



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DANILO SIDEN BATISTA SANTOS SILVA**

**CASOS DE WINDSHEAR NOS AEROPORTOS DAS CAPITAIS DO NORDESTE**  
**BRASILEIRO**

**MACEIÓ**  
**2023**

DANILO SIDEN BATISTA SANTOS SILVA

CASOS DE WINDSHEAR NOS AEROPORTOS DAS CAPITAIS DO NORDESTE  
BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Ciências Atmosféricas da  
Universidade Federal de Alagoas, para a  
obtenção do Grau de Bacharel em  
Meteorologia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Natalia Fedorova

MACEIÓ

2023

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586c Silva, Danilo Siden Batista Santos.  
Casos de *windshear* nos aeroportos nas capitais do nordeste brasileiro / Danilo Siden Batista Santos Silva. – 2023.  
126 f. : il.

Orientador: Natalia Fedorova.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 87-97.  
Apêndices: f. 98-126.

1. *Windshear*. 2. Brasil, Nordeste. 3. Meteorologia aeronáutica e marítima. I. Título.

CDU: 551.5:629.73

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que em Sua infinita misericórdia me concedeu a vida, saúde e condições de me dedicar a esse trabalho.

Agradeço a toda minha família, especialmente aos meus pais, Edinaldo Santos da Silva e Sirlei Batista dos Santos, por sempre me apoiarem e acreditarem na importância da educação.

A todos os professores do corpo docente do ICAT, por fazer desse instituto um ambiente propício para as atividades acadêmicas. Em especial à minha orientadora, a professora Natalia Fedorova, que tão pacientemente me guiou na elaboração desse trabalho.

A todos os colegas com quem tive a honra de dividir as instalações do ICAT, em especial a Thayna, Ittalo, Felipe, Glenda, Marcelo, Mose, Dhiego, Camila e Davidson, que me acompanharam nessa etapa da minha vida.

## RESUMO

O presente trabalho almeja contribuir com a segurança aérea e preencher uma lacuna no estudo de wind shear (WS) no Brasil, particularmente na região Nordeste. O objetivo principal é analisar a ocorrência de WS nos aeroportos das capitais da região, determinar as condições de tempo e os sistemas sinóticos associados. O período escolhido foi de dois anos (de 1 de janeiro de 2017 a 31 de dezembro de 2018). Os casos foram escolhidos com base nos dados de METAR de cada aeroporto. Também foram analisados o tempo presente e dados de radar meteorológico nos aeroportos (REDEMET). As análises sinóticas foram feitas usando dados da Reanalysis II (NCEP/DOE, resolução  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ ) e imagens do satélite GOES-16 (DSA). A estrutura vertical da atmosfera foi examinada usando dados da reanálise ERA5 (CDS, resolução  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ ), ou de radiossondagem (U. Wyoming), quando disponível. No período estudado registraram-se 58 casos de WS, a maior parte na estação chuvosa de 2017, especificamente no mês de julho. Os horários mais frequentes foram nos períodos da tarde e da noite (entre 15-18h UTC, e 23-02h UTC). O aeroporto mais afetado foi o de Salvador com 35 reportes. Em segundo lugar, Natal com 10 casos, seguido de Fortaleza, João Pessoa e Recife (5, 4 e 2 reportes, respectivamente). Aracaju e Teresina registraram 1 evento cada, enquanto não houve reporte em São Luís e Maceió. Os principais sistemas sinóticos atuantes durante esses casos foram as zonas frontais unidas ou não com a Zona de Convergência Intertropical - ZCIT (24 casos), seguidas pelos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis - VCANs (11) e pelas Perturbações Ondulatórias nos Alísios - POAs (3). A atuação isolada da ZCIT foi diagnosticada em um único caso. As condições de tempo mais frequentes em Salvador foram: ventos com alguma componente de leste, velocidade moderada, sem rajadas ou variação na direção, mais de 50% do céu com nuvens, altura das bases em médios níveis, presença de Cumulus Congestus e precipitação. A visibilidade foi reduzida em 15 dos casos, névoa úmida foi registrada em quatro eventos. A análise de perfis verticais de radiossondas e simulados casos revelou a predominância de instabilidade em baixos níveis em todos os aeroportos, exceto em Natal, onde houve uma maior proporção de inversões térmicas. As condições observadas com mais frequência nos demais aeroportos foram diferentes: ventos de sul com rajadas e/ou variação de direção; nebulosidade de base baixa cobrindo até 50% do céu, sem precipitações. A visibilidade horizontal foi sempre superior a 10 km. Nas poucas ocasiões onde houve registro de nuvens Cumulus Congestus, houve também precipitações.

**Palavras-chave:** windshear; Nordeste Brasileiro; meteorologia aeronáutica.

## ABSTRACT

The present study contributes to aviation safety and fills a gap in wind shear (WS) research in Brazil, particularly in the Northeast region. The main goal is to analyze the occurrence of WS at the airports of the region's capitals, to determine the associated weather conditions and synoptic systems. The selected period was two years (January 1, 2017, to December 31, 2018). The cases were chosen based on METAR data of each airport. Present weather and weather radar data on the airports (REDEMET) were also analyzed. Synoptic analyses were performed using data from Reanalysis II (NCEP/DOE,  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  resolution) and GOES-16 (DSA) satellite imagery. The atmosphere's vertical structure was examined using data from ERA5 reanalysis (CDS, resolution  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ), or radiosonde (U. Wyoming), when available. In the studied period, 58 cases of WS were registered, most of them in 2017's rainy season, specifically in July. The most frequent times were the afternoon and the night hours (between 15-18h UTC, and 23-02h UTC). The most affected airport was Salvador with 35 reports. Natal is second with 10 cases, followed by Fortaleza, João Pessoa and Recife (5, 4 and 2 reports, respectively). Aracaju and Teresina recorded 1 event each, while São Luís and Maceió had no reports. The main active synoptic systems during these cases were frontal zones united or not with the Intertropical Convergence Zone - ITCZ (24 cases), followed by Upper Tropospheric Cyclonic Vortex - UTCVs (11) and Wave Disturbance in Trade Winds - WDTWs (3). The isolated action of ITCZ was diagnosed in single case. The most frequently weather conditions in Salvador were: wind with any easterly component, moderate wind velocity, no gusts and no change in direction, more than 50% of the sky in cloudy, the height of the clouds base at middle levels, the presence of Cumulus Congestus, and precipitation. Visibility was reduced in 15 cases, mist was recorded in four events. Analysis of radiosonde and simulated vertical profiles revealed the predominance of low-level instability in all airports, except Natal, where there was a greater proportion of thermal inversions. The most frequently observed conditions at other airports were different: south winds with gusts and/or change in direction; low-level cloudiness covering up to 50% of the sky, no rainfalls. Horizontal visibility was always greater than 10 km. On the few events where Cumulus Congestus have been recorded, precipitation has also occurred.

**Key Words:** windshear; Northeast Brazil; aeronautical meteorology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aeronave encontrando WS durante a aproximação.....	16
Figura 2: Aeronave encontrando WS durante decolagem.....	16
Figura 3: turbulência de WS associada com inversão térmica.....	17
Figura 4: modelos de zonas frontais.....	25
Figura 5: Aspectos da ZCIT.....	26
Figura 6: Seção vertical esquemática através do sistema do VCAN.....	28
Figura 7: Distribuição idealizada da nebulosidade associada a um VCAN.....	28
Figura 8: Campo de linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 600 hPa mostrando um vórtice ciclônico de médios níveis.....	29
Figura 9: Padrão de circulação em baixos níveis associado a POAs.....	30
Figura 10: Altura do feixe para cada elevação da antena do radar.....	36
Figura 11: Esquema simplificado da construção de um CAPPI.....	36
Figura 12: Composição de um produto semelhante ao “maxcappi” .....	37
Figura 13: Inversão térmica próxima à superfície no Aeroporto de Brasília.....	38
Figura 14: localização dos aeroportos das capitais do NEB dentro da área de estudo dos sistemas sinóticos.....	41
Figura 15: Número de reportes de WS nos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste brasileiro.....	47
Figura 16: Localização e números de reportes de WS nos anos de 2017 e 2018 em cada aeroporto das capitais do nordeste brasileiro.....	48
Figura 17: Número de reportes de WS em cada horário nos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.....	49
Figura 18: Número de casos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.....	49

Figura 19: Número de reportes de WS em cada mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.....	50
Figura 20: Número de eventos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju.....	58
Figura 21: Número de eventos de WS em cada hora, de 2017 e 2018, nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju.....	59
Figura 22: Número de eventos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018, no Aeroporto de Salvador.....	61
Figura 23: número de eventos de WS em cada hora, de 2017 e 2018, no Aeroporto de Salvador.....	61
Figura 24: Sistemas sinóticos presentes nos eventos de WS nos aeroportos das capitais do nordeste nos anos de 2017 e 2018.....	64
Figura 25: Sistemas atuantes nos casos de WS reportados em aeroportos das capitais do nordeste em 2017 e 2018.....	67
Figura 26: CAPPI 5Km – Salvador 11/12/2017 (01h).....	76
Figura 27: CAPPI 3Km – Salvador 25+26/08/2017 [22-23-00-01] (00:36h).....	76
Figura 28: CAPPI 3Km – Natal (SBSG) 12/06/2018 [16h].....	77
Figura 29: CAPPI 3Km – Natal 10/12/2018 [15h] (14:50).....	78
Figura 30: CAPPI 10Km – Natal 10/12/2018 [15h] (15:10).....	79
Figura 31: MAXCAPPI – Aracaju 17/06/2018 [18h] (17:50).....	81
Figura 32: CAPPI 3Km – Recife 23/01/2018 [16h].....	82
Figura 33: CAPPI 10Km – Recife 23/01/2018 [16h].....	82
Figura 34: CAPPI 5 Km – João Pessoa (vista pelo radar de Natal) 10/07/2017 [20h] (19:24h).....	83
Figura 35: MAXCAPPI – João Pessoa (vista pelo radar de Maceió) 10/07/2017 [20h].....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do gradiente vertical de velocidade do vento.....	15
Tabela 2: Números de pousos e decolagens nos aeroportos das capitais do Nordeste em 2017. .....	22
Tabela 3: Números de pousos e decolagens nos aeroportos das capitais do Nordeste em 2018. .....	23
Tabela 4: quantificação da instabilidade atmosférica pelo CAPE. ....	31
Tabela 5: quantificação da instabilidade atmosférica pelo CIN.....	32
Tabela 6: quantificação da instabilidade atmosférica pelo LI.....	33
Tabela 7: valores de água precipitável e interpretação correspondente da umidade.....	34
Tabela 8: Número de eventos de WS nos aeroportos das capitais do nordeste nos anos de 2017 e 2018.....	42
Tabela 9: Números de eventos (N) e números de eventos consecutivos, ou grupos (G) de WS no aeroporto de Salvador nos anos de 2017 e 2018.....	46
Tabela 10: Duração dos grupos reportados em Salvador.....	47
Tabela 11: Condições observadas durante os eventos de WS em Fortaleza nos anos de 2017 e 2018.....	48
Tabela 12: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Fortaleza.....	51
Tabela 13: Condições observadas durante os eventos de WS em João Pessoa nos anos de 2017 e 2018.....	51
Tabela 14: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em João Pessoa.....	52
Tabela 15: Condições observadas durante os eventos de WS em Teresina, Aracaju e Recife nos anos de 2017 e 2018.....	53

Tabela 16: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Teresina, Aracaju e Recife.....	53
Tabela 17: Condições observadas durante os eventos de WS em Natal nos anos de 2017 e 2018.....	54
Tabela 18: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Natal.....	55
Tabela 19: Números de eventos (N) de diversas velocidades (V em kt e em escala Beaufort, B) e direção de vento – D, em graus (°) e setor da rosa dos ventos (S) – e com rajadas do vento nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.....	56
Tabela 20 - Números de eventos (N) de diferentes coberturas de nuvens (C), Temperatura (T (°C)) e T-Td (°C) nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife. ....	57
Tabela 21: Altura da base das nuvens nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife. ....	57
Tabela 22: Condições observadas durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Salvador.....	58
Tabela 23: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Salvador. ....	58
Tabela 24: Números de eventos (N) de diversas velocidades (V, em kt e B em escala Beaufort) e direção do vento (D em graus (°) e S em setor da rosa dos ventos) e com rajadas de vento nos eventos reportados em Salvador.....	62
Tabela 25: Número de eventos (N) de diferentes coberturas de nuvens (C), temperatura (T(°C)) e T-Td (°C) nos eventos reportados em Salvador. ....	63
Tabela 26: Número de eventos (N) com presença de nuvens do tipo Cumulus Congestus (Cu con), chuva (Chv) e visibilidade horizontal (km) em Salvador nos anos de 2017 e 2018. ....	63
Tabela 27: Altura da base das nuvens nos eventos reportados em Salvador.....	64

Tabela 28: Sistemas sinóticos atuantes nos casos de WS nos aeroportos das capitais do NEB.....	65
Tabela 29: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais simulados do ERA5 de Salvador. ....	67
Tabela 30: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais observados de Natal.....	68
Tabela 31: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais simulados do ERA5 de Aracaju, Recife, João Pessoa, Fortaleza e Teresina. ....	68
Tabela 32: Índices de instabilidade nos eventos de Salvador.....	69
Tabela 33: Índices de instabilidade nos eventos de Natal.....	70
Tabela 34: Índices termodinâmicos de instabilidade nos eventos de Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Recife e Teresina.....	70
Tabela 35: Número e tipos de inversões por perfil. ....	71
Tabela 36: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Salvador.....	72
Tabela 37: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Natal.....	73
Tabela 38: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Recife e Teresina. ....	73
Tabela 39: As informações de radar nos casos de WS em Salvador.....	75
Tabela 40: As informações de radar nos casos de WS em Natal.....	77
Tabela 41: As informações de radar nos casos de WS em Aracaju, João Pessoa e Recife.....	80

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	18
2.1	GERAL .....	18
2.2	ESPECÍFICOS .....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	<i>Wind shear</i> em Aeroportos Brasileiros .....	19
3.2	Sobre os Aeroportos das capitais do Nordeste Brasileiro .....	21
3.3	SISTEMAS SINÓTICOS ASSOCIADOS.....	23
3.2.1	Zonas Frontais .....	23
3.2.2	Zona de Convergência Intertropical .....	25
3.2.3	Zonas Frontais e ZCIT .....	26
3.2.4	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis.....	27
3.2.5	Vórtice Ciclônico de Médios Níveis .....	29
3.2.6	Perturbações Ondulatórias dos Alísios.....	30
3.3	ANÁLISE TERMODINÂMICA .....	31
3.3.1	Convective Available Potential Energy .....	31
3.3.2	Convective Inhibition.....	32
3.3.3	Lifted Index .....	33
3.3.4	Água precipitável .....	33
3.4	Reporte Meteorológico de Aeródromo.....	34
3.5	RADAR Meteorológico .....	35
3.6	Satélite meteorológico.....	38
3.7	Reanálise .....	39
3.7.1	Reanalysis II.....	39
3.7.2	ERA5.....	39
3.8	QGIS (versão 3.10) .....	39
3.9	GrADS.....	39
3.10	Linguagem de programação R (versão 4.1) .....	40
3.11	Linguagem de Programação Python (versão 3.9) .....	40
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	41
4.1	Área e período de estudo .....	41
4.2	Obtenção de METAR.....	41

4.2.1	Escala Beaufort .....	42
4.3	Dados de RADAR Meteorológico .....	42
4.4	Obtenção de imagens de satélite meteorológico .....	43
4.5	<i>Download</i> da Reanalysis II .....	43
4.6	<i>Download</i> do ERA5 .....	43
4.7	Função do QGIS.....	44
4.7.1	Obtenção de <i>Shapefiles</i> .....	44
4.8	Uso do GrADS .....	44
4.9	Utilização de R.....	44
4.10	Utilização de Python .....	45
4.11	Observações em altitude.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	46
5.1	Ocorrências de <i>wind shear</i> .....	46
5.2	Condições de tempo durante os eventos de <i>wind shear</i> .....	50
5.2.1	Aeroporto de Fortaleza.....	50
5.2.2	Aeroporto de João Pessoa .....	52
5.2.3	Aeroportos de Teresina, Aracaju e Recife.....	53
5.2.4	Aeroporto de Natal .....	54
5.2.5	Sumário de condições de tempo durante os eventos de WS nos anos de 2017 e 2018 nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.....	56
5.2.6	Condições de tempo durante os eventos de <i>wind shear</i> nos anos de 2017 e 2018 no Aeroporto de Salvador .....	59
5.3	Sistemas sinóticos atuantes durante os eventos de <i>wind shear</i> .....	64
5.4	Estrutura da troposfera durante os eventos de <i>wind shear</i> .....	67
5.5	Características termodinâmicas de troposfera nos sistemas sinóticas durante os eventos de <i>wind shear</i> .....	72
5.6	Análise de eventos de <i>Wind shear</i> pelos dados de radar meteorológico .....	73
5.6.1	As informações de radar nos casos de WS em Salvador.....	74
5.6.2	As informações de radar nos casos de WS em Natal .....	77
5.6.3	As informações de radar nos casos de WS em Aracaju, João Pessoa e Recife .....	79
6	CONCLUSÕES.....	85
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	88
	APÊNDICE A – Interpretação de uma mensagem METAR.....	99
	APÊNDICE B – Calcular vorticidade relativa e gerar arquivo NetCDF com GrADS .....	100
	APÊNDICE C – Recortar área de arquivo NetCDF com Grads .....	101

APÊNDICE D – Programa em R para obter mensagens METAR com a API-REDEMET .....	102
APÊNDICE E – Programa em R para obter e plotar imagens RADAR da API-REDEMET .....	104
APÊNDICE F – Programa em R para plotar linhas de corrente, vorticidade relativa, corrente de jato e altura geopotencial .....	112
APÊNDICE G – Programa em R para seleção de dados de arquivos NetCDF do ERA5 para elaborar perfil vertical .....	120
APÊNDICE H – Programa em R para calcular índices termodinâmicos.....	123
APÊNDICE I – Programa em Python para desenhar diagrama Skew-t log-p.....	124
APÊNDICE J – Condições observadas durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Salvador.....	126

## 1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos meteorológicos possuem grande importância no setor da aviação. Para garantir a regularidade, eficiência e segurança das atividades aeronáuticas ao redor do mundo, a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) estabeleceu padrões e recomendações no fornecimento dos serviços meteorológicos para essa indústria (POTTS; GILL, 2014).

*Wind shear* (WS), também chamado de cortante de vento, tesoura de vento, cisalhamento do vento ou gradiente do vento pode ser definido como uma forte variação que ocorre na direção e/ou velocidade do vento (tabela 1) em uma determinada distância (MONTEIRO *et al.*, 2005).

Em 1975 um avião da *Eastern Airlines* caiu próximo à cabeceira da pista 22L do aeroporto John F. Kennedy, em Nova York. A investigação apontou o WS como uma das principais causas desse evento trágico. A partir dessa conclusão, foram reinvestigados acidentes aeronáuticos anteriores que haviam sido atribuídos a erros de pilotagem, mas que tinham WS como causa principal (CABRAL; ROMÃO, s.d.).

Uma revisão dos acidentes e incidentes aeronáuticos reportados ao redor do mundo entre 1959 e 1983 revelou que 51 eventos meteorológicos estiveram relacionados a WS (FAA, 1988).

**Tabela 1: Classificação do gradiente vertical de velocidade do vento.**

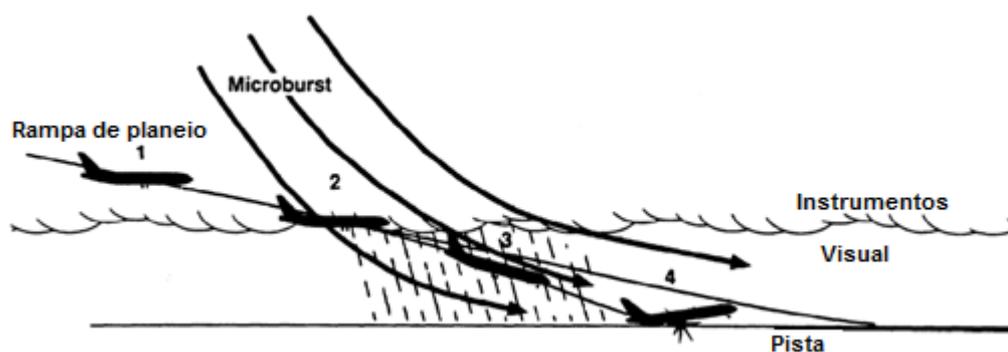
<b>Intensidade</b>	<b>Gradiente Vertical</b>
Leve	0 a 4 nós / 100 pés
Moderada	5 a 8 nós / 100 pés
Severa	9 a 12 nós / 100 pés
Intensa	> 12 nós / 100 pés

Fonte: ANAC, 2018 (adaptado).

Pode ocorrer em quaisquer níveis de voo, sendo mais perigosa a sua ocorrência em níveis baixos – até 2.000 pés ou 610 metros –, onde se dão as manobras de aproximação (figura 1), pouso, decolagem (figura 2) e subida inicial (ANAC, 2018).

**Figura 1: Aeronave encontrando WS durante a aproximação.**

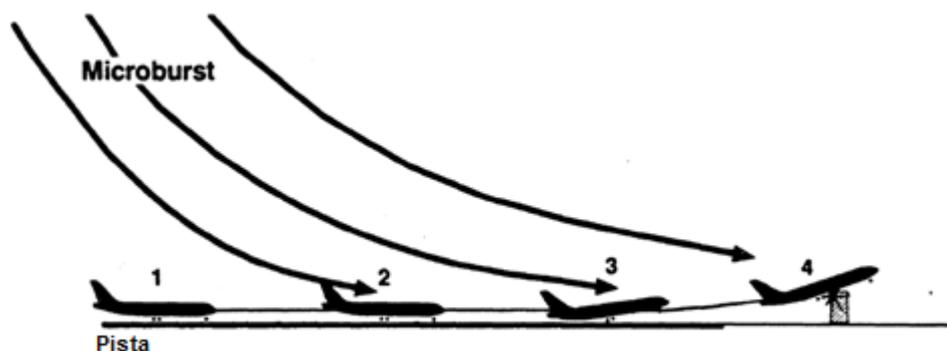
- (1) Inicialmente a aproximação aparenta ser normal;
- (2) Encontro com correntes descendentes e vento de cauda na zona de transição;
- (3) Perda de velocidade aerodinâmica combinada com perda de referências visuais resulta em redução do *pitch*;
- (4) Aeronave colide com o solo antes da pista.



Fonte: FAA (1988).

**Figura 2: Aeronave encontrando WS durante decolagem.**

- (1) Inicialmente a decolagem aparenta ser normal;
- (2) O ganho de velocidade aerodinâmica diminui devido ao WS;
- (3) A aeronave começa a sair do chão, mas não consegue ganhar altitude;
- (4) A aeronave colide com obstáculo depois da pista.



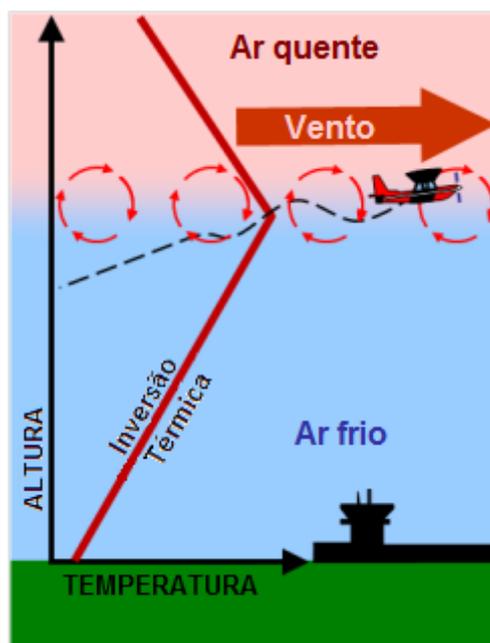
Fonte: FAA (1988).

A troposfera é camada atmosférica mais próxima da superfície da Terra. Tal proximidade proporciona uma interação contínua dessa camada com o solo, com movimentos verticais que causam transferência de calor e vapor d'água para os níveis superiores da troposfera. Conforme o ar atmosférico se afasta da sua fonte de calor, a sua temperatura tende a diminuir, isto é, normalmente a troposfera apresenta um decréscimo de temperatura com a altura (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Em determinadas circunstâncias, devido a resfriamento radiativo noturno da superfície terrestre, turbulência próxima da superfície, passagem de zonas frontais ou movimentos descendentes, formam-se camadas da troposfera onde a temperatura aumenta ou não muda com a altura. Essas camadas recebem o nome de inversões térmicas e isotermias, respectivamente (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O WS pode estar presente em camadas de inversão térmica (figura 3), na passagem de sistemas frontais, nuvens convectivas, por efeito orográfico e em *downbursts* – fortes correntes descendentes de ar associadas a tempestades, e as suas versões em escala inferior: os *microbursts* – (FAA, 2022).

**Figura 3: turbulência de WS associada com inversão térmica.**



Fonte: FAA (2022).

Ainda são poucos os estudos que trazem uma melhor compreensão do estado da atmosfera durante os episódios de WS no Brasil, principalmente em aeroportos da região Nordeste. Isso reforça a importância desse trabalho para a segurança aérea no País. A seguir serão mostrados os objetivos da presente pesquisa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Investigar quais sistemas meteorológicos de escala sinótica estão atuantes durante ocorrências de *wind shear* em aeroportos das capitais do Nordeste Brasileiro nos anos de 2017 e 2018.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Analisar as condições de tempo presente associadas à ocorrência de *wind shear*;
- Identificar os horários do dia e meses do ano com mais casos desse fenômeno;
- Verificar dados de radar meteorológico no momento do registro de *wind shear*;
- Avaliar as condições termodinâmicas sobre os aeroportos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo contém uma revisão de alguns estudos sobre WS em aeroportos brasileiros, além de listar os sistemas meteorológicos que atuam no NEB e trazer algumas informações sobre os aeroportos investigados nesse trabalho. Adicionalmente também se discorre sobre as ferramentas e os dados utilizados na pesquisa.

#### 3.1 *Wind shear* em Aeroportos Brasileiros

Ao analisar a formação de WS no Aeroporto de Guarulhos entre 01/06/2006 e 01/07/2007, Leirias (2007) aponta mais frequência nos meses de verão, sendo o período de ocorrência entre as 12 h e 18 h, enquanto nos meses de julho, agosto e setembro, entre 06 h e 12 h. A autora conclui que em um dos casos examinados o WS foi provocado por movimentos ascendentes da formação de um CCM na extremidade de uma frente fria. No segundo caso houve WS em condições de céu claro, com movimentos subsidentes numa inversão térmica. Ela sugere ainda que se faça uma análise dos sistemas sinóticos associados às ocorrências de WS.

Em situações pré-frontais, o vento sobre o Aeroporto de Guarulhos sopra de noroeste, lado das pistas onde há uma serra. Com velocidades mais intensas, a ocorrência de WS devido a fatores orográficos na área de aproximação desse aeródromo é favorecida (COSTA, 2008).

Durante a passagem de um sistema frontal sobre a Bahia houve registros de WS no Aeroporto de Salvador nos dias 10 e 11 de maio de 2007. Os fortes ventos também provocaram desabamento e destelhamento de imóveis na cidade (SILVA; ARAGÃO; CORREIA, 2009).

Entre os acidentes aeronáuticos ocorridos no mundo entre 1943 e 2009, o WS é um dos agentes meteorológicos contribuintes mais cotados, tanto do ponto de vista do número de acidentes, quanto do número de vítimas fatais. Nenhuma das formas de detecção e reporte desse fenômeno no Brasil é de grande eficiência (FRAGA; SOUZA; MANSANO, 2011).

Em relação ao alto número de ocorrências de WS nos aeroportos de Guarulhos e Florianópolis entre os anos de 1999 e 2012, Simão (2013) afirma: “deve-se levar em consideração que, por ser um fenômeno meteorológico comunicado por aeronaves, os

aeródromos com maior movimento passam a ter, teoricamente, maior possibilidade de reportes”.

Silva (2016) identificou no período de julho de 2012 a março de 2015, 435 casos de WS no Aeroporto Internacional de Guarulhos, que foi o primeiro aeroporto brasileiro a utilizar operacionalmente um equipamento perfilador de vento do tipo SODAR (*SOnic Detection And Ranging*). Esses eventos estavam associados a situações frontais, pré-frontais e à presença de convecção, além da interação do vento com a orografia do local.

Ao analisar o número de reportes de WS por aeroporto no Brasil no período 1999-2008, Furlin (2017) associou-o à passagem de frentes frias (pois os três primeiros aeroportos da lista localizam-se nas regiões Sul e Sudeste) e ao número de pousos e decolagens. O autor esclarece que apenas as tecnologias embarcadas nas aeronaves e o reporte dos pilotos são utilizados para atestar a ocorrência de WS nos aeroportos do Brasil.

Ribeiro *et al.* (2020) identificaram a ocorrência de WS no Aeroporto Internacional de Guarulhos entre janeiro de 2016 e junho de 2017. Houve mais registros de casos severos e extremos nos meses de verão. Os autores concluem que há pouca coincidência entre os dados obtidos com SODAR e as observações dos pilotos, devido, possivelmente, à pequena extensão espacial e temporal do fenômeno e à diferença entre a frequência de amostragem do equipamento e a passagem de aeronaves.

Leão (2021) analisou dados de dois períodos (outubro de 2016 a setembro de 2019, e janeiro a dezembro de 2020) no Aeroporto Internacional Santos Dumont / Rio de Janeiro, que também conta com o perfilador acústico. Os casos mais fortes de WS foram associados a sistemas frontais e às condições pós-frontais. Os casos leves detectados pelo SODAR foram mais comuns, mas normalmente não são sentidos e relatados pelos pilotos. Esse foi o primeiro trabalho sobre ocorrência e previsão de WS naquele aeroporto.

Silva *et al.* (2021) estudaram um caso de WS no Aeroporto Internacional de Belém (Belém – PA), desencadeado por uma tempestade intensa associada a um conglomerado de nuvens Cumulonimbus.

Na próxima seção serão mostradas algumas informações sobre os aeroportos das capitais do Nordeste.

### 3.2 Sobre os Aeroportos das capitais do Nordeste Brasileiro

Todas as capitais dos estados do Nordeste Brasileiro (NEB) pertencem a regiões litorâneas, com exceção de Teresina – PI, que se situa às margens do Rio Parnaíba a 280 km do litoral do estado. A maior parte delas (Salvador, Aracaju, Maceió, Recife, João Pessoa e Natal) localiza-se no leste do NEB, onde a estação chuvosa compreende os meses de abril a julho. Enquanto Fortaleza, Teresina e São Luís localizam-se no norte da região, que recebe mais precipitação de fevereiro a maio (MOLION; BERNARDO, 2002).

O Aeroporto de Natal (Governador Aluizio Alves, código ICAO: SBSG) foi o primeiro do Brasil a ser concedido à iniciativa privada (MACHADO *et al.*, 2019). Inaugurado em 2014, esse terminal sucedeu o Aeroporto Internacional Augusto Severo (código ICAO: SBNT) como o principal aeroporto civil do estado do Rio Grande do Norte.

O aeródromo anterior, renomeado Campo Augusto Severo, continua em operação exclusiva da aviação militar sob o comando da Base Aérea de Natal, e mantém as instalações de radar meteorológico e estação meteorológica de altitude (EMA) para realização de radiossondagens. Localiza-se a 20 km de distância do novo aeroporto.

Os aeroportos são escolhidos de acordo com o Cadastro de Aeródromos Civis Públicos (ANAC, 2022), filtrando-os de acordo com a coluna “município atendido” a buscar pelo nome da capital de cada estado. Quando não há a capital no cadastro, busca-se a sigla do estado na coluna “UF” e se dá prioridade ao que possui informações na coluna de “internacionalização”. Normalmente um aeroporto internacional está próximo da capital do estado.

Os aeródromos que cumprem os requisitos acima estão listados no quadro 1. Nota-se que somente o aeroporto de Teresina não opera voos internacionais, o aeroporto do Rio Grande do Norte não pertence à capital do estado e o aeroporto de Maceió é o que está localizado na maior altitude entre todos (118 m acima do nível do mar).

**Quadro 1: Aeroportos escolhidos para o presente trabalho.****RS = serviço internacional regular;****AS = serviço internacional como alternativa;****INTL PAX = tráfego internacional de passageiros;****INTL PAX/CARGA = tráfego internacional de passageiros e carga.**

CÓDIGO OACI	Aeródromo				Geoespacial			Internacionalização	
	CIAD	NOME	MUNICÍPIO ATENDIDO	UF	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	OACI	AIP BRASIL
SBAR	SE0001	SANTA MARIA	ARACAJU	SE	10° 59' 7" S	37° 4' 24" W	7 m	RS	INTL PAX/CARGA
SBFZ	CE0001	PINTO MARTINS	FORTALEZA	CE	3° 46' 33" S	38° 31' 56" W	25 m	RS	INTL PAX/CARGA
SBJP	PB0001	PRESIDENTE CASTRO PINTO	JOÃO PESSOA	PB	7° 8' 54" S	34° 57' 1" W	66 m	RS	INTL PAX/CARGA
SBMO	AL0001	ZUMBI DOS PALMARES	MACEIÓ	AL	9° 30' 39" S	35° 47' 30" W	118 m	RS	INTL PAX
SBTE	PI0001	SENADOR PETRÔNIO PORTELLA	TERESINA	PI	5° 3' 38" S	42° 49' 28" W	67 m	-	-
SBRF	PE0001	GUARARAPES - GILBERTO FREYRE	RECIFE	PE	8° 7' 35" S	34° 55' 22" W	10 m	RS	INTL PAX/CARGA
SBSG	RN0001	GOVERNADOR ALUIZIO ALVES	SÃO GONÇALO DO AMARANTE	RN	5° 46' 8" S	35° 21' 59" W	83 m	RS	INTL PAX/CARGA
SBSL	MA0001	MARECHAL CUNHA MACHADO	SÃO LUÍS	MA	2° 35' 13" S	44° 14' 10" W	54 m	AS	INTL PAX/CARGA
SBSV	BA0001	DEPUTADO LUÍS EDUARDO MAGALHÃES	SALVADOR	BA	12° 54' 31" S	38° 19' 21" W	20 m	RS	INTL PAX/CARGA

Fonte: ANAC (2022).

Considerando o número de pousos e decolagens dos aeroportos analisados no presente trabalho, em 2017 os aeroportos mais movimentados do Nordeste foram Salvador, Recife e Fortaleza (tabela 2).

**Tabela 2: Números de pousos e decolagens nos aeroportos das capitais do Nordeste em 2017.**

Sigla	Total
SBSV	76.642
SBRF	75.099
SBFZ	52.290
SBSL	19.695
SBSG	18.835*
SBMO	17.954
SBTE	14.848
SBJP	13.373
SBAR	12.847

Fontes: Infraero (2018); \*Aeroporto de Natal (2023).

Os mesmos aeroportos conservam suas posições no ano de 2018. Juntos, esses três terminais concentram 2/3 da movimentação de todas as capitais naqueles anos (tabela 3).

**Tabela 3: Números de pousos e decolagens nos aeroportos das capitais do Nordeste em 2018.**

<b>Sigla</b>	<b>Total</b>
SBSV	79.550*
SBRF	78.766
SBFZ	57.039*
SBSG	18.812**
SBSL	18.733
SBMO	18.548
SBJP	14.363
SBTE	13.823
SBAR	12.155

Fontes: Infraero (2019); \*CGNA (2019) (exceto sobrevoos e TGL); \*\*Aeroporto de Natal (2023).

### 3.3 SISTEMAS SINÓTICOS ASSOCIADOS

A seguir serão mostrados os sistemas meteorológicos de escala sinótica que atuam sobre a região do NEB, bem como seus métodos de identificação.

#### 3.2.1 Zonas Frontais

Quando uma grande parcela da atmosfera permanece em contato com uma área de características superficiais homogêneas (como oceanos, florestas, e desertos) o ar adquire propriedades termodinâmicas bem definidas. As distribuições verticais de umidade e temperatura tornam-se semelhantes por toda a extensão dessa parcela, e ela recebe o nome de massa de ar (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Quando essas massas deixam seu local de origem e se deslocam, encontram outras massas com propriedades distintas. À medida que isso ocorre elas sofrem alterações nas suas características, bem como alteram as características das regiões que atravessam. Onde houver deslocamento de uma massa de ar sobre outra, haverá a formação de uma zona de transição com acentuadas alterações nas condições de tempo (figura 4). A essas zonas convencionam-se chamar superfícies ou zonas frontais (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Zonas frontais, ou seus restos, adentram o Nordeste do Brasil durante todo o ano, e as partes sul e leste dessa região recebem boa parte da precipitação anual sob a atuação desses sistemas. (KOUSKY, 1979).

Oliveira (1986, *apud* CAVALCANTI; KOUSKY, 2009) identificou sistemas frontais em quatro bandas latitudinais através de imagens de satélite de 1975 a 1984. Na faixa 40°S-35°S a penetração dos sistemas ocorreu durante todo o ano, com máximo em julho. Em 35°S-25°S houve menos casos, mas com máximo ainda em julho. Nessa última banda e em 25°S-20°S houve mais interação com a convecção tropical nos meses de outubro e novembro. Ao norte de 20°S houve menos penetração de frentes, mas ainda com algumas associações à convecção tropical amazônica.

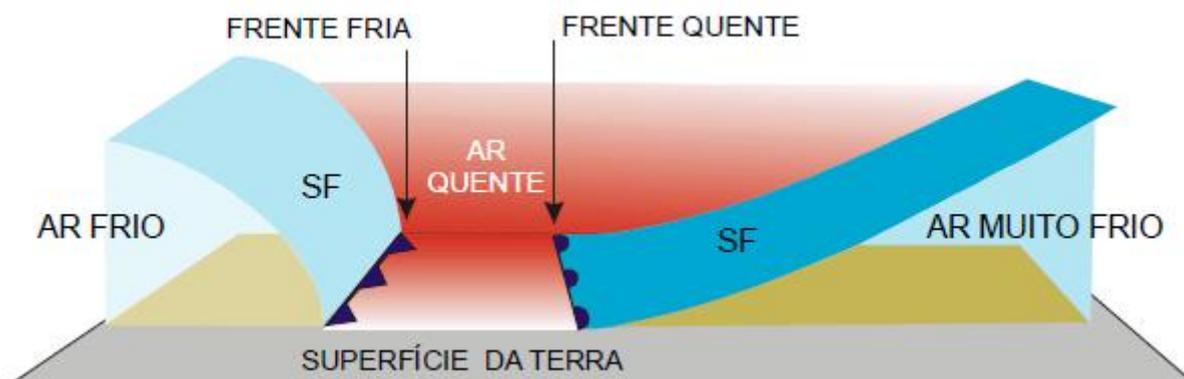
As zonas frontais sobre o NEB podem ser identificadas nos campos de linhas de corrente, altura geopotencial e pressão ao nível médio do mar (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009).

Durante o inverno do Hemisfério Sul esses sistemas são mais rápidos e intensos, e chegam a alcançar latitudes tropicais e equatoriais (FEDOROVA; LEVIT; CRUZ, 2015).

São capazes de penetrar constantemente até as latitudes equatoriais, devido ao posicionamento à ZCIT estar mais a norte nessa época do ano (MOLION; BERNARDO, 2002).

Veber, Fedorova e Levit (2020) analisaram zonas frontais no NEB entre 2000 e 2009 e concluíram que, nos casos em que a extremidade frontal organiza convecção profunda, há uma região de confluência em baixos e médios níveis sobre o NEB. Enquanto que nos casos sem convecção organizada há um padrão anticiclônico de circulação. Além disso, a presença de forte cavado ou VCAN sobre o Atlântico Tropical Sul é fator determinante para a existência de convecção provocada pela extremidade frontal.

**Figura 4: modelos de zonas frontais.**



Fonte: Varejão-Silva (2006).

### 3.2.2 Zona de Convergência Intertropical

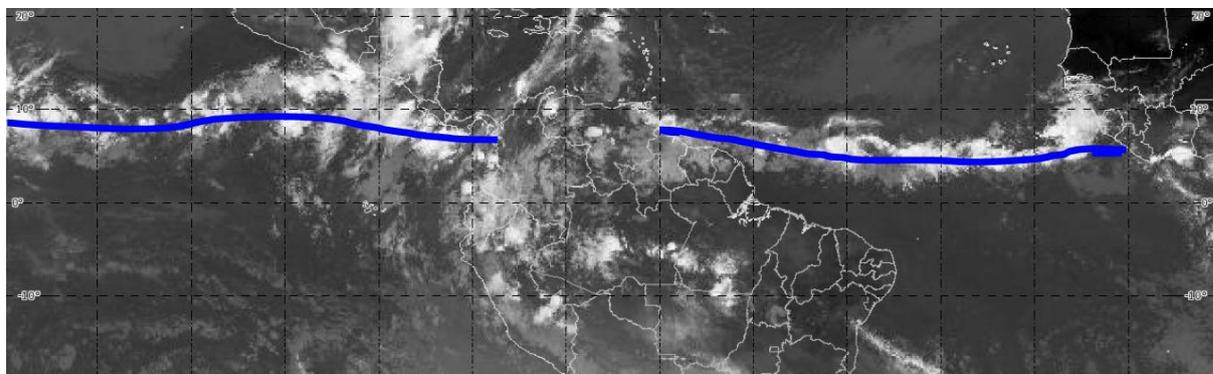
A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma faixa do globo próxima ao paralelo onde se observam confluência dos ventos alísios (figura 5b) e divergência em altos níveis (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Também é identificada pela forte instabilidade atmosférica e maior cobertura de nuvens convectivas (figura 5a) (MELO; CAVALCANTI; SOUZA, 2009).

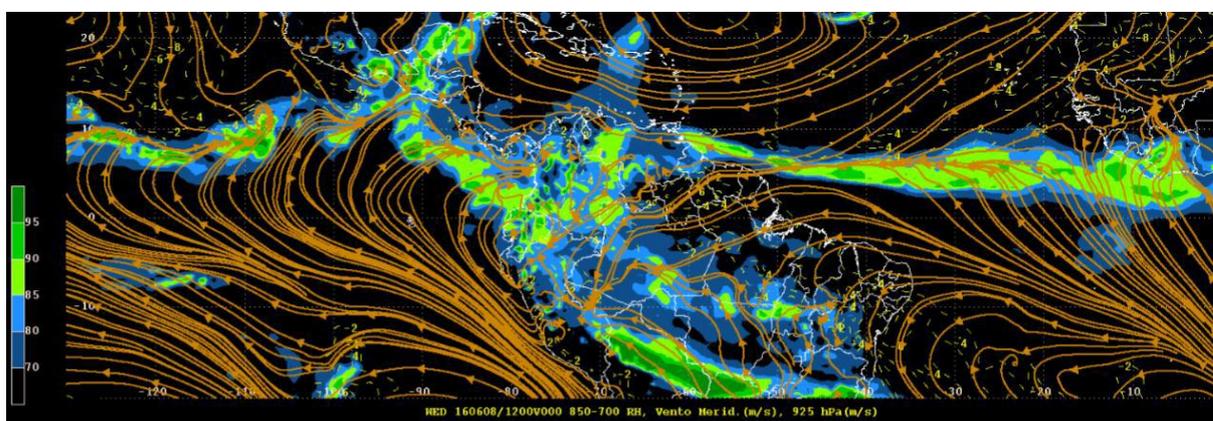
O deslocamento sazonal da ZCIT sobre as regiões continentais pode chegar a 25° de latitude, enquanto sobre os oceanos, entre 10° a 15° (ALAPATI; RAMAN, 1989, *apud* FERNANDEZ, 1996).

Sobre o Atlântico Equatorial a ZCIT desloca-se latitudinalmente desde os 14°N nos meses de agosto e setembro, até 2°S nos meses de março e abril. Nos anos mais secos do NEB, Uvo (1989) verificou que a ZCIT teve menor deslocamento para o Hemisfério Sul. É o principal sistema causador das precipitações que atingem o norte do NEB, e nos anos mais chuvosos a pode alcançar os 5°S (MOLION; BERNARDO, 2002).

**Figura 5: Aspectos da ZCIT. (a) ZCIT em imagem infravermelho. (b) ZCIT em linha de corrente em 925 hPa (cor marrom) e umidade relativa média na camada 850 hPa-700 hPa.**



a)



b)

Fonte: Escobar e Matoso (2020).

### 3.2.3 Zonas Frontais e ZCIT

Os sistemas frontais podem avançar ao norte até interagir com a massa de ar quente e úmido dos trópicos, a ponto de desencadear convecção profunda e causar precipitações fortes sobre o continente (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009). Cavalcanti (2009) aponta ainda que a precipitação sobre o NEB pode ser intensificada pela influência de outros sistemas meteorológicos juntamente à ZCIT.

A interação de extremidades frontais com a ZCIT é uma situação recentemente descrita na literatura e ainda pouco estudada. Lyra *et al.* (2019) inauguraram a análise desse tipo de junção com um caso de formação de um Complexo Convectivo de Mesoescala nos estados do Piauí e Maranhão.

Os seguintes padrões troposféricos para as situações de união de frentes com a ZCIT no NEB foram elaborados por Muanza, Fedorova e Levit (2021): a corrente de jato subtropical deve estar posicionada no sudoeste do Brasil, sem influenciar o NEB; e deve haver circulação anticiclônica em altos níveis no NEB.

#### 3.2.4 Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

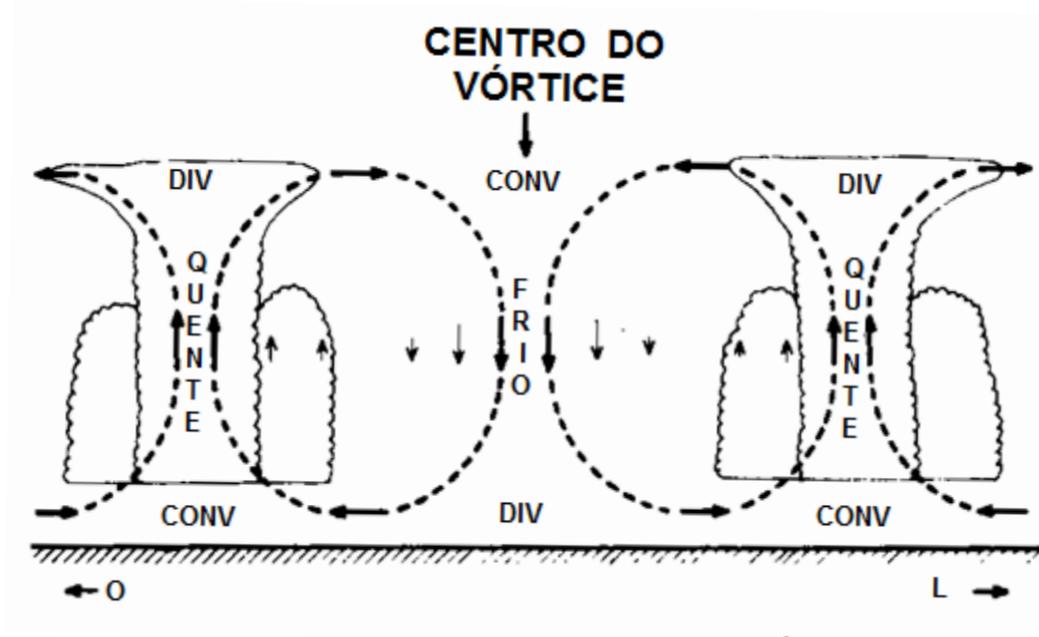
Um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), também chamado de baixa fria da alta troposfera ou baixa desprendida, é uma circulação ciclônica fechada de escala sinótica localizada na alta troposfera (acima de 400 hPa) (KOUSKY; GAN, 1981).

O núcleo dessa circulação apresenta movimentos descendentes e temperaturas mais baixas (figura 6), enquanto na sua periferia há convecção e temperaturas mais altas, com formação de nebulosidade (figura 7a) (MOLION; BERNARDO, 2002).

A formação do VCAN foi analisada pelo campo de vento de reanálises do NCEP, e classificada por Paixão e Gandu (2000), *apud* Ferreira, Ramirez e Gan (2009). Na formação clássica o VCAN surge com a intensificação da crista associada à Alta da Bolívia (AB), que provém da penetração de sistemas frontais nas baixas latitudes. Conforme o sistema frontal atinge as latitudes subtropicais, em baixos níveis, no setor leste do vórtice há advecção de ar quente e úmido, que alcança o lado frio da zona frontal e inicia convecção profunda. Com a condensação da umidade nesse processo convectivo, libera-se grandes quantidade de calor na atmosfera, o que aumenta a temperatura média da troposfera e intensifica e crista em altos níveis e o cavado a leste da AB, até formar o VCAN.

A maior frequência de precipitações fortes no NEB estão associadas à periferia do VCAN, entre 1000 e 2000 km de distância do seu centro (SILVA, 2005, *apud* REPINALDO *et al.*, 2020).

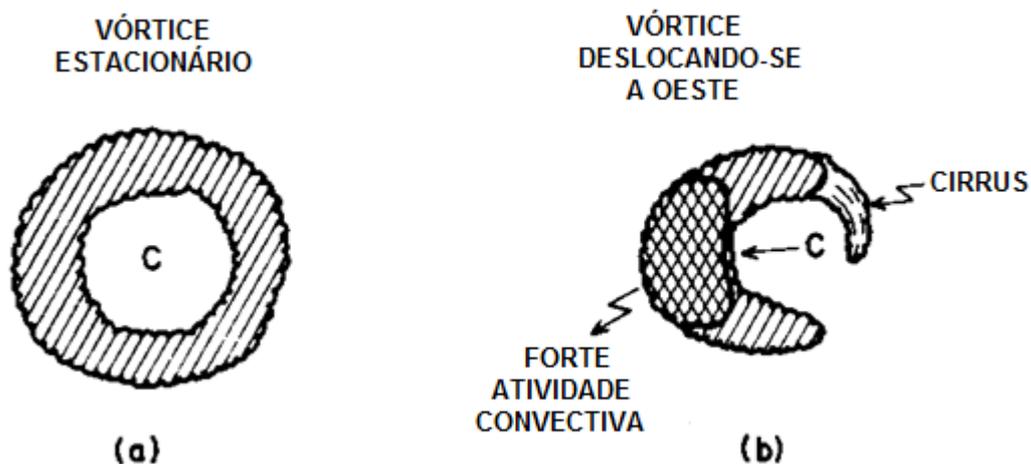
Figura 6: Seção vertical esquemática através do sistema do VCAN.



Fonte: Kousky e Gan (1981).

Quando há deslocamento do sistema (figura 7b), a nebulosidade intensifica-se no lado da vanguarda (KOUSKY; GAN, 1981).

Figura 7: Distribuição idealizada da nebulosidade associada a um VCAN (a) estacionário em 200 hPa e (b) movendo-se a oeste



Fonte: Kousky e Gan (1981).

Podem ser do tipo Palmén, que surgem geralmente nos meses de inverno nas latitudes subtropicais, ou Palmer, que aparecem principalmente nos meses de verão, nos trópicos (GAN, 1982).

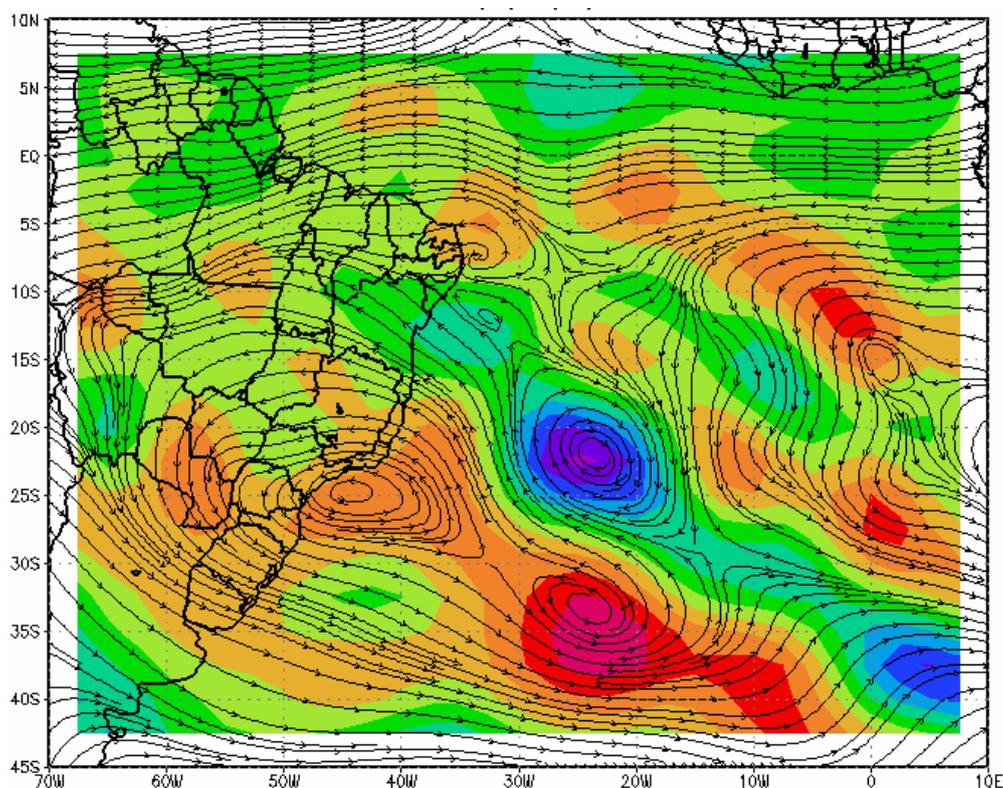
### 3.2.5 Vórtice Ciclônico de Médios Níveis

Um Vórtice Ciclônico de Médios Níveis (VCMN) é uma circulação ciclônica fechada que é observada somente nos médios níveis da troposfera (figura 8) (SANTOS, 2012).

O critério para identificação de VCMN's de Fedorova *et al.* (2016) são: convergência de linhas de corrente, vorticidade relativa menor ou igual a  $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , centro de circulação ciclônica entre 700 e 400 hPa e o diâmetro da área dessa circulação igual ou maior que 500 km.

Nos anos de 2008, 2009 e 2010, VCMN se localizaram predominantemente sobre o Oceano, sua ocorrência apresenta pouca variação sazonal e o centro é observado com mais frequência em 700 hPa. Em todos eventos que ocorreram sobre o continente foi detectada formação de precipitação (FEDOROVA *et al.*, 2016).

**Figura 8: Campo de linhas de corrente e vorticidade relativa no nível de 600 hPa mostrando um vórtice ciclônico de médios níveis.**

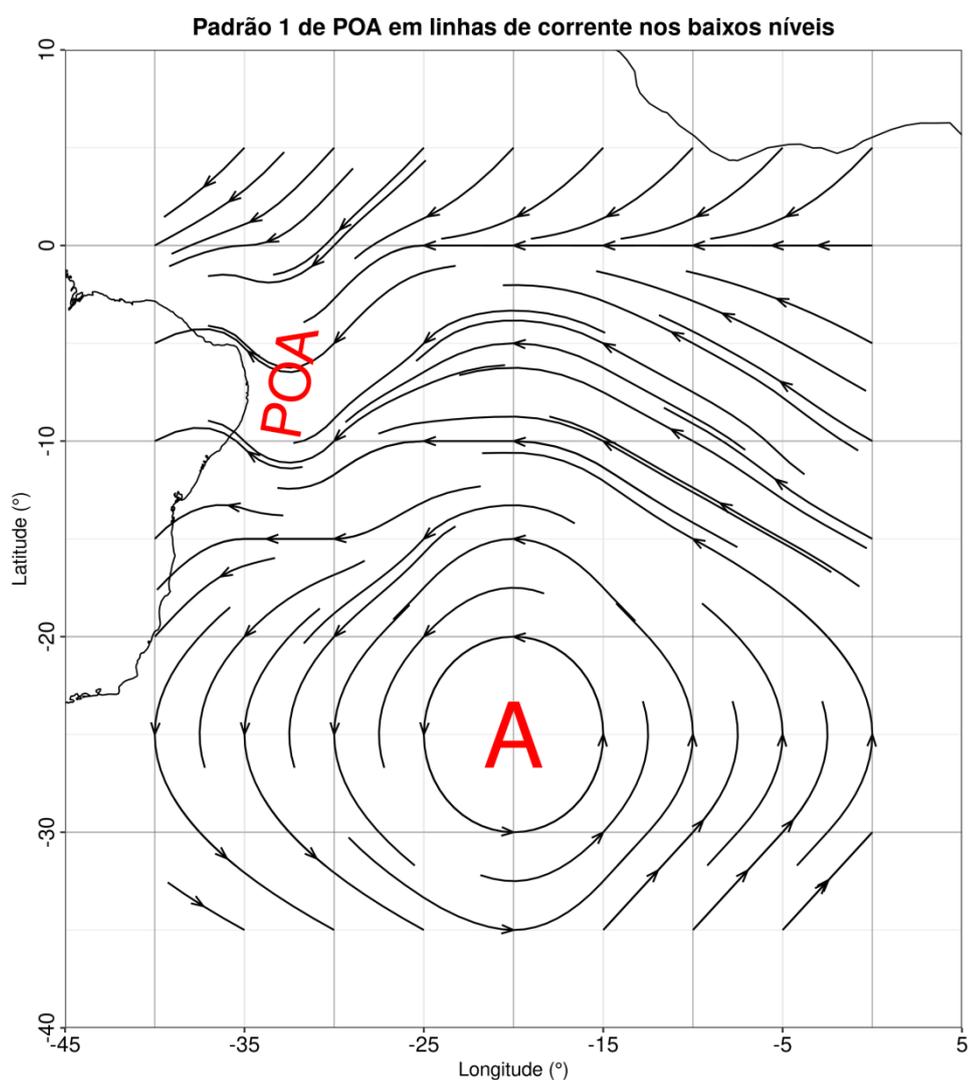


Fonte: Fedorova *et al.* (2006).

### 3.2.6 Perturbações Ondulatórias dos Alísios

As Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios (POAs) são distúrbios provocados pela convergência dos ventos alísios com os ventos que acompanham os sistemas frontais (PONTES DA SILVA *et al.*, 2011). Deslocam-se para oeste sobre a região equatorial e intensificam-se ao no encontro com brisas e atingir a costa do NEB (figura 9).

**Figura 9: Padrão de circulação em baixos níveis associado a POAs.**



Fonte: autor.

Além dos sistemas sinóticos, também são analisadas as condições termodinâmicas, com uso dos índices descritos na seção a seguir.

### 3.3 ANÁLISE TERMODINÂMICA

#### 3.3.1 Convective Available Potential Energy

O CAPE (energia potencial disponível para convecção) representa a quantidade de energia de flutuação disponível para acelerar uma parcela verticalmente (NATIONAL WEATHER SERVICE/NOAA, 2023).

Num diagrama Skew-T Log-P, o CAPE é a área entre as linhas da temperatura do ar e a curva de levantamento, que passa pela adiábática úmida, a partir do nível de convecção espontânea até o nível de equilíbrio. Pode ser calculado através da equação 1:

$$CAPE = R \int_{P_{nce}}^{P_{ne}} [T_{vp} - T_{va}] d \ln p \quad (1)$$

Onde:

$T_{vp}$ : temperatura virtual de uma parcela levantada erguendo-se adiabaticamente do nível de convecção espontânea ao nível de equilíbrio, (K);

$T_{va}$ : temperatura virtual do ambiente, (K);

R: constante específica do gás para o ar seco, ( $J \cdot K^{-1} \cdot Kg^{-1}$ );

$P_{nce}$ : pressão do nível de convecção espontânea, (hPa);

$P_{ne}$ : pressão do nível de equilíbrio, (hPa).

A interpretação dos valores de CAPE está descrita na tabela 4.

**Tabela 4: quantificação da instabilidade atmosférica pelo CAPE.**

CAPE (J/Kg)	Instabilidade
< 0	Estável
0 a 1000	Pouco instável
1000 a 2500	Instabilidade moderada
2500 a 3500	Instabilidade forte

Fonte: NWS/NOAA, 2023 (adaptado).

### 3.3.2 Convective Inhibition

O índice CIN (impedimento de convecção) quantifica a energia necessária para erguer uma parcela de ar adiabaticamente para o nível de condensação por levantamento, e, num processo pseudoabiabático, do NCL ao nível de convecção espontânea (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2020).

No diagrama Skew-T Log-P o CIN é a área entre a linha de temperatura do ar e a adiabática úmida, delimitada pelo NCE e o nível de origem da parcela. Seu valor pode ser encontrado com a equação 2:

$$CIN = -R \int_{P_i}^{P_{nce}} [T_{vp} - T_{va}] d \ln p \quad (2)$$

Onde:

$T_{vp}$ : temperatura virtual de uma parcela levantada erguendo-se adiabaticamente do nível de convecção espontânea ao nível de equilíbrio, (K);

$T_{va}$ : temperatura virtual do ambiente, (K);

R: constante específica do gás para o ar seco, ( $J.K^{-1} Kg^{-1}$ );

$P_{nce}$ : pressão do nível de convecção espontânea, (hPa);

$P_i$ : pressão inicial (nível da parcela), (hPa).

Quando a inibição é suficientemente grande, mesmo que as condições sejam favoráveis à convecção, ela não será profunda. A intensidade dessa inibição é classificada de acordo com a tabela 5.

**Tabela 5: quantificação da instabilidade atmosférica pelo CIN.**

CIN (J/Kg)	Intensidade da inibição
0 a -50	Fraca
-51 a -199	Moderada
< -200	Forte

Fonte: Haby, 2023a.

### 3.3.3 Lifted Index

O *Lifted Index* (LI) é um índice de instabilidade atmosférica utilizado para quantificar a instabilidade de parcelas de ar na baixa troposfera (GALWAY, 1956; PROSSER; FOSTER, 1966; SADOWSKI; RIECK, 1977; *apud* SÁ, 2011).

É calculado pela diferença entre as temperaturas do ar de e a curva de levantamento, que passa pela adiabática úmida, tomada a partir do NCL, no nível de 500 hPa, conforme mostra a equação 3:

$$LI = T_{ar\ 500} - T_{pa\ 500} \quad (3)$$

Onde:

$T_{ar500}$ : temperatura do ar em 500 hPa, (°C);

$T_{pa500}$ : temperatura da parcela, traçada na adiabática úmida a partir do NCL, em 500 hPa, (°C).

Os valores negativos desse índice correspondem a certos níveis de instabilidade, como mostra a tabela 6:

**Tabela 6: quantificação da instabilidade atmosférica pelo LI.**

LI	Instabilidade
0 a -3	Pouco instável
-4 a -6	Instabilidade moderada
< -6	Instabilidade forte

Fonte: NWS/NOAA, 2023 (adaptado).

### 3.3.4 Água precipitável

Água precipitável é uma forma de avaliar a umidade pela quantidade de vapor d'água contida numa coluna vertical da atmosfera entre dois níveis, expressa em termos da altura que a água alcançaria se fosse condensada sobre uma superfície de área unitária (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2015).

É calculado pela equação 4:

$$AP = \frac{1}{\rho g} \int_{P_1}^{P_2} r dp \quad (4)$$

Onde:

$\rho$ : densidade da água, (Kg.m<sup>-3</sup>);

$g$ : aceleração da gravidade, (m.s<sup>-2</sup>);

$P_2$  e  $P_1$ : níveis superior e inferior de pressão, (hPa);

$r$ : razão de mistura (g.Kg<sup>-1</sup>).

A tabela 7 relaciona os valores de água precipitável e a correspondente classificação da umidade:

**Tabela 7: valores de água precipitável e interpretação correspondente da umidade.**

Água Precipitável (mm)	Leitura da umidade
< 30	Baixa
30 a 45	Moderada
> 45	Alta

Fonte: Haby, 2023b (adaptado)

### 3.4 Reporte Meteorológico de Aeródromo

*METeological Aerodrome Report* (METAR) é o código utilizado para disseminar informações meteorológicas observadas em aeródromos. Nele constam informações válidas para uma área dentro de um raio de aproximadamente 8 km a partir de um ponto de referência do aeródromo, e além desse raio, até 16 km – área adicional que recebe nome de vizinhança (DECEA, 2023). É nele que se encontra a informação de ocorrência de WS.

O código contém obrigatoriamente a sua própria identificação (METAR quando emitido regularmente a cada hora, SPECI quando emitido extraordinariamente), código ICAO do aeródromo, o dia e a hora (UTC ou Z) de emissão e se foi emitido por uma estação automática sem o monitoramento de uma pessoa (DECEA, 2023).

Após essas seções seguem as informações meteorológicas: vento à superfície, visibilidade horizontal (opcionalmente dividida por setor), fenômenos de tempo presente, nebulosidade (base), temperatura do ar e ponto de orvalho, e pressão atmosférica ao nível médio do mar, (DECEA, 2023).

### **3.5 RADAR Meteorológico**

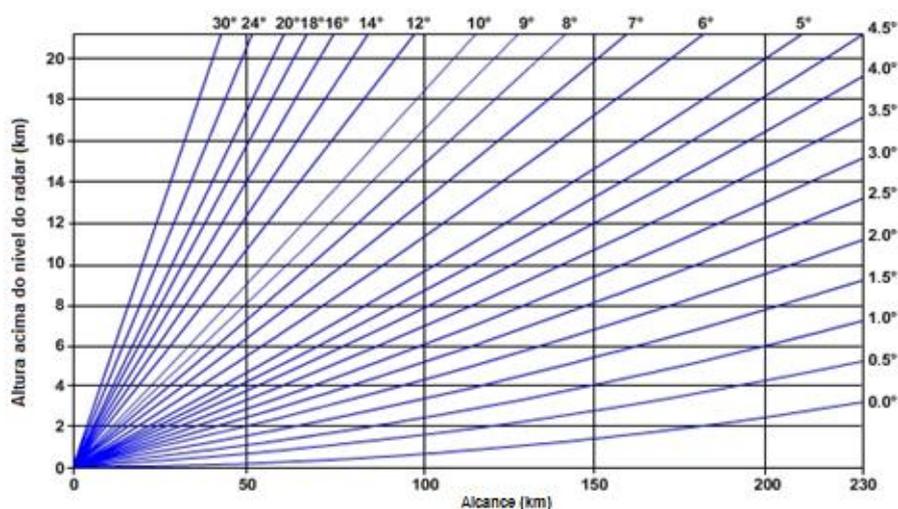
O RADAR (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging – detecção e telemetria por rádio) é um instrumento que emite um feixe de ondas eletromagnéticas de certa frequência na atmosfera e, após essas ondas serem retroespalhadas em alvos (corpos de tamanho próximo ao comprimento da onda emitida), ele registra a fração que retorna à antena e determina a localização e a intensidade do retroespalhamento. A quantidade de energia retroespalhada para o radar depende do tamanho, quantidade e forma, além de outras propriedades físicas dos alvos.

Os radares podem estar instalados em localidades estratégicas na superfície (radar meteorológico de solo) ou até mesmo embarcados nas aeronaves (radar meteorológico de bordo).

Nas imagens de radar meteorológico são identificados locais com presença de hidrometeoros, como chuva, virga, neve e granizo. Também podem ser detectados pássaros, aviões e retornos do solo. Gotículas de nuvem são muito pequenas e os radares operacionais não as detectam.

Normalmente, devido à forma da Terra o feixe de ondas ganha altitude conforme se afasta do radar (figura 10), mas em certas situações, como inversões térmicas, a atmosfera refrata o feixe em direção ao solo, que retroespalha energia para a antena.

**Figura 10: Altura do feixe para cada elevação da antena de um radar meteorológico.**  
 Altura acima do solo das amostras do RADAR em função do alcance



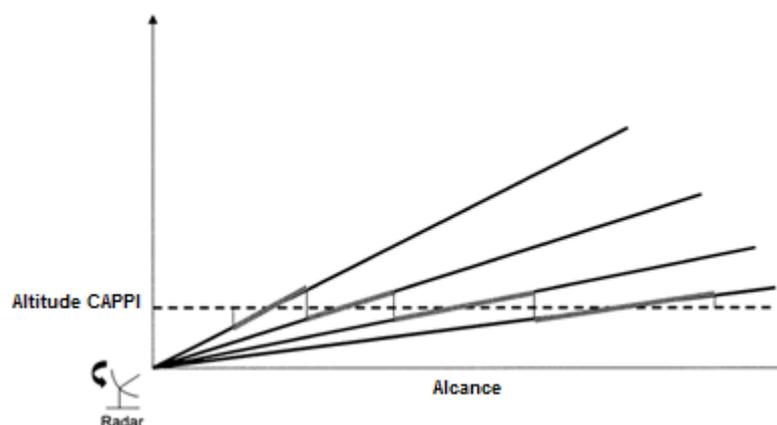
NOAA/WDTB

Fonte: UCLA (2017).

Os produtos CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) são compostos por várias varreduras para formar a visualização de uma mesma altitude (3 km, 5 km, 7 km ou 10 km) num raio de 250 km em torno do radar (figura 11).

**Figura 11: Esquema simplificado da construção de um CAPPI.**

Os eixos horizontal e vertical são, respectivamente, o alcance ou distância, e a altitude. As quatro linhas sólidas representam quatro feixes de radar. Um CAPPI é produzido através da combinação das seções de cada feixe que se mais se aproximam altitude pretendida (linha tracejada).



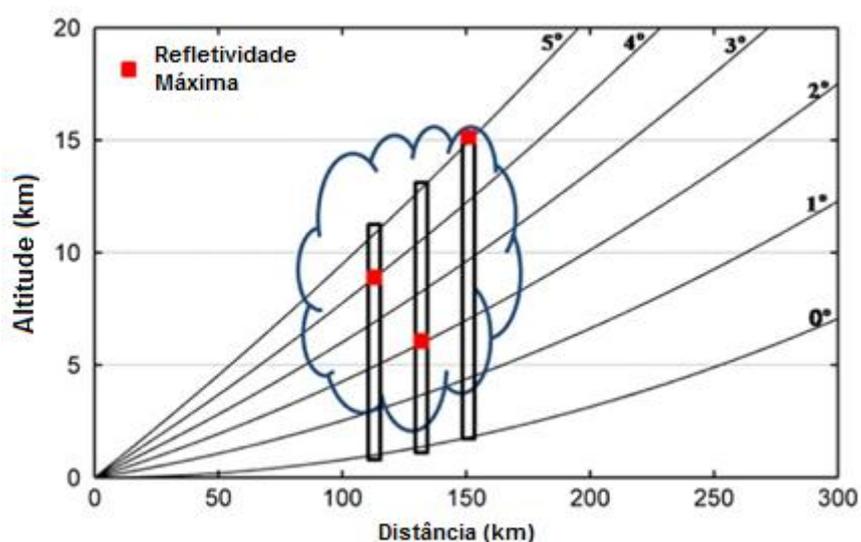
Fonte: Harasti *et al.* (2004).

O produto oferecido na REDEMET sob o nome de “maxcappi” consiste nos valores máximos de refletividade de varreduras com alcance de até 400 km, sem distinção de altitude

(figura 12). Para obter um alcance tão grande, as varreduras são feitas com baixos ângulos de elevação, o que favorece o aparecimento de ecos de solo nas proximidades do radar.

**Figura 12: Composição de um produto semelhante ao “maxcappi”.**

Os eixos horizontal e vertical são, respectivamente, o alcance ou distância, e a altitude. Após a realização de algumas varreduras, para cada ponto em determinada distância do radar, escolhe-se o dado com maior valor de refletividade (vermelho) para compor o produto.



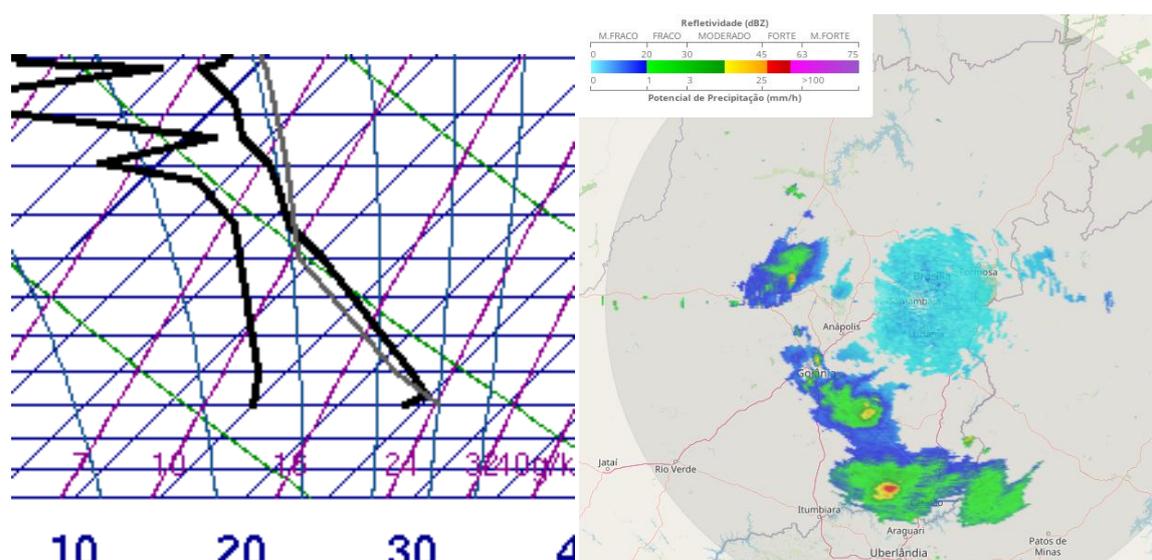
Fonte: adaptado de Yoon, Jeong e Lee (2013).

Na vigência de condições como inversões térmicas, haverá refletividade na área próxima ao radar, com formato muito diferente de precipitações e sem deslocamento entre varreduras (figura 13).

**Figura 13: Inversão térmica próxima à superfície no Aeroporto de Brasília.**

- (a) no diagrama termodinâmico de 10/10/2022 às 00 UTC;  
 (b) imagem MAXCAPPI do radar do Gama-DF (cidade a sudoeste de Brasília) do mesmo horário mostrando refletividade do solo no sobre o DF;  
 (c) consulta de mensagens METAR do Aeroporto de Brasília não mostra precipitação antes, durante ou depois desse horário.

Em (b), a oeste, sudoeste e sul do DF há áreas com refletividade característica de uma precipitação real.



a)

b)

09/10/2022 METAR SBBR 092300Z 12008KT 9999 FEW040 26/16 Q1018=

10/10/2022 METAR SBBR 100000Z 16006KT 9999 FEW040 24/16 Q1018=

c) 10/10/2022 METAR SBBR 100100Z 17004KT 110V230 CAVOK 24/17 Q1019=

### 3.6 Satélite meteorológico

Satélites meteorológicos carregam instrumentos sensíveis a certos comprimentos de onda de radiação emitidos e refletidos pela Terra e a atmosfera. As propriedades mais sensoriadas são temperatura, através dos canais de infravermelho (IR), e umidade, através de canais de vapor d'água. Várias organizações ao redor do mundo operam satélites meteorológicos, nas suas regiões de interesse.

### 3.7 Reanálise

A reanálise é uma descrição numérica de estados passados da atmosfera confeccionada a partir da combinação de leituras de diversos sensores com a modelagem numérica. Permite transformar a rede de observação (especialmente irregular) em uma grade regular de valores que podem ser estendidos para décadas no passado.

#### 3.7.1 Reanalysis II

A Reanalysis II (NCEP-DOE, 2002) é uma versão melhorada Reanalysis I (com correção de erros e atualização de parametrizações). Sua cobertura temporal parte de 1979 para coincidir com o começo da era dos satélites meteorológicos modernos. Cobre o globo com resolução de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  em 17 níveis de pressão entre 1000 hPa e 10 hPa, em intervalos de 4 horas (horários sinóticos – 00, 06, 12 e 18 horas UTC). Essa resolução é suficientemente adequada à elaboração de campos para análise de circulação em grande escala.

#### 3.7.2 ERA5

ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2023) é a reanálise atmosférica global de quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) que cobre o período de janeiro de 1940 até os dias atuais, substituindo o ERA-Interim.

O conjunto dessa reanálise escolhido para o presente trabalho (“*ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present*”), oferece estimativas horárias, a partir de 1940 até o presente, de um grande número de variáveis atmosféricas, oceânicas e de solo, numa grade regular de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  de resolução, com 37 níveis de pressão de 1000 hPa a 1 hPa, a cada hora. Foi escolhido para elaborar perfis simulados, pois a sua resolução é superior à da Reanalysis II.

### 3.8 QGIS (versão 3.10)

É um software de Sistema de Informação Geográfica de código aberto capaz de criar, editar e visualizar informações georreferenciadas.

#### 3.9 GrADS

*Grid Analysis and Display System* (GrADS) é uma ferramenta interativa para acesso, manipulação e visualização de dados em ponto de grade.

### **3.10 Linguagem de programação R (versão 4.1)**

É uma linguagem de programação com foco em análise e visualização de dados. É capaz de lidar com diferentes tipos de dados conforme a disponibilidade de pacotes, que estendem suas funções. No quesito de funções para visualização dos dados a essa linguagem recebeu contribuições recentes para elaboração de campos de linhas de corrente e confecção de diagramas Skew-T log-p.

### **3.11 Linguagem de Programação Python (versão 3.9)**

É uma linguagem de programação de alto nível para uso geral que possui pacotes notórios para ciência de dados e meteorologia.

Na próxima seção estão descritos o propósito e a maneira de utilização de cada uma dessas ferramentas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área e período de estudo

O domínio do estudo compreende uma área entre os continentes da América do Sul e África, entre o período de 1 de janeiro de 2017 e 31 de dezembro de 2018. De maneira que se observe a atuação de diversos sistemas meteorológicos que influenciam o tempo no NEB.

**Figura 14: localização dos aeroportos das capitais do NEB dentro da área de estudo dos sistemas sinóticos.**



Fonte: autor.

### 4.2 Obtenção de METAR

Com a *API-REDEMET: Mensagem METAR* pode-se solicitar mensagens METAR de anos inteiros de uma só vez. Conforme as instruções (DECEA, 2023), após o cadastro de usuário, a solicitação para essa API pode ser feita a partir do preenchimento de campos de um endereço de acesso. Após essa etapa a API retorna os dados no formato *JavaScript Object Notation* (JSON). Essa operação pode ser realizada num navegador de internet que seja capaz

de explorar interativamente arquivos JSON. Para o presente trabalho todo esse processo foi automatizado utilizando a linguagem de programação R.

Com os dados do METAR é possível discernir as condições de tempo presente e os horários de ocorrência de WS.

A descrição de cada parte que compõe uma mensagem METAR está no Apêndice A.

#### 4.2.1 Escala Beaufort

No início do século XIX, Francis Beaufort estabeleceu uma escala para classificação da velocidade do vento. A escala consiste em 13 números (de 0 a 12) correspondentes ao aspecto das ondas do mar, e, posteriormente, foram quantificados os devidos intervalos de velocidade do vento. Nesse trabalho ela será utilizada para facilitar a classificação da velocidade do vento informada no METAR.

**Tabela 8: Relação entre velocidade do vento e o código na escala Beaufort.**

<b>Código</b>	<b>Intensidade (nós)</b>
0	< 1
1	1 – 3
2	4 – 6
3	7 – 10
4	11 – 16
5	17 – 21
6	22 – 27
7	28 – 33
8	34 – 40
9	41 – 47
10	48 – 55
11	56 – 63
12	> 63

Fonte: Marinha do Brasil (adaptado).

#### 4.3 Dados de RADAR Meteorológico

Com a *API-REDEMET: Produtos RADAR*, da mesma maneira já falada com que se obtêm as mensagens METAR, é possível receber imagens de refletividade de produtos “cappi” e “maxcappi” no formato *Portable Network Graphics* (PNG), um tipo de arquivo utilizado para transmissão de imagens em formato digital.

A grande vantagem desse produto é que o dado pode ser manipulado por qualquer Sistema de Informação Geográfica (SIG) e até programas de edição de imagens, não sendo necessário lidar com a estrutura interna de dados provenientes dos *softwares* de radar meteorológico, que varia entre os diferentes modelos que compõem a rede do DECEA.

A indisponibilidade de dados de radar de datas mais antigas (ano de 2017 e início de 2018) na API limitou o uso dessa ferramenta para os casos mais recentes. Em vez da API, o *website* foi acessado para visualizar alguns dados, o que traz consigo o inconveniente de haver várias camadas fixas de informações geográficas ao fundo da imagem.

#### **4.4 Obtenção de imagens de satélite meteorológico**

As imagens analisadas são colagens de canais IR de vários satélites meteorológicos. Esse trabalho é realizado pelo *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) e o acesso ocorre através do *Global ISCCP B1 Browse System* (GIBBS), em <https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>. O produto obtido é o GridSat-B1, que facilita o uso dos dados dos diferentes satélites meteorológicos em órbita, ao criar uma única imagem que se estende pelo globo.

#### **4.5 Download da Reanalysis II**

Os dados utilizados são de conjuntos anuais de componentes zonal e meridional do vento, pressão atmosférica ao nível médio do mar e ômega.

Os dados são disponibilizados em formato NetCDF pelo *Physical Sciences Laboratory* (PSL) do NOAA, em <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>. Desses conjuntos inteiros, usa-se o GrADS para criar subconjuntos que abrangem somente a área de interesse e calcular a vorticidade relativa, para análise sinótica.

#### **4.6 Download do ERA5**

Os dados são obtidos na *Climate Data Store* (CDS) do *Copernicus Climate Change Service* (C3S). Após realizar o cadastro no portal, obtêm-se dados preenchendo o formulário em <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bd0915c6?tab=form>.

Devido à alta resolução dessa reanálise, grandes áreas e longos períodos de dados formam arquivos muito grandes em termos de armazenamento em computadores pessoais.

Para contornar isso, as variáveis (componentes zonal e meridional do vento, temperatura do ar e umidade relativa) são obtidas apenas para o ponto mais próximo do local de interesse, para a confecção de diagramas termodinâmicos.

## 4.7 Função do QGIS

É um software de Sistema de Informação Geográfica de código aberto capaz de criar, editar e visualizar informações georreferenciadas. No presente trabalho a aplicação é empregada para criar e manipular *shapefiles* e outros tipos de dados espaciais e elaborar algumas figuras.

### 4.7.1 Obtenção de *Shapefiles*

Obtém-se *shapefiles* com limites do Brasil e Unidades da Federação em [http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/unidades\\_administrativas.php](http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/unidades_administrativas.php), e contornos costeiros de todos os continentes em <https://www.naturalearthdata.com>.

## 4.8 Uso do GrADS

*Grid Analysis and Display System* (GrADS) é uma ferramenta interativa para acesso, manipulação e visualização de dados em ponto de grade. Nesse trabalho serve como instrumento de cálculo de campos derivados de dados de reanálise (Apêndice B), e recorte de subconjuntos dos dados anuais do Reanalysis II (Apêndice C). Está disponível em <http://cola.gmu.edu/grads/>.

## 4.9 Utilização de R

Os principais pacotes utilizados nesse trabalho são: *ndcf4* (PIERCE, 2023) para leitura de arquivos NetCDF, *ggplot2* (WICKHAM, 2016) e *metR* (CAMPITELLI, 2021) para exibição de campos meteorológicos, *aiRthermo* (SAÉNZ *et al.*, 2018) e *weathermetrics* (ANDERSON; BELL; PENG, 2013) para cálculos de termodinâmica da atmosfera, *rgdal* (BIVAND; KEITT; ROWLINGSON, 2023) para leitura de *shapefiles*, e *rjson* (COUTURE-BEIL, 2022) para leitura de arquivos JSON. A linguagem é utilizada para:

- Baixar dados de METAR (Apêndice D);
- Baixar dados de refletividade de radar e exibi-los com a localização dos aeroportos de interesse (Apêndice E);

- Gerar campos de linhas de corrente, vorticidade relativa, corrente de jato, altura geopotencial, pressão ao nível médio do mar e ômega, com dados da Reanalysis II (Apêndice F);
- Selecionar o ponto mais próximo dos aeroportos dentro da grade do ERA5, salvar os dados em formato de perfil vertical, pronto para entrada em outro programa (Apêndice G);
- Calcular índices termodinâmicos quando outros programas retornarem valores inusitados (Apêndice H).

A função de diagrama Skew-t log-p em R não chegou a ser avaliada no presente trabalho, pois antes da sua disponibilização as figuras feitas com Python já estavam prontas.

#### **4.10 Utilização de Python**

O principal pacote para Python utilizado nesse trabalho é *MetPy* (MAY *et al.*, 2022). É um pacote completo para análise de dados meteorológicos. É utilizado para exibir perfis simulados em diagrama Skew-t log-p e calcular índices termodinâmicos, a partir dos dados extraídos com R (Apêndice I).

#### **4.11 Observações em altitude**

Próximo ao Aeroporto Internacional de Natal (SBSG) existe uma estação meteorológica de altitude de onde são realizadas duas radiossondagens por dia. Os dados estão disponíveis em <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

Os resultados das análises desses dados são apresentados na próxima seção.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ocorrências de *wind shear*

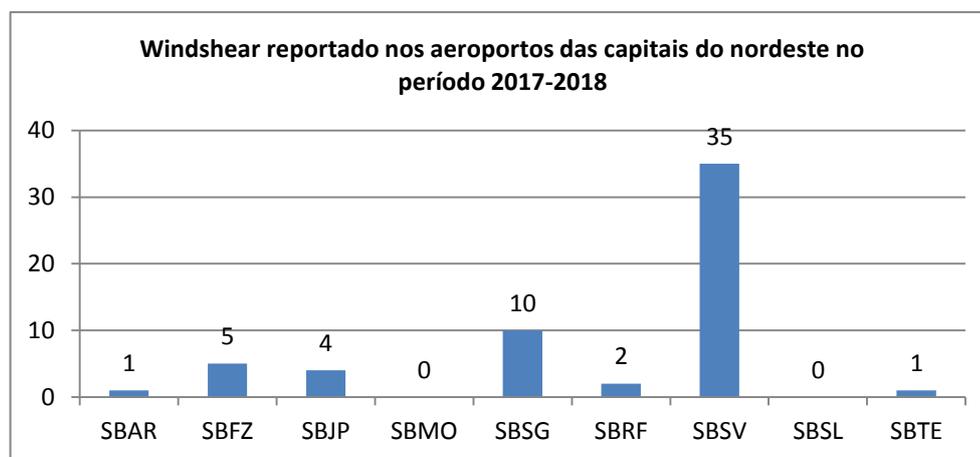
Nos anos de 2017 e 2018 o aeroporto com maior número de registros de WS foi o de Salvador, com um total de 35 reportes, seguido por Natal, com 10, Fortaleza (5), João Pessoa (4) e Recife (2) (Tabela 9, Figura 15). Os menores registros foram em Aracaju e Teresina (1 reporte cada). Em Maceió e São Luís nenhum caso de WS foi registrado. O ano de 2017 registrou mais casos no total (39 dos 58 para 2017 e 2018, respectivamente). O maior número de eventos foi em Salvador 29 dos 35 para os mesmos anos.

**Tabela 9: Número de eventos de WS nos aeroportos das capitais do nordeste nos anos de 2017 e 2018.**

	ARACAJU	FORTALEZA	JOÃO PESSOA	MACEIÓ	NATAL	RECIFE	SALVADOR	SÃO LUÍS	TERESINA	TOTAL
JAN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FEV	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
MAR	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
ABR	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
MAI	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
JUN	0	0	0	0	0	0	6	0	0	6
JUL	0	0	2	0	0	0	9	0	0	11
AGO	0	0	1	0	0	0	5	0	0	6
SET	0	1	0	0	2	0	3	0	0	6
OUT	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
NOV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEZ	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
JAN	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
FEV	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
MAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JUN	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
JUL	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
AGO	0	2	0	0	3	0	0	0	0	5
SET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OUT	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
NOV	0	0	1	0	0	0	4	0	0	5
DEZ	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
TOTAL	1	5	4	0	10	2	35	0	1	58

Fonte: autor.

**Figura 15: Número de reportes de WS nos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste brasileiro.**



Fonte: autor

Em alguns aeroportos foram observados os vários eventos de WS, sem intervalo entre si. Estes eventos consecutivos foram chamados “*grupos*”. Salvador apresenta 12 grupos – reportes consecutivos – de WS (Tabela 10). Nenhuma das outras capitais apresenta registros desse tipo, exceto por apenas dois eventos consecutivos em Natal em agosto de 2018. Isso indica a ocorrência mais persistente do fenômeno no aeroporto da capital baiana, em contraste com os episódios mais pontuais nos demais.

**Tabela 10: Números de eventos (N) e números de eventos consecutivos, ou grupos (G) de WS no aeroporto de Salvador nos anos de 2017 e 2018.**

Mês	2017												2018												TOTAL
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	
<b>N</b>	0	0	1	0	2	6	9	5	3	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	<b>35</b>
<b>G</b>	0	0	0	0	1	2	3	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	<b>12</b>

Fonte: autor

A maior parte dos grupos em Salvador é de 2 horas seguidas de reporte, com destaque para um grupo de 4 horas. Um caso possui duração menor que uma hora, porque foi reportado extraordinariamente entre duas mensagens sem mais registros (Tabela 11).

**Tabela 11: Duração dos grupos reportados em Salvador.**

Duração (h)	Casos
4	1
2	10
1,5	1
1	6
½	1

Fonte: autor

A localização geográfica de aeroportos com respectivos números de eventos de WS é mostrada na Figura 16. Todos os aeroportos, com exceção de SBTE (Teresina) estão localizados na região costeira do NEB.

**Figura 16: Localização e números de reportes de WS nos anos de 2017 e 2018 em cada aeroporto das capitais do nordeste brasileiro.**

Fonte: autor

A análise da frequência de eventos de WS durante os dias mostrou que os períodos da tarde (entre 15 às 18 horas UTC – 12 às 15 horas BRT) e da noite (23 às 02 horas UTC – 20 às 23 horas BRT) concentram a maior parte dos reportes (41 de 58) (Figura 17).

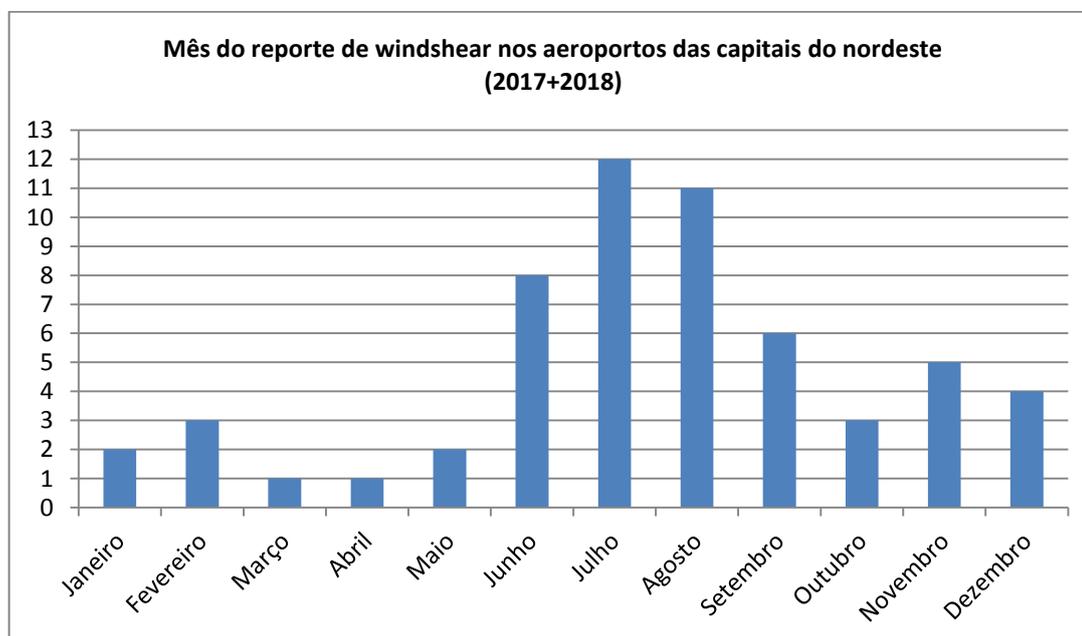
**Figura 17: Número de reportes de WS em cada horário nos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.**



Fonte: autor

Na análise mensal é possível notar prevalência de casos entre os meses de junho a setembro, logo após os meses com menos observações (Figura 18).

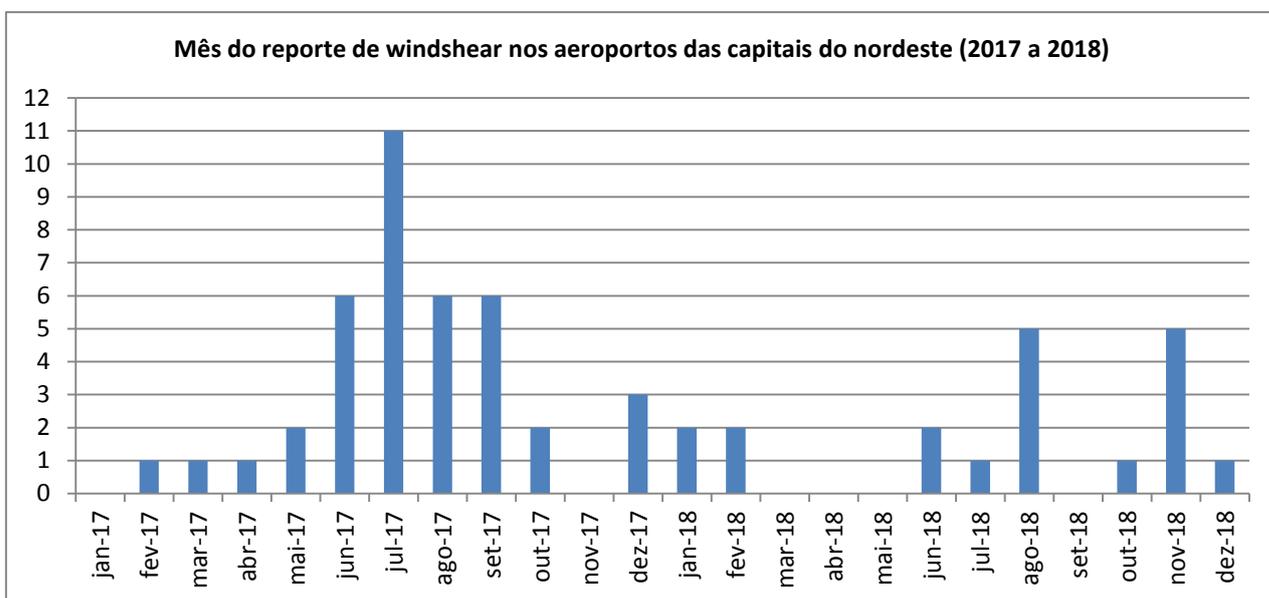
**Figura 18: Número de casos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.**



Fonte: autor

O ano de 2017 apresenta um período de maior número de casos nos os meses de junho a setembro (Figura 19), enquanto nos meses de janeiro e novembro não há nenhum caso. O ano de 2018 não segue esse padrão, e tem mais eventos nos meses de agosto e novembro, com ausência de eventos em setembro, março, abril e maio.

**Figura 19: Número de reportes de WS em cada mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos das capitais do nordeste.**



Fonte: autor

## 5.2 Condições de tempo durante os eventos de *wind shear*

### 5.2.1 Aeroporto de Fortaleza

Todos os eventos registrados no aeroporto de Fortaleza no biênio 2017-2018 duraram uma hora, tiveram boa visibilidade e completa ausência de névoa úmida ou chuva (Tabela 12). As temperaturas do ar registradas são de 26°C a 30°C, com média de 27,4°C. As depressões do ponto de orvalho são de 3°C a 10°C, com média de 6,8°C.

**Tabela 12: Condições observadas durante os eventos de WS em Fortaleza nos anos de 2017 e 2018.**

**Hífen (-): ausência de fenômeno**

Data / Hora	Duração (h)	Visibilidade (km)	Velocidade (kt)	Escala Beaufort	Rajadas (kt)	Direção (°)	Direção	Variação de direção (°)		Névoa úmida	Chuva	T (°C)	Td (°C)	T-Td
11-02-17 1700UTC	1	>10	7	3	-	270	W	-	-	-	-	27	24	3
14-09-17 1600UTC	1	>10	17	5	-	80	E	-	-	-	-	30	20	10
19-10-17 2200UTC	1	>10	11	4	-	80	E	-	-	-	-	27	21	6
04-08-18 2000UTC	1	>10	14	4	-	90	E	-	-	-	-	27	21	6
27-08-18 1100UTC	1	>10	17	5	28	130	SE	-	-	-	-	26	17	9

Fonte: autor.

A velocidade média do vento é de 13,2 kt, com presença de rajadas de 28 kt em um dos eventos (27/08/18). A direção tem componentes de leste na maioria dos casos, com apenas um (11/02/17) apresentando vento de oeste. Em dois casos não há presença de nuvens, enquanto nos demais há nuvens baixas, no evento de 11/02/17 há duas camadas de nuvens cobrindo de 5 a 6 octas do céu, sendo a segunda de médios níveis (Tabela 13).

**Tabela 13: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Fortaleza.**

**Hífen (-): sem mais camadas.**

Camadas de Nuvem e altura da base (m)				
Data / Hora	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
11-02-17 1700UTC	Nublado 300	Nublado 2130	-	-
14-09-17 1600UTC	Poucas 910	-	-	-
19-10-17 2200UTC	-	-	-	-
04-08-18 2000UTC	-	-	-	-
27-08-18 1100UTC	Poucas 610	-	-	-

Fonte: autor

### 5.2.2 Aeroporto de João Pessoa

Todos os eventos registrados no aeroporto de João Pessoa duraram uma hora, apresentaram visibilidade boa e ausência de chuva ou névoa úmida (Tabela 14). As temperaturas do ar registradas variam de 23°C a 30°C, com média de 26°C. As depressões do ponto de orvalho estão entre 1°C e 8°C, com média de 4,75°C.

**Tabela 14: Condições observadas durante os eventos de WS em João Pessoa nos anos de 2017 e 2018.**

Hífen (-): ausência de fenômeno.

Data / Hora	Duração (h)	Visibilidade (km)	Velocidade (kt)	Escala Beaufort	Rajadas (kt)	Direção (°)	Direção	Variação de direção (°)		Névoa úmida	Chuva	T (°C)	Td (°C)	T-Td
10-07-17 2000UTC	1	>10	11	4	-	190	S	-	-	-	-	24	21	3
14-07-17 1800UTC	1	>10	18	5	-	170	S	-	-	-	-	27	20	7
22-08-17 0000UTC	1	>10	5	2	-	190	S	-	-	-	-	23	22	1
29-11-18 1500UTC	1	>10	14	4	-	110	ESE	-	-	-	-	30	22	8

Fonte: autor.

As velocidades do vento vão de 5 kt a 18 kt, com média de 12 kt. Não há registro de rajadas ou variações de direção, que é de leste-sudeste apenas no evento de 29/11/18, sendo de sul nos demais. Há registro de nebulosidade em todos os eventos. Em baixos níveis, de poucas a esparsas, somente no caso de 10/07/17 há uma camada nublada em médios níveis (Tabela 15).

**Tabela 15: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em João Pessoa.**

Hífen (-): sem mais camadas.

Camadas de Nuvem e altura da base (m)				
Data / Hora	1	2	3	4
10-07-17 2000UTC	Poucas 760	Nublado 2130	-	-
14-07-17 1800UTC	Poucas 760	-	-	-
22-08-17 0000UTC	Esparsas 610	-	-	-
29-11-18 1500UTC	Esparsas 910	-	-	-

Fonte: autor.

### 5.2.3 Aeroportos de Teresina, Aracaju e Recife

Nas três cidades Teresina e Aracaju foram registrados somente um evento de WS em cada e no Recife 2 eventos. Todos os eventos duraram uma hora, apresentaram boa visibilidade, ausência de névoa úmida e algum tipo de nebulosidade. Em todos os casos houve nuvens esparsas em baixos níveis (Tabelas 16 e 17).

Entre os quatro eventos, o único de Teresina (19/04/2017) registrou a temperatura mais baixa (25°C), a maior umidade relativa ( $T-T_d = 1^\circ\text{C}$ ), e o vento mais fraco (4 kt) soprando de sul.

**Tabela 16: Condições observadas durante os eventos de WS em Teresina, Aracaju e Recife nos anos de 2017 e 2018.**

Hífen (-): ausência de fenômeno.

Cidade	Data / Hora	Duração (h)	Visibilidade (km)	Velocidade (kt)	Escala Beaufort	Rajadas (kt)	Direção (°)	Direção	Variação de direção (°)		Névoa úmida	Chuva	T (°C)	T <sub>d</sub> (°C)	T-T <sub>d</sub>
Teresina	19-04-17 1000UTC	1	>10	4	2	-	180	S	-	-	-	-	25	24	1
Aracaju	17-06-18 1800UTC	1	>10	12	4	-	140	SE	-	-	-	Pancadas nas vizinhanças	27	23	4
Recife	23-01-18 1600UTC	1	>10	7	3	20	90	E	040	130	-	Chuva fraca	28	25	3
	29-10-18 1700UTC	1	>10	10	3	-	60	ENE	-	-	-	-	29	23	6

Fonte: autor.

Nas outras cidades, Aracaju e Recife, a temperatura foi mais alta, o ar um pouco mais seco, maior velocidade de vento e presença de nuvens e chuva. No único evento em Aracaju no dia 17/06/2018 a temperatura foi de 27°C com T-Td = 4°C, a maior velocidade do vento registrada dentre as três cidades (12 kt de sudeste) e a presença de pancadas de chuvas na vizinhança. Apresentou também nuvens esparsas e céu nublado (tabela 9). Somente dois eventos foram registrados em Recife. No dia 23/01/2018 foi registrado vento de leste (variando direção entre 40° e 130°) com velocidade média de 7 kt e rajadas de 20 kt. A temperatura do ar foi de 28°C, T-Td = 3°C e foi registrada chuva fraca e, também, presença de Cumulus Congestus. Em 29/10/2018 registrou-se vento de leste-nordeste a 10 kt, com temperatura de 29°C e T-Td = 6°C.

**Tabela 17: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Teresina, Aracaju e Recife.**  
**Hífen (-): sem mais camadas.**

Cidade	Camadas de Nuvem e altura da base (m)				
	Data / Hora	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Teresina	19-04-17 1000UTC	Esparsas 610	-	-	-
Aracaju	17-06-18 1800UTC	Esparsas 550	Nublado 1520	-	-
Recife	23-01-18 1600UTC	Esparsas 610	Poucas 670 Cu. Con.	-	-
	29-10-18 1700UTC	Esparsas 700	-	-	-

Fonte: autor.

#### 5.2.4 Aeroporto de Natal

Todos os 10 casos em Natal tiveram boa visibilidade, presença de algum tipo de perturbação no vento, como rajadas ou variação de direção, e duraram uma hora, exceto pelo evento de 29/08/2018 que durou por 2 horas (Tabela 18). As temperaturas registradas foram de 23°C a 31°C, com média de 27,9°C. T-Td foi de 2°C a 11°C, com média de 7,6°C.

Em todos os casos o vento soprava com alguma componente de sul, com velocidades de 9 kt a 17 kt, média de 13,3 kt. Na maioria há registro de variação de direção e em 4 casos houve rajadas (de 24 kt a 27 kt), dois desses casos (03/09/2017 e 23/07/2018) ocorreram ao mesmo tempo em que havia variação de direção.

**Tabela 18: Condições observadas durante os eventos de WS em Natal nos anos de 2017 e 2018.**

**Hífen (-): ausência de fenômeno.**

Data / Hora	Duração (h)	Visibilidade (km)	Velocidade (kt)	Escala Beaufort	Rajadas (kt)	Direção (°)	Direção	Variação de direção (°)		Névoa úmida	Chuva	T (°C)	Td (°C)	T-Td
03-09-17 1900UTC	1	>10	14	4	26	180	S	150	220	-	-	28	18	10
24-09-17 1800UTC	1	>10	17	5	27	160	SSE	-	-	-	-	28	20	8
06-10-17 1700UTC	1	>10	14	4	24	170	S	-	-	-	-	29	20	9
08-01-18 1300UTC	1	>10	13	4	-	140	SE	120	180	-	-	31	21	10
12-06-18 1600UTC	1	>10	12	4	-	180	S	150	220	-	-	29	22	7
23-07-18 1500UTC	1	>10	16	4	27	170	S	150	210	-	-	29	18	11
21-08-18 1500UTC	1	>10	12	4	-	180	S	140	220	-	-	29	18	11
29-08-18 2300UTC	2	>10	10	3	-	180	S	150	220	-	-	23	19	4
30-08-18 0000UTC	-	>10	9	3	-	180	S	150	220	-	-	23	19	4
10-12-18 1500UTC	1	>10	16	4	-	160	SSE	140	230	-	Pancadas nas vizinhanças	29	27	2

Fonte: autor.

Em todos os eventos havia algum tipo de cobertura de nuvens baixas, com dois casos (12/06/2018 e 10/12/2018) apresentando Cumulus Congestus. Nessa última data também houve registro de pancadas de chuva nas vizinhanças do aeroporto (Tabela 19).

**Tabela 19: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Natal.**

**Hífen (-): ausência de fenômeno.**

<b>Camadas de Nuvem e altura da base (m)</b>				
<b>Data / Hora</b>	<b>Camada 1</b>	<b>Camada 2</b>	<b>Camada 3</b>	<b>Camada 4</b>
03-09-17 1900UTC	Poucas 910	-	-	-
24-09-17 1800UTC	Esparsas 910	-	-	-
06-10-17 1700UTC	Esparsas 1220	-	-	-
08-01-18 1300UTC	Nublado 910	-	-	-
12-06-18 1600UTC	Poucas 1000 Cu. Cong	-	-	-
23-07-18 1500UTC	Esparsas 1120	-	-	-
21-08-18 1500UTC	Esparsas 1000	-	-	-
29-08-18 2300UTC	Poucas 700	-	-	-
30-08-18 0000UTC	Poucas 700	-	-	-
10-12-18 1500UTC	Esparsas 450	Nublado 640	Poucas 760 Cu. Con.	-

Fonte: autor

5.2.5 Sumário de condições de tempo durante os eventos de WS nos anos de 2017 e 2018 nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.

Quase todos os eventos duraram 1 hora e somente um evento foi registrado durante 2 horas. Durante todos os eventos a visibilidade foi maior do que 10 km. Durante os eventos ocorridos nas capitais, exceto Salvador, o vento observado em superfície apresenta variação de direção e/ou rajadas em mais da metade dos casos. A direção majoritária observada em 11 dos 23 eventos é de sul, e a velocidade é classificada como moderada (Beaufort) em 12 registros (Tabela 20).

**Tabela 20: Números de eventos (N) de diversas velocidades (V em kt e em escala Beaufort, B) e direção de vento – D, em graus (°) e setor da rosa dos ventos (S) – e com rajadas do vento nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.**

Velocidade de vento				Direção de vento				Rajadas de vento	
V	N	B	N	D	N	S	N	Vento	N
18	1	5	4	270	1	ENE	1	Variando	
17	3	4	12	190	2	E	4	direção	8
16	2	3	5	180	6	ESE	1	Rajadas	6
14	4	2	2	170	3	SE	3	Normal	10
13	1			160	2	S	11		
12	3			140	2	SSE	2		
11	2			130	1	W	1		
10	2			110	1				
9	1			90	2				
7	2			80	2				
5	1			60	1				
4	1								

Fonte: autor.

Em todos os casos foram reportados ausência de névoa úmida e na maioria (20 casos) não choveu. As pancadas da chuva nas vizinhanças foram em 2 casos e chuva fraca em um caso. Há registro de presença de nuvens na maioria (21) dos eventos. A temperatura do ar registrada na maior parte (14) dos casos está entre 27°C e 29°C, e na depressão do ponto de orvalho há mais valores (14) superiores a 5°C do que inferiores (Tabela 21).

**Tabela 21 - Números de eventos (N) de diferentes coberturas de nuvens (C), Temperatura (T (°C)) e T-Td (°C) nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.**

Nebulosidade		Temperatura		Depressão do ponto de orvalho	
C	N	T	N	T-Td	N
Poucas	10	31	1	10	3
Esparsas	11	30	2	9	4
Nublado	6	29	6	8	2
Sem nuvens	2	28	3	7	2
		27	5	6	3
		26	1	4	3
		25	1	3	3
		24	1	2	1
		23	3	1	2

Fonte: autor.

Houve presença de Cumulus Congestus em apenas 2 dos 23 casos, chuva fraca em um caso e pancadas nas vizinhanças em dois casos, em nenhum evento se registrou névoa úmida.

Em apenas duas ocasiões foram observadas camadas de nuvens de médios níveis, não foram observadas nuvens mais baixas que 300 m. Das 27 camadas registradas, 13 estiveram entre 700 e 1000 m de altura (Tabela 22).

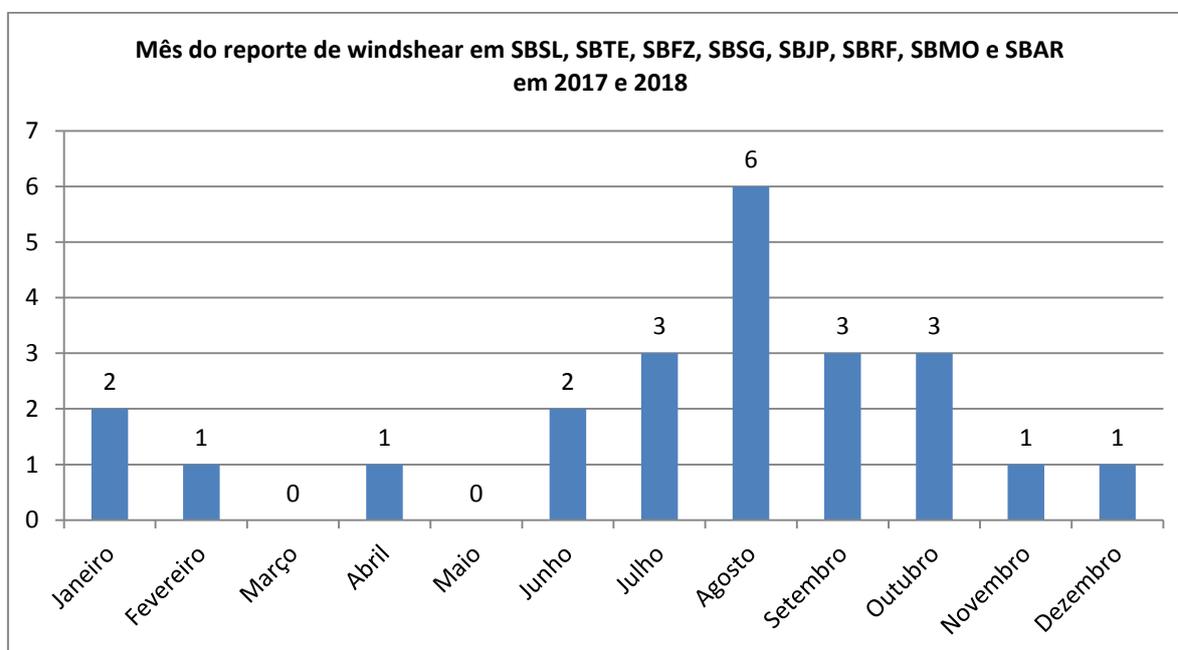
**Tabela 22: Altura da base das nuvens nos eventos reportados nas cidades Fortaleza, João Pessoa, Teresina, Aracaju, Natal e Recife.**

<b>Base das nuvens (m)</b>	2130	1520	1220	1120	1000	910	760	700	670	640	610	550	450	300
<b>Eventos</b>	2	1	1	1	2	5	3	3	1	1	4	1	1	1

Fonte: autor.

Em 2017 e 2018, nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju a maioria dos eventos (15 dos 23) ocorreu entre os meses de julho a outubro, com os meses de março e maio sem nenhuma ocorrência (Figura 20).

**Figura 20: Número de eventos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018 nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju.**

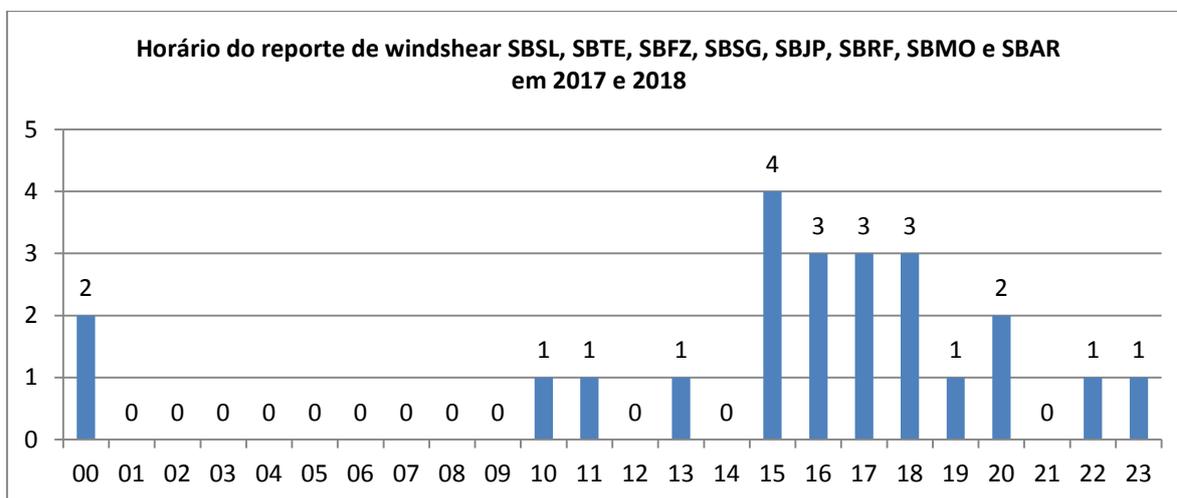


Fonte: autor.

Em 2017 e 2018, nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju os horários mais frequentes de reporte de WS (16 de 23) são entre as 15h UTC e 20h UTC (12h BRT às 17h BRT). Nos horários das 01h UTC às 09h UTC (22h

BRT às 06h BRT), incluindo 12h UTC, 14h UTC e 21h UTC, não houve nenhum reporte (Figura 21).

**Figura 21: Número de eventos de WS em cada hora, de 2017 e 2018, nos aeroportos de São Luís, Teresina, Fortaleza, Natal, João Pessoa, Recife, Maceió e Aracaju.**



Fonte: autor

### 5.2.6 Condições de tempo durante os eventos de *wind shear* nos anos de 2017 e 2018 no Aeroporto de Salvador

Dos 35 casos de WS ocorridos no Aeroporto de Salvador em 2017 e 2018, a maioria (29) ocorreu no ano de 2017. Em 2018 os poucos (6) casos registrados ocorreram nos meses de fevereiro e, principalmente, novembro, enquanto em 2017 nenhum evento foi registrado nesses meses. Durante os dias 25, 26 e 27 de agosto de 2017 não houve registro da temperatura do ponto de orvalho. Houve quatro registros de névoa úmida nos casos do período estudado, todos em 2017. Em nenhum caso houve variação de direção e rajadas de vento ao mesmo tempo. O ano de 2017 teve 48% de casos com algum tipo de chuva presente, enquanto 2018 teve 17% dos seus casos com chuva (Apêndice J).

Nenhum dos outros aeroportos registrou névoa úmida nos eventos. Alguns registraram rajadas e variação na direção do vento ao mesmo tempo. Os outros aeroportos somente registraram casos com chuva em 2018.

Nebulosidade esteve presente em múltiplas camadas e com mais de metade da cobertura do céu na maioria das vezes (77%). Quando estiveram presentes, a altura da base das Cumulus Congestus não ultrapassou os 800 m. O Aeroporto de Salvador foi o único entre

os estudados a registrar quatro camadas de nebulosidade durante (5 dos 35) eventos de WS (Tabela 23).

**Tabela 23: Nebulosidade observada durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Salvador.**

**Hífen (-): sem mais camadas.**

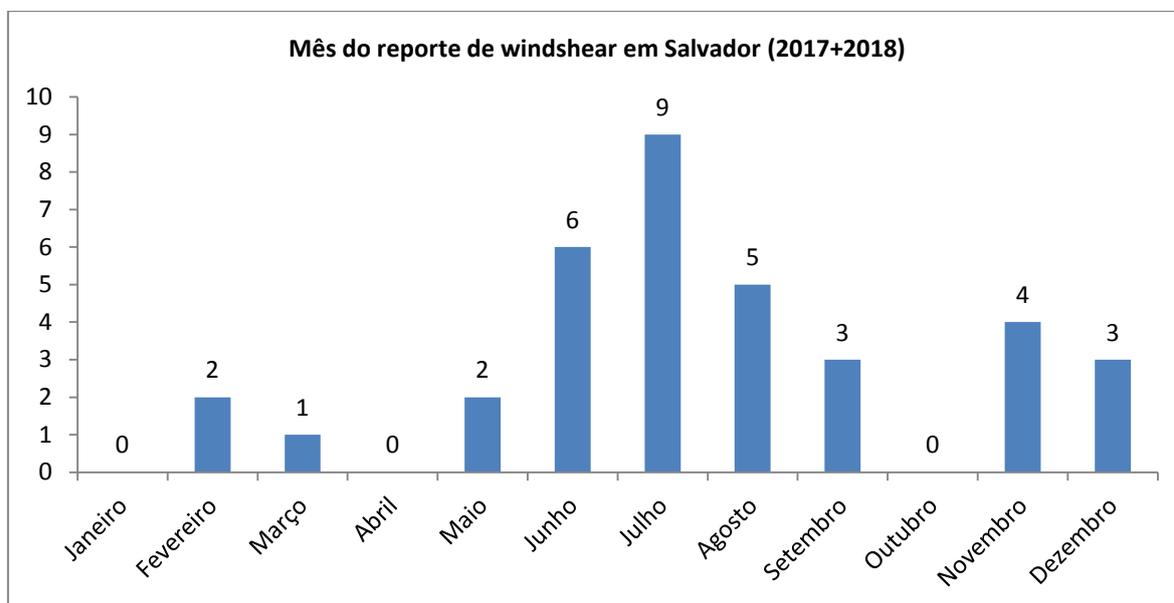
Camadas de Nuvem e altura da base (m)				
Data / Hora	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
04-03-17 / 1800UTC	Poucas 610	-	-	-
01-05-17 / 0100UTC	Esparsas 610	Nublado 1.800	-	-
01-05-17 / 0200UTC	Nublado 610	-	-	-
05-06-17 / 1230UTC	Esparsas 270	Nublado 300	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130
05-06-17 / 1300UTC	Esparsas 400	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130
21-06-17 / 2300UTC	Esparsas 610	-	-	-
23-06-17 / 0225UTC	Nublado 520	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
23-06-17 / 0235UTC	Nublado 520	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
23-06-17 / 1500UTC	Nublado 700	Poucas 760 Cu. Con.	Nublado 2.440	-
04-07-17 / 0200UTC	Nublado 520	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
04-07-17 / 0300UTC	Nublado 520	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
04-07-17 / 0500UTC	Esparsas 460	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
16-07-17 / 0600UTC	Esparsas 520	Nublado 2.130	-	-
16-07-17 / 0700UTC	Poucas 610	Nublado 2.130	-	-
27-07-17 / 0100UTC	Esparsas 610	Nublado 2.440	-	-
27-07-17 / 0200UTC	Esparsas 610	Nublado 3.050	-	-
29-07-17 / 1800UTC	Nublado 300	Nublado 460	Poucas 700 Cu. Con.	Nublado 1.830
29-07-17 / 1900UTC	Poucas 300	Nublado 460	Nublado 3.050	-
25-08-17 / 2200UTC	Esparsas 610	Nublado 2.130	-	-
25-08-17 / 2300UTC	Esparsas 460	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
26-08-17 / 0000UTC	Poucas 300	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130
26-08-17 / 0100UTC	Esparsas 300	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	-
27-08-17 / 0800UTC	Esparsas 610	-	-	-
02-09-17 / 1400UTC	Esparsas 610	Poucas 670 Cu. Con..	Nublado 2.130	-
02-09-17 / 1500UTC	Poucas 610	Esparsas 2.130	-	-
03-09-17 / 1600UTC	Nublado 460	Encoberto 2.130	-	-
11-12-17 / 0100UTC	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	Encoberto 1.830	-
11-12-17 / 0135UTC	Poucas 400	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	Encoberto 1.830
11-12-17 / 0200UTC	Nublado 460	Poucas 610 Cu. Con.	Encoberto 2.130	-
25-02-18 / 1600 UTC	Esparsas 610	-	-	-
25-02-18 / 1700 UTC	Esparsas 610	-	-	-
14-11-18 / 1500 UTC	Poucas 610	-	-	-
14-11-18 / 1600 UTC	Poucas 610	-	-	-
27-11-18 / 0100 UTC	Esparsas 520	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-
27-11-18 / 0200 UTC	Poucas 610 Cu. Con.	Nublado 2.130	-	-

Fonte: autor.

No biênio estudado no Aeroporto de Salvador os únicos meses que não têm registro de WS são janeiro, abril e outubro. Vê-se um período de grande número de reportes (25) entre os meses de maio e setembro. E se destacam também os meses de novembro e dezembro com

sete casos (Figura 22). Diferentemente de Salvador, nos outros aeroportos os meses sem ocorrência foram março e maio.

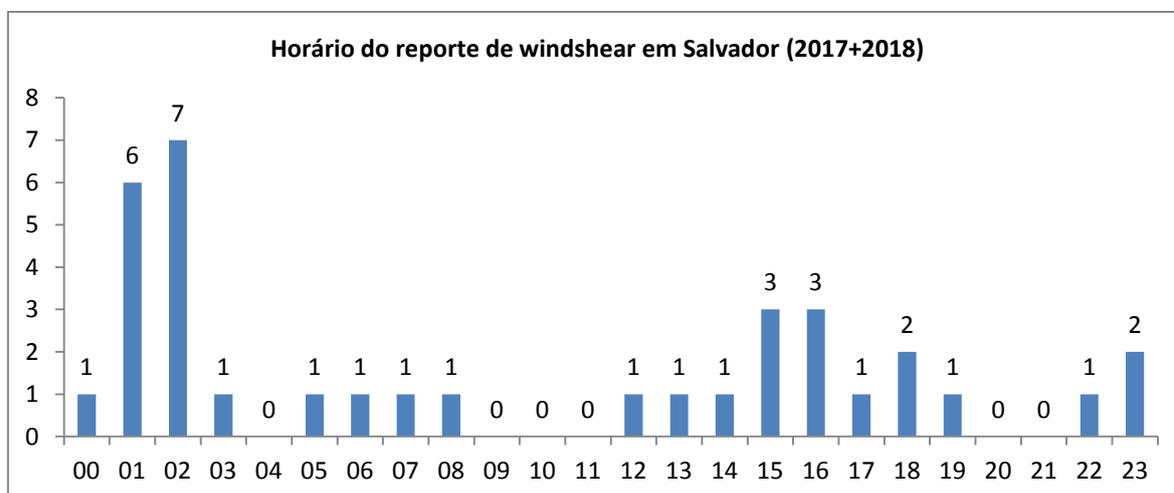
**Figura 22: Número de eventos de WS por mês dos anos de 2017 e 2018, no Aeroporto de Salvador.**



Fonte: autor.

No Aeroporto de Salvador em 2017 e 2018 os horários em que mais houve mais reportes (13) de WS são as 01 h UTC e 02 h UTC (22 h BRT e 23 h BRT), enquanto nos outros aeroportos não houve registros nessas horas. Há um segundo período, das 15 h UTC às 16 h UTC (12 h BRT e 13 h BRT) em que se registraram seis casos em Salvador (Figura 23), e que nos outros aeroportos é parte do período de maior número de casos.

**Figura 23: Número de eventos de WS em cada hora, de 2017 e 2018, no Aeroporto de Salvador.**



Fonte: autor.

Durante os eventos de WS no Aeroporto de Salvador o vento soprou com alguma componente de leste na maioria das vezes (29 de 35). Em 4 casos havia componente de oeste (continente) no vento. A velocidade era de 4 kt a 19 kt, com média de 11,5 kt; a maioria (19) se enquadrando como “moderada” na escala Beaufort, assim como nas outras cidades. Ao contrário dos outros aeroportos, na maioria (25) dos reportes não houve variação na direção ou rajadas de vento, que somente no dia 04/07/2017 alcançaram 29 kt (Tabela 24).

**Tabela 24: Números de eventos (N) de diversas velocidades (V, em kt e B em escala Beaufort) e direção do vento (D em graus (°) e S em setor da rosa dos ventos) e com rajadas de vento nos eventos reportados em Salvador.**

Velocidade do vento				Direção do vento		Rajadas de vento	
V	N			D	N		
19	2			340	1		
18	1			330	2		
16	2			250	1		
15	2			180	1	<b>S</b>	<b>N</b>
14	3			170	1	E	8
13	6	<b>B</b>	<b>N</b>	160	5	ENE	1
12	1	5	3	150	5	ESE	4
11	5	4	19	140	5	NNW	3
10	3	3	9	130	1	S	2
9	1	2	4	120	2	SE	6
8	3			110	2	SSE	10
7	2			100	2	WSW	1
6	2			90	4		
5	1			80	2		
4	1			70	1		
						<b>Vento</b>	<b>N</b>
						Variando	5
						direção	
						Rajadas	5
						Normal	25

Fonte: autor

A nebulosidade esteve presente em todos os casos de WS em Salvador, tal qual na maioria dos casos nas outras capitais. As temperaturas do ar registradas durante os eventos de Salvador estiveram abaixo das registradas nas outras cidades, entre 20°C e 30°C, com média de 24°C. A depressão do ponto de orvalho foi de 0°C a 9°C, com média de 4,3°C, cinco reportes não continham medição de Td, problema que não aconteceu em outros aeroportos durante os eventos (Tabela 25).

**Tabela 25: Número de eventos (N) de diferentes coberturas de nuvens (C), temperatura (T(°C)) e T-Td (°C) nos eventos reportados em Salvador.**

Cobertura de nuvens		Temperatura do ar		Depressão do ponto de orvalho	
		<b>T</b>	<b>N</b>	<b>T-Td</b>	<b>N</b>
		30	3	Sem Td	5
		29	2	9	1
		27	2	8	3
<b>C</b>	<b>N</b>	26	1	7	2
Poucas	26	25	1	6	5
Esparsas	17	24	3	5	5
Nublado	38	23	13	4	1
Encoberto	4	22	7	3	5
		21	1	2	2
		20	2	1	5
				0	1

Fonte: autor.

Na maioria dos reportes de WS no Aeroporto de Salvador a visibilidade era boa (superior a 10 Km, como em todos os casos das outras cidades), em outros casos na capital baiana, chegou desde 8 Km até 3 Km. Em mais da metade dos casos havia presença de nuvens do tipo Cumulus Congestus, fato que das outras cidades só ocorreu em Natal. Chuva também esteve presente (15 casos), ou na área do aeroporto (9), como em Recife, ou nas vizinhanças (6), como em Aracaju e Natal (Tabela 26).

**Tabela 26: Número de eventos (N) com presença de nuvens do tipo Cumulus Congestus (Cu con), chuva (Chv) e visibilidade horizontal (km) em Salvador nos anos de 2017 e 2018.**

Visibilidade		Cumulus Congestus		Chuva	
<b>Visibilidade</b>	<b>Eventos</b>			<b>Chv</b>	<b>N</b>
>10	20			Forte	2
8	6	<b>Cu con</b>	<b>N</b>	Fraca	6
6	1	Presente	18	Pancadas fracas	1
5	4	Ausente	17	Pancadas nas vizinhanças	6
4	1			Sem chuva	20
3	3				

Fonte: autor.

Nos reportes de Salvador, em 22 (26%) casos houve nuvens com base em médios níveis, enquanto nas outras capitais isso só ocorreu duas vezes (7%) (Tabela 27).

**Tabela 27: Altura da base das nuvens nos eventos reportados em Salvador.**

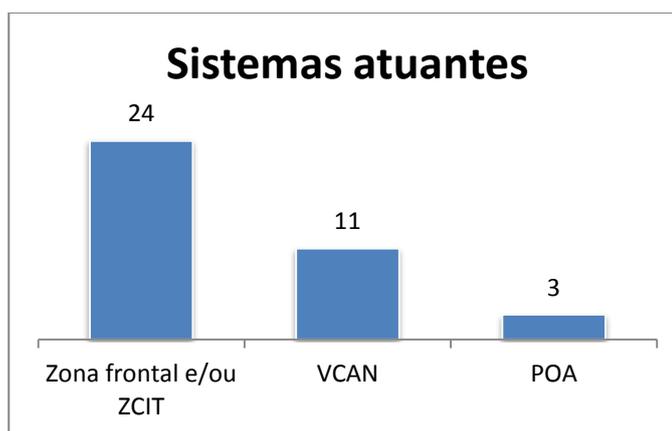
<b>Base das nuvens (m)</b>	3050	2440	2130	1830	1800	760	700	670	610	520	460	400	300	270
<b>Eventos</b>	2	2	18	3	1	1	2	1	30	6	11	2	5	1

Fonte: autor.

### 5.3 Sistemas sinóticos atuantes durante os eventos de *wind shear*

O sistema que mais esteve atuante durante os episódios de WS foram as zonas frontais, seguido pelo acoplamento de zonas frontais com a ZCIT, e o VCAN (Tabela 28 e Figura 24).

**Figura 24: Sistemas sinóticos presentes nos eventos de WS nos aeroportos das capitais do nordeste nos anos de 2017 e 2018.**



Fonte: autor.

**Tabela 28: Sistemas sinóticos atuantes nos casos de WS nos aeroportos das capitais do NEB.**

**ZF + ZCIT: zona frontal acoplada com ZCIT;**

**VCAN: vórtice ciclônico de altos níveis (setor do VCAN onde ocorre o evento);**

**VCMN: vórtice ciclônico de médios níveis;**

**POA1: padrão 1 de perturbação ondulatória dos alísios;**

**POA2: padrão 2 de perturbação ondulatória dos alísios;**

**Con. Cb: conglomerado de Cumulonimbus.**

<b>Cidade</b>	<b>Data[Hora]</b>	<b>Sistemas</b>
Aracaju	17-06-18 [18]	POA1
Fortaleza	04-08-18 [20]	Zona Frontal
Fortaleza	11-02-17 [17]	VCAN (setor N)
Fortaleza	14-09-17 [16]	Zona Frontal
Fortaleza	19-10-17 [22]	VCAN (setor N)
Fortaleza	27-08-18 [11]	Zona Frontal
João Pessoa	10-07-17 [20]	ZF + ZCIT
João Pessoa	14-07-17 [18]	ZF + ZCIT
João Pessoa	22-08-17 [00]	POA1
João Pessoa	29-11-18 [15]	ZF + ZCIT
Natal	03-09-17 [19]	Zona Frontal
Natal	06-10-17 [17]	Zona Frontal
Natal	08-01-18 [13]	VCAN (setor N)
Natal	10-12-18 [15]	VCAN (centro)
Natal	12-06-18 [16]	Zona Frontal
Natal	21-08-18 [15]	ZF + ZCIT
Natal	23-07-18 [15]	Zona Frontal
Natal	24-09-17 [18]	POA1
Natal	29+30-08-18 [23-00]	POA1
Recife	23-01-18 [16]	VCAN (setor E)
Recife	29-10-18 [17]	Zona Frontal
Salvador	01-05-17 [01-02]	ZF + ZCIT
Salvador	02-09-17 [14-15]	Zona Frontal
Salvador	03-09-17 [16]	Zona Frontal, VCMN
Salvador	04-03-17 [18]	VCAN (centro)
Salvador	04-07-17 [02-03-04]	Zona Frontal
Salvador	05-06-17 [12:30-13]	ZF + ZCIT
Salvador	11-12-17 [01-02]	Zona Frontal
Salvador	14-11-18 [15-16]	VCAN (setor SE)
Salvador	16-07-17 [06-07]	VCAN (setor NO)
Salvador	21-06-17 [23]	Zona Frontal
Salvador	23-06-17 [02:25]	Zona Frontal
Salvador	23-06-17 [15]	Zona Frontal
Salvador	25-02-18 [16-17]	ZF + ZCIT
Salvador	25+26-08-17 [22-23-00-01]	VCAN (setor N)
Salvador	27-07-17 [01-02]	VCAN (setor E)
Salvador	27-08-17 [08]	VCAN (setor N)
Salvador	27-11-18 [01-02]	Zona Frontal
Salvador	29-07-17 [18-19]	Zona Frontal
Teresina	19-04-17 [10]	ZCIT, Con. Cb

Fonte: autor.

Em Aracaju o único evento registrado ocorreu sob influência de POA no padrão 1, com cavado muito fraco em baixos níveis.

Os sistemas que atuaram nos eventos de WS no Aeroporto de Fortaleza foram as zonas frontais (3 casos) e os VCANs (setor norte) (2 casos).

Em João Pessoa os sistemas associados com WS foram os acoplamentos de zona frontal com ZCIT (3 casos) e as POAs – padrão 1 (1 caso). Esse padrão não apresenta convergência entre correntes do hemisfério norte e hemisfério sul, a circulação sobre o Atlântico Tropical Sul é dominada pela ASAS.

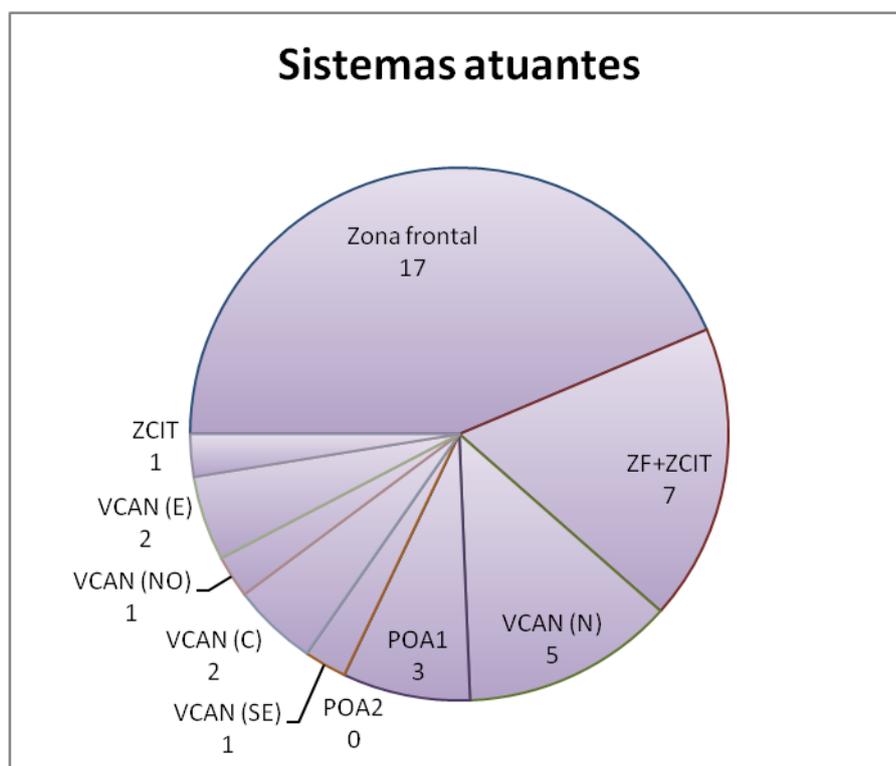
Em Natal (9 casos) os sistemas sinóticos atuantes foram as zonas frontais (4), as POAs – padrão 1 (2 casos), VCAN (setor norte (1 caso) e centro (1 caso)), e o acoplamento de zona frontal com ZCIT (1 caso).

Nos dois casos de Recife foram identificados VCAN continental (setor leste) e zona frontal. No caso de Teresina foi identificada a atuação da ZCIT na formação de um conglomerado de Cb (Tabela 21).

Para os eventos de Salvador foram identificados VCANs em praticamente todos os setores (3 no oceano, 2 no continente e 1 sobre a cidade). Também, as zonas frontais (9 casos) e estas zonas acoplados com ZCIT (3 casos) foram associados com WS. Um evento ocorreu no sistema da circulação de VCMN sobre o oceano com movimentos ascendentes (03/09/2017).

Entre todos os casos, a influência do VCAN foi confirmada principalmente quando o aeroporto está no setor norte do vórtice (Figura 25).

**Figura 25: Sistemas atuantes nos casos de WS reportados em aeroportos das capitais do nordeste em 2017 e 2018.**



Fonte: autor.

#### 5.4 Estrutura da troposfera durante os eventos de *wind shear*

Havia instabilidade na troposfera inferior na maior parte dos casos (64%) de todos os aeroportos, exceto em Natal, onde as inversões térmicas predominaram em baixos níveis (tabelas 29, 30, 31).

**Tabela 29: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais simulados do ERA5 de Salvador.**

**Baixos níveis: de 1000 hPa a 800 hPa; Médios níveis: de 800 hPa a 400 hPa; Altos níveis: de 400 hPa a 150 hPa.**

	Baixos níveis	Médios níveis	Altos níveis
Inversão	0	6	0
Isotermia	0	5	0
Estável	0	4	0
Condicional	4	2	16
Instável	14	2	2

Fonte: autor.

Nos médios níveis em Natal e Salvador as inversões térmicas foram mais comuns, seguidas das isotermias.

**Tabela 30: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais observados de Natal.**

*Baixos níveis: de 1000 hPa a 800 hPa; Médios níveis: de 800 hPa a 400 hPa; Altos níveis: de 400 hPa a 150 hPa.*

	Baixos níveis	Médios níveis	Altos níveis
Inversão	5	8	1
Isotermia	0	3	0
Estável	0	0	0
Condicional	3	1	8
Instável	4	0	0

Fonte: autor.

Nas demais cidades a média troposfera foi majoritariamente estável.

Em altos níveis a instabilidade foi condicional na maioria (85%) dos casos. Apenas Natal registrou inversões térmicas nesses níveis.

**Tabela 31: Características de instabilidade da troposfera (número de casos) pelos perfis verticais simulados do ERA5 de Aracaju, Recife, João Pessoa, Fortaleza e Teresina.**

*Baixos níveis: de 1000 hPa a 800 hPa; Médios níveis: de 800 hPa a 400 hPa; Altos níveis: de 400 hPa a 150 hPa.*

	Baixos níveis	Médios níveis	Altos níveis
Inversão	2	1	0
Isotermia	0	1	0
Estável	1	5	0
Condicional	1	3	10
Instável	11	4	3

Fonte: autor.

Em Salvador a maior parte dos casos ocorreu com os índices indicando estabilidade (LI>0 em 77% dos perfis simulados, CAPE < 100 J/Kg em 53% dos perfis). A média de água precipitável foi de 34,7 mm, e os valores mais extremos foram 24 mm em 16/07/2017 e 59 mm em 11/12/2017, esta última data também apresentou mais instabilidade (CAPE>800 J/Kg e LI=-2,6). Um caso (27/11/2018) apresentou umidade alta em todos os níveis da troposfera

(AP = 50 mm), apesar de não haver indícios de forte instabilidade (CAPE < 200 J/Kg; LI > -2) (Tabela 32).

**Tabela 32: Índices de instabilidade nos eventos de Salvador.**

**Asterisco (\*) – calculado com método alternativo.**

<b>Estação/Data/Hora</b>	<b>CAPE</b>	<b>CIN</b>	<b>LI</b>	<b>AP</b>
SBSV_01-05-2017 01:00	148.7*	-51.1*	1.7	32
SBSV_01-05-2017 02:00	63	-8.6	1.8	31
SBSV_02-09-2017 14:00	21.6	-11.3	4.8	29
SBSV_02-09-2017 15:00	21.6	-12.1	4.3	30
SBSV_03-09-2017 16:00	58.8	0	0.9	31
SBSV_04-03-2017 18:00	572.8	-27.8	-0.5	30
SBSV_04-07-2017 02:00	13.5	-15.2	7.1	29
SBSV_04-07-2017 03:00	12	-12.6	7.1	29
SBSV_04-07-2017 04:00	24.4	-5.6	6.9	28
SBSV_05-06-2017 12:00	9.7	-12.5	1	41
SBSV_05-06-2017 13:00	84*	-67.8*	0.8	40
SBSV_11-12-2017 01:00	809	-34.5	-2.6	59
SBSV_11-12-2017 02:00	803.6	-34.5	-2.6	59
SBSV_14-11-2018 15:00	124.6*	-106.1*	-0.7	46
SBSV_14-11-2018 16:00	12.9	-20.7	-0.3	45
SBSV_16-07-2017 06:00	27.6	-21.2	5.3	24
SBSV_16-07-2017 07:00	28.3	-21.6	5.8	24
SBSV_21-06-2017 23:00	195.3	0	3.7	36
SBSV_23-06-2017 02:00	172.9	0	2	37
SBSV_23-06-2017 03:00	174.5	0	2.1	37
SBSV_23-06-2017 15:00	1.7	0	-0.2	34
SBSV_25-02-2018 16:00	192*	-132.4*	1.3	31
SBSV_25-02-2018 17:00	235.9*	-94.3*	0.9	30
SBSV_25-08-2017 22:00	15.4	-8.4	4.1	32
SBSV_25-08-2017 23:00	15.2	-7.1	4.3	32
SBSV_26-08-2017 00:00	35.8	0	4.1	31
SBSV_26-08-2017 01:00	29.7	0	4.2	31
SBSV_27-07-2017 01:00	117.6	-0.4	4.5	29
SBSV_27-07-2017 02:00	120.1	-0.2	4.6	28
SBSV_27-08-2017 08:00	20.2	-2.6	4.6	28
SBSV_27-11-2018 01:00	105.3	-17.5	-0.4	50
SBSV_27-11-2018 02:00	199.9	-10.9	-0.9	50
SBSV_29-07-2017 18:00	164.1	0	2.5	29
SBSV_29-07-2017 19:00	189.5	-0.2	2.3	28

Fonte: autor.

Em Natal a maioria (80%) dos casos ocorreu em atmosfera estável (CAPE < 100 J/Kg). Os únicos casos em meses de verão (08/01/2018 e 10/12/2018) são os que têm mais sinais de convecção forte (respectivamente, CAPE de 1037 J/Kg e 828,6 J/Kg; LI de -4,3 e -

1,3). O índice de água precipitável esteve abaixo dos 50 mm em todos os casos, exceto em 10/12/2018, quando alcançou 59 mm (Tabela 33).

**Tabela 33: Índices de instabilidade nos eventos de Natal.**

<b>Estação/Data/Hora</b>	<b>Perfil (SBNT)</b>	<b>CAPE</b>	<b>CIN</b>	<b>LI</b>	<b>AP</b>
SBSG_03-09-2017 19:00	04-09-2017 00:00	0	0	3.4	29
SBSG_06-10-2017 17:00	06-10-2017 12:00	24.7	-6.9	2.4	33
SBSG_08-01-2018 13:00	08-01-2018 12:00	1037	-13.7	-4.3	37
SBSG_10-12-2018 15:00	10-12-2018 12:00	828.6	-4.2	-1.3	59
SBSG_12-06-2018 16:00	12-06-2018 12:00	70.9	-6.9	1.8	37
SBSG_21-08-2018 15:00	21-08-2018 12:00	28.1	-2.4	-0.1	28
SBSG_23-07-2018 15:00	23-07-2018 12:00	4.5	-12	4.3	31
SBSG_24-09-2017 18:00	25-09-2017 00:00	5.7	-28.7	2.4	34
SBSG_29-08-2018 23:00	30-08-2018 00:00	0	0	4.3	30
SBSG_30-08-2018 00:00	30-08-2018 00:00	0	0	4.3	30

Fonte: autor.

Entre os outros aeroportos, todos têm pelo menos um evento com CAPE superior a 100 J/Kg, exceto por Aracaju. O caso de 11/02/2017 em Fortaleza possui os maiores valores de CAPE (1372,2 J/Kg) e água precipitável (63 mm) de todos os eventos estudados (Tabela 34).

**Tabela 34: Índices termodinâmicos de instabilidade nos eventos de Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Recife e Teresina.**

<b>Estação/Data/Hora</b>	<b>CAPE</b>	<b>CIN</b>	<b>LI</b>	<b>AP</b>
SBAR_17-06-2018 18:00	41.6	-2.7	0.4	37
SBFZ_04-08-2018 20:00	1.9	-146.8	1.3	30
SBFZ_11-02-2017 17:00	1372.2	0	-3.4	63
SBFZ_14-09-2017 16:00	0.4	-26.2	2.7	35
SBFZ_19-10-2017 22:00	153	-202	-1.2	33
SBFZ_27-08-2018 11:00	0	0	2.7	27
SBJP_10-07-2017 20:00	58.6	-6.9	0.5	53
SBJP_14-07-2017 18:00	0	0	2.1	36
SBJP_22-08-2017 00:00	8.5	-13	1.9	30
SBJP_29-11-2018 15:00	145.9	-31.8	-0.7	40
SBRF_23-01-2018 16:00	980.7	-15	-1.9	51
SBRF_29-10-2018 17:00	70.8	-16.2	-0.3	37
SBTE_19-04-2017 10:00	649.1	-18.2	-1.4	51

Fonte: autor.

Das 31 inversões térmicas identificadas, 30 foram inversões de subsidência. Todos os perfis de Natal contiveram esse tipo de inversão. Em um caso naquela cidade (30/08/2018) houve inversão de turbulência, caracterizada pelo forte gradiente vertical de velocidade do

vento próximo da superfície. Em 7 dos 9 casos na cidade houve mais de uma camada de inversão térmica. Nos eventos de Aracaju, João Pessoa e Teresina não ocorreram inversões de nenhum tipo (Tabela 35).

**Tabela 35: Número e tipos de inversões por perfil.**

<b>Cidade</b>	<b>Data[Hora]</b>	<b>Inversão (quantidade)</b>
Aracaju	17-06-18 [18]	0
Fortaleza	04-08-18 [20]	0
Fortaleza	11-02-17 [17]	0
Fortaleza	14-09-17 [16]	Subsidência (1)
Fortaleza	19-10-17 [22]	0
Fortaleza	27-08-18 [11]	Subsidência (1)
João Pessoa	10-07-17 [20]	0
João Pessoa	14-07-17 [18]	0
João Pessoa	22-08-17 [00]	0
João Pessoa	29-11-18 [15]	0
Natal	03-09-17 [19]	Subsidência (4)
Natal	06-10-17 [17]	Subsidência (2)
Natal	08-01-18 [13]	Subsidência (3)
Natal	10-12-18 [15]	Subsidência (1)
Natal	12-06-18 [16]	Subsidência (3)
Natal	21-08-18 [15]	Subsidência (1)
Natal	23-07-18 [15]	Subsidência (2)
Natal	24-09-17 [18]	Subsidência (2)
Natal	29+30-08-18 [23-00]	Turbulência (1), Subsidiência (3)
Recife	23-01-18 [16]	0
Recife	29-10-18 [17]	Subsidência (1)
Salvador	01-05-17 [01-02]	0
Salvador	02-09-17 [14-15]	0
Salvador	03-09-17 [16]	0
Salvador	04-03-17 [18]	0
Salvador	04-07-17 [02-03-04]	Subsidência (1)
Salvador	05-06-17 [12:30-13]	0
Salvador	11-12-17 [01-02]	0
Salvador	14-11-18 [15-16]	0
Salvador	16-07-17 [06-07]	Subsidência (1)
Salvador	21-06-17 [23]	Subsidência (1)
Salvador	23-06-17 [02:25]	0
Salvador	23-06-17 [15]	0
Salvador	25-02-18 [16-17]	0
Salvador	25+26-08-17 [22-23-00-01]	Subsidência (1)
Salvador	27-07-17 [01-02]	Subsidência (1)
Salvador	27-08-17 [08]	Subsidência (1)
Salvador	27-11-18 [01-02]	0
Salvador	29-07-17 [18-19]	0
Teresina	19-04-17 [10]	0

Fonte: autor.

### 5.5 Características termodinâmicas de troposfera nos sistemas sinóticas durante os eventos de *wind shear*

No aeroporto de Salvador seis casos (33%) apresentaram inversões térmicas, e em metade desses eventos havia VCAN, apesar desse sistema atuar em apenas seis eventos (Tabela 36). Nos eventos WS associados com zonas frontais predominou a fraca instabilidade em 7 eventos (58%), seguida da estabilidade com ou sem inversão em quatro eventos (33%) e um único evento com atmosfera instável.

**Tabela 36: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Salvador.**

<b>Evento</b>	<b>Sinótica</b>	<b>Termodinâmica</b>
01-05-17 [01-02]	ZF + ZCIT	Fraca instabilidade
02-09-17 [14-15]	Zona Frontal	Estável
03-09-17 [16]	Zona Frontal, VCMN	Fraca instabilidade
04-03-17 [18]	VCAN (centro)	Fraca instabilidade
04-07-17 [02-03-04]	Zona Frontal	Estável com inversão
05-06-17 [12:30-13]	ZF + ZCIT	Estável
11-12-17 [01-02]	Zona Frontal	Instável
14-11-18 [15-16]	VCAN (setor SE)	Fraca instabilidade
16-07-17 [06-07]	VCAN (setor NO)	Estável com inversão
21-06-17 [23]	Zona Frontal	Fraca instabilidade com inversão
23-06-17 [02:25]	Zona Frontal	Fraca instabilidade
23-06-17 [15]	Zona Frontal	Fraca instabilidade
25-02-18 [16-17]	VCAN (setor N)	Fraca instabilidade
25+26-08-17 [22-23-00-01]	ZF + ZCIT	Estável com inversão
27-07-17 [01-02]	VCAN (setor E)	Fraca instabilidade com inversão
27-08-17 [08]	VCAN (setor N)	Estável com inversão
27-11-18 [01-02]	Zona Frontal	Fraca instabilidade
29-07-17 [18-19]	Zona Frontal	Fraca instabilidade

Fonte: autor.

Em Natal os eventos com algum nível de instabilidade ocorreram sob atuação de VCANs e interações de zona frontal com a ZCIT (tabela 30). Sob os demais sistemas (zonas frontais isoladamente e POAs) os casos foram registrados em atmosfera estável, mas em todas as ocorrências houve inversões térmicas (Tabela 37).

**Tabela 37: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Natal.**

<b>Evento</b>	<b>Sinótica</b>	<b>Termodinâmica</b>
03-09-17 [19]	Zona Frontal	Estável com inversões
06-10-17 [17]	Zona Frontal	Estável com inversões
08-01-18 [13]	VCAN (setor N)	Instável com inversões
10-12-18 [15]	VCAN (centro)	Fraca instabilidade com inversão
12-06-18 [16]	Zona Frontal	Estável com inversões
21-08-18 [15]	ZF + ZCIT	Fraca instabilidade com inversão
23-07-18 [15]	Zona Frontal	Estável com inversões
24-09-17 [18]	POA1	Estável com inversões
29+30-08-18 [23-00]	POA1	Estável com inversões

Fonte: autor.

Nos aeroportos de Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Recife e Teresina, todos os casos com VCAN apresentam atmosfera instável, enquanto os casos com zonas frontais sem interação com a ZCIT são de atmosfera estável com ou sem inversões. Exceto um caso em Recife (29/10/2018) em que houve fraca instabilidade, mas com inversão térmica (Tabela 38).

**Tabela 38: Situação termodinâmica e sinótica nos casos de Aracaju, Fortaleza, João Pessoa, Recife e Teresina.**

<b>Aeroporto</b>	<b>Evento</b>	<b>Sinótica</b>	<b>Termodinâmica</b>
Aracaju	17-06-18 [18]	POA1	Estável
Fortaleza	04-08-18 [20]	Zona Frontal	Estável
Fortaleza	11-02-17 [17]	VCAN (setor N)	Instável
Fortaleza	14-09-17 [16]	Zona Frontal	Estável com inversão
Fortaleza	19-10-17 [22]	VCAN (setor N)	Fraca instabilidade
Fortaleza	27-08-18 [11]	Zona Frontal	Estável com inversão
João Pessoa	10-07-17 [20]	ZF + ZCIT	Fraca instabilidade
João Pessoa	14-07-17 [18]	ZF + ZCIT	Estável
João Pessoa	22-08-17 [00]	POA1	Estável
João Pessoa	29-11-18 [15]	ZF + ZCIT	Fraca instabilidade
Recife	23-01-18 [16]	VCAN (setor E)	Instável
Recife	29-10-18 [17]	Zona Frontal	Fraca instabilidade com inversão
Teresina	19-04-17 [10]	ZCIT, Con. Cb	Fraca instabilidade

Fonte: autor.

## 5.6 Análise de eventos de *Wind shear* pelos dados de radar meteorológico

Nas imagens de radar são identificados locais com presença de precipitação ou virga. Gotículas de nuvem são muito pequenas e os radares não as detectam, por isso interpretam-se as imagens considerando a refletividade como presença de gotas de chuva.

A classificação da intensidade das precipitações segue a legenda da REDEMET.

Os produtos *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) são compostos por várias varreduras para formar a visualização de uma mesma altitude (3 km, 5 km, 7 km ou 10 km) num raio de 250 km em torno do radar.

O produto MAXCAPPI (*ou Maximum Display*) oferece os valores máximos de refletividade de varreduras com baixa elevação, com alcance de até 400 km, sem distinção de altitude. Sabendo-se que à medida que se afasta do radar, o feixe também se distancia da superfície da Terra: numa atmosfera padrão, próximo dos 400 km de raio o feixe do radar vai estar em média a uma altura de 13 km.

O deslocamento é estimado pela mudança de posição dos ecos ao olhar duas imagens consecutivas. O intervalo entre as imagens é de 10 minutos quando visualizadas no site, e 20 minutos quando obtidas com a API.

#### 5.6.1 As informações de radar nos casos de WS em Salvador

Na maior parte (71%) dos casos de Salvador houve sinal de precipitação no aeroporto ou nos arredores, desses eventos 40% das precipitações foram de intensidade moderada, com as demais sendo fracas ou muito fracas. Predominaram eventos às entre 01 h e 02 h UTC (27%), e 15 h e 16 h UTC (23%). Em todos os eventos as chuvas deslocavam-se do oceano ao continente, exceto por um (11/12/2017), quando as chuvas se deslocaram do continente para o oceano e, foi observada refletividade até 7 km de altura (Tabela 39).

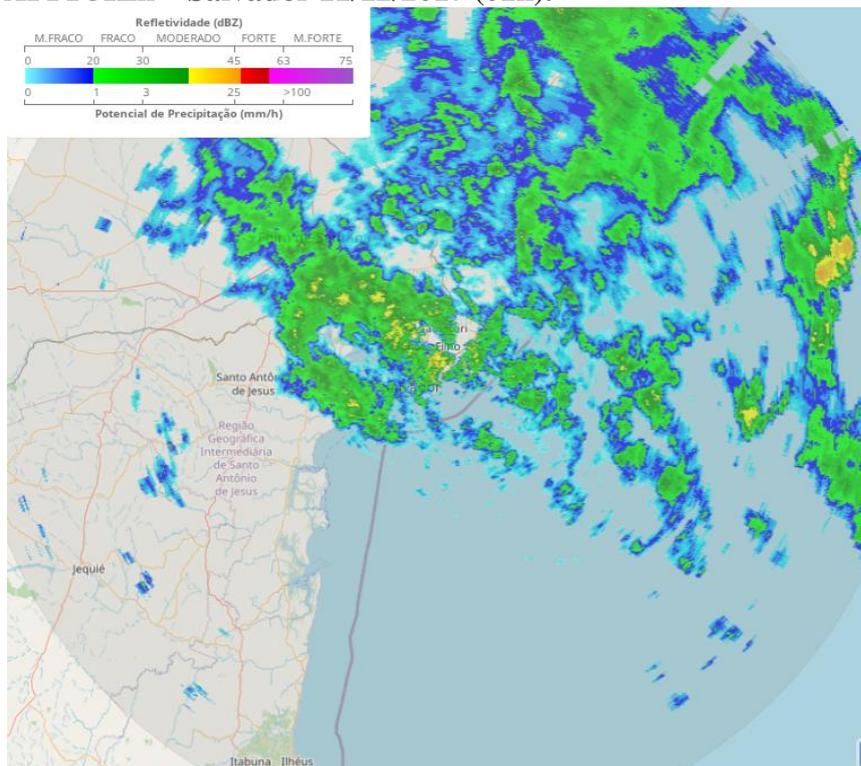
**Tabela 39: As informações de radar nos casos de WS em Salvador.**  
*s/p - sem precipitações*

<b>Data</b>	<b>Horário (UTC)</b>	<b>Precipitações no aeroporto</b>	<b>Precipitações nos arredores</b>	<b>Deslocamento de precipitações</b>
<b>01/05/2017</b>	<b>01 – 02</b>	s/p	Fracas	De sudeste (oceano)
<b>02/09/2017</b>	<b>14 – 15</b>	Fracas	Fracas	De sudeste (oceano)
<b>03/09/2017</b>	<b>16</b>	Fracas	Fracas	De sudeste (oceano)
<b>04/03/2017</b>	<b>18</b>	s/p	s/p	s/p
<b>04/07/2017</b>	<b>02 - 03 – 04</b>	Muito fracas	Muito fracas	De sudeste (oceano)
<b>05/06/2017</b>	<b>12:30 – 13</b>	Muito fracas	Muito fracas	De leste (oceano)
<b>11/12/2017</b>	<b>01 – 02</b>	Moderadas	Moderadas	De noroeste (continente)
<b>14/11/2018</b>	<b>15 – 16</b>	s/p	s/p	s/p
<b>16/07/2017</b>	<b>06 - 07</b>	Muito fracas	Muito fracas	De sudeste (oceano)
<b>21/06/2017</b>	<b>23</b>	Moderadas	Moderadas	De sudeste (oceano)
<b>23/06/2017</b>	<b>02:25</b>	Moderadas	Moderadas	De sudeste (oceano)
<b>23/06/2017</b>	<b>15</b>	Moderadas	Moderadas	De sudeste (oceano)
<b>25/02/2018</b>	<b>16 - 17</b>	s/p	s/p	s/p
<b>25+26/08/2017</b>	<b>22 - 23 - 00 - 01</b>	Muito fracas	Fracas	De sudeste (oceano)

Fonte: autor.

O primeiro exemplo no dia 11/12/2017 os dados de CAPPI sobre Salvador e na maior parte da Bahia ao norte da capital mostraram vastas áreas de precipitação fraca e moderada, com refletividade pelo menos até os 7 km de altura, deslocando-se de noroeste para sudeste (continente para o oceano). Os núcleos de precipitação mais forte estão mais afastados, no oceano (Figura 26).

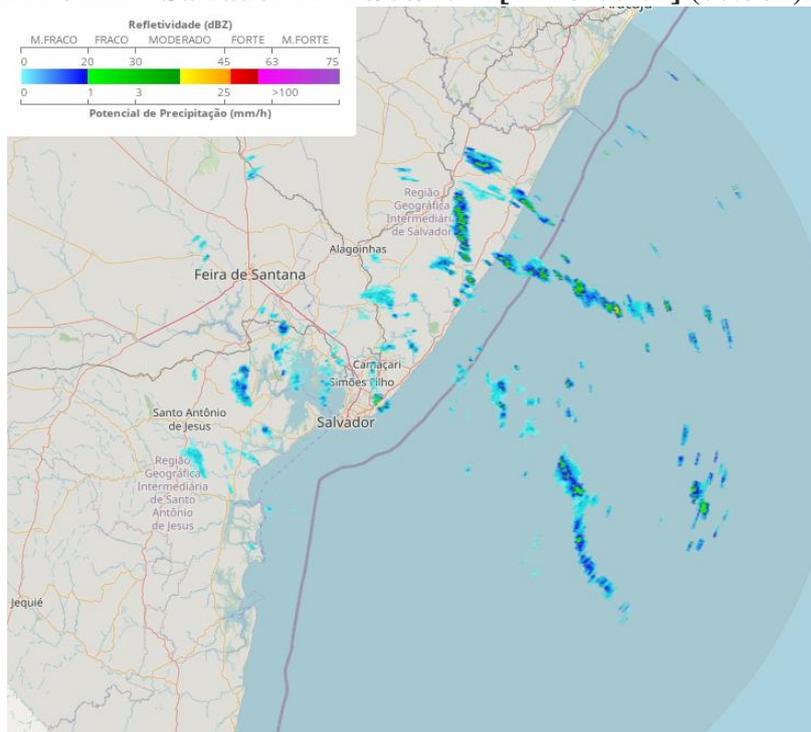
**Figura 26: CAPPI 5Km – Salvador 11/12/2017 (01h).**



Fonte: REDEMETS.

No segundo exemplo entre os dias 25 e 26/08/2017 os dados de CAPPI mostraram múltiplas precipitações muito fracas vindas de sudeste (oceano) atingem os arredores de Salvador, núcleos fracos precipitam sobre a área do Aeroporto às 23:50 e 00:36 (Figura 27).

**Figura 27: CAPPI 3Km – Salvador 25+26/08/2017 [22-23-00-01] (00:36h).**



Fonte: REDEMETS.

### 5.6.2 As informações de radar nos casos de WS em Natal

Nos casos de Natal não foi detectada precipitação sobre o aeroporto, todas as chuvas registradas nos arredores vinham do oceano com alguma componente de leste. Em um caso (10/12/2018) houve forte refletividade nos arredores do aeroporto, com retorno a 10 km de altitude (Tabela 40).

**Tabela 40: As informações de radar nos casos de WS em Natal.**

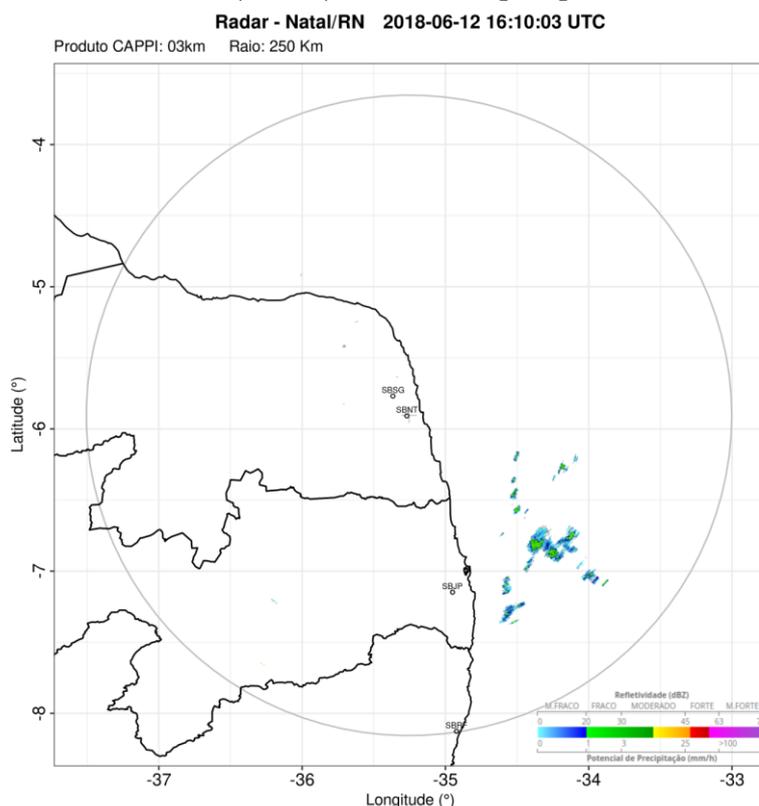
*s/p - sem precipitações*

Data	Horário (UTC)	Precipitações no aeroporto	Precipitações nos arredores	Deslocamento de precipitações
03/09/2017	19	s/p	s/p	De sul-sudeste (oceano)
06/10/2017	17	s/p	Muito fracas	De leste (oceano)
08/01/2018	13	s/p	Moderadas	De sudeste (oceano)
10/12/2018	15	s/p	Fortes	De sudeste (oceano)
12/06/2018	16	s/p	s/p	s/p
24/09/2017	18	s/p	s/p	s/p

Fonte: autor.

O primeiro exemplo os dados de CAPPI no dia 12/06/2018 mostrou que núcleos de precipitação fraca aproximam-se do litoral do RN pelo sudeste, nenhuma precipitação significativa no Aeroporto de Natal e arredores (Figura 28).

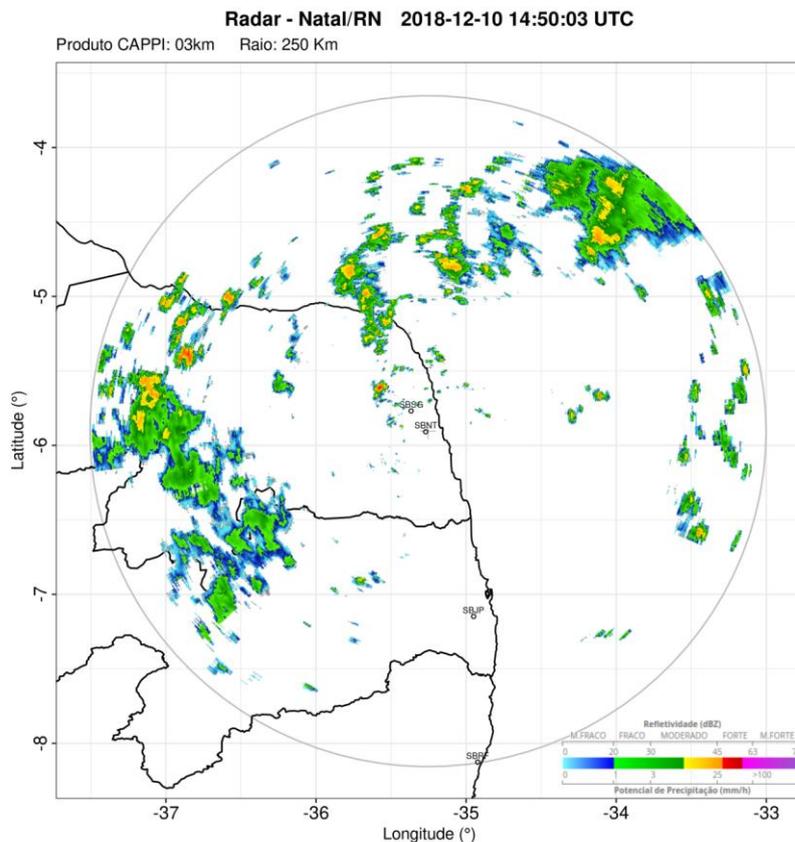
**Figura 28: CAPPI 3Km – Natal (SBSG) 12/06/2018 [16h].**



Fonte: autor.

No segundo exemplo no dia 10/12/2018 pelos dados de CAPPI vários núcleos de precipitação forte sobre o Aeroporto de Natal e arredores deslocando-se de sudeste (Figura 29).

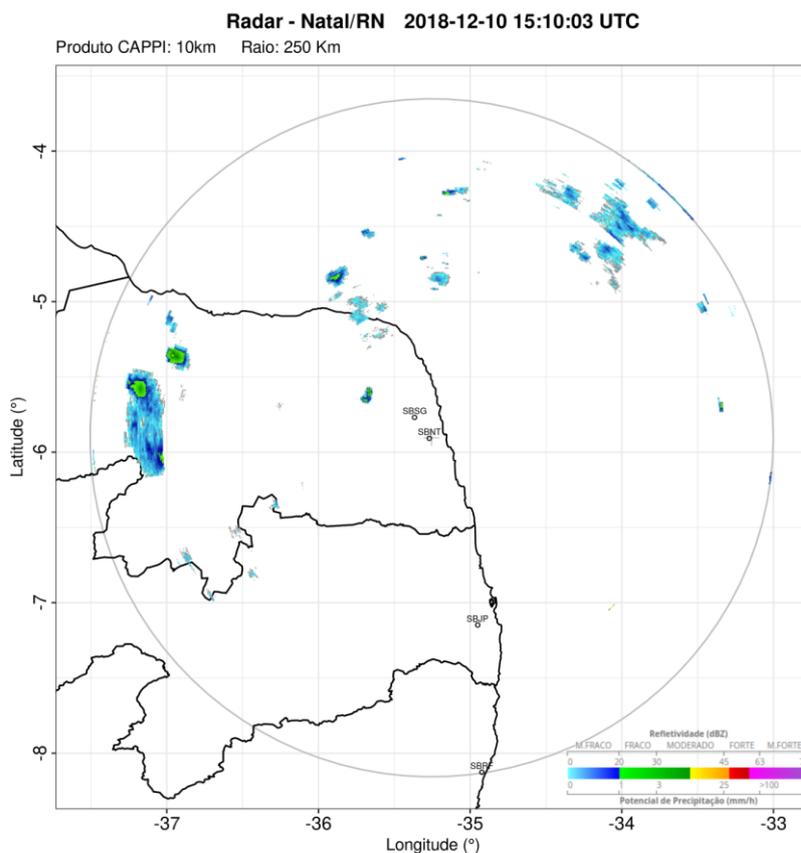
**Figura 29: CAPPI 3Km – Natal 10/12/2018 [15h] (14:50).**



Fonte: autor.

Também aparecem vastas áreas com precipitação forte e moderada a norte e oeste na cobertura do radar, que chegam a atingir 10 km de altura (Figura 30).

**Figura 30: CAPPI 10Km – Natal 10/12/2018 [15h] (15:10).**



Fonte: autor.

### 5.6.3 As informações de radar nos casos de WS em Aracaju, João Pessoa e Recife

Nas demais cidades os casos com sinais de chuva sobre o aeroporto (57%) se dividem entre moderadas (2) e muito fracas (2). Em todos os eventos com precipitação, a direção de deslocamento foi do oceano, à exceção de um caso em Recife (23/01/2018), quando foi observada refletividade em todas as altitudes disponíveis, em 3 km deslocava-se para o continente e em 10 km para o oceano (tabela 41).

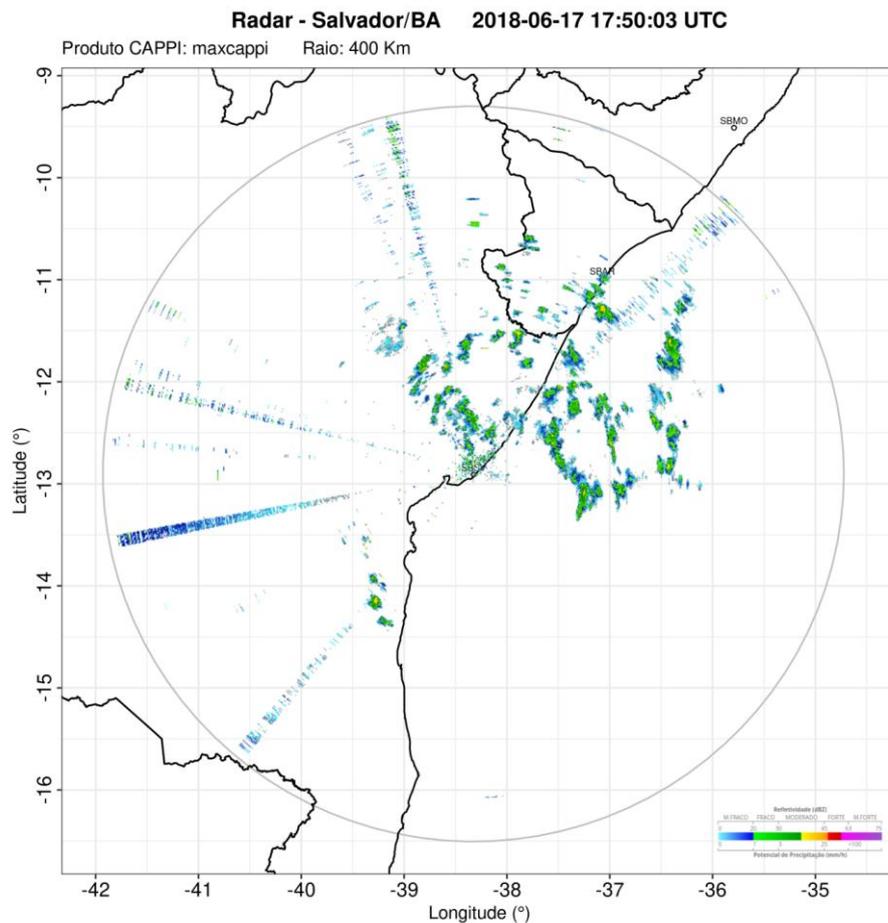
**Tabela 41: As informações de radar nos casos de WS em Aracaju, João Pessoa e Recife.***s/p - sem precipitações*

<b>Local/ data</b>	<b>Horário (UTC)</b>	<b>Precipitações no aeroporto</b>	<b>Precipitações nos arredores</b>	<b>Deslocamento de precipitações</b>
<b>Aracaju 17-06-18</b>	<b>18</b>	Moderadas	Fracas	De sudeste (oceano)
<b>João Pessoa 10/07/2017</b>	<b>20</b>	Muito fracas	s/p	De leste (oceano)
<b>João Pessoa 14/07/2017</b>	<b>18</b>	Muito fracas	s/p	De sudeste (oceano)
<b>João Pessoa 22/08/2017</b>	<b>00</b>	s/p	s/p	s/p
<b>João Pessoa 29/11/2018</b>	<b>15</b>	s/p	s/p	s/p
<b>Recife 23/01/2018</b>	<b>16</b>	Moderada	Moderada	De leste (baixos níveis), de noroeste (altos níveis)
<b>Recife 29/10/2018</b>	<b>17</b>	s/p	s/p	s/p

Fonte: autor.

No exemplo de imagem MAXCAPPI para Aracaju em 17/06/2018 pouco antes das 18 horas precipitações de intensidade moderada atingem o Aeroporto de Aracaju vindas de sudeste (oceano) (Figura 31).

**Figura 31: MAXCAPPI – Aracaju 17/06/2018 [18h] (17:50).**



Fonte: autor.

No evento sobre Recife e arredores no dia 23/01/2018 pelos dados de CAPPI múltiplos núcleos de refletividade moderada em 3 km de altura vindos de leste e ganhando intensidade ao entrar no continente (Figura 32).

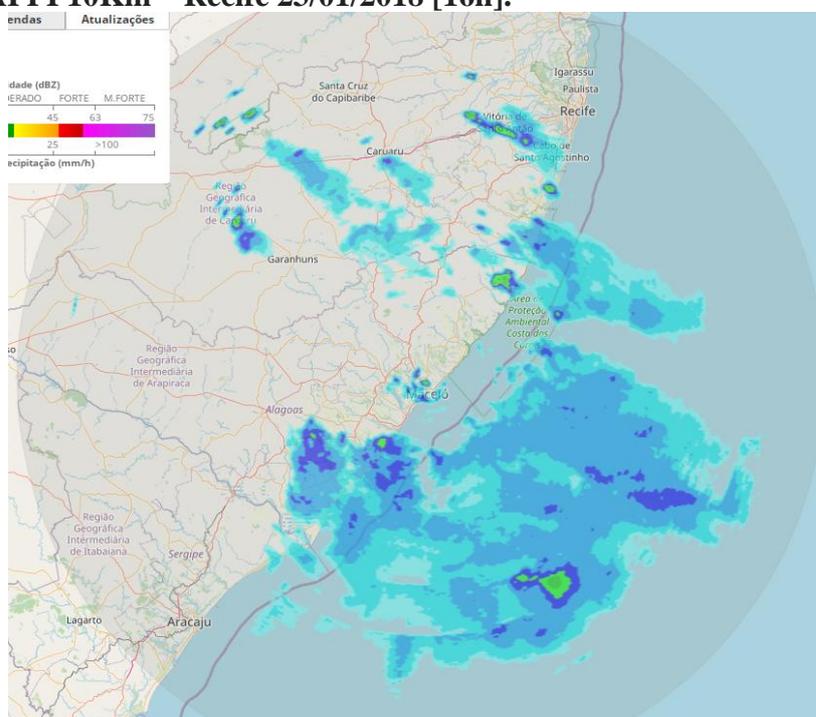
**Figura 32: CAPPI 3Km – Recife 23/01/2018 [16h].**



Fonte: REDEMET.

Refletividade em 10 km de altura aparece-se a oeste e sul da cidade de Recife (continuamente) e desloca-se para o oceano (Figura 33).

**Figura 33: CAPPI 10Km – Recife 23/01/2018 [16h].**

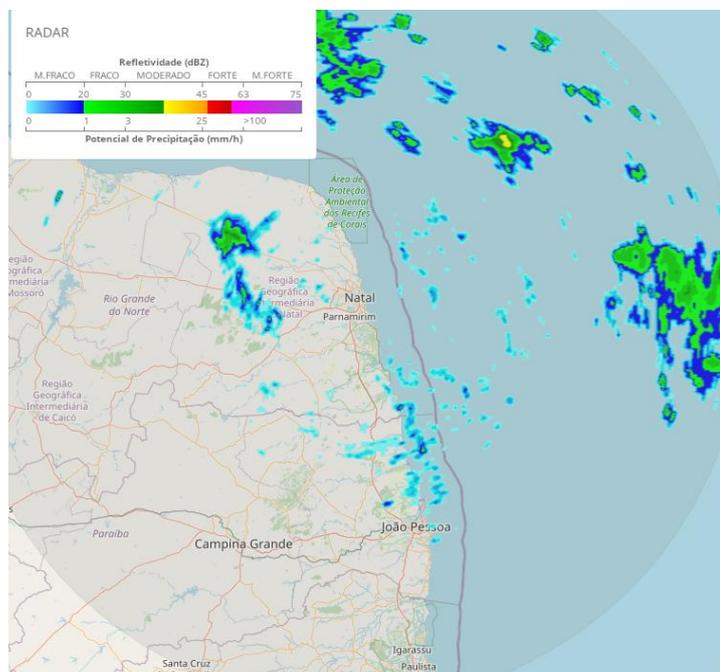


Fonte: REDEMET.

A partir dos dados CAPPI do radar de Natal (figura 34), meia hora antes do registro de WS havia refletividade muito fraca em 3 km e 5 km de altura sobre João Pessoa, deslocando-

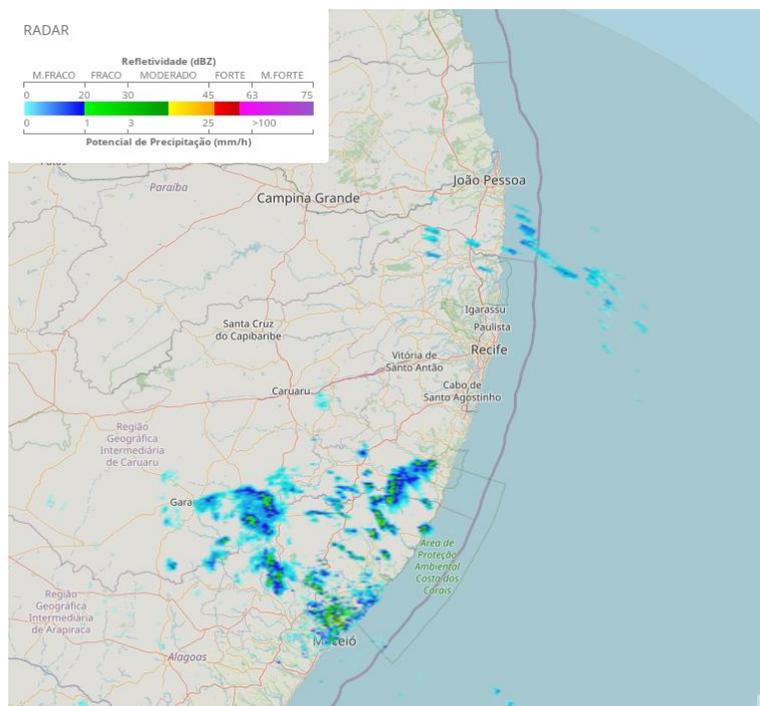
se de leste (oceano). Após isso não houve mais imagens do radar de Natal. No radar de Macaíó pelos dados MAXCAPPI a refletividade sobre João Pessoa vinha de nordeste durante a hora do registro de WS (figura 35).

**Figura 34: CAPPI 5 Km – João Pessoa (vista pelo radar de Natal) 10/07/2017 [20h] (19:24h).**



Fonte: REDEMET.

**Figura 35: MAXCAPPI – João Pessoa (vista pelo radar de Maceió) 10/07/2017 [20h].**



Fonte: REDEMET.

O Aeroporto de Fortaleza não está ao alcance de nenhum dos radares oferecidos pelo REDEMET. Em seis casos não houve cobertura disponível naquela data: Natal (23/07/2018, 21/08/2018 e 29+30/08/2018), Salvador (27/11/2018 e 29/07/2017), e Teresina (19/04/2017).

## 6 CONCLUSÕES

Os eventos de *windshear* (WS) foram analisados para 9 aeroportos do Nordeste Brasileiro no período de 2017 e 2018. Os fenômenos foram identificados pelas mensagens METAR nos seguintes aeroportos: de Santa Maria (Aracaju - SE), Pinto Martins (Fortaleza - CE), Presidente Castro Pinto (João Pessoa - PB), Zumbi dos Palmares (Maceió - AL), Senador Petrônio Portella (Teresina - PI), Guararapes-Gilberto Freire (Recife - PE), Governador Aluizio Alves (São Gonçalo do Amarante, representando Natal - RN), Marechal Cunha Machado (São Luís - MA) e Deputado Luís Eduardo Magalhães (Salvador - BA). Os reportes que persistiram ininterruptamente foram analisados como um único caso.

O aeroporto mais afetado foi o de Salvador com 35 reportes. O segundo aeroporto com mais reportes (10) foi Natal. Os números de Fortaleza (5) e Recife (2) foram bem menos expressivos. Considerando que esses terminais figuraram junto a Salvador entre os mais movimentados da região durante o período analisado. Ao longo dos dois anos pesquisados, os aeroportos de Maceió e São Luís não registraram um caso sequer.

### **Sistemas sinóticos associados a *wind shear***

Os principais sistemas sinóticos atuantes durante esses casos foram as zonas frontais unidas ou não com a ZCIT (24 casos), seguidas pelos VCANs (11) e os mais raros foram POAs (3). A atuação isolada da ZCIT foi diagnosticada em um único caso.

Durante as ocorrências em Salvador os sistemas meteorológicos mais comuns foram as zonas frontais isoladamente (9), seguidos pelos VCANs (6) e o acoplamento das ZF com a ZCIT (3).

Nos nove eventos de Natal foi identificada a atuação de extremidades frontais (4), POAs (2), VCAN (2), e união de ZF com a ZCIT (1).

Em Fortaleza, das cinco ocorrências de *windshear*, três foram marcadas pela influência das extremidades frontais e duas por VCANs.

No aeroporto de João Pessoa foram registrados 4 casos. A união da extremidade frontal com a ZCIT foi identificada em 3 eventos, e 1 esteve associado a POA.

Nos dois casos de Recife foram identificados um VCAN e uma passagem de zona frontal.

O único evento de Aracaju ocorreu sob a influência de uma POA.

No único caso de Teresina foi identificada a atuação da ZCIT na formação de um conglomerado de nuvens Cumulonimbus.

### **Condições de tempo presente associadas à ocorrência de *wind shear***

As condições observadas com mais frequência em Salvador eram ventos soprando com alguma componente de leste, velocidade moderada, sem rajadas ou variação na direção. Cobertura de nuvens superior a 50% do céu, altura das bases em médios níveis, presença de Cumulus Congestus e precipitações foram observações comuns durante os casos desse aeródromo. A visibilidade foi reduzida em 15 dos casos, névoa úmida foi registrada em quatro ocasiões.

As condições observadas com mais frequência nos demais aeroportos foram diferentes. Eram ventos soprando de sul com velocidade média moderada, rajadas e/ou variação de direção; cobertura de nuvens de até 50%, com bases em baixos níveis e ausência de precipitações. A visibilidade horizontal foi sempre superior a 10 km e em nenhum momento foi registrada a ocorrência de névoa úmida. Nas poucas ocasiões onde houve registro de nuvens Cumulus Congestus, houve também precipitações. No único caso de Aracaju houve precipitação sem registro de Cumulus Congestus.

### **Horários do dia e meses do ano com mais casos desse fenômeno**

No biênio estudado foram encontrados 58 registros de *wind shear*, estando a maior parte (48%) concentrada na estação chuvosa de 2017, especificamente no mês de julho (19%). Os horários mais comuns foram nos períodos da tarde e da noite (entre as 15 e 18 h UTC, e as 23 e 02 h UTC).

### **Dados de radar meteorológico no momento do registro de *wind shear***

Nos casos de Salvador a maioria das imagens de radar mostra sinais de precipitação na área do aeródromo ou nos arredores. Em todos os casos o deslocamento das formações foi em direção ao continente, exceto em 11/12/2017, quando se deslocavam para o oceano.

A análise das imagens de radar durante as ocorrências de Natal mostrou que houve precipitações em metade dos eventos, e sempre se deslocavam com alguma componente de

leste. No evento de 10/12/2018 foi identificada precipitação com características convectivas afastando-se das vizinhanças do aeroporto para noroeste.

As imagens de radar sobre João Pessoa mostram retornos fracos sobre o aeroporto advindos do oceano em dois casos (10/07/2017 e 14/07/2017), enquanto nas demais não há ecos sobre a área do aeroporto e arredores.

Os dados de radar sobre o aeroporto de Recife mostraram que em um dos casos (23/01/2018) ocorreu com precipitações de intensidade moderada ao redor do aeródromo se deslocando para o continente em baixos níveis e para o oceano em altos níveis, enquanto o outro evento ocorreu sem nenhum sinal de precipitação.

Sobre Aracaju as imagens de radar mostram precipitações de intensidade moderada nas vizinhanças do aeródromo, vindas de sudeste.

Nos anos pesquisados, nenhum dos radares disponíveis através da REDEMET cobre o aeroporto de Fortaleza. Não há disponibilidade de imagens do radar de São Luís, que alcançaria Teresina.

### **Condições termodinâmicas sobre os aeroportos**

A análise de perfis verticais de radiossondagem e simulados casos revelou a predominância de instabilidade na baixa troposfera em todos os aeroportos, exceto em Natal, onde houve uma maior proporção de inversões térmicas.

Todas as inversões de todos os eventos foram de subsidência, exceto um caso em Natal em que também havia inversão de turbulência.

Os índices termodinâmicos em Salvador e Natal apontam de maneira geral para estabilidade atmosférica na maior parte dos casos. Instabilidade mais forte foi identificada de Fortaleza e Recife (um caso de cada), além de Teresina, em menor grau.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se avaliar a influência de outros fatores na formação de WS, como o relevo da região dos aeroportos e a atuação de sistemas de micro e mesoescala. Além de ampliar o período de dados pesquisados para cada aeroporto.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aeroporto de Natal. **Estatísticas**. Disponível em: < <https://www.natal.aero/br/o-aeroporto/dados-operacionais/estatisticas/>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

American Meteorological Society. **Precipitable water**. 2015. Disponível em: <[https://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable\\_water](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable_water)>. Acesso em: 6 fev. 2023

ANAC (Brasil). Wind shear. In: Wind shear. [S. l.], 30 maio 2018. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/en/safety/aeronautical-meteorology/conditions/wind-shear>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

ANAC (Brasil). Cadastro de aeródromos civis públicos. Banco de dados em formato CSV. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/aerodromos/cadastro-de-aerodromos/aerodromos-cadastrados/cadastro-de-aerodromos-civis-publicos.csv>>. Acesso em: nov. 2022.

BIVAND, R.; KEITT, T.; ROWLINGSON, B. (2023). rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. R package version 1.6-5. <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>

ANDERSON, G. B.; BELL, M. L.; PENG, R. D. 2013. Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research. *Environmental Health Perspectives* 121(10):1111-1119.

CABRAL, E.; ROMÃO, M. Armadilha de ar, *Aero Magazine*, São Paulo, a.6, n.63, p.32-33; II., [S.d].

CAMPITELLI, E. (2021). *\_metR: Tools for Easier Analysis of Meteorological Fields\_*. doi: 10.5281/zenodo.2593516 (URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2593516>), R package version 0.14.0, <URL: <https://github.com/eliocamp/metR>>.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V.E. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. 2009. São Paulo: Oficina de textos. Cap. 9, p. 133-147.

CGNA – Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea. **Anuário Estatístico de tráfego Aéreo 2018**. Disponível em: <[http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario\\_estatistico/anuario\\_estatistico\\_2018.pdf](http://portal.cgna.decea.mil.br/files/uploads/anuario_estatistico/anuario_estatistico_2018.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2023.

COUTURE-BEIL, A. (2022). *\_rjson: JSON for R\_*. R package version 0.2.21, <URL: <https://CRAN.R-project.org/package=rjson>>.

COSTA, Márcia Maria Gomes. A METEOROLOGIA AERONÁUTICA NO AEROPORTO DE GUARULHOS. **VII SITRAER**, Rio de Janeiro, 2008, pp. 539-550. Disponível em: <<https://cabecadepapel.com/sites/viisitraer2008/pdf/500.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Como decodificar o METAR e o SPECI?**. Central de Ajuda DECEA, 2023. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/como-decodificar-o-metar-e-o-speci/>>. Acesso em: 26 mar. 2023

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **API-REDEMETS: Mensagem METAR**. Central de Ajuda DECEA, 2023. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/api-redemet-mensagem-metar/>>. Acesso em: 26 mar. 2023

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **API-REDEMETS: Produtos RADAR**. Central de Ajuda DECEA, 2023. Disponível em: <<https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/api-redemet-produtos-radar/>>. Acesso em: 26 mar. 2023

ESCOBAR, G. C. J.; MATOSO, V. **Zona De Convergência Intertropical (ZCIT):** Critério de detecção para uso em centros operacionais de previsão de tempo. INPE. São José dos Campos. 2020. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/08.20.15.34/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

FAA – Federal Aviation Administration. **Advisory Circular no 00-54: Pilot windshear guide**, [S. l.], 25 nov. 1988. Disponível em: <[https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC00-54.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC00-54.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2023.

FAA – Federal Aviation Administration. **Aviation Weather Handbook**. 2022. Disponível em: <[https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/FAA-H-8083-28\\_FAA\\_Web.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/FAA-H-8083-28_FAA_Web.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2023.

FERREIRA, N.J., RAMÍREZ, M.V., GAN, M.A., 2009. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.DE.A., FERREIRA, N.J., SILVA, M.G.A.J.DA, DIAS, M.A.F.DAS. (ORG.), **Tempo e Clima no Brasil**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, pp. 43-60.

FERNANDEZ, J. P. R. **Estudos da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e monções com um modelo média zonal.** Orientadores: Vadlamudi Brahmananda Rao e Sergio Henrique Franchito. 1996. Dissertação (Mestrado) – Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1996.

FURLIN, Alessandro D'Arrigo. **RISCOS DA WINDSHEAR E O SISTEMA DOPPLER LIDAR PARA SUA PREVISÃO.** Monografia. Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça – SC. 2017.

FEDOROVA, N., GEMIACKI, L., CARVALHO, L. C., LEVIT, V., RODRIGUES, L. R. L., COSTA, S. B. Frontal zone on the North-East of Brazil. **Proceedings of 8 ICSHMO**, Foz do Iguaçu, Brazil, 24-28 abr. 2006, INPE, p. 1765-1768.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CRUZ, C. D. On Frontal Zone Analysis in the Tropical Region of the Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**. 2015. DOI 10.1007/s00024-015-1166-y

FEDOROVA, N.; SANTOS, D. M. B. Dos; SEGUNDO, M. M. L.; LEVIT, V. Middle Tropospheric Cyclonic Vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic. **Pure Appl. Geophys.** 2016. DOI 10.1007/s00024-016-1381-1

FRAGA, G. M.; SOUZA, G. B. de; MANSANO, V. R. **Wind-shear:** as tesouras de vento na segurança das operações aéreas. Orientador: Edson Cabral. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Aviação Civil. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2011.

GAN, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias da alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e leste do Brasil.** Orientador: Nelson de Jesus

Parada. Dissertação (Mestrado) – Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982.

HABY, J. **CAPE and convective Inhibition**. (2023a) Disponível em: <<http://www.theweatherprediction.com/habyhints3/905/>>. Acesso em: 6 fev. 2023

HABY, J. **What is precipitable water?**. (2023b) Disponível em: <<https://www.theweatherprediction.com/habyhints3/899//>>. Acesso em: 6 fev. 2023

HARASTI, P. R; McADIE, C. J.; DODGE, P. P.; TUTTLE, J.; LEE, W-C.; MURILLO, S. T.; MARKS Jr, F. D. Real-Time Implementation of Single-Doppler Radar Analysis Methods for Tropical Cyclones: Algorithm Improvements and Use with WSR-88D Display Data. **Weather And Forecasting**, v. 19, abr. 2004, pp. 219-239.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., ROZUM, I., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., DEE, D., THÉPAUT, J-N. (2023): **ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.bd0915c6. Acesso em: 26 mar. 2023

INFRAERO. **Anuário Estatístico Operacional 2017**. Brasília, 2018. Disponível em: <[https://www4.infraero.gov.br/media/674694/anuario\\_2017.pdf](https://www4.infraero.gov.br/media/674694/anuario_2017.pdf)> Acesso em: 6 fev. 2023.

INFRAERO. **Anuário Estatístico Operacional 2018**. Brasília, 2019. Disponível em: <[https://www4.infraero.gov.br/media/677124/anuario\\_2018.pdf](https://www4.infraero.gov.br/media/677124/anuario_2018.pdf)> Acesso em: 6 fev. 2023.

KOUSKY V.E. Frontal Influences on Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 107: 1140–1153, 1979.

KOUSKY, V.E., GAN, M.A., 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, pp. 538-551, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x>

LEÃO, Victor Veiga Souza. **Análise e previsão de curto prazo de wind shear no Aeroporto Santos Dumont – Rio de Janeiro**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

LEIRIAS, Renata Barros Vasconcelos. **Estudo de ocorrências de windshear no Aeroporto Internacional de Guarulhos-SP, no período de 01 de junho de 2006 a 01 de julho de 2007**. Orientadora: Natalia Fedorova. 2007. TCC (Graduação) – Curso de Meteorologia, Instituto de Ciências Atmosféricas – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

LYRA, M. J. A.; CAVALCANTE, L. C. V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Ligação Entre Extremidade Frontal e Zona de Convergência Intertropical Sobre a Região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 42 – n. 1. 2019. pp. 413-424. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_1\\_413\\_424](http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_413_424)

MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. Escala Beaufort. Disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/escala\\_beaufort.pdf](https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u2035/escala_beaufort.pdf). Acesso em: 6 fev. 2023.

MAY, R. M.; GOEBBERT, K. H.; THIELEN, J. E.; LEEMAN, J. R.; CAMRON, M. D.; BRUICK, Z.; BRUNING, E. C.; MANSER, R. P.; ARMS, S. C.; AND MARSH, P. T. 2022: MetPy: A Meteorological Python Library for Data Analysis and Visualization. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 103, E2273-E2284, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0125.1>.

MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. (Orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap. 2, p. 25-41.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma Revisão da Dinâmica das Chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, pp. 1-10, 2002.

MONTEIRO, M. A.; CALEARO, D. S.; MARTINS, M.; MONTEIRO, A. Os perigos do vento para a aviação. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, A Meteorologia e a Aeronáutica, v.29, n.3, nov. 2005, pp. 45-51.

MUANZA, G.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Ligação da extremidade frontal com Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e análise de fenômenos associados. **Revista de Geociências do Nordeste (Northeast Geosciences Journal)**. v. 8, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID24618>

National Weather Service – National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Weather Forecast Office, Louisville, KY. **Convective Season Environmental Parameters and Indices**. Disponível em:<<https://www.weather.gov/lmk/indices>>. Acesso 06 fev. 2023.

NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2): M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. 1631-1643, Nov 2002, Bulletin of the American Meteorological Society.

PIERCE, D. (2023). `_ncdf4`: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. R package version 1.21, <URL: <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>>.

POTTS, R.; GILL, P. G. Developments in aviation meteorology. **Meteorological Applications**, n. 1, pp. 1-2, 2014. Editorial. DOI: 10.1002/met.1450

R CORE TEAM (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REPINALDO, H. F. B.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; REPINALDO, C. R. R. Upper Tropospheric Cyclonic Vortex and Brazilian Northeast Jet Stream over Alagoas State: Circulation Patterns and Rainfall. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, 745-754, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786355000003>

RIBEIRO, Davi Pinto; JUNIOR, João Bosco Verçosa Leal; FISCH, Gilberto; RAMOS, Diogo Nunes da Silva; REUTER, Elizabeth Diane de Jesus. **Cisalhamento do Vento no Aeroporto Internacional de São Paulo: Aspectos Observacionais e de Modelagem**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 2, pp. 301-315, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786352020>

SÁ, J. A. S. de. **Descargas atmosféricas na Amazônia**: reconhecimento e análise dos parâmetros de interesse para o planejamento estratégico dos sistemas de proteção de linhas de transmissão. Orientadora: Brígida Ramati Pereira da Rocha. 2011. Tese (Doutorado) –

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2011. (p. 63.)

SAÉNZ, J.; GONZÁLEZ-ROJÍ S. J.; CARRENO-MADINABEITIA, S.; IBARRA-BERASTEGI, G. (2018). aiRthermo: Atmospheric Thermodynamics and Visualization. R package version 1.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=aiRthermo>

SANTOS, D. M. B. dos; **Vórtices ciclônicos de médios níveis (VCMN):** uma análise de frequência e estrutura. Orientadores: Natalia Fedorova, Vladimir Levit. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Atmosféricas – Universidade Federal de Alagoas. 2012. Maceió, 2007.

SILVA, Letícia Pereira da; JESUS, Nizele de Vilhena Gomes; GOMES, Dênis José Cardoso; JESUS, Edmir dos Santos; SILVA, Ludmila Monteiro; JÚNIOR, Antônio Pereira. **Análise das condições atmosféricas na ocorrência de Windshear no aeroporto internacional de Belém: um estudo de caso** (XX CBMET – 2018). Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 8712-8721, jan. 2021. DOI:10.34117/bjdv7n1-590

SILVA, B. F. P. da; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; PERESETSKY, A.; BRITO, B. M. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, 323 - 338, 2011

SILVA, P. K. de O.; ARAGÃO, M. R. da S.; CORREIA, M. de F. Rajadas de Vento na Região Metropolitana de Salvador, Bahia. **Ciência E Natura**, pp. 185–188. 2009. <https://doi.org/10.5902/2179460X9548>

SIMÃO, A. C. Tesouras de vento e a segurança de voo. **Revista Conexão SIPAER**. v. 4, n. 2, pp. 149-188, mar-abr 2013. Disponível em: <<http://conexaosipaer.com.br/index.php/sipaer/article/view/240>>. Acesso em: 6 fev. 2023.

SILVA, Hiremar Antônio J. S. **Análise das ocorrências de cisalhamento de vento no Aeroporto De Guarulhos (SP) para a prevenção de acidentes aeronáuticos**. Orientador: Ricardo de Camargo. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

UCLA – University of California, Los Angeles. **Weather Radar Fundamentals: Angle**. 2017. Disponível em: <[http://research.atmos.ucla.edu/weather/C110/Documents/tmp/basic\\_wxradar/navmenu.php\\_tab\\_1\\_page\\_3\\_4\\_1\\_type\\_text.htm](http://research.atmos.ucla.edu/weather/C110/Documents/tmp/basic_wxradar/navmenu.php_tab_1_page_3_4_1_type_text.htm)>. Acesso em: 6 fev. 2023.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Recife, 2006. Versão Digital 2. Disponível em: <[https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf)> Acesso em: 6 fev. 2023.

VEBER, M. E.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V. Desenvolvimento de Atividades Convectivas Sobre a Região Nordeste do Brasil, Organizada Pela Extremidade Frontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, 995–1003, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863550071>

WICKHAM, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <URL: <https://ggplot2.tidyverse.org>>>

YOON, S.; JEONG, C.; LEE, T. Flood flow simulation using CMAX radar rainfall estimates in orographic basins. **Meteorological Applications**. n. 21, pp. 596-604, 2014. DOI: 10.1002/met.1382

## APÊNDICE A – Interpretação de uma mensagem METAR

Considerando a seguinte mensagem:

METAR SBCY 300000Z 31003KT 9999 FEW020 FEW030TCU BKN100 24/23 Q1012  
RETS=

O significado de cada parte é:

METAR – reporte regular emitido a cada hora (caso haja um evento importante, esse trecho é substituído por SPECI);

SBCY – código ICAO do aeródromo a que se refere (Cuiabá);

300000Z – dia (30), hora (00) e minuto (00) da emissão, Z é hora Zulu, ou UTC.

31003KT – direção do vento em graus (310) e velocidade em nós (03);

9999 – visibilidade horizontal em metros;

FEW020 – camada de nuvens cobrindo de 1 a 2 octas do céu (FEW), a 2000 pés de altura (020);

FEW030TCU – camada de nuvens cobrindo de 1 a 2 octas do céu, a 3000 pés de altura, com nuvens de grande extensão vertical que não são Cb (TCU);

BKN100 – camada de nuvens cobrindo de 5 a 7 octas do céu (BKN), a 10.000 pés de altura (100);

24/23 – temperatura do ar 24°C e ponto de orvalho 23°C;

Q1012 – pressão atmosférica ao nível médio do mar 1012 hPa (Q);

RETS – trovoadas (TS) recentes (RE).

## APÊNDICE B – Calcular vorticidade relativa e gerar arquivo NetCDF com GrADS

```
'reinit'  
*arquivos de vento  
'sdfopen /home/SINOTICA/reanalysis2/full/uwnd.2018.nc'  
'sdfopen /home/SINOTICA/reanalysis2/full/vwnd.2018.nc'  
  
* arquivo de saída  
'set sdfwrite -4d -rt -dbl -nc4 /home/SINOTICA/vorticidade.rea2.2018.nc'  
  
* atributos extras do arquivo  
*preencher conforme necessário  
'set sdfattr vorrel String long_name Vorticidade Relativa'  
'set sdfattr vorrel String units s**-1'  
'set sdfattr vorrel String derivado_de NCEP Reanalysis 2'  
'set sdfattr vorrel String calculado_com GrADS'  
  
* comandos para se certificar do que está fazendo  
'q dims'  
'q file'  
'q sdfwrite'  
  
*área um pouco maior que a desejada  
'set lon -82.5 22.5'  
'set lat -52.5 12.5'  
  
*intervalo dos tempos e níveis desejados  
*quanto menos, melhor  
'set t 1 1460'  
'set z 1 9'  
  
* vorticidade  
'vorrel=hcurl(uwnd,vwnd.2)'  
  
* escrever arquivo  
'sdfwrite vorrel'  
  
* verificar depois de carregado  
'q attr'
```

## APÊNDICE C – Recortar área de arquivo NetCDF com Grads

'reinit'

\* arquivo de entrada <<<

'sdfopen /home/SINOTICA/reanalysis2/full/vwnd.2017.nc'

\* arquivo de saída <<<

'set sdfwrite -4d -rt -dbl -nc4 /home/SINOTICA/reanalysis2/vwnd.2017.subset.nc'

\* atributos extras do arquivo

\*preencher conforme necessário

'set sdfattr vorrel String recorte\_de NCEP Reanalysis 2'

'set sdfattr vorrel String recortado\_com GrADS'

\*área um pouco maior que a desejada

'set lon -82.5 22.5'

'set lat -52.5 12.5'

\*tempos e níveis desejados

'set t 1 last'

'set z 1 9'

\* subvar <<< = var <<<

'subvwnd=vwnd'

\* escrever arquivo <<<

'sdfwrite subvwnd'

## APÊNDICE D – Programa em R para obter mensagens METAR com a API-REDEMETS

Na linha 4, entre as aspas, insira a sua chave REDEMETS. Na linha 5 está especificado o diretório do arquivo .CSV que deve conter as mensagens. Na linha 6 consta a variável que recebe o código ICAO/OACI do aeródromo. Nas linhas 7 e 8 estão escritos os tempos de busca inicial e final, no formato <AAAAMMDDHH> (AAAA: ano / MM: mês / DD: dia / HH: hora). As demais linhas não estão numeradas.

```

1  rm(list = ls())
2  library(rjson)
3  library(httr)

4  chave <- ""
5  saida <- "/home/user/Documents"
6  aero <- "SBSG"
7  inicio <- "2017010100"
8  fim <- "2017010112"

solicit <- paste( "https://api-redemet.decea.mil.br/mensagens/metar/",
                 aero,
                 "?api_key=",
                 chave,
                 "&page_tam=200",
                 "&data_ini=",
                 inicio,
                 "&data_fim=",
                 fim,
                 sep = "")
options(timeout = 4000000)
httr::timeout(4000000)
resposta <- fromJSON(file = solicit)
if(resposta$status==TRUE){
  cat("\nResposta válida")
  cat("\nMensagens recebidas:", resposta$data$total)
  cat("\nPáginas:", resposta$data$last_page)
  cat("\nMensagens por página:", resposta$data$per_page)
  while (resposta$data$current_page <= resposta$data$last_page) {
    if (resposta$data$current_page==1){
      cat("\nPágina atual:", resposta$data$current_page)
      for(n in 1:length(resposta$data$data)){
        if(n==1){
          mensagens <- c(resposta$data$data[[n]]$mens)
        }else{
          mensagens <- append(mensagens, resposta$data$data[[n]]$mens)
        }
      }
      cat("\n", length(mensagens), "mensagens copiadas")
    }else{
      cat("\nPágina atual:", resposta$data$current_page)
      for(n in 1:length(resposta$data$data)){
        mensagens <- append(mensagens, resposta$data$data[[n]]$mens)
      }
      cat("\n", length(mensagens), "mensagens copiadas")
    }
  }
solicit <- paste( "https://api-redemet.decea.mil.br/mensagens/metar/",
                 aero,

```

```

    "?api_key=",
    chave,
    "&page_tam=200",
    "&data_ini=",
    inicio,
    "&data_fim=",
    fim,
    sprintf("&page=%i", resposta$data$current_page+1),
    sep = "")
  resposta <- fromJSON(file = solicit)
}
if (resposta$data$current_page > resposta$data$last_page){
  cat("\nTodas as mensagens foram copiadas")
  mensagens.frame <- data.frame(mensagens)
  cat("\nO arquivo tem", length(mensagens.frame$mensagens), "linhas")
  write.csv(mensagens.frame$mensagens,
            row.names = FALSE,
            file = sprintf("%s/METAR_%s_%s_%s.csv", saida, aero, inicio, fim)
            )
  cat(sprintf("\nArquivo salvo em %s/METAR_%s_%s_%s.csv", saida, aero, inicio, fim))
}else{
  cat("\nNem todas as mensagens foram copiadas")
}
}else{
  cat("\nResposta inválida\n")
}
}

```

## APÊNDICE E – Programa em R para obter e plotar imagens RADAR da API-REDEMETS

Certifique-se da estrutura dos diretórios ser essa:

```
materia-prima/
├── redemet-radar-combine.R
├── EstadosBR_IBGE_LLWGS84[.dbf, .prj, .shp, shx]
├── aeroneb[.dbf, .prj, .shp, shx]
├── legenda_dBz.png
├── temporários/
└── resultados/
```

Em *temporários/* serão armazenadas as imagens de radar da API, elas não devem ser alteradas até o término da execução do programa, elas podem ser apagadas após a execução do programa.

Em *resultados/* serão armazenadas as imagens totalmente compostas, elas também não devem ser alteradas até o término de uma execução do programa.

O *datum* dos *shapefiles* deve ser WGS84.

*legenda\_dBz.png* é uma imagem com a legenda de refletividade, retirada do site REDEMETS.

A pasta de trabalho do R deve ser *materia-prima*. A chave deve ser inserida da mesma maneira do programa do Apêndice B.

```
if(strsplit(getwd(), split = "/")[[1]][length(strsplit(getwd(), split = "/")[[1]])]!="materia-prima")
{stop("\n\tPasta de trabalho incorreta")}
rm(list = ls())

library(rjson)
library(httr)
library(ggplot2)
library(grid)
library(png)
library(magick)

options("rgdal_show_exportToProj4_warnings"="none")
library(rgdal, include.only = 'readOGR', verbose = F, warn.conflicts = F, quietly = T)

EstadosBR <- readOGR(dsn = sprintf("%s/", getwd()), layer = "EstadosBR_IBGE_LLWGS84", verbose = F)
aeroneb <- readOGR(dsn = sprintf("%s", getwd()), layer = "aeroneb", verbose = F)
legenda <- sprintf("%s/legenda_dBz.png", getwd())

legenda <- readPNG(source = legenda)
legenda <- rasterGrob(legenda)

largura <- 8
altura <- 8
```

```

chave <- ""

repeat{
  cat("\nProdutos CAPPI: 03km, 05km, 07km, 10km, maxcappi\n")
  lista.produtos <- c('03km', '05km', '07km', '10km', 'maxcappi')
  produto <- readline("> ")
  while(!(produto %in% lista.produtos)){
    produto <- readline("> ")
  }
  repeat{
    cat("\nTempo no formato aaaaMMddHH\t")
    cat("ou pressione ENTER para a última imagem\t")
    tempo <- readline("> ")
    if(nchar(tempo)%in%c(0,10)){break}
  }
  cat("\nCódigo do radar (ou ENTER para ver a lista)\t")
  lista.radares <- data.frame("codigo" = c('al', 'be', 'bv', 'cn', 'cz', 'ga', 'jr', 'mq', 'mo', 'mn', 'mi', 'nt', 'pl',
    'pc', 'pv', 'sv', 'sn', 'st', 'sg', 'sf', 'ua', 'sl', 'sr', 'tt', 'tf', 'tm'),
    "local" = c('Almenara/MG', 'Belém/PA', 'Boa Vista/RR', 'Canguçu/RS', 'Cruzeiro do Sul/AC',
'Gama/DF', 'Jaraguari/MS', 'Macapá/AP',
    'Maceió/AL', 'Manaus/AM', 'Morro da Igreja/SC', 'Natal/RN', 'Petrolina/PE', 'Pico do
Couto/RJ', 'Porto Velho/RO',
    'Salvador/BA', 'Santarém/PA', 'Santa Teresa/ES', 'Santiago/RS', 'São Francisco/MG', 'São
Gabriel da Cachoeira/AM',
    'São Luís/MA', 'São Roque/SP', 'Tabatinga/AM', 'Tefé/AM', 'Três Marias/MG'))

  repeat{
    radar <- readline("> ")
    if(radar %in% lista.radares$codigo)
    {
      print(sprintf("Radar de %s", lista.radares[lista.radares$codigo==radar, "local"]))
      break
    }else{
      print(lista.radares)
    }
  }
  cat("\nQuantas imagens animar até a data? (1 a 15)\t")
  repeat{
    animar <- readline("> ")
    if(as.numeric(animar) %in% c(1:15)){break}
  }
  options(timeout = 4000000)
  httr::timeout(4000000)
  if(tempo==""){
    solicit <- paste( "https://api-redemet.decea.mil.br/produtos/radar/",
      produto,
      "?api_key=",
      chave,
      "&area=",
      radar,
      "&anima=",
      animar,
      sep = "")
  }else{
    solicit <- paste( "https://api-redemet.decea.mil.br/produtos/radar/",
      produto,

```

```

    "?api_key=",
    chave,
    "&data=",
    tempo,
    "&area=",
    radar,
    "&anima=",
    animar,
    sep = "")
}
cat("\nAcessando...")
resposta <- fromJSON(file = solicit)
if(resposta$status==TRUE){
  cat("\nResposta válida")
  cat(sprintf("\nProduto: %s", resposta$data$tipo))
  cat(sprintf("\nHorários: %i", length(resposta$data$anima)))
  if(length(resposta$data$anima)>1){
    todos.horarios <- c()
    todos.paths <- c()
    todas.imagens <- c()
    for(h in 1:length(resposta$data$anima)){
      for(l in 1:length(resposta[['data']][['radar']][[h]])){
        if(resposta[['data']][['radar']][[h]][[l]]$localidade==radar){
          long.min <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lon_min)
          long.max <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lon_max)
          lat.min <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lat_min)
          lat.max <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lat_max)
          raio <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$raio)
          nome <- resposta$data$radar[[h]][[l]]$nome
          lat.cent <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lat_center)
          lon.cent <- as.numeric(resposta$data$radar[[h]][[l]]$lon_center)
          produto <- resposta$data$tipo
          horario <- resposta$data$radar[[h]][[l]]$data
          todos.horarios <- append(todos.horarios, horario)
          todas.imagens <- append(todas.imagens, sprintf("%s/temporarios/radar_%.s.png", getwd(), horario))
          todos.paths <- append(todos.paths, resposta$data$radar[[h]][[l]]$path)
          infos <- data.frame("Nome" = nome,
                             "Produto" = produto,
                             "Raio" = raio,
                             "Latitude central" = lat.cent,
                             "Longitude central" = lon.cent,
                             "Longitude mínima" = long.min,
                             "Longitude máxima" = long.max,
                             "Latitude mínima" = lat.min,
                             "Latitude máxima" = lat.max)
          infos <- t(infos)
        }
      }
    }
    todos.paths <- unique(todos.paths)
    todos.horarios <- unique(todos.horarios)
    todas.imagens <- unique(todas.imagens)
    if( ( length(todos.paths) == length(todos.horarios) ) && ( length(todos.horarios) == length(todas.imagens) ) )
  ){
    if(length(todos.paths)==0){

```



```

}
if(animar==1){
  graphics.off()
  X11(height = altura,
       width = largura)
  plote <- ggplot()+
  annotate("path",
         x=lon.cent+raio/111*cos(seq(0,2*pi,length.out=100)),
         y=lat.cent+raio/111*sin(seq(0,2*pi,length.out=100)),
         colour = "gray",
         size = 0.5
  )+
  geom_point(data=as.data.frame(1),
            x=lon.cent,
            y=lat.cent,
            size = 3,
            shape = 3,
            color = 'gray'
  )+
  geom_path(data = EstadosBR,
           aes(x=long, y=lat, group = group),
           size = 0.5,
  )+
  geom_point(data = as.data.frame(aeroneb),
            aes(x=lon, y=lat),
            size = 1,
            shape = 1,
  )+
  geom_text(data = as.data.frame(aeroneb),
           aes(x=lon, y = lat, label = ICAO),
           size = 2,
           vjust = -0.5
  )+
  annotation_custom(imagemradar,
                   xmin = long.min,
                   xmax = long.max,
                   ymin = lat.min,
                   ymax = lat.max
  )+
  {
  if(raio==400){
    annotation_custom(legenda,
                     xmin = long.max-2.31,
                     xmax = long.max+0.37,
                     ymin = lat.min-0.55,
                     ymax = lat.min+0.67)
  }else{
    annotation_custom(legenda,
                     xmin = long.max-1.4,
                     xmax = long.max+0.24,
                     ymin = lat.min-0.35,
                     ymax = lat.min+0.45)
  }
  }+
  coord_fixed(ratio = 1,
             xlim = c(long.min, long.max),

```

```

        ylim = c(lat.min, lat.max),
        clip = "on"
    )+
    scale_x_continuous(breaks = seq(floor(long.min), ceiling(long.max), 1))+
    scale_y_continuous(breaks = seq(floor(lat.min), ceiling(lat.max), 1))+
    theme_bw()+
    theme(legend.position = "right",
          legend.key.height = unit(1.3, "cm"),
          legend.key.width = unit(0.2, "cm"),
          legend.title = element_text(size = 9),
          legend.background = element_blank(),
          axis.text = element_text(size = 12, colour = 1),
          axis.text.y = element_text(angle = 90, hjust = 0.5, vjust = 0.5),
          plot.margin = unit(c(0.3, 0.7, 0.3, 0.2), "cm"),
          plot.title = element_text(face = "bold",
                                    hjust = 0.5),
    )+
    labs(x = "Longitude (°)",
         y = "Latitude (°)",
         title = sprintf("%s\t%s UTC", nome, horario),
         subtitle = sprintf("Produto CAPPI: %s\tRaio: %s Km\t", produto, raio)
    )
    print(plote)
    ggsave(filename = sprintf("%s/resultados/radar_%s_%s_%s.png", getwd(), radar, produto, horario),
            height = altura,
            width = largura,
            units = "in",
            dpi = 300)
} else {
    os.plotes <- c()
    for(A in 1:nrow(eco.frame)){
        graphics.off()
        X11(height = altura,
            width = largura)
        plote <- ggplot()+
            annotate("path",
                   x=lon.cent+raio/111*cos(seq(0,2*pi,length.out=100)),
                   y=lat.cent+raio/111*sin(seq(0,2*pi,length.out=100)),
                   colour = "gray",
                   size = 0.5
            )+
            geom_point(data=as.data.frame(1),
                      x=lon.cent,
                      y=lat.cent,
                      size = 3,
                      shape = 3,
                      color = 'gray'
            )+
            geom_path(data = EstadosBR,
                    aes(x=long, y=lat, group = group),
                    size = 0.5,
            )+
            geom_point(data = as.data.frame(aeroneb),
                      aes(x=lon, y=lat),
                      size = 1,
                      shape = 1,

```

```

)+
geom_text(data = as.data.frame(aeroneb),
  aes(x=lon, y = lat, label = ICAO),
  size = 2,
  vjust = -0.5
)+
annotation_custom(rasterGrob(readPNG(eco.frame$png[A])),
  xmin = long.min,
  xmax = long.max,
  ymin = lat.min,
  ymax = lat.max
)+
{
  if(raio==400){
    annotation_custom(legenda,
      xmin = long.max-1.4,
      xmax = long.max+0.24,
      ymin = lat.min-0.35,
      ymax = lat.min+0.45)
  }else{
    annotation_custom(legenda,
      xmin = long.max-1.4,
      xmax = long.max+0.24,
      ymin = lat.min-0.35,
      ymax = lat.min+0.45)
  }
}
)+
coord_fixed(ratio = 1,
  xlim = c(long.min, long.max),
  ylim = c(lat.min, lat.max),
  clip = "on"
)+
scale_x_continuous(breaks = seq(floor(long.min), ceiling(long.max), 1))+
scale_y_continuous(breaks = seq(floor(lat.min), ceiling(lat.max), 1))+
theme_bw()+
theme(legend.position = "right",
  legend.key.height = unit(1.3, "cm"),
  legend.key.width = unit(0.2, "cm"),
  legend.title = element_text(size = 9),
  legend.background = element_blank(),
  axis.text = element_text(size = 12, colour = 1),
  axis.text.y = element_text(angle = 90, hjust = 0.5, vjust = 0.5),
  plot.margin = unit(c(0.3, 0.7, 0.3, 0.2), "cm"),
  plot.title = element_text(face = "bold",
    hjust = 0.5),
)+
labs(x = "Longitude (°)",
  y = "Latitude (°)",
  title = sprintf("%s\t%s UTC", nome, eco.frame$tempo[A]),
  subtitle = sprintf("Produto CAPPI: %s\tRaio: %s Km\t", produto, raio)
)
print(plote)
ggsave(filename = sprintf("%s/resultados/radar_anima_%i.png", getwd(), A),
  height = altura,
  width = largura,
  units = "in",

```

```
    dpi = 300)
  os.plotes <- append(os.plotes, sprintf("%s/resultados/radar_anima_%i.png", getwd(), A) )
}
os.plotes <- lapply(os.plotes, image_read)
cat("\nAnimando...\n")
animado <- image_animate(image_join(os.plotes),
  fps = 1,
  delay = NULL,
  optimize = T)
cat("Salvando...")
image_write(image = animado,
  path = sprintf("%s/resultados/radar_%s_%s_%s.gif", getwd(), radar, producto, horario))
}
graphics.off()
if(readline("Encerrar? (s/n) ")=="s"){break}
}
closeAllConnections()
```

## APÊNDICE F – Programa em R para plotar linhas de corrente, vorticidade relativa, corrente de jato e altura geopotencial

Esse programa utiliza dados da Reanalysis II (NCEP/DOE), *shapefiles* (*datum* WGS84) das Unidades da Federação, de países da América do Sul, de paralelos e meridianos, e da linha costeira da África.

As linhas de corrente são exibidas em três níveis de pressão, acompanhadas de outras variáveis. Para elaboração desse trabalho, as linhas de corrente do nível de 250 hPa são acompanhadas da corrente de jato (velocidade  $\geq 30 \text{ m.s}^{-1}$ ), as linhas de corrente em 500 hPa são exibidas com altura geopotencial do mesmo nível, e as linhas de corrente em 850 hPa são acompanhadas pelo campo de vorticidade relativa. Todas essas variáveis acompanhantes, inclusive o valor do limiar de jato, podem ser alteradas a critério do usuário.

O programa, da maneira que está aqui escrito, recebe dias específicos para exibir, que obviamente devem estar nos arquivos NetCDF de entrada. Não foi feito para gerar imagens em sequência entre dois momentos, mas pode ser adaptado para esse fim.

Existem três funções que devem estar escritas antes do programa principal.

Esta primeira serve para converter a dimensão temporal do arquivo NetCDF de seu valor numérico para um texto compreensível:

```
TEMPO_NUM_PARA_CHAR <- function (tempos, unidade){
  segundos <- switch(strsplit(unidade, split = " since ")[[1]][1],
    "hours"=3600, "minutes"=60, "seconds"=1)
  desde <- strsplit(unidade, split = " since ")[[1]][2]
  horarios <- as.POSIXct(tempos*segundos, origin=desde, tz="UTC")
  horarios <- strftime(horarios, "%d-%m-%Y %H:%M", tz="UTC")
}
```

Esta segunda combina as datas desejadas com os quatro horários que a Reanalysis II oferece por dia:

```
COMBINAR_DIAS_E_HORAS <- function(todos_dias, todas_horas){
  if(class(todos_dias)=="character" && class(todas_horas)=="character"){
    for (m in 1:length(todos_dias)){
      for (n in 1:length(todas_horas)){
        if(m==1 & n==1){
          todas_datas_horas <- c( paste(todos_dias[m], todas_horas[n]) )
        }else{
          todas_datas_horas <- append(todas_datas_horas, paste(todos_dias[m], todas_horas[n]))
        }
      }
    }
  }
  todas_datas_horas
}else{
  print("Não é character")
}
}
```

Esta terceira converte valores de longitude de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  para  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ :

```

LONGITUDE_180 <- function(longitudes){
  for(L in 1:length(longitudes))
  {
    if(longitudes[L]>180)
    {
      longitudes[L] <- longitudes[L]-360
    }
  }
  longitudes
}

setwd("/home/Desktop/SINOTICA/")

library(ggplot2)
library(ncdf4)
library(rgdal)

EstadosBR <- readOGR(dsn = sprintf("%s/shapes/", getwd()), layer = "linhas_estados_BR")
paralelos_e_meridianos <- readOGR(dsn = sprintf("%s/shapes/", getwd()), layer = "ne_50m_graticules_10")
países <- readOGR(dsn = sprintf("%s/ shapes/", getwd()), layer = "linhas-paises-AS-2")
africa <- readOGR(dsn = sprintf("%s/ shapes/", getwd()), layer = "corte")

arquivo1 <- nc_open(sprintf("%s/reanalysis2/uwnd.2017.subset.nc", getwd()))
arquivo2 <- nc_open(sprintf("%s/reanalysis2/vwnd.2017.subset.nc", getwd()))
arquivo3 <- nc_open(sprintf("%s/reanalysis2/vorticidade.rea2.2017.nc", getwd()))
arquivo4 <- nc_open(sprintf("%s/reanalysis2/hgt.2017.subset.nc", getwd()))

primeira.lon <- -60
ultima.lon <- 20
primeira.lat <- -50
ultima.lat <- 10
niveis.desejados <- c(250, 500, 850)
cjato <- T
if(cjato){
  nivel.do.jato <- 250
  vjato <- 30
}
geopot <- T
if(geopot){nivel.de.geopotencial <- 500}
numero_de_cores <- 9
largura <- 9.5
altura <- 8.6

dezessete <- c("11-02-2017", "14-09-2017", "19-10-2017", "10-07-2017", "14-07-2017",
              "22-08-2017", "19-04-2017", "04-03-2017", "01-05-2017",
              "05-06-2017", "21-06-2017", "23-06-2017", "04-07-2017", "16-07-2017",
              "27-07-2017", "29-07-2017", "25-08-2017", "26-08-2017", "27-08-2017",
              "02-09-2017", "03-09-2017", "11-12-2017",
              '03-09-2017', '24-09-2017', '06-10-2017')

todos_dias <- dezessete
todas_horas <- c("00:00", "06:00", "12:00", "18:00")

todas_datas_horas <- COMBINAR_DIAS_E_HORAS(todos_dias, todas_horas)
{
  # Verificar se as dimensões dos arquivos 1, 2, 3 e 4 são iguais, guardar valores

```

```

if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lat"), ncvar_get(arquivo2, "lat")))
{
  lats <- ncvar_get(arquivo1, "lat")
  if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lat"), ncvar_get(arquivo3, "lat")))
  {
    if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lat"), ncvar_get(arquivo4, "lat")))
    {
      print("Todas as latitudes são iguais")
    }else{
      print("Latitudes 1 e 4 não batem")
    }
  }else{
    lats3 <- ncvar_get(arquivo3, "lat")
    print("Latitudes 1 e 3 não batem")
    if(all(lats3 %in% lats)){print("mas arquivo1 contém arquivo3.")}
  }
}else{
  print("Latitudes 1 e 2 não batem")
}

if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lon"), ncvar_get(arquivo2, "lon")))
{
  lons <- ncvar_get(arquivo1, "lon")
  lons <- LONGITUDE_180(longitudes = lons)
  if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lon"), ncvar_get(arquivo3, "lon")))
  {
    if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lon"), ncvar_get(arquivo4, "lon")))
    {
      print("Todas as longitudes são iguais")
    }else{
      print("Longitudes 1 e 4 não batem")
    }
  }else{
    lons3 <- ncvar_get(arquivo3, "lon")
    lons3 <- LONGITUDE_180(lons3)
    print("Longitudes 1 e 3 não batem")
    if(all(lons3 %in% lons)){print("mas arquivo1 contém arquivo3.")}
  }
}else{
  print("Longitudes 1 e 2 não batem")
}

if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "time"), ncvar_get(arquivo2, "time")))
{
  tempos <- ncvar_get(arquivo1, "time")
  if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "time"), ncvar_get(arquivo3, "time")))
  {
    if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "time"), ncvar_get(arquivo4, "time")))
    {
      print("Todos os tempos são iguais")
    }else{
      print("Tempos 1 e 4 não batem")
    }
  }else{
    tempos3 <- ncvar_get(arquivo3, "time")
    print("Tempos 1 e 3 não batem")
  }
}

```

```

    if(all(tempos3 %in% tempos)){print("mas arquivo1 contém arquivo3.")}
  }
}else{
  print("Tempos 1 e 2 não batem")
}

if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lev"), ncvar_get(arquivo2, "lev")))
{
  niveis <- ncvar_get(arquivo1, "lev")
  if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lev"), ncvar_get(arquivo3, "lev")))
  {
    if(setequal(ncvar_get(arquivo1, "lev"), ncvar_get(arquivo4, "lev")))
    {
      print("Todos os níveis são iguais")
    }else{
      print("Níveis 1 e 4 não batem")
    }
  }else{
    niveis3 <- ncvar_get(arquivo3, "lev")
    print("Níveis 1 e 3 não batem")
    if(all(niveis3 %in% niveis)){print("mas arquivo1 contém arquivo3.")}
  }
}else{
  print("Níveis 1 e 2 não batem")
}
}

horarios <- TEMPO_NUM_PARA_CHAR(tempos = tempos,
                               unidade = arquivo1$dim$time$units)
i.primeira.lon <- match(primeira.lon, lons)
i.ultima.lon <- match(ultima.lon, lons)
i.primeira.lat <- match(primeira.lat, lats)
i.ultima.lat <- match(ultima.lat, lats)
tabela.de.graus <- data.frame("r"=c(seq(-179,180)),
                             "buss"=c(seq(269,0),seq(359,270))
)

for(nivel in niveis.desejados){
  for(horario in todas_datas_horas){
    print(sprintf("%i hPa & %s UTC", nivel, horario))
    i.nivel <- match(nivel, niveis)
    i.horario <- match(horario, horarios)
    u.fatia <- ncvar_get(arquivo1, "subuwnd",
                        start = c(i.primeira.lon, i.primeira.lat, i.nivel, i.horario),
                        count = c(abs(i.primeira.lon-i.ultima.lon)+1, abs(i.primeira.lat-i.ultima.lat)+1, 1, 1),
                        verbose = FALSE)
    v.fatia <- ncvar_get(arquivo2, "subvwnd",
                        start = c(i.primeira.lon, i.primeira.lat, i.nivel, i.horario),
                        count = c(abs(i.primeira.lon-i.ultima.lon)+1, abs(i.primeira.lat-i.ultima.lat)+1, 1, 1),
                        verbose = FALSE)

    vorrel.fatia <- ncvar_get(arquivo3, "vorrel",
                             start = c(i.primeira.lon, i.primeira.lat, i.nivel, i.horario),
                             count = c(abs(i.primeira.lon-i.ultima.lon)+1, abs(i.primeira.lat-i.ultima.lat)+1, 1, 1),
                             verbose = FALSE)

    geopot.fatia <- ncvar_get(arquivo4, attributes(arquivo4$var)[[1]],
                             start = c(i.primeira.lon, i.primeira.lat, i.nivel, i.horario),

```

```

        count = c(abs(i.primeira.lon-i.ultima.lon)+1, abs(i.primeira.lat-i.ultima.lat)+1, 1, 1),
        verbose = FALSE)
for (i in 1:dim(u.fatia)[1])
{
  for (j in 1:dim(v.fatia)[2])
  {
    if (i==1 && j==1)
    {
      lc.vr.ag.frame <- data.frame("lat"=lats[i.primeira.lat + j -1],
        "lon"=lons[i.primeira.lon + i -1],
        "u"=u.fatia[i,j],
        "v"=v.fatia[i,j],
        "u1"=1*sin(tabela.de.graus[match(iffelse(round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)==-
180, 180, round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)),tabela.de.graus$r),"buss"]*pi/180),
        "v1"=1*cos(tabela.de.graus[match(iffelse(round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)==-
180, 180, round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)),tabela.de.graus$r),"buss"]*pi/180),
        "vorrel"=vorrel.fatia[i,j],
        "ageop"=geopot.fatia[i,j],
        stringsAsFactors = FALSE)
    }else{
      nova_linha <- data.frame("lat"=lats[i.primeira.lat + j -1],
        "lon"=lons[i.primeira.lon + i -1],
        "u"=u.fatia[i,j],
        "v"=v.fatia[i,j],
        "u1"=1*sin(tabela.de.graus[match(iffelse(round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)==-180,
180, round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)),tabela.de.graus$r),"buss"]*pi/180),
        "v1"=1*cos(tabela.de.graus[match(iffelse(round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)==-180,
180, round(atan2(v.fatia[i,j], u.fatia[i,j])*180/pi)),tabela.de.graus$r),"buss"]*pi/180),
        "vorrel"=vorrel.fatia[i,j],
        "ageop"=geopot.fatia[i,j],
        stringsAsFactors = FALSE)
      lc.vr.ag.frame <- rbind(lc.vr.ag.frame, nova_linha)
    }
  }
}
if(cjato && nivel==nivel.do.jato){
  print("Preparando valores de jato...")
  for (h in 1:length(lc.vr.ag.frame$u)){
    vel <- sqrt(lc.vr.ag.frame$u[h]^2 + lc.vr.ag.frame$v[h]^2)
    if(h==1){
      jato <- vel
    }else{
      jato <- append(jato, vel)
    }
  }
}
valor_maximo_absoluto <- max(jato, na.rm = TRUE)
sequencia_das_cores <- round(seq(vjato, valor_maximo_absoluto +valor_maximo_absoluto*0.01,
  length.out = numero_de_cores-3), digits = 0)
lc.vr.ag.frame$jato <- jato
}else{
  if(nivel==500)
  {
    sequencia_das_cores <- seq(5000, 6000, 100)
  }else{
    valor_maximo_absoluto <- max(abs(lc.vr.ag.frame$vorrel*1e+05), na.rm = TRUE)
    sequencia_das_cores <- round(seq(-15, 15,

```

```

                length.out = numero_de_cores+1), digits = 0)
    }
  }
  graphics.off()
  if(cjato && nivel==nivel.do.jato){
    rampa_de_cores <- colorRampPalette(c("yellow", "darkorange3"))
  }else{
    if(nivel==500)
    {
      rampa_de_cores <- colorRampPalette(c("darkred", "mediumvioletred", "magenta", "purple", "cyan"))
    }else{
      rampa_de_cores <- colorRampPalette(c("purple", "white", "red"))
    }
  }
}
plote <- ggplot()+
{
  if(cjato && nivel==nivel.do.jato){
    metR::geom_contour_fill(data = lc.vr.ag.frame,
      aes(x = lon,
          y = lat,
          z = jato),
      na.fill = FALSE,
      bins = length(sequencia_das_cores)+1)
  }else{
    if(nivel==500){
      metR::geom_contour_fill(data = lc.vr.ag.frame,
        aes(x = lon,
            y = lat,
            z = ageop),
        na.fill = FALSE,
        bins = length(sequencia_das_cores)+1
      )
    }else{
      metR::geom_contour_fill(data = lc.vr.ag.frame,
        aes(x = lon,
            y = lat,
            z = vorrel*1e+05),
        na.fill = F,
        bins = 16)}
    }
  }+
  metR::geom_streamline(data = lc.vr.ag.frame,
    aes(x = lon,
        y = lat,
        dx = u1,
        dy = v1),
    arrow.angle = 20,
    arrow.type = "open",
    L = 7,
    res = 5,
    skip = 0,
    n = NULL,
    jitter = 0)+
  geom_path(data = paralelos_e_meridianos,
    aes(x=long, y=lat, group = group),
    color = "gray20",

```

```

        size = 0.4
    )+
    geom_path(data = paises,
              aes(x=long, y=lat, group = group),
              size = 0.4,
    )+
    geom_path(data = africa,
              aes(x=long, y=lat, group = group),
              size = 0.4,
    )+
    geom_path(data = EstadosBR,
              aes(x=long, y=lat, group = group),
              size = 0.5,
    )+
    coord_fixed(ratio = 27.5/25,
                xlim = c(primeira.lon, ultima.lon),
                ylim = c(primeira.lat, ultima.lat),
                expand = FALSE)+
    {
    if(cjato && nivel==nivel.do.jato){
        scale_fill_gradientn(name = "Velocidade do vento\n(m.s-1)",
                             colours = rampa_de_cores(numero_de_cores-3),
                             limits = c(vjato, valor_maximo_absoluto+valor_maximo_absoluto*0.1),
                             breaks = sequencia_das_cores,
                             na.value = rgb(0,0,0,0))
    }else{
        if(nivel==500){
            scale_fill_gradientn(name = "Altura geopotencial\n(m)",
                                 colours = rampa_de_cores(numero_de_cores),
                                 limits = c(5000, 6000),
                                 breaks = sequencia_das_cores)
        }else{
            scale_fill_gradientn(name = "Vorticidade relativa\n(10-5.s-1)",
                                 colours = rampa_de_cores(numero_de_cores),
                                 limits = c(-15, 15),
                                 breaks = sequencia_das_cores)
        }
    }
    }+
    scale_x_continuous(breaks = seq(primeira.lon, ultima.lon, 10))+
    scale_y_continuous(breaks = seq(primeira.lat, ultima.lat, 10))+
    theme_bw()+
    theme(legend.position = "bottom",
          legend.key.height = unit(0.4, "cm"),
          legend.key.width = unit(2.7, "cm"),
          legend.title = element_text(size = 9),
          legend.background = element_blank(),
          axis.text = element_text(size = 12, colour = 1),
          axis.text.y = element_text(angle = 90, hjust = 0.5, vjust = 0.5),
          plot.margin = unit(c(0.3, 0.7, 0.3, 0.2), "cm"),
          plot.title = element_text(face = "bold",
                                     hjust = 0.5),
    )+
    {
    if(cjato && nivel==nivel.do.jato){
        ggtitle(sprintf("%s UTC\nLinhas de corrente e jato em %s hPa", horario, nivel))
    }
    }

```

```
}else{
  if(nivel==500){
    ggtitle(sprintf("%s UTC\nLinhas de corrente e altura geopotencial em %s hPa", horario, nivel))
  }else{
    ggtitle(sprintf("%s UTC\nLinhas de corrente e vorticidade relativa em %s hPa", horario, nivel))
  }
}
}+
labs(x = "Longitude (°)",
     y = "Latitude (°)")
png(file=sprintf("%s/plots/LC_j_vr_ag_NCEP2_%s_%shPa.png", getwd(), horario, nivel),
     width=largura,
     height=altura,
     units="in",
     res=300
)
print(plote)
graphics.off()
}
}
nc_close(arquivo1)
nc_close(arquivo2)
nc_close(arquivo3)
nc_close(arquivo4)
```

## APÊNDICE G – Programa em R para seleção de dados de arquivos NetCDF do ERA5 para elaborar perfil vertical

Considerando que há uma pasta com arquivos NetCDF, cada um contendo dados para uma região em torno do aeródromo de interesse, nomeado com o seguinte padrão: ICAO-dd-mm-AAAA.nc

Onde ICAO é o código ICAO de um aeródromo de interesse, dd é o dia, mm o mês e AAAA o ano da ocorrência do fenômeno.

Esse programa abre cada arquivo, busca o ponto mais próximo do aeródromo (variável tipo de dataframe *aeroNEB*) para uma data e hora de interesse (variável de tipo lista *meus.casos*), lê (verticalmente) os dados de temperatura, umidade relativa (converte em Td), componentes u e v do vento e pressão, e os salva em formato CSV.

```
library(ncdf4)
library(aiRthermo)
library(weathermetrics)

setwd("/home/SINOTICA/R")

meus.casos <- list(
  c("11-02-2017 17:00", "14-09-2017 16:00", "19-10-2017 22:00", "04-08-2018 20:00",
    "27-08-2018 11:00"),# SBFZ

  c("10-07-2017 20:00", "14-07-2017 18:00", "22-08-2017 00:00", "29-11-2018 15:00"),# SBJP

  c("19-04-2017 10:00"),# SBTE

  c("03-09-2017 19:00", "24-09-2017 18:00", "06-10-2017 17:00", "08-01-2018 13:00",
    "12-06-2018 16:00", "23-07-2018 15:00", "21-08-2018 15:00", "29-08-2018 23:00",
    "30-08-2018 00:00", "10-12-2018 15:00"),# SBSG

  c("17-06-2018 18:00"),# SBAR

  c("23-01-2018 16:00",
    "29-10-2018 17:00"),# SBRF

  c("04-03-2017 18:00", "01-05-2017 01:00", "01-05-2017 02:00", "05-06-2017 12:00",
    "05-06-2017 13:00", "21-06-2017 23:00", "23-06-2017 02:00", "23-06-2017 03:00",
    "23-06-2017 15:00", "04-07-2017 02:00", "04-07-2017 03:00", "04-07-2017 04:00",
    "16-07-2017 06:00", "16-07-2017 07:00", "27-07-2017 01:00", "27-07-2017 02:00",
    "29-07-2017 18:00", "29-07-2017 19:00", "25-08-2017 22:00", "25-08-2017 23:00",
    "26-08-2017 00:00", "26-08-2017 01:00", "27-08-2017 08:00", "02-09-2017 14:00",
    "02-09-2017 15:00", "03-09-2017 16:00", "11-12-2017 01:00", "11-12-2017 02:00",
    "25-02-2018 16:00", "25-02-2018 17:00", "14-11-2018 15:00", "14-11-2018 16:00",
    "27-11-2018 01:00", "27-11-2018 02:00")# SBSV
)
names(meus.casos) <- c('SBFZ', 'SBJP', 'SBTE', 'SBSG', 'SBAR', 'SBRF', 'SBSV')
aeroNEB <- data.frame(icao = c("SBAR", "SBFZ", "SBMO", "SBRF", "SBSV", "SBSL", "SBJP", "SBTE",
"SBSG"),
  lat = c(-10.9853, -3.7758, -9.5108, -8.1264, -12.9086, -2.5869, -7.1483, -5.0606, -5.7689),
  lon = c(-37.0733, -38.5322, -35.7917, -34.9228, -38.3225, -44.2361, -34.9503, -42.8244, -35.3664))
```

```

pasta <- list.files('/ERA5/vertical', all.files = F, full.names = T)

for(aa in 1:length(pasta)){
  arquivo <- nc_open(pasta[aa])
  nome.do.arquivo <- tail(strsplit(pasta[aa], split = "/")[1], 1)
  print(sprintf("Arquivo aberto: %s", nome.do.arquivo))
  meu.icao <- strsplit(nome.do.arquivo, "-")[1][1]
  lat_desej <- aeroNEB[match(meu.icao, aeroNEB$icao),]$lat
  lon_desej <- aeroNEB[match(meu.icao, aeroNEB$icao),]$lon
  lats <- ncvr_get(arquivo, "latitude")
  lons <- ncvr_get(arquivo, "longitude")
  niveis <- ncvr_get(arquivo, "level")
  lat_disp <- lats[which.min(abs(lats-lat_desej))]
  lon_disp <- lons[which.min(abs(lons-lon_desej))]
  print(sprintf("Distância entre os pontos disponíveis: %.4f °lat, %.4f °lon", lat_disp-lat_desej, lon_disp-
lon_desej))
  if(abs(lat_disp-lat_desej) > 0.5 || abs(lon_disp-lon_desej) > 0.5){
    readline("Pontos muito distantes (>0.5°) ctrl+c para cancelar")
  }
  todos_horarios <- c(arquivo$dim$time$vals)
  todos_horarios <- as.POSIXct(todos_horarios*3600, origin="1900-01-01 00:00", tz="UTC")
  todos_horarios <- strptime(todos_horarios, "%d-%m-%Y %H:%M", tz="UTC")
  horarios_disp <- todos_horarios[which( as.logical( match(todos_horarios, meus.casos[[meu.icao]] )))]
  if(is.null(horarios_disp) || is.na(horarios_disp) || length(horarios_disp)<1){
    mensagemdeerro <- sprintf("Horários errados para %s no arquivo %s\n Disponível: %s\n Desejado: %s",
meu.icao, nome.do.arquivo, todos_horarios, meus.casos[[meu.icao]])
    stop(mensagemdeerro)
  }
  for(hh in match(horarios_disp, todos_horarios)){
    print(todos_horarios[hh])
    horario_selec <- todos_horarios[hh]
    temperatura.array <- ncvr_get(arquivo, "t")
    temperatura.perfil <- K2C(temperatura.array[match(lon_disp, lons), match(lat_disp, lats), ,
match(horario_selec, todos_horarios)])
    rm(temperatura.array)
    umidade.relativa.array <- ncvr_get(arquivo, "r")
    umidade.relativa.perfil <- umidade.relativa.array[match(lon_disp, lons), match(lat_disp, lats), ,
match(horario_selec, todos_horarios)]
    rm(umidade.relativa.array)
    umidade.relativa.perfil <- ifelse(umidade.relativa.perfil>100, 100, umidade.relativa.perfil)
    ponto.de.orvalho.perfil <- humidity.to.dewpoint(rh = umidade.relativa.perfil, t = temperatura.perfil,
temperature.metric = "celsius")
    u.array <- ncvr_get(arquivo, "u")
    v.array <- ncvr_get(arquivo, "v")
    u.perfil <- u.array[match(lon_disp, lons), match(lat_disp, lats), , match(horario_selec, todos_horarios)]
    v.perfil <- v.array[match(lon_disp, lons), match(lat_disp, lats), , match(horario_selec, todos_horarios)]
    rm(u.array, v.array)
    niveis <- rev(niveis)
    temperatura.perfil <- rev(temperatura.perfil)
    ponto.de.orvalho.perfil <- rev(ponto.de.orvalho.perfil)
    u.perfil <- rev(u.perfil)
    v.perfil <- rev(v.perfil)
    perfil <- data.frame(pressao = niveis,
temperatura = temperatura.perfil,
ponto_de_orvalho = ponto.de.orvalho.perfil,
u = u.perfil,

```

```
        v = v.perfil
    )
    write.csv(perfil,
              file = sprintf("%s/perfis/persim_%s_%s_%.2f_%.2f.csv", getwd(), meu.icao, horario_selec, lat_disp,
lon_disp),
              row.names = FALSE,
    )
    print(sprintf("Arquivo salvo: persim_%s_%s_%.2f_%.2f.csv", meu.icao, horario_selec, lat_disp, lon_disp))
    niveis <- ncvr_get(arquivo, "level")
}
nc_close(arquivo)
print("Arquivo fechado")
}
```

## APÊNDICE H – Programa em R para calcular índices termodinâmicos

Esse programa só foi utilizado quando o programa de Python (apêndice I) retornar valores incorretos para os índices termodinâmicos.

```

library(aiRthermo)
rm(list = ls())
pasta <- ("/home/SINOTICA/R/perfis")
# pode criar um arquivo .Rhistory nessa pasta, favor apagar para não dar problema depois
capes <- c()
cins <- c()
lis <- c()
aps <- c()
for (P in list.files(pasta)){
  perfil <- read.csv(file = paste(pasta,P, sep = "/"))
  pressao <- perfil$pressao
  # se estiver em hPa
  pressao <- pressao*100
  temperatura <- perfil$temperatura
  temperatura <- C2K(temperatura)
  ur <- dewpointdepression2rh(P = pressao,
                              Temp = temperatura,
                              dpd = temperatura-C2K(perfil$ponto_de_orvalho))
  razao.de.mistura <- rh2w(P = pressao,
                          Temp = temperatura,
                          rh = ur)
  result <- CAPE_CIN(Ps=pressao,
                    Ts=temperatura,
                    ws=razao.de.mistura)
  cape <- round(result$cape, digits = 1)
  cin <- round(result$cin, digits=1)
  LI <- round(LIindex(Ps = pressao, Ts = temperatura, ws = razao.de.mistura,
                    Psurface = pressao[1], deltaP = 5, PWIDTH = 5000), digits = 1)
  AP <- round(PW(w = razao.de.mistura, PRES = pressao, Psurf = pressao[1]))
  capes <- append(capes, cape)
  cins <- append(cins, cin)
  lis <- append(lis, LI)
  aps <- append(aps, AP)
}
termos <- data.frame("perfil"=list.files(pasta), "CAPE"=capes, "CIN"=cins, "LI"=lis, "AP"=aps)
View(termos)
write.csv(termos, paste(pasta,"indicesR.csv", sep = "/"), row.names = F)

```

## APÊNDICE I – Programa em Python para desenhar diagrama Skew-t log-p

Após os arquivos saírem do programa do apêndice G, eles servem de entrada no seguinte programa em Python:

```
import os
import matplotlib.gridspec as gridspec
import matplotlib.pyplot as plt
import metpy.calc as mpcalc
import pandas as pd
from metpy.plots import Hodograph, SkewT
from metpy.units import units

pasta = "/home/SINOTICA/R/perfis/"
arquivos = os.listdir(pasta)

fig = plt.figure(figsize=(9, 9))

# Obter os dados
for L in list(range(0, len(arquivos))):
    plt.clf() # limpar figura
    perfil = pd.read_csv(pasta+arquivos[L], sep=",")
    print("Arquivo", arquivos[L])
    local = arquivos[L].split("_")[1]
    data_hora = arquivos[L].split("_")[2]
    lat = arquivos[L].split("_")[3]
    lon = arquivos[L].split("_")[4].replace(".csv", "")
    p = perfil['pressao'].values * units.hPa
    T = perfil['temperatura'].values * units.degC
    Td = perfil['ponto_de_orvalho'].values * units.degC
    u = perfil['u'].values * units('m/s')
    v = perfil['v'].values * units('m/s')
    vel_vento = mpcalc.wind_speed(u=u, v=v)
    dir_vento = mpcalc.wind_direction(u=u, v=v)
    NCL_pressao, NCL_temperatura = mpcalc.lcl(p[0], T[0], Td[0])
    traj_parc = mpcalc.parcel_profile(p, T[0], Td[0]).to('degC')
    CAPE, CIN = mpcalc.cape_cin(p, T, Td, traj_parc)
    LI = mpcalc.lifted_index(p, T, traj_parc)
    AP = mpcalc.precipitable_water(pressure=p, dewpoint=Td)

    titulo = "{} {} UTC\nLat: {}° Lon: {}".format(local, data_hora, lat, lon)
    plt.suptitle(titulo)
    grade = gridspec.GridSpec(10,10)
    skew = SkewT(fig, rotation=45, subplot=grade[:, :6])

    skew.ax.set_xlim(-30, 40) # Quais isotermas a exibir
    skew.plot(p, Td, 'b', linewidth=2) # Td em azul
    skew.plot(p, T, 'r', linewidth=2) # T em vermelho
    skew.plot_barbs(pressure=p, u=u, v=v, # Barbelas
        plot_units=units('m/s'),
        x_clip_radius=20,
        barb_increments=dict(half=2.5,
            full=5.0,
            flag=25.0) # velocidades na barbela
    )
    skew.plot(NCL_pressao, NCL_temperatura, 'ko', markerfacecolor='black', markersize=1.52)
```

```

skew.plot(p, traj_parco, 'k', linewidth=1, alpha=0.5)
skew.shade_cin(p, T, traj_parco, Td)
skew.shade_cape(p, T, traj_parco)
skew.ax.text(1.15, 0.5,
             "AP: {} mm\nCAPE: {:.1f} J/Kg\nCIN: {:.1f} J/Kg\nLI: {:.1f}".format(round(float(str(AP).split(" ")[0])),
                                                                              float(str(CAPE).split(" ")[0]),
                                                                              float(str(CIN).split(" ")[0]),
                                                                              float(str(LI[0]).split(" ")[0])),

             transform=skew.ax.transAxes,
             fontsize=11,
             verticalalignment='top')
skew.ax.axvline(0, color='c', linestyle='--', linewidth=1.22)
skew.plot_dry_adiabats(linewidths=0.7, colors=(110/255, 220/255, 114/255, 0.9))
skew.plot_moist_adiabats(linewidths=0.7, colors=(110/255, 169/255, 219/255, 0.9))
skew.plot_mixing_lines(linewidths=0.7, colors=(182/255, 147/255, 226/255, 0.9))
plt.xlabel("Temperatura (°C)")
plt.ylabel("Pressão (hPa)")

eixo_hodo = fig.add_subplot(grade[1:4,7:])
hodo = Hodograph(eixo_hodo, component_range=30)
plt.yticks(color='black')
hodo.add_grid(increment=10)
hodo_cor = hodo.plot_colormapped(u, v, p, intervals=[100,400,800,1000]*units.hPa, colors=['tab:green',
'tab:orange', 'tab:purple'])
plt.colorbar(hodo_cor, location='top').ax.invert_xaxis()
print(titulo)
#plt.show()
plt.savefig("/home/danilo/Desktop/SINOTICA/Backup-friendly/perfis/"+titulo.split("\n")[0].replace(":",
"")+".png")
plt.close()
print("Fim")

```

**APÊNDICE J – Condições observadas durante os eventos de WS dos anos de 2017 e 2018 em Salvador.**

**Hífen (-): ausência de fenômeno**

**n/a: sem medição**

Data / Hora	Duração (h)	Visibilidade (km)	Velocidade (kt)	Escala Beaufort	Rajadas (kt)	Direção (°)	Direção	Variação de direção (°)		Névoa úmida	Chuva	T (°C)	Td (°C)	T-Td
04-03-17 1800UTC	1	>10	10	3	-	130	SE	-	-	-	-	29	21	8
01-05-17 0100UTC	2	>10	11	4	-	150	SSE	-	-	-	-	27	20	7
01-05-17 0200UTC	-	>10	8	3	-	160	SSE	-	-	-	-	27	21	6
05-06-17 1230UTC	1,5	3	19	5	-	100	E	-	-	X	Fraca	22	21	1
05-06-17 1300UTC	-	5	7	3	-	70	ENE	-	-	-	Pancadas fracas	23	22	1
21-06-17 2300UTC	1	>10	7	3	-	150	SSE	-	-	-	-	22	20	2
23-06-17 0225UTC	½	3	10	3	22	120	ESE	-	-	-	Forte	20	19	1
23-06-17 0235UTC	-	8	4	2	22	80	E	-	-	-	Pancadas nas vizinhanças	20	20	0
23-06-17 1500UTC	1	8	15	4	-	160	SSE	120	180	-	Pancadas nas vizinhanças	26	20	6
04-07-17 0200UTC	2	>10	18	5	29	180	S	-	-	-	-	22	17	5
04-07-17 0300UTC	-	>10	16	4	-	170	S	-	-	-	-	23	17	6
04-07-17 0500UTC	1	>10	19	5	-	160	SSE	-	-	-	-	22	16	6
16-07-17 0600UTC	2	>10	15	4	-	100	E	-	-	-	-	21	18	3
16-07-17 0700UTC	-	>10	9	3	-	110	ESE	-	-	-	-	22	17	5
27-07-17 0100UTC	2	>10	13	4	-	150	SSE	-	-	-	-	23	18	5
27-07-17 0200UTC	-	>10	14	4	-	140	SE	-	-	-	-	23	18	5
29-07-17 1800UTC	2	4	16	4	-	120	ESE	-	-	X	Fraca	22	19	3

29-07-17 1900UT C	-	5	13	4	-	140	SE	-	-	X	-	22	19	3
25-08-17 2200UT C	4	>10	14	4	-	150	SSE	-	-	-	-	24	n/a	n/a
25-08-17 2300UT C	-	8	14	4	-	150	SSE	-	-	-	Pancadas nas vizinhanças	24	n/a	n/a
26-08-17 0000UT C	-	8	13	4	23	140	SE	-	-	-	Pancadas nas vizinhanças	23	n/a	n/a
26-08-17 0100UT C	-	8	11	4	-	140	SE	-	-	-	Pancadas nas vizinhanças	23	n/a	n/a
27-08-17 0800UT C	1	>10	12	4	-	160	SSE	-	-	-	-	23	n/a	n/a
02-09-17 1400UT C	2	5	13	4	23	140	SE	-	-	-	Fraca	23	20	3
02-09-17 1500UT C	-	>10	6	2	-	110	ESE	-	-	-	-	25	17	8
03-09-17 1600UT C	1	3	13	4	-	160	SSE	-	-	X	Fraca	23	19	4
11-12-17 0100UT C	2	5	13	4	24	330	NNW	-	-	-	Forte	23	21	2
11-12-17 0135UT C	-	6	8	3	-	330	NNW	-	-	-	Fraca	23	22	1
11-12-17 0200UT C	-	8	6	2	-	340	NNW	-	-	-	Fraca	23	22	1
25-02-18 1600UT C	2	>10	10	3	-	80	E	50	120	-	-	30	22	8
25-02-18 1700UT C	-	>10	11	4	-	90	E	60	120	-	-	30	21	9
14-11-18 1500UT C	2	>10	11	4	-	90	E	-	-	-	-	29	23	6
14-11-18 1600UT C	-	>10	11	4	-	90	E	60	120	-	-	30	23	7
27-11-18 0100UT C	2	>10	8	3	-	90	E	60	120	-	Pancadas nas vizinhanças	24	19	5
27-11-18 0200UT C	-	>10	5	2	-	250	WSW	-	-	-	-	23	20	3

Fonte: autor.