de mecanismos de transporte de massa e energia em grande escala.

É importante conhecer antecipadamente sobre o desenvolvimento, propagação e possível atuação de circulações do tipo brisa (lacustre, vale-montanha), especialmente em áreas de aeroportos, porque o meteorologista pode preparar o terminal de previsão, incorporando a mudança no vento, permitindo, com isso, alertar os operadores das torres de controle para possíveis arremetidas em situações críticas ou para que eles possam fazer os ajustes necessários para pousos e decolagens.

As análises apresentadas neste trabalho têm como propósito caracterizar o regime de vento em superfície na região do Aeroporto Internacional de Petrolina (Senador Nilo Coelho) e identificar mecanismos dinâmicos e/ou termodinâmicos associados a condições meteorológicas adversas cruciais em operações de pousos e decolagens. Enfoque especial foi dado às ocorrências de ventos cruzados, também denominados de ventos de través (perpendiculares à pista de pouso).

2 – OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar o regime de vento na área do Aeroporto de Petrolina-PE, com ênfase nos casos de ventos de través (perpendicular à pista de pousos e decolagens) e avaliar a influência de sistemas atmosféricos transientes na mudança do padrão da intensidade e direção desses ventos. Para isso, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar mecanismos dinâmicos e/ou termodinâmicos relacionados com condições meteorológicas adversas cruciais em operações de pouso e decolagem;
- Identificar épocas do ano de maior ocorrência de ventos de través;
- Identificar padrões atmosféricos associados com variabilidade no regime de vento na localidade de Petrolina, utilizando a técnica de Análise em Componentes Principais – ACP.

3 – REVISÃO DA LITERATURA

Estudos de impacto ambiental, incluindo análises do tipo causa-efeito entre mudanças locais e variabilidade climática têm se tornado cada vez mais frequentes. A constatação da influência de pressões antrópicas no clima regional tem cobrado não apenas dos órgãos gestores, mas também da comunidade científica, a elaboração e execução de programas de desenvolvimento com sustentabilidade que possibilitem medidas efetivas com garantias de monitoramento contínuo, principalmente em áreas consideradas vulneráveis do ponto de vista hidrológico. O grau de vulnerabilidade é sempre mais elevado em áreas de climas árido e semiárido, em função da irregularidade espacial e temporal das chuvas. São regiões periodicamente atingidas por grandes estiagens ou episódios de chuvas intensas com registro de inundações.

Em estudos sobre impactos ambientais é imprescindível o conhecimento do padrão de comportamento de variáveis climáticas, como a temperatura (média, máxima e mínima), precipitação, número de horas de brilho solar, radiação solar incidente, velocidade e direção do vento, entre outras. Entre os elementos meteorológicos que afetam mais diretamente as atividades humanas, o vento se destaca entre os menos estudados, apesar de sua importância, provavelmente em função da carência de observações precisas (medições em alta resolução temporal e espacial).

O vento é uma importante variável climática, fundamental para as atividades humanas, como a agricultura, geração de energia, controle de qualidade do ar, construção civil, transportes marítimos e aéreos e possíveis alterações em seu comportamento precisam ser compreendidas, principalmente sob o aspecto das mudanças climáticas. Desta forma, em seguida é feita uma revisão bibliográfica de estudos sobre a variabilidade do vento.

Em um estudo sobre a climatologia do vento e temperatura para a aviação e as condições operacionais nos aeroportos brasileiros, o Centro Técnico Aeroespacial – CTA, pertencente ao Ministério da Aeronáutica, observou que o Aeroporto de Petrolina-PE apresenta condições meteorológicas favoráveis em relação à visibilidade, superior a 80%. Porém, a respeito do vento em superfície, são observadas variações significativas em seu comportamento, quando comparados os meses úmidos e secos, no período de 1967 a 1975 ([CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL, 1994](#)).

[Silva Aragão et al. \(1997\)](#) estudaram a relação existente entre o vento à superfície e a chuva em anos com características distintas na região do Submédio São Francisco e concluíram

que meses com precipitação abaixo da média climatológica sofrem forte influência de ventos associados à Alta Subtropical do Atlântico Sul – ASAS e que meses com precipitação acima da média apresentam ventos com outras direções, relacionados com a atuação de outros sistemas atmosféricos de grande escala, como a Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis – VCAN e Sistemas Frontais – SF provenientes da região de latitudes médias do hemisfério sul.

[Klink \(1999\)](#) analisou dados médios de vento dos Estados Unidos, entre os anos de 1961 e 1990, com objetivo de acrescentar informações à climatologia de superfície do país. A autora aponta que a topografia influencia fortemente no comportamento do vento e mostra que a maior variabilidade na direção do vento ocorre nas estações de transição da primavera e outono.

[Diniz et al. \(2004\)](#) investigaram condições de tempo significativas no Aeroporto de Petrolina-PE e a sua relação com a atividade convectiva intensa no mês de abril de 1985, constatando que variações significativas na intensidade e na direção do vento com a altura apresentavam uma associação direta com camadas de inversões térmicas de subsidência. As autoras também destacaram que o período chuvoso da região (novembro a abril) é caracterizado por grande incidência de ventos calmos e que há uma relação entre a grande variabilidade na direção e intensidade do vento e a atuação de sistemas atmosféricos produtores de chuva na região.

[Silva Aragão et al. \(2007\)](#), em uma análise da estrutura atmosférica para um dia chuvoso em janeiro de 1985 na região de Petrolina-PE, no semiárido do Nordeste brasileiro, mês caracterizado por um total pluviométrico bem acima da normal climatológica naquele ano. As autoras utilizaram dados de um radar meteorológico banda-C, dados de superfície e de ar superior, além de imagens de satélite Meteosat para as análises e observaram que as chuvas relacionadas com a atuação de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) foram interrompidas quando o vento à superfície estava apresentando uma intensidade forte e vindo do quadrante Sudeste, o que está relacionado com o domínio da ASAS sobre a região.

[Santos et al. \(2012\)](#) investigaram um evento extremo de precipitação na cidade de Salvador-BA no dia 12 de junho de 2006, associado à atuação de um Distúrbio Ondulatório de Leste (DOL). Para isso, foram analisados dados observacionais de superfície e altitude, imagens de satélite meteorológico e dados em pontos de grade. Os autores observaram, a partir das médias diárias das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento que, em grande parte do mês, o vento é fraco, aumentando um pouco sua intensidade nos dias que antecedem o evento

e que, nesses dias, a direção do vento é de Sul-Sudeste. No dia 12, o vento muda de direção, passando ao quadrante Sudoeste.

[Melo et al. \(2013\)](#) investigaram os regimes de vento à superfície na região de Petrolina-PE. As análises, concentradas na variação horária e sazonal, permitiram verificar que as velocidades médias horárias aumentam no trimestre abril-maio-junho, época de intensificação da ASAS e diminuem no trimestre outubro-novembro-dezembro devido ao seu enfraquecimento. Além disso, verificaram que as circulações locais são fracas entre os meses de janeiro a maio, possivelmente relacionado com o maior teor de umidade do solo e, por consequência, com o enfraquecimento dos gradientes de fluxos de calor sensível, porém, nos meses mais secos, essas circulações são comparativamente mais fortes.

Também é de interesse de alguns autores investigar a existência de padrões através de técnicas de análise multivariada, como a ACP e Análise de Agrupamento (AA), que têm sido aplicadas para relacionar elementos meteorológicos, possibilitando identificar áreas homogêneas e padrões de variabilidade temporal e espacial, auxiliando na identificação e compreensão de mecanismos físicos relacionados com várias escalas de tempo e espaço.

Através das técnicas da análise multivariada, ACP e AA, [Correia \(2000\)](#) investigou o comportamento das componentes zonal e meridional do vento à superfície na Região Nordeste do Brasil. O autor observou que os primeiros fatores representaram o sinal da grande escala e foram associados à atuação de sistemas com características distintas. No entanto, foi verificado um sinal de interação entre a grande escala e as circulações locais nos componentes que apresentavam menor porcentagem da variância, o que permitiu identificar padrões temporais que foram associados principalmente à ASAS e às características do terreno.

[Barreto \(2001\)](#) utilizou as técnicas da ACP e AA para identificar regiões com características similares e investigar o ciclo diário do vento à superfície, entre os anos de 1979 e 1981, para 77 estações do Nordeste do Brasil e verificou que 89,9% da variabilidade total dos dados foi explicada pelos quatro primeiros fatores. A pesquisa mostrou que a escala de tempo diária está fortemente ligada a processos de circulação de mesoescala e que todas as circulações locais interagem com o escoamento da grande escala.

[Jiménez et al. \(2008\)](#) utilizaram ACP e AA para caracterizar a variabilidade do vento em uma área da Espanha com terreno acidentado e detectaram padrões nas componentes zonal (u) e meridional (v) do vento relacionados com as características do terreno da região.

[Oliveira Silva \(2011\)](#) utilizou técnicas de análise multivariada (AA e ACP) para estudar as características do vento na região costeira do NEB associadas à atuação de sistemas de grande escala e identificou regiões homogêneas e padrões sazonais do vento à superfície, além de verificar meses com características distintas. Em um estudo similar, [Oliveira Silva et al. \(2011\)](#) destacaram regiões homogêneas de vento que apresentavam velocidades máximas e mínimas, além de uma região com um padrão de direção do vento distinto dos demais. Todas as regiões identificadas foram associadas à atuação de sistemas meteorológicos na área.

[Barbosa Silva \(2014\)](#) estudou a variabilidade do vento na região metropolitana de Salvador–BA em meses com eventos de rajadas. A utilização de técnicas multivariadas, através da ACP, permitiu avaliar a contribuição das escalas sinótica e local em eventos intensos, registrados nos meses de maio de 2007 e 2009.

[Barbosa Silva et al. \(2013\)](#) utilizaram dados horários do vento à superfície observados no Aeroporto Internacional de Petrolina no mês de janeiro, entre os anos de 2003 e 2010 para verificar a variabilidade do vento nesse mês. As autoras constataram a predominância de ventos das direções do quadrante Sudeste (SE) da rosa dos ventos e velocidades relativamente elevadas nos ventos oriundos das direções menos frequentes. Os anos de 2003 e 2004 apresentaram grande variabilidade na direção do vento no mês de janeiro e uma baixa frequência de ventos do quadrante Sudeste, relacionada com o enfraquecimento da ASAS, que possibilitou a atuação de sistemas atmosféricos precipitantes, levando a totais pluviométricos mensais acima da média climatológica nesses dois meses.

A revisão apresentada mostra a importância de se estudar o vento e suas variabilidades em intensidade e direção no espaço e no tempo e que a análise multivariada é válida para a análise desses estudos. Especialmente em áreas próximas a aeroportos, torna-se imprescindível esse tipo de estudo, considerando a influência do vento em estágios cruciais do voo.

4 – MATERIAL E MÉTODOS

4.1 – ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 – MUNICÍPIO DE PETROLINA

Petrolina está situada no Submédio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – BHSF (Figura 4.1), em uma área reconhecida como uma das regiões mais prósperas do país, em função do polo agroindustrial Petrolina-Juazeiro, diferenciado pela produção de frutas (manga, mamão, limão, uva e figo) para exportação, através de técnicas avançadas de irrigação. A economia local destaca-se pelo volume anual considerável de negócios, tanto para abastecer o mercado interno brasileiro, como também exportando para países da Europa e América do Norte, gerando, assim, muitos empregos diretos e indiretos na região ([EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2010](#)).

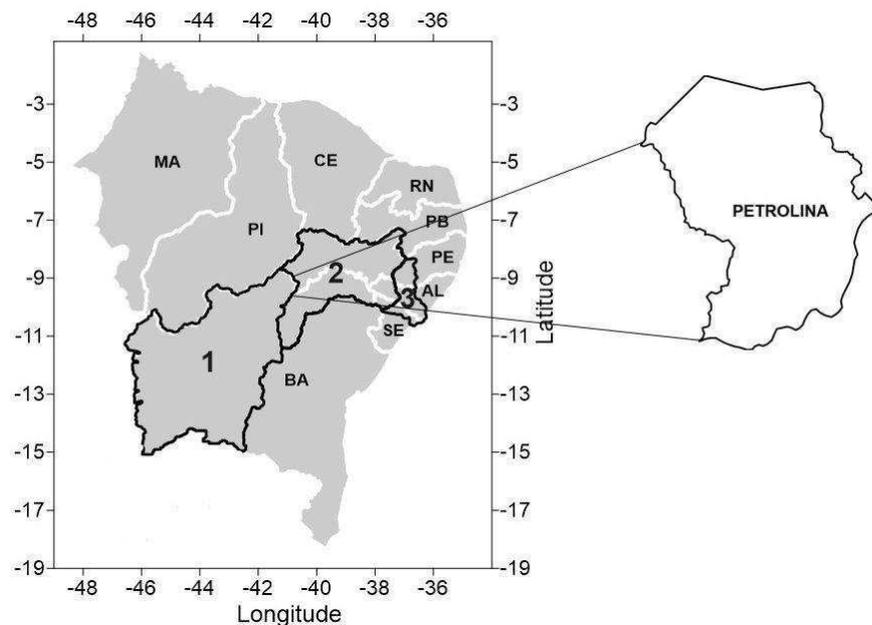


Figura 4.1 – Divisão política do Nordeste, destacando a localização do município de Petrolina no Estado de Pernambuco e a delimitação, em negrito, da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco na Região. Em que: 1 é a parte do Médio da BHSF na Região Nordeste; 2 e 3 são o Submédio e Baixo São Francisco, respectivamente.

A importância do polo Petrolina-Juazeiro é consequência da construção da represa de Sobradinho, na década de 1970. Com as mudanças ambientais, decorrentes da implantação de vários perímetros de irrigação no entorno da usina hidrelétrica de Sobradinho, foram observadas, já na década seguinte, alterações significativas no clima regional. Antes da

construção da represa, a economia da região era vinculada à agricultura de sequeiro, comumente observada em regiões onde a precipitação é escassa (CORREIA, 2001).

O clima na região é do tipo tropical semiárido, com temperaturas médias anuais variando de 23 a 27 °C. O relevo é pouco ondulado, com altitudes entre 200 e 800 m e tem como vegetação nativa a caatinga, cuja característica principal é a perda de folhas no período seco, como um mecanismo de defesa contra a limitação hídrica (CORREIA, 2001; DINIZ, 2007).

O período chuvoso compreende os meses de novembro a abril, com precipitação anual entre 350 e 800 mm. Grande parte da variabilidade na pluviometria está associada, principalmente, à atuação de sistemas meteorológicos de escala sinótica, como a ZCIT e o VCAN. Além destes, pode haver a influência de SF que, por ventura, cheguem a atingir latitudes mais baixas (MELLO et al., 1996; BARBOSA e CORREIA, 2005). Já no período seco, a atuação da ASAS contribui como inibidor para o desenvolvimento de nuvens e, conseqüentemente, de sistemas precipitantes, por ser o principal responsável por movimentos de subsidência, implicando na grande incidência de inversões térmicas na região (GANDU e SILVA DIAS, 1998; SILVA ARAGÃO et al., 2000; CORREIA et al., 2006a).

Particularmente, o VCAN destaca-se entre os principais sistemas meteorológicos atuantes no NEB por ser capaz de causar, simultaneamente, aumento e redução de chuvas em regiões específicas, dependendo da sua posição geográfica em relação ao centro do sistema (SILVA, 2005). A circulação responsável pela manutenção do VCAN apresenta uma configuração denominada de circulação térmica direta. Essa denominação se justifica em decorrência do resfriamento observado no centro do VCAN, causando movimentos descendentes, que contribuem para a redução na temperatura (resfriamento radiativo) e na umidade (secagem atmosférica). Mecanismo inverso é observado na periferia do sistema, resultante do aquecimento convectivo (KAUSKY e GAN, 1981). Esse padrão de circulação está associado com redução na formação de nuvens e precipitação em áreas sob a influência do centro do VCAN e aumento da atividade convectiva e precipitação intensa na periferia do sistema. Um esquema ilustrando a estrutura vertical do VCAN proposto por Kausky e Gan (1981) é apresentado na Figura 4.2. Mishra et al. (2001) sugerem que a instabilidade barotrópica do escoamento (cisalhamento meridional) pode ser um possível mecanismo de formação do VCAN.

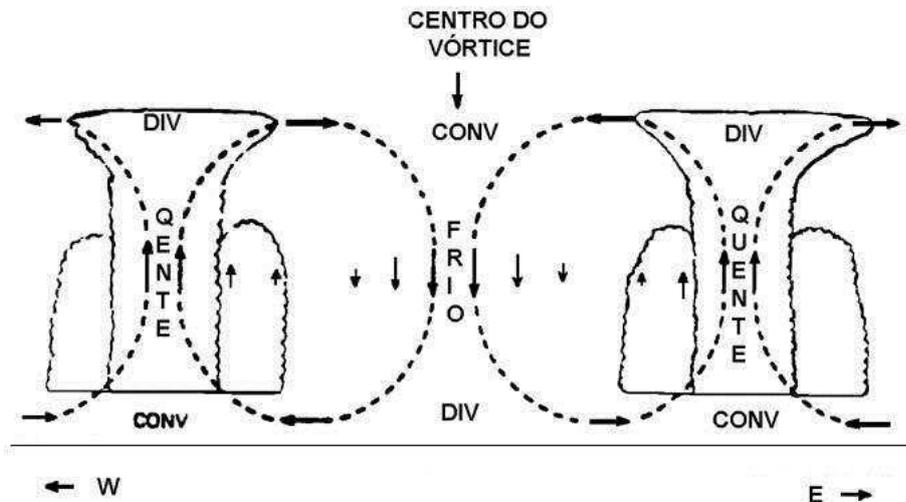


Figura 4.2 – Esquema de um corte vertical do Vórtice Ciclônico no Atlântico Sul. As setas verticais representam o sentido do movimento vertical. As abreviações DIV e CONV indicam divergência e convergência, respectivamente. Fonte: adaptado de [Kousky e Gan, \(1981\)](#).

Em um estudo climatológico, [Ramirez \(1996\)](#) analisou a estrutura vertical dos VCAN e sua relação com o ENSO (El Niño-Oscilação Sul). A autora observou que nos anos de El Niño forte (1982/1983 e 1996/1997) os VCAN apresentaram maior extensão vertical da circulação fechada, atingindo o nível de 500 hPa e que nos verões dos anos sob a atuação de La Niña (1984/1985 e 1988/1989), os VCAN ficaram confinados nos níveis mais altos, se aprofundando apenas até 300 hPa.

4.1.2 – O AEROPORTO DE PETROLINA

Com 3.250 m de comprimento e 45 m de largura, a pista do Aeroporto Internacional de Petrolina – Senador Nilo Coelho (09°22’S; 40°34’W; 377m) (Figura 4.3) é uma das mais extensas pistas de pousos e decolagens da Região Nordeste. A disponibilidade dessa estrutura possibilita a operação de aeronaves cargueiras de grande porte, atualmente com três voos semanais que atendem à demanda da região do Vale do São Francisco, que vem se consolidando como uma das mais importantes produtoras de frutas do país.

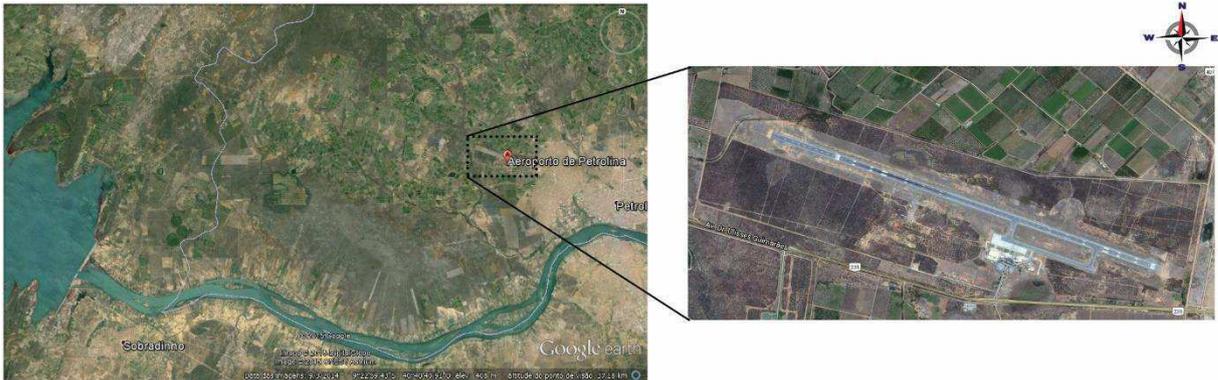


Figura 4.3 – Localização geográfica do Aeroporto de Petrolina-PE, com destaque para a pista de pousos e decolagens e a vegetação nas proximidades. Fonte: [Google Maps, 2015](#).

Aspectos relevantes são visíveis em dois setores distintos da área ilustrada na Figura 4.3. No extremo Sudoeste encontra-se o reservatório de Sobradinho, caracterizado por uma extensa área alagada inserida em uma região com vegetação esparsa, típica do bioma caatinga. Já no extremo Nordeste (detalhe da pista de pouso), é possível observar a existência de desigualdades marcantes na cobertura do solo, resultante da junção de áreas agrícolas (irrigação), vegetação natural e solo descoberto. Descontinuidades na cobertura e uso da terra são responsáveis por mudanças nos processos de troca de energia e água entre a superfície e a atmosfera e, conseqüentemente, no padrão de vento local.

O Aeroporto de Petrolina está localizado em uma posição privilegiada, por ser equidistante das sedes de regiões metropolitanas como Recife, Teresina, Fortaleza e Salvador, proporcionando uma função articuladora entre essas metrópoles. No ano de 2014, o terminal de logística de carga (Teca) do aeroporto registrou uma movimentação recorde de 4.879 toneladas (Figura 4.4), destacando o setor de exportação (manga, mamão, uva e figo) que, sozinho, contabilizou 4.800 toneladas, o que representa um aumento de 45,8% em relação ao ano anterior. No mesmo ano, foi registrada a importação de 78,5 toneladas de alho ([INFRAERO CARGO, 2015](#)). Além do recorde na movimentação de carga, o aeroporto também registrou, no mesmo ano, um recorde na movimentação de passageiros, com 499.116 embarques e desembarques, representando um aumento de 5,4% em relação a 2013. Nesse contexto, o Aeroporto de Petrolina vem se firmando como um dos principais do Nordeste, desempenhando um importante papel para o fortalecimento da economia local ([INFRAERO, 2015](#)).

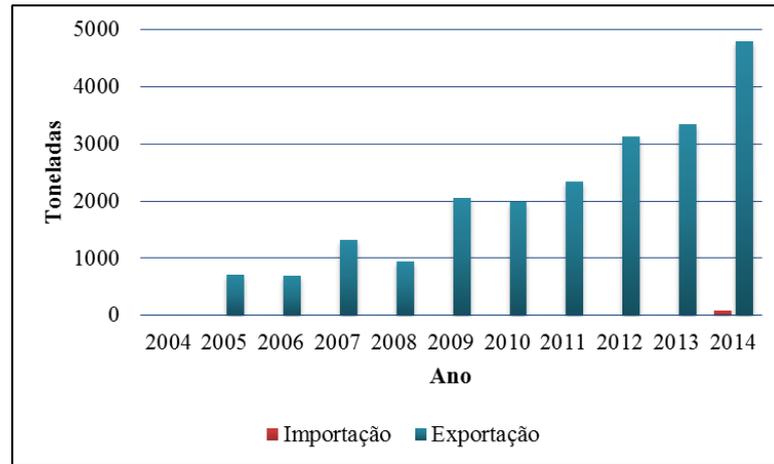


Figura 4.4 – Registro da movimentação de cargas no aeroporto de Petrolina-PE, entre 2004 e 2014. Fonte de dados: [INFRAERO CARGO, 2015](#).

4.2 – DADOS

Foram utilizados neste trabalho dados oriundos de diferentes fontes:

- Mensagens METAR/SPECI codificadas na estação do Aeroporto de Petrolina (09°22’S; 40°34’W; 377m), cujo número sinótico é 82984 e indicador SBPL, referente ao período de 2003 a 2014, disponibilizadas na página da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica – REDEMET (<http://www.redemet.aer.mil.br/>);
- Dados de vento em superfície no Aeroporto de Petrolina, entre os anos de 1967 e 1975, obtidos pela Divisão de Ciências Atmosféricas do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial – IAE/CTA;
- Dados da estação de superfície de Petrolina (09°22’S; 40°28’W; 370m), com número sinótico 82983, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, disponibilizados na página do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP (<http://www.inmet.gov.br/>);
- Imagens do Satélite GOES-12, disponíveis na página da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC (<http://satelite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp>);
- Dados de cota, volume e defluência do reservatório de Sobradinho, observadas entre 2003 e 2014, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas – ANA, a partir do portal do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios – SAR (<http://sar.ana.gov.br/Home>);
- Dados de reanálise com resolução horizontal de 2,5° de latitude e longitude dos National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research –

NCEP/NCAR. Foram usados os dados da componente zonal (u) e meridional (v) do vento no nível isobárico de 200 hPa.

4.3 – METODOLOGIA

Foram feitas análises dos padrões climáticos, em superfície, de ocorrências de ventos no Aeroporto de Petrolina-PE, calculando médias climáticas, para cada mês, do vetor-vento (vento vetorial), velocidade escalar do vento em superfície e persistência para o período de 2003 a 2014, usando a metodologia que o [Centro Técnico Aeroespacial \(1994\)](#) aplicou a dados coletados no período entre 1967 e 1975 nesse aeroporto. Os resultados encontrados foram comparados e testados estatisticamente, a fim de verificar alterações significativas.

Em seguida, foi aplicada a ACP para buscar a relação da ocorrência de ventos de través na área do aeroporto com a variabilidade de variáveis meteorológicas e hidrológicas como temperatura, umidade, vento, cota e volume do reservatório de Sobradinho.

4.3.1 – PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados utilizados para o estudo do vento em superfície foram extraídos das mensagens METAR/SPECI, disponibilizadas pela REDEMET. As mensagens foram decodificadas e separadas em grupos: data e hora da observação; direção e intensidade do vento à superfície; visibilidade; tempo presente; nebulosidade e presença de torres de Cumulus e Cumulonimbus; temperatura do ar; temperatura do ponto de orvalho e pressão atmosférica. No processo de tratamento/processamento das informações contidas no METAR, foram eliminadas da análise as mensagens com informações duvidosas e/ou ausentes, sempre que não foi possível corrigi-las. Posteriormente, os dados foram organizados em planilhas.

O conjunto total de dados disponíveis para análise compreende o período de 2003 a 2014, uma vez que, no portal da REDEMET não estão disponibilizados registros anteriores a 2003. Do total de 144 meses, 2 deles (novembro e dezembro de 2004), equivalente a aproximadamente 1% dos registros não tinham dados disponíveis (período referenciado como SD - sem dados). Uma pequena parte do período tem menos que 70% de informações válidas (6% do total). O percentual de dados válidos, separados por grupos, é apresentado na Figura 4.5.

O total de informações válidas é considerado como o número máximo de informações possíveis para cada mês. Como as mensagens METAR são horárias, em meses de 31 dias, o número máximo de mensagens possíveis é de 744 (considerando a ausência de mensagens do

tipo SPECI); para os meses com 30 dias, 720; nos meses de fevereiro em anos bissextos, 696. Nos meses de fevereiro normais, com 28 dias, o número máximo de mensagens é 672.

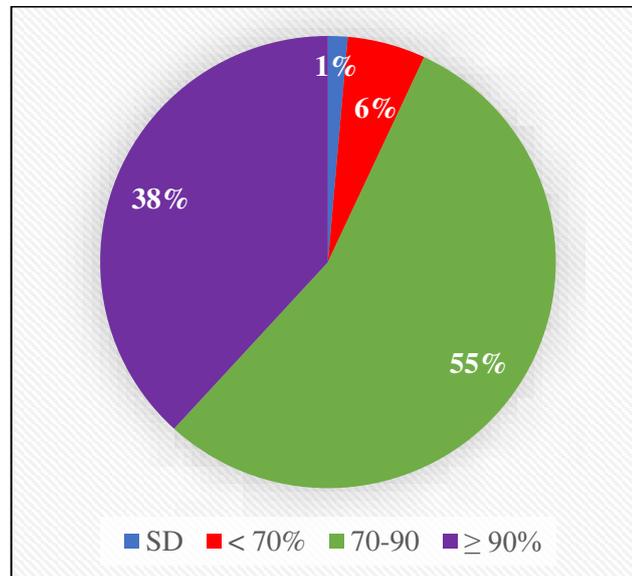


Figura 4.5 – Distribuição de frequência dos meses que: sem dados (SD) disponíveis (azul); menos de 70% de informações válidas (vermelho); entre 70 e 90% de informações válidas (verde); acima de 90% de informações válidas (roxo).

4.3.2 – IMPACTOS DO VENTO NA AVIAÇÃO

O vento é uma das variáveis meteorológicas mais importantes na definição de condições atmosféricas significativas para a aviação. A ocorrência de ventos laterais (través), por exemplo, pode gerar turbulência atmosférica significativa em operações de aproximação das aeronaves e aumentar o risco de acidentes. Dependendo das características ambientais, incluindo aspectos da circulação local e de grande escala, as influências podem variar consideravelmente, nos vários estágios do voo (decolagem, rota e pouso). O esquema da Figura 4.6 mostra esses efeitos graficamente. Em nível de cruzeiro, nível de voo no qual a aeronave se mantém durante uma etapa considerável da rota, as variações no vento podem influenciar na velocidade e no consumo de combustível das mesmas. A quantidade de combustível necessária para um voo é calculada de acordo com a distância a ser percorrida. Na presença de vento calmo (<4,5 nós), o efeito nas aeronaves é praticamente nulo (neutro) durante o percurso, não sendo necessárias correções no curso do avião e o consumo de combustível é normal. Considera-se como condições favoráveis, quando o vento sopra de cauda (em direção à parte traseira da aeronave), o que faz com que sua velocidade aumente e o consumo de combustível seja reduzido. As condições são ditas desfavoráveis, quando o vento é de proa (sopra em direção à frente do avião). Nestas situações, em que o vento sopra no sentido oposto ao deslocamento do

avião, observa-se redução da velocidade da aeronave e aumento no consumo de combustível. Quando o vento sopra perpendicularmente ao sentido do percurso, o efeito é relativo, podendo ou não influenciar no deslocamento e consumo da aeronave, dependendo da intensidade desse vento. Nestas situações podem ocorrer pequenos ou grandes afastamentos laterais. O desvio sofrido pela aeronave devido à força do vento é chamado de deriva. Este desvio cria um ângulo entre a proa (direção para a qual o nariz da aeronave está apontado) e a rota (para onde a aeronave voou). Para fazer a correção, o piloto deve somar à sua rota, o mesmo ângulo formado entre a proa e a rota, só que em sentido oposto.

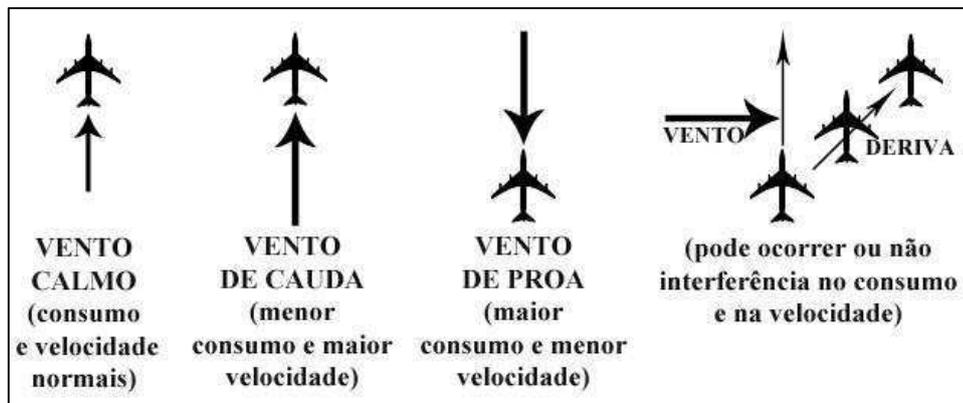


Figura 4.6 – Efeitos do vento calmo, vento de cauda e vento lateral na aeronave durante o voo.

Ocorrências de tempestades, nevoeiros e chuvas intensas, também afetam as atividades aéreas, pondo em risco os procedimentos de pouso e decolagem, muitas vezes devido à redução de visibilidade causada por esses fenômenos. Os aeroportos podem ficar inoperantes por longos períodos de tempo, até que as condições de visibilidade sejam normalizadas. No entanto, grande parte dos incidentes aéreos relacionados a condições meteorológicas está vinculada a situações de turbulência e/ou variações bruscas na velocidade e direção do vento, tanto em superfície, como em níveis mais altos (DINIZ et al., 2004).

Na região do Aeroporto de Petrolina, a variação na velocidade e direção do vento e distribuição espacial da precipitação associada com a formação e desenvolvimento de sistemas convectivos, geram e/ou intensificam correntes ascendentes e descendentes. Esses fenômenos representam condições de tempo críticas em operações de pouso e decolagem. Em muitas situações variações significantes no padrão de vento local tem como origem efeitos decorrentes de ações antrópicas.

Estudos numéricos com o modelo Regional Atmospheric Modeling System – RAMS realizados com o propósito de avaliar o impacto do Lago de Sobradinho no clima regional

(CORREIA, 2001; CORREIA e SILVA DIAS, 2003; MELO, 2011) mostram que a variação da pressão atmosférica resultante da diferença de temperatura entre o ar acima da água e regiões vizinhas mudou o padrão de vento local pela geração da brisa lacustre (BL). A direção e intensidade do escoamento associado à BL são influenciadas pela topografia, configuração das margens do lago e características termodinâmicas da atmosfera. O grau de influência da BL na área do aeroporto varia com o teor de umidade da atmosfera. Uma ilustração desse efeito na circulação local no entorno do Lago de Sobradinho é apresentada na Figura 4.7.

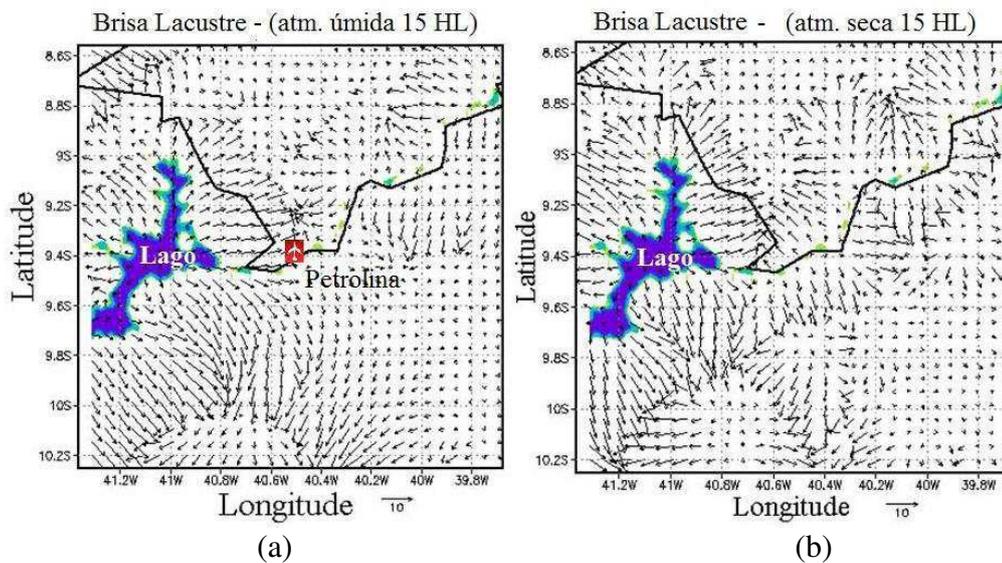


Figura 4.7 – Campo de vento (m/s) da brisa lacustre na área do lago de Sobradinho. (a) simulação com atmosfera úmida (abril de 1985); (b) simulação atmosfera seca. A escala do vento é vista abaixo de cada ilustração (setembro de 1999). Fonte: adaptado de [Correia \(2001\)](#).

Neste contexto, tendo em vista a existência de várias categorias de variação do vento que podem impactar as operações aéreas, procurou-se abordar preferencialmente casos mais frequentemente registrados na área foco do estudo.

Procedimentos de pousos e decolagens devem ser realizados, preferencialmente, com vento de proa, porém, há situações em que o vento predominante encontra-se transversal ao eixo da pista, denominado comumente de vento de través, podendo provocar o desvio da trajetória da aeronave, fazendo com que ela seja levada para fora da pista. A ilustração apresentada na Figura 4.8 mostra o efeito do vento de través durante o procedimento de pouso no Aeroporto de Petrolina. Esses efeitos podem ser evitados, na maioria das vezes, a partir de ajustes feitos pelo piloto. No caso de decolagens (não mostrado) os efeitos do vento sobre a

aeronave são os mesmos e, normalmente, espera-se a melhoria nas condições de tempo para que seja permitida a realização desse procedimento.

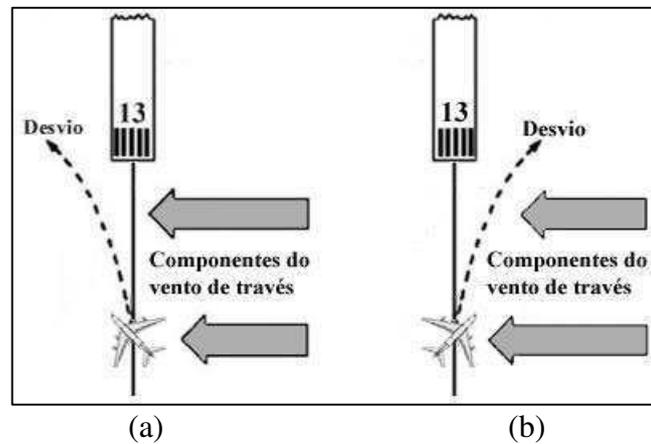


Figura 4.8 – Efeito do vento de través durante o pouso, sem a intervenção do piloto no Aeroporto de Petrolina. (a) devido ao aumento do vento de direita; (b) devido à diminuição do vento de direita. (Fonte: adaptado de [Fogaccia, 2001](#)).

Nos episódios em que observam-se formação e desenvolvimento de nuvens do tipo Cumulonimbus (CB), além da ocorrência de precipitação, normalmente intensa, verificam-se fortes correntes ascendentes e descendentes dentro e fora das nuvens. Nos casos em que as CB estão localizadas na área do aeroporto, as correntes descendentes podem dificultar o pouso e a decolagem, uma vez que essas correntes, ao atingir o solo, geram ventos fortes, chamados nesse caso de frente de rajada, em todas as direções, desestabilizando a aeronave. É importante frisar que fortes correntes verticais do ar também podem ocorrer em situações de céu claro ou com pouca chuva. A Figura 4.9 ilustra os efeitos desse fenômeno na aproximação de uma aeronave.

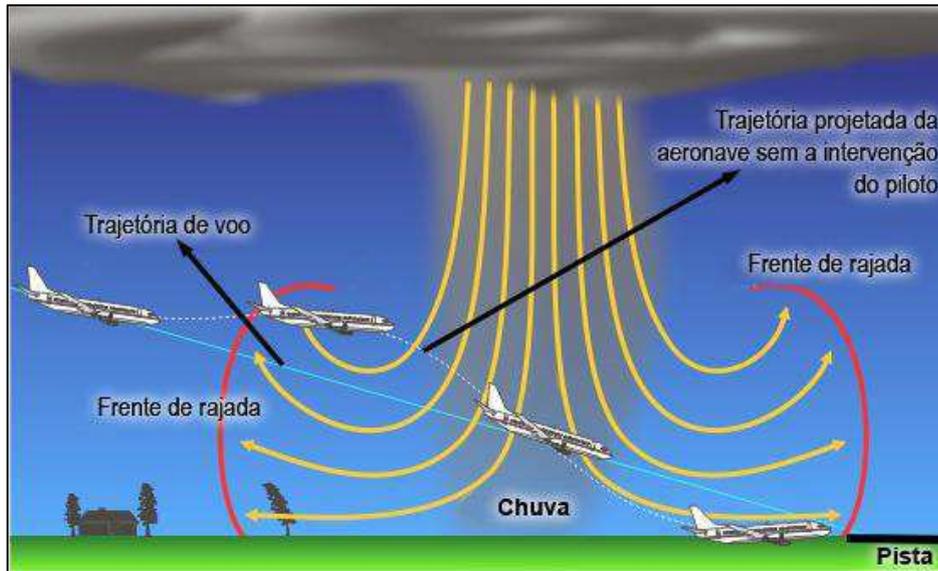


Figura 4.9 – Efeitos de correntes descendentes intensas e explosão divergente do ar próxima à superfície na aproximação final de uma aeronave. (Fonte: adaptado de [National Weather Service – National and Oceanic Atmospheric Administration, 2014](#)).

Além dos exemplos citados, a atuação de outros sistemas meteorológicos, na região do Aeroporto de Petrolina, pode influenciar nas variações de intensidade e direção do vento em superfície, sendo necessária atenção durante os procedimentos de pouso e decolagem.

Tendo em vista que a direção do vento em superfície, medida nas estações meteorológicas e também disponibilizada nas mensagens METAR, é determinada em relação ao norte verdadeiro (NV) (direção tomada à superfície terrestre que aponta para o polo norte geográfico) e que, em procedimentos de aproximação (pousos), os pilotos utilizam como referência o norte magnético (NM), torna-se essencial a realização de ajustes da orientação por meio de instrumentos.

Os ajustes em manobras de aproximação, também utilizados na identificação das cabeceiras das pistas, variam de acordo com a localização geográfica do aeródromo. A correção é feita adicionando algebricamente o valor da declinação magnética (DM) local (diferença, em graus, entre o NV e o NM, podendo ser positiva ou negativa) às direções apresentadas no código METAR, obtendo-se, assim, os valores correspondentes ao NM. Uma DM positiva (negativa), ou leste (oeste), significa que o NM está desviado do NV no sentido horário (anti-horário) (Figura 4.10).

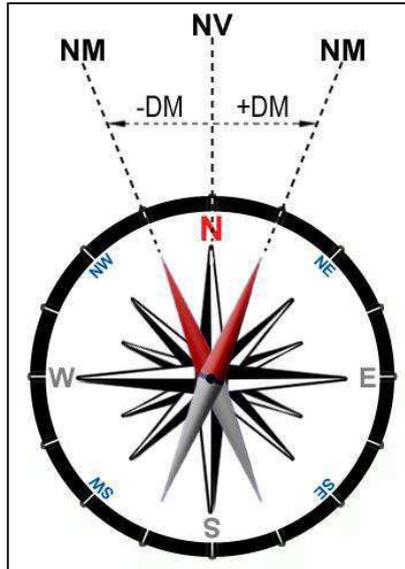


Figura 4.10 – Ilustração de uma bússola, indicando a relação entre o NV (norte verdadeiro) e o NM (norte magnético), com DM (declinação magnética) positiva e negativa.

No caso do Aeroporto de Petrolina, a DM é negativa e corresponde em média, a -22° . Desta forma, a pista, que está alinhada a 109°E (sentido do vento predominante local) em relação ao NV, ao somar 22° da DM, passa a ter 131°E em relação ao NM, valor utilizado para identificar o número das cabeceiras da pista (13 e 31), já que, por convenção, a numeração das pistas é composta apenas por dois dígitos. Dessa forma, a identificação é feita dispensando-se o último dígito. Além disso, deve-se considerar a direção para onde a aeronave segue, ou seja, uma das cabeceiras da pista será nomeada como 13 e, a oposta, somando-se 18 ($13+18$), 31.

Em seguida, o eixo da pista foi rotacionado, a fim de coincidir com o eixo das abscissas de um plano cartesiano, e os ventos foram decompostos em componentes ortogonais, zonal (u) e meridional (v) utilizando as Equações 4.1 e 4.2, respectivamente. Desta forma, obtêm-se as componentes que sopram ao longo de seu eixo, nos dois sentidos e as perpendiculares ao eixo (ventos de través). A equivalência entre o eixo da pista e o das abscissas foi feita, para Petrolina, que apresenta um ângulo de 131° em relação ao NM, subtraindo-se 41° ($131^\circ-90^\circ$) de cada direção. Essas etapas são apresentadas, esquematicamente, na Figura 4.11.

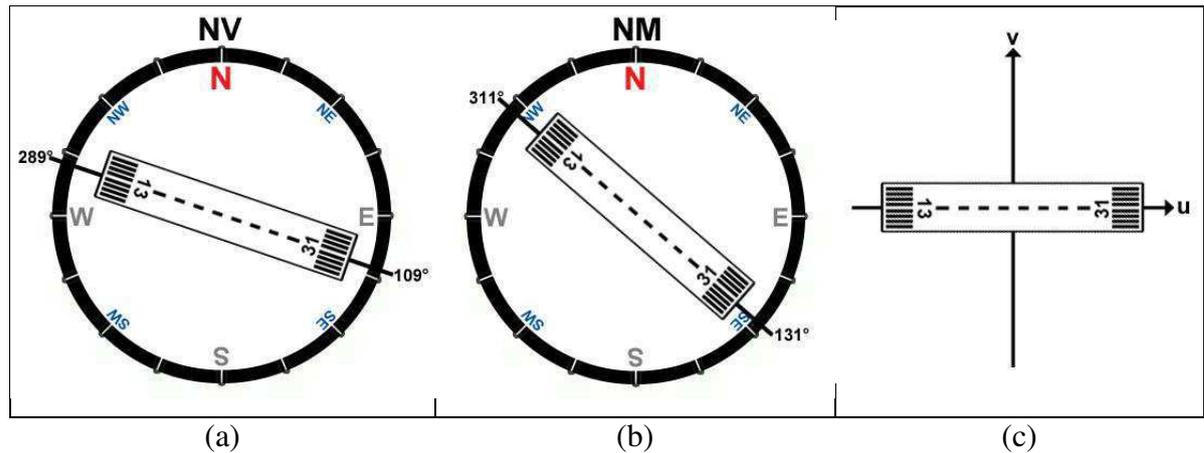


Figura 4.11 – Alinhamento da pista do Aeroporto de Petrolina em relação: (a) ao NV (norte verdadeiro); (b) ao NM (norte magnético); (c) aos eixos em um plano de coordenadas cartesianas.

4.3.3 – DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS E VARIÁVEIS CALCULADAS

Foram computadas as frequências absolutas e relativas do vento em superfície para cada mês, distinguindo as ocorrências em categorias de acordo com a intensidade, utilizando o mesmo critério de análise adotado por [Centro Técnico Aeroespacial \(1994\)](#), que considera ventos significativos para pousos e decolagens intensidades maiores ou iguais a 4,5 nós. Dessa forma, há calmaria quando as componentes (zonal e meridional) têm valores menores que 4,5 nós, ou seja, foram contabilizados como vento calmo apenas quando as duas componentes apresentaram valores abaixo de 4,5 nós, simultaneamente.

Também foram calculadas a velocidade, direção e persistência (predominância) do vento vetorial médio, assim como a velocidade escalar média para cada mês do ano. As equações correspondentes são mostradas a seguir:

Componentes Zonal (u) e Meridional (v) do vento

As componentes zonal e meridional (u e v) foram calculadas através de Equações 4.1 e 4.2, adaptadas para um círculo trigonométrico baseado na Rosa dos Ventos, onde 0°/360° coincide com o Norte (N) e a contagem dos ângulos é feita no sentido horário.

$$u = -V \sin \theta \quad (4.1)$$

$$v = -V \cos \theta \quad (4.2)$$

Em que:

V é a intensidade do vento;

θ é a direção do vento.

Vento Vetorial Médio ($\bar{\vec{V}}$)

O vento vetorial médio ($\bar{\vec{V}}$) é um vetor cuja direção apresenta a direção predominante dos ventos em um determinado local e sua intensidade foi calculada pela equação seguinte:

$$\bar{\vec{V}} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{v}_i}{n} \quad (4.3)$$

Em que:

\vec{v}_i é o i -ésimo vetor vento, ou seja, cada uma das ocorrências de vento registradas na estação meteorológica; ele é o vetor soma de cada par de componentes u e v ;

n é o número de observações realizadas do vento.

Quando o vento apresenta grande variação na direção, seu módulo terá uma baixa relação com a média das velocidades observadas, devido à subtração entre as componentes vetoriais opostas, diminuindo o módulo do vento vetorial médio. Portanto, pode haver uma interpretação errônea em relação à intensidade dos ventos em regiões onde estes variam muito de direção, já que os ventos vetoriais médios tendem a ser muito fracos, comparados com as velocidades observadas, que podem ser altas. Nessas situações, a direção predominante tem baixa probabilidade de ocorrer, tendo em vista a grande variação na direção do vento. Especificamente em Petrolina, esse problema não ocorre, pois a variabilidade na direção do vento na região é pequena.

Velocidade Escalar Média do Vento (\bar{V})

A velocidade escalar média do vento (\bar{V}) é a média das velocidades observadas, desconsiderando a direção associada, definida pela equação:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n |\vec{v}_i|}{n} \quad (4.4)$$

Em que:

$|\vec{V}_i|$ é o módulo do i-ésimo vetor-vento, obtido a partir do vetor soma de cada par de componentes, em módulo, u e v;

n é o número de observações registradas do vento.

Persistência (P)

A persistência do vento foi definida a partir dos conceitos de vento vetorial médio e velocidade escalar média. Essa variável possibilita ter uma ideia melhor dos ventos em uma região, em termos climatológicos. É obtida a partir da razão entre o módulo do vento vetorial médio e a velocidade escalar média, tendo seu valor expresso em porcentagem, segundo a equação seguinte:

$$P = \frac{|\vec{V}|}{\bar{V}} \times 100\% \quad (4.5)$$

Em que:

$|\vec{V}|$ é o módulo do vento vetorial médio;

\bar{V} é a velocidade escalar média.

Observa-se, portanto, a partir da Equação 4.5 que, em localidades onde há grande variação na direção do vento, ou seja, quando o módulo do vento vetorial médio é pequeno em relação ao valor da velocidade escalar média, o valor encontrado da persistência será baixo. De forma análoga, se há pouca variação na direção do vento de uma localidade, os valores encontrados para o módulo do vento vetorial médio e para a velocidade escalar média serão próximos, implicado em uma persistência próxima de 100%. Desta forma, a persistência pode ser interpretada como um índice do grau de predominância do vento médio em uma localidade.

Direção Predominante (Θ_p)

A direção predominante indica de onde vem a maior frequência de ventos em um determinado período analisado, e é encontrada a partir dos vetores resultantes de u e v, usando a equação seguinte:

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n u_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \right) + 180 \quad (4.6)$$

Em que:

u_i é a i -ésima componente zonal;

v_i é a i -ésima componente meridional.

PST13 e PST31

Definida a componente zonal (u), os valores negativos dessa componente ($-u$) representam os ventos vindos do quadrante Sudeste, que sopram em direção à cabeceira 13 da pista e é denominado de PST13, enquanto que os valores positivos ($+u$) representam os ventos vindos do quadrante Noroeste, que sopram em direção à cabeceira 31 da pista e é denominado de PST31.

Vento Calmo

Os ventos calmos são contabilizados quando os módulos das componentes zonal e meridional apresentam valores menores que 4,5 nós, simultaneamente.

Vento de Través

Os ventos de través, que cruzam a pista do aeroporto, podem vir do quadrante Nordeste ou do quadrante Sudoeste, e são identificados a partir da componente meridional (v). Quando os valores de v forem negativos ($-v$) e, em módulo, maiores que 4,5 nós, são considerados ventos vindos do quadrante Nordeste e são denominados como TRV_NE. Já quando os valores de v forem positivos ($+v$) e maiores que 4,5 nós, são considerados ventos vindos do quadrante Sudoeste e denominados como TRV_SW.

Altura da base das nuvens (h_{base})

A altura de uma nuvem ou de uma camada de nuvens, é a distância vertical medida entre o nível do terreno do local da medição e a base da nuvem ou da camada. De preferência, essa altura deve ser obtida através de instrumentos apropriados, porém, o observador também pode fazer uso de métodos indiretos.

Na ocorrência de nuvens de origem convectiva, a altura das nuvens pode ser obtida em função da temperatura e do ponto de orvalho. Como essas duas temperaturas estão presentes na mensagem METAR, utilizamos a Equação utilizada pelo [Instituto de Controle do Espaço Aéreo \(2008\)](#):

$$h_{base} = (T - Td) \times 125 \quad (4.7)$$

Em que:

T é a temperatura do ar;

Td é a temperatura do ponto de orvalho.

Déficit de pressão de vapor (DPV)

O déficit de pressão de vapor (DPV) é utilizado para representar a umidade atmosférica e calculado a partir da diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s) e a pressão de vapor (e), em hectopascal (hPa).

A pressão de vapor de saturação é obtida pela Equação 4.8:

$$e_s = 6,11 \times \exp\left(\frac{17,67 \times T}{T + 243,5}\right) \quad (4.8)$$

Em que:

T é a temperatura do ar em superfície.

A pressão de vapor é encontrada a partir da Equação 4.9:

$$e = \frac{e_s \times UR}{100} \quad (4.9)$$

Em que:

UR é a umidade relativa do ar em superfície.

Portando, o DPV é dado por:

$$DPV = e - e_s \quad (4.10)$$

4.3.4 – ANÁLISE MULTIVARIADA

A análise multivariada abrange várias técnicas estatísticas que têm como objetivo medir o grau de correlação entre as variáveis de um conjunto de dados, de modo a resumir a informação presente em um grupo menor destas variáveis, sem que haja perda significativa de informação, através da identificação de fatores que explicam a relação entre as variáveis utilizadas. A análise fatorial por componentes principais e de agrupamento, estão entre as principais técnicas estatísticas multivariadas (CORRAR et al., 2007; HAIR JR. et al., 2009).

Essas técnicas são utilizadas em inúmeras áreas, nas quais é preciso analisar, de forma simultânea, um grande número de dados. No caso da Meteorologia, têm sido empregadas na

detecção de regiões homogêneas, padrões e variabilidade temporal e espacial de variáveis e fenômenos meteorológicos.

4.3.4.1 – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP)

A técnica estatística denominada ACP foi aplicada para detectar mecanismos físicos associados com mudanças significantes do vento local. No contexto deste estudo, os componentes principais representam processos fisicamente independentes que controlam a variação de elementos importantes do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, do regime de vento na região de estudo. O método utilizado na extração de fatores usa combinação linear entre as variáveis, de modo a explicar o máximo de variância, a partir dessa combinação (CORRAR et al., 2007; HAIR JR. et al., 2009).

A matriz de dados pode ser organizada em, pelo menos, seis modos diferentes (RICHMAN, 1986), porém, neste trabalho é utilizado o modo-P, no qual as variáveis ocupam as colunas e o tempo, as linhas. Este é um modo bastante utilizado em experimentos em que as observações estão concentradas em apenas um ponto ou localidade. Lorenz (1956) foi um dos primeiros pesquisadores a utilizar essa técnica para a análise de dados meteorológicos, denominando-as de Funções Ortogonais Empíricas (FOE). Posteriormente, outros autores também aplicaram tais técnicas em uma grande variedade de elementos meteorológicos, a exemplo de Braga (1992), Diniz et al. (2011) e Queiroz et al. (2014).

Após a geração de fatores, que representam as dimensões que explicam o conjunto de variáveis observadas, são extraídas as combinações de variáveis com máxima explicação de variância, seguidas das combinações que apresentam a explicação das menores variâncias. Desta forma, o melhor ajuste dos dados é alcançado a partir da explicação da variância, organizando os autovalores em ordem decrescente, o que corresponde a mostrar o quanto cada fator é capaz de explicar da variância total dos dados.

Primeiramente foi feita a verificação da matriz de correlação, observando os valores obtidos, os quais devem apresentar valores superiores a 0,3, na maioria dos casos, para que a análise fatorial seja considerada apropriada. Em seguida, testes de aplicabilidade da análise fatorial foram utilizados: o Measure of Sampling Adequacy (MSA), que mede o grau de correlação parcial das variáveis e seus valores variam entre 0 e 1; o teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) foi utilizado para medir o grau de adequação dos dados para o uso da técnica, o qual deve ter seu valor acima de 0,5; e o teste de esfericidade de Barlett, que é um teste de significância em relação a correlação das variáveis, indicando o quanto as variáveis estão

correlacionadas e se são significativas, sugerindo a aplicação da análise fatorial, devendo ter valor inferior a 0,05 (CORRAR et al., 2007; FÁVERO et al., 2009; HAIR JR. et al., 2009).

Foi utilizado o método de rotação ortogonal Varimax, a fim de aumentar a explicação dos fatores, facilitando a sua interpretação, uma vez que a possibilidade de uma variável possuir cargas fatoriais semelhantes em diferentes fatores é reduzida. O método utilizado na determinação do número de fatores a serem retidos foi o de Kaiser, em que apenas são considerados os fatores com autovalores acima de 1,0 (CORRAR et al., 2007; HAIR JR. et al., 2009).

O cálculo da ACP passa pelas seguintes etapas: obtenção da matriz de variância-covariância ou correlação; cálculo dos autovetores e autovalores; transformação linear do conjunto de dados e obtenção da correlação entre os dados originais e as componentes (WILKS, 2006).

4.3.4.1.1 – DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A obtenção dos fatores não rotacionados, utilizando o método das componentes principais é mostrado seguindo MANLY (2008).

Seja $X' = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_p]$ um vetor aleatório de dimensão p , vetor de médias μ , matriz de correlações ρ e autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$. As p combinações lineares das variáveis originais podem ser escritas como:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + b_{13}X_3 + \dots + b_{1p}X_p \\
 Z_2 &= b_{21}X_1 + b_{22}X_2 + b_{23}X_3 + \dots + b_{2p}X_p \\
 Z_3 &= b_{31}X_1 + b_{32}X_2 + b_{33}X_3 + \dots + b_{3p}X_p \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 Z_p &= b_{p1}X_1 + b_{p2}X_2 + b_{p3}X_3 + \dots + b_{pp}X_p
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

Em que:

b_{ij} são os autovetores da matriz de correlações.

A transformação dos valores X para os valores Z é ortogonal, de tal forma que o relacionamento inverso é feito:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= b_{11}Z_1 + b_{21}Z_2 + b_{31}Z_3 + \cdots + b_{p1}Z_p \\
 X_2 &= b_{12}Z_1 + b_{22}Z_2 + b_{32}Z_3 + \cdots + b_{p2}Z_p \\
 X_3 &= b_{13}Z_1 + b_{23}Z_2 + b_{33}Z_3 + \cdots + b_{p3}Z_p \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X_p &= b_{1p}Z_1 + b_{2p}Z_2 + b_{3p}Z_3 + \cdots + b_{pp}Z_p
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Na análise de fatores, apenas m das componentes principais são retidas e as Equações anteriores tornam-se:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= b_{11}Z_1 + b_{21}Z_2 + b_{31}Z_3 + \cdots + b_{p1}Z_p + e_1 \\
 X_2 &= b_{12}Z_1 + b_{22}Z_2 + b_{32}Z_3 + \cdots + b_{p2}Z_p + e_2 \\
 X_3 &= b_{13}Z_1 + b_{23}Z_2 + b_{33}Z_3 + \cdots + b_{p3}Z_p + e_3 \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X_p &= b_{1p}Z_1 + b_{2p}Z_2 + b_{3p}Z_3 + \cdots + b_{mp}Z_m + e_p
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Em que:

e_p é uma combinação linear dos componentes principais Z_{m+1} a Z_p .

A partir daí, os componentes principais $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_m$ são escalonados para terem variâncias unitárias. Para isso, Z_i deve ser dividido por seu desvio-padrão e a raiz quadrada do correspondente autovalor na matriz de correlações é dada por $\sqrt{\lambda_i}$. As equações tornam-se:

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \sqrt{\lambda_1}b_{11}F_1 + \sqrt{\lambda_2}b_{21}F_2 + \sqrt{\lambda_3}b_{31}F_3 + \cdots + \sqrt{\lambda_m}b_{p1}F_p + e_1 \\
 X_2 &= \sqrt{\lambda_1}b_{12}F_1 + \sqrt{\lambda_2}b_{22}F_2 + \sqrt{\lambda_3}b_{32}F_3 + \cdots + \sqrt{\lambda_m}b_{p2}F_p + e_2
 \end{aligned}$$

$$X_3 = \sqrt{\lambda_1}b_{13}F_1 + \sqrt{\lambda_2}b_{23}F_2 + \sqrt{\lambda_3}b_{33}F_3 + \cdots + \sqrt{\lambda_m}b_{p3}F_p + e_3$$

(4.14)

$$X_p = \sqrt{\lambda_1}b_{1p}F_1 + \sqrt{\lambda_2}b_{2p}F_2 + \sqrt{\lambda_3}b_{3p}F_3 + \cdots + \sqrt{\lambda_m}b_{pm}F_m + e_p$$

Em que:

$$F_i = Z_i / \sqrt{\lambda_i}$$

Assim, os fatores não rotacionados são dados por:

$$X_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + a_{13}F_3 + \cdots + a_{1m}F_m + e_1$$

$$X_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + a_{23}F_3 + \cdots + a_{2m}F_m + e_2$$

$$X_3 = a_{31}F_1 + a_{32}F_2 + a_{33}F_3 + \cdots + a_{3m}F_m + e_3$$

(4.15)

$$X_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + a_{p3}F_3 + \cdots + a_{pm}F_m + e_p$$

Em que:

$$a_{ij} = \sqrt{\lambda_i}b_{ji}$$

Rotação de Fatores

Para facilitar a interpretação de fatores, é comum que se realize a rotação de seus eixos. Com essa rotação, os fatores apresentarão correlações relativamente fortes com algumas poucas variáveis. Entre os diversos tipos, a rotação ortogonal Varimax é a mais utilizada, minimizando a probabilidade de uma mesma variável possuir altas cargas fatoriais para fatores diferentes, tornando fácil identificar uma variável com um único fator (CORRAR et al., 2007). Feita a rotação, a nova solução dos fatores será:

$$X_1 = g_{11}F^*_1 + g_{12}F^*_2 + g_{13}F^*_3 + \cdots + g_{1m}F^*_m + e_1$$

$$\begin{aligned}
X_2 &= g_{21}F^*_1 + g_{22}F^*_2 + g_{23}F^*_3 + \dots + g_{2m}F^*_m + e_2 \\
X_3 &= g_{31}F^*_1 + g_{32}F^*_2 + g_{33}F^*_3 + \dots + g_{3m}F^*_m + e_3 \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
X_p &= g_{p1}F^*_1 + g_{p2}F^*_2 + g_{p3}F^*_3 + \dots + g_{pm}F^*_m + e_p
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Em que:

F^*_i é o novo *i-ésimo* fator.

Os valores do *i-ésimo* fator não rotacionado são os valores do *i-ésimo* componente principal depois de serem escalonados para ter variância 1 (um). Já os valores dos fatores rotacionados são obtidos de forma mais complexa, pela equação matricial:

$$F^* = XG(G'G)^{-1} \tag{4.17}$$

Em que:

F^* é uma matriz $n \times m$ que contém os valores dos m fatores rotacionados em suas colunas e uma linha para cada n linhas originais de dados;

X é uma matriz $n \times p$ com os dados originais para p variáveis e n observações, após a padronização das variáveis X_1 a X_p com média 0 (zero) e variância 1 (um);

G é uma matriz $p \times m$ com as cargas rotacionadas encontradas pela Equação 4.16.

Neste estudo foi utilizado um total de 12 (doze) variáveis para identificar a relação entre a ocorrência de ventos de través no Aeroporto de Petrolina-PE com a influência de variáveis atmosféricas e outras associadas com o Lago de Sobradinho, o qual exerce grande influência no regime de brisas que afetam o aeroporto. Após a primeira rodada, foram encontradas informações que levaram a uma outra investigação, adicionando novas variáveis ao conjunto inicial de dados. Por fim, verificou-se a influência do ciclo diurno no comportamento das variáveis utilizadas na pesquisa, a partir do aquecimento radiativo solar.

4.3.5 – TESTE t-STUDENT

O teste t-Student é um teste de hipótese que utiliza conceitos estatísticos para aceitar ou rejeitar uma hipótese nula quando a estatística do teste segue uma distribuição t-Student. Essa premissa é satisfeita quando a estatística de teste segue uma distribuição normal, mas a variância da população σ^2 é desconhecida, sendo usada, nesse caso, a variância amostral S^2 e, com esse ajuste, a estatística de teste passa a seguir uma distribuição t-Student (STORCH e ZWIERS, 2003).

Unicaudal x Bicaudal

Pode ser usada uma ou duas caudas da distribuição t-Student na avaliação do teste, dependendo da definição da hipótese nula. Ou seja, se a hipótese nula for $\bar{X} \leq \mu_0$ e a hipótese alternativa $\bar{X} > \mu_0$, o teste deve ser feito apenas para valores maiores que $t_{\text{crítico}}$ e, de acordo com os resultados, ao consultar a função densidade de probabilidade (FDP) da distribuição t-Student, deve ser considerada apenas a área superior a $t_{\text{crítico}}$, ou seja, somente uma das caudas da distribuição.

No entanto, se a hipótese nula for $\bar{X} = \mu_0$ e a hipótese alternativa $\bar{X} \neq \mu_0$, seria preciso avaliar tanto a possibilidade de $\bar{X} < \mu_0$, quanto de $\bar{X} > \mu_0$. Assim, ao consultar a FDP da distribuição t-Student, devem ser consideradas as áreas abaixo da curva para valores superiores a $t_{\text{crítico}}$ e inferiores a $-t_{\text{crítico}}$, isto é, as caudas direita e esquerda da distribuição.

O teste t-Student pode ser subdividido, de acordo com o tipo de dado a ser analisado. Há, por exemplo, o teste de hipóteses para uma amostra (testa se existe diferença entre a média de uma amostra e a média populacional); para duas amostras independentes (testa se uma variável difere entre dois grupos independentes de sujeitos); ou para amostras pareadas (testa se existem diferenças entre performance/comportamento quando se tem um mesmo grupo de sujeitos, testados em dois momentos distintos).

Nesta pesquisa, foi utilizado o teste *t* de Student para duas amostras pareadas, a fim de verificar se a média populacional (μ) ANTES e DEPOIS de um determinado tempo, sofreu alteração significativa.

Para realizar o teste *t* pareado, deve-se primeiro estabelecer um dos conjuntos de hipóteses:

$$\begin{cases} H_0: \mu_{DEPOIS} = \mu_{ANTES} \\ H_1: \mu_{DEPOIS} \neq \mu_{ANTES} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0: \mu_{DEPOIS} = \mu_{ANTES} \\ H_1: \mu_{DEPOIS} > \mu_{ANTES} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0: \mu_{DEPOIS} = \mu_{ANTES} \\ H_1: \mu_{DEPOIS} < \mu_{ANTES} \end{cases}$$

Os dados devem ser organizados de acordo com a estrutura da Tabela 4.1, a fim de determinar a diferença entre cada par de valores e então testar se a média das diferenças é igual a zero.

Tabela 4.1 – Estrutura dos dados para uma amostra pareada.

UNIDADE AMOSTRAL	1ª MEDIDA (antes)	2ª MEDIDA (depois)	Diferença entre as medidas
1	x_{11}	x_{12}	D_1
2	x_{21}	x_{22}	D_2
3	x_{31}	x_{32}	D_3
.	.	.	.
.	.	.	.
n	x_{n1}	x_{n2}	D_n
Média	μ_1	μ_2	\bar{D}
Desvio-padrão	σ_1	σ_2	σ_D

Em que:

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{1j} + x_{2j} + x_{3j} + \dots + x_{nj}}{n} \quad (4.18)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_j)^2}{n-1}} \quad (4.19)$$

Sendo $j=1$ para a primeira medida e $j=2$ para a segunda medida.

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n}{n} \quad (4.20)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (4.21)$$

Considerando que as medidas apresentem distribuição normal, a diferença entre elas também apresentará uma distribuição normal, logo, as distribuições t são apropriadas para testar a hipótese nula de que a média das diferenças é igual a zero. Os graus de liberdade serão

definidos pela subtração de 1 do total de unidades amostrais e a estatística usada para testar a hipótese nula é:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\bar{D}}{\sigma_D / \sqrt{n}} \quad (4.22)$$

A partir daí, escolhe-se um nível de significância (α) para ser utilizado como referência, normalmente $\alpha=5\%$, em que rejeita-se a hipótese nula quando esta é verdadeira, tendo a probabilidade de isto ocorrer denotado pelo valor de α . Os valores da distribuição t (t_{tabelado}) podem ser consultadas em tabelas como a apresentada em (SPIEGEL, 1978), os quais são apresentados de acordo com os graus de liberdade e o valor de α .

Se $t_{\text{calculado}} > t_{\text{tabelado}}$ ou $t_{\text{calculado}} < -t_{\text{tabelado}}$, rejeita-se a hipótese nula, isto é, há diferença significativa entre as condições anteriores e posteriores.

Se $-t_{\text{tabelado}} \leq t_{\text{calculado}} \leq t_{\text{tabelado}}$, a hipótese nula não será rejeitada, ou seja, a amostra não apresenta evidência estatística de diferença entre as condições anteriores e posteriores.

Para facilitar a compreensão do leitor, foram utilizados símbolos para qualificar o resultado estatístico:

>: houve aumento da média, porém, não significativo estatisticamente, ao nível de 5%;

+: houve aumento da média, significativo estatisticamente, ao nível de 5%;

<: houve redução da média, porém, não significativa estatisticamente, ao nível de 5%;

-: houve redução da média, significativa estatisticamente, ao nível de 5%.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para auxiliar na análise dos resultados de uma pesquisa na área de meteorologia e climatologia, é importante conhecer o comportamento médio das variáveis relacionadas ao estudo ou padrão atmosférico da região analisada. Na Figura 5.1 são apresentadas as médias climatológicas (1961-1990) da precipitação, temperatura do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento em Petrolina-PE.

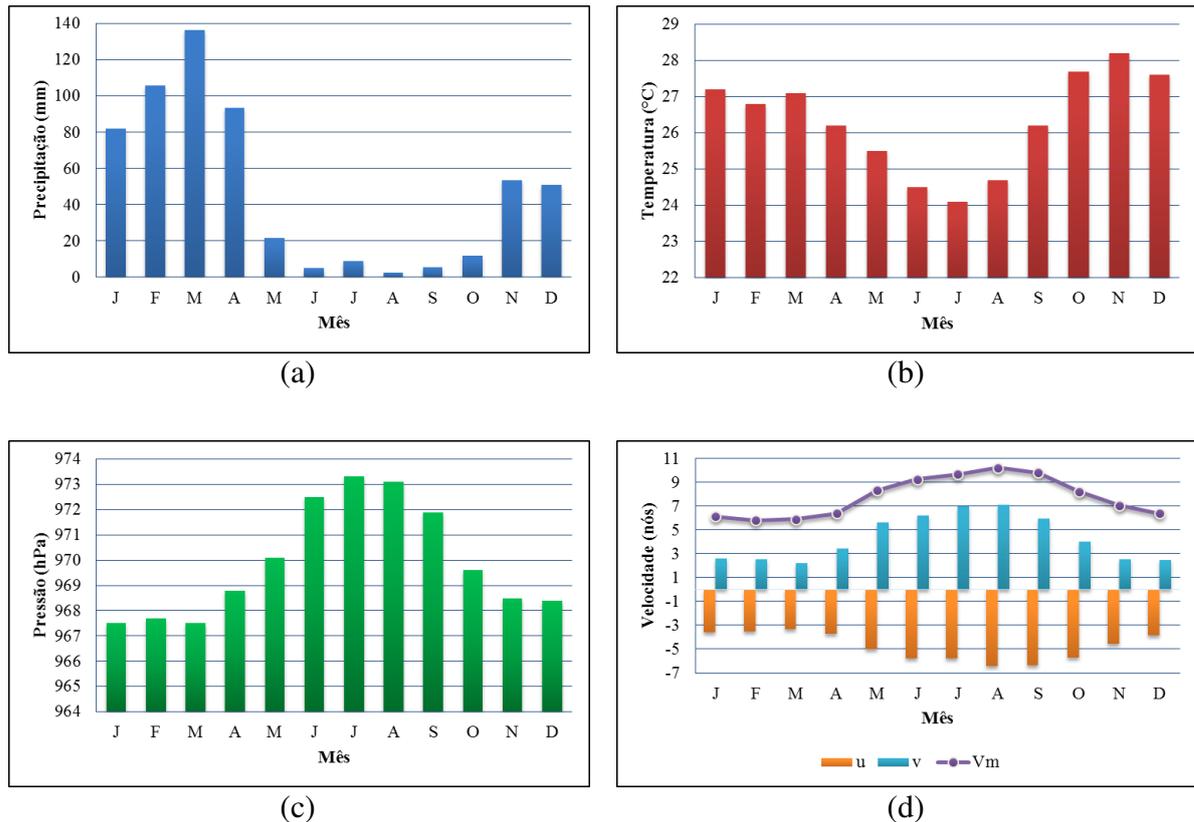


Figura 5.1 – Normais climatológicas da: (a) precipitação (mm); (b) temperatura média do ar (°C); (c) pressão atmosférica (hPa); (d) velocidade média do vento (Vm) e suas componentes zonal (u) e meridional (v) (nós). (Fonte: INMET, 2009).

O período chuvoso na região ocorre entre os meses de novembro e abril (Figura 5.1a), sendo março o mês que apresenta o maior total de precipitação pluvial (136,3 mm). Esse período (novembro a abril) coincide com os meses de temperaturas mais elevadas (Figura 5.1b) e pressões relativamente mais baixas (Figura 5.1c), o que contribui para uma maior evaporação nos baixos níveis da atmosfera. Os ventos alísios de sudeste (caracterizados pela componente zonal (u) positiva e meridional (v) negativa), predominantes na região durante todo o ano, são mais fracos no período chuvoso (Figura 5.1d), o que contribui para a aproximação e atuação de sistemas precipitantes, como a ZCIT e VCAN, desde que as condições atmosféricas estejam favoráveis. No período seco, entre os meses de maio e outubro, o comportamento é inverso. As

temperaturas são mais amenas e o fortalecimento dos ventos alísios de sudeste gera pressões relativamente mais elevadas nesse período, devido à subsidência de ar nessa região, relacionada com a circulação anticiclônica presente.

5.1 – VENTO MÉDIO EM SUPERFÍCIE NA ÁREA DO AEROPORTO DE PETROLINA-PE

Histogramas ilustrando o comportamento sazonal do vento médio (vetorial, escalar, persistência e direção predominante) em superfície no Aeroporto de Petrolina-PE, nos períodos (1967 a 1975) e (2003-2014) são apresentados na Figura 5.2.

Embora aparentemente a evolução da velocidade do vetor-vento (Figura 5.2a) e da velocidade escalar (Figura 5.2b) sejam próximas entre si, percebe-se que no período 2003-2014 elas são maiores e que a diferença entre os dois períodos é mais notável nos meses úmidos, chegando a, aproximadamente, 2 nós.

Os módulos das velocidades do vetor-vento estão diretamente ligados à variabilidade na direção do vento em uma determinada localidade, percebida quando se compara com as velocidades escalares, através do cálculo da persistência (Figura 5.2c). Nota-se que, em Petrolina, no período seco (úmido), época em que os alísios de Sudeste estão mais (menos) intensos, há menor (maior) variação na direção do vento. É visto ainda que essa variabilidade é menor no período 2003-2014 (P2), uma vez que os valores encontrados são superiores aos do período 1967-1975 (P1).

Complementando essas informações, a Figura 5.2d ilustra a evolução média mensal da direção predominante. Percebe-se que no período 1967-1975 a direção varia, aproximadamente, entre 120 e 147 graus, enquanto que no período 2003-2014, essa variação ocorre entre 135 e 160 graus. Esse resultado indica que apesar da variabilidade detectada, quando comparadas as direções predominantes médias mensais dos dois períodos, o vento continua predominantemente do quadrante Sudeste, determinada fundamentalmente pelos ventos alísios, resultante da circulação geral da atmosfera.

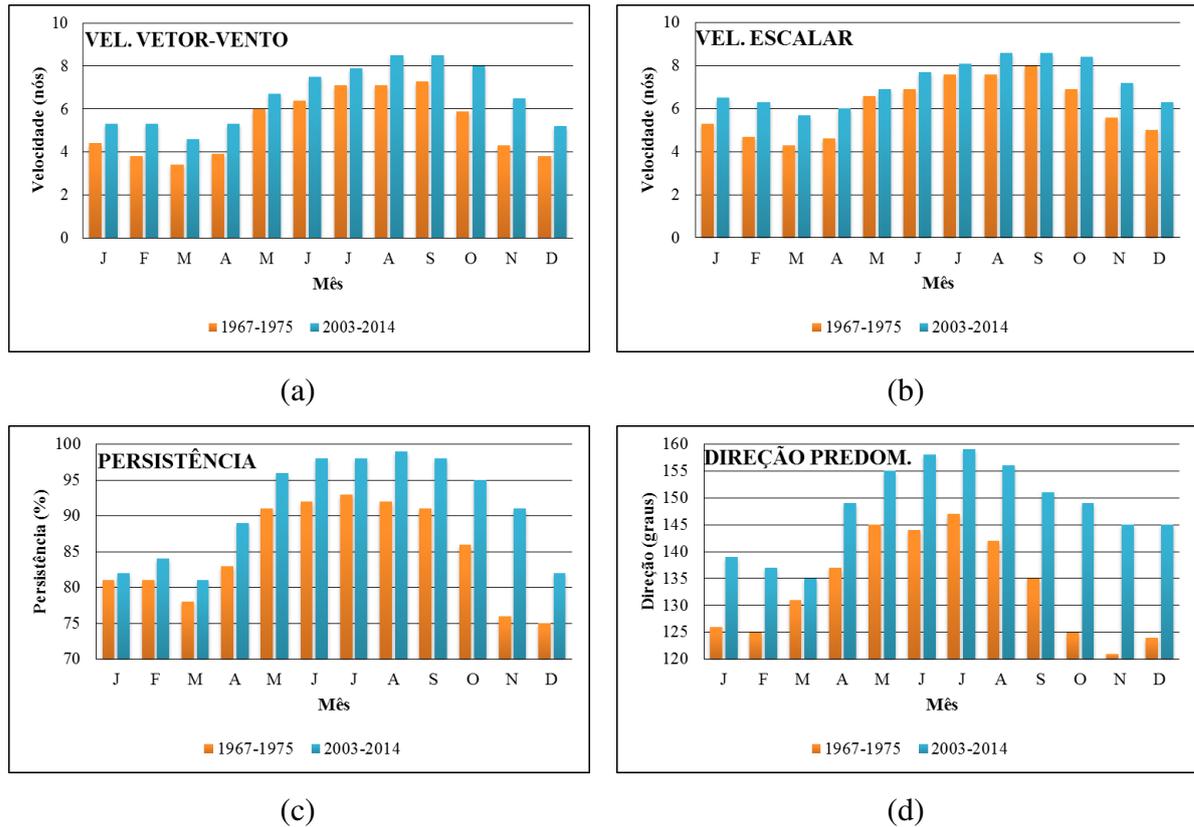


Figura 5.2 – Valores médios em superfície para 1967-1975 (laranja) e 2003-2014 (azul) da: (a) velocidade do vetor-vento (nós); (b) velocidade escalar (nós); (c) persistência do vento (%); (d) direção predominante do vento (graus). Fonte: [Centro Técnico Aeroespacial \(1994\)](#); [REDEMET \(2014\)](#).

As análises da velocidade média do vento em superfície na região de Petrolina-PE, indicam a presença de um ciclo sazonal bem definido, com valores mais altos no período de estiagem. Observa-se que os valores da velocidade média vetorial obtidos na estação úmida, independentemente do período (1967-1975 ou 2003-2014), são menores do que os valores da velocidade média escalar. Esse resultado está vinculado aos casos de calmaria, mais frequentes no período chuvoso, que não são computados no cálculo vetorial. No entanto, independente da fórmula utilizada, tem-se um aumento na intensidade do vento em superfície no período 2003-2014. Observa-se ainda que a variabilidade da média mensal do vento é visivelmente maior no período úmido em virtude dos efeitos mais proeminentes de fatores locais na geração de circulações induzidas termicamente (alísios menos intensos).

Os resultados do teste t de Student pareado, ao nível de significância de 5% aplicados aos dois conjuntos de dados (1967-1975 e 2003-2014), são apresentados no Quadro 5.1. Verifica-se um aumento significativo da intensidade do vento, no período 2003-2014.

Quadro 5.1 – Resultados estatísticos da velocidade do vento em superfície, persistência e direção predominante no Aeroporto de Petrolina (teste t de Student). Em que: (+) aumento significativo.

Variáveis	Médias		$t_{\text{crítico}} = \pm 2,571$	Significância estatística
	1967-1975	2003-2014	$t_{\text{calculado}}$	
Vetor vento (nov-abr)	3,933	5,367	8,126	+
Vetor vento (mai-out)	6,633	7,850	5,917	+
Vel. escalar (nov-abr)	4,917	6,333	21,660	+
Vel. escalar (mai-out)	7,267	8,050	4,502	+
Persistência (nov-abr)	79,000	84,833	2,860	+
Persistência (mai-out)	90,833	97,333	10,498	+
Dir. predom. (nov-abr)	127,333	143,500	6,157	+
Dir. predom. (mai-out)	139,666	155,000	6,416	+

5.2 – FREQUÊNCIA DOS VENTOS NA ÁREA DO AEROPORTO DE PETROLINA-PE

Conforme mencionado anteriormente, as análises de mudanças no padrão de vento local e frequência de ventos de través, apresentadas neste trabalho, foram feitas segundo os critérios definidos no relatório técnico [Centro Técnico Aeroespacial \(1994\)](#).

O Aeroporto de Petrolina tem uma única pista e duas cabeceiras, com numerações 13 (PST13) e 31 (PST31). A identificação 13 representa, usando dois dígitos, o rumo magnético da pista que é de 131° . Consequentemente, a cabeceira oposta (180° de diferença) tem numeração 31 ($131^\circ + 180^\circ = 311^\circ$). Como os aviões devem decolar e pousar contra o vento predominante, em Petrolina a decolagem é sempre da cabeceira 13 (PST13). Portanto, no cálculo das frequências, foram contabilizados como ocorrências de vento ao longo da pista, os casos de vento no sentido contrário ao sentido de decolagem (PST13), vindos do quadrante Sudeste, e como ventos no sentido oposto (PST31), os ventos vindos do quadrante Noroeste.

A distribuição média de ocorrências mensais (número de casos registrados) de vento significativo ($\geq 4,5$ nós) em superfície ao longo da pista (PST13), ventos no sentido oposto (PST31), perpendicular à pista (través), e ventos calmos (componentes zonal e meridional abaixo de 4,5 nós, simultaneamente), estimadas no período de 1967 a 1975 (P1), obtidas pela Divisão de Ciências Atmosféricas do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial – IAE/CTA ([Centro Técnico Aeroespacial, 1994](#)) e no período de 2003 a 2014

(P2), são apresentadas na Figura 5.3. A escala do eixo vertical (redução no valor máximo) na Figura 5.3b foi alterada com o propósito de destacar as informações.

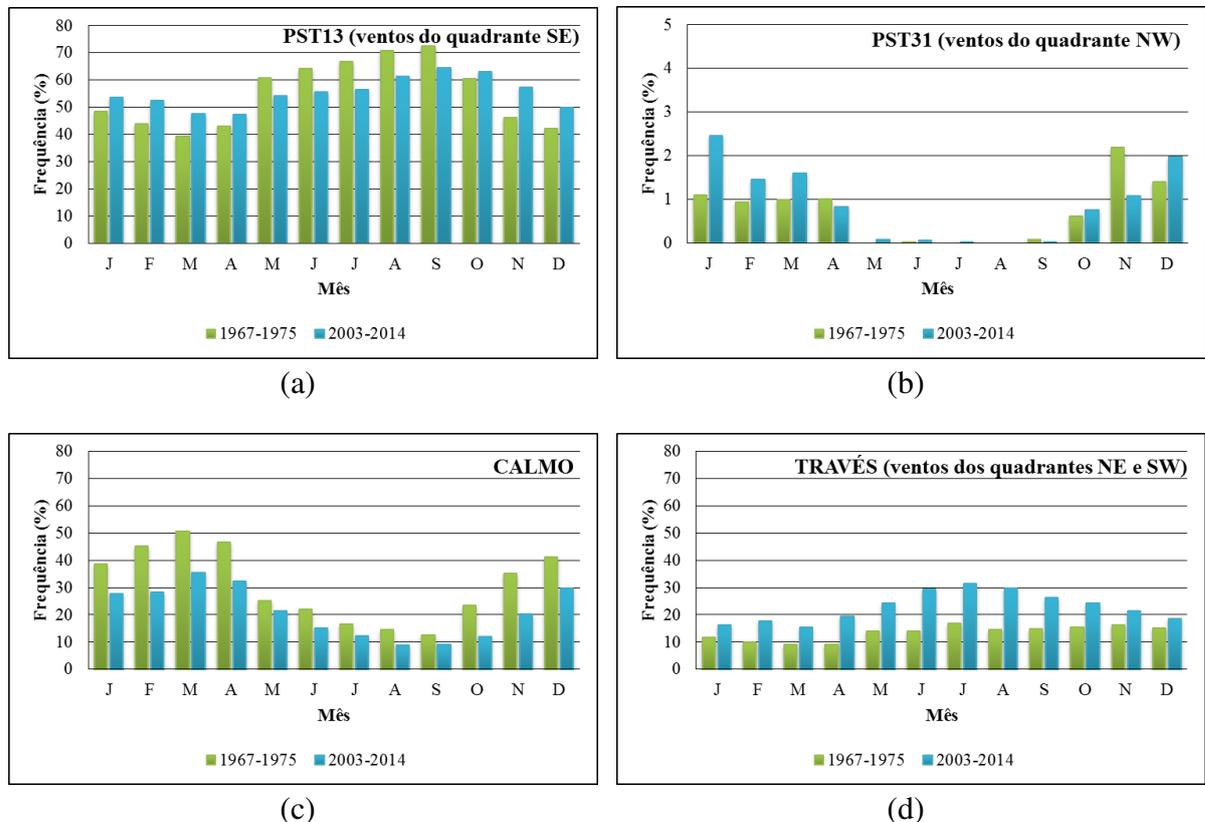


Figura 5.3 – Frequência relativa média mensal dos ventos em superfície atuantes na área do aeroporto de Petrolina-PE, para os períodos 1967-1975 (verde) e 2003-2014 (azul): (a) ao longo da pista (PST13); (b) contrário a direção predominante (PST31); (c) ventos calmos; (d) ventos de través. Fonte: [Centro Técnico Aeroespacial \(1994\)](#); [REDEMET \(2014\)](#).

Verifica-se que, apesar da variabilidade do vento em superfície, quando consideradas as categorias PST13, PST31 e TRAVÉS, as quais representam ventos vindos dos quatro quadrantes (NE, SE, SW, NW), as frequências médias mensais ao longo da pista (PST13) apresentadas na Figura 5.3a, independente do período (P1 e P2) é, em grande dos casos, maior que 50%. Este resultado indica que, apesar das mudanças, a relação entre a orientação da pista do aeroporto de Petrolina com o padrão de vento na região (quadrante sudeste) permanece. Em outras palavras, indica que do ponto de vista climatológico a orientação da pista continua nos padrões exigidos. As pistas de pouso/decolagem de um aeroporto são construídas de forma que o eixo coincida com o vento predominante, no entanto, nos casos em que uma localidade apresenta grande variabilidade na direção do vento, é conveniente construir pistas secundárias, com orientações diferentes.

Contudo, quando comparados os períodos P1 e P2, observa-se a redução substancial na frequência de ventos registrados na PST13, no período de 2003 a 2014, particularmente nos

meses de maio a setembro, estação de redução das chuvas. Simultaneamente observa-se um aumento significativo nos ventos de través no mesmo período (Figura 5.3d). A ocorrência de ventos de outros setores é mais comum no período úmido com o enfraquecimento dos alísios de Sudeste, padrão de comportamento detectado em outros estudos desenvolvidos na região (MELO et al., 2013; SANTOS SILVA et al., 2008; SILVA ARAGÃO et al., 2007; SOUZA, 2003; SILVA ARAGÃO et al., 1997). Variações significantes no período de estiagem podem indicar influência de fatores locais como efeitos da brisa lacustre ou circulações induzidas por descontinuidades na cobertura vegetal. Resultados semelhantes foram obtidos por Correia et al. (2006b), em um estudo sobre a influência da ocupação do solo na área do Lago de Sobradinho. As autoras verificaram uma redução significativa na intensidade do vento em Petrolina-PE em decorrência das mudanças na cobertura e uso da terra. Ventos locais resultantes do acoplamento entre a brisa lacustre e de encosta são mais intensos, alcançando maiores distâncias (CORREIA e SILVA DIAS, 2003).

O aumento na frequência de ventos de través no aeroporto de Petrolina é uma informação importante, já que a ocorrência desses ventos pode comprometer a segurança dos voos, principalmente em procedimentos de pousos e decolagens. Variações na frequência de ventos na PST31 (Figura 5.3b) também foram observadas, principalmente no período úmido. Embora as frequências sejam bem menores, esse resultando em relação à PST31 indica mudanças importantes nas características do vento local, decorrentes da atuação de sistemas meteorológicos de grande escala. Já com relação às ocorrências de ventos calmos ($V < 4,5$ nós), observa-se redução em todos os meses (Figura 5.3c).

O Quadro 5.2 mostra os resultados obtidos com a aplicação do teste t de Student pareado ao nível de significância (α) de 5% aos dados de vento em superfície dos dois períodos analisados, considerando período úmido (novembro a abril) e de estiagem (maio a outubro). Os sinais positivos (+) e negativos (-) foram usados para indicar os períodos nos quais houve aumento ou diminuição significativa, respectivamente, no número de ocorrências de ventos, ao longo da pista (PST13), no sentido contrário (PST31), calmos e de través no período 2003 a 2014. Os sinais de maior (>) e menor (<) indicam os períodos nos quais houve apenas uma tendência de aumento ou diminuição no número de registros, respectivamente. Para isso, foram assumidas as hipóteses: $H_0: \mu_2 = \mu_1$ e $H_1: \mu_2 \neq \mu_1$.

Quadro 5.2 – Resultados estatísticos do vento em superfície no Aeroporto de Petrolina (teste *t* de Student). Em que: (+) aumento significativo; (-) redução significativa; (>) aumento não significativo; (<) redução não significativa.

Vento em Superfície	Período	Significância Estatística
Ao longo da pista (PST13)	(nov-abr)	+
Ao longo da pista (PST13)	(mai-out)	-
Sentido oposto (PST31)	(nov-abr)	>
Sentido oposto (PST31)	(mai-out)	>
Calmo	(nov-abr)	-
Calmo	(mai-out)	-
Través	(nov-abr)	+
Través	(mai-out)	+

Os resultados mostram que houve aumento significativo na frequência de ventos do quadrante Sudeste (PST13) no período chuvoso e redução significativa no período seco. Por outro lado, houve aumento não significativo ao nível de 5%, de frequência de ventos do quadrante Noroeste (PST31). A ocorrência de ventos calmos, no período úmido (novembro a abril) e no período seco (maio a outubro), apresentou uma redução estatisticamente significativa ao nível de 5% no período de 2003 a 2014, em relação ao período anterior (1967-1975). Já os ventos de través, tanto no período chuvoso quanto no seco, entre 2003 e 2014, apresentaram um aumento estatisticamente significativo.

5.3 – ANÁLISE FATORIAL POR COMPONENTES PRINCIPAIS (ACP) PARA O MÊS ABRIL DE 2003 A 2014

Os resultados obtidos anteriormente indicam aumento significativo do vento de través, independentemente da estação (úmida/estiagem). As análises também evidenciaram que a alta variabilidade observada na direção do vento em superfície no período úmido tem relação direta com os sistemas de circulação produtores de chuva na região. Os meses de abril (final da estação chuvosa) e novembro (início da estação chuvosa) se destacam pelo aumento significativo de ocorrências de ventos de través registradas no período de 2003 a 2014. Neste trabalho a ACP foi aplicada ao conjunto de dados constituídos por variáveis meteorológicas e hidrológicas, relacionadas ao vento, temperatura e umidade, observadas em abril no período de 2003 a 2014. O propósito é identificar fatores físicos importantes associados com a variabilidade do vento em superfície observada no período em análise.

Abril representa o mês de transição entre o período úmido e o período seco. A precipitação na região, neste mês, está principalmente associada à atuação da ZCIT que, quando está posicionada próxima à sua posição climatológica ou ao Sul dela, favorece a convecção nessa região. Além da ZCIT, a presença de VCAN tem influência na distribuição espacial da chuva. Quando a região está sob a área do centro do VCAN, onde ocorre subsidência de ar, não favorece a formação de nuvens de chuva, enquanto que as regiões sob a periferia do sistema, onde formam-se nuvens do tipo cumulonimbus, ocorre precipitação. Pode haver ainda a atuação de aglomerados convectivos e a influência da umidade relacionada a Linhas de Instabilidade (LI) que podem aumentar a precipitação em partes do NEB.

5.3.1 – INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE INTERANUAL

Os resultados da aplicação da ACP foram validados com base nos testes KMO e de Esfericidade de *Bartlett*. Autovalores e porcentagens de variância acumulada estão descritos na Tabela 5.1. Foram retidos 3 (três) fatores, a partir de um conjunto de 8 (oito) variáveis (TRV_NE, TRV_SW, u, v, T-Td, h_base, Cota e Vol), que explicam 94,9% da variabilidade dos dados. A importância relativa de cada uma das variáveis utilizadas está diretamente ligada à variância explicada por cada um dos fatores.

Tabela 5.1 – Autovalores e porcentagens de variância acumulada.

Abril (2003 – 2014)			
Fator	Autovalor	Percentual de variância	Percentual cumulativo de variância
1	3,5	43,3	43,3
2	2,1	26,2	69,5
3	2,0	25,5	94,9

O primeiro fator (F1) explica 43,3% da variabilidade dos dados e é composto pelas variáveis: TRV_NE (componente do vento do setor nordeste, perpendicular à pista), T-Td (diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho), h_base (altura da base das nuvens) e a componente zonal do vento (u) (Figura 5.4).

Escores negativos, em torno de um, estão presentes nos anos de 2006, 2008 e 2009 e são mostrados na série temporal associada ao F1 (Figura 5.4). Esses valores negativos indicam uma relação direta com a variável u e inversa com as variáveis TRV_NE, T-Td e h_base. Ou seja, nestes anos a componente zonal do vento representou maior relevância na variabilidade do conjunto de dados retidos no primeiro fator, apresentando velocidades maiores que o restante do período, além de uma maior umidade presente na atmosfera e bases de nuvens mais baixas.

Os meses de abril de 2008 e 2009, em Petrolina, apresentaram precipitação total mensal, segundo dados do INMET, de 165,0 mm e 223,6 mm, respectivamente, acima do valor da normal climatológica para o mês, que é de 93,6 mm, influenciadas pela atuação da ZCIT na Região (CLIMANÁLISE, 2008, 2009).

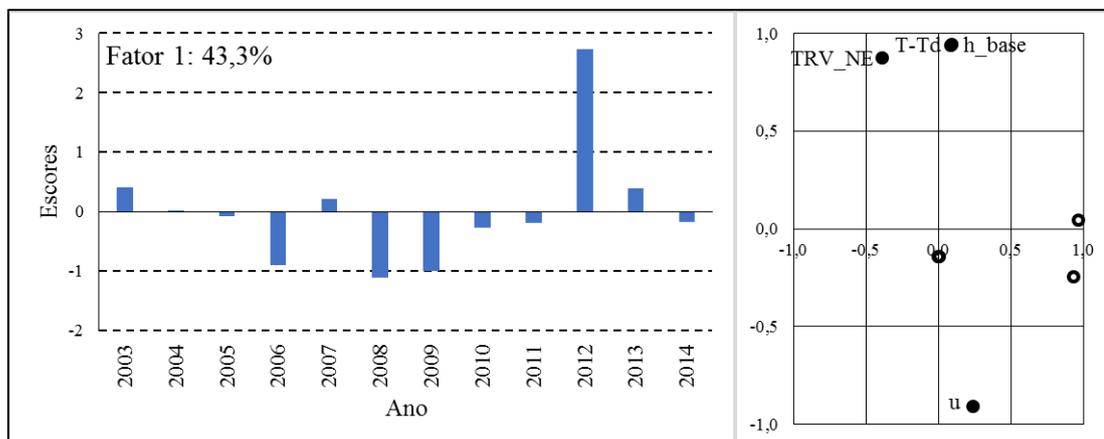


Figura 5.4 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014.

No entanto, foi observado um valor positivo, superior a 2,5, no ano de 2012. Este resultado indica maior relevância das variáveis com cargas fatoriais positivas neste ano. Os altos valores de correlação (carga fatorial) com F1 indicam que o aumento na frequência de TRV_NE está relacionado com redução na umidade atmosférica e elevação da base das nuvens, além de menores velocidades da componente u (zonal) do vento, sendo reflexo do enfraquecimento dos ventos alísios de Sudeste, que contribuem para a maior frequência na ocorrência de ventos de través do setor Sudoeste (TRV_SW).

A distribuição do percentual anual de ventos de través é apresentada na Figura 5.5. No período de 2003 a 2014, 86% dos casos de ventos de través estão associados com componentes do quadrante SW, perpendicular à pista (TRV_SW). No entanto, em 2012, verifica-se uma frequência significativa de TRV_NE (componente do quadrante NE, perpendicular à pista) em relação ao total de casos observados. Praticamente não foram registrados episódios de TRV_SW em 2012.

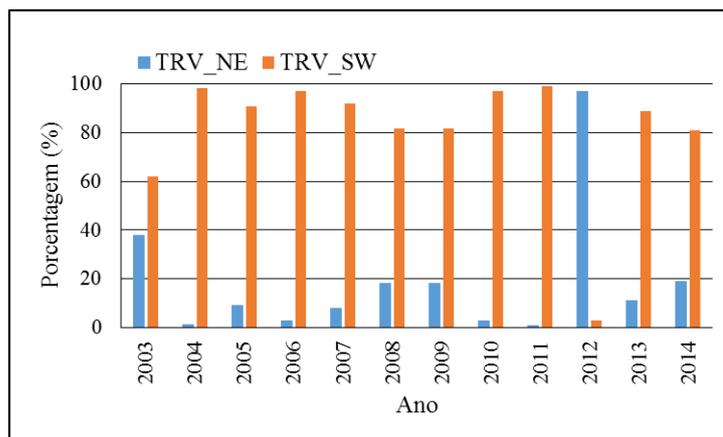


Figura 5.5 – Frequência de ventos de través dos quadrantes nordeste (TRV_NE) e sudoeste (TRV_SW) entre 2003 e 2014.

Segundo dados do CPTEC ([CLIMANÁLISE, 2012](#)), quase todo o mês de abril de 2012 apresentou registro de VCAN. A atuação desses sistemas foi responsável por índices pluviométricos abaixo da normal climatológica em grande parte da Região Nordeste, que esteve sob a influência da área central do VCAN (região de subsidência do ar frio e seco dos altos níveis da atmosfera). Além disso, o VCAN possivelmente contribuiu para um maior número de ventos significativos de través do setor Nordeste (TRV_NE) em 2012.

A evolução diária da estrutura vertical da razão de mistura, r (g/kg), às 12 UTC para abril de 2012, apresentada na Figura 5.6a, ilustra a relação entre a estratificação vertical do vapor e efeitos da atuação de VCAN no período analisado. Verifica-se uma redução substancial nos valores de r (secagem atmosférica) acima de 800 hPa, particularmente no período entre 25 e 30 de abril. A razão de mistura atinge valores da ordem de 2 g/kg no nível de 750 hPa, indicando uma redução de, aproximadamente, 8 g/kg em relação aos primeiros dias do mês, que apresentaram uma concentração de vapor na atmosfera da ordem de 10 g/kg. O transporte de ar seco de camadas elevadas para níveis mais baixos da atmosfera diminui a atividade convectiva e, neste mês, na cidade de Petrolina não foi registrada precipitação.

A temperatura de brilho média correspondente à pênstada de 26 e 30 de abril de 2012, apresentada na Figura 5.6b, ilustra a pouca nebulosidade registrada sobre o Nordeste. Esse efeito é típico em regiões sob a atuação da área de subsidência de VCAN.

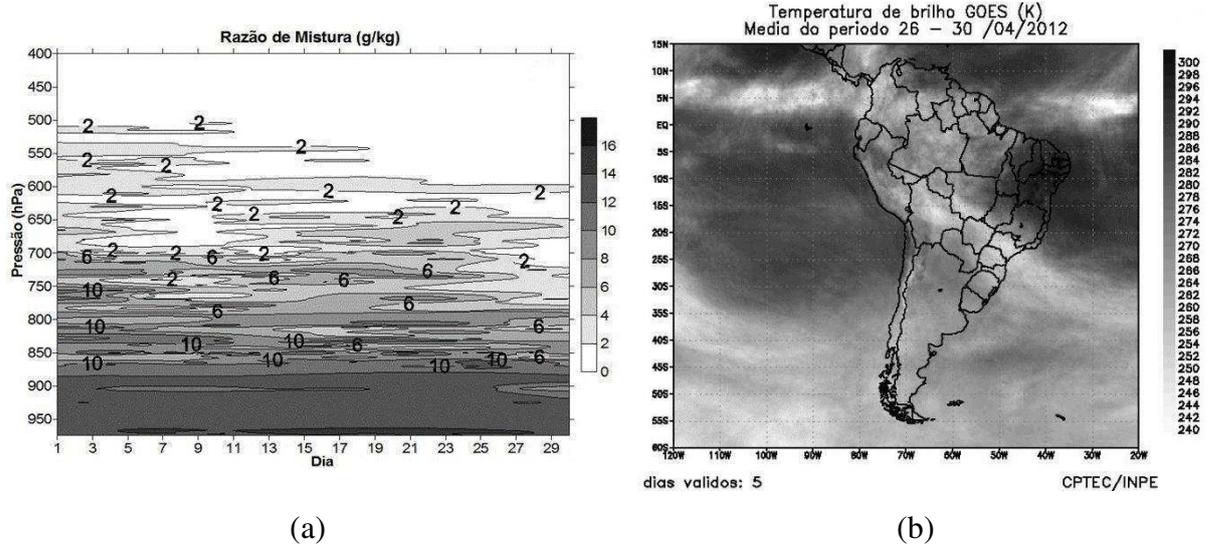


Figura 5.6 – (a) Estrutura vertical da razão de mistura (g/kg) para abril de 2012; (b) Temperatura média do topo das nuvens para o período de 26 a 30/04/2012.

A circulação ciclônica observada no campo de linhas de corrente do dia 29 de abril, às 06h UTC, em 200 hPa (Figura 5.7a) representa a maior evidência da atuação do sistema no Nordeste. A extremidade da seta na cor vermelha indica a localização do centro do VCAN, sobre o Oceano Atlântico próximo à costa do Rio Grande do Norte e da Paraíba. A Figura 5.7b evidencia a ausência de nuvens profundas na área de subsidência do VCAN do dia 29, onde observa-se a cor cinza mais escura abrangendo toda a Região Nordeste. Em imagens realçadas, a profundidade das nuvens é estimada de acordo com a temperatura de seu topo, utilizando a escala de cores/temperatura mostrada na parte inferior da Figura 5.7b, onde quanto menor for a temperatura do topo da nuvem, maior será sua profundidade. Resultados semelhantes sobre o impacto de VCAN na estrutura termodinâmica da atmosfera, na região de Petrolina-PE, foram encontrados por [Correia et al. \(2012\)](#).

Em um estudo sobre mecanismos físicos associados com eventos extremos de chuva em Petrolina PE registrados em janeiro de 2004, [Ribeiro et al. \(2013\)](#) verificaram que a subsidência no centro de um VCAN influenciou as condições de tempo na região, inibindo a precipitação. Os resultados mostraram ainda a ocorrência de ventos do quadrante Nordeste no período de influência da área central de VCAN.

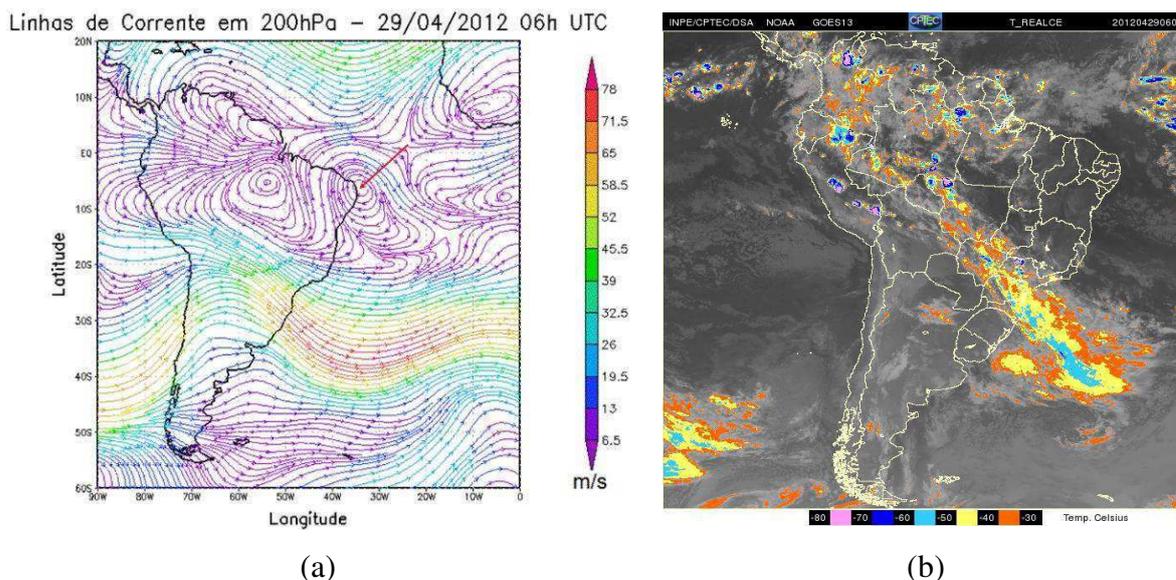


Figura 5.7 – (a) Configuração do VCAN registrado em 29/04/2012; (b) Imagem do GOES-13 no canal do infravermelho realçado 29/04/2012 às 06h UTC.

O F2, responsável por 26,2% da variação dos dados, é composto pelas variáveis: Cota (nível de Sobradinho) e Vol. (volume útil do lago) (Figura 5.8). Embora o fator determinante da variabilidade no nível (cotas) de Sobradinho seja a vazão afluente, resultante das chuvas no alto da bacia hidrográfica (Minas Gerais), os diversos usos múltiplos do reservatório (geração de energia, abastecimento urbano, irrigação) também contribuem com a variação do volume armazenado. Cotas altas do reservatório de Sobradinho indicam maior extensão de área inundada e brisas lacustres mais intensas.

Segundo [Correia e Silva Dias \(2003\)](#), em situações de cota alta, a circulação da brisa lacustre, acoplada aos ventos anabáticos existentes na região da usina hidrelétrica de Sobradinho, atinge distâncias maiores do que aquelas obtidas em períodos de cota baixa.

A série temporal dos escores apresentada na Figura 5.8, mostra valores negativos significativos nos anos de 2003, 2013 e 2014. Esse resultado indica redução no volume e cota do reservatório e esses três anos apresentaram os menores valores das séries das variáveis. O mês de abril de 2013 atingiu apenas 43% de volume útil e pode ter relação com a redução de chuvas no alto da bacia. Normalmente, em anos de El Niño, ocorre precipitação no alto da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, contribuindo para a manutenção de valores de cota e volume elevados na Região do lago de Sobradinho. No entanto, as chuvas abaixo da média, naquela região, foram determinantes para a redução do volume do lago. Cotas baixas correspondem a menores áreas inundadas e, conseqüentemente, circulações de brisas lacustres menos intensas.

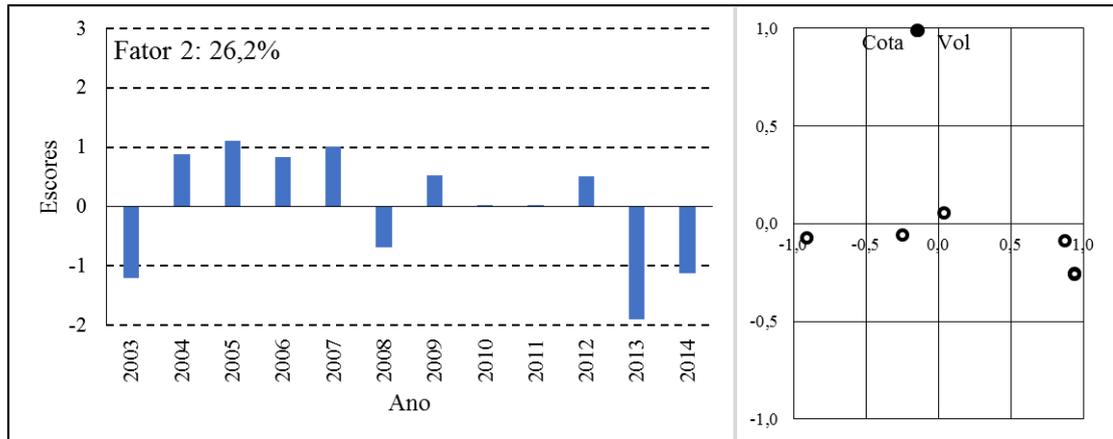


Figura 5.8 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014.

O terceiro fator, composto pelas variáveis v (componente meridional do vento) e TRV_SW (componente do vento do quadrante Sudoeste, perpendicular à pista) é responsável por 25,5% da variância total dos dados (Figura 5.9). Este resultado indica uma relação direta entre a componente meridional e o vento de través (componente SW). Escores positivos associados a esse fator, indicam maior influência do vento de través (componente SW), principalmente nos anos de 2004, 2010 e 2011, em que os escores foram acima de um. Nesses anos em que a componente meridional foi mais intensa, houve uma maior ocorrência de casos de ventos de través do quadrante Sudoeste.

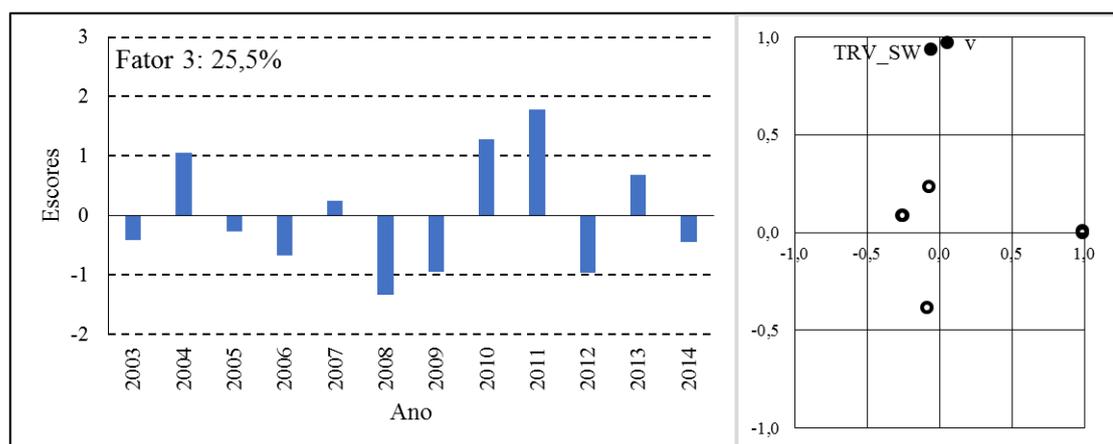


Figura 5.9 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril no período de 2003 a 2014.

Os anos de 2008, 2009 e 2012 apresentam valores de escores negativos, próximos a -1, relacionados com a redução da frequência de ventos de través do quadrante Sudoeste e com componente meridional negativas do vento.

5.3.2 – INFLUÊNCIA DE VÓRTICES CICLÔNICOS DE ALTOS NÍVEIS (VCAN)

Com base nas discussões e levantamento bibliográfico apresentados neste trabalho, fica evidente que vários estudos que analisam variação no regime de ventos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (vale/montanhas) abordam os efeitos de impactos ambientais. [Whiteman e Doran \(1993\)](#) mostraram que a existência de circulação forçada termicamente sobre qualquer vale depende da magnitude dos ventos sinóticos de grande escala. Os resultados obtidos com a ACP indicam que na região de Petrolina-PE os VCAN podem ter papel determinante nas variações observadas na intensidade e, particularmente, na direção do vento em superfície. Neste sentido, as análises apresentadas a seguir tiveram como objetivo avaliar o comportamento do vento associado não apenas com a atuação de VCAN, mas também com a frequência de ocorrência do sistema.

A Tabela 5.2 mostra, simultaneamente, o número de ocorrências de VCAN, ventos de través significativos ($\geq 4,5$ nós) e o total de precipitação registrado em abril no período de 2003 a 2014, em Petrolina-PE. Verifica-se que na maior parte do período as chuvas foram abaixo da média climatológica (93,6 mm), mesmo em anos sob a influência do fenômeno La Niña (2006, 2007, 2011 e 2012) em que podem ser esperadas chuvas acima da média na Região Norte e na Região Nordeste. Apenas nos anos de 2008, 2009 e 2010 ocorreram chuvas acima da média. O aumento no índice pluviométrico ocorreu em função do posicionamento da ZCIT ao Sul da posição climatológica, além de interações com circulações associadas aos VCAN que atuaram na Região ([CLIMANÁLISE, 2008, 2009, 2010](#)). Em média, foram 4,6 dias do mês sob a influência de VCAN. No entanto, os anos de 2003 e 2012, se destacam pelo número elevado de registros e maiores frequências de ventos de través vindos do quadrante Nordeste (TRV_NE), totalizando 8 dias em 2003, com 35,3% de TRV_NE e 11 dias em 2012, em que 93,6% dos ventos de través foram TRV_NE.

Tabela 5.2 – Número de dias de VCAN, ventos de través e total mensal de precipitação registrado no mês de abril, no período de 2003 a 2014.

Ano	dias de VCAN	TRV_NE (%)	TRV_SW (%)	Precipitação (mm)
2003	8	35,3	64,7	70,9
2004	4	2,5	97,5	16,7
2005	4	11,4	88,6	31,9
2006	2	6,2	93,8	62,3
2007	5	5,7	94,3	12,2
2008	5	18,2	81,8	165,0
2009	2	17,3	82,7	223,6
2010	2	2,0	98,0	148,3
2011	5	2,5	97,5	89,8
2012	11	93,8	6,2	0,0
2013	6	7,9	92,1	37,8
2014	2	20,9	79,1	55,6

A frequência de ventos acima de 4,5 nós (significativos), distribuída por quadrantes, com suas respectivas velocidades médias registradas, são apresentados na Tabela 5.3. Observa-se a predominância de ventos do quadrante Sudeste (SE) em todo o período, chegando a 95,37 % dos casos no ano de 2005 e com velocidade média de 7,5 nós. O valor máximo de 9,06 nós foi registrado em 2010. Os demais quadrantes apresentam frequências menores, porém, observa-se um número considerável de ventos do setor Nordeste (NE) no ano de 2012 (24,31 % do total), com velocidade média de 9,01 nós.

A frequência elevada de ventos no quadrante Sudeste pode estar associada com o número de ocorrências de VCAN. [Barbosa Silva et al \(2013\)](#) observaram ventos em quadrantes diferentes do predominante no mês de janeiro em Petrolina e associaram a ocorrência desses ventos com o enfraquecimento dos alísios de Sudeste e a atuação de sistemas precipitantes. [Queiroz et al \(2014\)](#) em estudo sobre eventos extremos de precipitação registrados em janeiro de 2004, na região de Petrolina, verificaram a ocorrência de ventos relativamente mais fortes quando a região estava sob a influência do centro de VCAN.

Diante dos resultados apresentados, a ACP foi aplicada a um novo conjunto de variáveis formado pela inclusão das variáveis ND_VCAN (dias de atuação de VCAN) e defluência do Lago de Sobradinho (DFLS), além da substituição da variável (T–Td) utilizada como parâmetro representativo da contribuição do teor de umidade atmosférica pelo déficit de pressão de vapor (DPV).

Tabela 5.3 – Frequência de ventos significativos por quadrantes e suas velocidades médias associadas. Em que: NE, SE, SO e NO representam os quadrantes Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste, respectivamente.

Ano	Frequência de Ventos Significativos				Velocidade média > 4,5 nós			
	NE	SE	SO	NO	NE	SE	SO	NO
-								
2003	9,94	88,12	0,55	1,38	8,11	8,66	6,50	6,00
2004	3,28	93,00	3,72	-	6,13	8,44	6,94	-
2005	4,23	95,37	0,40	-	6,71	7,50	5,50	-
2006	6,02	86,84	4,89	2,26	6,19	7,71	6,15	6,17
2007	3,50	92,34	3,94	0,22	6,31	7,70	6,44	6,00
2008	6,48	87,04	2,83	3,64	6,00	6,66	5,14	7,33
2009	6,44	78,64	5,08	9,83	5,68	7,48	6,27	6,45
2010	1,80	94,80	2,00	1,40	7,66	9,06	5,90	5,71
2011	2,44	91,81	4,88	0,87	6,36	8,98	6,14	7,20
2012	24,31	75,69	-	-	9,01	8,44	-	-
2013	6,99	84,56	6,99	1,47	6,74	8,34	7,95	6,12
2014	13,22	81,02	4,26	1,49	7,34	7,48	7,75	7,29

O novo conjunto, composto por 10 (dez) variáveis explica 92,2% da variabilidade dos dados, com a retenção de 3 (três fatores). O grau de associação entre os elementos agrupados nos fatores dominantes foi mantido e a nova variável ND_VCAN foi integrada ao conjunto de variáveis do primeiro fator como pode ser visto no diagrama esquemático apresentado na Figura 5.10. Na nova configuração, o primeiro fator (F1) explica 41,6% da variabilidade dos dados. Mesmo que a inclusão dessa variável tenha diminuído o poder explicativo do primeiro fator que, na análise anterior, foi de 43,3% da variabilidade total dos dados, esse resultado ratifica a importância do número de dias de VCAN como parâmetro de avaliação da probabilidade de mudanças importantes no padrão de vento em superfície e geração de ambientes favoráveis aos ventos de través oriundos do setor Nordeste (TRV_NE).

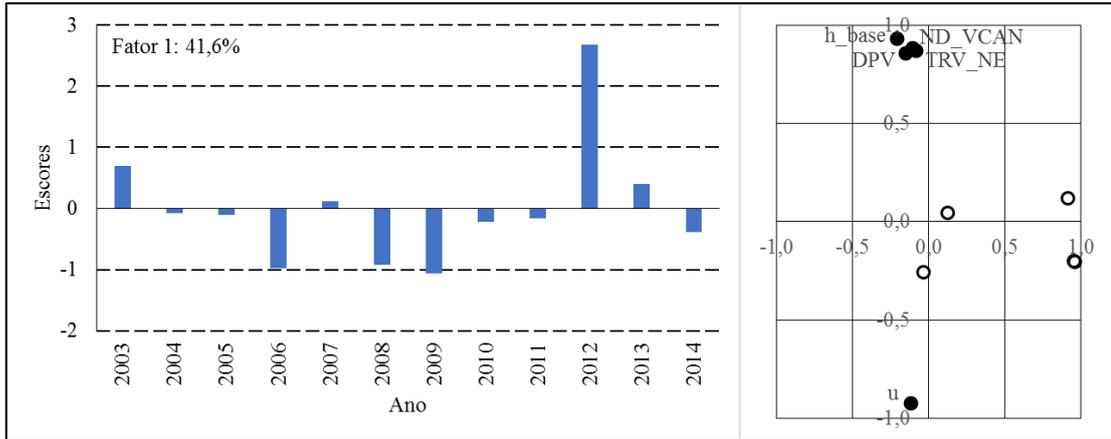


Figura 5.10 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014.

A frequência de ventos significativos de través do quadrante Nordeste (TRV_NE) é apresentada no gráfico ilustrado na Figura 5.11. A linha tracejada, observada no centro da figura, foi utilizada para ressaltar o período de atuação de VCAN na Região Nordeste em abril de 2012 (segunda quinzena do mês).

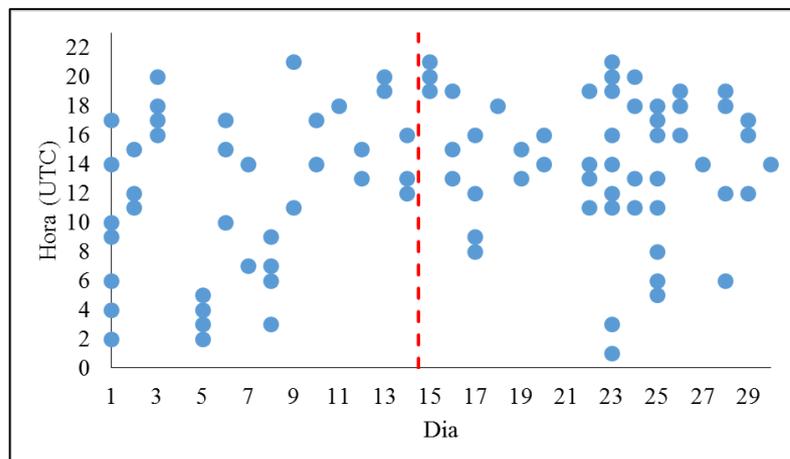


Figura 5.11 – Número de ocorrências de TRV_NE para o mês de abril de 2012.

Observa-se um maior número de ocorrência de TRV_NE nos últimos quinze dias de abril. Esse resultado é um indicativo da influência do posicionamento do centro de VCAN, na mudança de direção do vento em superfície. Observa-se também que o período diurno concentra um número mais expressivo de TRV_NE, o que pode indicar, também, a influência do aquecimento diurno da superfície na geração e modificação de circulações termicamente induzidas.

O teste *t* de Student pareado aplicado ao conjunto de dados de TRV_NE, ao nível de significância de 5%, permitiu detectar que realmente ocorreu um aumento na frequência desse vento no período de atuação de VCAN (Quadro 5.3). No entanto, do ponto de vista estatístico a diferença não é significativa. Esse resultado não descarta a existência de uma relação do tipo causa-efeito. Efetivamente é um indicativo da influência de mecanismos resultantes da interação entre a circulação associada com a subsidência na área central do VCAN e outros fatores ambientais para ocorrência de ventos de TRV_NE na área do aeroporto de Petrolina.

Quadro 5.3 – Resultados estatísticos da ocorrência de TRV_NE no Aeroporto de Petrolina em abril de 2012 (teste *t* de Student). Em que: (>) indica aumento significativo.

Vento de través	Médias		$t_{\text{crítico}} = \pm 2,145$	Significância Estatística
	Dias: 01 a 14	Dias: 15 a 30	$t_{\text{calculado}}$	
TRV_NE	2,600	3,467	1,103	>

No segundo fator (F2), conforme apresentado na Figura 5.12, a inclusão da variável defluência (DFLS) aumentou o poder explicativo do fator, passando a explicar 28% da variabilidade dos dados.

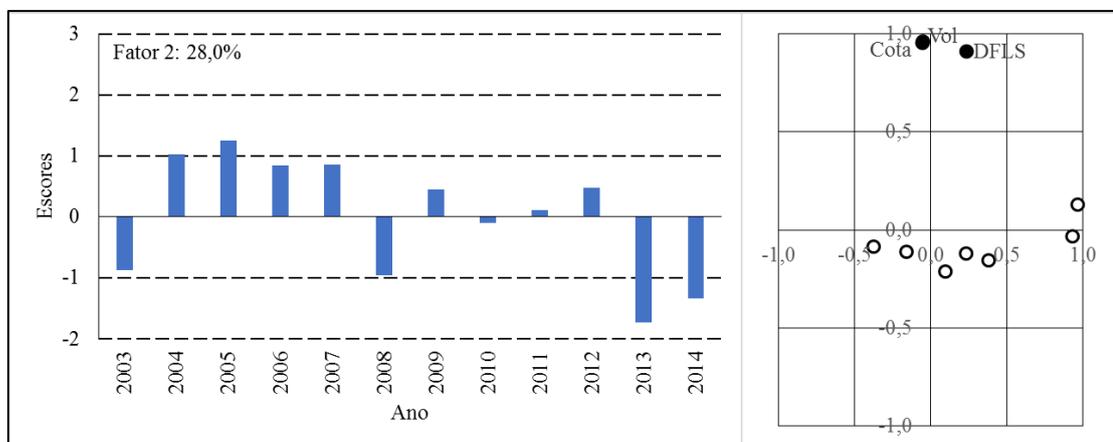


Figura 5.12 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014.

Esse resultado indica que valores máximos de defluência (taxa de liberação de água a jusante de Sobradinho) estão diretamente relacionados com situações de cotas altas. Em situações que um grande volume de água é armazenado na represa de Sobradinho, há uma ligação direta com brisas lacustres mais intensas.

O terceiro fator (Figura 5.13) teve seu poder explicativo reduzido, quando comparado com o resultado anterior (Figura 5.9), passando a explicar 22,5% da variabilidade dos dados.

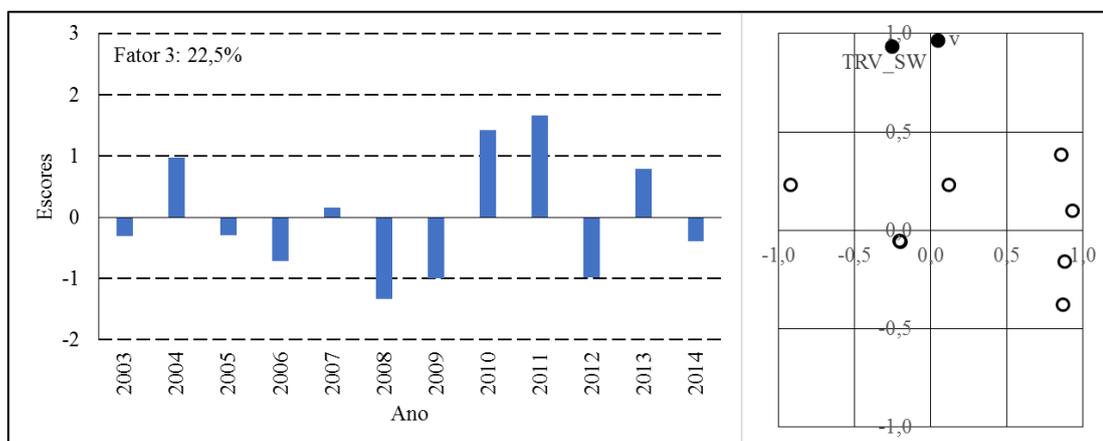


Figura 5.13 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril, incluindo o número de dias de VCAN e a defluência do Lago, no período de 2003 a 2014.

5.3.3 – INFLUÊNCIA DO CICLO DIURNO (MANHÃ E TARDE)

Com o propósito de verificar a influência do aquecimento radiativo solar no comportamento das variáveis meteorológicas utilizadas nesta pesquisa, as análises foram realizadas considerando o período diurno dividido em dois (manhã e tarde). Um conjunto de 13 (treze) variáveis (T, DPV, h_base, P, ND_VCAN, TRV_NE, TRV_SW, PST13, u, v, Cota, Vol e DFLS) foi utilizado neste processo. Os resultados mostram a retenção de quatro fatores, com poder explicativo de 94,0% da variabilidade total dos dados.

O primeiro fator (F1) representado pelo digrama ilustrativo apresentado na Figura 5.14, é responsável por 28,8% da variação dos dados, sendo composto pelas variáveis T (temperatura do ar), DPV (déficit de pressão de vapor), h_base (altura da base das nuvens) e P (pressão atmosférica). Percebe-se claramente que há uma diferença no comportamento da atmosfera no período matutino e vespertino. No período da manhã a pressão atmosférica é mais elevada, enquanto no período da tarde, com o aquecimento da superfície, o valor da pressão é relativamente mais baixo.

No mês de abril de 2012, como visto anteriormente, houve influência da área central de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) durante quase todo o mês (CLIMANÁLISE, 2012) e, possivelmente, o escore elevado registrado no período da tarde nesse ano, com valor próximo de 2 (dois), está diretamente associado com uma atmosfera mais seca e,

consequentemente, com valores altos de DPV e com base mais elevadas das nuvens (menos umidade implica em nível de condensação mais alto). O comportamento médio é visto em todo o período, exceto nos anos de 2012 e 2013 à tarde.

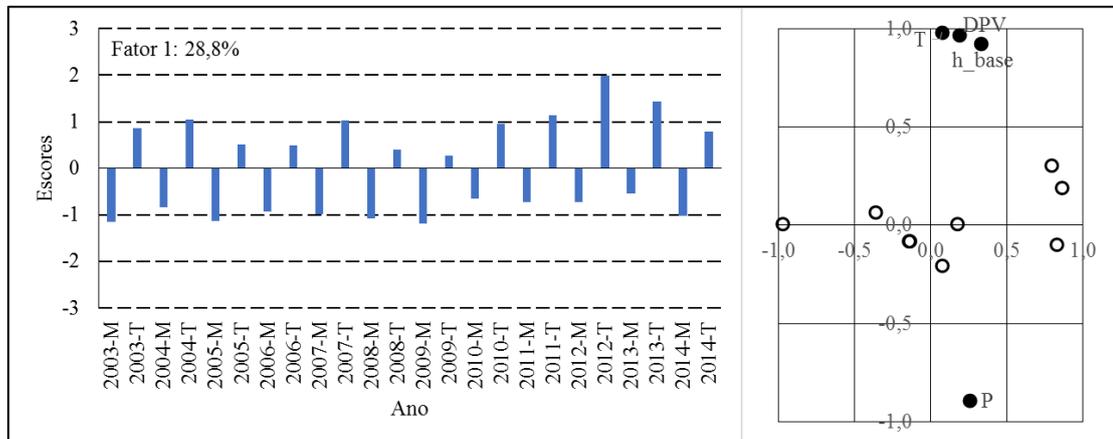


Figura 5.14 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do primeiro fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014.

O segundo fator (Figura 5.15) é representado pelas variáveis ND_VCAN (número de dias de VCAN), TRV_NE (ventos de través do quadrante Nordeste), PST13 (ventos ao longo da pista 13) e u (componente zonal do vento) e explica 26,5% da variabilidade dos dados do período analisado. A série temporal associada a esse fator apresenta escores elevados, superior a 2, para o ano de 2012, atingindo o valor de 2 no período da tarde. Esse resultado indica que nesse ano houve um aumento considerável de TRV_NE em função do aumento no número de dias de VCAN. Além disso, nesse ano há correlação positiva do número de dias de VCAN com ocorrência de ventos ao longo da pista 13 (PST13) no Aeroporto de Petrolina e, consequentemente, com valores negativos da componente zonal (u), que denota ventos vindos do quadrante Sudeste.

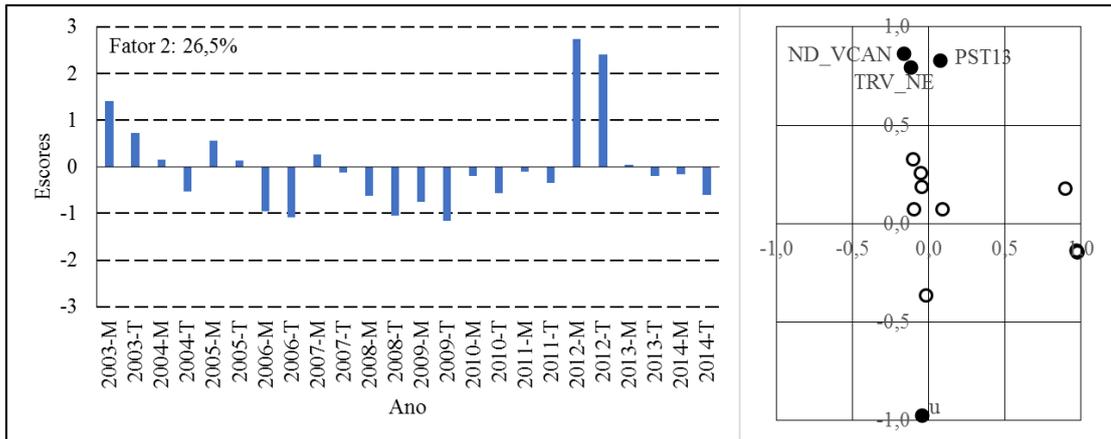


Figura 5.15 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do segundo fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014.

O terceiro fator (F3), ilustrado na Figura 5.16, explica 21,4% da variabilidade dos dados e é composto pelas variáveis cota, volume (Vol) e defluência do Lago de Sobradinho (DFLS). A série temporal desse fator mostra escores negativos significantes, inferiores a -1, nos anos de 2013 e 2014. Esse resultado reflete a influência dos baixos níveis do reservatório de Sobradinho (cota baixa) na intensidade da brisa lacustre, que atingem menores distâncias, por serem mais fracas e, conseqüentemente, nas ocorrências de ventos de través.

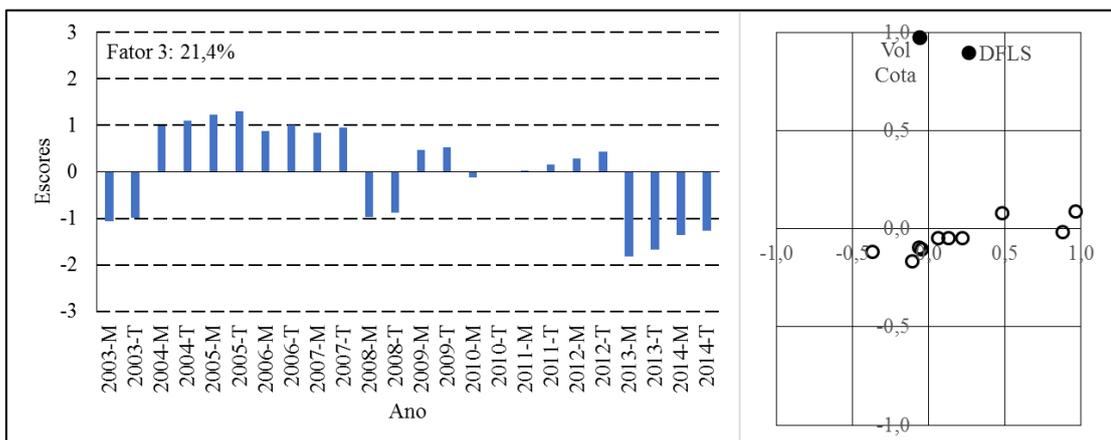


Figura 5.16 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do terceiro fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014.

O quarto fator (F4), ilustrado na Figura 5.17, explica 17,3% da variabilidade dos dados e é representado pela associação entre a componente meridional do vento (v) e a frequência de

través do quadrante Sudoeste (TRV_SW). A série temporal mostra escores significantes (acima de um) e positivos em 2004, 2010 e 2011. Esse resultado indica um acoplamento entre ocorrência de TRV_SW e a componente meridional do vento (v), ou seja, quanto mais forte for a intensidade de v , maior será a probabilidade de ocorrência de ventos de través do quadrante Sudoeste.

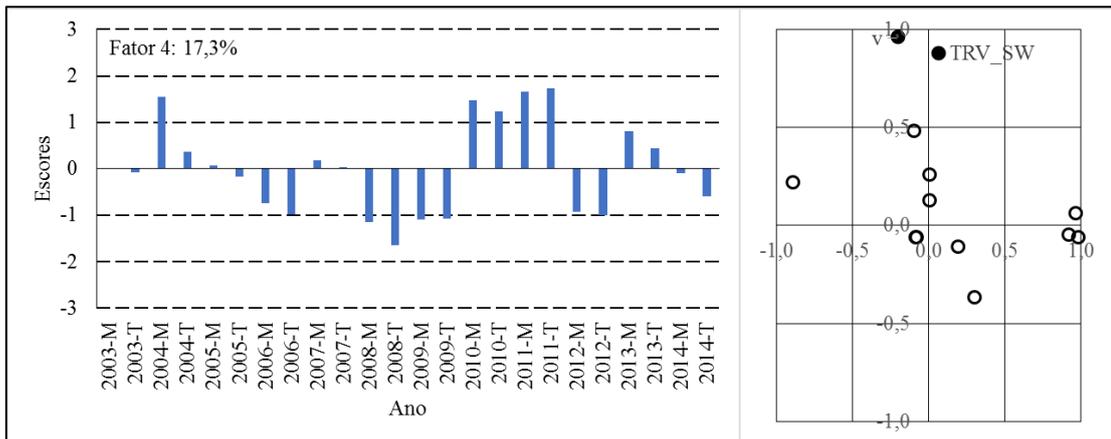


Figura 5.17 – Série temporal dos escores e a representação diagramática das cargas fatoriais do quarto fator para o mês de abril, no período da manhã e da tarde, entre 2003 e 2014.

6 – CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nessa pesquisa, foi possível concluir que:

1. Independente do período analisado (1967-1975 e 2003-2014) ventos oriundos do quadrante Sudeste são predominantes na região de Petrolina PE;
2. Um aumento na intensidade do vento foi verificado no período 2003-2014, principalmente no período de estiagem (maio a outubro). Já no período úmido o aumento na intensidade do vento em Petrolina, atinge valores da ordem de 2 nós acima dos valores encontrados no período 1967-1975;
3. Uma análise diferenciada da frequência de ventos por categoria, considerando a direção do vento em relação ao eixo principal da pista do aeroporto, verificou-se um aumento significativo no registro de ventos de través no período 2003-2014. Esse comportamento é ainda mais expressivo no período de estiagem;
4. A construção da represa de Sobradinho e mudanças no uso da terra no entorno do lago estão entre as principais causas da mudança no padrão de vento local com geração de circulações do tipo brisa e variações significantes na direção do vento;
5. A aplicação da ACP no conjunto de variáveis meteorológicas coletadas no aeroporto de Petrolina incluindo temperatura, pressão, déficit de vapor, altura da base das nuvens, direção e velocidade dos ventos ao longo da pista e ventos de través no período de 2003 e 2014, permitiram verificar que:
 - 5.1.O aumento na frequência de TRV_NE (quadrante nordeste) está relacionado com redução na umidade atmosférica e elevação da base das nuvens, além de menores velocidades da componente u (zonal) do vento, sendo reflexo do enfraquecimento dos ventos alísios de Sudeste, que contribuem para a maior frequência na ocorrência de ventos de través do quadrante Sudoeste (TRV_SW);
 - 5.2.A influência da área central do VCAN (Vórtice Ciclônico de Altos Níveis) contribuiu com um maior número de ventos de través do quadrante Nordeste (TRV_NE) em 2012, mostrando que há uma relação positiva entre o número de registros de VCAN e a frequência de TRV_NE;
 - 5.3.A circulação da brisa lacustre gerada pela construção do Lago de Sobradinho situado ao sul do aeroporto de Petrolina contribuiu com o aumento na frequência de ventos de través do quadrante Sudoeste (TRV_SW).

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBIERI, L. F. P.; CORREIA, M. F.; BRAGA, C. C.; GONÇALVES, W. A.; MOURA, M. S. B. Desempenho de método de estimativa da temperatura média diária: um estudo em áreas com forte pressão antrópica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 4, p. 857-874, 2013.

BARBOSA SILVA, A. **Análise em componentes principais das condições atmosféricas em episódios de rajadas de vento na região metropolitana de Salvador**. 2014. 84p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

BARBOSA SILVA, A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; OLIVEIRA, G. B. Variabilidade do vento no aeroporto de Petrolina: uma análise para o mês de janeiro. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 1., 2013, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande, 2013.

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F. Sistemas convectivos intensos no semiárido brasileiro: o controle da grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 395-410, 2005.

BARRETO, A. B. **Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil**. 2001. 56f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.

BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação média decenal no Estado da Paraíba. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO, 1., CONGRESSO INTERAMERICANO DE METEOROLOGIA, 5., 1992, Madrid. **Anais...** Madrid, 1992. v. 1, p. 292-298.

CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL (CTA). Climatologia de vento e temperatura para aviação. ACA-RT-01/93 CTA/IAE, 1994.

CLIMANÁLISE – BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, v. 23, n. 4, 2008.

CLIMANÁLISE – BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, v. 24, n. 4, 2009.

CLIMANÁLISE – BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, v. 25, n. 4, 2010.

CLIMANÁLISE – BOLETIM DE MONITORAMENTO E ANÁLISE CLIMÁTICA. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, v. 27, n. 4, 2012.

CORRAR, L. J.; PAULO, E; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada:** para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. São Paulo: Atlas, 2007.

CORREIA, A. A. **Padrões de variabilidade do vento à superfície no Nordeste do Brasil.** 2000. 66f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.

CORREIA, M. F. **Impacto das ações antrópicas no clima do Submédio São Francisco:** um estudo numérico e observacional. 181p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CORREIA, M. F.; BEZERRA, J. C.; BARBIERI, L. F. P.; SILVA ARAGÃO, M. R.; GONÇALVES, W. A. Mudanças no uso do solo e variações no padrão de refratividade atmosférica: uma análise numérica e observacional na área do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 4, p. 919-931, 2013.

CORREIA, M. F.; GONÇALVES, W. A.; SILVA ARAGÃO, M. R.; DINIZ, M. C. Mudanças na estrutura termodinâmica da atmosfera na presença de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis: um episódio de precipitação extrema no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, p. 877-890, 2012.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 157-168, 2003.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake area. Part one: an observational analysis. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Austria, v. 94, p. 103-113, 2006a.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Soil occupation and atmospheric variations over Sobradinho lake area. Part two: a regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Austria, v. 94, p. 115 – 128. 2006b.

DINIZ, M. C. S. **Variabilidade climática e ocorrência de cheias na zona semi-árida da bacia hidrográfica do São Francisco**. 101f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DINIZ, M. C. S.; CORREIA, M. F.; MELO, E. C. S.; FARIAS, W. R. G.; SILVA ARAGÃO, M. R. Episódios de cheia na região semi-árida da bacia do rio São Francisco em abril de 1985: um estudo das escalas dominantes e condições atmosféricas associadas. **Revista Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 1, p. 277-298, jan./mar. 2011.

DINIZ, M. C. S.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R. Convecção profunda no submédio do rio São Francisco: uma avaliação das condições atmosféricas na área do aeroporto de Petrolina-PE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 273-285, 2004.

EMBRAPA SEMIÁRIDO. Sistemas de Produção, 1. **Versão Eletrônica**, Petrolina, 2ª ed., ago. 2010. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/#uva>> Acesso em: 24 mai. 2015.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 4ª ed., 2009.

FOGACCIA, C. V. C. **Análise de eventos de turbulência e cisalhamento do vento na área do aeroporto internacional de São Paulo/Guarulhos**. 130p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GANDU, A. W.; SILVA DIAS, P. L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal of Geophysics Research**, Washington, v. 103, p. 6001-6015, 1998.

GOOGLE MAPS. Localização do aeroporto de Petrolina-PE Senador Nilo Coelho, 2015. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Aeroporto+de+Petrolina>> Acesso em: 2 mai. 2015.

HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 6ª ed., 2009.

ICEA – INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Radioperador em plataforma marítima: CNS 014**. São José dos Campos, SP, fev. 2008.

INFRAERO CARGO. Movimentação das cargas. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/cargo/index.php/mais-informacoes/programa-infraero-eficiencia-logistica>> Acesso em: 3 mai. 2015.

INFRAERO. Informações sobre o aeroporto de Petrolina-PE. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/pesquisa.html?searchword=petrolina&ordering=newest&searchphrase=all&limit=0>> Acesso em: 2 mai. 2015.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília, DF, 2009.

JIMÉNEZ, P. A.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; MONTÁVEZ, J. P.; NAVARRO, J.; GARCIA-BUSTAMANTE, E.; VALERO, F. Surface wind regionalization in complex terrain. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Washington, v. 47, p. 308-325, 2008.

KLINK, K. Climatological mean and interannual variance of United States surface wind speed, direction and velocity. **International Journal of Climatology**, United Kingdom, v. 19, p. 471-488, 1999.

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, Munksgaard, v. 33, n. 6, p. 538-551, feb. 1981.

LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction**. Sci. Rep. no 1. Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, Cambridge, Massachusetts (EUA), MIT, 49 p., 1956.

MANLY, B. F. J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**. Porto Alegre: Bookman, 2008, 3ª ed., 229 p., ISBN 978-85-7780-185-5.

MELLO, N. G. S.; SAKAMOTO, M. S.; TORSANI, J. A. Estudo de caso de um sistema convectivo de mesoescala (SCM) observado no Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão, **Anais...** v. 2, p. 887-890, Campos do Jordão, 1996.

MELO, E. C. S. **Simulação numérica das interações biosfera-atmosfera em área de caatinga: uma análise da expansão agrícola em ambiente semiárido**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MELO, E. C. S.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 229-241, 2013.

MISHRA, S. K.; RAO, V. B.; GAN, M. A. Structure and evolution of the large-scale flow and an embedded upper-tropospheric cyclonic vortex over Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 129, n. 7, p. 1673-1688, July 2001.

NWS-NOAA – NATIONAL WEATHER SERVICE – NATIONAL AND OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - Thunderstorm Hazards - Damaging Wind, 2014. Disponível em: <<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/wind.htm>> Acesso em: 29 mai. 2015.

OLIVEIRA SILVA, P. K. **Análise multivariada aplicada ao vento na área costeira do Nordeste do Brasil**. 61p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

OLIVEIRA SILVA, P. K.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; BARBOSA SILVA, A. Detecção de padrões homogêneos de vento. Parte 2: análise de agrupamento. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. Especial, ed. Suplementar, p. 347-350, 2011.

QUEIROZ, J. N.; SOUSA, L. F.; RIBEIRO, R. E. P.; SILVA ARAGÃO, M. R., CORREIA, M. F. Fatores físicos na atmosfera do semiárido brasileiro em janeiro de 2004. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 5, p. 990-1001, (Número Especial - VIWMC RHPE), 2014.

RAMIREZ, M. C. V. **Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos de altos níveis no Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

REDEMETS – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica. Consulta de mensagens OPMET, 2014. Disponível: < <http://www.redemet.aer.mil.br/?i=produtos&p=consulta-de-mensagens-opmet>> Acesso em: 28 set. 2014.

RIBEIRO, R. E. P.; SILVA ARAGÃO, M. R.; QUEIROZ, J. N.; SOUSA, L. F.; CORREIA, M. F. Mecanismos físicos em mês extremo chuvoso na cidade de Petrolina. Parte 3: características termodinâmicas e do vento. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 1., 2013, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande, 2013.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **International Journal of Climatology**, United Kingdom, v. 6, p. 293-335, 1986.

SANTOS SILVA, F. D.; CORREIA, M. F.; SILVA ARAGÃO, M. R.; SILVA, J. M. Convecção linearmente organizada na área de Petrolina, semiárido do Nordeste do Brasil: aspectos em meso e grande escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 292-304, 2008.

SANTOS, A. H. M.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H. A.; BARBOSA SILVA, A. Distúrbio ondulatório de leste e seus impactos na cidade de Salvador. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 355-364, 2012.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; SOBRAL, Z. R. Vento à superfície e chuva em anos contrastantes no Submédio São Francisco. In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2., 1997, Presidente Prudente. **Boletim climatológico...** ano 2, n. 3, p. 213-217, Presidente Prudente, jul. 1997.

SILVA ARAGÃO, M. R.; MENDES, M. C. D.; CAVALCANTI, I. F. A.; CORREIA, M. F. Observational study of a rainy January day in the Northeast Brazil semi-arid region: synoptic and mesoscale characteristics. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, United Kingdom, v. 133, p. 1127-1141, 2007. DOI 10.1002/qj.81.

SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, H.A. Characteristics of C-Band meteorological radar echoes at Petrolina, Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, United Kingdom, v. 20, p. 279-298, 2000.

SILVA, L. A. **A influência dos vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) sobre a precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

SOUZA, P. P. **Estudo da atuação de um sistema de latitudes médias no semiárido do Nordeste do Brasil.** 102p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.

SPIEGEL, M. R. **Probabilidade e estatística.** Tradução: Alfredo Alves de Farias. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 518p, 1978.

STORCH, H.; ZWIERS, F. W. **Statistical Analysis in Climate Research**. Cambridge: Cambridge University Press (Virtual Publishing), 484p. ISBN 0 511 01018 4 virtual (net Library Edition), 2003.

WHITEMAN, C. D.; DORAN, J. C. The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley. **Journal of Applied Meteorology**, Richland, v. 32, n. 11, p. 1669-1682, 1993.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. Elsevier Academic Press Publications, 627p. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. ISBN 10: 0-12-751966-1, 2006.