



Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Meteorologia

**AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TURBULÊNCIA DE AR CLARO NA
REGIÃO DE VOO CONTROLADO POR CURITIBA: ESTUDO DE
CASOS**

Francisco Pinheiro Gomes

Rio de Janeiro - RJ

Março de 2021

AVALIAÇÃO DA PREVISÃO DE TURBULÊNCIA DE AR CLARO NA REGIÃO
DE VOO CONTROLADO POR CURITIBA: ESTUDO DE CASOS

Francisco Pinheiro Gomes

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadores: Gutemberg Borges França, *PhD*.

Wallace Figueiredo Menezes, *DSc*.

Rio de Janeiro

Maio de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo deste período.

Agradeço a minha família Berenice, Eron, Bárbara e Enzo pela força, amor e apoio incondicional.

Aos meus pais Francisco e Marlene (*in memoriam*), com todo amor do mundo e gratidão.

Aos meus queridos professores e orientadores Gutemberg e Wallace pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação.

Aos meus amigos do CIMAER e de vida, Platenik, Maria Carolina, Caroline, Pereira, Fabrício e Rosette, pela ajuda, pelos momentos de felicidade e amizade, principalmente nas horas difíceis.

Agradeço também à Cátedra de Meteorologia Aeronáutica, e ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) por me proporcionar a oportunidade de trabalhar com este tema, na forma de autor.

E por fim, meus agradecimentos a LATAM pela gentileza em fornecer os dados de variação vertical da força da gravidade (VRTG) utilizados neste trabalho.

RESUMO

Analisa-se a aplicabilidade dos índices clássicos, numericamente modelados, indicadores de condições atmosféricas turbulenta para previsão de turbulência de céu claro (CAT) na região sul do Brasil. Os eventos foram reconstruídos usando 6.750 mensagens de CAT, denominado de AIREP, de 2015 a 2019, e 12.959 observações *in-situ* da aceleração vertical da gravidade (VRTG) registrados pelas aeronaves de dezembro de 2018 a dezembro de 2019. Os registros de CAT via VRTG mostraram que os eventos são proporcionalmente distribuídos (em parênteses a severidade) em 94.05 % (leve), 4.92% (moderada) e 1.01% (severa) na região de estudo. As análises sinóticas em 5 estudos de casos revelam que os eventos de CAT ocorreram durante condições de céu claro na presença da corrente de jato e, assim, o cisalhamento de vento foi o mecanismo de sua formação. Três análises, baseada na composição de variáveis e índices modelados pelos modelos GFS0,25 e WRF (com grade de 18, 6 e 2km), definido como, (1) perfil de vento, temperatura potencial (Θ), energia cinética turbulenta (TKE), (2) número de Richardson (Ri) e velocidade vertical (W), e (3) os índices indicadores de CAT denominados de Ri, Brown, Ellrod-Endlich, Ellrod-Knap and Ellroad-Knox, mostraram que quanto maior a resolução espacial da simulação numérica melhor é previsão de CAT, vide Kim *et al.*, (2010). Análises da resposta dos índices modelados versus capacidade destes em representar as condições de uma atmosfera turbulenta, na circunvizinhança dos registros de VRTG, é discutida e se observou que o índice Brown foi o mais eficiente para tal, uma que este foi capaz de identificar 100% dos cinco casos estudados. O resultado de tentativa inicial para ajustar os índices (Brown, Ellrod-Endlich e Ellrod-Knap) de previsão de CAT, usando dados modelados são bastante promissores, visto os três índices ajustados foram capazes de detectar, respectivamente, 0,96, 0,96 e 0,99 dos eventos de CAT, com 12 horas de antecedência nos dias 21 de maio de 2018 e 27 de março de 2019.

Palavras chaves: Turbulência de céu claro, modelagem de dados

ESTIMATION OF THE CLEAR AIR TURBULENCE FORECAST IN CURITIBA CONTROLLED FLIGHT REGION: CASE STUDY

ABSTRACT

This article analyzes the applicability of classic indexes modeled numerically to predict turbulence events in a clear sky condition in the southern region of Brazil. Historical clear sky turbulence (CAT) events were reconstructed by using 25.465 CAT messages, namely AIREP, from 2015 to 2019, and 12.959 *in-situ* CAT records by aircraft of vertical gravity acceleration (VRTG) from December 2018 to December 2019. It was observed that CAT events are proportionally distributed (in parentheses, severity) in 94.05% (light), 4.92% (moderate), and 1.01% (severe) based on the VRTG data of the study region. Synoptic analyses in five cases studied reveal that *in-situ* turbulence records occurred during clear sky conditions in the presence of jet stream. Three joint analysis of the compositions of the variables and indexes modeled by GFS0.25 and WRF (16, 6 and 2 km grid), defined as, (1) wind profile, potential temperature (Θ), turbulent kinetic energy (TKE); and (2) Richardson (Ri) and vertical speed (W), and (3) separately the CAT indicator indices called Ri, Brown, Ellrod-Endlich, and Ellrod-Knap, and Ellroad-Knox, showed that the improvement of spatial resolution data plays an important role in CAT forecasting as Kim *et al.* (2010). The result of the initial attempt to adjust the predictive indexes (Brown, Ellrod-Endlich, and Ellrod-Knap) of CAT, using modeled WRF data (18, 6, and 2 km grid) is encouraging since the three adjusted indexes were able to detect 0,96, 0,96 e 0,99 CAT events, respectively, with 12 hours of advance on May 21, 2018 and March 27, 2019.

Keywords: CAT, VRTG e WRF

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
	2.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAT.....	21
	2.2 DESCRIÇÃO DOS ÍNDICES DE TURBULÊNCIA	25
	2.2.1 Número de Richardson (Ri).....	25
	2.3.2 Indicador Brown (Φm)	26
	2.3.3 Indicador Ellrod-Knapp - TI2.....	27
	2.3.4 Indicador Ellrod-Knox - EKI.....	30
3	MATERIAL	33
4	MÉTODO.....	36
5	RESULTADOS.....	38
	5.1 ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES DE CAT	38
	5.2 SELEÇÃO DO CASOS E ANÁLISE	41
	5.2.1 Caso I.....	42
	5.2.2 Caso II	50
	5.2.3 Caso III	57
	5.2.4 Caso IV	64
	5.2.5 Caso V	71
	5.3 ANÁLISE QUANTITATIVA.....	79
6	CONCLUSÃO	81
7	REFERÊNCIAS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Projeção da demanda da aviação. Fonte: OACI (2016).....	15
Figura 1.2 - A aviação geral na FIR Curitiba. Fonte: DECEA.....	17
Figura 1.3 - Região da FIR Curitiba e os registros de turbulências coletados pelas das aeronaves A320 da empresa aérea LATAM no período de 2018 a 2019. Fonte: Autor.	17
Figura 2.1- Forças governantes da onda da gravidade. Fonte: Programa COMET.....	19
Figura 2.2 - Mecanismos da turbulência: turbulência gerada por onda de montanha – MWT (a esquerda), turbulência de ar claro – CAT (centro) e turbulência perto da nuvem e/ou indutiva por convecção - NCT/CIT (a direita). Fonte: Adaptada de Bitar, 2015. .	22
Figura 4.1 - Passos do método.....	37
Figura 5.1 - Densidade de registro de CAT considerando 6.750 registros de AIREP ocorridos na FIR Sul entre 02 de outubro de 2015 a 04 junho de 2019.	39
Figura 5.2 - Distribuição dos registros de VRTG por classe para na FIR Curitiba no período de 01/12/ 2018 a 31/12/2019.	39
Figura 5.3 - Quantidade dos registros mensais de CAT via VRTG (G) para classe 2 e 3 (a), classe 3 (b) e registros horários para classe 2 e 3 (c) na FIR Curitiba no período de 01/12/ 2018 a 31/12/2019.	40
Figura 5.4 - (a) imagem GOES-16 (canal13-infravermelho) como os pontos em vermelho representando as localizações dos VRTG registrado, conforme Tabela 5.3, no dia 29 de setembro de 2018. (b) recorte da carta de superfície das 12Z e (c) Corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro.	44
Figura 5.5 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$ e composto C2: R_i (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curva branca com valores negativo e positivo), determinado com dados GFS0,25 das 09Z do dia 23 de abril de 2018.	46
Figura 5.6 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em	

m ² .s ² . C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 09Z do dia 23 de abril de 2018.....	47
Figura 5.7 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 12 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 12Z do dia 23 de abril de 2018. .	48
Figura 5.8 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 300 hPa com o ponto vermelho indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG 18 km, 6 km e 2 km das 12Z do dia 23 de abril de 2018.	49
Figura 5.9 - (a) imagem GOES-16 (canal13-infravermelho) como os pontos em vermelho representando as localizações dos VRTG registrado, conforme Tabela 5.3, no dia 29 de setembro de 2018. (b) recorte da carta de superfície das 12Z e (c) Corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro.	51
Figura 5.10 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em m ² .s ² e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 03Z do dia 29 de setembro de 2018.	53
Figura 5.11 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em m ² .s ² . C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018.	54
Figura 5.12 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 03 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 4Z do dia 29 de setembro de 2018.	55

Figura 5.13 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 300 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018. O ponto vermelho indica o dado VRTG..... 56

Figura 5.14 - (a) Posição exata da turbulência, indicada indicado pelo avião azul, cruzando FL330 canal 13 visível, Fonte: INPE. (b) Análise de superfície do dia 18/05/2018. Fonte: REDEMET e em (c) corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro apresenta forte cisalhamento entre SAEZ a SBGL na altura de 8 km. Fonte: REDEMET. 58

Figura 5.15 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$ e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 18Z do dia 18 de maio de 2018. 60

Figura 5.16 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$. C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 19Z do dia 18 de maio de 2018..... 61

Figura 5.17 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 03 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 18Z do dia 18 de maio de 2018. . 62

Figura 5.18 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 350 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 18 de maio de 2018. 63

Figura 5.19 - (a): Posição exata da turbulência, indicada indicado pelo avião amarelo, cruzando FL380 canal 13 visível, Fonte: INPE, figura 5.19 (b): Análise de superfície do dia 23/04/2018. Fonte: REDEMET e figura 5.19 (c) Corte vertical de Buenos Aires

(SAEZ) ao Rio de Janeiro (SBGL) apresenta forte corrente de jato de SAEZ até SBGL.
Fonte: REDEMET. 65

Figura 5.20 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$ e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 18Z do dia 21 de maio de 2018. 67

Figura 5.21 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$. C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 18Z do dia 21 de maio de 2018. 68

Figura 5.22 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índices de B, E-1, E-2, e E-3 200 hPa às 17Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do V RTG às 18Z do dia 21 de maio de 2018. 69

Figura 5.23 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 200 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 17Z do dia 21 de maio de 2018. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 5.24 - (a): Posição exata da turbulência, indicada indicado pelo avião azul, cruzando FL380 canal 13 visível, Fonte: INPE, Figura 5.41 (b): Análise de superfície do dia 27/03/2019. Fonte: REDEMET e figura 5.41 (c) Corte vertical de Buenos Aires (SAEZ) ao Rio de Janeiro (SBGL) apresenta forte corrente de jato de SAEZ até SBGL. Fonte: REDEMET. 72

Figura 5.25 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva branca com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$ e composto C2: Ri (valores

no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 12Z do dia 27 de março de 2019.....	74
Figura 5.26 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$. C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 12Z do dia 27 de março de 2019.....	75
Figura 5.27 - a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 250 hPa às 12Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 12Z do dia 27 de março de 2019.	76
Figura 5.28 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 200/250 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 11Z do dia 27 de março de 2019.	77
Figura 5.29 - Variação n -intervalos do fator, definido no passo vi do método, dos índices (a) Brown, (b) Ellrod e (c) Ellrod Knap obtidos dos dados WRF de todas as grades (18, 6 e 2 km) versus percentual de acerto das observações de VRTG nos dias 27/03/19 e 18/05/2018.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sumário dos índices de CAT.	32
Tabela 3.1- Sumário dos dados.....	33
Tabela 3.2 - Valores de VRTG (em g) e as classes de turbulência 1 (leve), 2 (moderada) e 3(severa) para aeronave do tipo A320 LATAM. Fonte: adaptado do manual A320 LATAM.	34
Tabela 3.3 – Parametrizações	35
Tabela 5.1 - Casos selecionados.	42
Tabela 5.2 - Detalhes do registro da VRTG do voo do Caso I. Fonte: LATAM.	43
Tabela 5.3 - Dia 29/09/18 a severidade classe 3 das 04Z (fonte TAM).	50
Tabela 5.4 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso I.	57
Tabela 5.5 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso I.	64
Tabela 5.6 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso V.	71
Tabela 5.7 - Percentual de acerto dos índices Ri, Brown, E-1, E-2 e E-3 (GFS0,25 e WRF) versus os registros de VRTG dos cinco casos estudados.	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIREP	- Pilot Report Air
AFTM	- Medidas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo
AMDAR	- Aircraft Meteorological Data Relay
AWC	- Center World Area
CAT	- Clear Air Turbulance
CB	- Cumulonimbus
CELMET	- Célula de Meteorologia do CIMAER
CGNA	- Centro de Gerenciamento de Navegação Aérea
CIMAER	- Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica
CIT	- Turbulência induzida por convecção
CMA	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CMI	- Centro Meteorológico Integrado
CMV	- Centro Meteorológico de Vigilância
CVG	- Convergência
DECEA	- Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DEF	- Deformação
DSH	- Deformação de Cisalhamento
DST	- Deformação de Estiramento
DVT	- Termo de Tendência de Divergência
EKI	- Ellrod Knox <i>Instability</i>
FAB	- Força Aérea Brasileira
FIR	- <i>Fly Information Region</i>
GANP	- <i>Global Air Navagation Plan</i>
GFS	- <i>Global Forecasting System</i>
ICAO	- <i>International Civil Aviation Organization</i>
MWT	- <i>Mountain Wave Turbulance</i>
NCT	- <i>Near Cloud Turbulance</i>
QGIS	- Plotagem em Programa em Georreferenciamento
Ri	- Número de Richardson
RINDAT	- Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas

SEP - Subdivisão de Estudos e Projetos
SIGWX - Cartas de prognóstico de tempo significativo
SISCEAB - Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
TCU - Grande cumulus
TI2 - Índice de instabilidade 2
VRTG - Variação Vertical da Força G
VWS - Cisalhamento do Vento
WRF - *World Research and Forecasting Model*

1 INTRODUÇÃO

A turbulência durante o voo pode causar desconforto para a tripulação e passageiros, ou causar danos físicos, chegando a acidentes graves dependendo de sua intensidade. Apesar do conhecimento das causas e características da turbulência ter crescido substancialmente nas últimas décadas (com exemplo, Endlich, 1964; Dutton *and* Panofsky, 1970; Brown, 1973; Lee *et al.* 1984; Ellrod and Knapp, 1992; Marroquin, 1998; Ellrod *et al.* 2002; Kaplan *et al.* 2005a,b, 2006), este fenômeno continua a ser um risco para a aviação (MC LEAN, 1986). A meteorologia aeronáutica é a ciência que procura entender, prever e minimizar os riscos a que as aeronaves estão sujeitas e melhorar a segurança do voo. Para viabilizar os voos, assim como melhorar sua qualidade, e a ordenação dos fluxos de tráfego aéreo na atmosfera onde fenômenos e distúrbios inesperados podem acontecer repentinamente com relação à meteorologia, existe o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), responsável pelo controle do espaço aéreo e provedor dos serviços de navegação aérea, entre estes, os relacionados à meteorologia aeronáutica.

Hoje a meteorologia aeronáutica no Brasil, fazendo parte do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), criou-se em 12 de abril de 2019, o Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER). O CIMAER tem a missão de prestar o serviço meteorológico aeronáutico de vigilância e previsão, com vistas a contribuir com a segurança e a eficiência do tráfego aéreo.

Atualmente são confeccionados e divulgados 743 produtos meteorológicos por dia sobre uma vasta região (América do Sul até uma parte da África) para atender à aviação geral. O serviço do previsor do Centro Meteorológico integrado (CMI) consiste em auxiliar o Centro Mundial de Previsão de Área na confecção da carta de prognóstico de tempo significativo (SIGWX) em altas altitudes, confeccionar a SIGWX para níveis baixos e disponibilizar as cartas de vento e cartas auxiliares na região anteriormente citada.

Para acompanhar as novas tecnologias destinadas meteorologia aeronáutica, junto ao CMI, existe um setor de a Subdivisão de Estudos e Projetos (SEP) que, entre outras atribuições, ficará responsável para planejar, executar e controlar as atividades que envolvem pesquisas e trabalhará junto à Cátedra de meteorologia aeronáutica, criada pelo

DECEA, que unirá esforços da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Força Aérea Brasileira (FAB) em prol da meteorologia aeronáutica. Desse feito, a operação e a pesquisa estão lado-a-lado, operacionalizando e ajustando métodos objetivos e diagnósticos de previsão do tempo, modelagem numérica e a inteligência computacional de fenômenos que poderão impactar as aerovias e aeroportos como: nevoeiro, linhas de instabilidade, frentes, cavados, células convectivas. Acompanhando assim, a tendência dos principais centros de previsão espalhados pelo mundo, conforme R. D. Sharman e J. M. Pearson (2016).

Dentre dos produtos meteorológicos de responsabilidade do CMI está a previsão de turbulência de ar claro (*Clear Air Turbulence* - CAT) em altos níveis atmosféricos. Esse tipo de distúrbio atmosférico se classifica como um dos maiores desafios não só em termos de vigilância, mas também na previsão no meio meteorológico e aeronáutico até os dias de hoje, responsáveis por inúmeros incidentes (KIN e CHUN, 2010).

Os voos internacionais e nacionais aumentam a cada dia desde na década de 1990 e a clara tendência de continuidade, conforme o Plano de Navegação Aérea Global (GANP da Organização da Aviação da Civil Internacional - ICAO) (Fig. 1.1) e, assim, espera-se que um aumento na demanda do serviço de previsão de tempo com objetivo de minimizar impactos ocasionados pela CAT, quando estiver atuando em determinadas aerovias, prejudicará o fluxo de tráfego aéreo coordenado pelo CGNA.

- **GANP (*Global Air Navigation Plan*), OACI (2016)**

Previsão de Crescimento do Tráfego Aéreo Global



Fonte: OACI (2016)

Figura 1.1 - Projeção da demanda da aviação. Fonte: OACI (2016).

Uma das ferramentas operacionais mais utilizadas atualmente nos serviços de previsão meteorológica são os modelos numéricos de previsão do tempo (RAFTARY, 2005), de

uma forma geral, consiste em modelos atmosféricos, que baseados em equações diferenciais parciais, inicializadas a partir de condições iniciais obtidas de diversas fontes de dados observados e estimados, geram prognósticos para grandezas meteorológicas primitivas e paramétricas. Atualmente, o CMI utiliza operacionalmente o modelo de pesquisa e previsão do tempo (WRF) que gera diversos campos de parâmetros meteorológicos e campos de turbulência que ainda não foram validados para regiões do Brasil. No entanto, apesar dos avanços no desenvolvimento de modelos atmosféricos, estes ainda necessitam ser aprimorados para vencer o desafio da previsão de turbulência, pois a turbulência prevista/simulada por modelos numéricos é calculada a partir de parametrizações. As parametrizações são artifícios matemáticos que ainda estão aquém de representar a “verdade” para todo tipo de caso, e estão em constante desenvolvimento para aprimoramento. As parametrizações dependem fortemente da resolução e, principalmente, da qualidade dos dados de entrada para o modelo, para darem resultados minimamente satisfatórios. As parametrizações podem dar resultados muito mais precisos, porém as chances de erros são muito maiores, devido a essa nossa falta de qualidade de dados de entrada em tempo real.

Já os índices de previsão de turbulência, são calculados a partir de cálculos simples, com variáveis “básicas” previstas pelo modelo (temperatura, pressão, vento, etc....). Essas variáveis são bem mais fáceis de o modelo acertar a previsão, dessa forma a chance de os índices serem calculados corretamente é bem grande.

Evidentemente que as parametrizações vão dar valores precisos de turbulência, que os índices não dão. Entretanto para a previsão, para uma Tomada de decisão, a informação que os índices fornecem é suficiente, pois ele indica se a severidade da turbulência está atingindo um valor crítico, ou não. Isso mostra uma grande vantagem de se trabalhar com os índices, no caso da previsão e tomada de decisão

Em particular, a Região de Voo de Curitiba (FIR Curitiba), onde estão localizados os principais aeroportos do País ocorreram 488.743 voos em 2018, representando uma média de 40.000 voos mensais, segundo DECEA (2018), com registros frequentes de CAT pelas aeronaves. A Fig. 1.2 ilustra o número mensal de voo da FIR Curitiba ao longo de 2018.

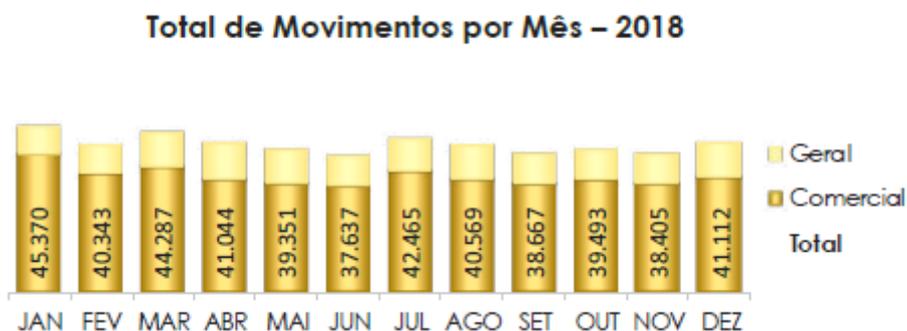


Figura 1.2 - A aviação geral na FIR Curitiba. Fonte: DECEA.

Segundo Gultepe *et al.* (2019) a CAT foi responsável por mais de 70 % dos acidentes aéreos globais no período de 2000 a 2011. Ellrod e Knapp (1992) constataram que as regiões influenciadas por correntes de jato são propícias a existência de CAT. A FIR Curitiba é uma dessas regiões, pois tem o comportamento atmosférico influenciado pelo jato subtropical e polar, conforme estudos desenvolvidos por Lyra, Chan e Dereckynski (2004). A Fig. 1.3 mostra a área correspondente a FIR Curitiba e os registros de CAT (pontos vermelhos e amarelos) pelas aeronaves da empresa aérea LATAM no período de 01/01/2018 a 31/12/2019.

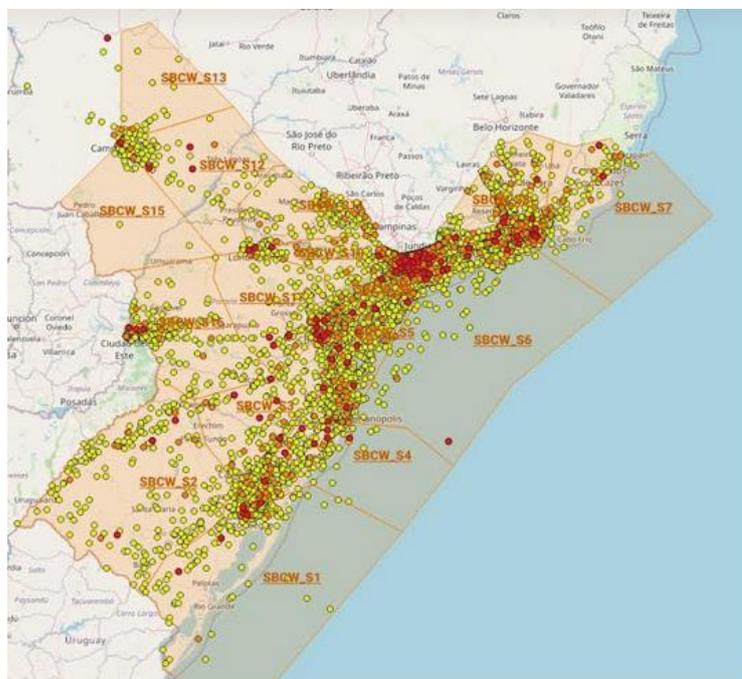


Figura 1.3 - Região da FIR Curitiba e os registros de turbulências coletados pelas aeronaves A320 da empresa aérea LATAM no período de 2018 a 2019. Fonte: Autor.

Existem indicadores de turbulência na literatura e este trabalho é motivado pela procura do índice que represente melhor a CAT na FIR Curitiba. Nos últimos anos, muitos esforços foram voltados para melhorar o entendimento da interação entre as circulações e a geração de turbulência, principalmente utilizando índices que tentam reproduzir estes fenômenos.

Portanto, o objetivo geral deste presente trabalho é estudar aplicabilidade dos índices de CAT calculados a partir de variáveis meteorológicas extraídas de modelos de previsão numérica do tempo versus observações *in situ* de turbulência, registrados pelas aeronaves para previsão dos eventos de CAT região de voo controlado por Curitiba e para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos são:

1) **Analisar** os dados históricos de registros de CAT com base nas mensagens recebidas das aeronaves (AIREP e VRTG);

2) **Implementar** e avaliar os 5 índices e velocidade vertical (W), turbulência energética cinética (TKE) e temperatura potencial (Θ); simulados pelos modelos GFS e WRF na região.

A dissertação está organizada da seguinte forma. No capítulo 2, está apresentada a fundamentação teórica; no capítulo 3, o material para o desenvolvimento da dissertação; no capítulo 4, o referencial teórico; no capítulo 5, o método aplicado; no capítulo 6, os resultados; e, finalmente, a conclusão é mostrada no capítulo 7.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Figura 2.1 ilustra o mecanismo da força da gravidade e o gradiente de pressão são denominadas ondas de gravidade. Estas se originam principalmente na baixa atmosfera a partir da restauração do desequilíbrio entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e se propagam até a alta atmosfera. Sua escala espacial varia de alguns quilômetros até milhares de quilômetros e sua velocidade de propagação é normalmente menor do que a velocidade das ondas sonoras. Devido à conservação da energia, essas ondas propagam-se ascendentemente na atmosfera e crescem exponencialmente em amplitude, devido ao decréscimo exponencial da densidade com a altura, caso não haja dissipação da onda. Quando a amplitude se torna muito grande, ou seja, a onda de gravidade alcança um nível crítico, ocorre quebra da onda e sua energia é transferida para a atmosfera, interferindo no campo de vento, causando-lhes aceleração e turbulência, e provocando mudanças também nos campos de pressão e temperatura (Ellrod e Knap, 1992).

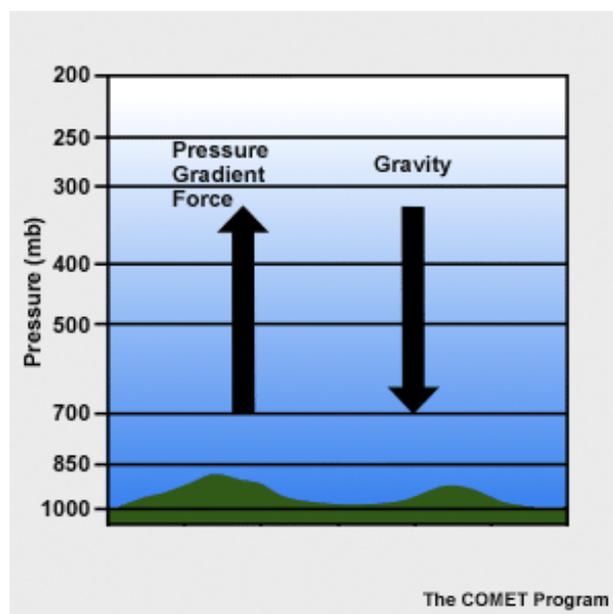


Figura 2.1- Forças governantes da onda da gravidade. Fonte: Programa COMET.

Turbulência é uma propriedade da maioria dos fluidos (líquidos e gases) encontrados na natureza. Talvez o melhor exemplo de fluxo turbulento é encontrado na atmosfera onde aqueles que voam podem experimentar a turbulência no seu pior estado.

Felizmente, os voos em uma atmosfera sem turbulência acontecem mais frequentemente. De fato, a chance de uma aeronave voando em qualquer lugar na troposfera ou baixa estratosfera encontrar turbulência significativa é 1 entre 20 (Lester, 1993).

Segundo Lester (1994) a definição clássica de turbulência é feita em termos do estado do fluido onde a velocidade é caótica e aparentemente randômica. Na aviação, o conceito de turbulência está relacionado à resposta da aeronave (solavanco na aeronave) à presença de correntes verticais de vento ou presença de vórtices na atmosfera. A distinção entre estas duas definições é muito importante, pois a turbulência para aviação é definida de acordo com a reação na aeronave e pode ser gerada por uma variedade maior de distúrbios que a turbulência clássica.

Clark (1997) afirma que mecanismos de formação da turbulência provêm de interações com ondas de gravidade associadas com a topografia de uma determinada região e processos físicos e dinâmicos característicos do lugar.

Segundo Lilly (1978) processos atmosféricos característicos de escoamentos turbulentos e não lineares associados com a propagação de ondas de grande amplitude são um exemplo de fatores físicos moduladores da turbulência.

A CAT é um fenômeno meteorológico de pequena escala que foi estudada intensamente de 1950 a 1960. O principal mecanismo ser responsável pela CAT é a instabilidade de Kelvin-Helmholtz (KHI). Segundo Bittar (2015), a CAT é a turbulência que ocorre na atmosfera livre e em altos níveis (alta troposfera ou baixa estratosfera, fora da camada limite atmosférica e acima de 15.000 pés) na ausência de atividade convectiva. Este fenômeno assemelha-se a quebra de uma onda oceânica. A KHI ocorre quando o cisalhamento vertical do vento dentro de uma camada estável excede um valor crítico (KELLER, 1990).

O número adimensional Richardson (Ri) vem sendo frequentemente usado como uma medida para possíveis condições de turbulência quando o Ri está relacionado com uma camada estável da atmosfera e o cisalhamento vertical do vento. Quando Ri é próximo a 0,25, frequentemente KHI ocorre (MILES e HOWARD 1964).

Segmentos curvos da corrente de jato associados com os cavados, cristas, regiões entre eles (transição) e baixas fechadas em altitude podem conter áreas de turbulência que segmentos retos da corrente de jato (ENDLICH, 1964).

A CAT significativas foi encontrada ser mais predominante em regiões de:

- Cisalhamento vertical de vento (velocidade e direção);
- Cisalhamento horizontal;
- Convergência;
- Deformação Horizontal; e
- Forte gradiente horizontal de temperatura

Todos os quais tende ocorrer perto da rampa de uma zona frontal. Embora a CAT geralmente ocorra perto da corrente de jato e a velocidade do vento por segundo não foi ser um importante fator (MANCUSO e ENDLICH, 1966; DUTTON, 1970).

2.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAT

Para a ocorrência de CAT são necessários a presença de cisalhamento do vento horizontal (os módulos do vetor velocidade do vento de duas camadas de ar adjacentes deve ser diferentes) e em uma atmosfera estável (densidade do ar na camada abaixo é maior que a densidade do ar na camada acima). Nestas condições, o escoamento se instabiliza, o que é chamado instabilidade dinâmica das ondas de Kelvin-Helmoltz (KHI) devido à quebra da onda gravidade, instabilizando e gerando uma forte energia deslocada na atmosfera), conforme Ellrod e Knapp (1992).

Hopkins (1977) afirma que mecanismos mencionados são mais intensos durante período do inverno onde os gradientes de temperatura e as variações na velocidade do vento são maiores.

Na Figura 2.2 pode-se visualizar todos os mecanismos de formação de CAT. Da esquerda para direita, a primeira coluna ilustra o escoamento sendo forçado a subir devido o relevo (montanha) e na sua descida após a passagem sobre a montanha o vento gera um movimento ondulatório denominado de onda orográfica ou uma turbulência de ondas de montanha (ou *mountain wave turbulence* – MWT) que é, em outras palavras, a interação das ondas de gravidade juntamente com o terreno.

Na segunda coluna ilustra a CAT clássica, mecanismo principal a ser estudado desse trabalho, que é o forte cisalhamento vertical do vento próxima a corrente de jato. Os movimentos gerados do forte cisalhamento em altitude formarão a KHI associadas pelas ondas da gravidade.

A terceira coluna ilustra uma nebulosidade convectiva (do tipo cumulonimbus – CB ou grandes cumulus – TCU). O processo convectivo intenso é capaz de gerar ondas de gravidade e assim induzir CAT até 3 km de distância das células ou complexos convectivos (MEDEIROS, 2001).

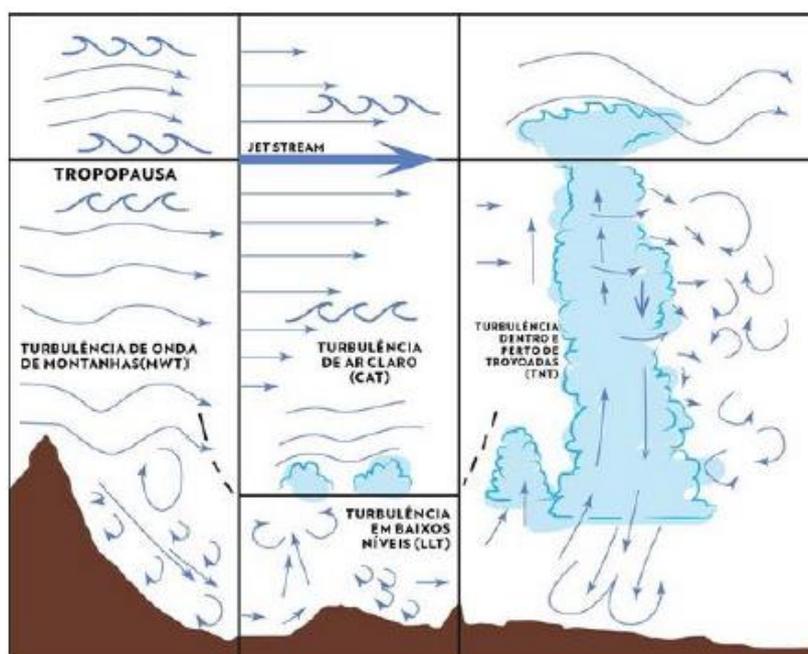


Figura 2.2 - Mecanismos da turbulência: turbulência gerada por onda de montanha – MWT (a esquerda), turbulência de ar claro – CAT (centro) e turbulência perto da nuvem e/ou indutiva por convecção - NCT/CIT (a direita). Fonte: Adaptada de Bitar, 2015.

Durante as últimas 4 décadas do século 20, vários índices foram desenvolvidos para ajudar a diagnosticar e prever a probabilidade de CAT em altos níveis perto da corrente de jato como por exemplo, Endlich, (1964); Dutton e Panosfky, (1970); Brown, (1973); Lee *et al.*, (1984); Ellrod e Knap, (1992); Marroquin, (1998); Ellrod *et al.*, (2002); Kaplan *et al.*, (2005^a, b, 2006). Segundo Kaplan (2000), a turbulência é um dos fatores meteorológicos adversos mais comuns no campo aeronáutico, responsável pela maioria dos acidentes ou incidentes aeronáuticos sem fatalidades.

Lane (2009) afirma que reportes meteorológicos de turbulência provenientes de aeronaves são de suma importância para o campo aéreo, pois possuem o papel de alertar e prevenir pilotos e controladores a procurarem alternativas de maior segurança tendo em vista as operações aéreas.

Sharman (2008) evidenciaram que turbulências de intensidade moderada a severa do tipo intra-nuvem ocorrem em uma escala vertical entre 4 a 6 km de altitude enquanto turbulências associadas a condições de céu claro ocorrem em uma escala entre 9 a 11 km de altitude.

Sharman (2008), incidentes aeronáuticos decorrentes de turbulências convectivas sobre o Texas e a Florida nos Estados Unidos, apresentam um período de maior ocorrência na primavera e no verão, onde os gradientes de aquecimento e umidade são mais intensos do que em outras épocas do ano. Vinnichenko (1980) afirma que as turbulências convectivas não somente ocorrem próximas ou abaixo de sistemas convectivos, mas também no topo desses sistemas onde fortes correntes verticais estão presentes.

Para que haja céu claro na atmosfera diversos fenômenos meteorológicos como regiões de subsidência do ar, presença de massas de ar estáveis, pré-entrada de sistemas frontais, nuvens cirrus locais e regiões nas quais correntes de jato estão presentes. E tais condições podem ser o anúncio para uma possível presença de uma turbulência de céu claro conforme, Endlish, R. M. (1964).

Segundo Villela (1998), regiões de forte turbulência podem ser encontradas nas proximidades do núcleo da corrente de jato (onde os ventos podem chegar até 205 km/h). Variações do vento na corrente de jato podem apresentar uma variação na vertical de 35 km/h em 1000 metros e na horizontal de 125 km/h em 100 km. Isto é vital para pilotos e aviadores analisarem que rotas possuem condição de serem mais ou menos seguras e econômicas e conseqüentemente quais possam estar sujeitas a presença da CAT, conforme, Mirapalmete (2004).

Em termos de magnitude, a CAT é medida e classificada a partir do grau de severidade em leve, moderada ou severa dependendo dos danos e das alterações na dinâmica de uma determinada aeronave, conforme Molarin (2013).

Através de observações realizadas, inúmeros casos de CAT estão associados com correntes de jato e ondas de gravidade em regiões montanhosas. A CAT pode ser formada através de diversos fatores, dentre eles o aumento no cisalhamento do vento vertical e horizontal e intensos “wind-shears” em grandes altitudes na qual o vento aumenta significativamente de velocidade com a distância, (BITAR 2015).

As características e possíveis mecanismos de eventos de CAT nas diferentes regiões são investigadas, usando o modelo WRF. A simulação consiste de seis domínios centrado na Península da Coreia com uma grade horizontal mais refinada de 0.37 km é usada para reproduzir um único grupo de eventos moderado/severo de CAT e entender o mecanismo responsável por eles em três diferentes áreas no sul da Coreia, (J.H KIM e H. CHUN 2010).

As previsões de CAT do centro mundial de previsão de área (WAFC) são produzidas de previsões determinísticas, usando os algoritmos Ellrod T11, Ellrod e Knapp (1992). As previsões determinísticas estão indisponíveis para convergir num grau de confiança na previsão. A maioria da turbulência induzida por cisalhamento está associada com a corrente de jato. A posição da corrente de jato e associada com o cisalhamento de vento é sujeito de certas incertezas (particularmente certas situações sinóticas). Pelo o uso de um conjunto de sistemas de previsão a posição do cisalhamento de vento pode ser previsto no modo probabilístico, mais precisamente, descrevendo, a provável posição, (GILL e BUCHANAN 2014).

Atualmente os dois centros mundiais de previsão usam modelos determinísticos para gerar previsões de turbulência. Foi mostrado que o uso de conjunto de vários modelos pode levar melhores técnicas de previsão de turbulência. E, também, foi mostrado que a combinação de diagnósticos de turbulência pode também produzir mais técnicas de previsão, usando modelos determinísticos. Este estudo coloca duas aproximações para expandir o alcance dos diagnósticos para incluir ambas previsões turbulência convectiva e onda de montanha e, além disso, a CAT, usando os dois conjuntos de modelos, (LUKE N.; STORER P. G.; GILL e P. D. WILLIAM 2018).

As ondas atmosféricas de pequena escala, normalmente é definida como ondas internas ou de gravidade e são conhecidas como um eficiente mecanismo de transporte de energia e momentum através da atmosfera, conforme estudos realizados por Holton

(1982), e outros. Elas se propagam para cima das fontes (fluxo de vento sobre uma topografia, convecção, corrente de jato) para a média ou alta atmosfera, (FRITTS e ALEXANDER 2003).

2.2 DESCRIÇÃO DOS ÍNDICES DE TURBULÊNCIA

Vários índices de turbulência foram elaborados e atualizados de tempo em tempo desde os anos 60. Neste trabalho quatro índices clássicos de CAT, vide literatura, são detalhados nas seções seguintes, e ajustados e testado conforme método aqui sugerido seção 4.

2.2.1 Número de Richardson (Ri)

É condição indispensável que a turbulência resulta de cisalhamento do vento em uma camada atmosférica estável, principalmente associado com a corrente de jato, iniciando a KHI. Este efeito pode ser representado pelo número de Richardson (Equação 1), conforme Ellrod Knapp (1992),

$$Ri = \frac{\left(\frac{g}{\theta_m}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)}{\left(\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z}\right)^2}. \quad (1)$$

Onde $\left(\frac{g}{\theta_m}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)$ é a estabilidade estática com g representando a aceleração da gravidade (9,8 m. s⁻²), θ é a temperatura potencial e θ_m representa a temperatura potencial no nível médio da camada, e $\left(\frac{\partial U}{\Delta z}\right)^2 = \left(\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z}\right)^2$ é o cisalhamento vertical, se $Ri < 0,25$ existe uma maior probabilidade de ocorrer turbulência, Miles e Howard (1964). O número de Richardson (Ri) é um número adimensional. É útil para diagnosticar a turbulência em um fluxo estaticamente estável.

A instabilidade é favorecida pelo elevado cisalhamento vertical e fraca estabilidade.

- Instabilidade convectiva ocorre com $Ri < 0$;
- Fluxo turbulento se torna não-turbulento com $Ri > 1$;

- Fluxo não-turbulento se torna turbulento com $Ri < 0,25$;

Quando Ri cai abaixo de 0,25 a primeira aparência da turbulência é no formato da KHI.

Jun e Chun (2010) analisou eventos de CAT reportados pelas aeronaves, sobre o território da Korea do Sul, através do comportamento do Ri , a velocidade vertical (W) e a temperatura potencial (\emptyset) calculados via dados gerados pelo modelo de previsão numérica de tempo (*Weather Research and Forecasting*) - WRF com resolução de grade 1 km e 87 níveis verticais. Os resultados demonstraram a capacidade do Ri , W e \emptyset em reproduzir as condições para ocorrência de CAT e, assim, neste trabalho as condições de iniciais são seguidas e aplicados aos estudos de casos apresentados na seção 5.

2.3.2 Indicador Brown (Φ_m)

Para deduzir a equação de tendência de Ri , Roach (1970) considerou, a partir de dados sinóticos, que a CAT deveria ser representada pela descontinuidade do vento e temperatura no plano vertical pela deformação por cisalhamento e estiramento. Considerando o escoamento sendo hidrostático, adiabático, invíscido ele obteve uma expressão para a taxa de mudança logarítmica de Ri , que pode ser descrita pela equação:

$$\Phi = -\frac{D}{D_t} \ln Ri = (2Ri - 1) \left| \frac{\partial V}{\partial p} \right| |\nabla_{\theta} p| \cos \beta + \left[\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right] \cos 2\alpha - \left[\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right] \sin 2\alpha, \quad (2)$$

em que V é o vetor horizontal do vento, $\nabla_{\theta} p$ é o gradiente horizontal de pressão numa superfície isentrópica, u e v são, respectivamente as componentes zonal e meridional do vento, α é o ângulo entre $\frac{\partial V}{\partial p}$ e o norte no sentido horário e β é o ângulo entre $\frac{\partial V}{\partial p}$ e $\nabla_{\theta} p$ (que é 90° num escoamento geostrófico).

Superfície Isentrópica contém a mesma temperatura potencial e o escoamento geostrófico é perpendicular entre o equilíbrio entre as forças de coriolis e gradiente de pressão paralela às isóbaras, (ENDLICH 1964).

Roach (1970) encontrou uma correlação pequena de campos de Φ calculados de dados sinóticos com observações de turbulência severa feitas por aeronaves, às vezes Φ tornava-se negativo na vizinhança da turbulência. Todavia, as magnitudes dos

multiplicadores $\left[\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right]$ e $\left[\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}\right]$ tendem a ser grandes em áreas de CAT. Não obstante, o valor de Φ era suscetível à orientação do vetor cisalhamento vertical do vento que pode mudar rapidamente com a altura, especialmente perto da tropopausa.

Brown (1973) modificou essa aproximação, removendo os efeitos da flutuação na orientação do vetor cisalhamento vertical do vento. O indicador de turbulência Brown Φ_m (Eq. 3) é uma simplificação da equação de tendência de Ri (Eq. 2) originalmente derivada por Roach (1970).

$$\Phi_m = \sqrt{0,3 \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}. \quad (3)$$

Onde $0,3 \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)^2$ é a vorticidade absoluta; $\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2$ é a deformação por cisalhamento e $\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$ deformação por alongamento. A eq. 3 é uma simplificação da eq. de tendência de RI derivada de Roach. Ao contrário de RI, quanto maior o valor do indicador Brown, maior será a CAT.

2.3.3 Indicador Ellrod-Knapp - TI2

Segundo Lyra *et al.* (2004), o indicador de turbulência Ellrod (TI2) tem sido frequentemente usado pelo *Aviation Weather Center* (AWC) para detectar turbulência. Esse indicador é calculado com base no produto do cisalhamento vertical do vento (VWS) pela soma da deformação horizontal (DEF) e convergência horizontal (CVG), conforme Equações abaixo:

$$TI1 = VWS \times DEF \quad (4)$$

$$TI2 = VWS \times (DEF + CVG) \quad (5)$$

$$VWS = \frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}}}{\Delta z} \quad (6)$$

$$CVG = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (7)$$

Usou as deformações de cisalhamento (DSH) e alongamento (DST) foi a primeira ser testada para o índice, mas os campos gerados por essa deformação foram grandes com

ambos os valores positivos máximos e negativos máximos de difícil interpretação, conforme a segunda parcela da equação 7. O resultado de deformação (DEF), combinando a DST com DSH eliminou esses sinais negativos e reduzindo as grandes áreas.

$$DEF = \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (8)$$

DSH DST

Cisalhamento alongamento

em que u e v são, respectivamente as componentes zonal e meridional do vento ($m \cdot s^{-1}$) e z a altura (m).

O uso de DEF eliminou os sinais negativos e reduziu as áreas de contorno. Muitas áreas de CAT significativa, contudo parecem ocorrer em áreas onde ambos DEF e VWS (cisalhamento) estavam relativamente grandes. Esses dois parâmetros foram combinados para somente um da formação do produto de (DEF X VWS), resultando no índice de turbulência (TI). Os valores de TI estão em unidades $10^{-7} sec^{-2}$ e normalmente varia entre 0 a 15 unidades dependendo do modelo numérico usado.

A descrição da base física para o uso de DEF X VWS como indicador objetivo de CAT foi primeira vez proposto por Mancuso e Endlich (1966). A origem de TI pode ser copiada da equação de Peterssen, relacionando a intensidade frontogenética como:

$$I_f = |\nabla\theta|(0,5)[DEF(\cos 2\beta) + CVG] \quad (9)$$

Onde

I_f é a intensidade frontogenética

$|\nabla\theta|$ é a magnitude do gradiente da temperatura potencial;

CVG é a convergência e é igual a $-\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ e

β é o ângulo de dilatação das isotermas.

A I_f depende da DEF e CVG, sendo que β não pode ser menor que 45° a fim de produzir uma contribuição positiva de I_f .

Se $A_t = I_f$ (taxa de mudança de tempo do gradiente de temperatura à uma superfície de pressão constante.

$|\nabla\theta| = \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)$, onde temperatura (T) está em Kelvin e n é a distância horizontal normal à isotermas, resultando da equação de Petterssen

$$A_T = \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) (0,5)[DEF(\cos 2\beta) + CVG]. \quad (10)$$

Da relação do vento termal e gradiente horizontal de temperatura está relacionado o cisalhamento vertical do vento (VWS), onde

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \left(\frac{fT}{g}\right) \left(\frac{\Delta V}{\partial z}\right), \quad (11)$$

onde f = a força de coriolis, g = aceleração da gravidade e $\frac{\Delta V}{\partial z} = VWS$. Permitindo que que Equação (5) seja reescrita com segue:

$$A_T = (0,5) \left(\frac{fT}{g}\right) (VWS)[DEF(\cos 2\beta) + CVG]. \quad (12)$$

Potencializando A_T , logo $\cos 2\beta = 1$ então:

$$A_T = 0,5 \left(\frac{fT}{g}\right) (VWS)[DEF + CVG]. \quad (13)$$

A frontogenesis resultará então em um aumento no cisalhamento vertical do vento e um aumento da probabilidade da ocorrência da CAT. Conforme, Mancuso e Endlich (1966) correlacionou a turbulência de moderada ou severa com os parâmetros numéricos meteorológicos e acharam ser significativa a geração de CAT.

Conforme, Dutton (1970) houve uma pobre correlação entre DEF e CAT, mas não considerou o produto de DEF e VSW. Então a versão de TI é

$$TI1 = VWS \times DEF. \quad (14)$$

O TI usado pelo AFGWC reteve o termo CVG o que é muito menor que a DEF, mas em alguns casos podem contribuir para o potencial de CAT, Ellrod (1985) então:

$$TI2 = VWS \times (DEF + CVG) \quad (15)$$

Todos os termos englobados na Equação 14 são cinemáticos, então descreve condições de correntes atmosféricas sem observar as forças de pressão.

2.3.4 Indicador Ellrod-Knox - EKI

Ellrod Knox (2019) esforçaram para melhorar o diagnóstico da CAT e o TI de Ellrod e Knapp (1992). Outras versões de TI foram usadas em outros centros de previsão. O TI é popular porque tem boa performance, Brown et. al. (2000) entre os previsores, velocidade computacional e fácil implementação. A mudança proposta para TI é somar um termo aproximado com a tendência de divergência para explicar em situações de rápida mudança da divergência associada com o jato anticiclone (cisalhamento e curvatura) e nas regiões ciclônicas sem o balanço gradiente. A performance neste novo índice de turbulência de divergência modificada ou DTI foi então comparada ao TI.

Melhorar a performance do TI, Ellroad Knapp (1992), a combinação de deformação e as mudanças de divergência pareciam capturar dois mecanismos para CAT nos jatos ciclônicos: a frontogênese como também a onda de gravidade do desequilíbrio espontâneo. Estudos observados, usando medições das aeronaves na vizinhança das frentes das médias latitudes notou-se a presença de ondas de gravidade de pequena escala (1-20 km) que reduz os valores de RI, favorecendo a turbulência. Uma vez que a divergência muda as características do jato anticiclone também, combinando a tendência de divergência e deformação funcionaria como um diagnóstico de CAT em situações no anticiclone. Disso, então, é a base física para o uso de combinação das tendências de deformação e divergência como uma melhoria para prever a CAT em todos os tipos de jatos.

Equação (9) TI proposto por Ellrod e Knapp (1992) é definida como:

$$TI = DEF \times VWS \quad (16)$$

$$TI = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \left(\frac{\partial V}{\partial Z} \right) \quad (17)$$

DEF

VWS

Para melhorar TI e simplificar o termo tendência divergência

DVT (termo de tendência de divergência) = C (constante 0.1 km)

$$DVT = C \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{h2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{h1} \right] \quad (18)$$

$$EKI = DTI = TI + DVT \quad (19)$$

DVT e TI produzidos para 300-250 hpa (30 mil a 34 mil pés)

Todos os índices apresentados têm uma particularidade, conforme a situação sinótica e a região, todavia, atualmente, o melhor índice utilizado no centro operacional é o EKI após testes com TI e EKI 250 E 300 hPa, usando dados do 1°x1° GFS output, 24h, em Denver com 23 km de resolução horizontal e dados de vento em dois períodos, conforme Williams (2018).

Lyra et al. (2004) calcularam os indicadores de turbulência de Richardson (Ri), Brown e Ellrod a partir das saídas do modelo regional ETA e observaram que os indicadores de turbulência Brown e Ellrod representaram melhor a turbulência quando comparados ao Ri.

Foram incluídas nas previsões de turbulência no WAFC três diagnósticos de turbulência de cisalhamento que são: Ellrod TI1, o índice Brown e o número de Richardson (Ri). O diagnóstico da MWT é também incluído que é a MWT12 de Sharman e Pearson (2017).

Atualmente, existem dois Centros mundiais de Previsão de áreas (WAFCs) que fornecem previsões globais para aviação, incluindo o perigo de turbulência. Estas previsões são derivadas das saídas de modelos determinísticos de resolução de 1.25 com sete níveis verticais (ICAO, 2016). Todavia, estudos anteriores têm mostrado uma melhora no desempenho nas previsões probabilísticas de turbulência vindos de um conjunto de modelos probabilísticos (GILL e BUCHANAN, 2014; STORER et al., 2018a).

Storer et al. (2018a) a ideia de usar um conjunto de vários modelos para a previsão de turbulência para aviação foi apresentada, usando somente o índice Ellrod and Knapp (1992) e o índice de turbulência 1 (Ellrod TI1). O Ellrod TI1 pode somente prever a turbulência de cisalhamento e não a MWT ou CIT e, portanto, não são todos os eventos de turbulências que serão previstos.

Tabela 2.1 – Sumário dos índices de CAT.

Índice	Descrição	Referência
1. Richardson (Ri)	$Ri = \frac{\left(\frac{g}{\theta_m}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\Delta u^2 + \Delta v^2}{\Delta z}\right)^{1/2}}$ <p>onde $\left(\frac{g}{\theta_m}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)$ é a estabilidade estática com g representando a aceleração da gravidade (9,8 m. s⁻²), θ é a temperatura potencial e θ_m representa a temperatura potencial no nível médio da camada, e $\left(\frac{\partial u}{\Delta z}\right)^2 = \left(\frac{\Delta u^2 + \Delta v^2}{\Delta z}\right)^2$ é o cisalhamento vertical, se $Ri < 0,25$ existe uma maior probabilidade de ocorrer turbulência.</p>	Miles Howard (1964)
2. Brown (B)	$\Phi_m = \sqrt{0,3 \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$ <p>onde $0,3 \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)^2$ é a vorticidade absoluta; $\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2$ é a deformação por cisalhamento e $\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$ deformação por alongamento.</p>	Roach (1970)
3. Ellrod-Endlich (E-1)	$\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z} \times \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{1/2}$	Mancuso Endlich (1966)
4. Ellrod-Knap (E-2)	$\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z} \left(\left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \right)$	Ellrod (1985)
5. Ellroad-Knox (E-3)	$\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z} \left\{ \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{1/2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \right\} + C \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)_{h2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)_{h1} \right]$ <p>onde C (constante 0,1 km).</p>	Ellrod Knap (1992)

3 MATERIAL

A Tabela 3.1 é apresentado detalhes dos dados utilizado neste trabalho.

Tabela 3.1- Sumário dos dados

Fonte	Freq.	Informação	Quant.	Período
1. VRTG (Empresa LATAM)	variável	registro da aceleração vertical em voo (g).	12.969	01/12/2018 a 31/12/2019
2. AIREP (www.redem et.aer.mil.br)	variável	mensagem codificada de posição proveniente de uma aeronave em voo, contendo informações operacionais e/ou meteorológicas, incluindo localização (latitude, longitude e altitude), da ocorrência de CAT.	6.750	02/10/2015 a 04/06/2019
3. GFS 0.25 (http://www.wxmaps.org/pix/sa.vv)	3h	análise e previsão com grade (latitude; longitude) de 0.25° por 0.25°.	---	casos selecionados
4. WRF	1h	previsão com grades de 18, 6, e 2 km com 87 níveis (segundo Kim <i>et al.</i> , 2010).	3.840	casos selecionados
5. TEMP (www.redem et.aer.mil.br)	12h	mensagem codificada das estações de meteorológica de altitude. Esta representa o perfil de temperatura, umidade relativa e vento das localidades de Bueno Aires, Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro.	---	casos selecionados
6. Cartas de superfície (www.redem et.aer.mil.br)	6h	informações meteorológicas das estações meteorológicas de superfície.	---	casos selecionados
7. Imagem GOES-16	15 min	imagens dos termal dos canais visíveis (0,47 μ m) e termais (13,3 μ m).	---	casos selecionados
8. METAR	1 hora	códigos meteorológicos contendo observações tempo presente, vento, temperatura do ar e pressão atmosférica gerados pelas estações meteorológicas de superfície localizadas nos aeródromos.	---	casos selecionados

As medidas de variação vertical da aceleração gravitacional (VRTG) aqui utilizadas são normalmente registradas pelas aeronaves A320 da LATAM e a anomalia da aceleração gravitacional (g) pode ser indicador de turbulências (LATAM, 2019). Na Tabela 3.2 são apresentados os limites de VRTG usados para classificar a severidade dos eventos turbulentos, ou seja, (1) leve, (2) moderada e (3) severa. As medições VRTG são obtidas automaticamente começando 10 s após a decolagem e termina 4 s antes do pouso. Em um voo sem perturbações, o VRTG é igual à unidade g. Se a aeronave sofrer uma

subida ou queda repentina, os valores de VRTG serão respectivamente positivos ou negativos. O evento turbulento é considerado quando os valores do VRTG estão dentro dos limites estabelecidos na Tabela 3, porém apenas o maior máximo ou menor mínimo será registrado ao longo de 60 minutos. Isso garante que apenas um evento seja gerado em condições de longa turbulência (LATAM, 2019).

Tabela 3.2 - Valores de VRTG (em g) e as classes de turbulência 1 (leve), 2 (moderada) e 3 (severa) para aeronave do tipo A320 LATAM. Fonte: adaptado do manual A320 LATAM.

Classe 1	Classe 2	Classe 3
$> 0,4 \text{ G}$	$> 0,6 \text{ G}$	$> 0,8 \text{ G}$

As mensagens AIREP relata as condições operacionais do voo e podem também incluir detecção de CAT. Neste trabalho, os AIREP foram utilizados para observar a distribuição espaço temporal das ocorrências de turbulência na FIR Curitiba durante o período de 02/10/2015 a 04/06/2019. As imagens do satélite GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), perfis atmosféricos, carta de superfícies são conjuntamente analisados para diagnóstica as condições sinóticas reinantes (verificar o possível mecanismo de formação da CAT, presença de células convectivas, cisalhamento de vento e circulação atmosféricas) durante os registros da VRTG pelas aeronaves para os eventos selecionados e estudados.

Os dados atmosféricos modelados numericamente têm duas fontes, a saber: 1) análise e previsão do modelo GFS0,25 (*Global Forecast System*), e 2) dados prognosticados gerados pelo modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF). A simulação realizada utilizou-se a solução dinâmica ARW (*Advanced Research WRF*). Este módulo contempla equações compressíveis não-hidrostáticas, com solução para Coriolis e termos de curvatura da Terra, aninhamento bidirecional para múltiplas grades, com projeção Mercator e arranjo de grade tipo C de Arakawa. Foi utilizado, ainda, o suporte à computação paralela *shared memory*. Para as simulações foram criados três domínios computacionais centrados, 27°S 49°W, que abrangem a área entre 23°S-32°S e 43°W-58°W. As resoluções horizontais aplicadas nos três domínios são de 18 km (90 x 90 pontos), 6 km (151 x 151 pontos) e 2 km (253 x 253 pontos). O número de níveis na vertical é igual a 87, conforme Kim *et al.*, (2010). A pressão no topo

da atmosfera é de 50 hPa. Os esquemas de parametrização dos processos físicos são, conforme tabela 4 abaixo:

Tabela 3.3 – Parametrizações

Processo físico	Referência
para convecção profunda	Kain-Fritsch (Kain, 2003)
para convecção explícita	Kessler (Kessler, 1969)
para radiação de ondas longa e curta	<i>Rapid Radiative Transfer Model-RRTMG</i> (Iacono <i>et al.</i> , 2008)
para camada limite planetária	Mellor-Yamada Janjic (Janjic, 1994)
para processos de superfície	Noah Land Surface Model- Noah LSM (Chen e Dudhia, 2001)

4 MÉTODO

Visando analisar as respostas dos quatro índices, isto é, (1) Brown, (2) Ellrod, (3) Ellrod Knap e (4) Richardson, calculados a partir das previsões do GFS0,25° e do WRF, para caracterização do estado termodinâmica atmosféricos durante as ocorrências de CAT, registradas pelas aeronaves da LATAM, na Figura 4.1 são apresentados sequência de passos do método proposto e descritos conforme abaixo:

- i. Analisa-se da distribuição espacial os dados históricos dos registros de CAT pelas aeronaves via dados de AIREP e VRTG(G);
- ii. Seleciona-se via analisa as condições sinóticas o conjunto de casos com e sem registros de CAT a serem analisados baseado nos registros de VRTG;
- iii. Coleta-se os dados do GFS0,25° para os casos selecionados no item ii;
- iv. Simula-se com as condições atmosféricas e horárias para os casos selecionados utilizando o WRF com resoluções das grades de 18, 6, e 2 km com 87 níveis e conjuntamente utiliza-se dos dados de previsão e análise do GFS0,25;
- v. Calcula-se os campos dos índices estabelecidos para saídas do GFS0,25° e WRF para os casos selecionados, e analise-se qualitativamente os compostos de seção longitudinal dos campos de W , TKE , Θ , Ri , e , conjuntamente, os valores dos índices Brown, E-1 e E-2 para o nível (em hPa), aproximadamente, ao do VRTG, enquanto o E-3, visto sua composição com o divergente, faz uso dos níveis (em hPa) inferior e superior ao nível do VRTG registrado;
- vi. Analisa-se a distribuições dos seus valores de cada índice versus as observações do VRTG. Estabelece-se limite classificador do índice i , ($LIMITE_{clas}(i)$) de CAT testando, via tentativa e erro, para n -intervalos de valores do índice i , a saber:

$$LIMITE_{clas}(i) \geq [Média\ do\ Índice(i) - \mathbf{fator}(DEVPAD(i))], \text{ onde}$$

$$\mathbf{fator} \text{ varia no intervalo de } [0+\Delta X; \mathbf{n}] \text{ em } \Delta X = 0 \text{ até } \mathbf{n}, \text{ incremento de } 0,1;$$
- vii. Testa-se cada $LIMITE_{clas}(i)$ com amostra de independente e avalia-se estatisticamente os resultados versus as observações de VRTG e, se satisfatório, $LIMITE_{clas}(i)$ ótimo é obtido; caso contrário repete-se os passos vi e vii variando n até obter ótimo.

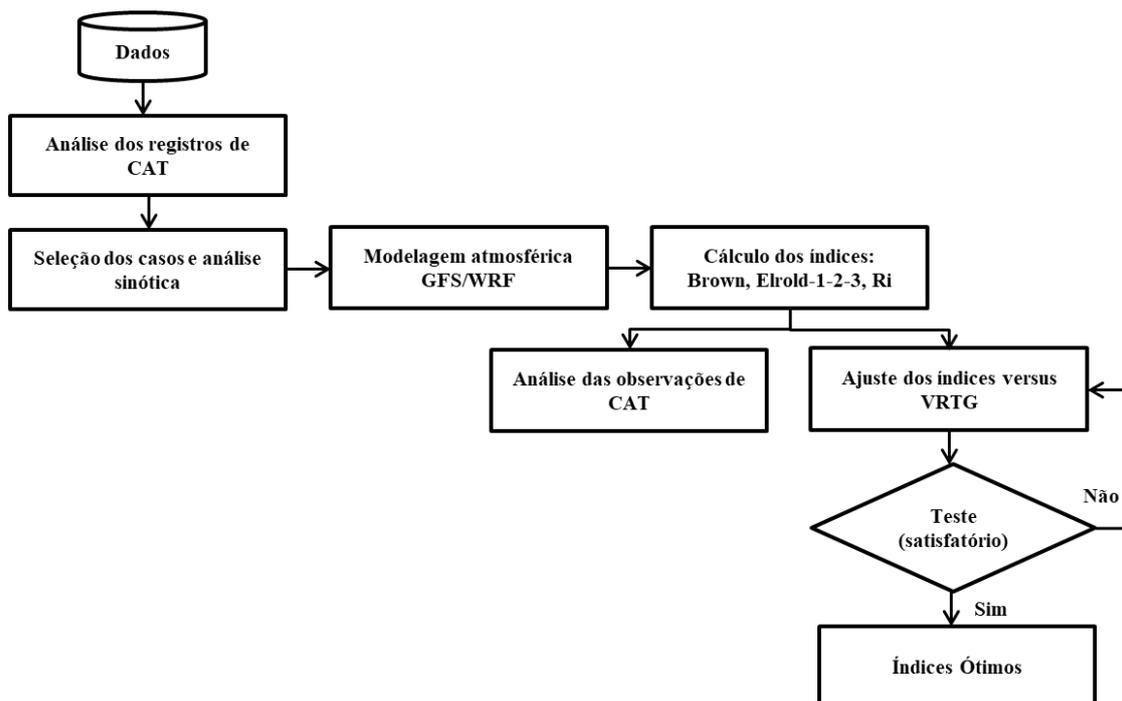


Figura 4.1 - Passos do método.

Vale ressaltar, conforme Brown e Young (2000), às limitações dos dados de VRTG que não amostram sistematicamente o espaço aéreo, assim como ocorre com o AIREP/PIREP, nem todas as estatísticas sumárias dicotômicas escalares como a taxa de falso alarme (FAR) e tendência de uma previsão (BIAS) são consideradas apropriadas de serem calculadas (Brown; Young, 2000).

Sendo assim, utilizou-se neste trabalho a PODy (probabilidade de detecção do evento e PODn (probabilidade de detecção do não-evento). Estas medidas não são consideradas probabilidades verdadeiras, mas a proporção do conjunto de dados observados corretamente categorizado pelas previsões (Kay et al., 2006).

5 RESULTADOS

Seguindo os passos do método na seção 4, conforme na Figura 4.1, e com base nos dados definidos na Tabela 3.1, é apresentado inicialmente a análise da distribuição espacial das ocorrências de CAT na área de estudo.

5.1 ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES DE CAT

Visto que há duas fontes de observações de CAT, que são as mensagens AIREP emitidas pelos pilotos em voo e os VRTG obtidos das aeronaves da LATAM, estes são discutidos separadamente abaixo.

O sistema de informação geográfica livre denominada QGIS (versão Windows 3.14.1) foi utilizado para análise espaço-temporal das mensagens AIREP. A Figura 5.1 apresenta a distribuição espacial da densidade dos registros de CAT (mapa de calor) baseado em 6.750 registros de AIREP ocorridos de 02 de outubro de 2015 a 04 junho de 2019 sobre área correspondente a FIR-Curitiba. É importante mencionar que os AIREP são restritos de ocorrências de eventos meteorológicas ou não ao longo do voo. Observa-se que há registros de CAT em toda área da FIR estudada e, talvez, pode-se inferir que razão destes registros bem distribuído espacialmente esteja associado à presença, na maior parte do ano, da corrente de jato (que provoca o cisalhamento do vento) e do giro anticiclone sobre a mencionada área da FIR. A maior densidade dos registros dos AIREP (cores mais claras na Fig. 5.1) correspondem a rota São Paulo-Porto Alegre onde existe certamente a maior frequência de aeronaves em relação as demais rotas da FIR Curitiba.

Os 45.759 registros de variação de G (VRTG) detectadas pelas aeronaves da LATAM entre 01 de dezembro de 2018 a 31 dezembro de 2019 em todos seus voos no Brasil. Dentre os registros, conforme tabela 3.1 (linha 1), 12.959, apresentados na Figura 5.2, ocorreram na FIR Curitiba e a sua distribuição por de severidade (e quantidade) 1 (12189), 2 (638) e 3 (132) são, respectivamente, correspondentes a 94,05%, 4,92% e 1,01% das ocorrências de detecção de CAT pelas aeronaves no período.



Figura 5.1 - Densidade de registro de CAT considerando 25.465 registros de AIREP ocorridos na FIR Sul entre 02 de outubro de 2015 a 04 junho de 2019.

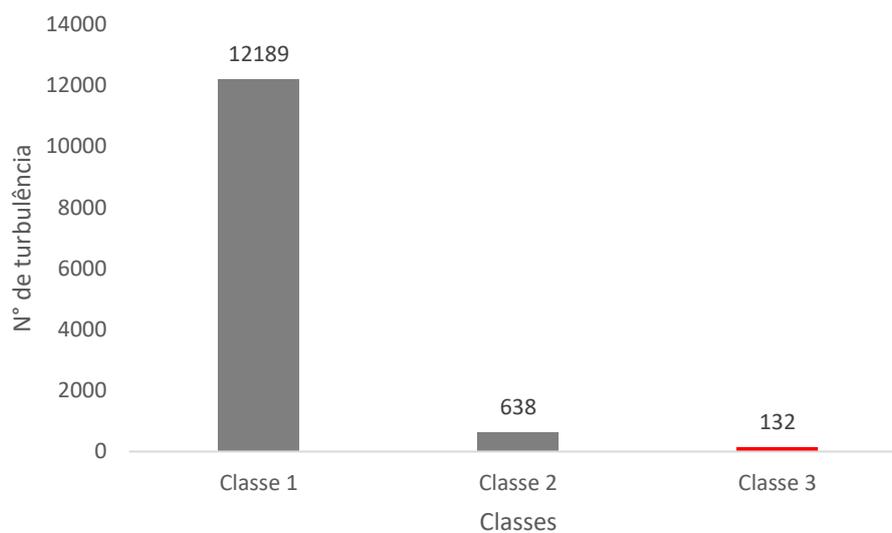


Figura 5.2 - Distribuição dos registros de VRTG por classe para na FIR Curitiba no período de 01/12/ 2018 a 31/12/2019.

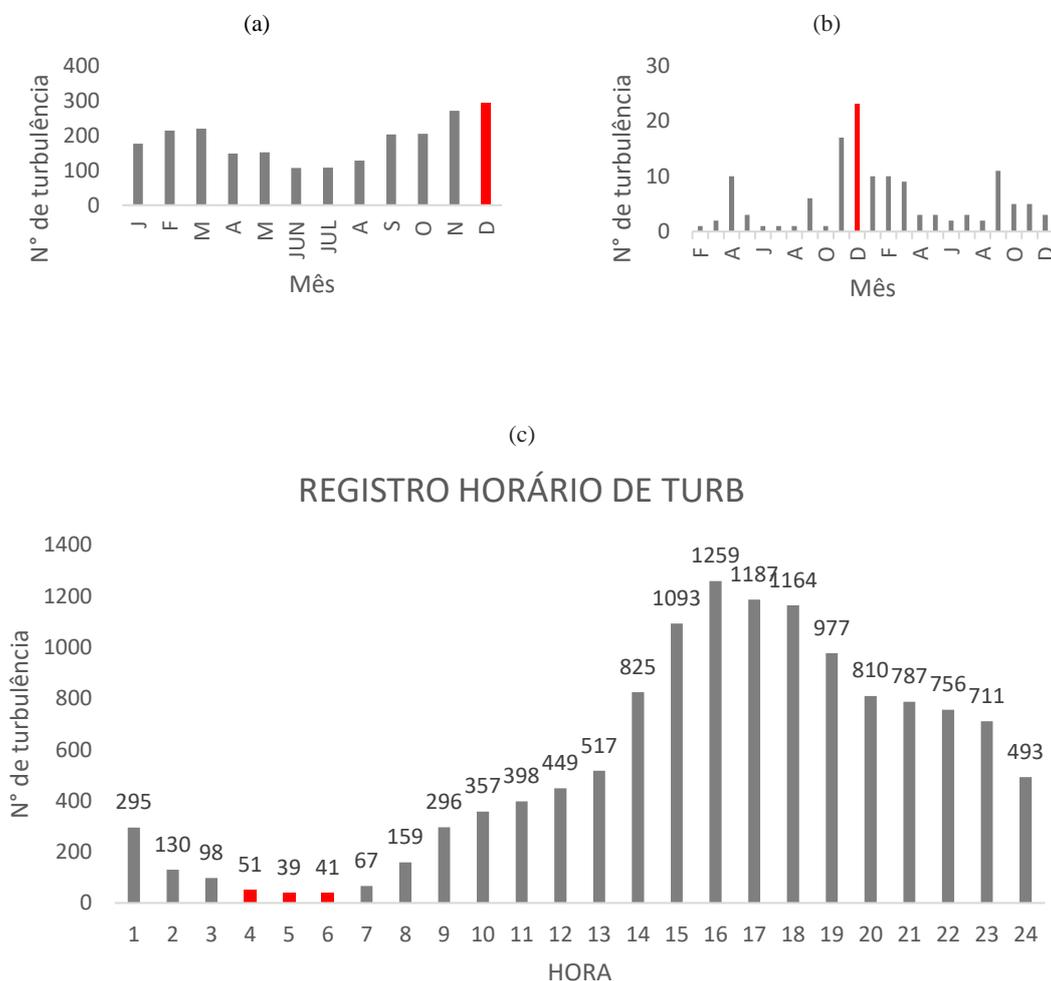


Figura 5.3 - Quantidade dos registros mensais de CAT via VRTG (G) para classe 2 e 3 (a), classe 3 (b) e registros horários para classe 2 e 3 (c) na FIR Curitiba no período de 01/12/ 2018 a 31/12/2019.

Na Figura 5.3 (a) e (b) são respectivamente ilustradas a distribuição mensal da quantidade de turbulência detectadas pelos voos da LATAM, via VRTG(G), para classes 2 e 3 e classe 3 e observa-se que há registros de turbulência (CAT ou não) ao longo de todos os meses. O período de setembro a março os de maior ocorrência com pico em dezembro (barra em vermelho) para ambas as classes mencionadas devida a CIT. É importante enfatizar que a quantidade dos registros aqui analisados está associada ao número de aeronaves em voo, nos horários, conforme Figura 5.3 (c), em que foram detectados a variação no VRTG correspondente as classes 2 ou 3 no período estudado. Apesar dos números de voos são menores nos horários 04, 05 e 06 h, chamou a atenção

o número de registros de VRTG e o principal efeito disso na maioria dos eventos foi de CAT, conforme as análises das imagens satélites, apresentando a corrente de jato. Nesta pesquisa o VRTG é a principal fonte de dado, todavia, é importante frisar que a distribuição mensal e horária da ocorrência do VRTG não foi considerada uma climatologia devido ao curto período (22 meses) de dados e, sim, um dado correlacionado com os dados de ocorrência de CAT via AIREP (outubro de 2015 a junho de 2019). Esta mineração de dados que conduziu a escolha da área de estudo, sul do Brasil.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS TURBULENTOS

Utilizando os 132 registros de VRTG de severidade classe 3 sobre a FIR Curitiba para período dos dados, realizou-se análise sinótica, considerando o período das informações meteorológicas dentro do intervalo de 12 horas que antecedeu o registro dos VRTG, usando os dados das fontes 5, 6, 7 e 8 (perfis atmosféricos, carta de superfície, imagens do satélite GOES-16 e METAR), conforme Tabela 3.1. Na tabela 5.1, coluna 1, são apresentados os casos selecionados. Os índices indicadores turbulência Ri, B, E-1, E-2 e E-3, usando dados modelados pelo GFS0,25 e WRF foram calculados. Ainda, construiu-se dois compostos (C) definidos com as seguintes variáveis modeladas, a saber:

C1: perfil do vento, temperatura potencial Θ e energia cinética turbulenta (TKE);
e

C2: Ri e velocidade vertical (W)

Visando ajustar os índices indicadores de CAT aos casos cujo a gênese tenha origem no cisalhamento devido à presença da corrente de jato, observou-se a ativa presença dela, conforme o corte vertical, abrangendo quase toda a região de estudo, do extremo sul do Brasil até o Rio de Janeiro e, assim, a distribuição em espaço corroborará a presença do jato ou não e a cobertura de nuvens nas fontes de dados mencionadas. Logo, 46 dias com registros de VRTG foram inicialmente selecionados e dentre os quais 5 são aqui analisados. Análise similar para os casos sem VRTG foi realizada. A Tabela 5.1 apresenta os eventos selecionados, com e sem VRTG ao longo da aerovia, e abaixo são analisados qualitativamente e quantitativamente com presença de registro de VRTG.

Tabela 5.1 - Casos selecionados

Caso	Dia	Nível de voo de referência
1	23/04/2018	FL320
2	29/09/2018	FL330
3	18/05/2018	FL150
4	21/05/2018	FL380
5	27/03/2019	FL380

5.2.1 Caso I

Na Tabela 5.2 é apresentado a data, posição, os horários (hora cheia) que se finalizaram os registros do VRTG, para intervalo 60 minutos, dos quatro eventos de VRTG registrados no referido dia, fase do voo (subida/em rota/descida), classe da CAT para voo LATAM, ida-e-volta, entre São Paulo (aeroporto de Congonhas) e Porto Alegre (aeroporto Salgado Filho) no dia 23 de abril de 2018. Observa-se que a atmosfera esteve turbulenta ao longo de todo dia, visto a distribuição temporal dos registros de VRTG.

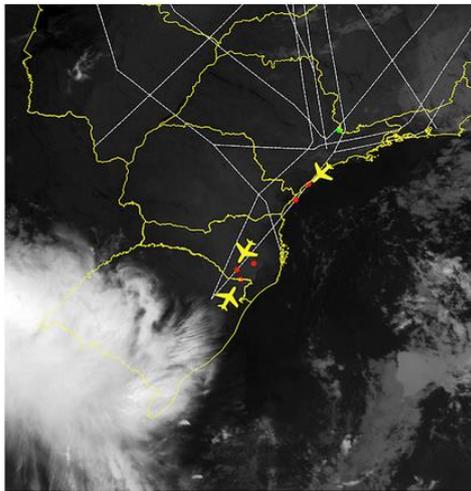
Na Figura 5.4 (a), (b) e (c) são, respectivamente, apresentadas as imagens GOES-16 (banda termal, centrada em 13,0 μm), parte da carta sinótica de superfície e o corte vertical do perfil atmosféricos entre Buenos Aires (SAEZ) e Galeão (SBGL), que inclui os perfis de Porto Alegre (SBPA), Curitiba (SBCT) e São Paulo (SBMT), corresponde às 12 UTC. Os dois pontos vermelhos na fig. 5.4(a) representam as posições referente aos registros de VRTG severos (classe 3) observados, as aerovias (as linhas brancas), uma frente fria entre a porção o Sul do Rio Grande Sul e o Uruguai e uma crista atuando na região sul e sudeste do Brasil, conforme fig. 5.4(a)(b), enquanto no corte longitudinal dos perfis de vento em barbela (na ordenada) versus as localidades de Buenos Aires, Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Galeão, é possível identificar a localização do jato (J), entre as linhas pretas e os círculos ovais sobre os cisalhamentos e as indicações de ventos fortes, (melhor a visualização da corrente de jato, atuando a quilômetros de distância) é possível, com todas as características da CAT clássica, conforme realce na fig. 5.4(c), observar a presença de um jato entre SAEZ e SBCT com ventos de intensidade variando entre 50 e 70 nós ou aproximadamente 150 - 210 km/h e entre 55-65 nós (ou 165-195 km/h) entre Porto Alegre (SBPA) e Curitiba (SBCT) – na região do avião azul - correspondente aproximadamente os níveis de voo de 30.000 (FL300) e 36.000 pés (FL360) e

consequente cisalhamento do ventos nos níveis de voo utilizados para rota São Paulo-Porto Alegre e onde aproximadamente os quatros VRTG foram registrados pela aeronave da LATAM, conforme tabela 5.2 e fig. 5.4(c). Além disso, os METAR de Porto Alegre (SBPA) e Florianópolis (SBFL) registram condição de céu claro nas duas localidades, comprovando o que é observado na imagem GOES ao longo da rota voada e, assim, todos os indícios apontam para que o CAT teve suas gênese devido a formação de onde gravidade gerada pela presença do jato.

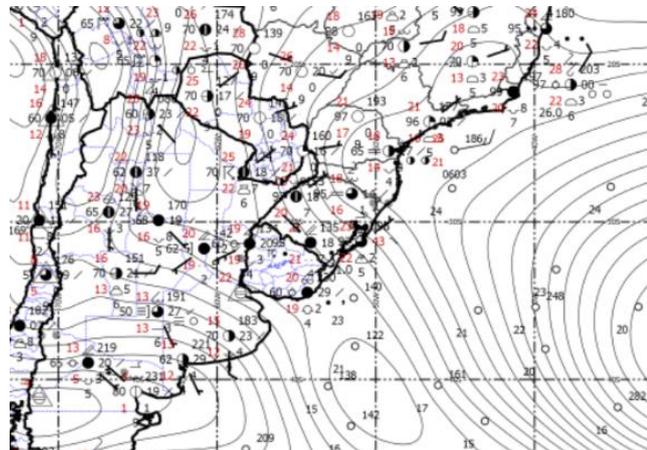
Tabela 5.2 - Detalhes do registro da VRTG do voo do Caso I. Fonte: LATAM.

Data	Posição	H (UTC)	Fase	Classe	Lon.	Lat.	Altitude	Origem	Destino
23/04/2018	1	9	Subindo	3	-47,59	-24,84	29560	CGH	POA
23/04/2018	2	9	rota	3	-48,07	-25,44	32056	CGH	POA
23/04/2018	3	10	rota	3	-50,24	-28,09	32068	CGH	POA
23/04/2018	4	12	subindo	3	-50,11	-28,45	32120	POA	CGH

(a)



(b)



(c)

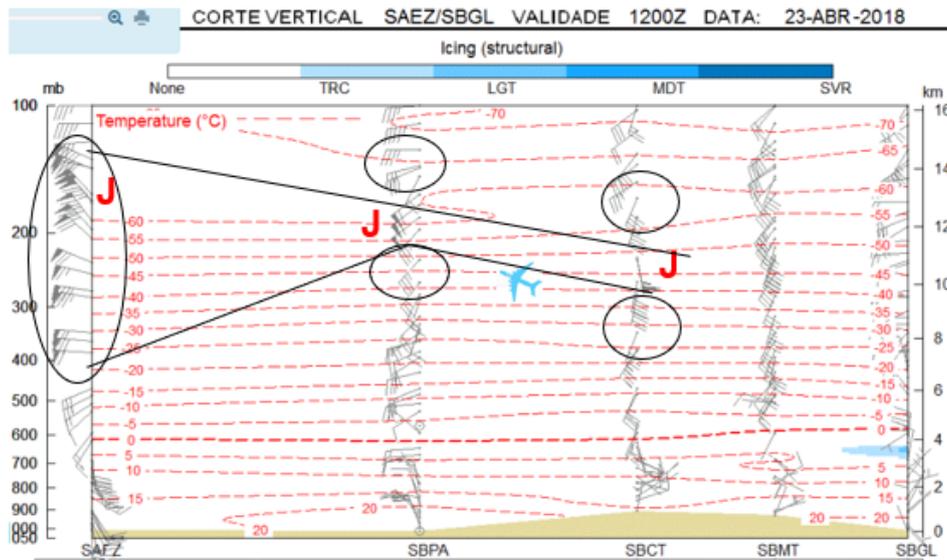


Figura 5.4 - (a) imagem GOES-16 (canal13-infravermelho) como os pontos em vermelho representando as localizações dos VRTG registrado, conforme Tabela 5.3, no dia 29 de setembro de 2018. (b) recorte da carta de superfície das 12Z e (c) Corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro.

As Figuras 5.5 (a)-(b) representam o corte vertical latitudinal a 48°W onde as ordenadas representam a pressão atmosférica em hPa versus a latitude entre 30°S a 22°S . As posições marcadas em pontos pretos são as indicações VRTG (classe 3) registrados, sobre o campos das variáveis dos composto, ou seja, C1: perfil do vento (barbelas), Θ (valores representado pelas linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil) e TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo $]30;300[\text{ m}^2.\text{s}^2$ fig. 5.5(a) e C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curva branca com valores negativo e positivo) fig. 5.5(b), determinado com dados GFS0,25° para 9Z (horário da observação do VRTG registrado). Tendo em vista que o resultado dos modelos dificilmente está sincronizado com as observações, adotou-se a área de análise dos campos gerados pelos modelos uma área retangular - linha vermelha tracejada, onde na vertical limitou-se aos níveis de pressão de 200 a 400 hPa, e na horizontal, o percurso aproximado de 1 hora de voo do tipo da aeronave mencionado, 400 km, ou o intervalo 24-29S, correspondente ao tempo de registro de VRTG -, nas nas Fig. 5.5(a) e 5.5(b). No C1, considerando o perfil do vento (da base ao topo), gerado pelo GFS0,25, observar qualitativamente que este é bastante similar quanta direção do escoamento, no entanto difere significativamente em magnitude, embora mostre claramente que há cisalhando e conseqüentemente indica um

estado turbulento da atmosfera na região do retângulo definido, onde houve o registro do VRTG. Os valores TKE variam aproximadamente na área de observação no intervalo de $[150; 210[\text{ m}^2.\text{s}^2$ que corrobora com indicador de CAT. O comportamento de Θ , não se apresentou, neste caso, como indicador de CAT, pois as linhas de Θ quase não sofrem variações esperada quando há turbulência. No C2, W com valores próximos a zero e Ri com valores $[4; 5[$ acima de 1 não foram parâmetros indicadores de CAT, este último, segundo Miles e Howard (1964), $Ri \leq 0,25$ comprovará a CAT.

De forma similar, as Figuras 5.6, a tabela: as colunas C1 e C2 e as linhas 18, 6 e 2 Km ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km. A exemplo da análise anterior, na área de observação, os perfis de vento simulados mostra um cisalhamento mais acentuado e posiciona o jato de forma similar as observações, conforme Fig. 5.4c; a TKE varia em intervalo maior do que o anterior de $[150; 300[\text{ m}^2.\text{s}^2$; Ri com valores $[0; 0,75[$ inferior a 1 e W variando de valores negativos a positivos. Assim, podemos talvez afirmar que o aumento da resolução espacial (x , y e z), exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.*, (2010), reproduziram as condições atmosféricas de forma mais fidedigna das observações de CAT.

As figuras 5.7 e 5.8 representam respectivamente as previsões do GFS0,25 às 9 e 12Z e WRF às 12Z (com as resoluções 18 km, 6 km e 2 km). Observa-se que os índices dos dois modelos, independente da resolução, geram valores dos índices condizentes com indicação de CAT no volume da atmosfera que circunda os registros dos VRTG no dia em questão. Vale ressaltar uma melhor eficiência para o índice *Brown*.

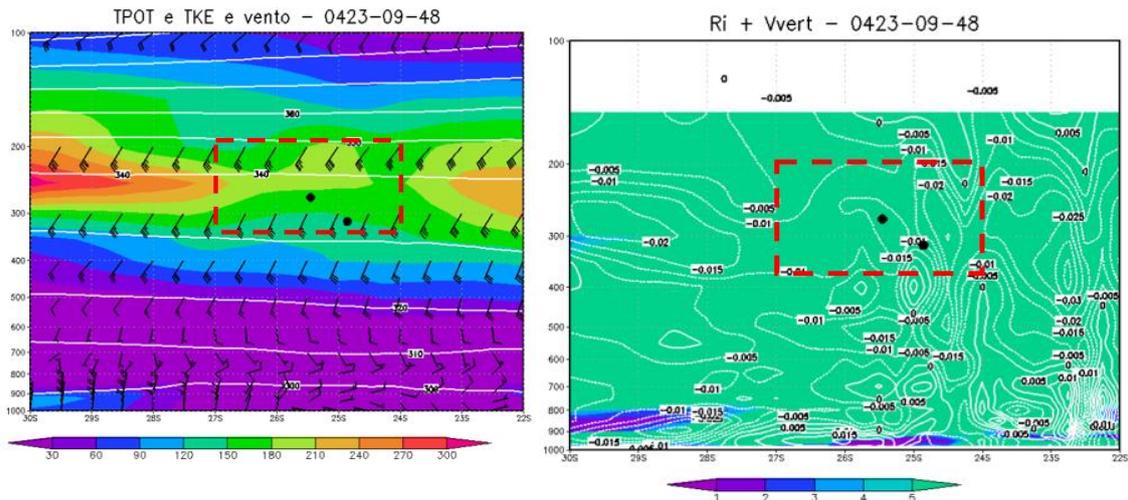
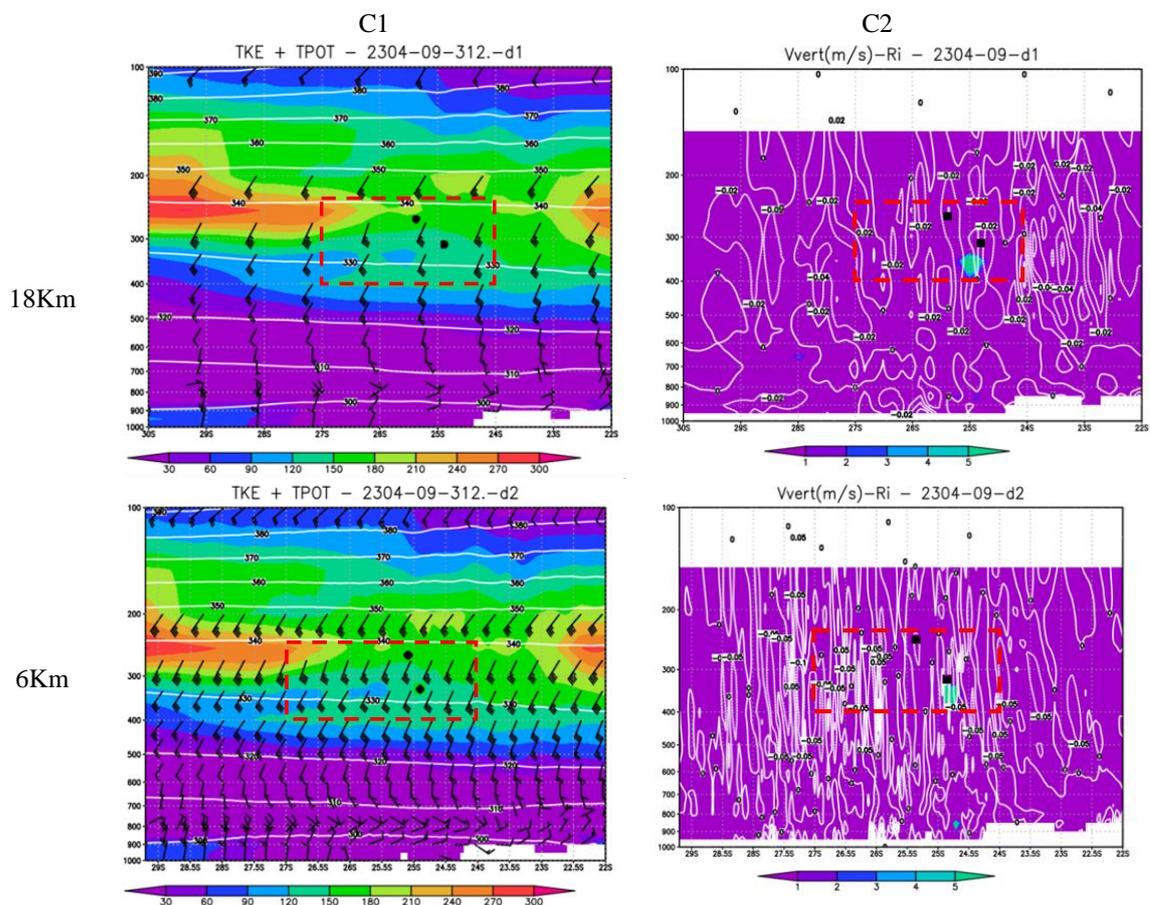


Figura 5.5 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$ e composto C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curva branca com valores negativo e positivo), determinado com dados GFS0,25 das 09Z do dia 23 de abril de 2018.



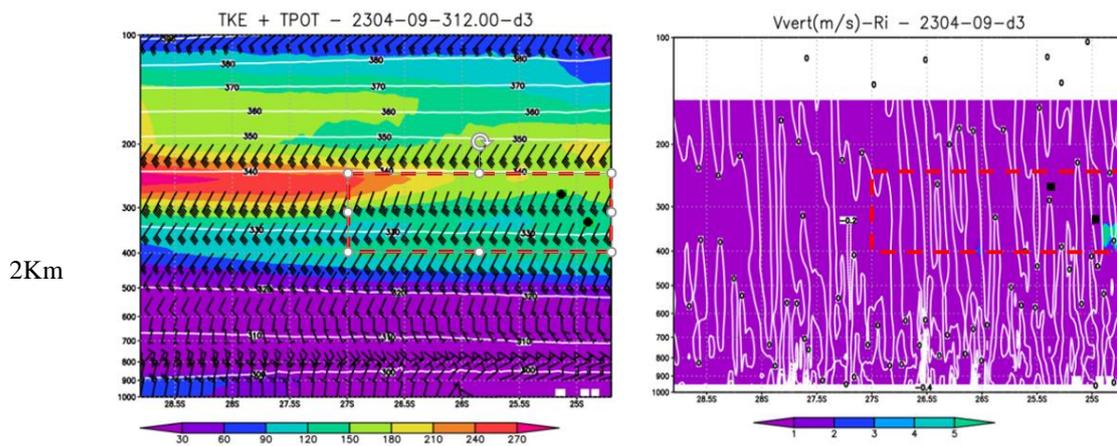
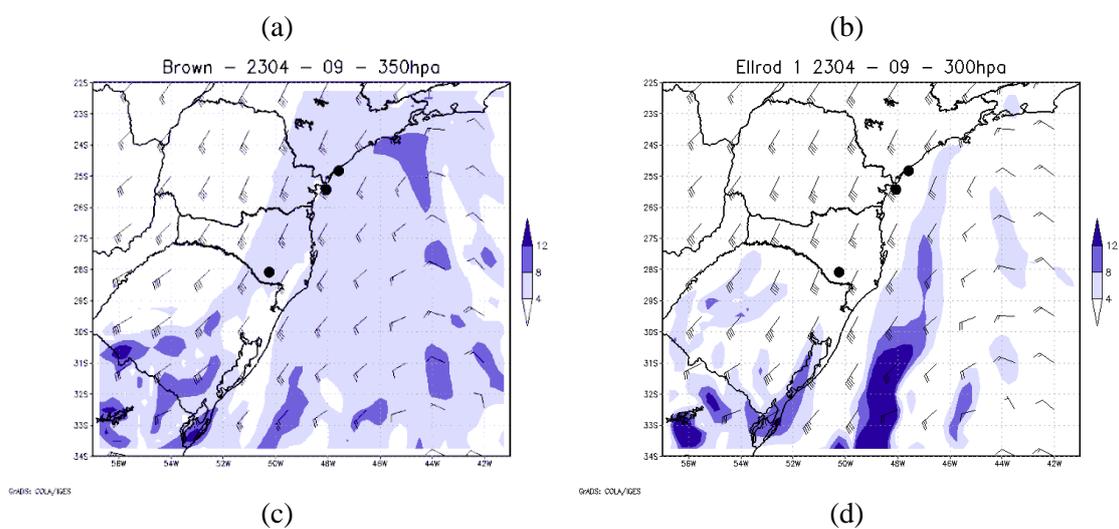


Figura 5.6 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^{-2}$). C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 09Z do dia 23 de abril de 2018.



©MIR: COLA/IGES

©MIR: COLA/IGES

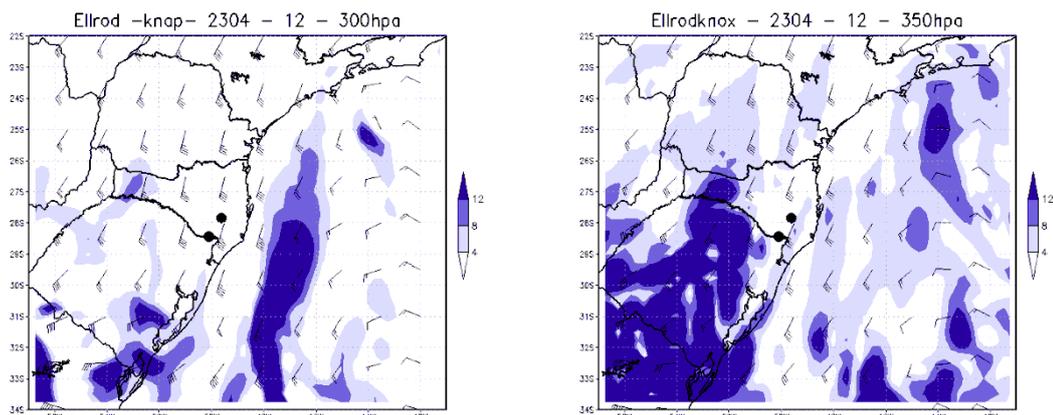


Figura 5.7 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 12 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 12Z do dia 23 de abril de 2018.

Essas mesmas análises foram feitas para as outras simulações do modelo GFS de 3 em 3 horas das 00 Z até 24 Z de 200, 250, 300 e 350 hPa e do perfil da atmosfera com os preditores para os outros 5 casos selecionados citados na seção anterior.

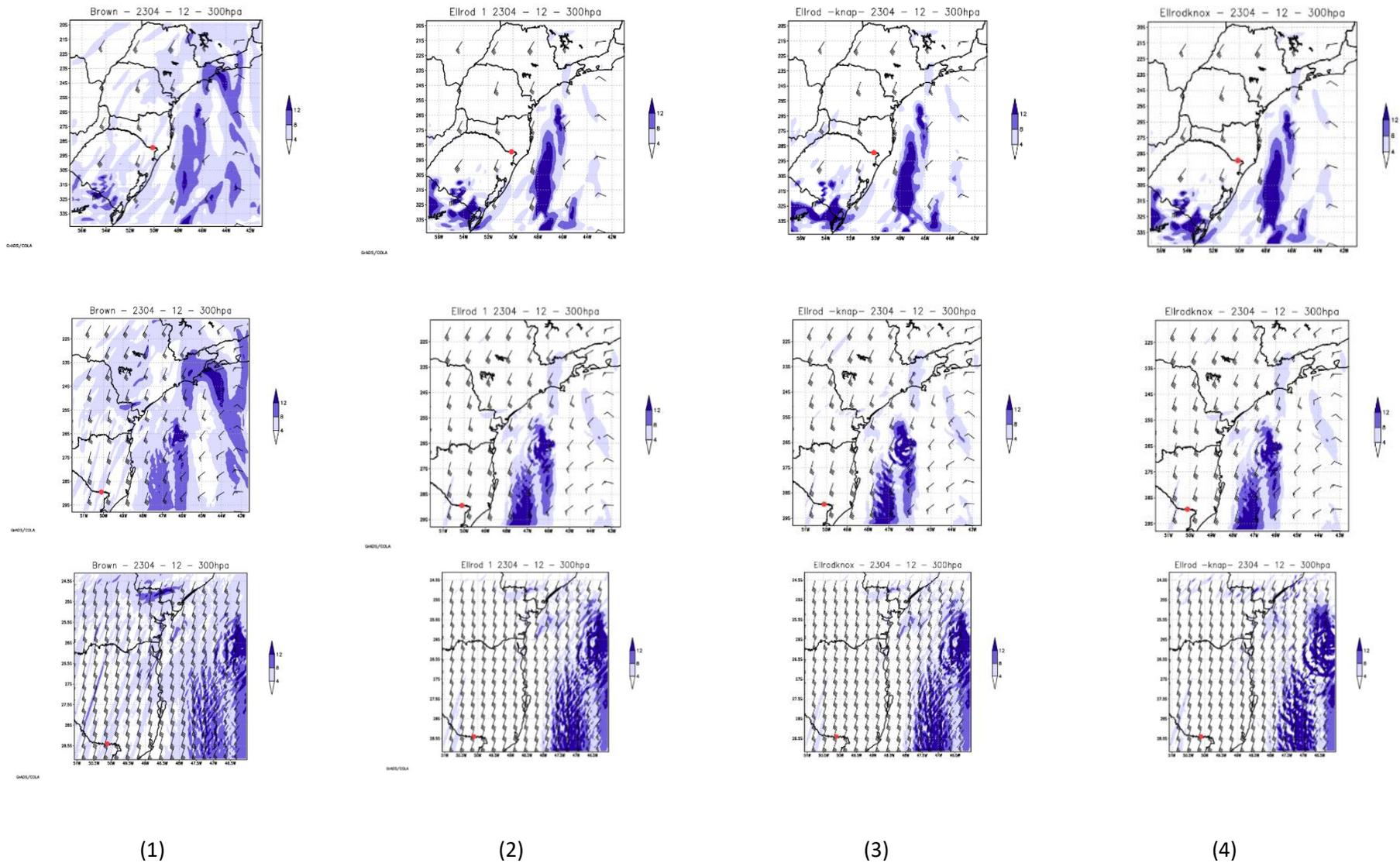


Figura 5.8 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 300 hPa com o ponto vermelho indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG 18 km, 6 km e 2 km das 12Z do dia 23 de abril de 2018.

5.2.2 Caso II

Na Tabela 5.3 é apresentado a posição (longitude, latitude), os horários (hora cheia) que se finalizaram os registros do VRTG, para intervalo 60 minutos, dos oito eventos de VRTG registrados no referido dia. Observa-se que a atmosfera esteve turbulenta ao longo de todo dia, visto a distribuição temporal dos registros de VRTG.

Tabela 5.3 - Dia 29/09/18 a severidade classe 3 das 04Z (fonte TAM).

Data	Hora	Fase	Classe	Lon	Lat	Altitude	Origem	Destino
29/09/2018	2	APPROACH	Class 1	51,37	29,98	3192	GRU	POA
29/09/2018	4	CRUISE	Class 3	50,31	27,16	33568	GRU	ROS
29/09/2018	4	CRUISE	Class 3	50,82	27,60	33568	GRU	ROS
29/09/2018	5	DESCENT	Class 1	43,78	22,93	8796	SCL	GIG
29/09/2018	14	APPROACH	Class 2	49,30	25,39	3152	CGH	CWB
29/09/2018	15	APPROACH	Class 1	46,72	23,59	2044	SDU	CGH
29/09/2018	20	DESCENT	Class 1	46,40	22,53	18500	SDU	GRU
29/09/2018	23	CRUISE	Class 1	56,02	30,11	31828	GIG	EZE

A Figura 5.9 (a) ilustra o avião posição às 04Z está sobre a cidade de Santa Catarina, sentido Rosario, região sul do Brasil. As condições atmosféricas apresentaram, céu limpo, devido horário a condição de tempo presente foi de névoa úmida, conforme os metares da REDEMET:

METAR SBPA 290400Z 10012KT CAVOK 20/18 Q1013=
 METAR SBPA 290500Z 10011KT CAVOK 20/18 Q1012=
 METAR SBPA 290600Z 10010KT CAVOK 20/18 Q1011=

Na Figura 5.9 (a), (b) e (c) são, respectivamente, apresentadas a imagens GOES-16 (banda termal, centrada em 13,0 μm), parte da carta sinótica de superfície e corte vertical do perfil atmosféricos entre Porto Alegre (SBPA) e Galeão (SBGL), que inclui os perfis de Curitiba (SBCT) e São Paulo (SBMT), corresponde às 12 UTC. Os dois pontos vermelhos na Fig. 5(a) representam as posições referente aos registros de VRTG severos (classe 3) observados. Estas informações revelam que há um centro de alta pressão de 1.023 hPa sobre o oceano atlântico próximo à costa do estado do Rio Grande Sul, conforme ilustrada na carta de superfície Fig. 5(b). Os METAR do aeroporto de Porto Alegre ao longo das primeiras horas do referido dia registraram condição de céu claro com excelente visibilidade. Na Fig. 5(c) no corte longitudinal dos perfis de vento em barbela (na ordenada) versus as localidades de Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Galeão, é possível identificar a localização do núcleo do jato (J) e também toda a extensão

da corrente de jato sobre a área de estudo, entre as linhas preta, e que acima do nível pressão de 290 hPa, sobre Porto Alegre, a velocidade do vento varia entre 50-80 nós (ou aproximadamente 150 - 240 km/h) e entre 65-80 nós (ou 195-240 km/h) sobre Curitiba (SBCT) correspondente aproximadamente os níveis de voo de 30.000 (FL300) e 32.000 pés (FL320).

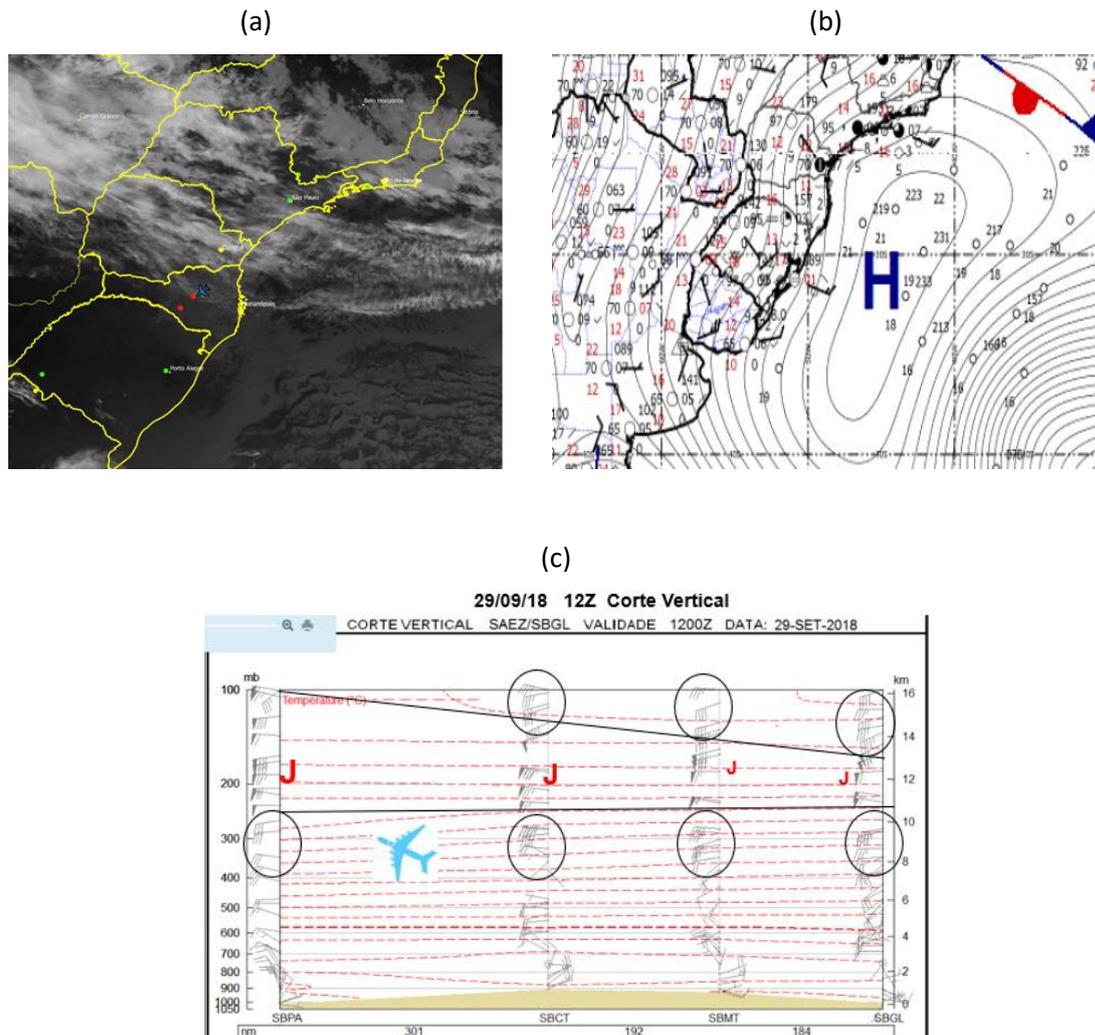


Figura 5.9 - (a) imagem GOES-16 (canal13-infravermelho) como os pontos em vermelho representando as localizações dos VRTG registrado, conforme Tabela 5.3, no dia 29 de setembro de 2018. (b) recorte da carta de superfície das 12Z e (c) Corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro.

As Figura 5.10 (a)-(b) representam o corte vertical latitudinal a 51°W onde as ordenadas representam a pressão atmosférica em hPa versus a latitude entre 30°S a 22°S . As posições marcadas em pontos pretos são as indicações VRTG (classe 3) registrados,

sobre o campos das variáveis dos composto, ou seja, C1: perfil do vento (barbelas), Θ (valores representado pelas linhas brancas aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo]100;900[$\text{m}^2.\text{s}^2$ (Fig. 5.10a) e C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) entre 1 e 5 e W (curva branca com valores negativo e positivo), determinado com dados GFS0,25° para 3Z (horário mais próximo da observação do VRTG registrado de 3:01Z até 4Z). Similar ao caso 1 e aos demais casos a seguir, adotou-se a área de observação nos campos gerados pelos modelos a área do retângulo (linha vermelhas tracejadas) nas Fig. 5.10(a) e 5.10(b). Considerando o perfil do vento (da base ao topo), gerado pelo GFS0,25, observar qualitativamente que este é bastante similar quanta direção do escoamento e em magnitude, assim mostra claramente que há cisalhando e conseqüentemente indica um estado turbulento da atmosfera na região do retângulo definido, onde houve o registro do VRTG. O valores TKE variam aproximadamente na área de observação no intervalo de [300; 800[$\text{m}^2.\text{s}^2$ que corrobora com indicador de CAT e o comportamento de Θ , não se apresentou, neste caso, como indicadores de CAT, pois as linhas de Θ quase não sofrem variações esperada quando há turbulência, conforme 5.10(a); W com valores próximo a zero e Ri entre 0 e 1, conforme 5.10(b). Este último, segundo Miles e Howard (1964), $\text{Ri} \leq 0,25$ se torna um eficiente indicador de CAT.

De forma similar, a Figura 5.11, a tabela: as colunas C1 e C2 e as linhas 18. 6 e 2 Km ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km. A exemplo da análise anterior, na área de observação, os perfis de vento simulados mostram um cisalhamento mais acentuado e posiciona o jato de forma similar as observações, conforme Fig. 5.9(c); a TKE varia em intervalo maior do que o anterior de [300; 900[$\text{m}^2.\text{s}^2$; Ri com valores inferior a 0,25 e W variando de valores negativos a positivos. Assim, podemos talvez afirmar que o aumento da resolução espacial (x, y e z), exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.*, (2010), reproduziram as condições atmosféricas de forma mais fidedigna das observações de CAT.

As figuras 5.12 e 5.13 representam respectivamente as previsões do GFS0,25 às 3Z e WRF às 4Z (com as resoluções 18 km, 6 km e 2 km). Observa-se que os índices dos dois modelos, independente da resolução, geram valores dos índices condizentes com

indicação de CAT no volume da atmosfera que circunda os registros dos VRTG no dia em questão melhores que o primeiro caso, dia 23/04/2018.

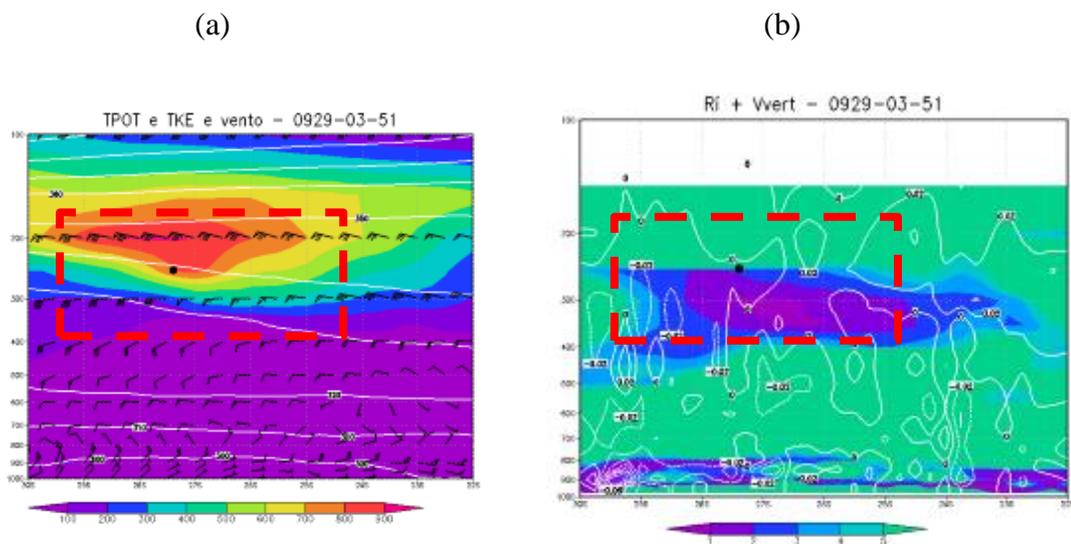


Figura 5.10 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$) e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 03Z do dia 29 de setembro de 2018.

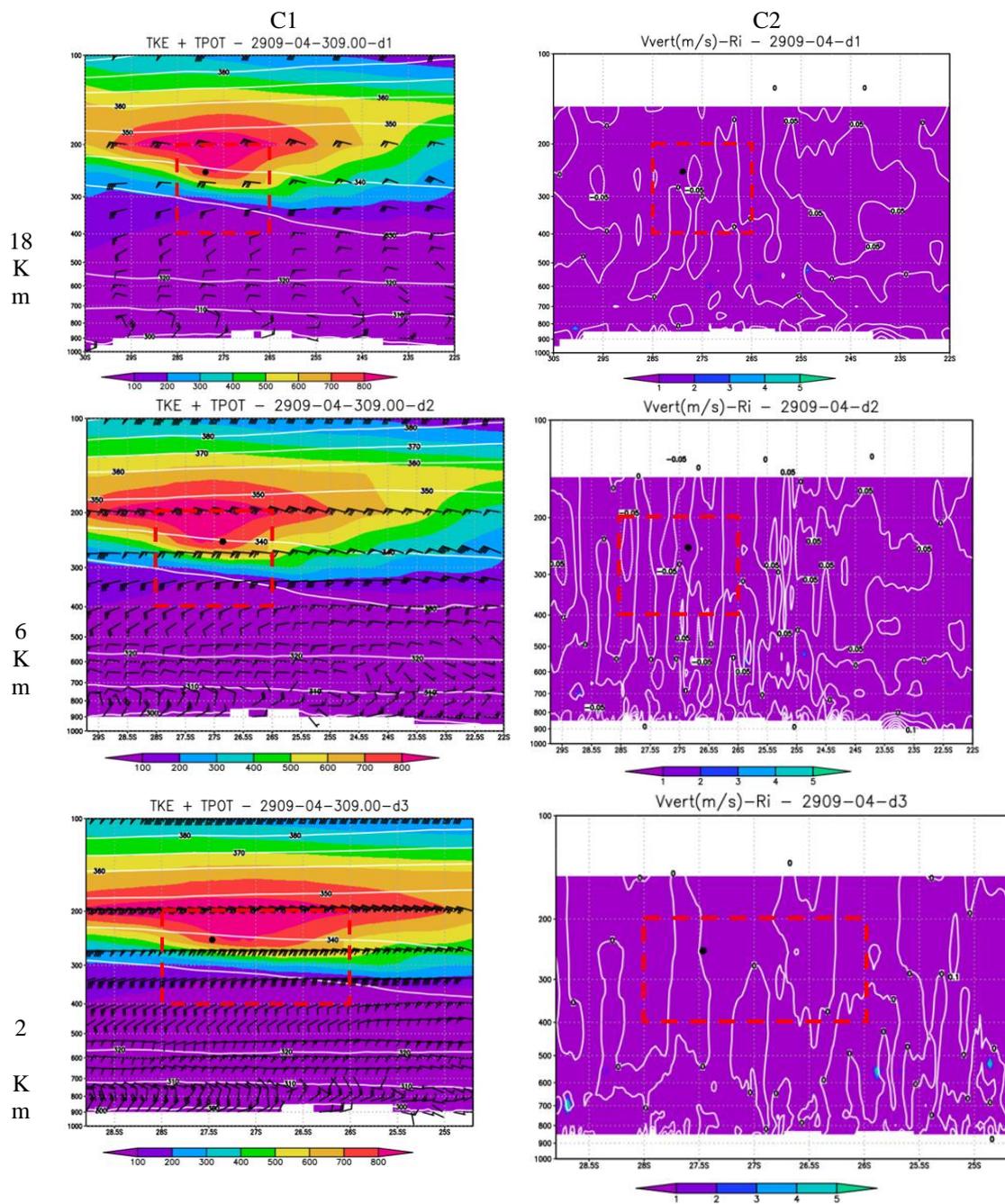


Figura 5.11 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$). C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018.

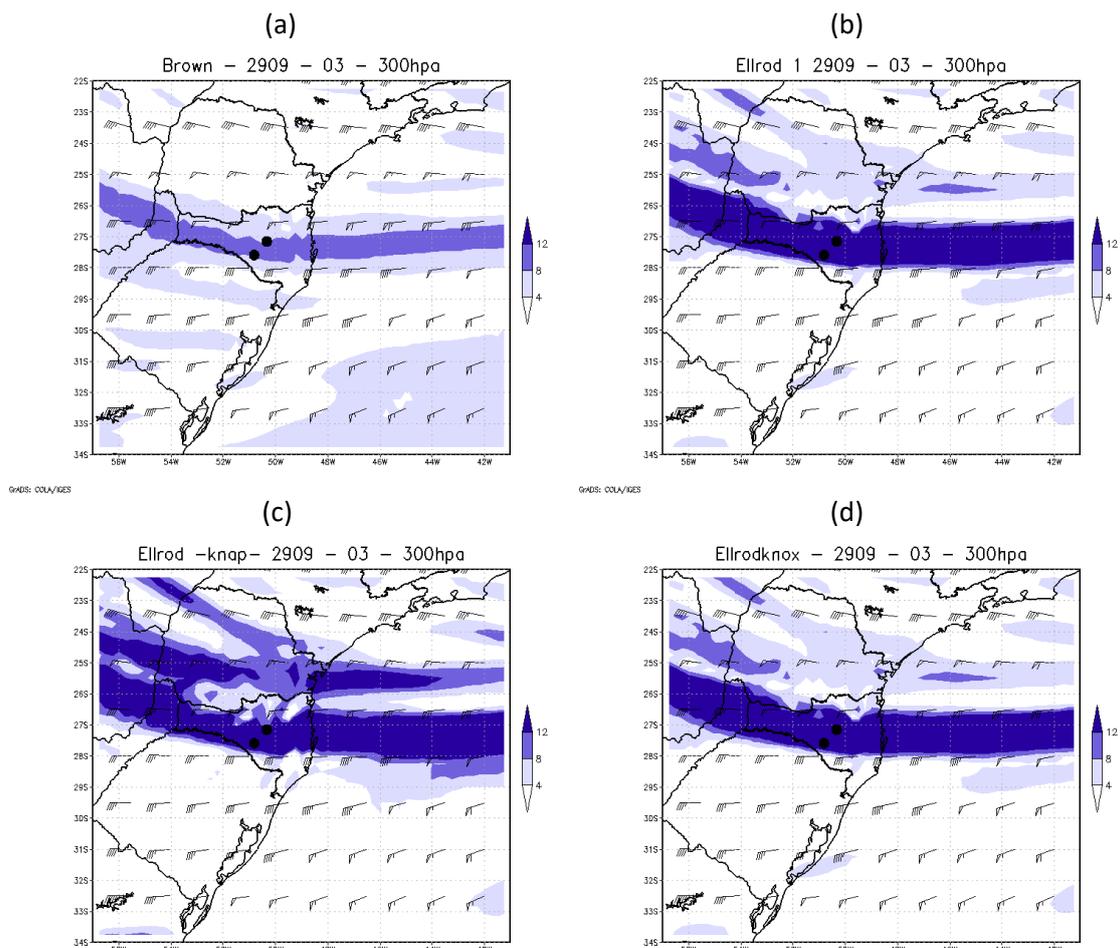


Figura 5.12 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 03 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 4Z do dia 29 de setembro de 2018.

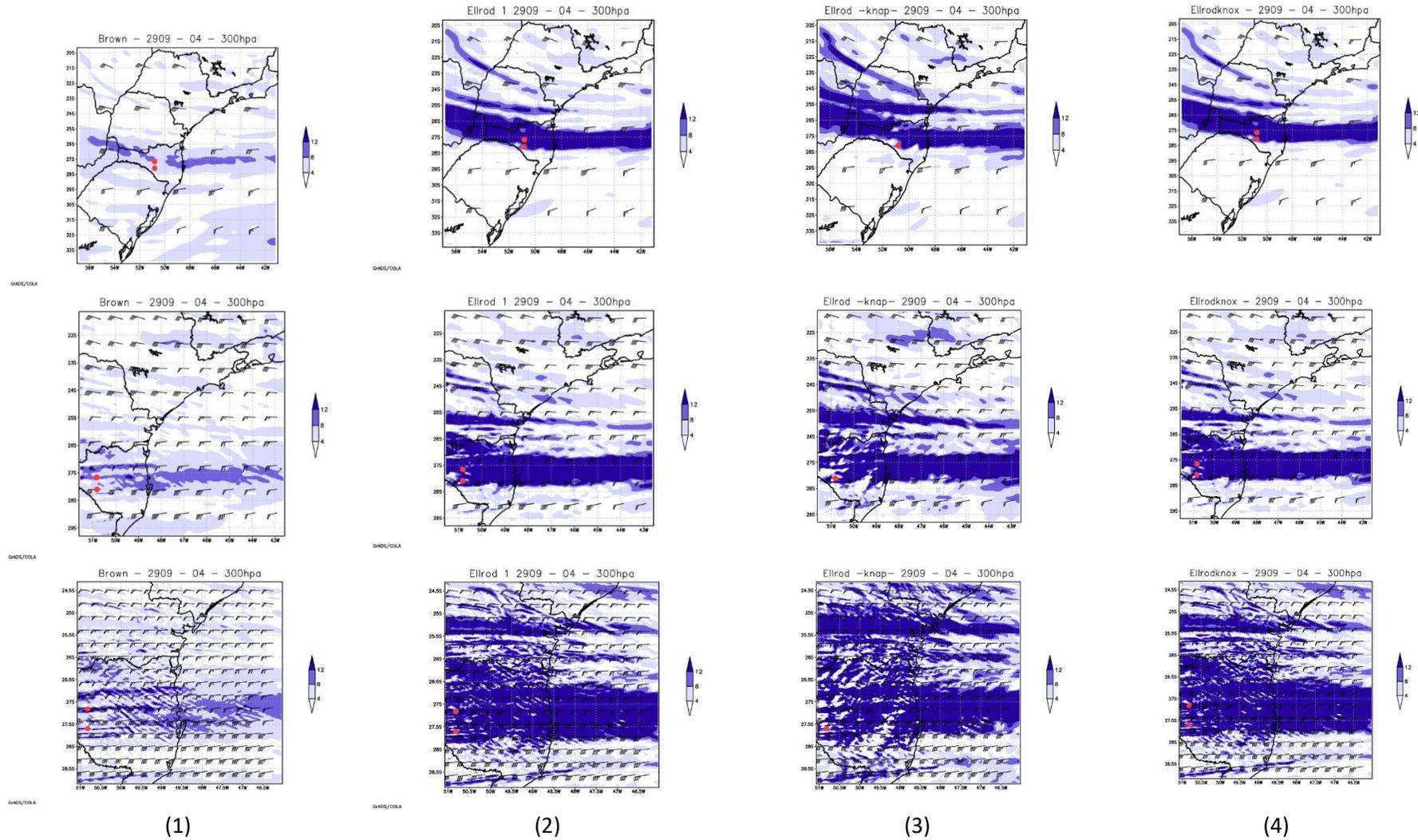


Figura 5.13 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 300 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018. O ponto vermelho indica o dado VRTG.

5.2.3 Caso III

Este reproduz os dados do voo LATAM de Santiago para Galeão em 18 de maio de 2018. Na Tabela 5.4 é apresentado a data, período (H), fase do voo (subida/em rota/descida), classe da CAT, coordenada geográfica do registro e o trecho do voo.

Tabela 5.4 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso I.

Data	horário Z	fase	classe	long	lat	altitude	origem	destino
18/05/2018	19	climb	class 1	-48,4653	-28,0075	11920	FLN	JJG
18/05/2018	19	cruise	class 1	-51,7113	-27,0967	34924	SCL	GIG
18/05/2018	19	cruise	class 1	-48,5421	-26,6817	35956	CGH	POA
18/05/2018	19	descent	class 3	-49,0284	-26,8475	15300	CGH	FLN

Fonte: LATAM.

A Figura 5.14 seguem, em (a) a ilustra o avião posição às 19Z a 15 mil 300 pés (FL150, limite para ser considerada a CAT clássica) está sobre o estado de Santa Catarina, sentido galeão (RJ), região sul do Brasil. As condições atmosféricas apresentaram, céu com poucas nuvens a 3 mil pés e nublado a 8 mil pés (SBFL 181900Z 36003KT 9999 FEW030 BKN080 24/18 Q1009) e nesse mesmo horário aconteceu uma trovoadas próxima a região do dado observado VRTG, conforme o SPECI (SBFL 181950Z 19007KT 7000 TS VCSH BKN020 FEW035CB BKN080 22/19 Q1010) associada a corrente jato e a pressão baixa devido aproximação de um cavado sobre a estação próxima a essa rota e, também, ilustrada a visualização de nuvens na forma de bandas, ondas e estrias, confirmando o cisalhamento de vento, atuando sobre São Paulo, Mato Grosso e Paraná. Além disso, acompanhado a tríade sinótica (corrente de jato, a alta pressão atuando e a possibilidade de uma pré-frontal) uma alta pressão de 1025 hPa com centro sobre o oceano atlântico próximo à costa do Rio de Janeiro e um cavado de 1005 hPa devido a aproximação da frente fria ilustrada na carta de superfície, conforme figura 5.15(b). A detecção da variação vertical da força G (VRTG) de severidade classe 3 foi por uma turbulência de ar claro (CAT) clássica devido a sua longa extensão, ou seja por cisalhamento vertical do vento da corrente de jato (linhas vermelhas tracejadas) sobre Santa Catarina, conforme mostra o corte vertical onde as abscissas estão as localidades de Buenos Aires a Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro ilustra bem ventos com velocidade entre 50 nós (150 km/h) e 70 nós (210 km/h) acima de 400 hPa nas abscissas SAEZ e SBPA (próximo ao dado de VRTG), sentido SBMT (SP) onde nessa

abscissa apresentou o cisalhamento, acima de 200 hPa, de 30 nós (90 km/h) para 80 nós (240 km/h), conforme figura 5.14 (c).

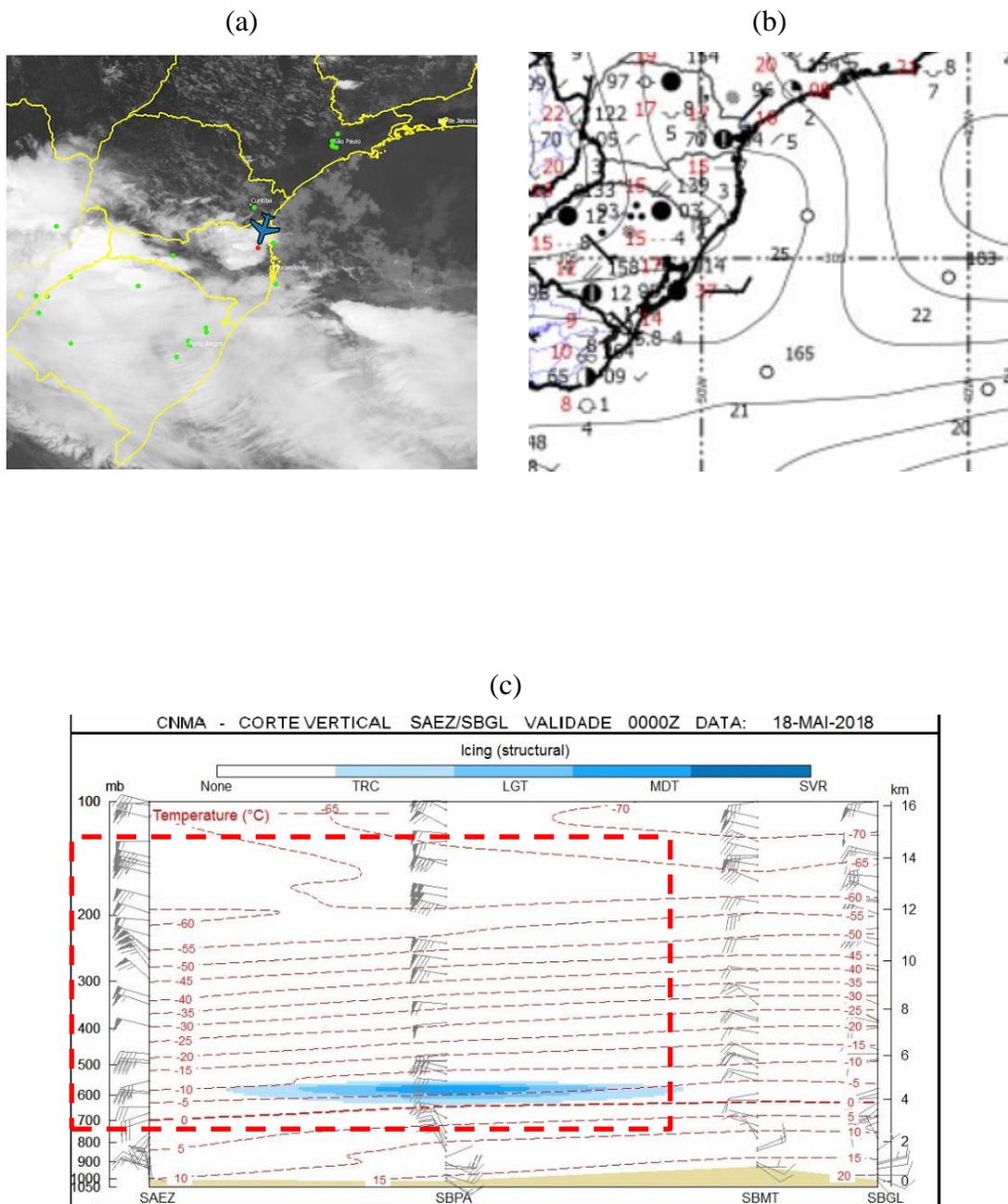


Figura 5.14 - (a) Posição exata da turbulência, indicada pelo avião azul, cruzando FL330 canal 13 visível, Fonte: INPE. (b) Análise de superfície do dia 18/05/2018. Fonte: REDEMET e em (c) corte vertical de Porto Alegre ao Rio de Janeiro apresenta forte cisalhamento entre SAEZ a SBGL na altura de 8 km. Fonte: REDEMET.

Seguindo o próximo passo, o cálculo dos índices indicadores de turbulência e compostos, usando dados de análise do GFS para período do voo.

A Figura 5.15 apresentam o corte vertical latitudinal onde as ordenadas estão em hPa e as abscissas em latitudes, as posições marcadas em pontos pretos são as indicações da variação vertical da força G (VRTG), respectivamente os dois compostos definido, ou seja, C1 perfil do vento, Θ , TKE fig. 5.15(a) e C2 Ri e W fig. 5.15(b), determinado com dados GFS0,25° para 18Z (horário mais próximo da observação do VRTG, 19Z). Observa-se na região do retângulo (linha vermelhas tracejadas) o comportamento do perfil do vento (da base ao topo) difere em magnitude das observações VRTG apresentadas e conseqüente assim o cisalhamento é subestimado.

No C1, a TKE variou de 100 a 200 $m^2.s^2$, região do núcleo apresentou-se afastada e à esquerda região tracejada no topo da figura. O comportamento da temperatura potencial (Θ) apresentou-se mais espaçada com relação aos níveis superiores. Em resumo, análise mostra que compostos não deram indícios da presença de CAT de 15300 a 35000 pés estimados nas observações, conforme a tabela 5.4. No C2, os valores de Ri apresentaram o máximo valor 5 dentro do retângulo (linha vermelhas tracejadas), não sendo indícios na indicação de CAT, visto que o valor desejado é o $Ri \leq 0,25$ e W apresentou valores próximos à zero sobre a mesma região.

De forma similar, a Figura 5.16, a tabela: as colunas C1 e C2 e as linhas 18, 6 e 2 Km ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km. A exemplo da análise anterior, na área de observação, os perfis de vento simulados mostram um cisalhamento mais acentuado e posiciona o jato de forma similar as observações, conforme Fig. 5.14(c); a TKE varia em intervalo maior do que o anterior de [100; 900] $m^2.s^2$; Ri com valores inferior a 0,25 e W variando de valores negativos a positivos. Assim, podemos talvez afirmar que o aumento da resolução espacial (x, y e z), exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.*, (2010), reproduziram as condições atmosféricas de forma mais fidedigna das observações de CAT.

As figuras 5.16 e 5.17 representam respectivamente as previsões do GFS0,25 às 18Z e WRF às 19Z (com as resoluções 18 km, 6 km e 2 km) dos índices *Brown*, *Ellrod 1*, *Ellrod 2 (Knap)* e *Ellrod 3 (Knox)* sobre a área de estudo em 300 e 350 hPa com valores de 4 a 12 x $10^{-6} ms^{-1}$. Observa-se que os índices dos dois modelos, independente da resolução, geram valores dos índices condizentes com indicação de CAT no volume da atmosfera que circunda os registros dos VRTG no nível bem mais abaixo (15300 pés) que

os casos anteriores. Talvez, podemos afirmar que as outras fontes geradoras: CIT e MWT corroboraram neste caso.

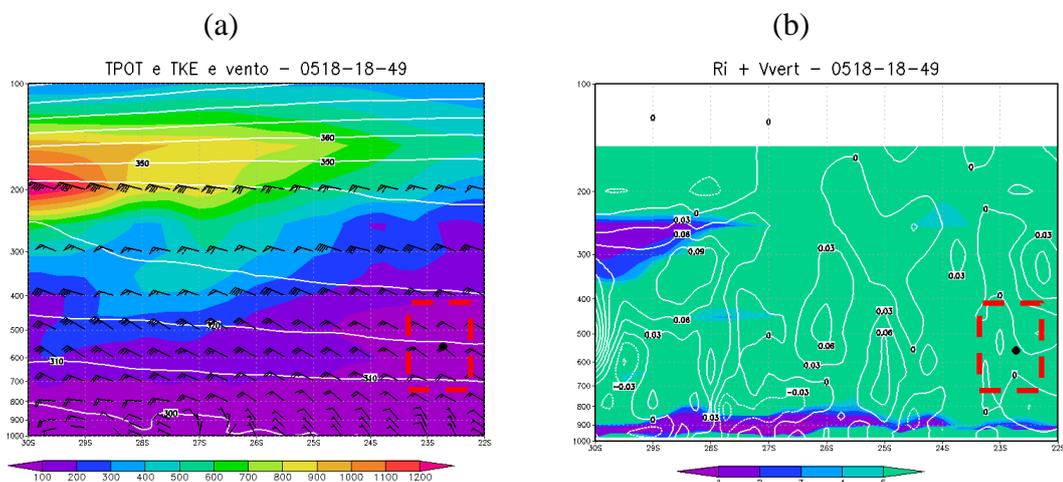


Figura 5.15 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $\text{m}^2.\text{s}^2$) e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 18Z do dia 18 de maio de 2018.

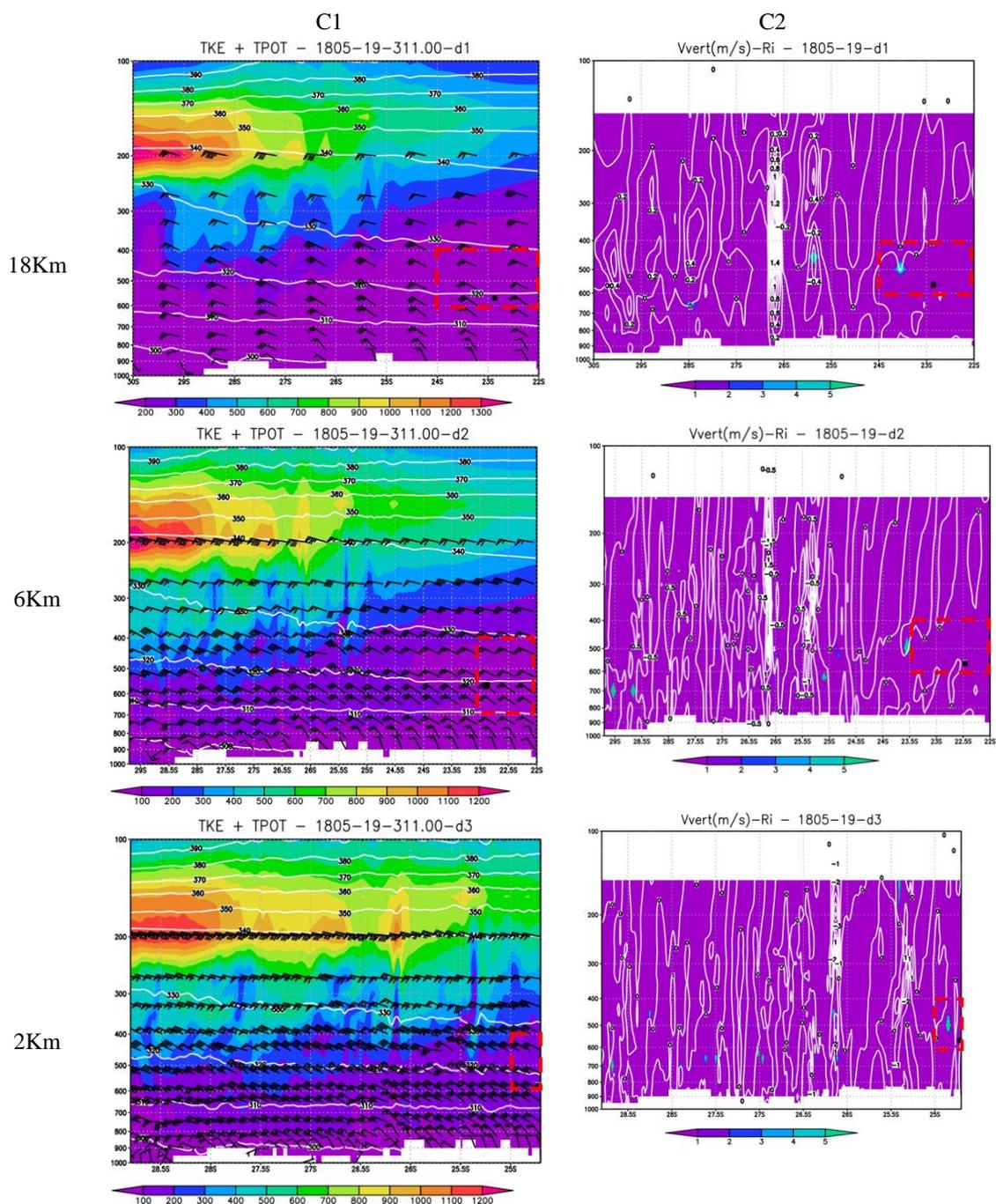


Figura 5.16 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2 \cdot s^2$). C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 19Z do dia 18 de maio de 2018.

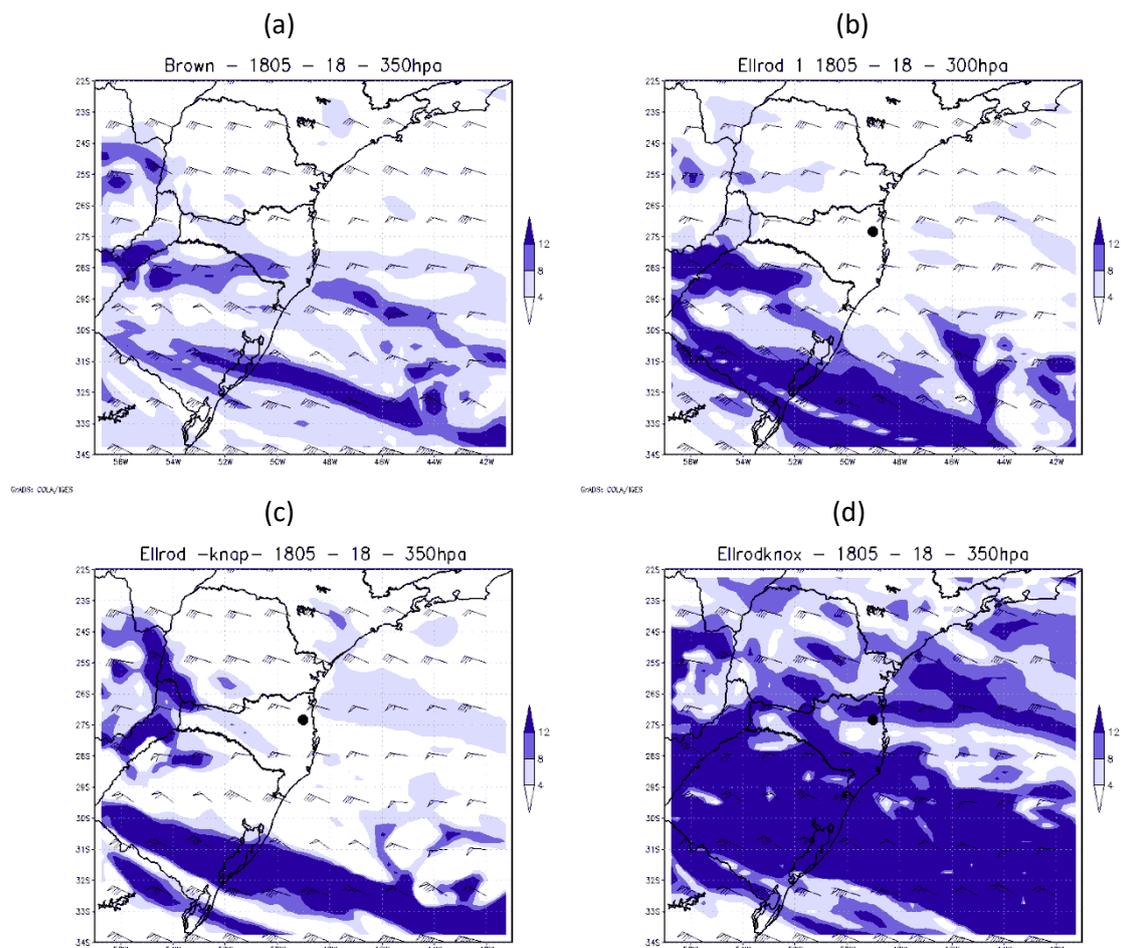
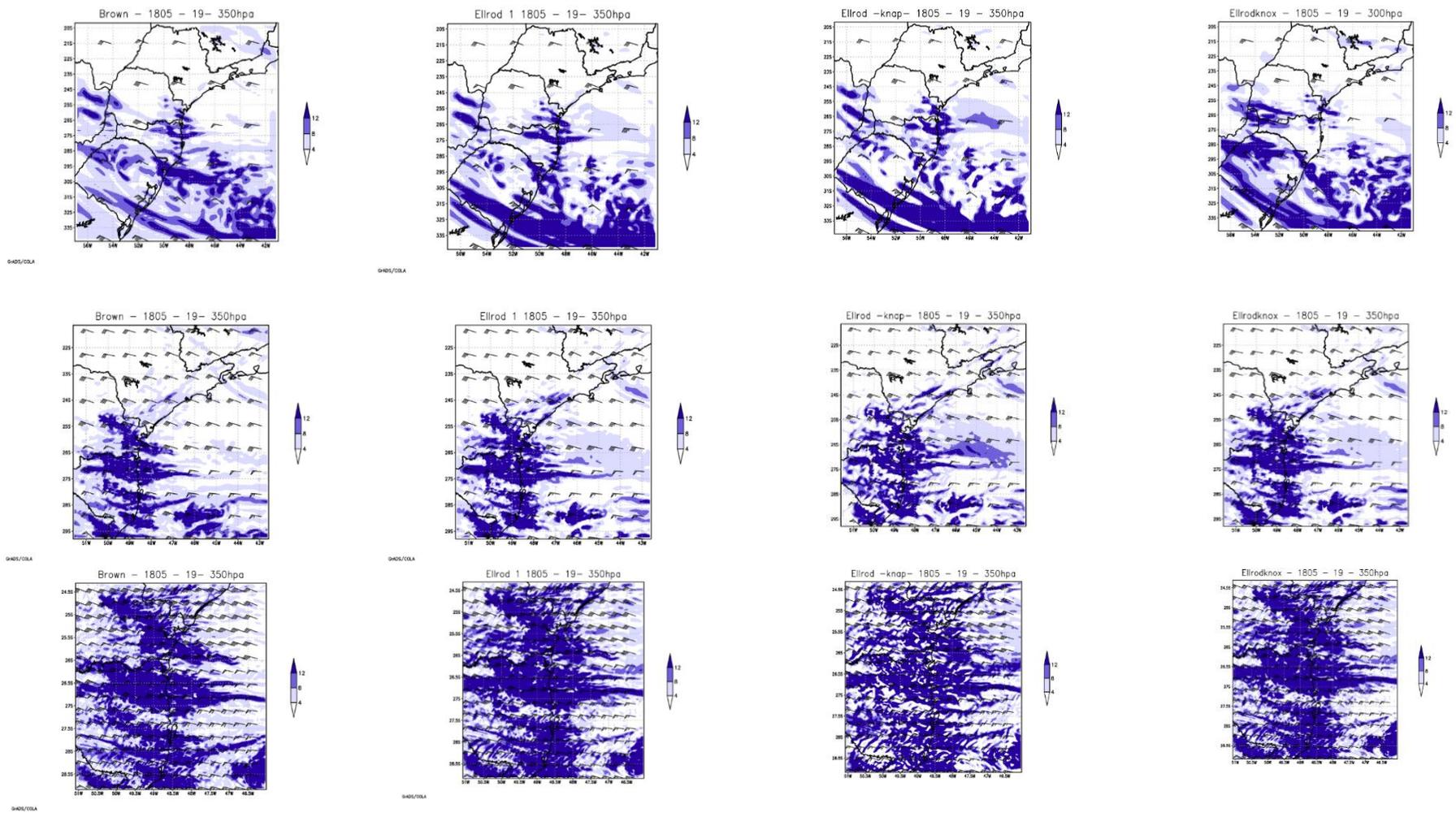


Figura 5.17 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 300 hPa às 03 Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 18Z do dia 18 de maio de 2018.



(1)

(2)

(3)

(4)

Figura 5.18 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 350 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 18 de maio de 2018.

5.2.4 Caso IV

Este reproduz os dados do voo LATAM de Santiago para Galeão em 21 de maio de 2018. Na Tabela 5.5 é apresentado a data, período (H), fase do voo (subida/em rota/descida), classe da CAT, coordenada geográfica do registro e o trecho do voo.

Tabela 5.5 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso I.

Data	horário Z	fase	classe	long	lat	altitude	origem	destino
21/05/2018	14	approach	class 1	-43,415	-22,7175	3220	CGH	GIG
21/05/2018	17	cruise	class 3	-50,421	-25,7967	38424	GRU	SCL
21/05/2018	18	final	class 1	-46,632	-23,6517	476	UDI	CGH

Fonte: LATAM.

A Figura 5.19(a) ilustra as aerovias nas cores brancas, os pontos verdes as capitais e o ponto vermelho a posição exata do dado automático observado de VRTG do avião (amarelo) às 17Z está sobre o estado do Paraná, sentido Rio Grande do Sul, região sul do Brasil. As condições atmosféricas apresentaram durante o voo, céu claro sem nuvens conforme o metar da estação de Florianópolis (METAR SBFL 211700Z 33003KT CAVOK 21/10 Q1016) e o metar da estação de Curitiba - METAR SBCT 211700Z VRB03KT CAVOK 18/05 Q1018 -. Também ilustra a visualização dos rios bem nítidos na imagem visível e nuvens na forma de bandas, ondas e estrias, confirmando o cisalhamento de vento devido a corrente de jato atuando sobre desde de Buenos Aires (SAEZ) até o Rio de Janeiro (SBGL). Nesse caso, não teve o trinômio sinótico (a corrente de jato, alta pressão atuando e a possibilidade de uma pré-frontal), não existiu uma pré-frontal ou mesmo uma frente aproximando-se. A alta pressão de 1020 hPa bem pronunciada com centro sobre o estado do PR, ilustrada na carta de superfície conforme a figura 5.19(b).

A corrente jato encontra-se de SAEZ (RS) até SBGL (RJ) com a velocidade do vento entre 50 nós (150 Km) a 90 nós (180 km). Na posição do avião entre a abscissa SBCT e SBPA a velocidade do vento está entre 70 nós (210 km) a 80 nós (240 Km), conforme o corte vertical, conforme a fig 5.19(c). A detecção da variação vertical da força G (VRTG) de severidade classe 3 foi por uma turbulência de ar claro (CAT) clássica, ou seja por cisalhamento vertical do vento da corrente de jato em altas altitudes, conforme mostra o corte vertical onde as abscissas estão as localidades de Buenos Aires, Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro, ou seja, em quase toda FIR Curitiba,

ilustrando bem os ventos com velocidade entre 50 nós (150 km/h) e 90 nós (270 km/h) acima de 400 hPa nas abscissas SAEZ e SBPA, sentido SBGL (RJ) onde próximo a abscissa SBCT (posição do avião azul) apresentou o cisalhamento abaixo de 200 hPa, de 65 nós (195 km/h) para 80 nós (240 km/h), conforme a figura 5.19(c).

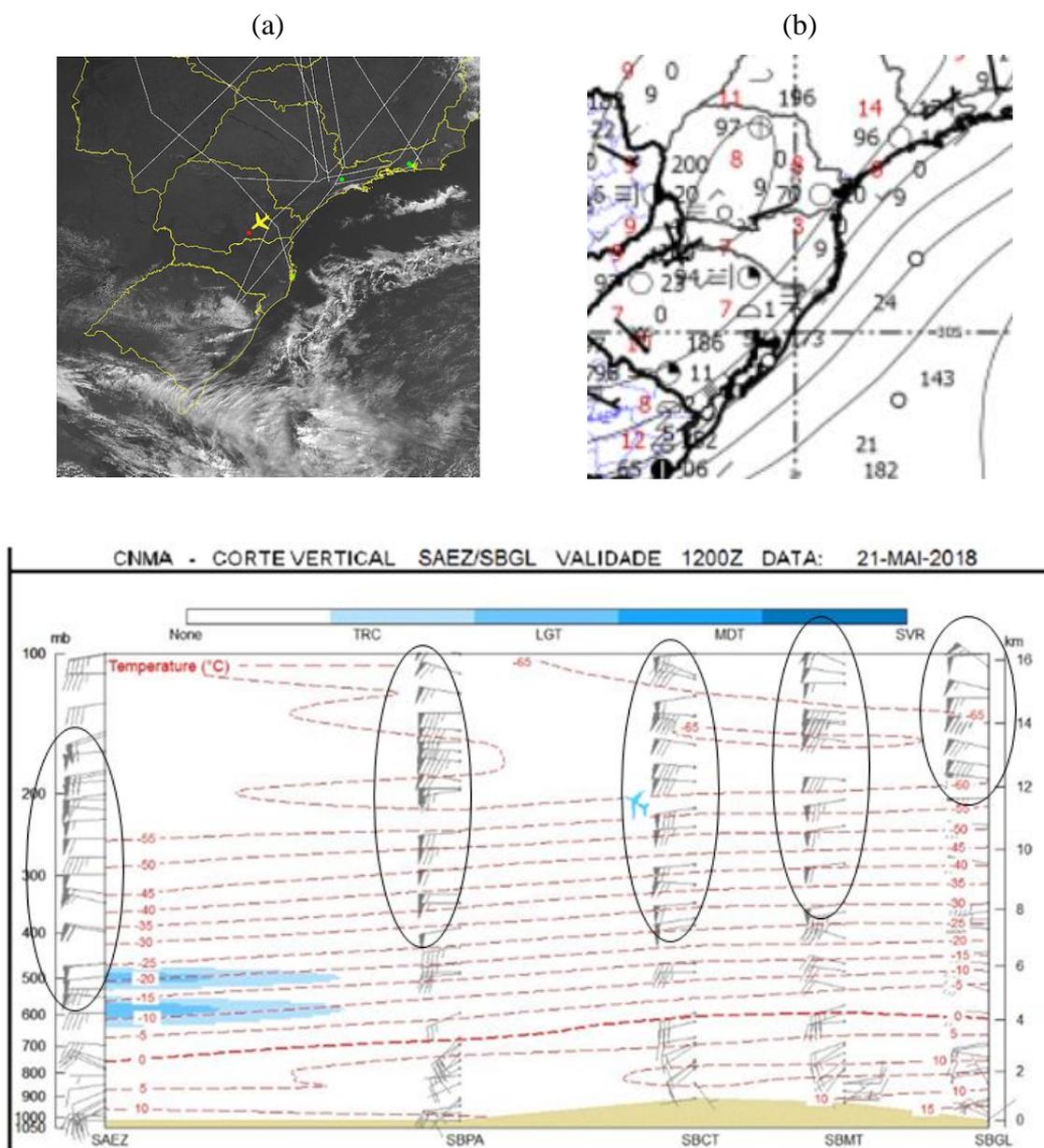


Figura 5.19 - (a): Posição exata da turbulência, indicada pelo avião amarelo, cruzando FL380 canal 13 visível, Fonte: INPE, figura 5.19 (b): Análise de superfície do dia 23/04/2018. Fonte: REDEMET e figura 5.19 (c) Corte vertical de Buenos Aires (SAEZ) ao Rio de Janeiro (SBGL) apresenta forte corrente de jato de SAEZ até SBGL. Fonte: REDEMET.

Seguindo o próximo passo, o cálculo dos índices indicadores de turbulência e compostos, usando dados de análise do GFS para período do voo.

As Figura 5.20 apresentam o corte vertical latitudinal onde as ordenadas estão em hPa e as abscissas em latitudes, as posições marcadas em pontos pretos são as indicações da variação vertical da força G (VRTG), respectivamente os dois compostos definido, ou seja, (1) perfil do vento, Θ , e TKE fig. 5.20(a) e (2) Ri e W fig. 5.20(b), determinado com dados GFS0,25° para 18Z (horário mais próximo da observação do VRTG, 17Z). Observa-se na região do retângulo (linha vermelhas tracejadas) o comportamento do perfil do vento (da base ao topo) não difere em magnitude das observações VRTG apresentadas e conseqüente assim o cisalhamento é estimado.

Composto (1), a TKE de [900; 1000] $m^2.s^2$, região do núcleo que está à esquerda da região tracejada. O comportamento da temperatura potencial (Θ) apresentou-se menos espaçadas no topo da região tracejada, provavelmente, porque está próximo ao núcleo e um desprendimento de energia sobre essa região. Em resumo, análise mostra que compostos dão indícios da presença de CAT a 38000 pés, estimados nas observações.

No composto (2), os valores de Ri variam aproximadamente dentro do retângulo (linha vermelhas tracejadas) de [0; 5], não sendo indícios na indicação de CAT, visto que $Ri \leq 0,25$ são desejados e foi representado na região logo abaixo na região tracejada e W apresentou valores próximos à zero (linha vermelhas tracejadas).

De forma similar, a Figura 5.21, a tabela: as colunas C1 e C2 e as linhas 18, 6 e 2 Km ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km. Os perfis de vento simulados mostram um cisalhamento mais acentuado e posiciona o jato de forma similar as observações, conforme Fig. 5.19(c); a TKE onde na região da posição (dentro do retângulo linha vermelhas tracejadas) apresentou valores de [900; 1000] $m^2.s^2$; Θ apresentou o mesmo comportamento do GFS; os valores de Ri com valores de [0; 1], logo, apresentou próximos $Ri \leq 0,25$ e W variando em valores positivos e negativos. Assim, podemos talvez afirmar que o aumento da resolução espacial (x, y e z), exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.*, (2010), reproduziram as condições atmosféricas de forma mais fidedigna das observações de CAT.

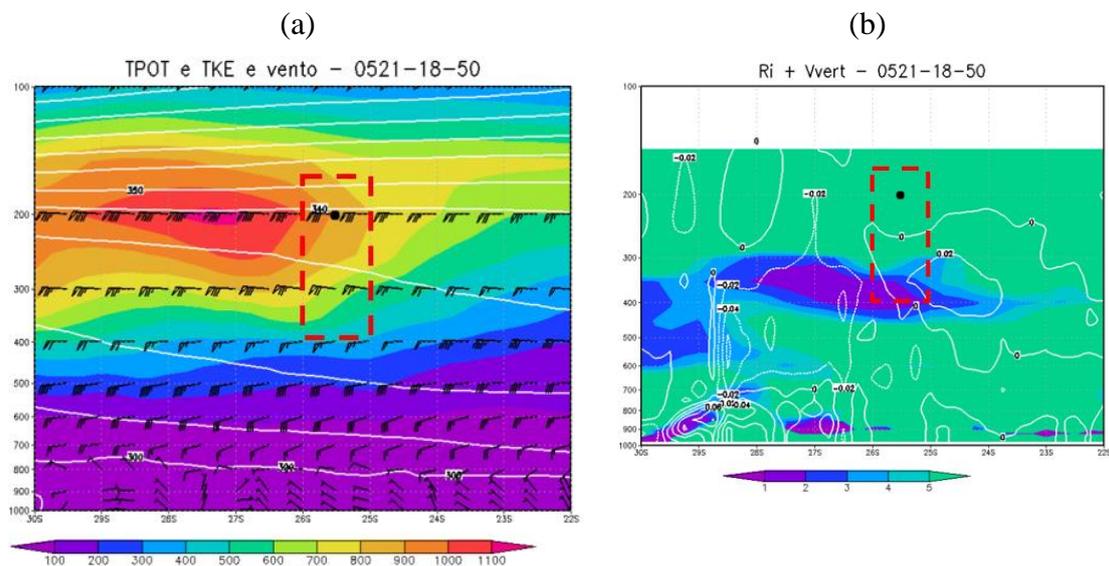


Figura 5.20 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas laranja clara aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva laranja escura com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$) e composto C2: perfil do vento, Θ , Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 18Z do dia 21 de maio de 2018.

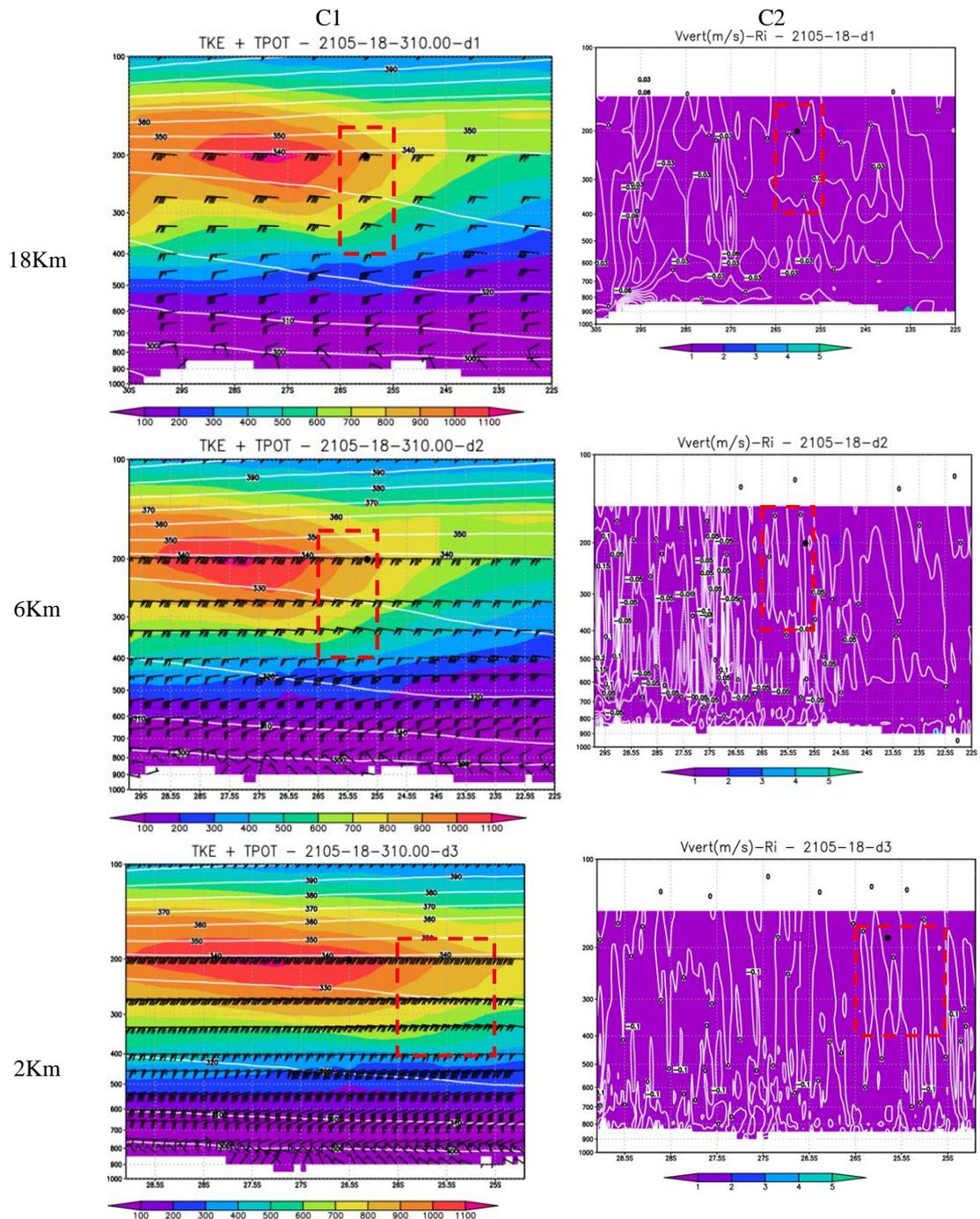


Figura 5.21 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas

cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$. C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 18Z do dia 21 de maio de 2018.

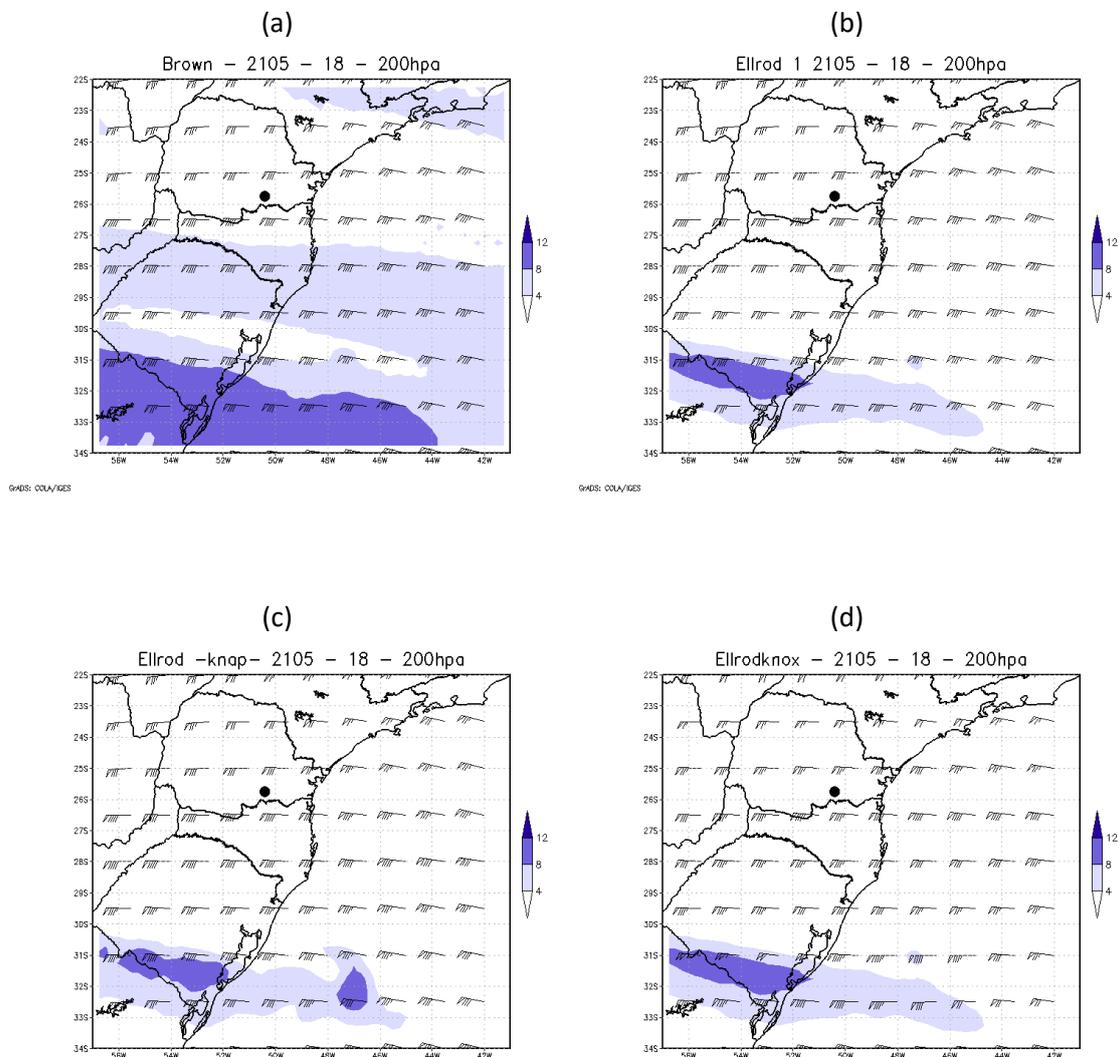


Figura 5.22 - (a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 200 hPa às 17Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do V RTG às 18Z do dia 21 de maio de 2018.

5.2.5 Caso V

Este reproduz os dados do voo LATAM de Guarulhos para Santiago do Chile em 27 de março de 2019. Na Tabela 5.6 é apresentado a data, período (H), fase do voo (subida/em rota/descida), classe da CAT, coordenada geográfica do registo e o trecho do voo.

Tabela 5.6 - Dados de registro da VRTG do voo do Caso V.

Data	horário Z	fase	classe	long	lat	altitude	origem	destino
27/03/2019	11	cruise	class 3	-49,245	-25,1175	38503	GRU	SCL
27/03/2019	11	descent	class 1	-47,431	-25,1367	31784	POA	CGH
27/03/2019	11	descent	class 1	-46,902	-24,3817	18264	NVT	CGH

Fonte: LATAM.

A Figura 5.24 (a) ilustra as aerovias nas cores brancas, a posição exata do dado automático observado de VRTG do avião (amarelo) às 11Z está sobre o estado do Paraná, sentido Rio Grande do Sul, região sul do Brasil. As condições atmosféricas apresentaram durante o voo, céu claro acima de 3500 mil pés sobre a região sul, conforme os metares da estação de Florianópolis e Curitiba e, também, ilustra a visualização dos rios bem nítidos na imagem visível e nuvens na forma de bandas, ondas e estrias, confirmando o cisalhamento de vento devido a corrente de jato anticiclônico, atuando sobre Paraná e São Paulo:

METAR SBFL 271100Z 20004KT 9999 SCT030 23/20 Q1017=

METAR SBCT 271100Z 10003KT 8000 BKN003 OVC006 18/17 Q1022=

METAR SBFL 271200Z 31006KT 9999 SCT035 22/19 Q1018=

METAR SBCT 271200Z 10004KT 9999 BKN004 OVC009 18/18 Q1022=

Nesse caso, a corrente de jato e o centro de 1024 hPa da alta pressão bem pronunciado, atuando sobre o oceano Atlântico próximo ao Uruguai, bloqueando a possibilidade de chegada uma de frente, ilustrada na carta de superfície figura 5.24(b).

A corrente jato de curvatura anticiclônica encontra-se de Buenos Aires (SAEZ) até o Rio Janeiro (SBGL) com a velocidade do vento entre 50 a 90 nós (150 a 270 Km/h), apresentando em quase toda extensão sul e sudeste do Brasil e a posição do avião (dado

observado do VRTG) entre a abscissa SBCT e SBPA a velocidade do vento está entre 80 a 90 nós (240 a 270 km/h), conforme o corte vertical fig 5.24(c).

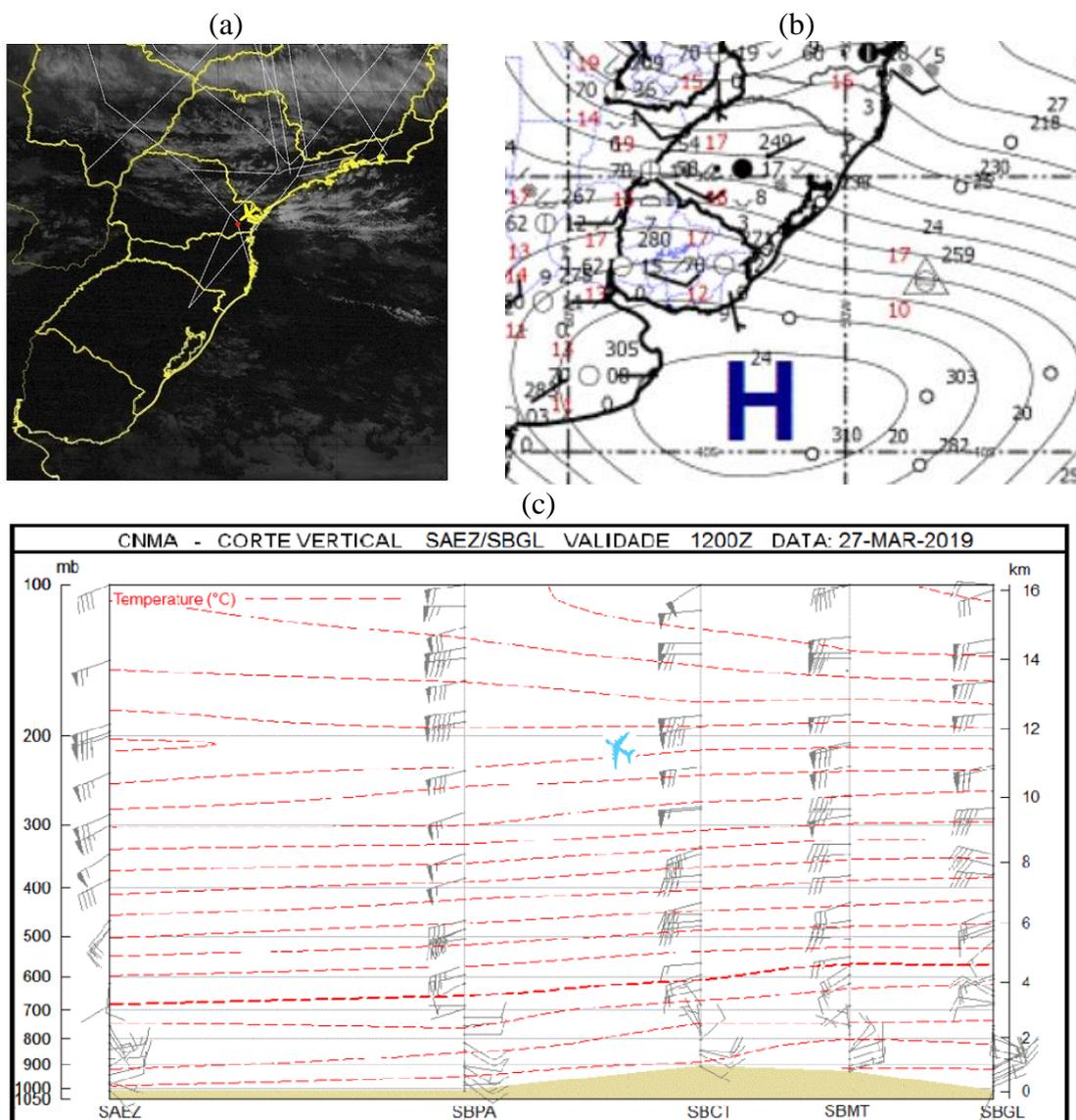


Figura 5.24 - (a): Posição exata da turbulência, indicada pelo avião azul, cruzando FL380 canal 13 visível, Fonte: INPE, Figura 5.41 (b): Análise de superfície do dia 27/03/2019. Fonte: REDEMET e figura 5.41 (c) Corte vertical de Buenos Aires (SAEZ) ao Rio de Janeiro (SBGL) apresenta forte corrente de jato de SAEZ até SBGL. Fonte: REDEMET.

Seguindo o próximo passo, o cálculo dos índices indicadores de turbulência e compostos, usando dados de análise do GFS para período do voo.

As Figura 5.25(a-b) representam o corte vertical latitudinal a 49°W onde as ordenadas representam a pressão atmosférica em hPa versus a latitude entre 30°S a 24°S.

As posições marcadas em pontos pretos são as indicações VRTG (classe 3) registrados, sobre o campos das variáveis dos composto, ou seja, C1: perfil do vento (barbelas), Θ (valores representado pelas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo]100;1000[$m^2.s^2$ fig. 5.25(a) e C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curva branca com valores negativo e positivo) fig.5.25(b), determinado com dados GFS0,25° para 12Z (horário mais próximo da observação do VRTG registrado de 11:01Z até 12Z). Observa-se na região do retângulo (linha vermelhas tracejadas) o comportamento do perfil do vento (da base ao topo), gerado pelo GFS0,25, é bastante similar quanta direção do escoamento e magnitude, e claramente que há cisalhando e conseqüentemente indica um estado turbulento da atmosfera na região do retângulo definido, onde houve o registro do VRTG. O valores TKE variam aproximadamente na área de observação no intervalo de [200; 1000[$m^2.s^2$ que corrobora com indicador de CAT. O comportamento de Θ apresentou um menor espaçamento entre as linhas acima da região tracejada, ou seja, houve variações de turbulência acima daquela região; W apresentou com valores próximo a zero. Logo, neste caso não foram referência como indicadores de CAT. Já Ri entre 0 e 1. Este último, segundo Miles e Howard (1964), $Ri \leq 0,25$ é indicador de CAT.

De forma similar, as Figuras 5.26 (a), (b) e (c) ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km. A exemplo da análise anterior, na área de observação, os perfis de vento simulados mostra um cisalhamento mais acentuado e posiciona o jato de forma similar as observações, conforme Fig. 5.24(c); a TKE varia em intervalo maior do que o anterior de [100; 1.000[$m^2.s^2$; Ri com valores inferior a 1 em todo o perfil e W variando de valores negativos a positivos. Assim, podemos talvez afirmar que o aumento da resolução espacial (x, y e z), exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.*, (2010), reproduziram as condições atmosféricas de forma mais fidedigna das observações de CAT.

As figuras 5.27 e 5.28 representam respectivamente as previsões dos índices *Brown*, *Ellrod 1*, *Ellrod 2 (Knap)* e *Ellrod 3 (Knox)* sobre a área de estudo em 250 hPa com valores de 4 a $12 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ do GFS0,25 às 12Z e WRF (200/250 hPa) às 11Z (com as resoluções 18 km, 6 km e 2 km). Observa-se que os índices dos dois modelos, independente da resolução, geram valores dos índices levemente favoráveis no GFS à

indicação de CAT e no WRF os no volume da atmosfera que circunda os registros dos VRTG no dia em questão.

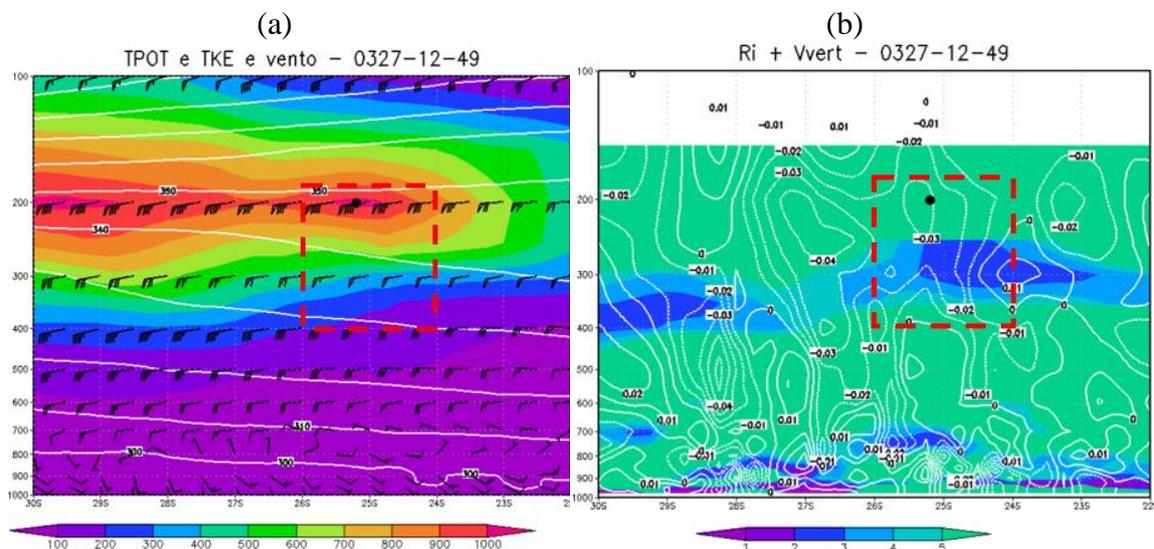
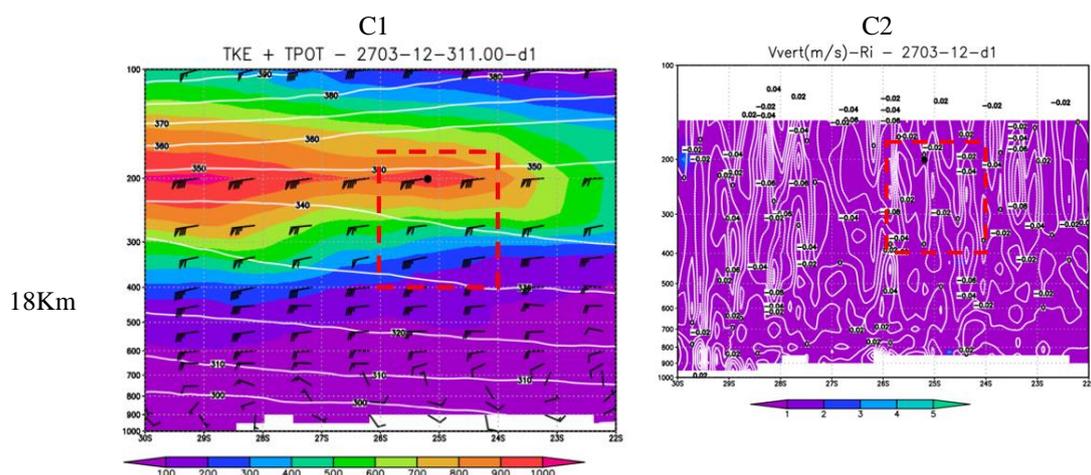


Figura 5.25 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), W (curva branca com valores negativo e positivo), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $\text{m}^2.\text{s}^2$ e composto C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W determinado com dados GFS0,25 das 12Z do dia 27 de março de 2019.



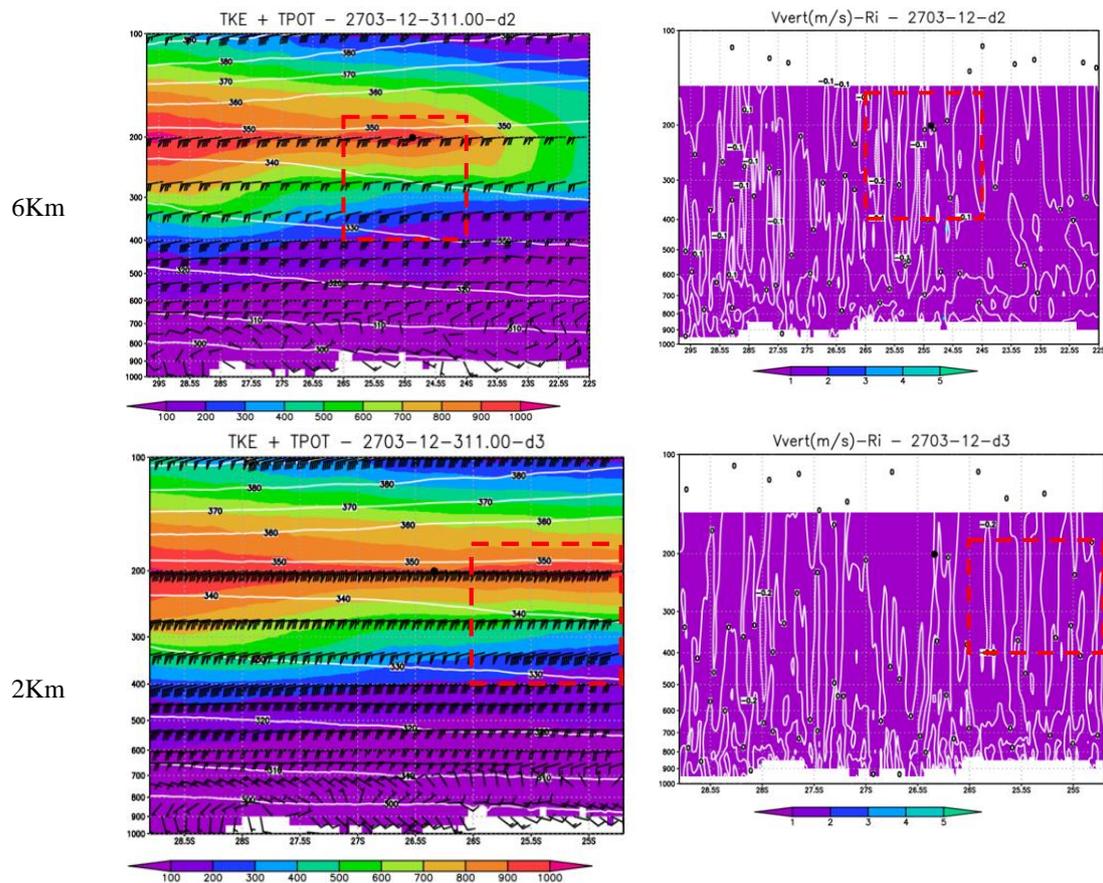


Figura 5.26 - As colunas 1 e 2 respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^2$). C2 representa W (curva branca com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF pelas linhas 18 km, 6 km e 2 km das 12Z do dia 27 de março de 2019.

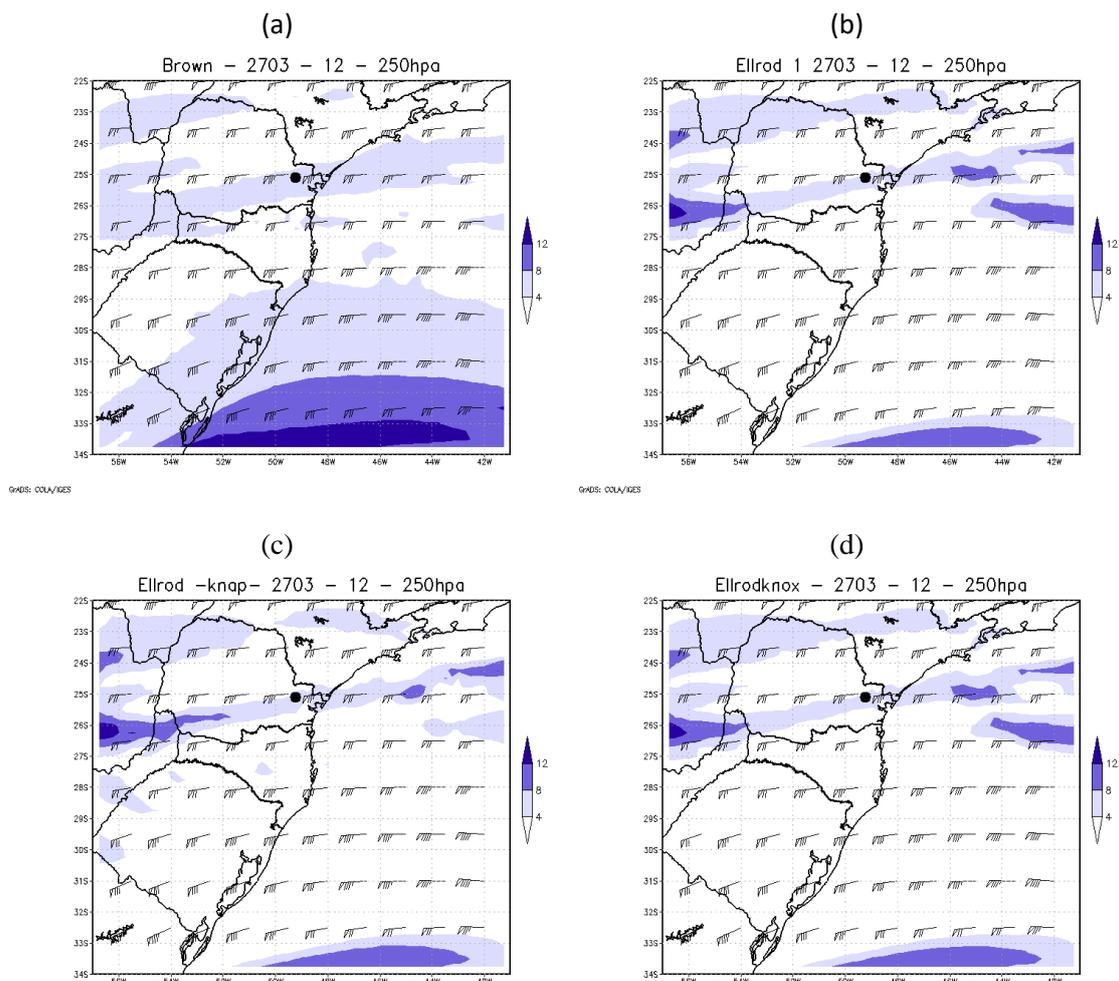


Figura 5.27 - a), (b), (c) e (d) representam respectivamente as previsões GFS0,25 dos Índice de B, E-1, E-2, e E-3 250 hPa às 12Z. O ponto preto indica aproximadamente a posição da aeronave durante o registro do VRTG às 12Z do dia 27 de março de 2019.

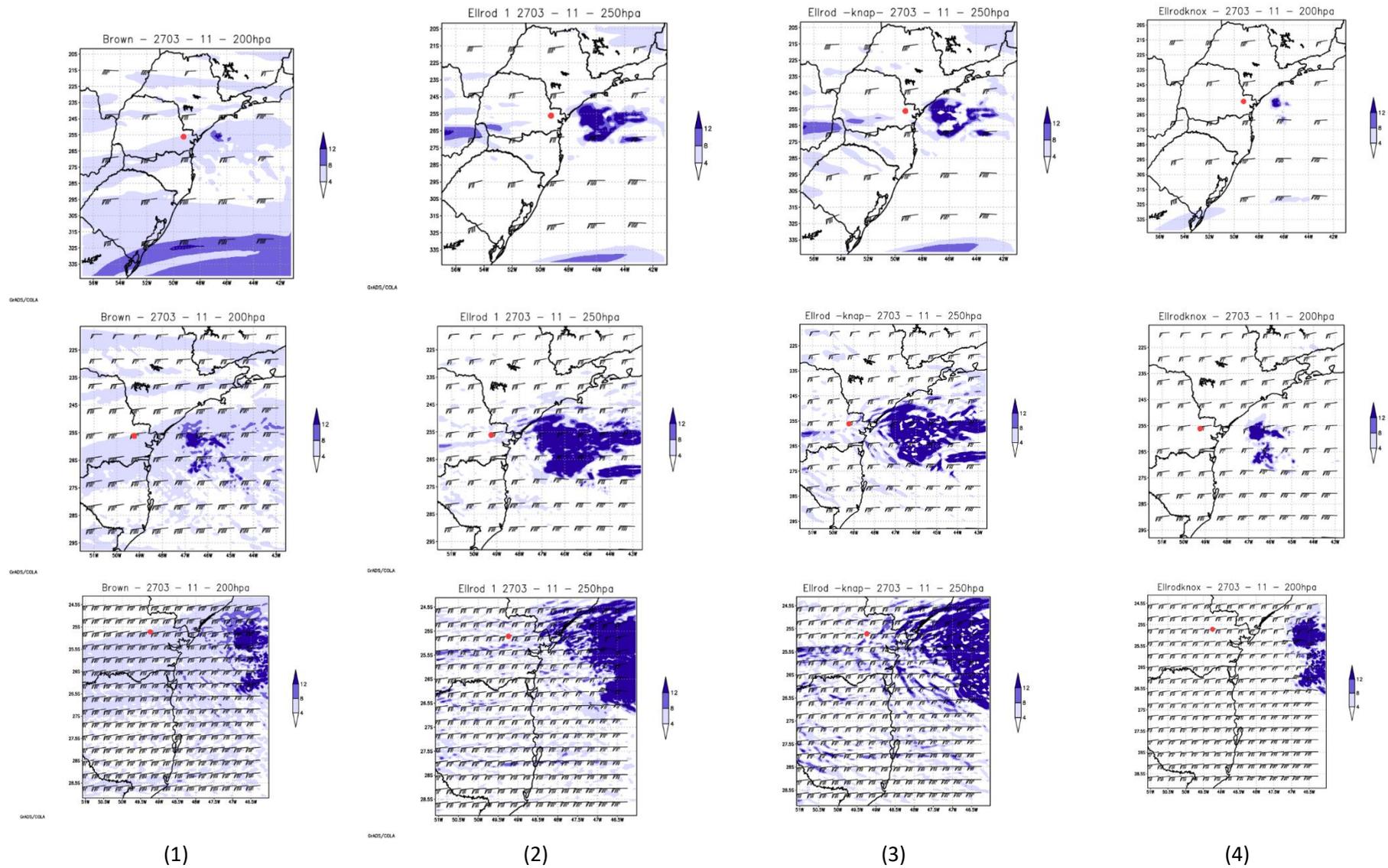


Figura 5.28 - Coluna (1), (2), (3) e (4) representam respectivamente os valores previstos dos índices B, E-1, E-2 e E-3, e de cima para baixo, correspondentes as simulações com WRF no nível de 200/250 hPa com 18 km, 6 km e 2 km das 11Z do dia 27 de março de 2019.

Em suma, observa-se, conforme a tabela 5.6 que os resultados são satisfatórios, utilizando os perfis 1 e 2 e os índices para a região de estudo.

Na Tabela 5.7 são apresentados resultados das análises dos índices quanto a representar as condições de uma atmosfera turbulenta na circunvizinhança dos registros de VRTG, ou seja, onde os índices variam dentro dos seguintes intervalos $Ri = [0; 0,25]$ (Miles e Howard, 1964), $Brown = [4,0 \cdot 10^{-6}; 12 \cdot 10^{-6}] \text{ m/s}$ (Roach, 1970) $E-1 = [4,0 \cdot 10^{-6}; 12 \cdot 10^{-6}] \text{ m/s}$, $E-2 = [4,0 \cdot 10^{-6}; 12 \cdot 10^{-6}] \text{ m/s}$, $E-3 = [4,0 \cdot 10^{-6}; 12 \cdot 10^{-6}] \text{ m/s}$ (Willians, 2018). Observa-se o índice Brown foi capaz de identificar a totalidade dos eventos de VRTG independente do modelo e/ou resolução espacial utilizada. O aumento de resolução com uso do WRF fez com que o número de Ri aumentasse a sua eficiência de detecção de VRTG de 66%, com GFS0,25, para 100%. Os índices E-1, E-2 e E-3 determinados pelo GFS0,25 e WRF possuem, respectivamente, médias conjuntas de acertos dos VRTG similares e iguais a 0,73% e 0,74%. Em suma, o aumento da resolução nas simulações com uso do WRF melhorou conjuntamente a eficiência dos índices de detecção das condições de atmosfera turbulenta de 78% (com GFS) para 84% (com WRF), considerando 23 eventos de VRTG dos cinco casos analisados.

Tabela 5.7 - Percentual de acerto dos índices Ri , Brown, E-1, E-2 e E-3 (GFS0,25 e WRF) versus os registros de VRTG dos cinco casos estudados.

Caso	Data	Nível de voo	Modelo	GFS					WRF					
			Quant.VRTG	Ri	B	E-1	E-2	E-3	Ri	B	E-1	E-2	E-3	
I	23/04/2018	FL320	5	20%	100%	100%	80%	100%	100%	100%	100%	80%	100%	100%
II	29/09/2018	FL330	8	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	88%	100%	100%
III	18/05/2018	FL150	4	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
IV	21/05/2018	FL380	3	33%	100%	0%	33%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
V	27/03/2019	FL380	3	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	33%
			Média de acerto	66%	100%	80%	83%	60%	100%	100%	74%	80%	67%	

5.3 ANÁLISE QUANTITATIVA

Os dados de VRTG podem corroborar, também, a um estudo quantitativo. Desse feito, esta análise representa a obtenção do limite classificador ótimo por índice (LIMITEclas(i)), ou seja (1) Brown, (2) Ellrod e (3) Ellrod Knap, que são calculados a partir das saídas do WRF nos 3 domínios (18, 6 e 2km) de T-1h a T+1h (correspondente ao registro do horário do VRTG) e níveis (em hPa) com espaçamento de ± 50 hPa da altitude, visando a análise do volumétrica dos dados no entorno dos registros de cada VRTG (dia, horário, latitude, longitude e a altitude).

Desta forma, os valores dos índices com dados do WRF, com resoluções de grade de 18, 6 e 2 km para os dois níveis (acima e abaixo dos registros VRTG, com espaçamento de ± 50 hPa), foram associados aos dados de VRTG para os dias 27 de março de 2019, 23 de abril de 2018, 18 de maio de 2018, e 21 de maio de 2018, resultando em 5215 eventos. Os LIMITEclas(i) ótimos para os índices foram aqui determinados via os passos vi e vii do método, e utilizando dados referentes aos dias 18 de maio de 2018 e 27 de março de 2019 e realizando o seguinte:

- a) Calculou-se a média e desvio padrão para cada índice para as três grades mencionadas dos dados modelados;
- b) Seguindo método, atribui-se o valor de n aleatoriamente e observa o percentual de acerto, conforme para cada incremento definido no passo vi do método. Assume-se que o valor LIMITEclas(i) ótimo é aquele que a classifica corretamente 80% ou mais dos eventos de VRTG até que o valor limite classificador ótimo por índice seja obtido. As Figura 5.29 (a), (b) e (c) apresentam variação do fator do limite classificador (que é definido no passo vi do método) versus o percentual de classificação correta das observações de VRTG pelos índices B (Fig. 5.29(a)), E-1 e E-2, respectivamente. Os valores dos LIMITEclas(B), LIMITEclas(E-1) e LIMITEclas(E-2) ótimos são iguais a 3,82, 1,37 e 1,91, correspondentes aos fatores de 2,5, 1,2 e 1,2, respectivamente, considerando os eventos de VRTG nos dias nos dias 27/03/19 e 18/05/2018.
- c) Finalmente, testou-se separadamente todos os três limites ótimo calculados a partir dos dados WRF de todas as grades (18, 6 e 2 km), em 23 de abril de

2018 e 21 de maio de 2018 obtidos anteriormente versus os eventos de VRTG. Os resultados preliminares mostraram que os índices ajustados de B, E-1 e E-2 foram capazes de classificar 0,96, 0,96 e 0,99% dos eventos de VRTG.

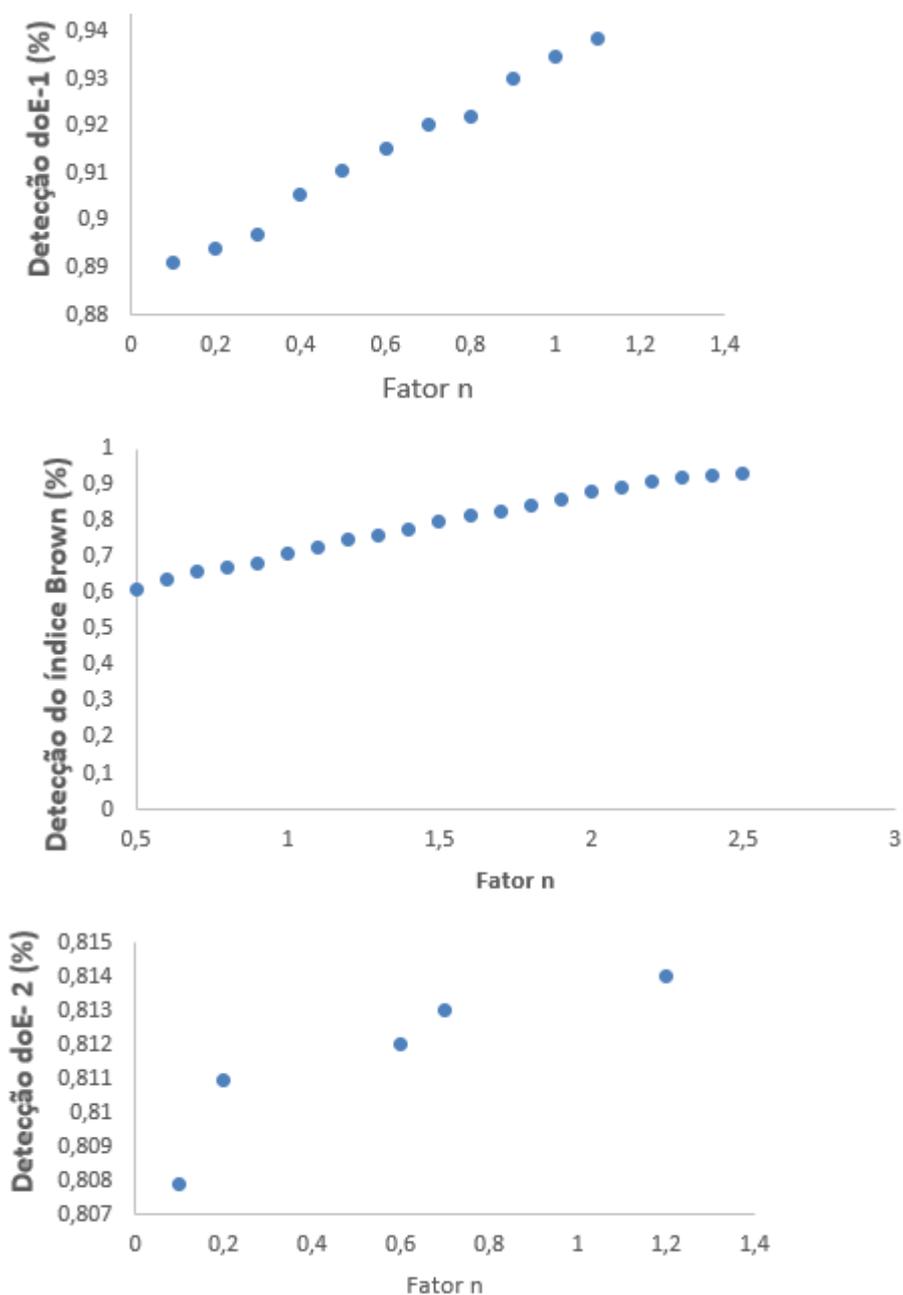


Figura 5.29 - Variação n -intervalos do fator, definido no passo vi do método, dos índices (a) Brown, (b) Ellrod e (c) Ellrod Knap obtidos dos dados WRF de todas as grades (18, 6 e 2 km) versus percentual de acerto das observações de VRTG nos dias 27/03/19 e 18/05/2018.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho visou analisar as respostas dos quatro índices, isto é, (1) Brown, (2) Ellrod, (3) Ellrod Knap e (4) Richardson, calculados a partir das previsões do GFS0,25° e do WRF, para caracterização do estado termodinâmica atmosféricos durante as ocorrências de CAT, registradas pelas aeronaves da LATAM para a região sul do Brasil.

Os objetivos específicos foram alcançados com o teste e com o ajuste para a região estudada, bem como a validação desses ajustes realizados para um período independente do utilizado para no teste. Com o cumprimento desses objetivos foi possível alcançar o objetivo geral da pesquisa que foi o de desenvolver um modelo preditivo de CAT para a região sul do Brasil, detectando indícios de eventos de CAT, com uma antecedência, utilizando o limite classificador do índice i , ($LIMITE_{clas}(i)$) de CAT testando, via tentativa e erro, para n -intervalos de valores do índice i , considerando dados observacionais de VRTG do airbus e as previsões geradas por modelos atmosféricos GFS (025°) WRF (18, 6 e 2 km), configurado para a região sul do Brasil.

Os resultados revelaram, quantitativamente, que os valores dos $LIMITE_{clas}(Brown)$, $LIMITE_{clas}(Ellrod)$ e $LIMITE_{clas}(Ellrod Knap)$ iguais a 3,82, 1,37 e 1,91, correspondentes aos fatores de 2,5, 1,2 e 1,2, são respectivamente aqueles que obtiveram os melhores desempenhos em classificar os eventos de VRTG nos dias nos dias 27/03/19 e 18/05/2018. E, assim, estes valores são aqui considerados os valores ótimos. Finalmente, testou-se separadamente todos os limites ótimo versus 492 eventos que correspondem os valores dos índices, calculados a partir dos dados WRF de todas as grades (18, 6 e 2 km), em 23 de abril de 2018 e 21 de maio de 2018. Os resultados mostraram que os índices ajustados de *Brown*, *Ellrod* e *Ellrod Knap* foram capazes de classificar 0,96, 0,96 e 0,99% (ou conjuntamente aproximadamente $0,97 \pm 0,01$) dos eventos. Os resultados, qualitativamente dos perfis 1 (TKE) e 2 (Ri) indicaram indícios de CAT para os cinco casos e os índices todos indicaram a CAT para os três primeiros casos, todavia para o caso IV somente o índice Brown foi referência. O motivo disso possa ser que o parâmetro vorticidade absoluta influenciou para simular a CAT já que os outros índices não apresentam aquele parâmetro. O caso V somente o índice *Ellrod Knox* (com a inclusão do parâmetro divergência) não apresentou satisfatoriamente como índice CAT.

Visto as necessidades operacionais dentro de um salão operacional, o modelo preditivo aqui estabelecido poderá ser utilizado pelos meteorologistas como ferramenta objetiva para emissão das mensagens de alertas de CAT e, assim, corroborar de forma assertiva para o gerenciamento de fluxo aéreo em rota. Como passo futuro, pretende-se estender a amostra de dados analisados, visando uma consistência estatística dos resultados.

7 REFERÊNCIAS

BITAR, I., 2015: **Climatologia e estudo de caso da turbulência de céu claro a partir de registros de aeronaves**: análise de dados observacionais e de modelagem. Sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.13.04.06-TDI .

BROWN, B. G.; YOUNG, G. S. **Verification of icing and turbulence forecasts: Why some verification statistics can't be computed using PIREPs**. IN: NINTH CONFERENCE ON AVIATION, RANGE, AND AEROSPACE METEOROLOGY Orlando, FL: American Meteorological Society, 2000.

BROWN, R. **New indices to locate clear air turbulence**. Meteorological Magazine, 102, 347-361. 1973.

DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Publicações de Informações Aeronáuticas. AIC-N**. Rio de Janeiro, 2018. OK

DUTTON, J. A.; PANOFSKY H. A., 1970: **Clear air turbulence: A mystery may be unfolding**. Science, 167, 937–944. OK

ELLROD, G. P.; LESTER P.F. e EHERNBERG .J, 2002: **Clear Air Turbulence**. Encyclopedia of the Atmospheric Sciencers, Academic Press, 393-403.

Ellrod, G. P., 1985: **Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data**. NOAA Tech. Memo. NESDIS 10, 30 pp.

ELLROD, G. P.; KNAPP D.I.; 1992: **An objective Clear Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and operational use**. Weather and Forecasting 7(1): 150-165.

ELLOD, G. P.; KONX J. A., 2010: **Improvements to an Operational Clear-Air Turbulence Diagnostic Index by Addition of a Divergence Trend Term**. Use in American Meteorological Society. April, 2010.

ENDLICH, R. M., 1964: **The mesoscale structure of some regions of clear air turbulence**. J. Appl. Meteor., v.3, 261-276.

FRITTS, D. C. e ALEXANDER, M. J.: **Gravity dynamics and effects in the middle atmosphere**, Rev. Geophys., 41, 1003,doi:10.1029/2001RG000106, 2003.

GILL, P. G. e BUCHANAN, P. (2014) **An ensemble based turbulence forecasting system**. Meteorological Applications, 21(1), 12–19.

GULTEPE, I. et al. **A review of high impact weather for aviation meteorology**. Pure Appl. Geophys. 2019, 176, 1869–1921.OK

HOLTON, J. R.: **The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere**, J. Atmos. Sci., 39,791–799, 1982.

HOPKINS, R. H. **Forecasting techniques of clear-air turbulence including that associated with mountain waves.** Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO), 1977. No. 482, technical note no. 155.

ICAO, International Civil Aviation Organization Invironmental: Report 2016, **Aviation and Climate Change**: Produced by the Environment Branch of the International Civil Aviation Organization (ICAO).

KAPLAN, M. L., LIN Y. L., RIORDAN A. J., LUX K. M.e HUFFMAN A. W. 2005 a,b: Observacional and numerical simulation-derived factors that characterize turbulence accident environments preprints. **9th AMS Conference on Aerospace Range and Aeronautical Meteorology.** Sep. 2000.

KAY, M.P. et. al. **Quality Assessment Product Development Team: Graphical Turbulence Guidance, Version 2.3.** In: AVIATION WEATHER TECHNOLOGY TRANSFER (AWTT) TECHNICAL REVIEW PANEL, 2006.

KELLER J. L., 1990: **Clear air turbulence as a response to meso- and synoptic-scale dynamic processes.** Mon. Wea. Rev., 118, 2228-2242.

KIM J.-H. e CHUN, H.-Y. A. Numerical Study of Clear-Air Turbulence (CAT) Encounters over South Korea on 2 April 2007, **Journal of applied meteorology and climatology**, v.49, n.12, p.2381-2403,1 dez 2010.

KNOX, J. A., 1997: **Possible mechanisms of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flow.** Mon. Wea. Rev., 125, 1251–1259.

LATAM. In: **Verical Acceleration High in Flight.** [S.I:s.n].p 485-486, 01dez.2019..

LYRA, CHAN e PEREIRA, **Indicadores de Turbulência a partir de previsões do modelo regional ETA.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.22, n.2, 161-182, 2004.

LEE, D. R., STULL R. S. e IRVINE W. S., 1984: **Clear air turbulence forecasting techniques.** **Air Weather Service Tech.** Note AFGWC/TN-79/001 (REV), Air Force Global Weather Central, Offutt AFB, NE, 16 pp.

LESTER, P. F. **Turbulence: a new perspective for pilots.** [S.I.]: Jeppesen Sanderson, 1994. p.212.

LILLY, D.K. **Turbulence in troposphere and stratosphere.** In: FAA Symposium on Turbulence, 1978, Washington, D.C. Proceedings Washington: FAA, 1978.

MANCUSO R.L e ENDLICH; R. M. **Clear air turbulence frequency as a function of wind shear and deformation.** Mon. Wea. Rev., 95, 581-585, 1966.

MILES, J.W., e HORWARD L.N., 1964: **Note on a heterogeneous shear flow.** J.Fluid Mech., 20, 331-336.

MARROQUIN, A., 1998: **An advanced algorithm to diagnose atmospheric turbulence using numerical model output**. Preprints, 16th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 79–81.

MCLEAN, J. C., 1986: **Comments on the problem of turbulence in aviation**. Proc. Of Workshop on Atmospheric Turbulence Relative to Aviation, Missile and Space Programs, NASA Langley Research Center, NASA Conf. Publication 2468, 53pp.

MEDEIROS, A. F. **Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência**. 2001. 187p. (INPE-10478-TDI/932). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.

OACI, **Organização da Aviação Civil Internacional, 1990**: Plano de Navegação Aérea Global.

Pantley, K. C. e P.F. Lester, 1993: **Observations of severe turbulence near Thunderstorm tops**. J. Appl. Meteor., v.29, 1171-1179.

ROACH, W. T. **On the influence of synoptic development on the production of high level turbulence**. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. v.96, p.413-429, 1970.

SHARMAN R. D. e PEARSON. M.; 2016: **Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence**. Part I: Forecasting Nonconvective Turbulence. National Center for Atmospheric Research, 2016.

TRIER, S. B., e R. SHARMAN, 2016: Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. Mon. Wea. Rev., 144, 3003–3027, doi:10.1175/MWR-D-16-0094.1.

STORER, L.N., GILL, P.G. e WILLIAMS, P.D. (2018a) **Multi-model ensemble predictions of atmospheric turbulence**. *Meteorological Applications*, 26(3), 416–428. <https://doi.org/10.1002/met.1772>.

SHARMAN, R.D. e PEARSON, J.M. (2017) **Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence**. Part I: Forecasting 14 of 15 Storer et al. nonconvective turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 317–337.