

Artigo

Turbulência de Ar Claro no Sudeste do Brasil: Estudo de Casos

Francisco Pinheiro Gomes¹ , Gutemberg Borges Franca¹, Antonio Vicente Pereira Neto¹¹*Laboratório de Meteorologia Aplicada, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

Recebido em: 16 de Abril de 2021 - Aceito em: 2 de Dezembro de 2021

Resumo

Analisa-se a aplicabilidade dos índices clássicos, numericamente modelados, indicadores de condições atmosféricas turbulentas para previsão de turbulência de céu claro (CAT) na região sul do Brasil. Os eventos foram reconstruídos usando 25.465 mensagens de CAT, denominado de AIREP (Air-Report), de 2015 a 2019, e 12.959 observações *in-situ* da aceleração vertical da gravidade (VRTG) registrados pelas aeronaves de fevereiro de 2018 a dezembro de 2019. Os registros de CAT via VRTG mostraram que os eventos turbulentos são proporcionalmente distribuídos (em parênteses a sua severidade) em 94% (leve), 4% (moderada) e 1% (severa) na região de estudo. As análises sinóticas de 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 modelados pelos modelos GFS0,25 e WRF (com grade de 18, 6 e 2 km), 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 a previsão de CAT. Análises da resposta dos índices modelados versus capacidade destes em representar as condições de uma atmosfera turbulenta, na circunvizinhança dos registros de VRTG, é calculada e se observou que o índice Brown foi o mais eficiente para tal, uma vez 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 do WRF são bastante promissores, visto que os três índices ajustados foram capazes de detectar, respectivamente, 96%, 96% e 99% da previsão de eventos de CAT, com 12 horas de antecedência nos dias 21 de maio de 2018 e 27 de março de 2019.

Palavras-chave: turbulência de céu claro, índices de CAT, simulações modelos WRF, AIREP.

Air Clear Turbulence in the Southern Brazil: study Cases

Abstract

This analyzes the classic indexes modeled numerically to predict turbulence in the southern region of Brazil. Historical clear sky turbulence (CAT) events were reconstructed by using 25.465 AIREP messages, from 2015 to 2019, and 12.959 CAT records by aircraft from February 2018 to December 2019. The observations have shown that CAT events are proportionally distributed (in parentheses, its severity) in 94% (light), 4% (moderate), and 1% (severe). Synoptic analyses of five cases studied reveal that turbulence records occurred during clear sky conditions in the presence of a jet stream. Three joint analyses of the compositions of the variables modeled by GFS0.25 and WRF (18, 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. The response of the modeled indices is compared to their capacity to characterize the circumstances of a turbulent atmosphere in the vicinity of the VRTG records, and it was revealed that the Brown index was the most efficient for this, able to identify 100% of the five cases examined. The results of an initial attempt to adjust the CAT prediction indices (Brown, Ellrod-Endlich, and Ellrod-Knap) using modeled WRF data are reasonably promising, as the three adjusted indices detected 96%, and 99% of CAT event forecast 12 hours in advance on May 21, 2018 and March 27, 2019.

Keywords: clear air turbulence, CAT index, WRF model simulations, AIREP.

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 (Endlich, 1964; Dutton and Panofsky, 1970; Lilly, 1971; Brown, 1973; Lee *et al.*, 1984; McLean, 1986; Ellrod and Knapp, 1992; Clark, 1997; Marroquin, 1998; Kaplan *et al.*, 2000; Ellrod *et al.*, 2010; e Sharman, *et al.*, 2017), este fenômeno continua a ser um risco para a aviação. A turbulência é uma propriedade da maioria dos fluidos (líquido e gás) encontrados na natureza. Talvez o melhor exemplo de escoamento turbulento é o encontrado na atmosfera onde aqueles que voam podem experimentar balanços extremos que afetam a segurança da aeronave. Felizmente, os voos em uma atmosfera turbulenta ainda são menos frequentes na proporção de 1 a cada 20, segundo Lester (1990). Lester (1994) define turbulência como o estado do fluido onde a velocidade é caótica e aparentemente randômica. Na aviação, em particular, o conceito de turbulência está relacionado à resposta da aeronave (ou solavancos sofridos). Segundo o plano de navegação aérea global da Organização da Aviação da Civil Internacional (ICAO), o número dos voos vem duplicando desde 1977 em intervalos de 15 anos (ICAO, 2016) e em recente estudo realizados por Gultepe *et al.* (2019), conclui-se que a turbulência de céu claro (CAT) foi responsável por mais de 70% dos incidentes aéreos globais no período de 2000 a 2011. Em particular, na região de voo - controlada pelo centro de controle da navegação aérea de Curitiba, denominada FIR Curitiba (ou flight region Curitiba), representada na Fig. 1, se localizam os principais aeroportos do país, com exceção do aeroporto de Brasília, e nesta ocorreram 488.743 voos em 2018 (que representa uma média mensal de 40.000 voos) segundo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA, 2018). Na referida FIR, as aeronaves A320 da empresa LATAM registraram 12.959 eventos de CAT no período de 2018 a 2019, que estão espacialmente representados pelos círculos na Fig. 1. Segundo Lyra *et al.* (2007), o espaço aéreo da FIR Curitiba é uma dessas regiões que sofre influência do jato subtropical e este é provavelmente o mecanismo de formação do cisalhamento para os registros de CAT.

Desta forma, o objetivo deste presente trabalho é investigar variáveis indicadores de turbulência de céu claro, determinados por modelo numéricos de dinâmica da atmosfera, versus registros *in situ* de turbulência, registrados pelas aeronaves na FIR Curitiba.

2. Material e Métodos

Na Tabela 1 são apresentados detalhes sobre os dados modelados e coletados utilizados neste trabalho.

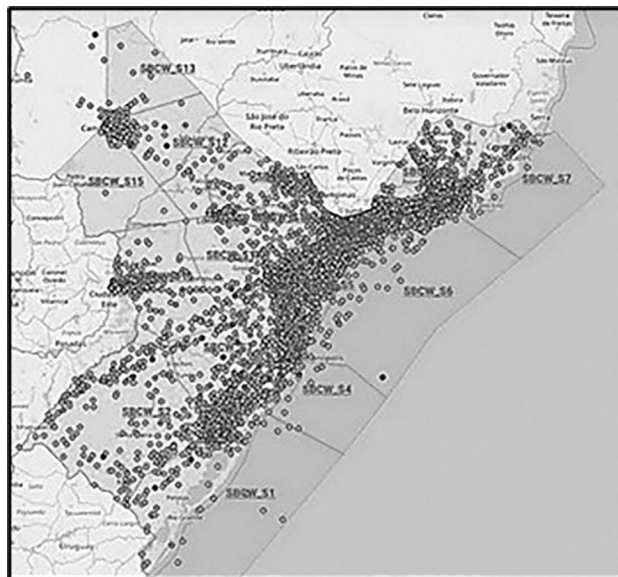


Figura 1 - A região em ênfase representa a FIR Curitiba e os círculos são as ocorrências dos registros de turbulências pelas aeronaves A320 da empresa aérea LATAM no período de 2018 a 2019.

As medidas de variação vertical da aceleração gravitacional (VRTG) aqui utilizadas foram registradas pelas aeronaves A320 da Empresa LATAM e as anomalias da aceleração gravitacional [g] são utilizados como variáveis indicadores de turbulência (LATAM, 2019). Na Tabela 2 são apresentados os limites dos intervalos de g para registros de VRTG que classificam os eventos turbulentos como, (1) leve, (2) moderada e (3) severa. O VRTG é registrado, em escala horária, e representa apenas o maior valor absoluto deste intervalo de tempo, e isso garante que apenas um evento seja registrado em condições de longa turbulência (LATAM, 2019).

As mensagens AIREP relata as condições operacionais do voo e podem também incluir detecção de CAT. Neste trabalho, os AIREP (portal REDEMETS) 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 superfície (portal REDEMETS) conjuntamente analisados para diagnosticar as condições sinóticas atuantes (verificar possíveis mecanismos 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 GFS 0,25 (*Global Forecast System* - disponível em NCEP), e 2) dados prognosticados gerados pelo modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF). As simulações realizadas utilizaram-se a solução dinâmica

Tabela 1 - Sumário dos dados.

Dados	Freq.	Descrição	Quant.	Período
1. VRTG	variável	registro da aceleração vertical em voo (g).	12.959	01/12/2018 a 31/12/2019
2. AIREP	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.	25.465	02/10/2015 a 04/06/2019
3. GFS0.25	3 h	análise e previsão com grade (latitude; longitude) de 0.25° por 0.25°.	—	casos selecionados
4. WRF	3 h	previsão com grades de 18, 6, e 2 km com 87 níveis (segundo Kim <i>et al.</i> , 2018).	3.840	casos selecionados
5. TEMP	12 h	mensagem codificada das estações de meteorológica de altitude. Neste representa os perfis de temperatura, umidade relativa e vento das localidades de Bueno Aires, Porto Alegre, Curitiba, São Paulo e Rio de Janeiro.	—	casos selecionados
6. Carta de superfície	6 h	informações meteorológicas das estações meteorológicas de superfície.	—	casos selecionados
7. Imagem GOES-16	15 min	imagens dos termal (13,3 µm).	—	casos selecionados
8. METAR	1 h	códigos meteorológicos contendo observações tempo presente, vento, temperatura do ar e pressão atmosférica gerados pelas estações meteorológicas de superfície localizadas nos aeródromos.	—	casos selecionados

Tabela 2 - Valores dos intervalos de variação de g nos registros dos VRTG que classificam as classes dos eventos de turbulências definidas com 1 (leve), 2 (moderada) e 3 (severa) para aeronave do tipo A320 LATAM (fonte: adaptado de LATAM (2019)).

Classe 1		Classe 2		Classe 3	
-g	+g	-g	+g	-g	+g
≤ 0,6 g	≥ 1,4 g	≤ 0,4 g	≥ 1,6 g	≤ 0,2 g	≥ 1,8 g

ARW (*Advanced Research WRF*). Foi utilizado o suporte à computação paralela *shared memory*. Para as simulações de 24 h, com 12 h de *spinoff*, foram criados três domínios computacionais centrados em 27° S-49° W, que abrangem a área entre 20° S-33° S e 40° 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 com a pressão no topo da atmosfera é de 50 hPa, conforme Kim *et al.* (2010). Os esquemas de parametrização dos processos físicos usados neste trabalho foram, conforme a [Tabela 3](#).

A seguir é descrito a sequência de passos do método idealizado para identificar o ambiente atmosférico

Tabela 3 - Parametrizações utilizadas nas simulações com o WRF.

Processo físico	Referência
Para convecção profunda	Kain-Fritsch (Kain, 2004)
Para convecção explícita	Kessler (Kessler, 1969)
Para radiação de ondas longa e curta	<i>Rapid Radiative Transfer Model</i> - RRTMG (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)

rico turbulento ou não, nas previsões geradas pelo GFS 0,25° e WRF, considerando comportamento dos valores de 9 variáveis que são definidas como segue: (1) perfil do vento (PV), (2) velocidade vertical do vento (W), (3) temperatura potencial (Θ), (4) energia cinética turbulenta (TKE), (5), e dos índices de turbulência, conforme descritos sucintamente [Tabela 4](#), denominados de (6) número de Richardson (Ri), (7) Brown (B), (6) Ellrod-Endlich (E-1), (8) Ellrod-Knap (E-2), e (9) Ellrod Knox (E-3).

Os passos são:

- i. Processamento de dados - analisa-se a distribuição espaço-temporal dos dados históricos dos registros de CAT considerados as mensagens AIREP (www.rede.met.aer.mil.br) e os registros de VRTG;
- ii. Seleção dos eventos - coleta-se os casos com e sem registros de CAT e analisa-se as condições sinóticas usando os dados perfil atmosférico, carta de superfície, imagem do satélite GOES-16 e METAR (Meteorological Aerodrome Report, disponível em www.rede.met.aer.mil.br), conforme descrito na [Tabela 1](#);
- iii. Simulação dos eventos - reproduz-se as condições atmosféricas dos casos selecionados no item ii utilizando o WRF com resoluções das grades de 18, 6, e 2 km com 87 níveis;
- iv. Análise dos compostos meteorológicos - define-se dois Compostos (C) meteorológicos definido com as seguintes variáveis, isto é,
C1: PV, Θ , TKE e
C2: Ri, W

usando as saídas do GFS0,25° e WRF para os casos selecionados e, assim considerando os eventos selecionados, analise-se o comportamento desses compostos C1 e C2 em função das observações de VRTG;

Tabela 4 - Sumário dos índices de CAT.

Índice	Descrição	Referência
1. Richardson (Ri)	$Ri = \frac{\left(\frac{g}{\theta_m}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\Delta u^2 + \Delta v^2}{\Delta z}\right)^{\frac{1}{2}}}$, 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 $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 = \left(\frac{\Delta u^2 + \Delta v^2}{\Delta z}\right)^{\frac{1}{2}}$ é o cisalhamento vertical, se $Ri < 0,25$ existe uma maior probabilidade de ocorrer turbulência, e u e v são respectivamente as componentes zonal e meridional do vento. Miles Howard (1964)	Miles Howard (1964)
2. Brown (B)	$\Phi_m = \sqrt{0,3 \times \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$, 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, $\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$ deformação por alongamento e f é parâmetro de Coriolis.	Roach (1970)
3. Ellrod-Endlich (E-1)	$\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}}}{\Delta z} \times \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ Mancuso Endlich (1966)	Mancuso Endlich (1966)
4. Ellrod-Knap (E-2)	$\frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}}}{\Delta z} \left(\left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \right)$	Ellrod (1985)

v. Ajuste dos índices de CAT com as observações - Analisa-se a distribuições das estatísticas dos valores de cada índice (Ri, B, E-1, E-2, E-3), versus as observações dos VRTG e, assim, se ajusta, via tentativa e erro, o valor LIMITE classificador, de cada índice i (LIMITEclas(i)), de CAT testando, para n -intervalos de valores do índice i , considerando a seguinte rotina:

- usa-se a expressão $LIMITEclas(i) \geq [\text{Média do Índice}(i) - \text{fator}(\text{DEVPAD}(i))]$, onde **fator** varia no intervalo de $[0+\Delta X; n]$ em $\Delta X = 0$ até n , incremento de 0,1; e
- testa-se cada LIMITEclas(i) com amostra de independente e avalia-se estatisticamente os resultados versus as observações de VRTG até LIMITEclas(i) ótimo seja obtido.

3. Resultados e Discussões

A Fig. 2 apresenta a variação espacial da densidade (onde as cores claras representam maiores valores) das ocorrências de CAT considerando 25.465 registros de AIREP ocorridos entre 02 de outubro de 2015 a 04 junho de 2019, na FIR Curitiba. Observa-se que há registros de CAT em toda área da FIR, podendo indicar que razão desta distribuição esteja associada à presença, na maior parte do ano, da corrente de jato (que provoca o cisalhamento do vento). Nota-se, conforme cores mais claras na Fig. 2, que maior frequência de CAT corresponde aproximadamente a rota São Paulo-Porto Alegre onde há maior frequência de voos em relação as demais rotas da FIR Curitiba. A Fig. 3a mostra a distribuição 12.959 ocorrência de CAT por classe

de VRTG e observa-se que 12189, 638 e 132 ocorrências são respectivamente de classe 1, classe 2 e classe 3 correspondendo a 94% (leve), 4% (moderada) e 1% (severa) dos registros. A Fig. 3b mostra a distribuição horária da quantidade de turbulência detectadas pelos voos da LATAM, via VRTG(G), para classes 2 e 3, e observa-se que há registros de turbulência ao longo de todos os horários, com as maiores frequência de CAT quando no período diurno quando há a maior frequência dos voos.



Figura 2 - 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.

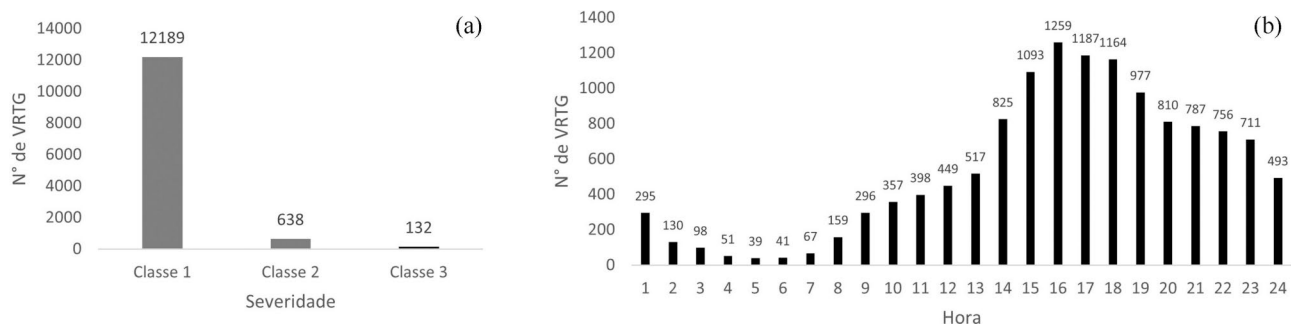


Figura 3 - (a) Distribuição de 12.959 registros de VRTG por classe. (b) distribuição horária dos registros conjunto dos VRTG das classes 2 e 3 na FIR Curitiba no período de 01 de dezembro de 2018 a 31 de dezembro de 2019.

3.1. Seleção e análise do evento de cat

Utilizando os 132 registros de VRTG de classe 3 ocorridos sobre a FIR Curitiba para período dos dados, realizou-se análise sinótica, considerando as 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) descritos na Tabela 1.

A Tabela 5 mostra os detalhes dos registros de VRTG do dia 29 de setembro de 2018, ou seja, os horários (hora cheia em UTC), para intervalo 60 min, que se finalizaram os registros do VRTG, classes, posição geográfica e nível de voo dos eventos de VRTG detectados pela aeronave. Observa-se que a atmosfera esteve turbulenta ao longo de todo dia, visto a distribuição temporal dos registros de VRTG. Na Figs. 4a, 4b, e 4c são, respectivamente, apresentadas as imagens GOES-16 (banda termal, centrada em 13,0 μm , disponível em <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/>), 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), correspondentes às 12 UTC. Os dois pontos em cor vermelha na Fig. 4a representam aproximadamente as posições geográficas dos registros de VRTG de classe 3 ocorridos para caso estudado, conforme coluna 3 da Tabela 5. A carta sinótica de superfície

(Fig. 4b) revelam que existia um centro de alta pressão de 1.023 hPa sobre o oceano atlântico próximo à costa do estado do Rio Grande Sul. 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. 4c é apresentado seção longitudinal dos perfis de vento (em barbelas), extraídos de TEMP (www.redemet.aer.mil.br), na ordenada versus as posições de Porto Alegre (SBPA), Curitiba (SBCT), São Paulo (SBMT) e Galeão (SBGL) é possível identificar a localização do jato (J), entre as linhas cinzas, e que está 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).

Considerando os compostos meteorológicos definidos no método deste trabalho, as Figs. 5a-5b apresentam respectivamente os campos das variáveis dos compostos C1 e C2, a seção vertical longitudinal a 50° W, onde as ordenadas representam a pressão atmosférica em hPa versus intervalo latitudinal entre 30° S a 22° S, determinado com dados GFS0,25° para 3 UTC-29/09/2018 (horário mais próximo da observação do VRTG registrado de 3:01 (UTC) até 4 UTC). O ponto em cor preta representa aproximadamente a posição da ocorrência de um dos VRTG de classe 3, sobre os campos das variáveis dos compostos meteorológicos definidos, ou seja, o C1 (Fig. 5a): perfil do vento (barbelas pretas), Θ (valores representado pelas linhas branca aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE, cujo valores no campo representados pelas cores da legenda inferior variam no intervalo]100;900[$\text{m}^2.\text{s}^2$, e o C2 (Fig. 5b): R_i (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curva branca com valores negativo e positivo). Tendo em vista que os resultados dos modelos dificilmente estão sincronizados com as observações, adotou-se a área de análise dos campos gerados pelos modelos uma área retangular - linha vermelha tracejada na Figs. 5, 6 e 7,

Tabela 5 - Registros de VRTG e sua severidade durante o dia 29/09/18 (fonte: LATAM, 2019).

Data	Hora (UTC)	Classe	Latitude (S)	Longitude (W)	Nível de voo (pés)
29/set/ 2018	2	1	29,98	51,37	3.192
	4	3	27,16	50,31	33.568
	4	3	27,60	50,82	33.568
	5	1	22,93	43,78	8.796
	14	2	25,39	49,30	3.152
	15	1	23,59	46,72	2.044
	20	1	22,53	46,40	18.500
	23	1	30,11	56,02	31.828

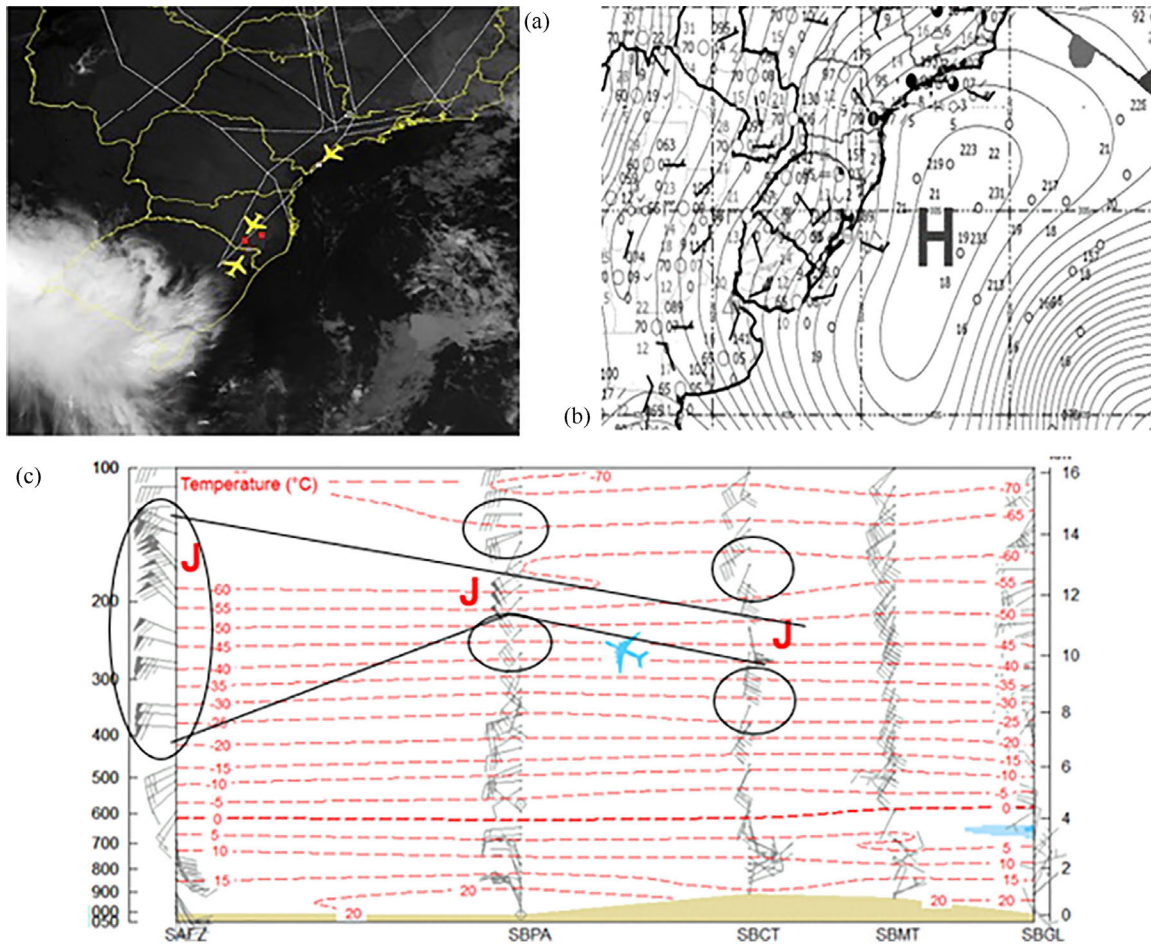


Figura 4 - (a) imagem GOES-16 (banda termal, centrada em $13,0 \mu\text{m}$) como os pontos em vermelho representando as localizações dos VRTG registrado no dia 29 de setembro de 2018 (conforme Tabela 5), (b) recorte da carta de superfície das 12 UTC e (c) Corte vertical entre Porto Alegre (SBPA) e Galeão (SBGL), que inclui os perfis de Curitiba (SBCT) e São Paulo (SBMT) das 12 UTC.

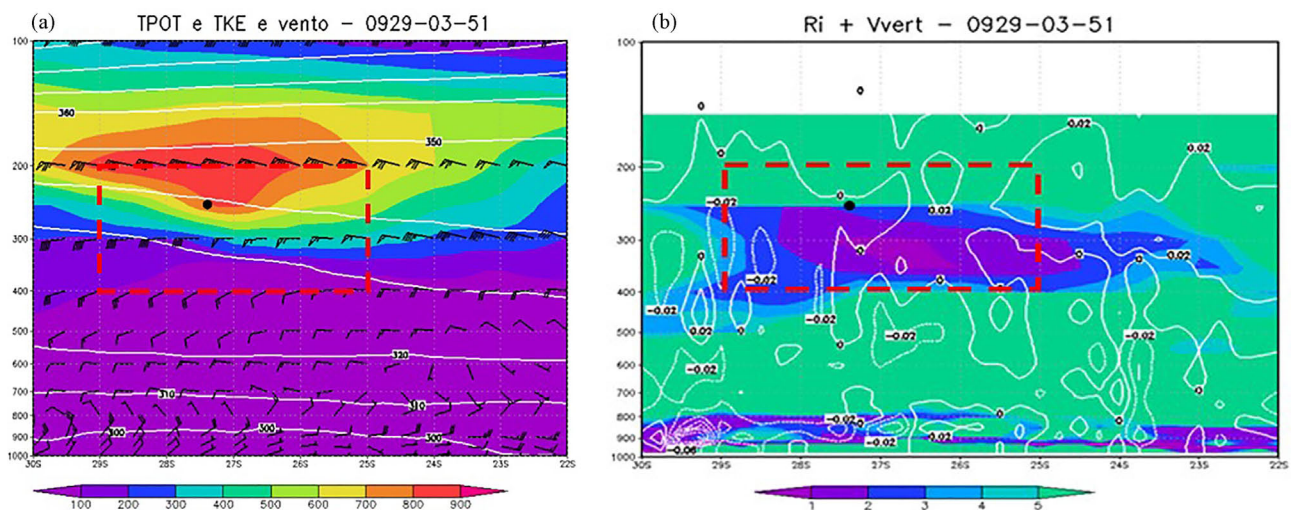


Figura 5 - (a) e (b) representa respectivamente o composto C1: perfil do vento (barbelas), Θ (linhas brancas aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior em valores no intervalo em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) e composto C2: Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) e W (curvas brancas com valores negativo e positivo), determinado com dados GFS0,25 das 03Z do dia 29 de setembro de 2018.

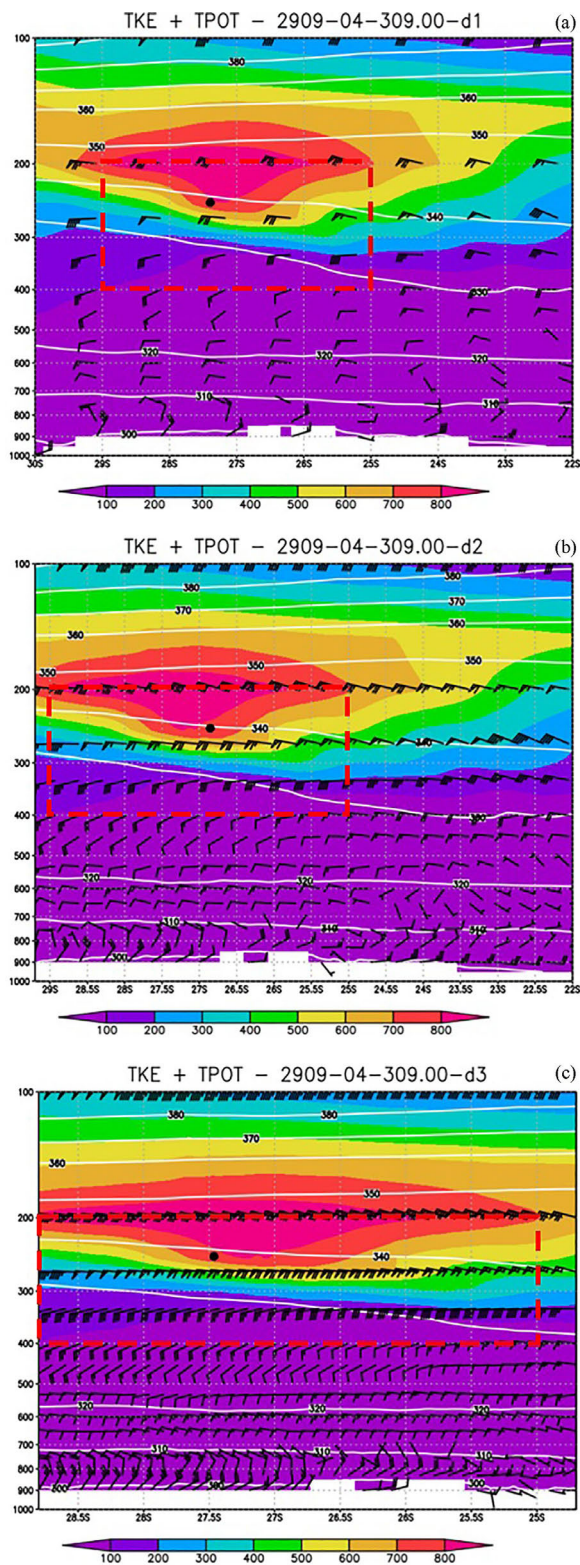


Figura 6 - (a), (b) e (c) representa respectivamente o composto C1 representa do perfil do vento (barbelas), Θ (linhas brancas aproximadamente disposta ao longo do perfil), TKE (valores no campo representados pelas cores legenda inferior em valores no intervalo em $m^2.s^{-2}$ gerado com dados WRF de 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018.

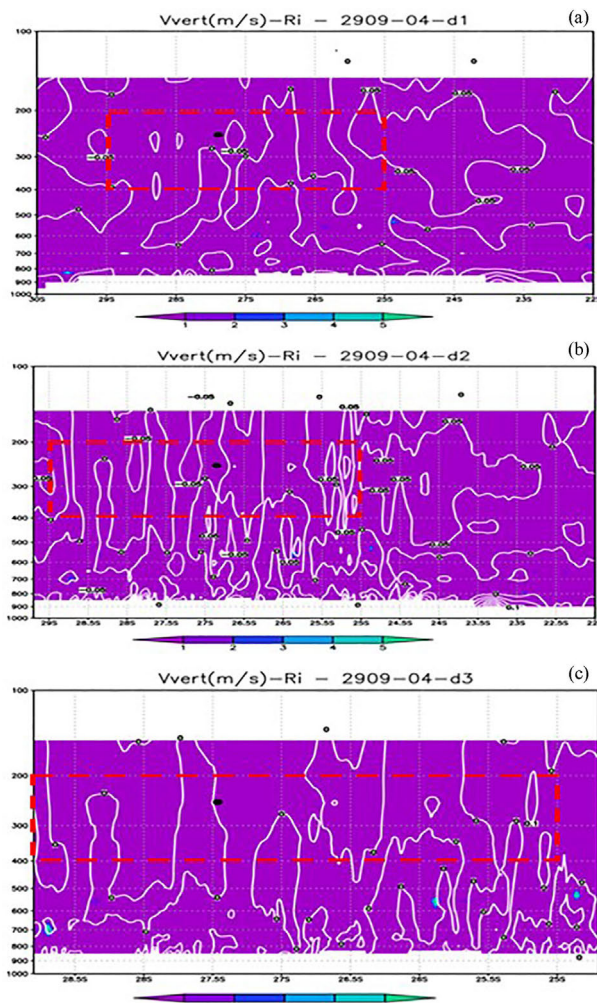


Figura 7 - (a), (b) e (c) representam respectivamente o composto C2 representa W (curva brancas com valores negativo e positivo), Ri (valores no campo representados pelas cores da legenda inferior) gerado com dados WRF de 18 km, 6 km e 2 km das 04Z do dia 29 de setembro de 2018.

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 24-29 S, correspondente ao tempo de registro de VRTG. A direção do vento do C1 (da base ao topo, conforme a Fig. 5a) gerado pelo GFS0,25 mostra-se bastante similar as observações dos perfis de radiossondagens (Fig. 4c), no entanto difere significativamente em magnitude, mas por outro lado mostra claramente o cisalhamento presente e consequentemente a indicação de um escoamento turbulento da atmosfera na região analisada, onde ocorreu o registro do VRTG. Os valores TKE variam aproximadamente na área de observação no intervalo de $[200; 800] m^2.s^{-2}$ que corrobora com indicador de CAT. Os comportamentos de Θ , W não se apresentaram, neste caso, como indicadores de CAT, pois as linhas de Θ quase não sofrem variações quando há turbulência; W com valores

próximo a zero, na região com Ri com valores entre 0 e 1. Este último, segundo Miles e Howard (1964), $Ri \leq 0,25$ é indicador de CAT. De forma similar, as Figs. 6-7 ilustram respectivamente os compostos C1 e C2 mais próximo ao registro do registro do VRTG gerados pelo WRF para resolução de 18, 6 e 2 km, e considerando condições da simulação descrita com antecedência de 12 h. 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. 4(c); a TKE varia em intervalo maior do que o anterior de $[200; 900]$ $m^2.s^{-2}$; Ri com valores inferior a 1 e W variando de valores negativos a positivos. Assim, os resultados com aumento da resolução espacial (x, y e z) usando os dados WRF (Figs. 6-7), a exemplo dos resultados obtidos por Kim *et al.* (2010), reproduziram as condições atmosféricas similares àqueles gerados com dados do GFS0,25 (Fig. 5), mas ligeiramente superior na identificação das condições de CAT.

Na Tabela 6 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 = $[4,0.10^{-6}; 12.10^{-6}]$ m/s (Roach, 1970) E-1 = $[4,0.10^{-6}; 12.10^{-6}]$ m/s, E-2 = $[4,0.10^{-6}; 12.10^{-6}]$ m/s, E-3 = $[4,0.10^{-6}; 12.10^{-6}]$ m/s (Knox, 2010 e Willians, 2016). Observa-se que o índice Brown foi capaz de identificar as condições atmosféricas turbulentas em consonância com 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 a eficiência dos índices de detecção das condições de atmosfera turbulenta de 78% (com GFS) para 84% (com WRF), considerando 22 eventos de VRTG dos cinco casos analisados.

3.2. Ajuste dos índices com as observações

Este representa a obtenção do limite classificador ótimo por índice (LIMITEclas(i)), ou seja, por exemplo, aqui, índice Brown, E-1 e E-2, que são calculados a partir das saídas do WRF (18, 6 e 2 km) para T-1h a T+1h (T horário do registro do VRTG) e em níveis entre o registro do VRTG (em hPa) com espaçamento de ± 50 hPa da altitude, visando a analisar o volume da atmosfera no entorno dos registros de cada VRTG (dia, horário, latitude, longitude, horário e a altitude). Desta forma, os valores dos índices determinados com dados do WRF, conforme condições mencionadas, 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 1.681 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, ou seja:

- Calculou-se a média e desvio padrão para cada índice para as três grades mencionadas dos dados modelados;
- 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. Os valores dos LIMITEclas(B), LIMITEclas(E-1) e LIMITEclas(E-2) ótimos obtidos passo vi do método são iguais a 3,82, 1,37 e 1,91, correspondentes aos fatores n de 2,5, 1,2 e 1,2, respectivamente, considerando os eventos de VRTG nos dias 27/03/19 e 18/05/2018.
- 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.

Tabela 6 - 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 (pés)	Modelo Quant. VRTG	GFS					WRF					
				Ri	B	E-1	E-2	E-3	Ri	B	E-1	E-2	E-3	
I	23/04/2018	32.000	4	20%	100%	100%	80%	100%	100%	100%	100%	80%	100%	100%
II	29/09/2018	33.000	8	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	88%	100%	100%
III	18/05/2018	15.000	4	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
IV	21/05/2018	38.000	3	33%	100%	0%	33%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
V	27/03/2019	38.000	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%	

4. Conclusão

Este trabalho propõe uma análise dos índices indicadores de turbulência de céu claro, obtidos com simulações numéricas via GFS 0,25 e WRF, versus dados de registros de evento de turbulência pelas aeronaves, para previsão dos eventos de CAT na FIR Curitiba. Em resumo, as principais conclusões do presente trabalho são:

- O mecanismo de formação dos eventos de turbulência está associado somente a presença da corrente de jato e não por convecção na área de estudo;
- Considerando a análise dos compostos C1 (perfil do vento, Θ , TKE) e C2 (perfil Ri e W) para estudo de caso apresentado, observou-se que as intensidades dos perfis de vento são subestimadas em comparação as observações, mas identificou quase que perfeitamente a corrente de jato (consequentemente o cisalhamento) tanto para os dados modelados pelo GFS 0,25, bem como para o gerados pelo WRF. Os valores da TKE e Ri são fidedignos da presença de CAT quanto maior é a resolução dos dados modelados. Os valores de Θ e W não apresentaram claramente a indicação de atmosfera turbulenta onde os registros *in-situ* de CAT foram observados;
- Análises dos índices em representar as condições de uma atmosfera turbulenta na circunvizinhança dos registros de VRTG (Tabela 5), demonstraram que o índice Brown é o mais eficiente e que o Ri se torna mais eficiente à medida que a resolução dos dados modelados aumentou. Os índices E-1, E-2 e E-3 tem sua eficiência similar independente da resolução ou modelo utilizado.
- Os testes preliminares dos índices ajustados B, E-1 e E-2 determinado com dados do WRF (18, 6 e 2 km) conseguiu prever o volume da atmosfera com CAT com antecedência de doze horas para dois dias de registros de VRTG.

Com meta futura, pretende-se estender a amostra dos eventos analisados, considerando apenas dados modelados pelo WRF, visando estabelecer mecanismo de previsão de CAT para uso operacional pelos órgãos dos setores aeronáutico.

Agradecimentos

Este estudo é financiado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo, por meio da Organização Brasileira para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Controle do Espaço Aéreo (CTCEA) (Contrato n. 002-2018 / COP-PETEC_CTCEA) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP): OUTORGADO: FINEP 01.11. 0100.00 / FUJB 16.278-7.

Referências

- BITAR, I. **Climatologia e Estudo de Caso da Turbulência de Céu Claro a partir de Registros de Aeronaves: Análise de Dados Observacionais e de Modelagem.** <https://Sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.13.04.06-TDI>, 2015.
- BROWN, R. New indices to locate clear air turbulence. **The Meteorological Magazine**, v. 102, n. 3, p. 347-361, 1973.
- DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Publicações de Informações Aeronáuticas. AIC-N.** Rio de Janeiro: DECEA, 2018.
- DUTTON, J.A.; PANOFKY H.A. Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. **Science**, v. 167, n. 7, p. 937-944, 1970.
- ELLROD, G.P.; LESTER P.F.; EHERNBERG J. Clear Air Turbulence. **Encyclopedia of the Atmospheric Sciences**, Academic Press, v.1, n. 38, p. 393-403, 2002.
- ELLROD, G.P. Detection of high level turbulence using satellite imagery and upper air data. **NOAA Tech. Memo. NESDIS**, p. 10-30, 1985.
- ELLROD, G.P.; KNAPP, D.I. An objective Clear Air Turbulence Forecasting Technique: Verification and operational use. **Weather and Forecasting**, v. 7, n. 1, p. 150-165, 1992.
- ELLOD, G.P.; KONX, J.A. Improvements to an operational clear-air turbulence diagnostic index by addition of a divergence trend term. **Weather and Forecasting**, v. 25, n. 2, p. 789-798, 2010.
- ENDLICH, R.M. The mesoscale structure of some regions of clear air turbulence. **J. Appl. Meteor.**, v. 3, n. 3 p. 261-276, 1964.
- FRITTS, D.C.; ALEXANDER, M.J. Gravity dynamics and effects in the middle atmosphere, **Rev. Geophys.**, v. 41, n. 1, p. 1003, 2003. [doi](#)
- GILL, P.G.; BUCHANAN, P. An ensemble based turbulence forecasting system. **Meteorological Applications**, v. 21, n. 1, p. 12-19, 2014.
- GULTEPE, I. A review of high impact weather for aviation meteorology. **Pure Appl. Geophys.** v. 176, n. 9, p. 1869-192, 2019.
- HOLTON, J.R. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere, **J. Atmos. Sci.**, v. 39, n. 8, p. 791-799.
- HOPKINS, R.H. Forecasting techniques of clear-air turbulence including that associated with mountain waves, **Secretariat of the World Meteorological Organization (WMO)**, v. 4, n. 482, p. 155, 1977.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION ENVIRONMENTAL (ICAO), **Aviation and Climate Change**, p. 40-19, 2016.
- KIM J.-H.; 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, 2010.
- KAPLAN, M.L.; LIN Y.L.; RIORDAN A.J.; LUX K.M.; HUFFMAN A. Observational and numerical simulation-derived factors that characterize turbulence accident environments preprints. **In 9th AMS Conference on Aerospace Range and Aeronautical Meteorology**, 2000.

- KELLER, J.L. Clear air turbulence as a response to meso- and synoptic-scale dynamic processes. **Mon. Wea. Rev.**, v. 118, n. 12, p. 2228-2242, 1990.
- KNOX, J.A. Possible mechanisms of clear-air turbulence in strongly anticyclonic flow. **Mon. Wea. Rev.**, v. 125, n. 4, p. 1251-1259, 1997.
- Vertical Acceleration High in Flight, manual A320, **LATAM**, v. 1, n. 1, p. 485-486, 2019.
- LYRA, CHAN, PEREIRA, Indicadores de Turbulência a partir de previsões do modelo regional ETA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 161-182, 2004.
- LEE, D.R.; STULL R.S.; IRVINE W.S. Clear air turbulence forecasting techniques. Air Weather Service Tech. Note AFGWC/TN-79/001, **Air Force Global Weather Central**, Offutt AFB, NE, p. 16, 1984.
- LESTER, P.F. **Turbulence: A New Perspective for Pilots**. Colorado: Jeppesen Sanderson, 1994.
- LILLY, D.K. Turbulence in troposphere and stratosphere, **Symposium on Turbulence**, 1978.
- MANCUSO R.L.; ENDLICH, R.M. Clear air turbulence frequency as a function of wind shear and deformation. **Mon. Wea. Rev.**, v.95, n. 3, p.581-585, 1966.
- MILES, J.W.; HORWARD L.N. Note on a heterogeneous shear flow. **J. Fluid Mech.**, v. 20, n. 7, p. 331-336, 1964.
- MARROQUIN, A. An advanced algorithm to diagnose atmospheric turbulence using numerical model output. Preprints. In: **16th Conf. on Weather Analysis and Forecasting**, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., p. 79-81, 1988.
- MCLEAN, J.C. 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, p. 53, 1986.
- MEDEIROS, A.F. **Observações de Ondas de Gravidade Através do Imageamento da Aeroluminescência**. (INPE-10478-TDI/932). Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 187 p., 2001.
- Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), **Plano de Navegação Aérea Global**, disponível em <https://sirius.decea.mil.br/base-normativa/ganp-plano-global-de-navegacao>, 1990.
- PANTLEY, K.C.; P.F. LESTER. Observations of severe turbulence near Thunderstorm tops. **J. Appl. Meteor.**, v. 29, p. 1171-1179, 1993.
- 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.; PEARSON. M. Prediction of Energy Dissipation Rates for Aviation Turbulence. Part I: Forecasting Nonconvective Turbulence. **National Center for Atmospheric Research**, 2016.
- TRIER, S.B.; SHARMAN, R.D. Mechanisms influencing cirrus banding and aviation turbulence near a convectively enhanced upper-level jet stream. **Mon. Wea. Rev.**, v. 144, p. 3003-3027, 2016. doi
- STORER, L.N.; GILL, P.G.; WILLIAMS, P.D. Multi-model ensemble predictions of atmospheric turbulence. **Meteorological Applications**, v.26, n. 3, p. 416-428, 2019. doi
- SHARMAN, R.D.; PEARSON, J.M. Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, n. 7, p. 317-337, 2017.

Internet Resources

REDEMET, www.redemet.aer.mil.br
 NCEP, <http://www.wxmaps.org/pix/sa.vv>

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.