UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA EM EVENTOS DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thaíssa Melanye Busch

Rio de Janeiro
Dezembro/2024

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA EM EVENTOS DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Thaíssa Melanye Busch

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMNUFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Orientador(es): Edilson Marton, D.Sc

Wallace Figueiredo Menezes, D.Sc

Rio de Janeiro

Dezembro/2024

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA EM EVENTOS DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

THAÍSSA MELANYE BUSCH

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Prof. Dr. Wallace Figueiredo Menezes – PPGM/UFRJ – Orientador

Profa. Dra. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira – PPGM/UFRJ

Prof. Dr. Fabrício Polifke da silva – PPGM/UFRJ

Dr. Vinícius Albuquerque de Almeida – UFRJ/LMA

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO, 2024

Ficha Catalográfica

Busch, Thaíssa Melanye

“AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA EM EVENTOS DE CHUVAS INTENSAS NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO”

Rio de Janeiro, 2024.

77p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ

1. Índices termodinâmicos. 2. Eventos de chuvas intensas. 3. Rio de Janeiro

“Até aqui me ajudou o Senhor!”

1 Samuel 7:12

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao apoio e à contribuição de muitas pessoas que me acompanharam ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço, primeiramente à Deus, autor e consumador da minha fé, merecedor de toda honra e toda glória!

Aos meus pais, João Luiz Busch e Leozíria Rosa Silva Busch (*in memorian*), por todo amor, carinho, ensinamentos e dedicação à minha criação. Este trabalho é um reflexo do que aprendi com vocês e uma forma de retribuir tudo o que fizeram por mim.

Ao meu irmão Patrick, bem como toda minha família, pelo apoio incondicional dado a mim, ao longo dessa caminhada. Essa conquista também é de vocês.

Ao meu namorado, Cristiano, pelo carinho, paciência e apoio durante este processo.

Aos meus pastores, Davi Moreira e sua esposa Cristina Moreira, pelas ministrações e orações, bem como toda a membresia da Assembleia de Deus Adonai, à qual faço parte.

A todos os meus amigos que me alegram e me suportam em amor. “O amigo ama em todos os momentos” (Provérbios 17:17).

Aos meus orientadores, pela dedicação, paciência e orientação cuidadosa ao longo deste processo. Agradeço pela confiança em mim depositada.

Aos professores e colegas do Departamento de Meteorologia da UFRJ, pelo apoio, amizade, incentivo e conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas de trabalho das Defesas Civis de Niterói e de Itaboraí, em especial, aos secretários, Walace Medeiros e Ricardo Nunes, por todo apoio e conselhos.

Agradeço também, ao meu chefe e amigo Nilton Moraes, pela compreensão, conselhos, ajuda e incentivo.

E a todos que sempre me socorriam quando eu pedia ajuda com o trabalho. Jonatha Soares, Fernando Eulalio, Andressa Nemirovsky, Noé Guimarães, Henrique Coutinho e Marcos Rezende, muito obrigada mesmo.

RESUMO

Este estudo analisou as condições atmosféricas associadas a chuvas intensas no município do Rio de Janeiro, com foco na estação pluviométrica de Piedade. A cidade, frequentemente afetada por danos causados por precipitações fortes, especialmente no verão, enfrenta desafios devido à topografia acidentada e à ocupação em áreas de risco. A pesquisa utilizou índices termodinâmicos (IL, K, TT e CAPE) para identificar padrões atmosféricos relacionados a eventos de chuvas intensas (ECI), definidos pelo percentil 95 dos acumulados em períodos de 15 minutos e 24 horas, considerando dados de pelo menos 11 estações pluviométricas, incluindo Piedade. Foram analisados 100 dias de ECI, avaliando a relação entre os índices termodinâmicos e os eventos registrados.

Adicionalmente, a análise climatológica de dados pluviométricos (1997-2023) apontou variações significativas nos acumulados anuais e sazonais. A climatologia de ventos (2003-2020) permitiu constatar que em casos de ECI o padrão desse escoamento pode sofrer mudanças significativas, possivelmente devido à atuação de frentes frias e sistemas convectivos de oeste.

A pesquisa também fez uso do índice CK, que combina o índice K com a divergência do vento em 925 hPa, mostrando-se promissor para a identificação de condições propensas a eventos convectivos. Os resultados destacam que, embora os índices termodinâmicos sejam eficazes na identificação de instabilidades atmosféricas, é fundamental integrá-los a outras variáveis meteorológicas, como a dinâmica dos ventos, com o intuito de sinalizar localidades mais propensas a chuvas intensas.

O aprimoramento das previsões meteorológicas, aliado ao uso de ferramentas como radares, satélites e redes de estações meteorológicas, é essencial para reduzir os danos causados por eventos intensos de chuva. Por fim, a integração entre ciência, tecnologia e políticas públicas é crucial para proteger a população e otimizar a gestão de riscos climáticos.

Palavras-chave: chuvas intensas, índices termodinâmicos, Rio de Janeiro

ABSTRACT

This study analyzed the atmospheric conditions associated with heavy rainfall in the municipality of Rio de Janeiro, with a focus on the Piedade rain gauge station. The city, often affected by damage caused by intense precipitation—especially during the summer—faces challenges due to its rugged topography and the occupation of risk-prone areas. The research employed thermodynamic indices (IL, K, TT, and CAPE) to identify atmospheric patterns related to heavy rainfall events (HRE), defined by the 95th percentile of accumulated rainfall over 15-minute and 24-hour periods, considering data from at least 11 rain gauge stations, including Piedade. A total of 100 HRE days were analyzed to assess the relationship between these thermodynamic indices and recorded events.

Additionally, a climatological analysis of rainfall data (1997–2023) revealed significant variations in annual and seasonal totals. Wind climatology (2003–2020) indicated that HREs may be associated with notable changes in wind flow patterns, possibly due to the influence of cold fronts and westward-moving convective systems.

The study also employed the CK index, which combines the K index with wind divergence at 925 hPa, showing promise in identifying conditions favorable to convective events. Results emphasize that while thermodynamic indices are effective in identifying atmospheric instability, it is essential to integrate them with other meteorological variables, such as wind dynamics, to better signal areas more susceptible to heavy rainfall.

Improving weather forecasts, in conjunction with tools like radar, satellites, and meteorological station networks, is essential to mitigate the impacts of intense rainfall events. Ultimately, the integration of science, technology, and public policy is crucial to protect the population and enhance climate risk management.

Keywords: intense rainfall, thermodynamic indices, Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
2.1 Climatologia de chuva na cidade do Rio de Janeiro 15
2.2 Estudos de casos 17
2.3 Uso geral de índices termodinâmicos 19
2.4 Combinação dinâmica/termodinâmica em casos de chuvas intensas 23
3. ÁREA DE ESTUDO, DADOS E METODOLOGIA 26
3.1 Área de estudo 26
3.2 Dados 26
3.3 Metodologia 27
4. RESULTADOS 34
4.1 Climatologia da precipitação na estação Piedade 34
4.2 Caracterização dos ECIs 36
4.3 Índices termodinâmicos 39
4.4 Índices termodinâmicos x chuva em ECI's 46
4.5 Avaliação conjunta divergência-índices e o índice CK..... 53
4.6 Rosa dos ventos..... 56
5. CONCLUSÃO 61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

APÊNDICES..... 71

APÊNDICE A..... 71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Climatologia do total pluviométrico anual (mm/ano) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio. (Figura 2 de Pristo et al. (2018))..... 16

3.1 Distribuição espacial dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio, na cidade do Rio de Janeiro..... 27

3.2 Mapa do município do Rio de Janeiro destacando o bairro de Piedade, localizado na Zona Norte da cidade..... 27

3.3 Localização dos aeródromos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, onde estão baseadas as estações meteorológicas da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). Destacam-se os maciços de Gericinó, ao Norte, da Pedra Branca ao Sul e o Maciço da Tijuca, a Leste da região de estudo..... 30

3.4 Representação da estruturação de um diagrama de caixa (*boxplot*)..... 31

4.1 Acumulado de precipitação para a estação de Piedade, entre os anos de 1997 e 2023: (a) anual, (b) verão – DJF e (c) estações do ano DJF, MAM, JJA, SON. A linha vermelha horizontal nos painéis (a) e (b) indica o valor médio da precipitação, respectivamente..... 35

4.2 Distribuição da quantidade de ECIs por ano (1997 – 2023), onde a linha vermelha destaca o valor médio da série e a linha pontilhada destaca a tendência..... 36

4.3 Distribuição da quantidade de ECIs por estações do ano: primavera (SON – setembro, outubro, novembro), verão (DJF – dezembro, janeiro, fevereiro), outono (MAM – março, abril, maio), inverno (JJA – junho, julho, agosto)..... 37

4.4 *Boxplot* referente à climatologia dos índices (coluna esquerda) – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e seus valores nos dias de ECIs (coluna direita) – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente..... 40-41

4.5 *Boxplot* da climatologia dos índices para os meses de janeiro (1997 – 2023), às 00Z – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e às 12Z – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. A linha laranja se refere à mediana e seus valores estão destacados em vermelho..... 44-45

4.6 Distribuição da chuva, nos dias de ECIs, associada aos índices termodinâmicos – Total Totals (a), CAPE (b), Índice de Levantamento (c), Índice K (d) – às 00Z (linha azul) e às 12Z (linha laranja), onde a escala do lado esquerdo é referente aos valores de precipitação e do lado direito, referente aos valores dos índices..... 47-48

4.7 Gráficos de dispersão de índices termodinâmicos x precipitação (dividida em dois períodos de 12 horas – 00h a 12h (00Z – azul: (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL) e 12h a 23h59min (12Z – laranja: (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL))..... 49-52

4.8 *Boxplot* referente à climatologia do índice CK (coluna esquerda) – (a) e seus valores nos dias de ECIs (coluna direita) – (b). São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente..... 55

4.9 Distribuição da chuva, nos dias de ECIs, associada ao índice CK– às 00Z (linha azul) e às 12Z (linha laranja), onde a escala do lado esquerdo é referente aos valores de precipitação e do lado direito, referente aos valores do índice..... 55

4.10 Distribuição de frequência dos ventos para as estações da REDEMET. Na coluna da esquerda estão as figuras referentes à climatologia: (a), (c), (e), (g), (i). Na coluna da direita, estão as figuras referentes aos dias de ECI: (b), (d), (f), (h), (j)..... 57-59

4.11 (a) Rosas dos ventos referentes a climatologia de cada aeródromo da REDEMET, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro..... 63

4.11 (b) Rosas dos ventos referentes aos dias de ECI de cada aeródromo da REDEMET, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro..... 64

LISTA DE TABELAS

3.1 Valores de percentil 95 de 24 horas e de 15 minutos para cada estação pluviométrica 28

3.2 Datas de ECI selecionadas a partir da estação de Piedade referente ao período de 1997 a 2023, de acordo com o critério descrito no texto 29

4.1 Faixa de horário local dos máximos de precipitação para cada ECI 38

4.2 Valores de mediana e terceiro quartil, obtidos pelos gráficos *boxplots* da climatologia e dias de ECI dos índices termodinâmicos. (*) Foi utilizado no índice IL o primeiro quartil, pois este índice é negativo 39

4.3 Correlações entre a precipitação de 24 horas e de 12 horas com os índices termodinâmicos às 00Z e 12Z 53

4.4 Correlação entre divergência em 925 hPa com índices termodinâmicos para climatologia e casos de ECI 54

1. INTRODUÇÃO

A cidade do Rio de Janeiro é uma metrópole que sofre constantemente com os danos causados pelas fortes chuvas que acometem o município, principalmente no verão. De acordo com Dereczynski *et al*. (2017), a população convive com esse problema desde a fundação da cidade. Os maciços existentes na região, tais como Maciço da Tijuca, Gericinó, Mendanha e da Pedra Branca, contribuem para a variabilidade espacial da precipitação (DERECZYNSKI *et al*., 2009). Calado (2012) ressalta que o município sofre com os transtornos causados pelas fortes chuvas desde que foi ocupado e que, com o aumento de habitações em áreas de risco, a população se torna mais vulnerável a tais eventos.

O entendimento dos sistemas causadores de chuvas intensas e dos ambientes atmosféricos associados a eles se torna cada vez mais necessário, de forma a auxiliar o previsor na tomada de decisão na hora de emitir avisos e no acionamento das defesas civis para tomarem medidas com o objetivo de minimizar os estragos e, principalmente, proteger a população.

Devido à importância da cidade do Rio de Janeiro, o conhecimento da climatologia da precipitação é de extrema utilidade para diversas atividades relacionadas ao comércio, indústria e turismo, além do próprio planejamento urbano (DERECZYNSKI *et al*., 2009). Ainda segundo a autora, os principais responsáveis pelas chuvas torrenciais que acometem a cidade são os sistemas frontais, por vezes associados a sistemas convectivos de mesoescala nos casos de chuvas mais intensas.

Sabe-se que as chuvas mais fortes, que causam mais danos à cidade, ocorrem principalmente durante o verão, período em que as instabilidades termodinâmicas são realçadas devido às altas temperaturas e ao alto teor de umidade na atmosfera (PRISTO *et al.*, 2018).

No Brasil, ainda há muito a ser feito em relação à previsão de tempo severo, visto que a previsão de curto prazo, em geral, é mais difícil em relação a eventos de escala sinótica, pois os fenômenos de mesoescala podem se formar e se dissipar em um espaço muito curto de tempo. Isso evidencia a importância da utilização de radares meteorológicos e satélites para acompanhar o nascimento, duração e trajetória das tempestades, de uma ampla rede de estações meteorológicas para se conhecer melhor o ambiente atmosférico de estudo, e de modelos regionais que sejam capazes de calcular parâmetros meteorológicos que possam identificar condições propícias ao desenvolvimento de tempestades severas.

Nos últimos anos, no Brasil, diversos trabalhos de pesquisa têm sido realizados com o propósito de validar e criar ferramentas que possam auxiliar o setor operacional em suas tomadas de decisão, como os “índices de instabilidade” ou “indicadores de tempo severo”. Essas ferramentas tentam sumarizar diversas condições em parâmetros mais objetivos para auxiliar na previsão de chuvas e ventos intensos (NASCIMENTO, 2005; PEREIRA, 2015; FRANCO *et al.*, 2020, entre outros).

Índices termodinâmicos podem ser bons indicadores de chuvas intensas, principalmente quando associados a mecanismos dinâmicos ou mesmo combinados com outros índices (MENEZES *et al*., 2006). Esses índices podem ser calculados com base nos dados coletados por radiossondagens, que são equipamentos utilizados para registrar a temperatura, pressão, umidade, direção e velocidade do vento em diversos níveis de altitude (SILVA *et al*., 2017).

Assim sendo, o objetivo deste estudo é buscar indicadores termodinâmicos que possam sinalizar situações atmosféricas com potencial para o desenvolvimento de chuvas intensas no município do Rio de Janeiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista o objetivo deste trabalho, será feita uma revisão abordando os temas que norteiam esta pesquisa, tais como: climatologia de precipitação, eventos de chuvas intensas e características da escala sinótica associada e o uso de índices de instabilidade no estudo de perfis termodinâmicos da atmosfera local.

2.1 Climatologia de chuva na cidade do Rio de Janeiro

O estudo de uma climatologia nos mostra padrões de comportamento da atmosfera que nos ajudam a entender melhor o clima de um determinado local.

Pristo *et al.* (2018) elaboraram uma climatologia de eventos de chuvas intensas para o município do Rio de Janeiro, a fim de entender a frequência, intensidade, localização e padrões desses eventos extremos na cidade. O período considerado foi de 1997 a 2016, utilizando séries de dados de precipitação dos pluviômetros do Sistema Alerta Rio. Procedeu-se ao cálculo dos percentis de 75, 90, 95 e 99 dos acumulados de 15 minutos e de 24 horas. Com isso, os autores definiram como ECI (eventos de chuvas intensas) os dias em que o acumulado de 24 horas e o acumulado de 15 minutos se igualam ou ultrapassam seus respectivos percentis 95, simultaneamente. Dos resultados obtidos, destaca-se um máximo de precipitação no Maciço da Tijuca, ocorrendo na primavera. Porém, em uma análise geral, nota-se o verão como a estação mais chuvosa para a cidade do Rio de Janeiro. Observou-se também que os máximos de ECIs foram registrados próximos aos maciços da cidade (Sumaré e Mendanha), enquanto o mínimo foi observado na Tijuca e na Saúde. Quanto à frequência de ocorrência de ECIs, os autores verificaram que há aproximadamente 30 dias de ECIs por ano, sendo que cerca de 70% ocorrem no período chuvoso (dezembro a abril).

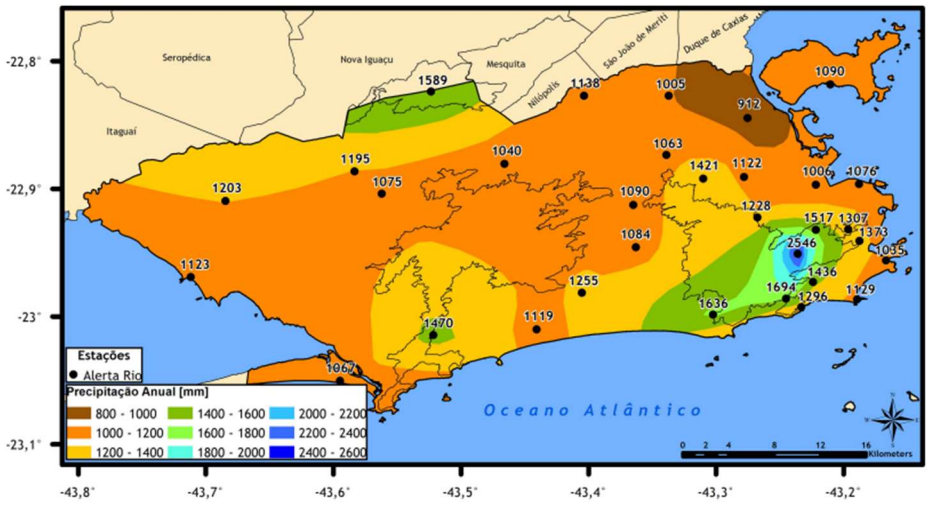


Figura 2.1 - Climatologia do total pluviométrico anual (mm/ano) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio. (Figura 2 de Pristo *et al.* (2018))

O método de percentis também foi utilizado por Lima e Armond (2022). Com o intuito de entender melhor as características da variabilidade de eventos de chuvas intensas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, os autores elaboraram um estudo em que utilizaram dados de 48 postos pluviométricos divididos em duas séries (2008 a 2019 – 40 postos; 1970 a 2019 – 8 postos) e aplicaram o método de percentis para estabelecer anos padrão e definir os eventos extremos. Com o auxílio do Software R, foram realizados testes estatísticos e de autocorrelação. Os resultados mostraram que os anos com maior ocorrência de eventos chuvosos foram 1988 e 2009 e que 90% dos extremos acontecem em dezembro, janeiro e março, sendo os de maior magnitude registrados em abril.

Na climatologia de precipitação elaborada por Dereczynski *et al.* (2009) para o município do Rio de Janeiro, os resultados mostraram que os máximos pluviométricos ocorrem nas regiões de maciços e diminuem nas regiões de planícies. Nota-se ainda que a estação do Sumaré registra os mais elevados índices pluviométricos da cidade, com pico no mês de setembro. Os dados utilizados foram da Fundação Geo-Rio, abrangendo o período de 1997 a 2006, totalizando 10 anos. Ao final, os autores concluíram que mais de 70% dos eventos chuvosos ocorrem por influência de sistemas frontais, enquanto apenas 13% estão relacionados à ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) e 8% a sistemas convectivos de mesoescala.

Para o estado do Rio de Janeiro, Silva & Dereczynski (2014) elaboraram uma climatologia utilizando dados observacionais de estações meteorológicas e pluviométricas entre os anos de 1961 e 2012, de temperatura do ar e precipitação. Os autores verificaram que as médias de temperaturas mínimas na região serrana variavam entre 9,5 e 17°C, enquanto nas regiões litorâneas essa média se elevava para 17 a 23°C. Verificou-se ainda que as menores temperaturas máximas médias ocorrem na região serrana e os valores mais elevados na região

metropolitana e no Norte/Noroeste Fluminense. Quanto à precipitação, observou-se que as regiões mais elevadas concentram as médias mais altas, enquanto as regiões de baixada e de costa registram números mais baixos. Em relação à tendência, pôde-se notar que os totais pluviométricos das chuvas mais fortes do ano nas Baixadas Litorâneas e em parte da região metropolitana apresentaram elevação significativa.

Dados de precipitação do Sistema Alerta Rio também foram utilizados por Silva *et al.* (2016) no período de 1997 a 2012, para elaborar uma climatologia e avaliar indicadores atmosféricos em eventos chuvosos na cidade do Rio de Janeiro, com o objetivo de melhorar a previsão de tais eventos, tendo em vista os grandes transtornos trazidos pelas chuvas ao município. Com o auxílio de simulações realizadas com o modelo numérico WRF (Weather Research and Forecasting), foram calculadas a probabilidade de detecção (POD), a razão de alarme falso (RAF) e os limiares para cada indicador atmosférico. Através do diagrama ROC (Relative Operating Characteristic, Wilks, 2006), foi possível verificar o desempenho das variáveis. Os autores concluíram que os indicadores mais eficientes para identificar condições favoráveis ao desenvolvimento de fortes chuvas foram a umidade específica em 850 hPa, a divergência do vento em 300 hPa, a água precipitável e a energia total das tempestades severas em 500 hPa.

No trabalho de Escobar *et al.* (2020), foram estudados os episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que também ocasionaram eventos de chuvas intensas (ECI) entre os anos de 2006 e 2016 na cidade do Rio de Janeiro. Os autores utilizaram o método de Pristo *et al*. (2018) para determinar ECIs. Dos 77 episódios de ZCAS ocorridos no estado do Rio de Janeiro, foi identificado pelo menos um dia de ECI em 37 deles. Em mais de 67% desses casos, as chuvas intensas ocorreram nos dois primeiros dias do período de ZCAS no Rio de Janeiro. Quanto ao padrão sinótico do sistema, observou-se uma frente fria sobre o Oceano Atlântico conectada a um sistema de baixa pressão próximo ao litoral do estado do Rio de Janeiro, com uma crista de nível superior localizada no sudeste do Brasil, contribuindo para a intensificação das chuvas. Dos quatro padrões sinóticos identificados para as ZCAS que atuaram no estado, os dois mais comuns estão associados a frentes frias próximas ao litoral da cidade, enquanto os outros dois estão relacionados a um anticiclone com características bloqueadoras e um ciclone extratropical.

2.2 Estudos de casos

Os estudos de casos são cruciais para a compreensão aprofundada de fenômenos meteorológicos severos e para o desenvolvimento de estratégias de previsão. Neste contexto,

diversos trabalhos destacaram eventos de chuvas intensas no Rio de Janeiro e regiões adjacentes, identificando padrões sinóticos e dinâmicos relevantes.

Calado (2012) realizou uma análise sinótica da tempestade severa que atingiu a Região Metropolitana do Rio de Janeiro em 6 de abril de 2010. A pesquisa utilizou dados de reanálise, totais pluviométricos, SYNOP, METAR, imagens de satélite e radar para identificar o padrão sinótico do evento, possibilitando a previsão de fenômenos similares. Um levantamento histórico das chuvas do município evidenciou que catástrofes causadas por tempestades são frequentes. O estudo concluiu que a chuva de abril de 2010 foi a mais intensa registrada entre 36 eventos analisados no período de 1883 a 2011. O evento foi associado a um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM), intensificado pela passagem de um sistema frontal e a presença de um cavado na média e alta troposfera.

Fumagalli Coelho e Nunes (2020) analisaram três eventos de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro, ocorridos em 14 e 15 de fevereiro de 2018, 6 e 7 de fevereiro de 2019 e 8 e 9 de abril de 2019. Os eventos, que resultaram em aproximadamente 20 vítimas fatais, tiveram suas características analisadas a partir de dados de pluviômetros do Sistema Alerta Rio, imagens de satélite (DSA/INPE) e reanálises meteorológicas (ECMWF). Constatou-se que, em todos os casos, a precipitação acumulada superou 100 mm em 24 horas, com intensidade máxima ocorrendo à noite, entre 00Z e 02Z. Os sistemas sinóticos identificados incluíram cavados em latitudes médias, vórtices ciclônicos de altos níveis, baixa pressão, difluência de vento em níveis superiores, frentes frias e a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul.

Silva *et al.* (2017a) investigou a passagem de uma frente fria no Rio de Janeiro em 6 de março de 2017, utilizando radiossondagens para avaliar os mecanismos dinâmicos e termodinâmicos associados à formação de nuvens e precipitações. O estudo revelou que o índice CAPE (Convective Available Potential Energy) indicava condições favoráveis à convecção, intensificando-se ao longo do dia, com valores máximos registrados às 16 horas. Em pesquisa posterior, Silva *et al*. (2017b) utilizaram radiossondas em duas datas (29 de novembro e 12 de dezembro de 2016) para avaliar parâmetros termodinâmicos e identificar perfis atmosféricos associados a tempestades. Constatou-se que a previsão meteorológica foi confirmada apenas para 12 de dezembro, quando os índices CAPE e LI mostraram variações significativas relacionadas ao aquecimento do ar e à umidade próxima à superfície.

Em outras regiões, Andrade *et al.* (2015) analisaram as chuvas ocorridas em 17 e 18 de março de 2013, que superaram 100 mm em 24 horas em várias localidades do Rio de Janeiro e litoral de São Paulo, alcançando 424,5 mm em Petrópolis. O estudo utilizou imagens de satélite (GOES-12), dados de precipitação, radiossondagens e previsões numéricas com modelos

regionais (ETA e BRAMS) e global (GFS). Semelhanças sinóticas foram identificadas com o evento de 2 de novembro de 2003, destacando a influência de uma frente fria e ventos intensos em baixos níveis, que favoreceram a entrada de umidade continental. Os modelos regionais representaram bem a natureza das chuvas, mas subestimaram a intensidade.

Sousa e Karam (2014) também investigaram as chuvas de 17 e 18 de março de 2013 no Rio de Janeiro, analisando a estrutura vertical da troposfera e a instabilidade termodinâmica por meio de variáveis conservativas, como temperatura potencial equivalente e de saturação. Foi identificada forte instabilidade condicional associada à advecção de ar úmido e ao cisalhamento do vento. Sinoticamente, uma frente fria no Atlântico e um canal de umidade sobre o Centro-Oeste do Brasil contribuíram para os altos volumes de precipitação.

Marques e Siqueira (2015) estudaram Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) nos dias 2 e 3 de janeiro de 2013, que causaram grandes impactos nas regiões metropolitana e serrana do Rio de Janeiro, incluindo mortes e feridos. O estudo utilizou imagens de satélite, radar e dados meteorológicos de superfície e reanálise (NCEP). Os SCM foram associados à passagem de uma frente fria no litoral, atingindo máxima intensidade na madrugada de 3 de janeiro em Xerém (Duque de Caxias). Características semelhantes às dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) foram identificadas, destacando a forte convergência de umidade e a instabilidade atmosférica.

Os estudos apresentados reforçam a importância de análises sinóticas e termodinâmicas para a compreensão de eventos extremos e o aprimoramento das previsões meteorológicas.

2.3 Uso geral de índices termodinâmicos

No estudo de Busch (2013), foi realizada uma climatologia de índices de instabilidade atmosférica utilizando radiossondagens do aeroporto do Galeão-RJ, entre os anos de 1980 e 2009, com o objetivo de traçar o perfil termodinâmico local e, assim, colaborar com a previsão de chuvas e tempestades na cidade do Rio de Janeiro. Foram feitas análises utilizando os índices K, Total Totals, Showalter, SWEAT, CAPE e o Índice de Levantamento nos horários das 00Z e 12Z. Nos resultados obtidos, observou-se que o horário das 00Z se mostrou termodinamicamente mais instável e que os índices, de forma geral, se mostraram eficientes em denotar essa instabilidade. Da análise sazonal, as estações primavera e verão foram as mais instáveis.

Sobre o uso de índices termodinâmicos em publicações sobre regiões brasileiras, Carmo *et al.* (2019) utilizaram dados de SYNOP e sondagens atmosféricas para realizar uma análise dos índices de instabilidade para as regiões Sul e Sudeste do Brasil, no período de 1996 a 2014. Os dados foram divididos em três intervalos de classes, a partir de 60 mm/dia, sendo: 1 – chuva

intensa, 2 – chuva moderada e 3 – chuva fraca/não chuva. Os autores selecionaram 12 eventos para cada classe, sendo que os casos em que houve chuva estavam associados a sistemas frontais. Os índices termodinâmicos Convective Potential Available Energy (CAPEv), Severe Weather Threat (SWEAT), K, Total Totals (TT), Lifted Index (LI) e Índice Showalter (IS) foram calculados para as três classes de precipitação. Para as classes 1 e 2 (casos de chuvas moderadas), os índices TT, K e SWEAT se mostraram bons indicadores, enquanto os índices LI, IS e CAPEv não corresponderam ao esperado para os casos selecionados. Os autores concluíram que a combinação entre os índices SWEAT, K e TT também foi capaz de identificar tais casos.

Para a região Metropolitana de São Paulo, Hallack e Pereira Filho (2012) analisaram o desempenho de índices termodinâmicos como previsores de eventos convectivos de mesoescala. O período escolhido abrange os dias entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. O estudo mostrou que houve chuva na maioria dos dias analisados, ocorrendo a partir da tarde. O índice K não apresentou valores tão altos nos cinco eventos e o Total Totals não conseguiu representar bem a intensidade de três dos cinco casos estudados. O Índice de Levantamento denotou instabilidade moderada em todas as datas e o Showalter avaliou bem quatro dos cinco eventos, embora tenha mostrado valores fortemente reduzidos em uma sondagem com camada isotérmica entre 910 e 840 hPa, assim como o CAPE Tv.

Em Escobar e Andrade (2010), foi elaborada uma climatologia dos índices termodinâmicos K e Total Totals para as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Os autores utilizaram dados de temperatura da reanálise do NCAR/NCEP (Kalnay *et al*., 1996), para o período de 51 anos (1956 a 2006). Com os campos médios mensais gerados para os horários das 00Z, 12Z e 18Z, observou-se que o índice K (00Z) na estação do verão, representado pelo mês de janeiro, obteve um máximo que se estende de Minas Gerais até São Paulo. Este comportamento é associado aos campos de chuva e umidade, que, por sua vez, são influenciados pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Nas estações de outono e inverno, representadas pelos meses de abril e julho, respectivamente, o índice K mostrou comportamento semelhante ao apresentado no verão, porém com seus valores absolutos em declínio. Para o índice K, observou-se uma elevação em seu gradiente devido ao aumento da radiação solar entre Minas Gerais e o Rio de Janeiro. Na primavera, este gradiente se intensifica até o estado do Rio Grande do Sul. Para o Total Totals, sua análise climatológica mostrou-se muito similar ao índice K, com um máximo sobre o centro-sul de Minas Gerais e valores variando entre 44 e 46 na primavera e verão; já para os meses referentes ao outono e inverno, esses valores chegaram a 40°C.

Oliveira *et al.* (2018) explicaram como o comportamento da atmosfera pode ser investigado por meio de radiossondagens. Esses sensores são lançados diariamente por balões atmosféricos, a partir de uma Estação Meteorológica de Altitude (EMA), e são capazes de coletar dados de pressão, temperatura, umidade do ar e vento em diversos níveis da atmosfera. Esses dados são capturados por rádio ou por meio de sítios de meteorologia de acesso livre. A partir desses dados, é possível calcular os índices de instabilidade atmosférica, por meio de suas respectivas equações matemáticas.

Dados de radiossondagens (DTCEA-Be) foram utilizados por Tavares e Mota (2012) para elaborar uma climatologia e investigar as condições termodinâmicas da cidade de Belém (PA). O período escolhido foi entre 1987 e 2007, nos horários de 00Z e 12Z, e os índices calculados foram CAPE, K, TT e LI. Os eventos de precipitação intensa da estação chuvosa foram selecionados pelo método de Decis (Xavier *et al*., 2007). Os autores verificaram que 56% das precipitações extremas apresentaram ambiente de forte instabilidade, com CAPE maior que 1000 J/kg, além de valores significativos para os outros índices. K, TT e LI foram bons representantes da instabilidade atmosférica e prognóstico de tempestades com chuvas fortes, com índice de acerto de 74%. Os autores ressaltam que as condições termodinâmicas não são as únicas responsáveis por eventos extremos de chuva, mas ajudam a promovê-los.

Uma climatologia dos índices de instabilidade K e TT também foi elaborada por Ferreira *et al*. (2016) para a América do Sul, no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2012. Foram utilizados dados de temperatura e umidade do ar obtidos da reanálise ERA-Interim do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC, para os níveis de 850, 700 e 500 hPa. Através dos resultados obtidos, os autores observaram que, na região Sudeste, há maiores variações nos valores dos índices de instabilidade, devido à evaporação na região amazônica, que afeta a estrutura termodinâmica da atmosfera devido às zonas de convergência de umidade que atuam nessas estações, principalmente no verão e na primavera. Nota-se também que, no interior do continente, os valores dos índices estudados são mais altos durante a estação do verão, devido à variação sazonal da temperatura e à precipitação proveniente do regime monçônico, principalmente no Sudeste do Brasil.

Em Schumacher e Teixeira (2016), foram estudados 105 eventos extremos e 342 eventos comuns que ocorreram entre os anos de 2000 e 2009, para analisar a relação entre índices de instabilidade e chuva extrema no Rio Grande do Sul. Os resultados mostraram um centro de baixa pressão em superfície sobre o Paraguai e o nordeste da Argentina, um escoamento de norte mais intenso nesta região e, consequentemente, maior convergência do fluxo de umidade sobre o sul do Brasil, especialmente sobre o estado do Rio Grande do Sul. As correlações entre

os índices de instabilidade e a chuva extrema mostraram relações lineares estatisticamente significativas para quase todos os índices.

O trabalho de da Silva, *et al.* (2020) elaborou uma análise da variação sazonal de índices termodinâmicos (LCL, LFC, CINE e CAPE) e uma intercomparação com a reanálise ERA-Interim para os índices e para os perfis médios sazonais de temperatura e umidade, para a região Amazônica no período de 2014 a 2015. A análise do perfil termodinâmico demonstrou que o ano de 2015 foi mais seco do que o ano de 2014 e a intercomparação com a reanálise demonstrou coerência entre os valores de LCL e os dados observados no horário das 18Z. No entanto, os valores de CAPE não demonstraram compatibilidade.

Grossmann (2010) desenvolveu um estudo via modelagem numérica utilizando o modelo BRAMS para analisar o comportamento espacial e temporal dos índices em diversos casos de tempestades no estado do Rio de Janeiro. Ao longo do estudo, percebeu-se que tais ferramentas eram eficazes na identificação de áreas mais propícias para o desenvolvimento de eventos convectivos, sempre fornecendo indicativos das regiões onde as tempestades estudadas se desenvolveram. A autora também identificou alguns "alarmes falsos" nas situações estudadas, ou seja, regiões onde algum índice indicava que poderia se desenvolver uma tempestade, mas não ocorria tal desenvolvimento. Ela então decidiu aprimorar o método para aumentar a precisão e diminuir as áreas de "alarme falso". De um modo geral, os resultados foram satisfatórios. O modelo BRAMS captou relativamente bem os sinais dos fenômenos de mesoescala estudados e mostrou que os índices calculados para esses casos conseguiram detectar um perfil termodinâmico favorável à formação de tempestades.

Nascimento (2005) conduziu um estudo para o Brasil com o objetivo de identificar ambientes favoráveis à ocorrência de tempestades convectivas severas (tempestades capazes de produzir granizo grande, vendavais intensos e tornados). O autor calculou parâmetros atmosféricos que destacam condições de intensa instabilidade convectiva e cisalhamento vertical do vento, utilizando, entre outras fontes de informação, saídas de modelos de mesoescala, que representam uma estratégia operacional de possível adoção no Brasil. O autor destaca que não existem "números mágicos" para a previsão de eventos convectivos. Até os melhores parâmetros para previsão de tempestades registram alto índice de alarme falso, ou seja, mesmo que tais parâmetros indiquem condições favoráveis à chuvas intensas, eles não são capazes de definir a questão importante da iniciação convectiva. Por isso, é imprescindível o componente humano no diagnóstico final da previsão de tempo severo, onde o meteorologista compara os dados fornecidos pelo modelo com os dados observados da atmosfera e baliza as informações quanto ao potencial de ocorrência de tempestades.

No artigo de Silva Dias (1987), é feito um estudo sobre os sistemas de mesoescala e a previsão em curto prazo, com destaque para a análise feita sobre quais aspectos da resposta do ambiente à atividade convectiva são favoráveis à continuidade da convecção. Segundo a autora, os principais agentes que podem desestabilizar uma convecção profunda seriam o resfriamento da alta troposfera pela ascensão adiabática e pelo resfriamento radiativo, e o aquecimento e umedecimento da baixa troposfera pelos fluxos turbulentos na superfície. A evaporação, a radiação e a convergência de umidade também são fatores importantes. Um fator relevante também (particularmente em latitudes médias) é a quantidade de energia necessária para levantar a parcela de ar condicionalmente instável até o nível de convecção espontânea. A autora ressalta que, para previsões de tempo em curto prazo, é necessário definir um sistema de aquisição e análise de dados que possibilite visualizar os diversos aspectos dinâmicos inerentes à formação de atividades convectivas.

O estudo de Menezes *et al.* (2006), aborda o uso de índices de instabilidade atmosférica como ferramentas de previsão meteorológica, com foco em eventos severos no estado do Rio de Janeiro. Os índices, como "K," "Total-Totals" (TT) e "Lapse Rate," foram calculados a partir de simulações realizadas com o modelo Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Além disso, foi considerado um novo índice, denominado "CK index," de acordo com Lima (2005), que combina fatores termodinâmicos e dinâmicos para melhorar a previsão de eventos em mesoescala. Foram analisados três casos de tempestades severas (31/01/2000, 21/03/2003 e 21/04/2005), utilizando dados de satélite, radar meteorológico e saídas do modelo numérico com grades de 27 km e 9 km. Os resultados mostraram que os índices "K" e "TT" apresentaram boa correspondência com as regiões de maior intensidade de chuva e convecção nos dois primeiros casos. O índice "Lapse Rate" teve desempenho satisfatório, especialmente em áreas específicas como a cidade do Rio de Janeiro. Já o "CK index" mostrou potencial para identificar a evolução e o deslocamento de sistemas convectivos profundos. O estudo destaca a importância dos índices de instabilidade na previsão de eventos severos em escala meso, especialmente quando modelos operacionais não conseguem prever chuvas associadas a tempestades convectivas. Esses índices podem ser ferramentas úteis para melhorar a previsão meteorológica operacional, mesmo em cenários de baixa resolução numérica.

2.4 Combinação dinâmica/termodinâmica em casos de chuvas intensas

Os trabalhos a seguir destacam a relação dinâmica e termodinâmica da atmosfera na caracterização de eventos chuvosos.

Silva *et al.* (2018) exploraram variáveis dinâmicas e termodinâmicas no período compreendido entre os dias 17 e 18 de março de 2013, evento chuvoso que causou transtornos

na cidade de Petrópolis, com o intuito de aprimorar o desenvolvimento de ferramentas operacionais no dia a dia de meteorologistas e defesas civis, no que diz respeito a inundações e deslizamentos. Entre as variáveis dinâmicas estão a divergência do vento em altos níveis da atmosfera (DIV), o cisalhamento vertical do vento (WS), o movimento vertical (OM) e a convergência do vento em baixos níveis da atmosfera (CONV). Para as variáveis termodinâmicas, foram utilizados a taxa de variação vertical de temperatura (lapse-rate), os índices K e Total Totals (TT), água precipitável (PW) e a CAPE. Através dos resultados, pôde-se perceber que, enquanto os indicadores dinâmicos atuavam antes e durante a precipitação, os índices termodinâmicos caracterizaram melhor o início da chuva. Observou-se também que os índices K, TT, PW e LR atuaram como suporte termodinâmico durante a precipitação. Os autores concluíram que a combinação dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos favoreceu a formação de nuvens convectivas e, quando não há componente termodinâmico presente, há maior facilidade para a formação de nuvens estratiformes.

Com o intuito de caracterizar o perfil atmosférico da cidade do Rio de Janeiro e contribuir com o aprimoramento das previsões de chuvas intensas, Silva, e*t al*. (2020) analisaram dados de radiossondagens de 30 experimentos realizados para a região metropolitana do Rio de Janeiro. Os autores utilizaram um método recomendado pela literatura, substituindo a temperatura do ar de uma sondagem lançada no horário das 12 UTC por valores previstos, utilizando dados observados à tarde. De acordo com os resultados, pôde-se notar que, para as camadas mais próximas à superfície, as maiores taxas de aquecimento ocorreram no período da tarde, nos dias com nuvens diurnas (DC) e também nos dias em que havia atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Nos dias em que havia influência de sistemas frontais, os valores de temperatura para o período da tarde eram mais baixos, comparados aos das sondagens matinais. Observou-se ainda que os ventos contribuíram para advecção quente e fria, apresentando componentes nordeste e sudoeste, e que as variáveis termodinâmicas foram superestimadas em relação aos resultados em grande parte dos dias estudados.

Silva *et al*. (2022) propõem um modelo híbrido para a previsão de eventos meteorológicos convectivos, combinando simulações numéricas com algoritmos de aprendizado de máquina. A pesquisa utilizou dados de precipitação das principais estações aeroportuárias do Rio de Janeiro e descargas atmosféricas da área circundante de cerca de 150 km, entre os anos de 2008 a 2020, com ênfase no mês de fevereiro, caracterizado pela maior frequência de descargas. O modelo Weather Research and Forecasting (WRF) foi empregado para simular as condições atmosféricas, e um teste de p-valor foi utilizado para identificar 36 variáveis atmosféricas mais relevantes para os eventos convectivos. Nove algoritmos de

aprendizado de máquina foram treinados com esses atributos, e o Random Forest apresentou os melhores resultados, alcançando alta precisão (POD = 1,00; FAR = 0,02; CSI = 0,98) na previsão dos eventos convectivos, especialmente na fase de maturação. No entanto, o modelo teve limitações nas fases de formação e dissipação dos eventos. A pesquisa mostra a eficácia da combinação de simulações numéricas e aprendizado de máquina na previsão de curto prazo de eventos meteorológicos, oferecendo contribuições significativas para a melhoria da previsão de tempestades convectivas.

Lima (2005) desenvolveu um estudo na bacia do rio Manso, centro-oeste do Brasil, em que propõe uma metodologia voltada às previsões de chuvas intensas na região. O modelo atmosférico BRAMS foi empregado, destacando o uso combinado da modelagem com os índices de instabilidade na determinação de ambiente favorável ao disparo de convecção. Nessa abordagem, um novo índice de instabilidade atmosférica, denominado CK, foi definido a partir do simples produto entre o índice K e a divergência do vento em baixos níveis (925 hPa). O índice CK, portanto, representa uma combinação dos efeitos dinâmico (forçante a partir da convergência do vento) e termodinâmico (dado pelo próprio índice K). Quanto mais negativo for o CK, mais favorável será o ambiente à formação de células convectivas. O estudo indica que o CK deverá ser testado nos centros operacionais de previsão do tempo e que a proposta desse novo indicador de tempo severo é bastante promissora.

3. ÁREA DE ESTUDO, DADOS E METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O local de interesse deste trabalho é o município do Rio de Janeiro, capital do Estado de mesmo nome. O município possui cerca de 1200 Km^2 de área e população em torno de 6,775 milhões de pessoas (IBGE, 2021).

3.2 Dados

Os dados de precipitação utilizados foram obtidos do sistema Alerta Rio (http://www.sistema-alerta-rio.com.br/dados-meteorologicos/download/dados-pluviometricos/). O Sistema Alerta Rio é o sistema de alerta de chuvas intensas e de deslizamentos em encostas da cidade do Rio de Janeiro, e mantém um banco de dados pluviométricos e de outras variáveis meteorológicas desde o ano de 1997 até os dias atuais. Sua rede pluviométrica conta com 33 pluviômetros distribuídos no município, com dados acumulados a cada 15 minutos (Fonte: site do Alerta Rio). A Figura 3.1 apresenta a localização dos postos pluviométricos. No presente trabalho, foram utilizados dados de precipitação referentes ao período de 26 anos, entre 1997 e 2023, de 33 postos pluviométricos, com ênfase dada à estação de Piedade, localizada na zona norte da cidade, conforme destacado na Figura 3.2. Embora o termo "climatologia" seja definido para um período de 30 anos de dados, neste trabalho esse termo será empregado quando for feita referência ao período de 26 anos acima indicado.

Índices termodinâmicos IL, K, TT e CAPE para os horários 00Z e 12Z também foram utilizados no mesmo período de 1997 a 2023, provenientes do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo do Galeão (DTCEA-GL) e obtidos a partir do endereço eletrônico da Universidade de Wyoming (https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html). Uma descrição desses índices é apresentada no item 3.3.

Os dados de direção e intensidade do vento, para elaboração das rosas dos ventos, foram obtidos a partir dos códigos METAR, disponibilizados pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (www.redemet.aer.mil.br), com frequência horária abrangendo o período de 2003 (início da disponibilidade dos dados) até 2020.

A divergência do vento, utilizada no cálculo do índice CK, foi obtida a partir de dados de reanálise ERA5, extraídos de um ponto próximo à estação Piedade (latitude 22,75°S, longitude 43,5°O), indicado na Figura 3.1.

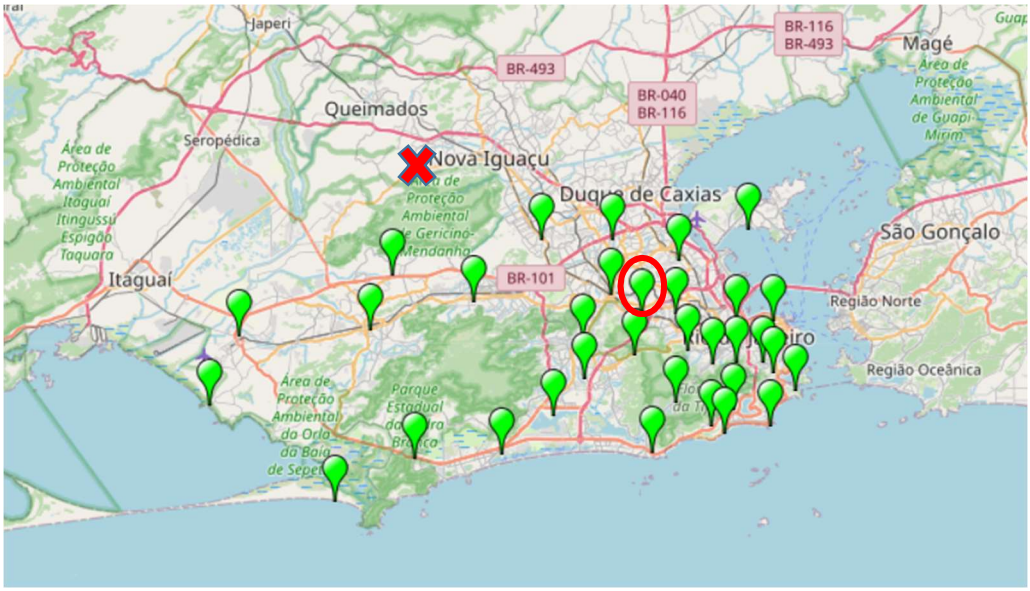


Figura 3.1: Distribuição espacial dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio, na cidade do Rio de Janeiro. A estação de Piedade está destacada com um círculo vermelho e o símbolo X em vermelho indica o ponto de obtenção da divergência do vento.

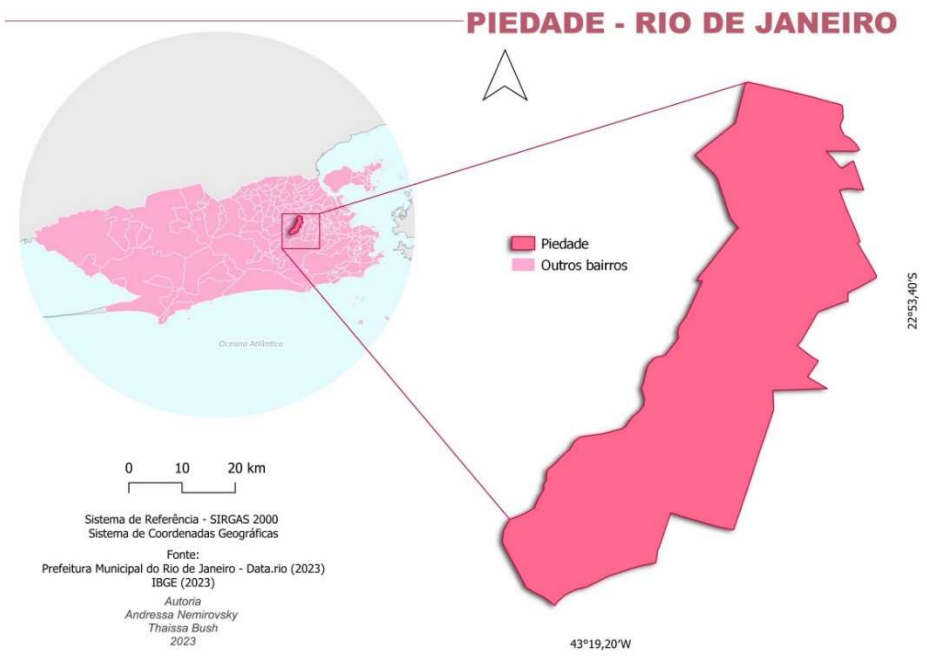


Figura 3.2: Mapa do município do Rio de Janeiro destacando o bairro de Piedade, localizado na Zona Norte da cidade.

3.3 Metodologia

No presente trabalho, o método de avaliação entre chuva e índice de instabilidade no município do Rio de Janeiro segue o procedimento descrito a seguir.

Inicialmente, calculou-se o percentil 95 dos acumulados diários (24 horas) e também de 15 minutos para cada estação pluviométrica do Sistema Alerta Rio, apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores de percentil 95 (em milímetros) diário (24 horas) e de 15 minutos para cada estação pluviométrica. A tabela também exibe a data de instalação de cada estação. Valores de chuva iguais à zero não foram considerados na obtenção do P95.

ESTAÇÕES	P95 (24h) mm	P95 (15min) mm	DATA DE INSTALAÇÃO
Alto da Boa Vista	59	3,2	16/04/2010
Anchieta	34,8	3,2	01/01/1997
Av. Brasil/Mendanha	34,2	2,8	01/04/2010
Bangu	32,2	2,8	01/01/1997
Barra/Barrinha	45,5	3	08/01/2013
Campo Grande	32,4	2,8	01/01/1997
Cidade de Deus	35,6	2,8	01/01/1997
Copacabana	36,8	3	01/01/1997
Grajaú	37,6	2,8	01/01/1997
Grajaú/Jacarepaguá	39,8	2,8	12/05/2010
Grande Méier	34,6	2,8	01/01/1997
Grota Funda	43,4	3	01/01/1997
Guaratiba	31,8	2,6	01/01/1997
Ilha do Governador	35,5	3,2	02/01/1997
Irajá	32,4	3	01/01/1997
Jardim Botânico	48,6	3,2	01/01/1997
Laranjeiras	42,7	2,8	13/08/2000
Madureira	33,6	2,8	01/01/1997
Penha	30,4	2,9	01/01/1997
Piedade	**34,3**	**3**	**01/01/1997**
Recreio	36,4	2,8	01/01/1997
Riocentro	39,7	3	01/01/1997
Rocinha	55,6	3,2	01/01/1997
Santa Cruz	35,4	3	01/01/1997
Santa Teresa	41,6	2,8	01/01/1997
São Cristóvão	33,2	2,8	19/08/2000
Saúde	35,5	3	01/01/1997
Sepetiba	34,7	3	01/01/1997
Tanque	34,2	2,8	01/01/1997
Tijuca	44,8	3	02/01/1997
Tijuca/Muda	42,2	3	07/02/2011
Urca	37,4	3	01/01/1997
Vidigal	41,2	3	01/01/1997

A seguir, a ocorrência simultânea de P95 diário com o P95 de 15 minutos foi definido como dia de chuva intensa. Uma avaliação preliminar referente apenas ao ano de 2016 permitiu identificar a estação de Piedade como aquela de maior ocorrência de dias de chuva intensa dentre todas as estações do Sistema Alerta Rio, de acordo com a definição aqui adotada. A partir desse resultado preliminar, definiu-se evento de chuva intensa (ECI) com base na data de

ocorrência de dia de chuva intensa em Piedade, juntamente com pelo menos mais outras dez estações, simultaneamente. Ou seja, para ser considerado ECI a chuva intensa precisa ocorrer simultaneamente em Piedade e em pelo menos mais dez estações, garantindo que pelo menos um terço das 33 estações pluviométricas do Sistema Alerta Rio indiquem chuva intensa em um determinado dia. Esse procedimento foi adotado para evitar que o ECI não se caracterize por eventos localizados de chuva, mas sim de forma espacialmente mais abrangente. Portanto, a definição de ECI aqui apresentada difere daquela dada em Pristo *et al*. (2018), sendo mais restritiva em número de eventos considerados. De acordo com o exposto, foram obtidas 100 datas de ECI, as quais são apresentadas a seguir na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Datas de ECI selecionadas no período de 1997 a 2023, de acordo com o critério descrito no texto.

05/01/1997	18/03/2003	14/03/2008	04/09/2013	09/04/2019
07/01/1998	21/03/2003	21/01/2009	05/12/2013	02/02/2020
08/01/1998	11/10/2003	21/09/2009	11/12/2013	03/02/2020
11/02/1998	29/11/2003	09/10/2009	16/01/2014	10/02/2020
14/03/1998	25/04/2004	30/12/2009	08/03/2014	01/03/2020
20/07/1998	29/11/2004	31/12/2009	22/03/2015	22/09/2020
07/10/1998	11/01/2005	15/01/2010	15/01/2016	07/12/2020
15/01/1999	26/01/2005	25/01/2010	16/01/2016	25/12/2020
12/03/1999	03/03/2005	06/03/2010	29/02/2016	02/01/2021
02/01/2000	25/03/2005	14/03/2010	12/03/2016	06/03/2021
17/02/2000	26/04/2005	05/04/2010	12/12/2016	30/05/2021
19/03/2000	26/11/2005	06/04/2010	07/01/2018	17/12/2021
28/03/2001	11/12/2005	05/12/2010	08/01/2018	30/12/2021
13/05/2001	27/01/2006	26/04/2011	15/02/2018	01/04/2022
20/10/2001	31/01/2006	26/12/2011	03/04/2018	14/04/2022
16/12/2001	10/02/2006	30/04/2012	08/11/2018	30/04/2022
24/12/2001	23/05/2006	03/01/2013	25/01/2019	21/12/2022
22/05/2002	07/10/2006	17/01/2013	04/02/2019	07/02/2023
25/01/2003	11/02/2007	26/01/2013	01/03/2019	30/03/2023
17/03/2003	24/10/2007	05/03/2013	03/03/2019	08/04/2023

Os índices termodinâmicos IL, K, TT e CAPE dos horários 00Z e 12Z, para as mesmas datas de ECI, foram considerados com o objetivo de estabelecer valores típicos desses índices

para chuvas intensas. Contudo, a análise foi limitada pela ausência de dados em algumas datas, resultando em um total de 73 dias disponíveis para o horário de 00Z e 85 dias para o horário de 12Z. Ao cruzar as informações, verificou-se que os índices estavam disponíveis de forma completa e simultânea às datas de ECI em 70 dias.

Para uma visão climatológica desses índices, o período total de 1997 a 2023 foi considerado para os horários 00Z e 12Z. Uma comparação entre a climatologia dos índices e os valores referentes aos casos de ECI é apresentada.

A metodologia de análise dos resultados é baseada em gráficos de chuva versus índice e na interpretação de gráficos do tipo boxplot para os índices termodinâmicos. Uma descrição do método boxplot e dos índices termodinâmicos será apresentada a seguir.

Adicionalmente, para observar o padrão do vento nos dias de ECI, foram elaborados gráficos do tipo rosas dos ventos para cada estação meteorológica de superfície dos aeródromos Galeão (SBGL), Santos Dumont (SBRJ), Jacarepaguá (SBJR), Santa Cruz (SBSC) e Afonsos (SBAF), (Figura 3.3). Esses gráficos foram criados para toda a série histórica disponível (2000 a 2023), permitindo uma análise comparativa entre a distribuição horizontal dos ventos nos dias de ECI e os padrões climatológicos típicos. Essa abordagem busca evidenciar diferenças ou similaridades nos regimes de vento, contribuindo para a compreensão das condições atmosféricas predominantes nesses eventos específicos.

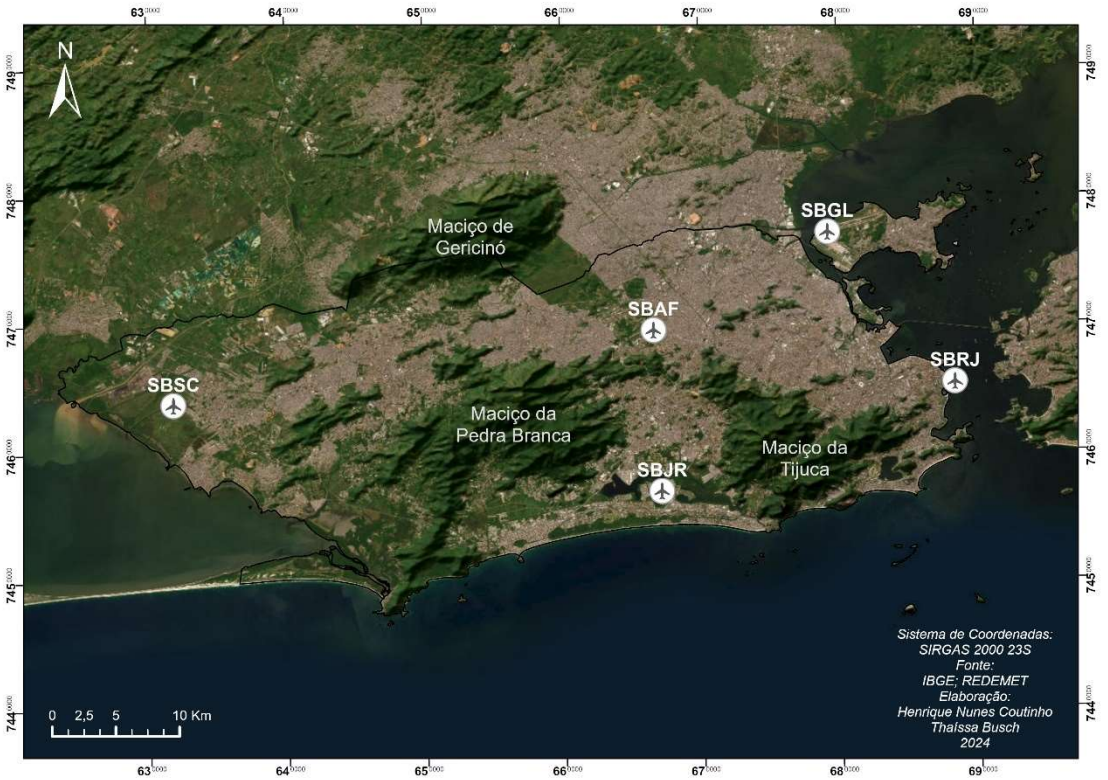


Figura 3.3: Localização dos aeródromos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, onde estão baseadas as estações meteorológicas da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET). Destacam-se os maciços de Gericinó, ao Norte, da Pedra Branca ao Sul e o Maciço da Tijuca, a Leste da região de estudo.

O *Boxplot* – ou em português, diagrama de caixa – consiste em um gráfico composto por seis elementos: valor mínimo (ou limite inferior), primeiro quartil, mediana (ou segundo quartil), terceiro quartil, valor máximo (ou limite superior) e *outliers* (ou valores discrepantes), como mostra a Figura 3.4. Onde os valores máximos e mínimos, correspondem ao maior e menor valor do conjunto de dados em questão (respectivamente), que não sejam outliers.

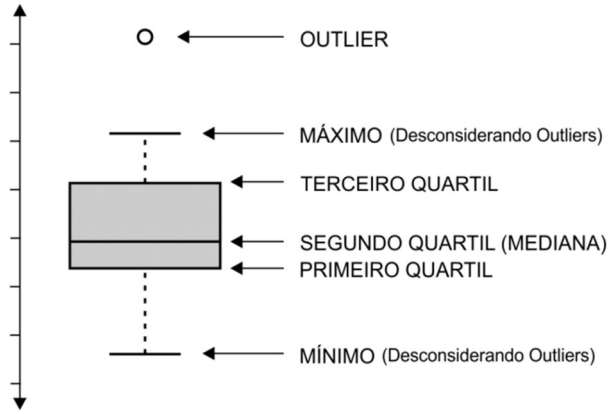


Figura 3.4: Representação da estruturação de um diagrama de caixa (*boxplot*).

A mediana é o valor central do conjunto de dados, onde 50% dos valores serão iguais ou inferiores a ela, e os outros 50% serão iguais ou superiores. O quartil segue a mesma lógica, porém, dividindo o conjunto em quatro partes iguais (cada um contendo 25%). As hastes inferiores e superiores marcam, respectivamente, os valores de Q1 - 1.5IQR e Q3 + 1.5IQR, sendo IQR o intervalo interquartil (IQR = Q3 - Q1), (WILKS, 2006).

Índices de instabilidade:

Índice K

O índice K é um dos mais utilizados para referenciar instabilidade atmosférica. Para o seu cálculo, são necessários os valores da temperatura do ar e do ponto de orvalho em 850 hPa, a temperatura do ar em 500 hPa, e a depressão do bulbo úmido em 700 hPa. Proposto por George em 1960, ente índice, para ser significativo, deve alcançar valores maiores que 24°C e

para que isso ocorra, deve haver calor em baixos níveis e umidade abundante em 700 hPa (SILVA DIAS, 2000). Quando o K é maior que 30°C, significa que a atmosfera tem alto potencial para desenvolver tempestades e se for maior que 40°C, esse potencial se intensifica (HENRY, 1987 *apud* NASCIMENTO, 2005).

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - Dep_{700}\ [°C]$$

Índice Total Totals (TT):

Em 1972, Miller propôs o índice Total Totals, que é definido pela temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho no nível de 850 hPa, e a temperatura do ar em 500 hPa. Para valores significativos de TT, é necessário que haja calor e umidade em 850 hPa e ar frio em 500 hPa (SILVA DIAS, 2000). Valores a partir de 40°C indicam atividade favorável à tempestade e acima de 50°C indicam alto potencial para ocorrência de tempestades severas, levando em conta, que o la*pse-rate* nos níveis médios da atmosfera também pode aumentar os valores de TT, por isso não se recomenda analisar este índice isoladamente (Nascimento, 2005).

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2\ T_{500}\ [°C]$$

CAPE:

O índice CAPE leva em sua equação os valores da temperatura virtual da parcela (T_{vp}) e a temperatura virtual do ambiente (T_{va}). Este índice foi formulado por Houze em 1993 e configura a energia potencial convectiva disponível, de uma parcela levantada a partir do NCE (Nível de Convecção Espontânea) até o NE (Nível de Equilíbrio ou nível de perda de empuxo de uma determinada parcela de ar ascendente). Este índice é apropriado para avaliar instabilidade por consequência do aquecimento da superfície, pois a CAPE calcula a energia máxima disponível para a ascensão de uma parcela de ar. Valores maiores que 2000 J/kg indicam potencial para a formação de supercélulas (HOUZE, 1993) e maiores que 4000 J/kg denotam instabilidade extrema (NASCIMENTO, 2005).

$$CAPE = g \int_{NCE}^{NE} \frac{T_{vp}(z) - T_{va}(z)}{T_{va}(z)} dz\ \ [J\ kg^{-1}]$$

Índice de Levantamento (IL)

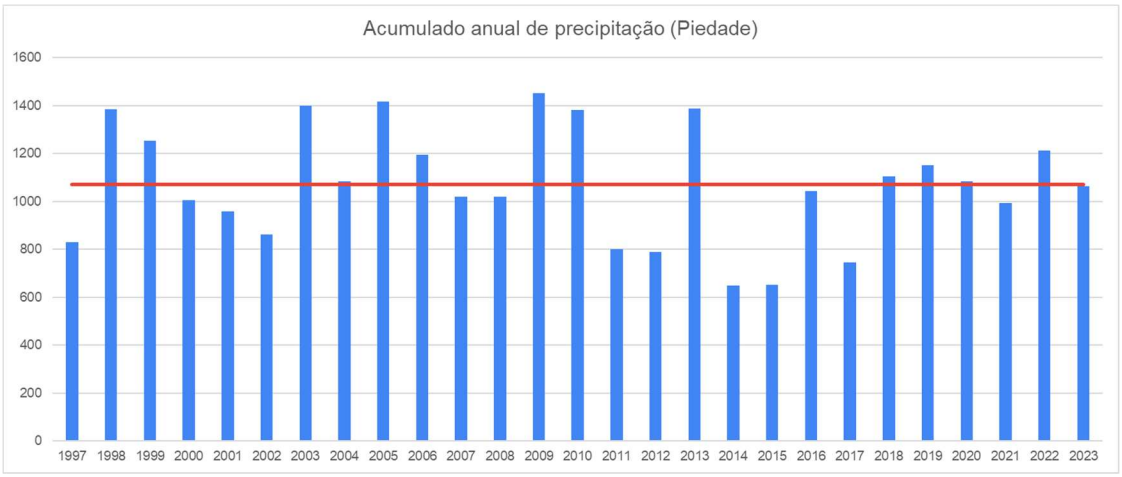
Galway desenvolveu este índice no ano de 1956. O Índice de Levantamento é uma variação do índice Showalter (definição de Showalter não descrita no presente texto). Logo, seus cálculos são similares sendo que o IL leva em consideração a temperatura da parcela no nível de 500 hPa, que é obtida através do levantamento da parcela de ar com razão de mistura média entre a superfície e o nível de 850 hPa. Este índice, para ser significativo, deve alcançar valores negativos menores que -5°C, e se chegar a ser menor que -10°C irá configurar uma atmosfera extremamente instável. O índice de Levantamento é uma boa ferramenta para traçar o perfil de instabilidade atmosférica, principalmente combinado a CAPE (NASCIMENTO, 2005).

$$IL = T_{500} - T''p_{500}\ [°C]''$$

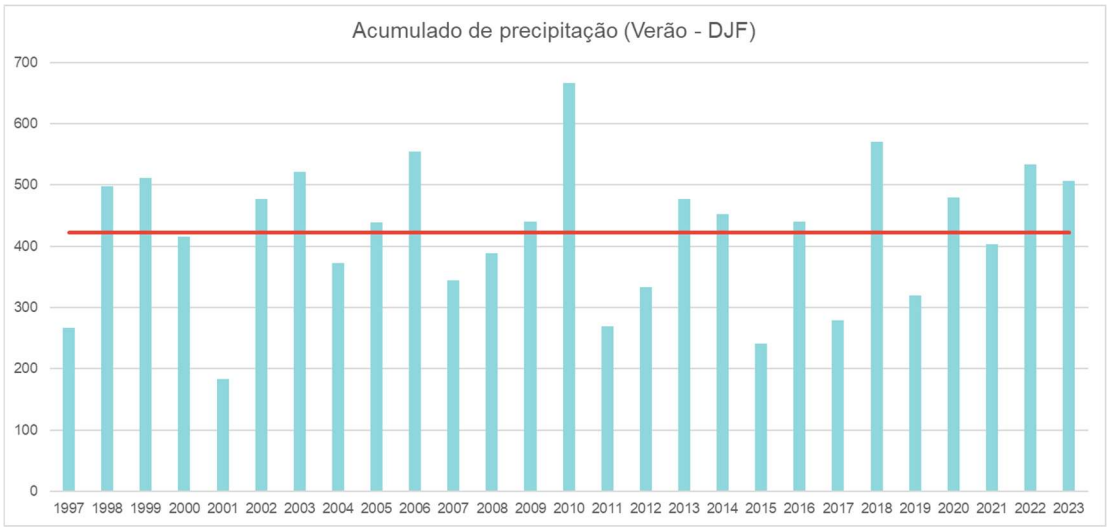
4. RESULTADOS

4.1 Climatologia da precipitação na estação Piedade

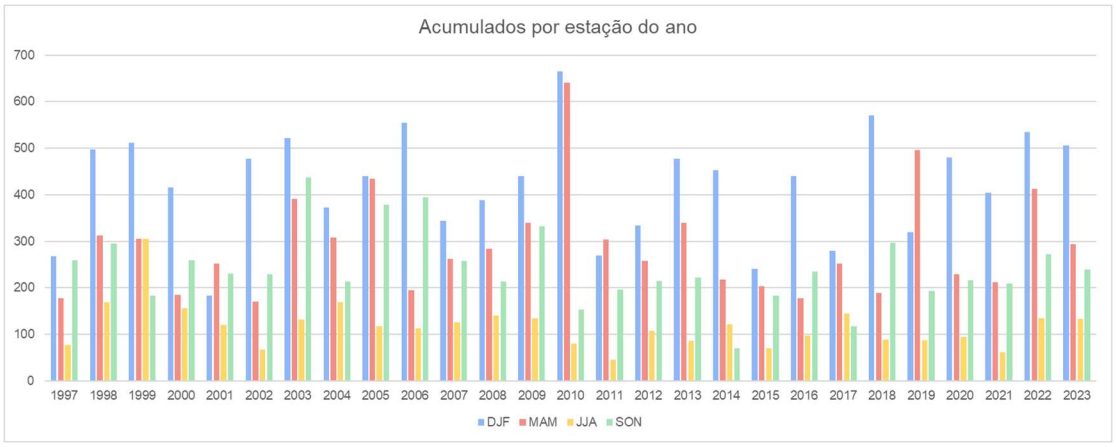
As figuras a seguir ilustram séries temporais de precipitação em Piedade. Os acumulados anuais no período de estudo variam de 600 mm a 1400 mm, aproximadamente, com valor médio (climatologia no período) de 1071,9 mm, como destacado na Figura 4.1a. Os anos 2014 e 2015 apresentaram os menores valores de precipitação (aproximadamente 600 mm). Por outro lado, os anos que apresentaram os maiores acumulados de precipitação são 1998, 2003, 2005, 2009, 2010 e 2013, com valores aproximados de 1400 mm. O verão é conhecido como a estação mais chuvosa para a região Sudeste. Na Figura 4.1b, são apresentados os acumulados de precipitação de verão, considerando os meses de dezembro, janeiro e fevereiro – DJF. Para o primeiro ano da série, 1997, foram considerados no verão apenas os meses de janeiro e fevereiro. A média dos valores registrados nesta estação do ano é de 421,8 mm. Os verões mais secos (excluindo 1997 nesta avaliação por contar apenas com janeiro e fevereiro) correspondem aos anos 2001, 2011, 2015 e 2017 com acumulados inferiores a 300 mm, onde o ano de 2001 não chegou nem a 200mm (183,8). Por outro lado, os mais chuvosos correspondem aos anos 1999, 2003, 2006, 2010, 2018 e 2022, ultrapassando a marca de 500 mm, com destaque para o ano de 2010 que registrou acumulado 665,8 mm de chuva. A Figura 4.1c é um demonstrativo dos acumulados de precipitação para cada estação do ano ao longo de toda a série de dados. Nota-se que o ano de 1999 registrou o inverno mais úmido, com acumulado de 300mm e no ano de 2003, ocorreu a primavera mais chuvosa, com mais de 400mm de chuva e o ano de 2010, registrou altos acumulados de chuva no verão e no outono (acima der 600 mm). Observa-se também que o verão de 2018 registrou quase 600mm de chuva, enquanto o outono do mesmo ano, registrou menos de 200mm. Já em 2019, o outono foi a estação mais chuvosa, registrando 500mm de chuva aproximadamente. Ressalta-se que nos anos de 2000/2001, 2014/2015 há registros de secas históricas na região Sudeste do Brasil (NOBRE *et al*., 2015 *apud* ALVARENGA CUMPLIDO *et al.,* 2023).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: Acumulado de precipitação para a estação de Piedade, entre os anos de 1997 e 2023: (a) anual, (b) verão – DJF e (c) estações do ano DJF, MAM, JJA, SON. A linha vermelha horizontal nos painéis (a) e (b) indica o valor médio da precipitação, respectivamente.

4.2 Caracterização dos ECIs

A Tabela 3.1, apresenta o percentil 95 de cada um dos 33 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio. Esses valores serviram de referência para se chegar às 100 datas de ECI, mencionadas

A seguir, tem-se um panorama geral da ocorrência de ECI's para cada ano na estação Piedade (Figura 4.2), bem como sua distribuição sazonal (Figura 4.3). Na Figura 4.2, apresenta-se a quantidade de eventos em cada ano ao longo da série temporal considerada. Destacam-se os anos de 2005, 2010, 2013 e 2020 com 7 episódios de ECI's, enquanto a média climatológica é de 3,7 episódios por ano, destacada pela linha horizontal vermelha na figura. Nota-se ainda que, segundo a metodologia escolhida, não houve ocorrência de ECI's no ano de 2017. A linha de tendência exibida na figura (linha tracejada) revela tendência de aumento de ECIs no período, como destacado também em Pristo *et al* (2018) para uma classificação de ECI menos restritiva.

Em relação a sazonalidade, percebe-se um comportamento de acordo com o esperado, com o número maior de eventos ocorrendo no verão (DJF), contabilizando 49 ECI's. A segunda maior ocorrência desses eventos ocorre na estação de outono, com 37 ECIs.

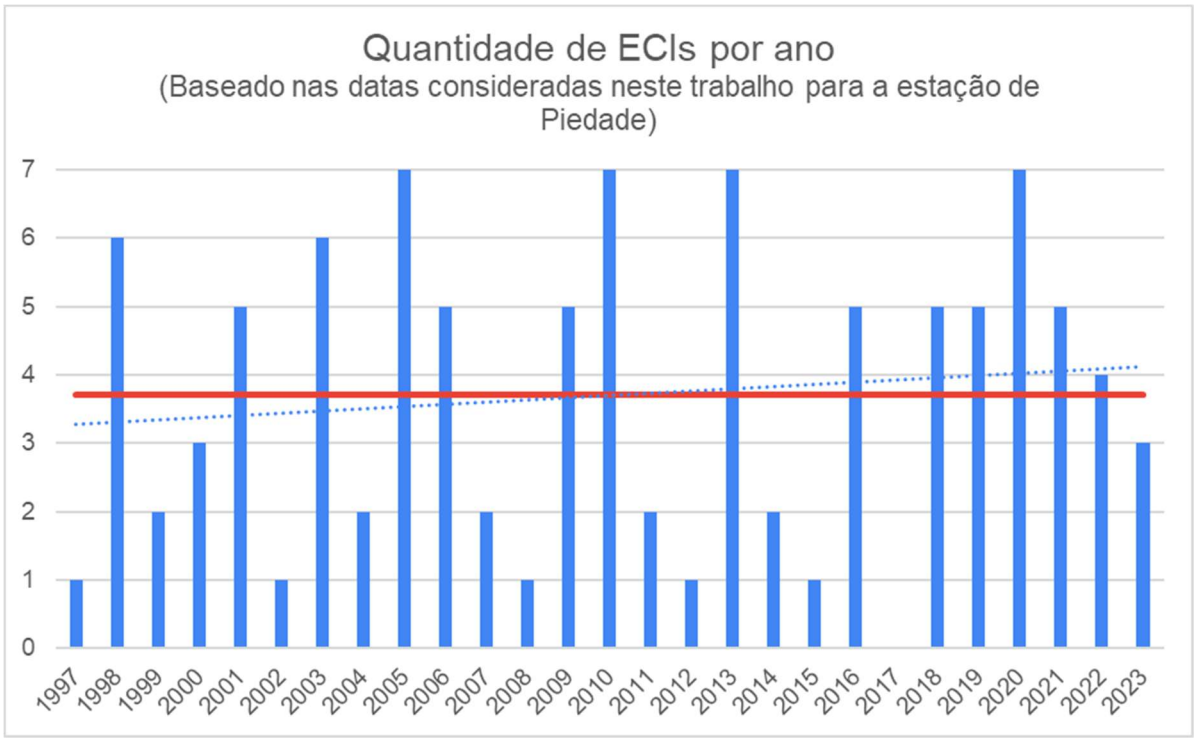


Figura 4.2: Distribuição da quantidade de ECIs por ano (1997 – 2023), onde a linha vermelha destaca o valor médio da série e a linha pontilhada destaca a tendência.

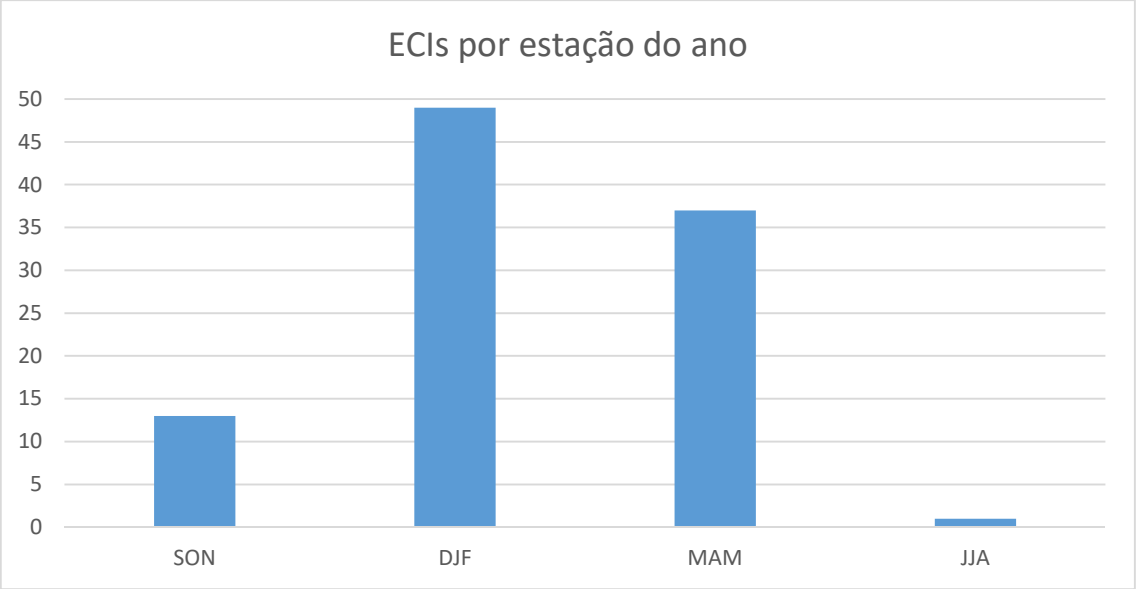


Figura 4.3: Distribuição da quantidade de ECIs por estações do ano: primavera (SON – setembro, outubro, novembro), verão (DJF – dezembro, janeiro, fevereiro), outono (MAM – março, abril, maio), inverno (JJA – junho, julho, agosto).

Sabe-se que a chuva ao longo do dia (24 horas) pode apresentar momentos de maior ou menor volume. Nesse sentido, a Tabela 3.2 destaca o período de maior acumulado de 4h ao longo do ciclo diário de cada ECI. O que se pode notar é a maior frequência de máximos acumulados no período 20-24h, com 27 ocorrências, seguido do período 16-20h, com 25 ocorrências. Este fato permite indicar que essas chuvas nessas faixas horárias são induzidas prioritariamente por efeito termodinâmico local, dado o desenvolvimento da convecção entre o final da tarde e início da noite, estimulada pelo aquecimento radiativo ao longo do dia. Apesar do período 16-20h ser o segundo mais frequente nessa classificação, é exatamente nessa faixa horária em que se apresenta o maior volume de chuva (1086,9 mm - Tabela 4.1). Por outro lado, em relação a períodos individuais de 4h indicados na Tabela 4.1, destacam-se os acumulados de 120,8 mm e de 113,2 mm, registrados nas faixas horárias 04-08h e 00-04h, respectivamente.

Tabela 4.1: Faixa de horário local dos máximos de precipitação para cada ECI.

Quantidade de registros	00-04	04-08	08-12	12-16	16-20	20-24
1	45,5	40,5	34,4	12,7	39,2	30
2	34	27,8	11,8	60,8	90,5	41,4
3	29	35	30,2	16,2	44,6	23,7
4	44	31,8	16,2	23	69,2	32,8
5	16,8	13,8	17,8	10,4	40,2	38,7
6	13,8	25,8	91	31,6	19,2	43,4
7	39,8	33,4		21,2	61,2	28,2
8	25	21,4		32,2	29,4	34
9	17,2	120,8		19,8	55,6	46,2
10	32,4	49,4		46	59,2	41,2
11	35	28,4			70,6	57
12	16,4	43,8			22,8	27,4
13	60,6	45,6			39,8	54,2
14	43,2				27	20,8
15	24,8				32,2	55,8
16	36,2				52,6	54,4
17	28				53,2	44
18	113,2				28,2	36,6
19	41,4				30	46,6
20	31,8				26,4	15,4
21					26,2	67,6
22					57,4	63,4
23					37,4	21,6
24					32,8	43,4
25					42	19,6
26						16,8
27						38
Quantidade total de precipitação	728,1	517,5	201,4	273,9	1086,9	1042,2

4.3 Índices termodinâmicos

As Figuras 4.4 e 4.5 a seguir apresentam resultados dos índices termodinâmicos no formato *boxplot* sem *outliers*. As mesmas figuras com a inclusão dos *outliers* são encontradas no Apêndice-A.

A Figura 4.4, apresenta gráficos *boxplot* referentes à climatologia dos índices e dos dias de ECI às 00Z e às 12Z. Através dos diagramas, pode-se observar que todos os índices demonstram maior instabilidade no horário das 00Z, tanto na climatologia, concordando com o resultado encontrado por Busch (2013), quanto nos dias de ECI. Esse fato é consequência da "memória" convectiva devido ao aquecimento da atmosfera em horários antecedentes às 00Z e ao resfriamento da mesma em horários antecedentes às 12Z.

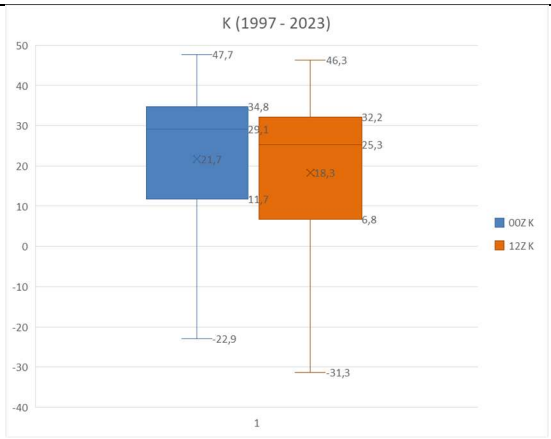
Por outro lado, tomando-se como referência a mediana, por exemplo, é notável que os maiores valores acontecem nos casos de ECI em comparação com a climatologia, reforçando a ideia que eventos intensos de chuva estão relacionados a valores também mais intensos dos índices termodinâmicos. Chama a atenção a quantidade de valores negativos do índice K na análise climatológica. Tal resultado indica perfil termodinâmico significativamente estável, o que pode ser inferido por meio da expressão do índice, apresentado na sessão 3.3.

A Tabela 4.2 resume os valores da mediana e do terceiro quartil (Q3), obtidos diretamente dos gráficos de *boxplots*, para os índices termodinâmicos analisados neste estudo. Esses valores são destacados em dois cenários distintos: climatologia e dias de ECI, considerando ambos os horários analisados (00Z e 12Z). Sugere-se que esses valores da mediana e do terceiro quartil sejam testados nos centros operacionais de previsão do tempo, avaliando, portanto, o potencial de formação de eventos de chuva intensa, especialmente quando os índices forem utilizados em conjunto com outros indicadores atmosféricos.

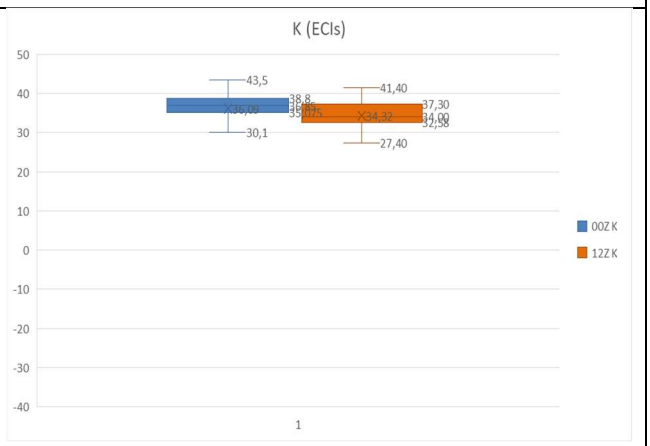
Tabela 4.2: Valores de mediana e terceiro quartil, obtidos pelos gráficos *boxplots* da climatologia e dias de ECI dos índices termodinâmicos. (*) Foi utilizado no índice IL o primeiro quartil, pois este índice é negativo.

ÍNDICES	**CLIMATOLOGIA**				**ECI**			
	MEDIANA		TERCEIRO QUARTIL		MEDIANA		TERCEIRO QUARTIL	
	00Z	12Z	00Z	12Z	00Z	12Z	00Z	12Z
K	29,1	25,3	34,8	32,2	36,6	34,4	38,7	36,9
TT	43,4	41,8	46,4	44,8	45,5	44,1	47,4	45,5
CAPE	5,9	41,3	686,2	378,5	809,2	226,4	1299,1	879,9
IL	0,1	1	-2,2 (*)	-1,4 (*)	-2,6	-1,1	-4,1 (*)	-2,6 (*)

Índice K

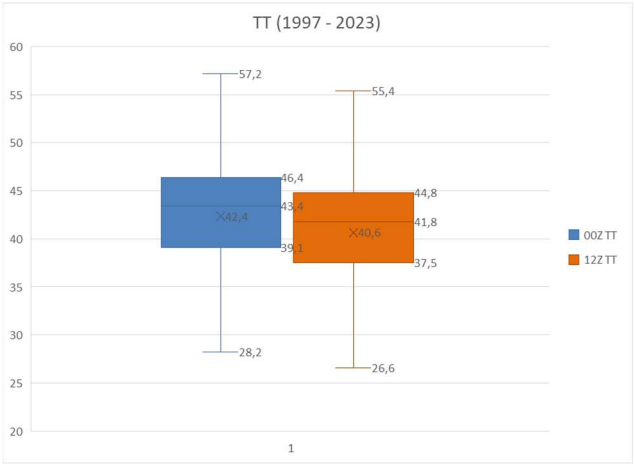


(a)

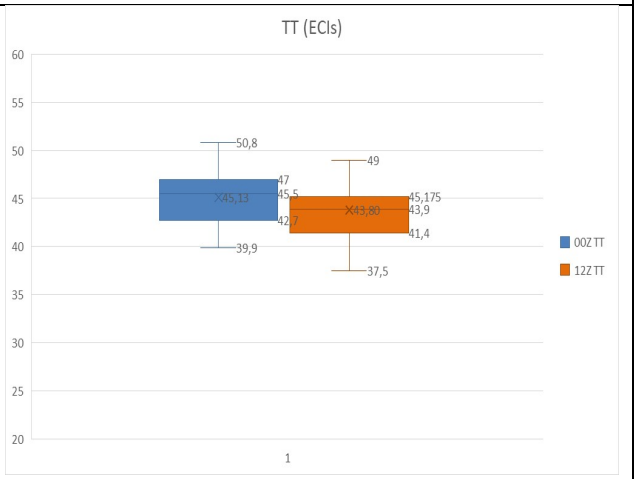


(b)

Índice Total Totals



(c)



(d)

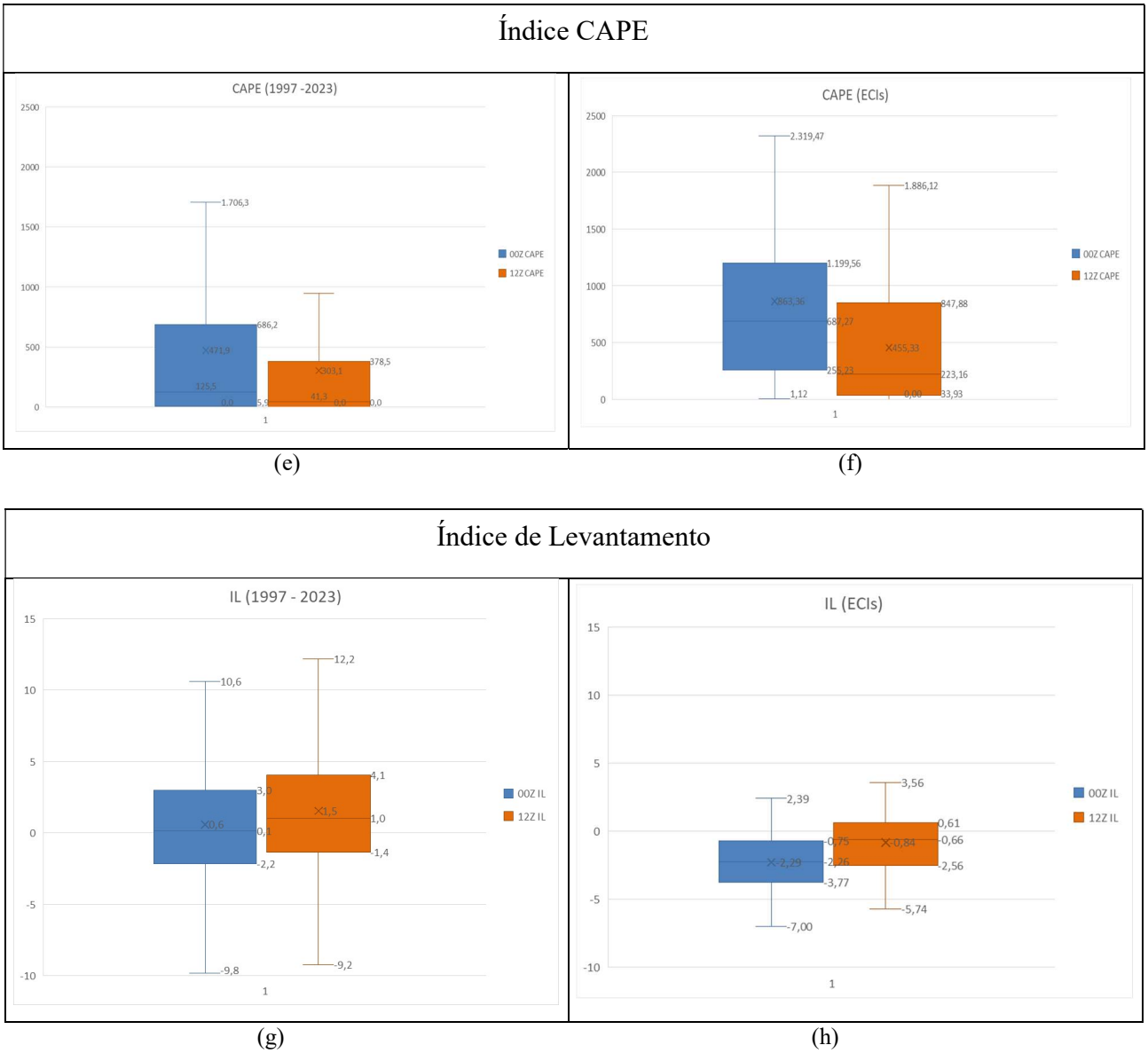


Figura 4.4: *Boxplot* referente à climatologia dos índices (coluna esquerda) – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e seus valores nos dias de ECIs (coluna direita) – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente. *Outliers* excluídos.

A Figura (4.5) apresenta a série temporal de *boxplot* para a estação de verão (DJF) ao longo do período 1997-2023, para às 00Z e às 12Z. Ressalta-se que para o horário 00Z não há dados no ano de 2001 e para ambos os horários não há dados no ano de 2010.

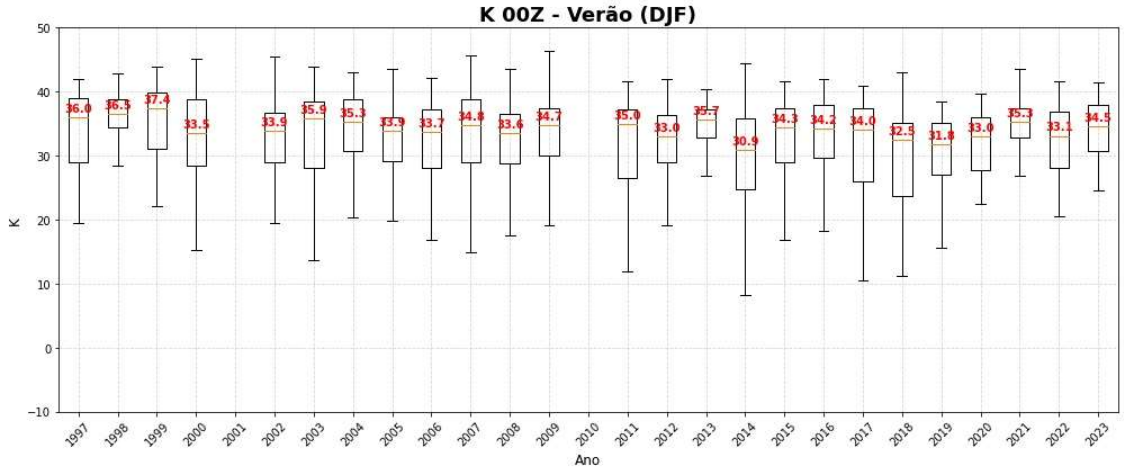
É possível notar que as séries temporais do *boxplot* também revelam que o horário das 00Z é sistematicamente mais instável que o das 12Z (Figura 4.5). Através dos diagramas podemos destacar que, para o índice K, em ambos os horários, o ano de 2013 apresenta pouca dispersão de dados, em contrapartida, nos anos de 2011 e 2014, essa variação é bem maior. É

interessante observar também, que o ano de 2014 possui o menor valor de mediana em ambos os horários.

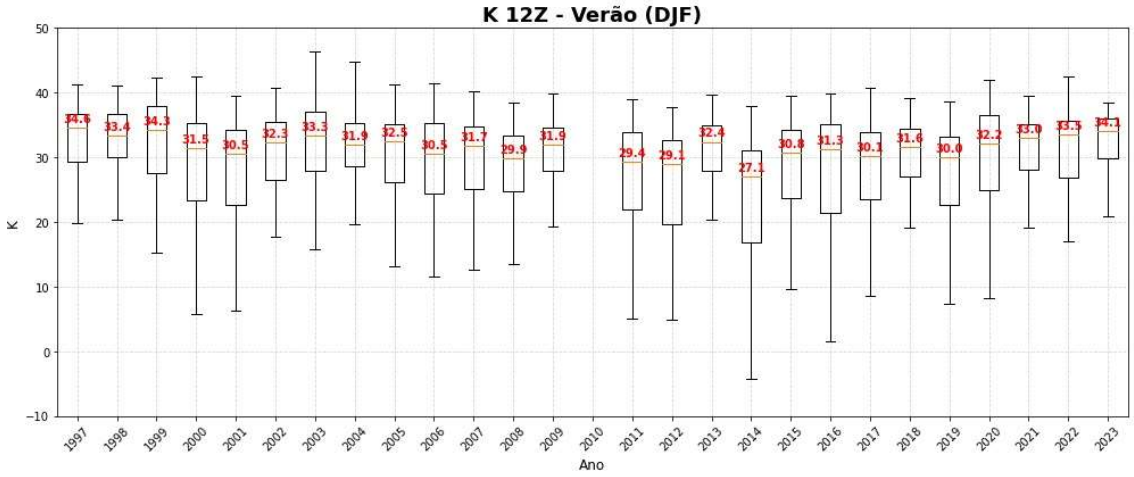
Para o TT, nos dois horários, observamos que os valores da mediana se concentram entre 40 e 50, onde os maiores valores acontecem no ano de 1999, tanto para o horário das 00Z, quanto para o horário das 12Z (47,5 e 45,6 respectivamente). Nota-se que os valores mais baixos deste índice ocorrem nos anos de 2005 para o horário das 00Z (43,4) e 2007, no horário das 12Z (41,9).

No diagrama da CAPE, destacamos o ano de 1999, que possui maior valor de mediana (1692,08 às 00Z e 1638,05 às 12Z) e maior valor máximo em ambos os horários. Ao longo da série também podemos notar grande variação nos valores da mediana e consequentemente grande dispersão entre primeiro e terceiro quartis.

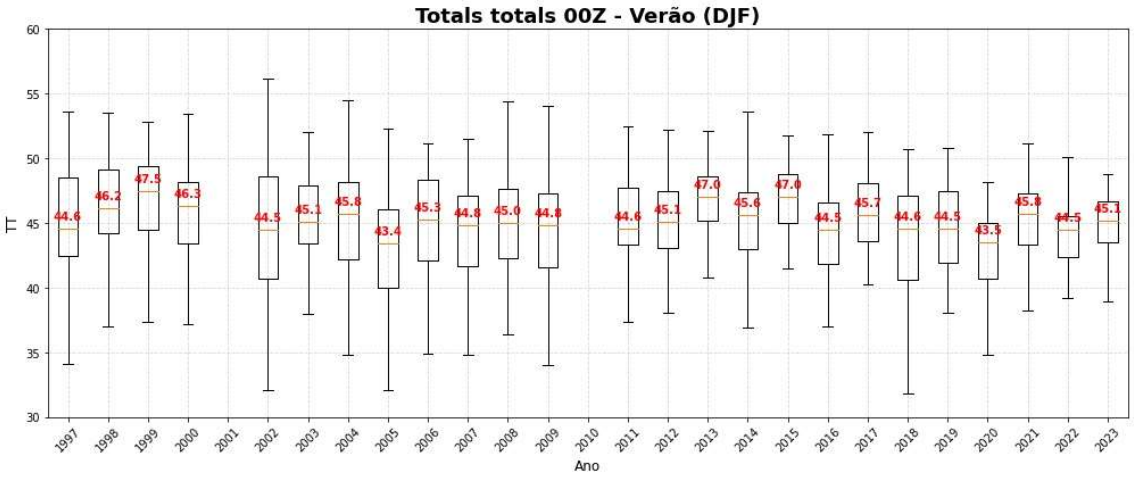
Em relação ao índice IL, é possível destacar que a mediana apesenta sistematicamente valores negativos em ambos horários 00Z e 12Z, exceto para às 12Z no ano 2007.


K 00Z - Verão (DJF)
K
Ano

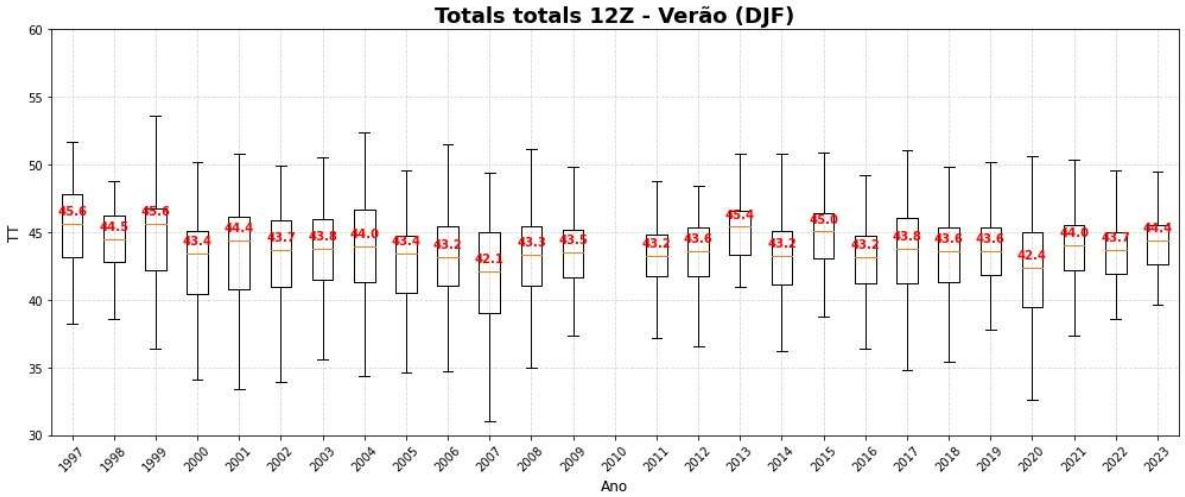
(a)


K 12Z - Verão (DJF)
K
Ano

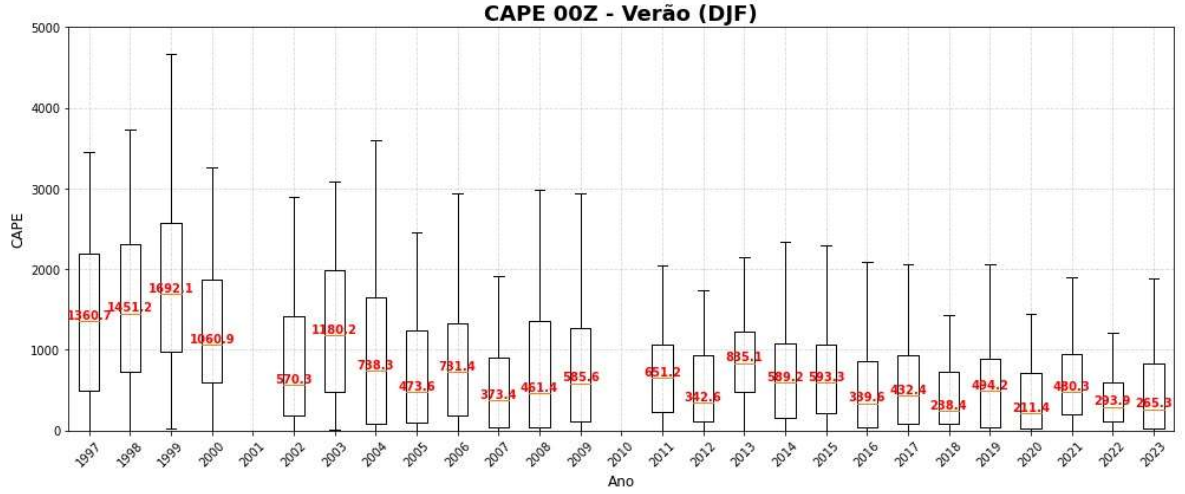
(b)


Totals totals 00Z - Verão (DJF)
TT
Ano

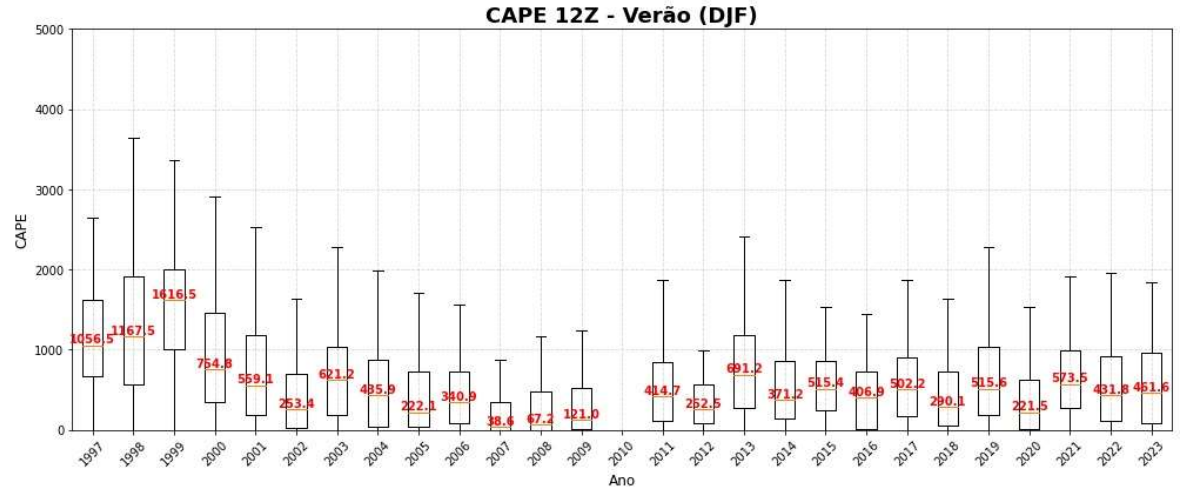
(c)


Totals totals 12Z - Verão (DJF)
TT
Ano
45.6
44.5
45.6
43.4
44.4
43.7
43.8
44.0
43.4
43.2
42.1
43.3
43.5
43.2
43.6
45.4
43.2
45.0
43.2
43.8
43.6
43.6
42.4
44.0
43.7
44.4

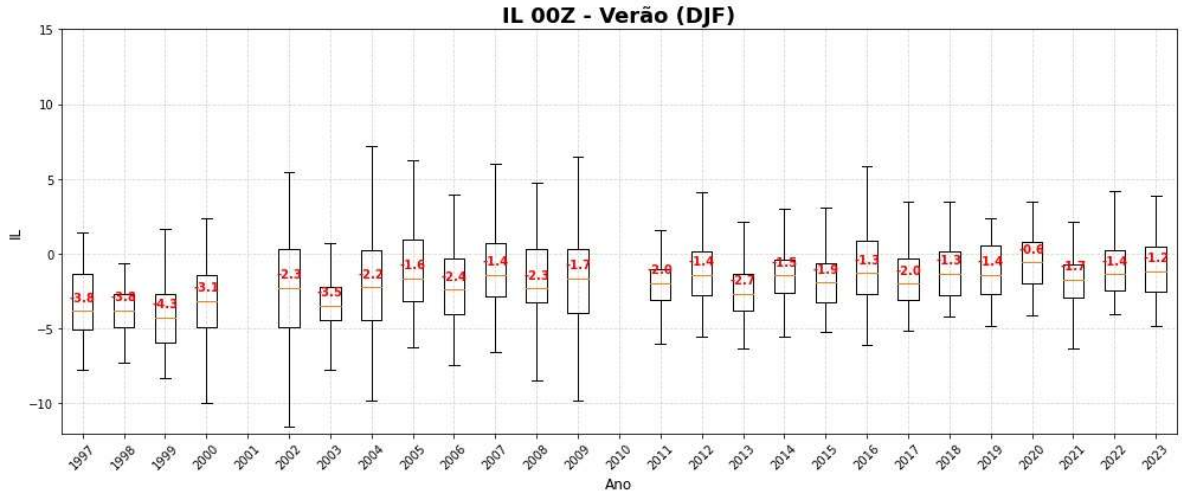
(d)


CAPE 00Z - Verão (DJF)
CAPE
Ano
1360.7
1451.2
1692.1
1060.9
570.3
1180.2
738.3
473.6
781.4
373.4
461.4
585.6
651.2
342.6
885.1
589.2
593.3
389.6
432.4
238.4
494.2
211.4
480.3
293.9
265.3

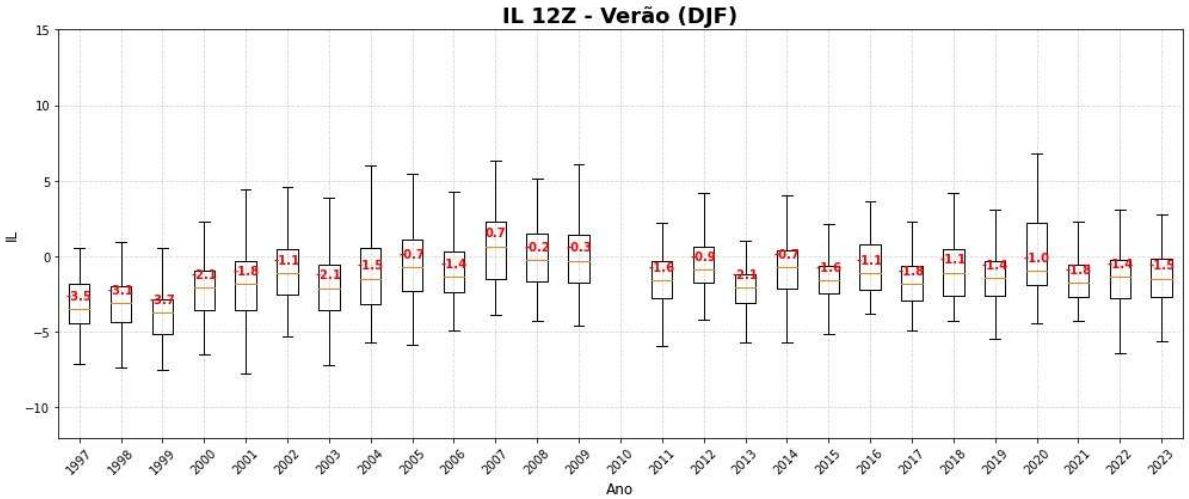
(e)


CAPE 12Z - Verão (DJF)
CAPE
Ano
1056.5
1167.5
1616.5
784.8
559.1
253.4
621.2
485.9
222.1
340.9
38.6
67.2
121.0
414.7
252.5
691.2
371.2
515.4
406.8
502.2
290.1
515.6
221.5
573.5
431.8
461.6

(f)



(g)



(h)

Figura 4.5: *Boxplot* para o verão (DJF) ao longo da série temporal de 1997 a 2023, referente aos horários 00Z – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e 12Z – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. A linha laranja se refere à mediana e seus valores estão destacados em vermelho. *Outliers* excluídos.

4.4 Índices termodinâmicos x chuva em ECI's

A relação entre índice termodinâmico e chuva é abordada a seguir, considerando os ECI's selecionados.

Primeiramente, pode-se destacar as séries temporais de chuva diária em cada um dos 100 ECI's, combinadas com os respectivos índices termodinâmicos nos horários 00Z e 12Z (Figura 4.6). Para o índice TT, nota-se valores relativamente elevados em 11/12/2013 de 46,2 e 42,7 para 00 e 12Z, respectivamente, associados à chuva de quase 150 mm. Porém, os valores mais altos deste índice ocorreram no dia 30/05/2021 (54 às 00Z e 51 às 12Z), com um acumulado de precipitação em torno de 40 mm.

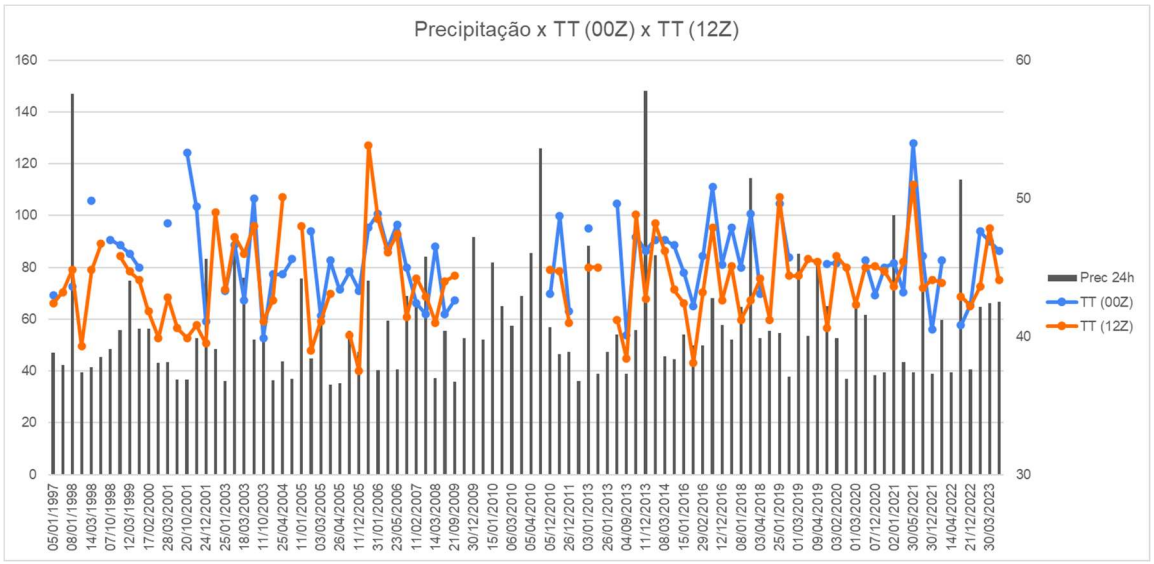
Para o índice CAPE é interessante destacar o dia 21/03/2003, onde observa-se o valor mais alto desta série de dados (4412,9). Para este dia, o acumulado de precipitação foi de 52 mm.

Para o Índice de Levantamento, sabemos que valores negativos correspondem a mais instabilidade termodinâmica. Nesta série de dados, o valor mais negativo de IL aconteceu no dia 27/01/2006 às 12Z (-7,8) e sua correspondência de precipitação acumulada foi de 74,8 mm.

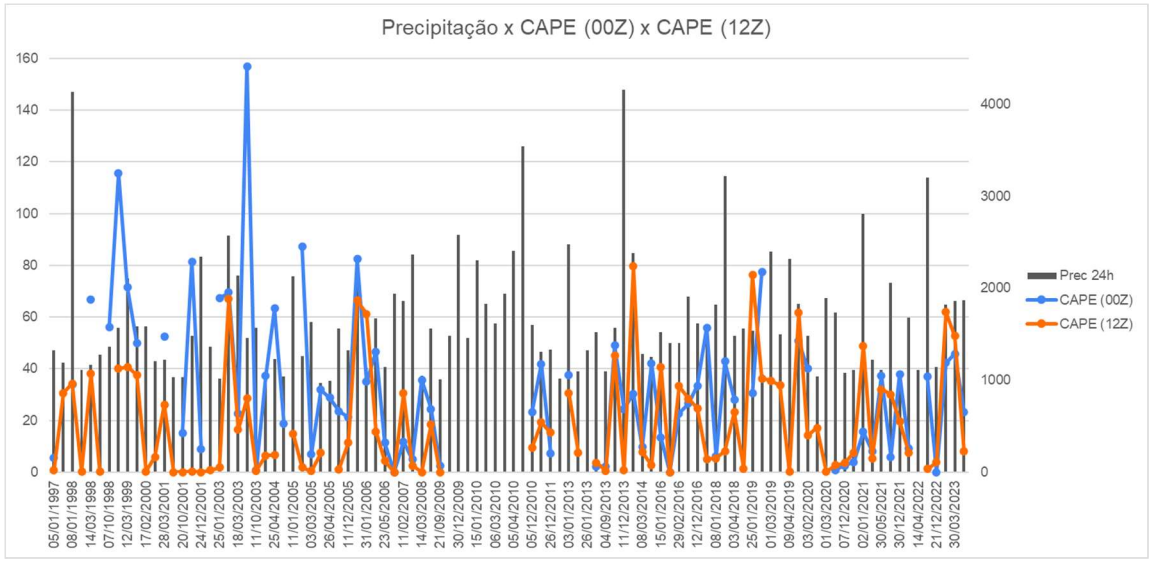
Em relação ao índice K, constata-se altos valores também no dia 11/12/2013 nos dois horários, assim como o TT. É interessante observar também o dia 15/02/2018, onde houve um acumulado de 114,4 mm de precipitação e o índice K registrou grande diferença de valores entre os dois horários, 41 às 00Z e 12,7 às 12Z. Observa-se ainda, um valor negativo deste índice no dia 11/02/2007 (00Z), onde houve um acumulado de 66,2 mm de precipitação.

Em uma análise geral, destaca-se o dia 11/12/2013 (o maior acumulado de precipitação desta série de dados), em que os índices K, TT e IL, no horário das 00Z, alcançaram valores onde, segundo a literatura, podem caracterizar um ambiente atmosférico condizente com a alta quantidade de precipitação ocorrida.

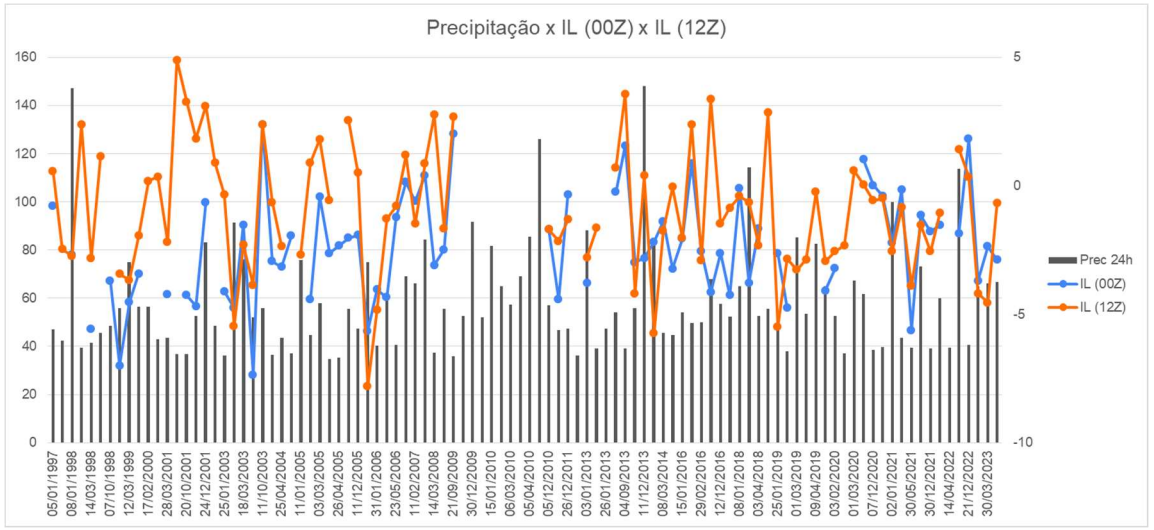
É importante destacar que, embora os índices possam atingir valores que indiquem instabilidade atmosférica, isso não significa, necessariamente, que ocorrerão altos registros de precipitação. Para que a precipitação aconteça é necessário que outros fatores dinâmicos e termodinâmicos estejam presentes, contribuindo para a formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação.


Precipitação x TT (00Z) x TT (12Z)
Prec 24h
TT (00Z)
TT (12Z)

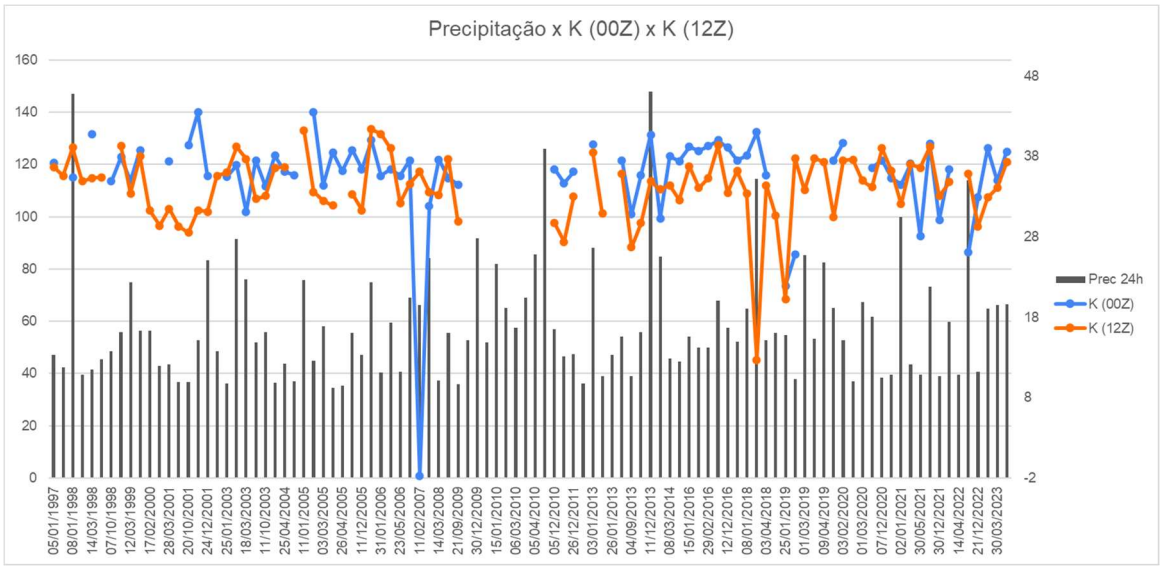
(a)


Precipitação x CAPE (00Z) x CAPE (12Z)
Prec 24h
CAPE (00Z)
CAPE (12Z)

(b)


Precipitação x IL (00Z) x IL (12Z)
Prec 24h
IL (00Z)
IL (12Z)

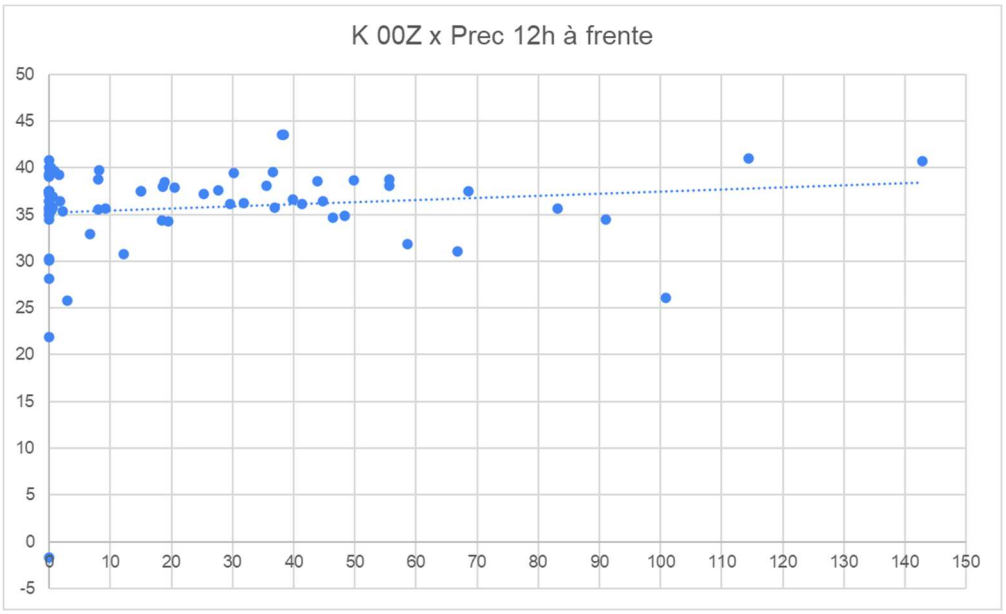
(c)



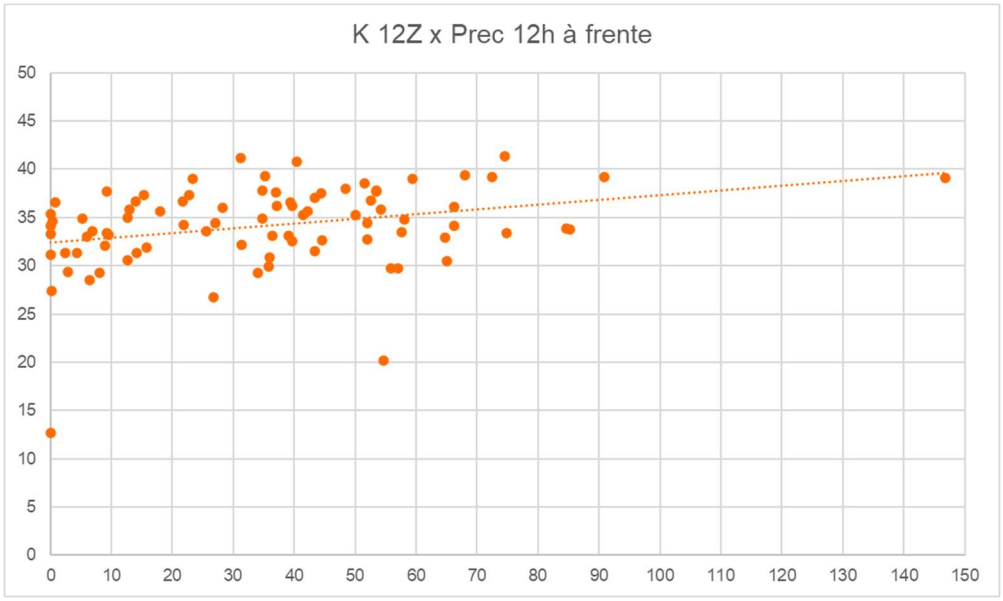
(d)

Figura 4.6: Distribuição da chuva, nos dias de ECIs, associada aos índices termodinâmicos – (a) Total Totals, (b) CAPE, (c) Índice de Levantamento e (d) Índice K – às 00Z (linha azul) e às 12Z (linha laranja). A escala do lado esquerdo é referente aos valores de precipitação e do lado direito referente aos valores dos índices.

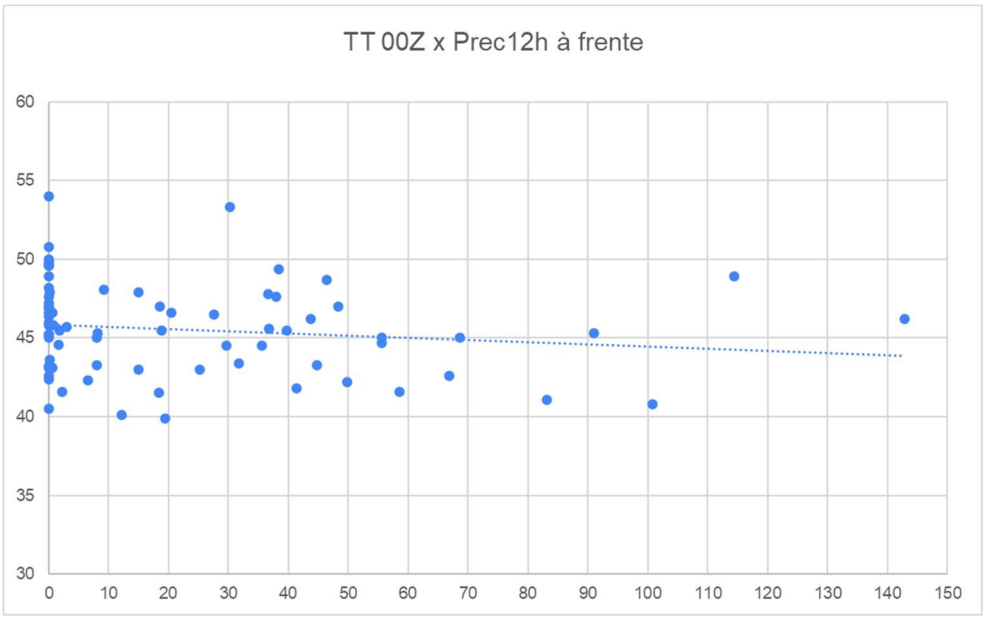
Embora a Figura 4.6 seja importante para apresentar a evolução dos índices termodinâmicos referentes aos ECI's, nota-se que os mesmos não estão muito bem correlacionados com a chuva diária. Assim sendo, procedeu-se uma visualização em gráfico de dispersão para esses mesmos índices, mas combinados com a chuva acumulada em 12h (Figura 4.7). É possível perceber que, para todos os índices termodinâmicos, a chuva acumulada 12-24h fica melhor correlacionada com os índices no horário das 12Z, enquanto que o acumulado de 00-12h não fica bem correlacionado com índices de 00Z. Isso pode ser justificado pelo fato de que é justamente no período da tarde e início da noite que a atmosfera local está termodinamicamente mais aquecida e apresenta seus valores máximos de chuva. A Tabela 4.3 referenda essa conclusão com base nos coeficientes de correlação entre chuva diária (acumulada em 24h) correlacionada com os índices de 00Z e 12Z e chuva em períodos acumulados de 12h à frente para os respectivos índices 00Z e 12Z.


K 00Z x Prec 12h à frente
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150

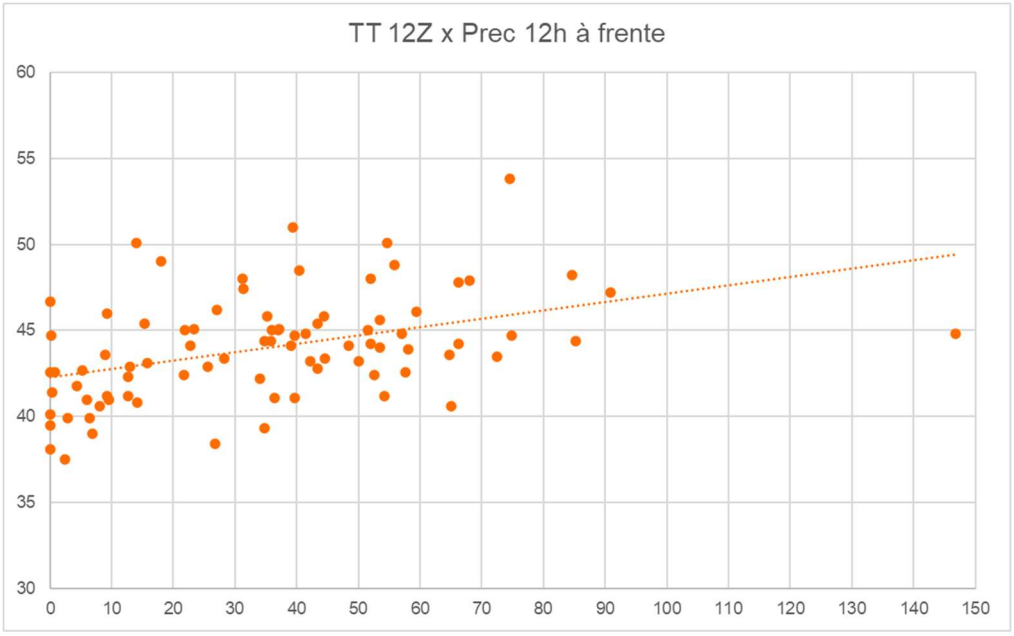
(a)


K 12Z x Prec 12h à frente
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150

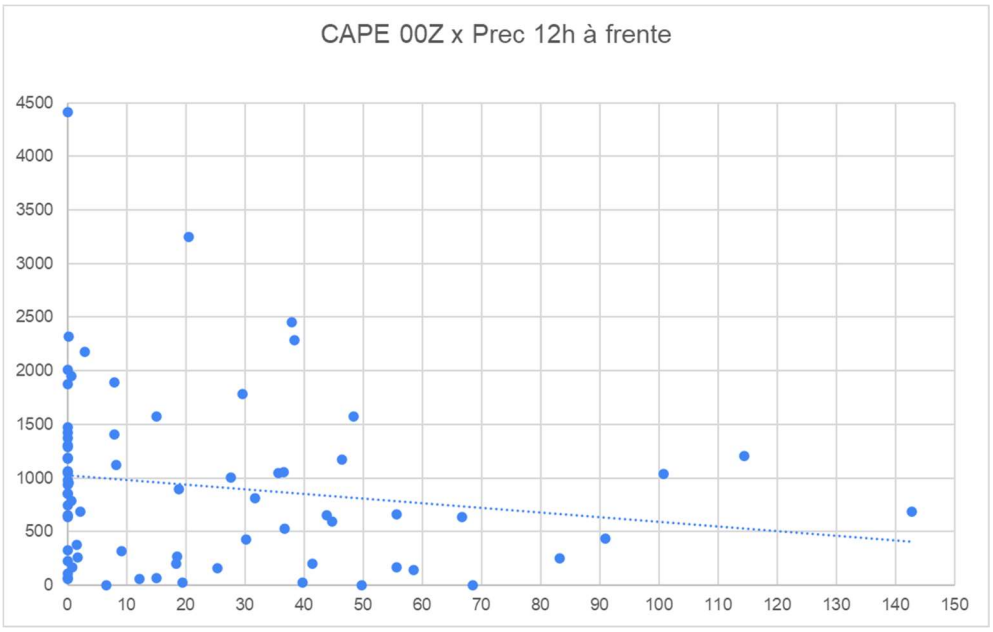
(b)


TT 00Z x Prec12h à frente
60
55
50
45
40
35
30
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150

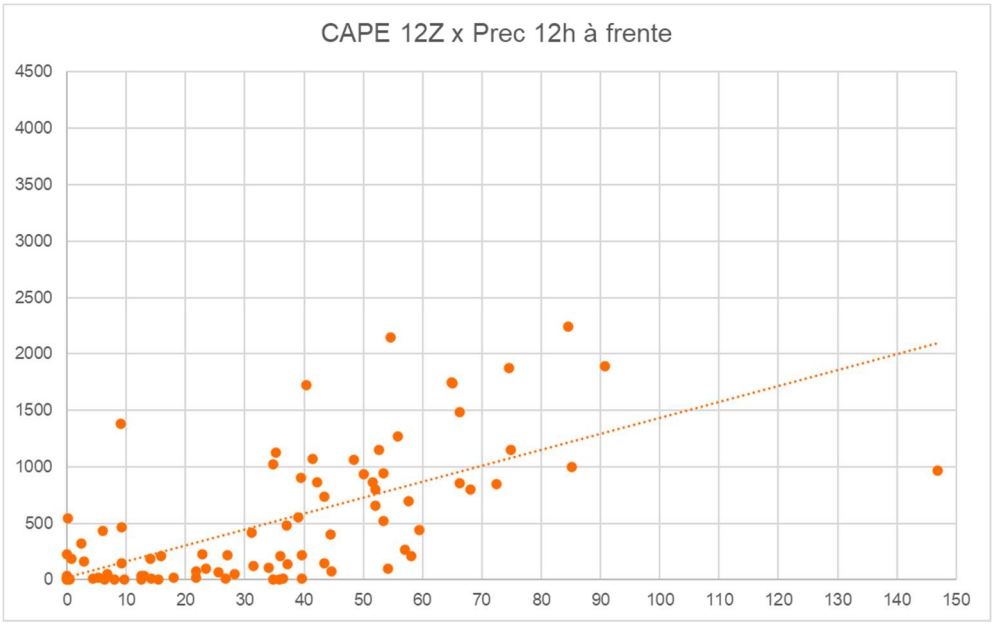
(c)


TT 12Z x Prec 12h à frente
60
55
50
45
40
35
30
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
130
140
150

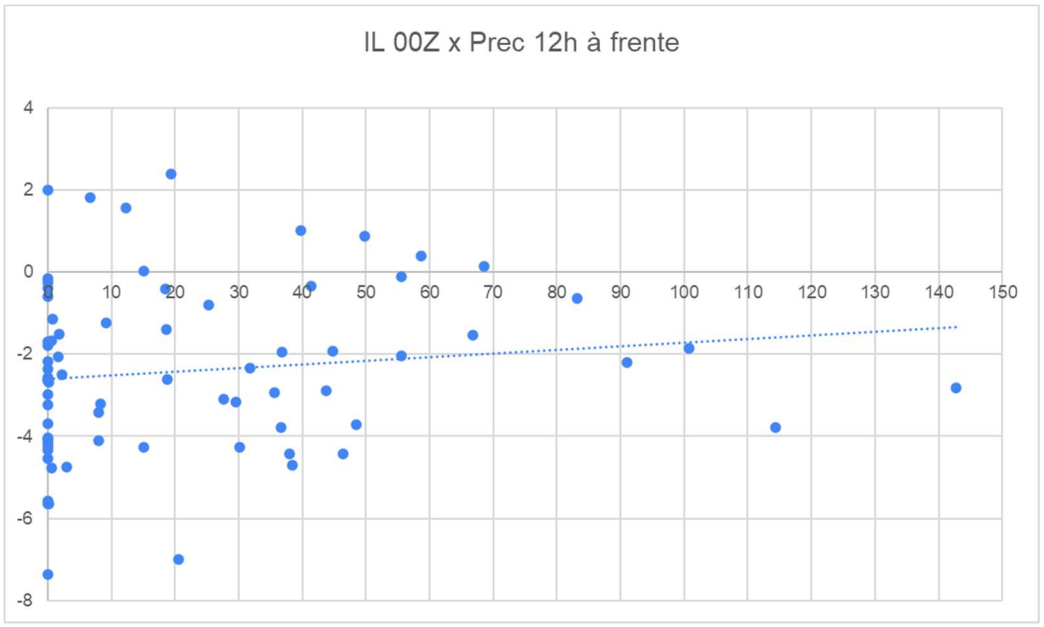
(d)


CAPE 00Z x Prec 12h à frente
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150

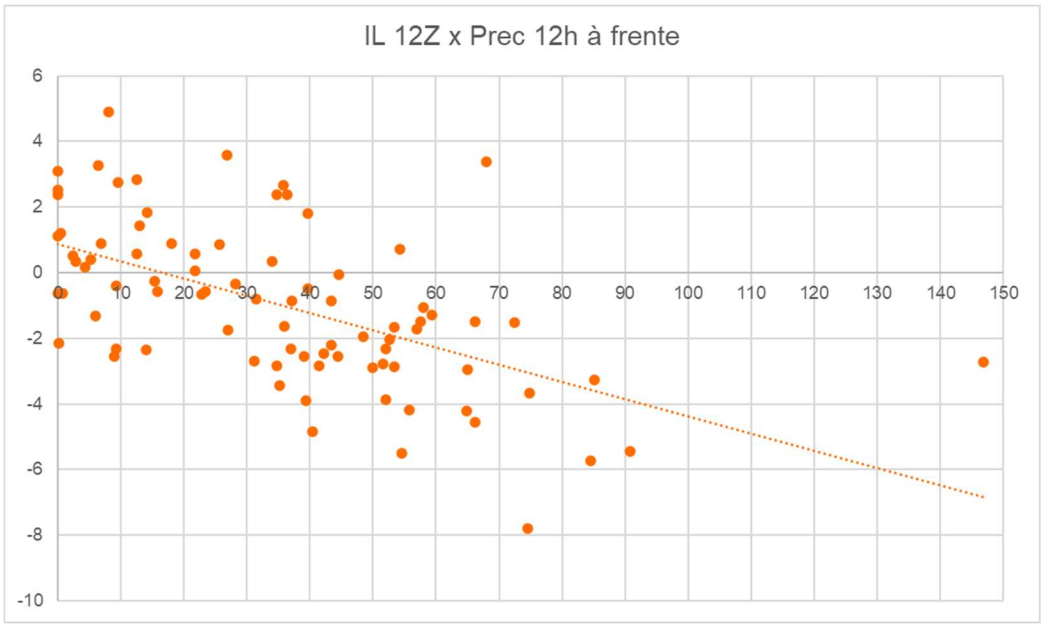
(e)


CAPE 12Z x Prec 12h à frente
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150

(f)



(g)



(h)

Figura 4.7: Gráficos de dispersão de índices termodinâmicos x precipitação (dividida em dois períodos de 12 horas – 00h a 12h (00Z – azul: (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL) e 12h a 24h (12Z – laranja: (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL)).

Tabela 4.3: Correlações entre acumulados de precipitação diária (24 h) e de 12 horas com os índices termodinâmicos às 00Z e 12Z.

CORRELAÇÕES	
Prec (24h) x K 00Z	-0,05
Prec (24h) x K 12Z	+0,04
Prec (24h) x TT 00Z	-0,06
Prec (24h) x TT 12Z	+0,08
Prec (24h) x CAPE 00Z	0,00
Prec (24h) x CAPE 12Z	0,21
Prec (24h) x IL 00Z	-0,05
Prec (24h) x IL 12Z	-0,16
Prec (00 - 12h) x K 00Z	+0,12
Prec (12 - 24h) x K 12Z	+0,31
Prec (00 - 12h) x TT 00Z	-0,14
Prec (12 - 24h) x TT 12Z	+0,42
Prec (00 - 12h) x CAPE 00Z	-0,16
Prec (12 - 24h) x CAPE 12Z	+0,64
Prec (00 - 12h) x IL 00Z	+0,13
Prec (12 - 24h) x IL 12Z	-0,57

4.5 Avaliação conjunta divergência-índices e o índice CK

Com o intuito de fazer associação entre índice termodinâmico e outros parâmetros da atmosfera, procedeu-se a correlação entre uma variável de caráter dinâmico, no caso a divergência do vento em 925 hPa, com os índices termodinâmicos considerados neste trabalho.

Por exemplo, o índice K mesmo com valor elevado pode não resultar no desenvolvimento de nuvens convectivas se a parcela de ar não tiver o impulso ascendente inicial ("gatilho atmosférico"), dado pela convergência do vento. Para os índices K, TT e CAPE, quanto mais negativa for a correlação, melhor será a indicação para o desenvolvimento de convecção, pois neste caso estará sendo destacada a participação efetiva da convergência (divergência negativa) na correlação. O contrário é esperado para o índice IL, que originalmente tem valores negativos como indicativo de instabilidade.

A Tabela 4.4 mostra os valores de correlação para a climatologia e para os casos de ECI. Para a climatologia as correlações entre divergência e cada um dos índices K, TT e CAPE foram negativas para o horário das 00Z, porém positivas às 12Z. Em casos de ECI, o resultado é similar, exceto às 12Z que também indicou valor negativo. De forma geral, os valores da

correlação também foram baixos e uma tentativa para melhorar esse desempenho foi feita considerando o valor médio da divergência em uma área, ao invés de um único ponto, mas um teste preliminar não indicou melhora na correlação. Em princípio, correlação positiva às 12Z não era o esperado nessa análise, pois indica que a convergência em baixos níveis não está atuando cooperativamente com o índice para produzir nuvens convectivas. Entretanto, esse resultado pode estar refletindo a memória estável da atmosfera às 12Z e, consequentemente, o caráter menos convergente nos baixos níveis quando a atmosfera está mais estável. Talvez a correlação entre índice termodinâmico da sondagem às 12Z com a previsão da divergência em horário à frente, p. ex. às 18Z, seja uma alternativa para melhores resultados.

Tabela 4.4: Correlação entre divergência em 925 hPa com índices termodinâmicos para climatologia e casos de ECI.

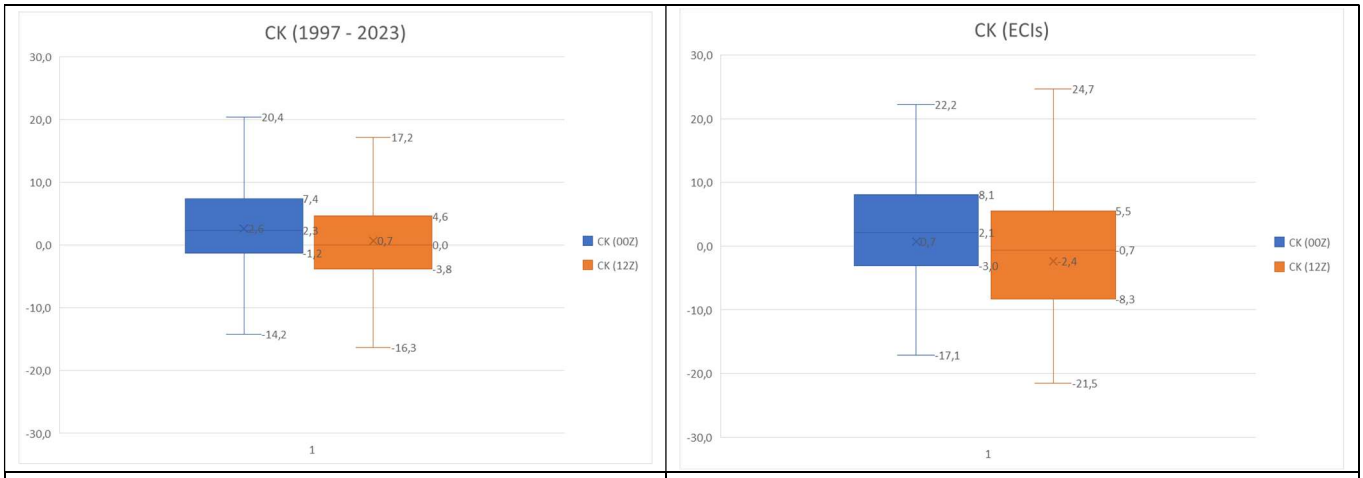
CORRELAÇÕES DIVERGÊNCIA x ÍNDICES				
	Climatologia 00Z	Climatologia 12Z	ECI 00Z	ECI 12Z
K	-0,09	0,12	-0,12	-0,03
TT	-0,12	0,13	-0,11	0,16
CAPE	-0,11	0,13	-0,14	0,17
IL	0,13	-0,15	0,12	-0,15

O índice CK, originalmente definido em Lima (2005), também foi utilizado no presente trabalho. Ressalta-se, no entanto, que o CK aqui calculado considerou o índice K extraído diretamente da sondagem atmosférica do Aeroporto Galeão e a divergência do vento foi obtida dos dados de reanálise (ERA5), enquanto que em Lima (2005) o índice K e a divergência do vento vieram do próprio modelo atmosférico BRAMS. Importante também lembrar que o CK é definido pelo simples produto entre o índice K e a divergência do vento em 925 hPa e quanto mais negativo for esse produto, mais favorável é o ambiente para o desenvolvimento de nuvens convectivas. A Figura 4.8 apresenta gráficos *boxplot* de CK referentes à climatologia e casos de ECI. Chama a atenção o aspecto negativo deste índice, evidenciado no primeiro quartil. Valores do primeiro quartil indicam que o caráter mais convectivo (instabilidade atmosférica) ocorreu no horário 12Z e não às 00Z, tanto na climatologia como em casos de ECI. A introdução da componente dinâmica (divergência) na definição de CK parece ser a responsável por trazer esse caráter mais instável às 12Z em comparação com 00Z, o que não é visto no desempenho do índice K.

A Figura 4.9 apresenta a série temporal de CK para os casos de ECI (linha azul às 00Z e linha laranja às 12Z), juntamente com a chuva acumulada no dia (barras pretas). As variações às 00Z são de aproximadamente -40 a +30 e às 12Z entre -92 a +29. Embora existam de forma bem distribuída valores positivos e negativos, é possível notar que a maior amplitude dos

valores negativos de CK ocorre no horário 12Z. Esse último aspecto também se reflete na maior largura do primeiro quartil em relação ao terceiro quartil dos casos de ECI na Figura 4.8.

A grande quantidade de valores positivos de CK associados a eventos de chuva intensa ainda precisa ser melhor entendido. Porém, há de se ressaltar que a formulação desse índice traz uma alternativa adicional na avaliação do potencial da atmosfera para o desenvolvimento de nuvens convectivas.



(a) (b)

Figura 4.8: *Boxplot* (a) referente à climatologia do índice CK (coluna esquerda) – (b) e seus valores nos dias de ECIs (coluna direita). São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente.

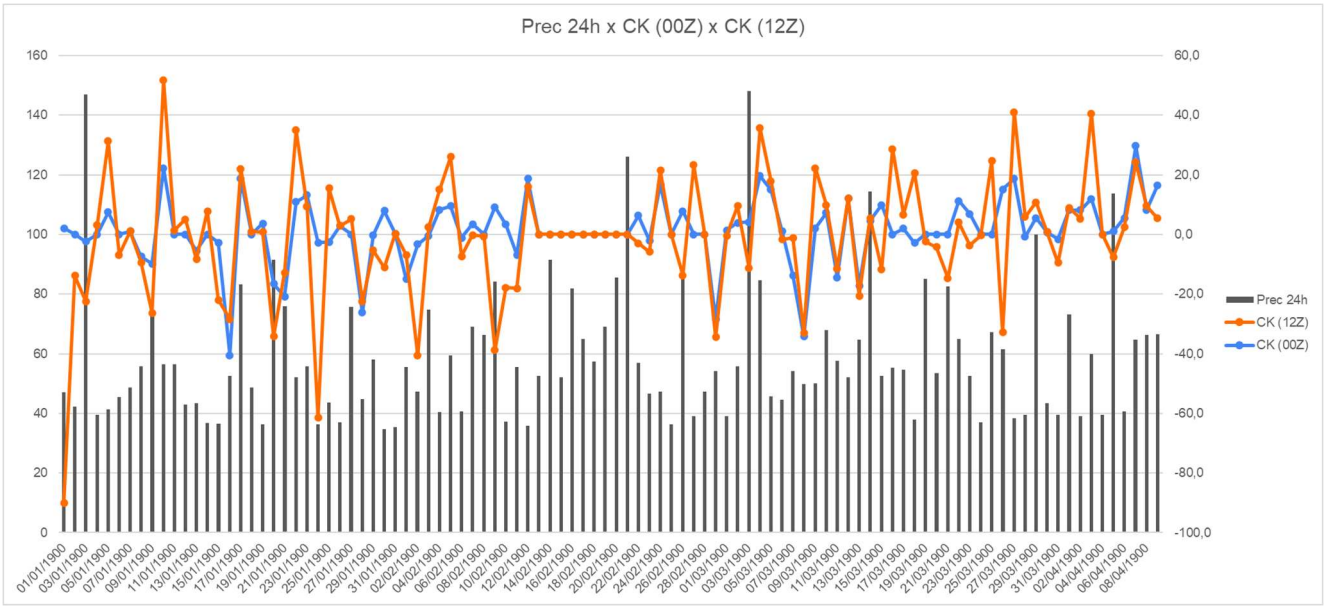


Figura 4.9: Distribuição da chuva, nos dias de ECIs, associada ao índice CK– às 00Z (linha azul) e às 12Z (linha laranja), onde a escala do lado esquerdo é referente aos valores de precipitação e do lado direito, referente aos valores do índice.

4.6 Rosa dos ventos

A seguir, serão analisados gráficos de rosa dos ventos, com o objetivo de comparar os padrões de vento observados nos dias de ECI, com a climatologia. Conforme detalhado na seção de Metodologia, os dados de vento utilizados para compor a climatologia abrangem o período de 2003 a 2020. Vale ressaltar que essa climatologia já foi representada no artigo de Pimentel *et al.* (2014), o qual, embora tenha analisado um intervalo de tempo menor (2000 a 2007), apresenta padrões muito semelhantes aos obtidos no presente estudo.

A descrição a seguir se refere à Figura 4.10. Os cones indicam a direção proveniente dos ventos, a intensidade (em Kt, ou nó) é dividida em cinco intervalos dados por 1-4, 4-7, 7-11, 11-17 e maior que 17 nós. Calmaria é caracterizada por intensidade inferior a 1 nó.

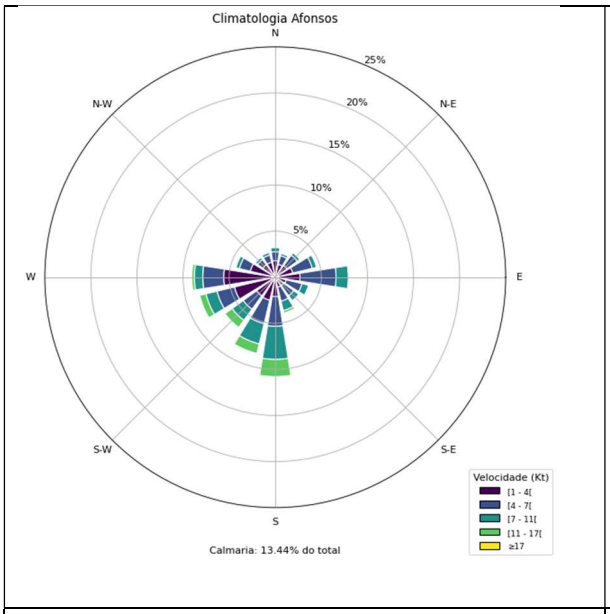
Na climatologia da estação de Afonsos, observa-se o predomínio dos ventos provenientes do quadrante Sul, seguidos pelos ventos de Oeste e Leste, respectivamente. Durante os dias de ECI, verifica-se uma manutenção da frequência dos ventos de Sul e Oeste, porém com intensidades mais elevadas em comparação à climatologia. Em contrapartida, os ventos de Leste apresentam intensidades significativamente menores em relação aos valores observados no padrão climatológico.

Na estação do Galeão, a climatologia revela um padrão predominante de ventos de Sudeste (SE), Leste (E) e Leste-Sudeste (E/SE). Para os dias de ECI, os ventos de SE continuam sendo significativos, porém observa-se um aumento significativo na frequência de ventos de Oeste (W), o que ocasiona uma mudança de padrão de ventos bastante evidente. Além disso, nota-se a presença de ventos mais intensos (a partir de 17 nós) nas direções Oeste-Sudoeste (W/SW) e Sul-Sudeste (S/SE).

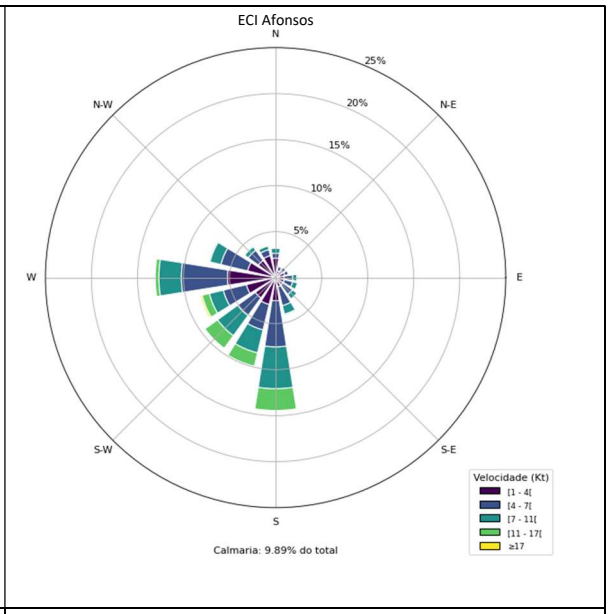
No aeródromo de Jacarepaguá, a climatologia dos ventos indica um padrão predominante de ventos de Sul, seguido pelos ventos de Norte. Durante os dias de ECI, a predominância dos ventos de Sul se mantém e com intensidades ainda maiores. Observa-se ainda que os ventos de Sudoeste (SW) também são mais frequentes. Por outro lado, a frequência dos ventos de Norte fica bastante reduzida em relação à climatologia.

Na estação de Santa Cruz, a climatologia revela um padrão predominante de ventos do quadrante Nordeste (NE), seguido pelo quadrante Sudoeste (SW). Durante os dias de ECI, os ventos dos quadrantes Sudoeste (SW) mostram-se significativamente mais frequentes e mais intensos, ao contrário dos ventos do quadrante Nordeste (NE) que se apresentam menos intensos e menos frequentes. Essa descrição acima ressalta uma mudança significativa no padrão dos ventos de ECI em relação à climatologia.

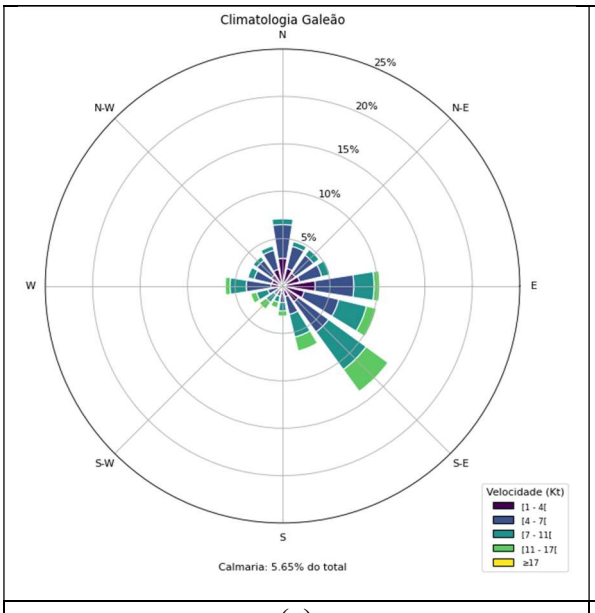
A estação de Santos Dumont é a que apresenta o padrão de vento mais semelhante entre os dias de ECI e a climatologia. Em ambos os casos, predominam ventos dos quadrantes Sul (S) e Norte (N), respectivamente. Nos dias de ECI, entretanto, observa-se maior intensidade (a partir de 17 nós) e frequência nos dos ventos do quadrante Sul.



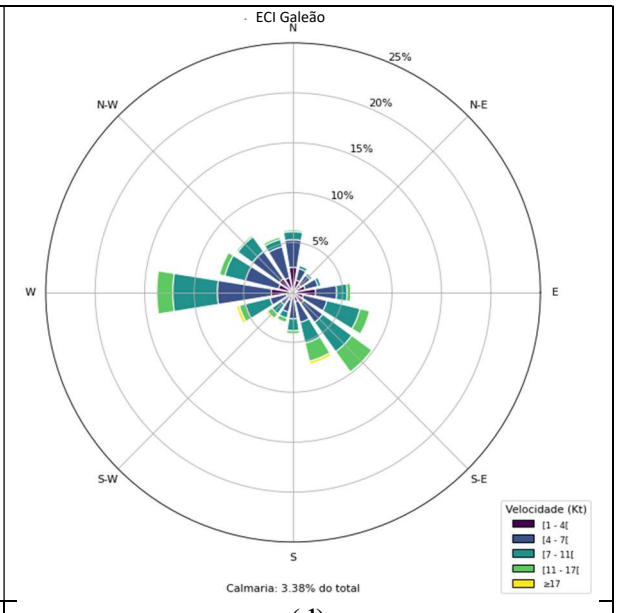
(a)



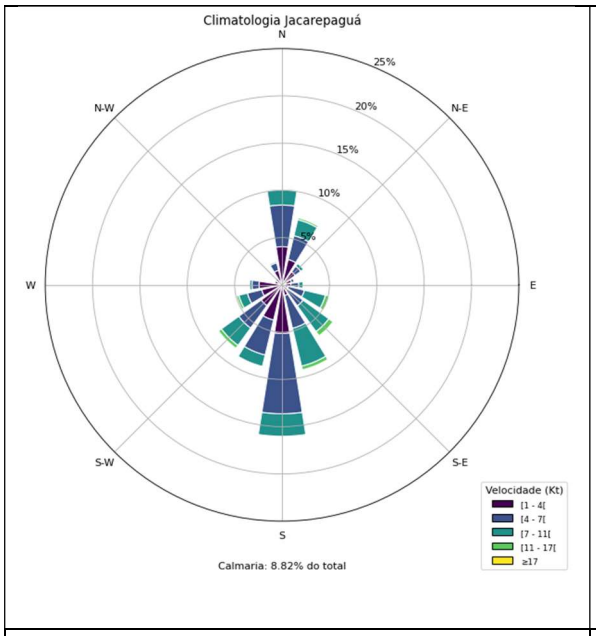
(b)



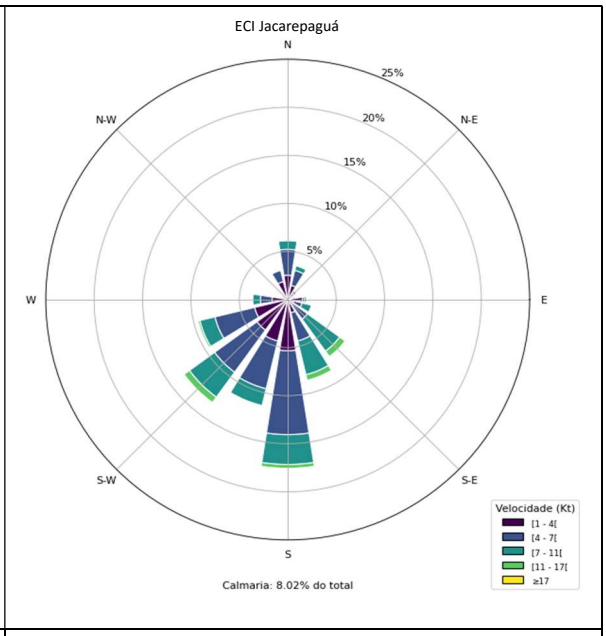
(c)



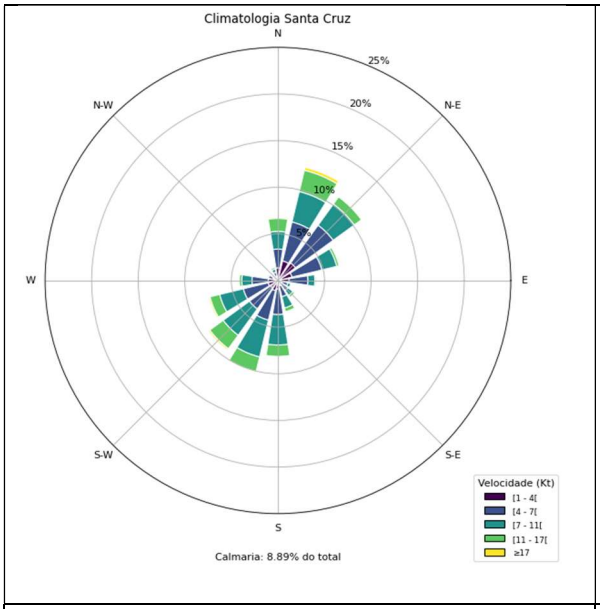
(d)


Climatologia Jacarepaguá
N
N-E
E
S-E
S
S-W
W
N-W
25%
20%
15%
10%
5%
Velocidade (Kt)
[1 - 4[
[4 - 7[
[7 - 11[
[11 - 17[
≥17
Calmaria: 8.82% do total

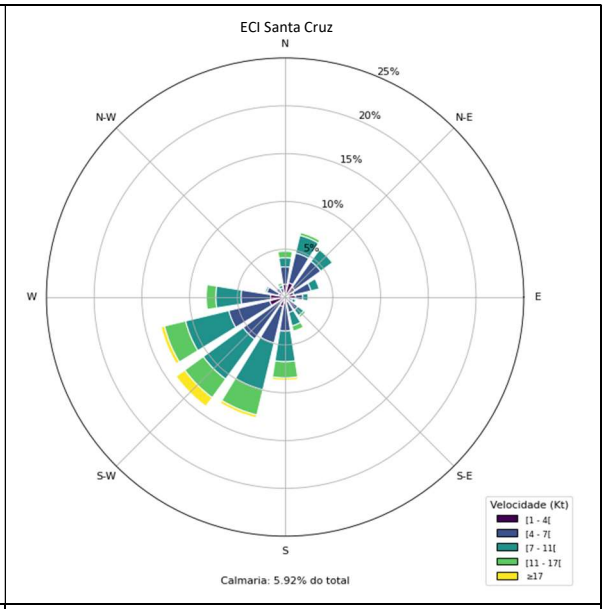
(e)


ECI Jacarepaguá
N
N-E
E
S-E
S
S-W
W
N-W
25%
20%
15%
10%
5%
Velocidade (Kt)
[1 - 4[
[4 - 7[
[7 - 11[
[11 - 17[
≥17
Calmaria: 8.02% do total

(f)


Climatologia Santa Cruz
N
N-E
E
S-E
S
S-W
W
N-W
25%
20%
15%
10%
5%
Velocidade (Kt)
[1 - 4[
[4 - 7[
[7 - 11[
[11 - 17[
≥17
Calmaria: 8.89% do total

(g)


ECI Santa Cruz
N
N-E
E
S-E
S
S-W
W
N-W
25%
20%
15%
10%
5%
Velocidade (Kt)
[1 - 4[
[4 - 7[
[7 - 11[
[11 - 17[
≥17
Calmaria: 5.92% do total

(h)

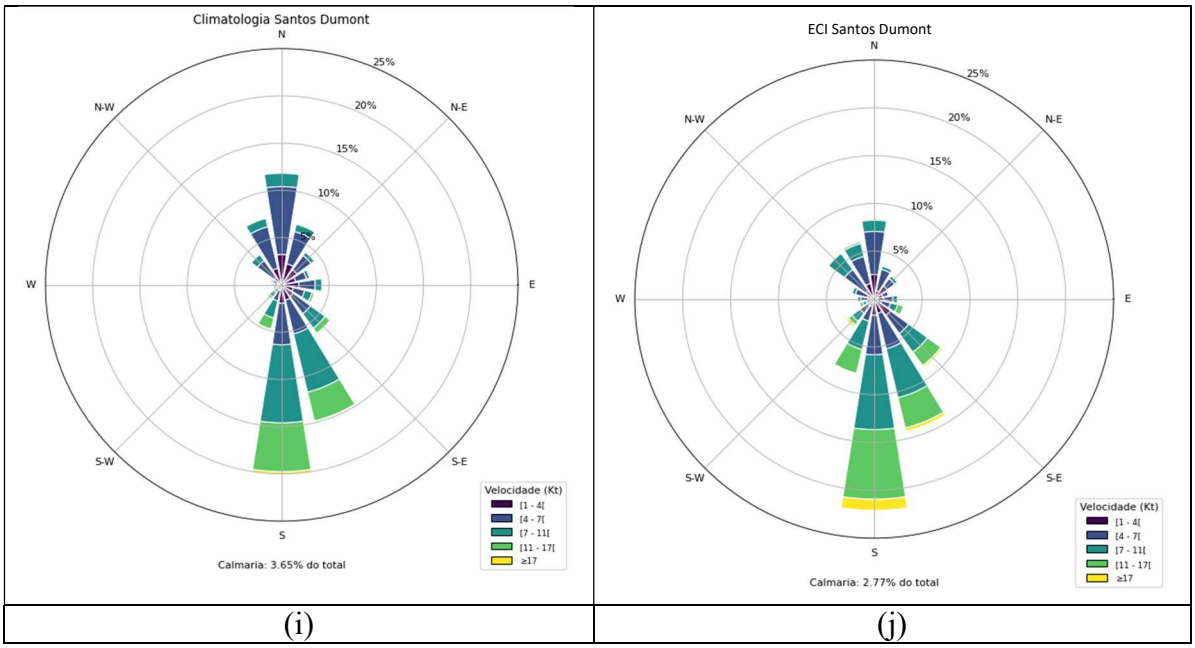


Figura 4.10: Distribuição de frequência dos ventos para as estações da REDEMET. Na coluna da esquerda estão as figuras referentes à climatologia: (a), (c), (e), (g), (i). Na coluna da direita, estão as figuras referentes aos dias de ECI: (b), (d), (f), (h), (j).

A Figura (4.11) a seguir apresenta uma espacialização das rosas dos ventos na região de estudo, permitindo uma interpretação do escoamento próximo à superfície em conjunto com as feições topográficas da área. A reorientação do escoamento próximo à superfície em decorrência da topografia e das circulações locais de brisa marítima-terrestre é discutida em detalhe em Pimentel *et al* (2014) para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro e a mesma ideia é trazida aqui na interpretação dos ventos nas figuras que seguem. As Figuras (4.11a) e (4.11b), quando avaliadas em conjunto, evidenciam as diferenças entre o padrão climatológico e de situações de ECI, respectivamente.

Em casos de ECI (Figura 4.11b), fica evidente o aumento na intensidade e na frequência dos ventos de SW em Santa Cruz, o reforço na frequência dos ventos de oeste em Afonsos e Galeão, sugerindo uma canalização de ventos de oeste entre os maciços de Gericinó e da Pedra Branca. Em Santa Cruz, esse escoamento segue perpendicular à linha de costa, possivelmente interagindo com a circulação térmica de brisa marítima-terrestre, como destacado em Pimentel *et al* (2014). Também fica evidente o incremento na componente sul dos ventos em Afonsos, Jacarepaguá e Santos Dumont, além do reforço nos ventos de SW também em Jacarepaguá. Os maciços da Pedra Branca e da Tijuca podem ajudar na canalização desses ventos, enquanto que a Baía de Guanabara poderá estar atuando na canalização do vento sul em Santos Dumont. Ventos de sudoeste e de sul em situações de ECI podem estar sendo estimulados, entre outros mecanismos, por aproximação de frentes frias e do deslocamento de sistemas convectivos de

oeste a partir das regiões de Angra dos Reis e Baía de Sepetiba, como frequentemente observados na rotina da previsão do tempo.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou indicadores termodinâmicos com finalidade de sinalizar situações atmosféricas com grande potencial de desenvolvimento de chuvas intensas. Para isso, índices termodinâmicos clássicos foram utilizados tanto no contexto climatológico como também em associação a eventos de chuva intensa.

Do ponto de vista da importância do conhecimento climático, sabe-se que o estudo da climatologia da precipitação e a compreensão dos sistemas meteorológicos são fundamentais para diversas atividades da cidade, como turismo, comércio e planejamento urbano. Além disso, uma previsão cada vez mais assertiva de chuvas intensas é crucial para a proteção da população e a minimização dos danos materiais. Esse último fato impõe grandes desafios na previsão desses eventos, embora avanços importantes tenham sido registrados. A formação e dissipação rápida desses eventos tornam as previsões de curto prazo mais complexas, destacando a importância de ferramentas como radares meteorológicos, satélites e uma rede robusta de estações meteorológicas. Por outro lado, os índices termodinâmicos são também uma opção para identificar condições atmosféricas propensas ao desenvolvimento de chuvas intensas. A combinação desses índices com outros parâmetros meteorológicos pode também melhorar o desempenho da previsão do tempo e contribuir para ações preventivas mais eficazes. No cenário da análise combinada de índices termodinâmicos pode-se destacar o produto entre a divergência e o índice K, dando origem ao índice CK, e que vem sendo estudado no contexto dos modelos atmosféricos (LIMA, 2005 ; MENEZES *et al*, 2006). O presente trabalho traz esse mesmo tipo de combinação de variáveis, porém com a novidade de se utilizar o índice K da própria sondagem atmosférica, e não a partir de modelo numérico. O desempenho do CK ainda precisa ser melhor avaliado na definição de ambiente favorável à convecção e posteriormente ser aplicado na rotina de previsão do tempo em ambiente operacional, mas, por outro lado, se apresenta como mais uma alternativa de avaliação do potencial convectivo da atmosfera.

Ainda na mesma ideia de combinação de índices, o presente estudo evidenciou que, embora os índices termodinâmicos possam ajudar a identificar períodos de maior instabilidade, é necessário considerar também os padrões de vento e a dinâmica atmosférica local na avaliação de eventos de chuvas intensas. A utilização de dados combinados de precipitação, índices termodinâmicos e ventos pode ser uma ferramenta eficaz para antecipar intensos eventos de precipitação e otimizar os sistemas de alerta para a população.

O aprimoramento das previsões de tempo e a utilização de ferramentas como os índices de instabilidade são essenciais para proteger a população e tomar decisões rápidas e eficazes

em situações de risco. A combinação de ciência, tecnologia e políticas públicas pode ser determinante para reduzir os danos causados por chuvas intensas no Rio de Janeiro.

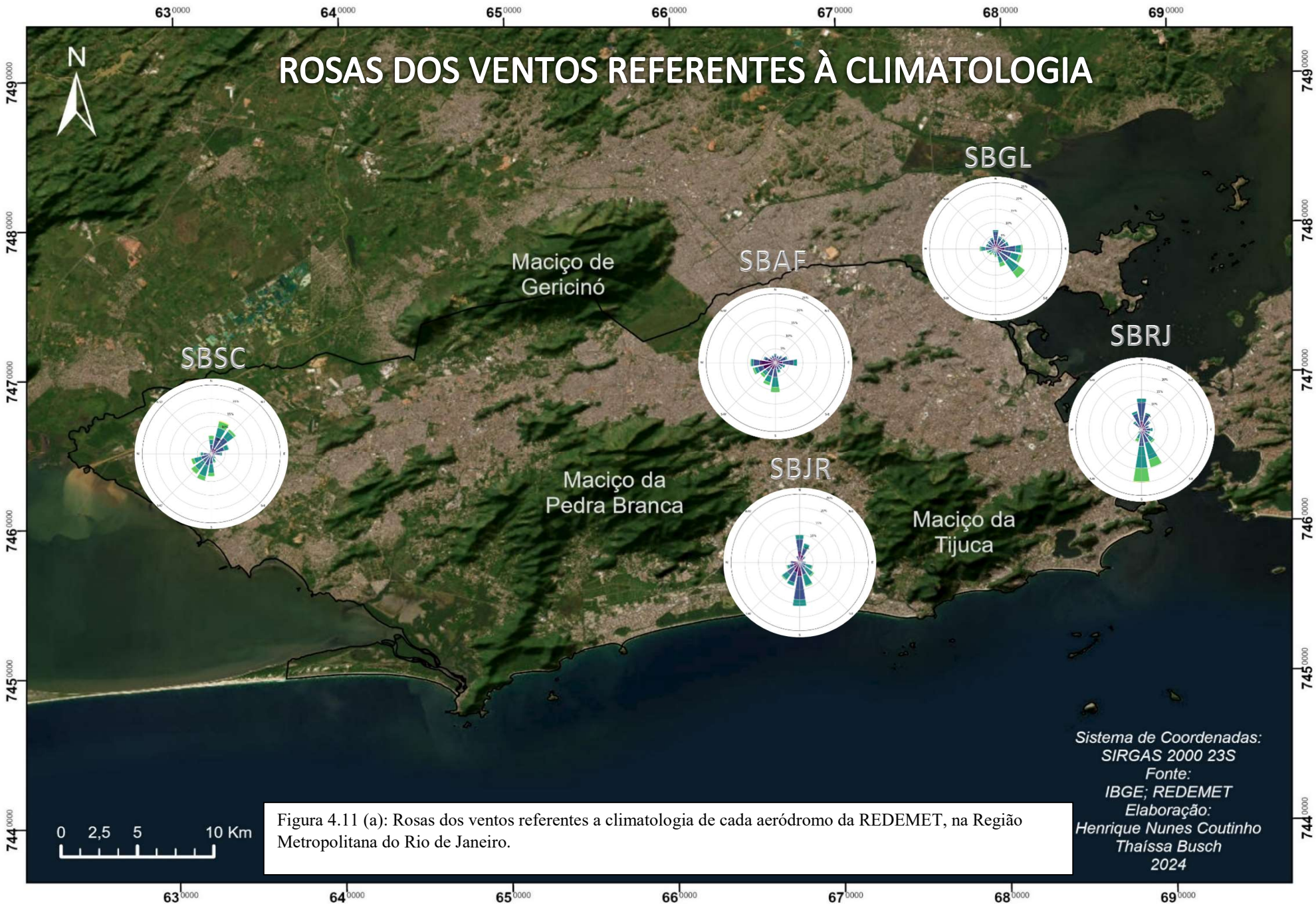


Figura 4.11 (a): Rosas dos ventos referentes a climatologia de cada aeródromo da REDEMET, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

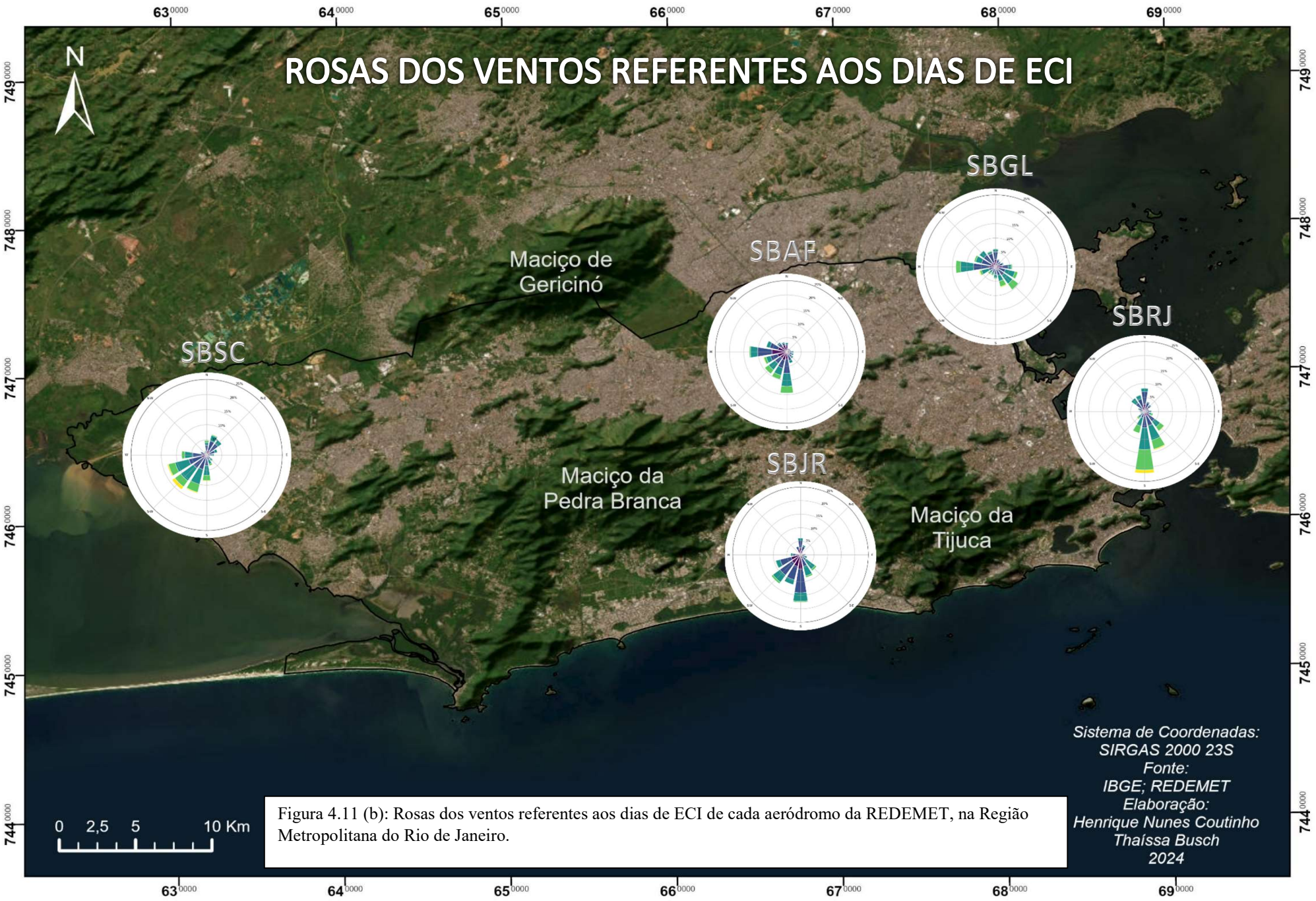


Figura 4.11 (b): Rosas dos ventos referentes aos dias de ECI de cada aeródromo da REDEMET, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA CUMPLIDO, M., INOCENTE, M. C., PEREIRA DE MEDEIROS, T.; SAMPAIO DE OLIVEIRA, G.; MARENGO, J. A. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, *[S. l.]*, v. 32, n. 19, p. 129–153, 2023. DOI: 10.55761/abclima.v32i19.16154.

ANDRADE, K., PINHEIRO, H., DOLIF NETO, G. (2015). Evento extremo de chuva no rio de janeiro: análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. Ciência e Natura. 37. 10.5902/2179460X16236.

BUSCH, T. M.; Climatologia de índices de instabilidade atmosférica utilizando radiossondagens do aeroporto Galeão-RJ. Monografia. Departamento de Meteorologia/UFRJ. Rio de Janeiro, 2013, pp 72.

CALADO, R. N.: Estudo de caso de tempestade severa no Rio de Janeiro em abril de 2010. Monografia. Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012, 72p.

CARMO, L. F. R. DO, VASCONCELLOS, F. C., MENEZES, W. F., & VASCONCELLOS, E. C. (2019). Análise de Índices de Instabilidade em Casos de Chuva Intensa, Chuva Moderada e Chuva Fraca/sem Chuva nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. *Anuário Do Instituto De Geociências*, *42*(1), 769–782.

DERECZYNSKI, C.P., CALADO, R.N., BODSTEIN, A. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. Anuário do Instituto de Geociências - UFR. v. 40, n. 2, p. 17 30, 2017. DOI: http://dx.doi.org/ 10.11137/2017_2

DERECZYNSKI, C. P., OLIVEIRA, J. S., MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Meteorologia. v. 24, n. 1, p. 2, 2009.

ESCOBAR, G., ANDRADE, K.: Climatologia dos índices de instabilidade K e Total Totals (TT) para o Sul e Sudeste do Brasil. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, PA. Soc. Bras. Meteorologia, 2010. DVD.

ESCOBAR, G. C. J., DE ALMEIDA MARQUES, A. C., DERECZYNSKI, C. P. Synoptic patterns of South Atlantic Convergence Zone episodes associated with heavy rainfall events in the city of Rio de Janeiro, Brazil. Atmósfera, [S.l.], dez. 2020. ISSN 2395-8812.

FERREIRA, R. C., REBOITA, M. S., HERDIES, D. L., & BENETI, C. A. (2016). Tendência dos índices de instabilidade na américa do sul. *Ciência e Natura*, *38*(1), 164-169.

FRANCO, R. M.-C., MENEZES, W. F., & VASCONCELLOS, F. C. (2020). Análise Sinótica e de Mesoescala de Ventos Intensos com Impacto Destrutivo em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Paraná. *Revista Brasileira De Geografia Física*, *13*(07), 3177–3194.

FUMAGALLI COELHO, L. & NUNES, A. (2020). Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. REVISTA BRASILEIRA DE GEOGRAFIA FÍSICA , v. 13, p. 994-1012, 2020.

GROSSMANN, K. S. Estudo da Combinação de Índices de Instabilidade Como Ferramenta de Auxílio na Previsão de Tempo UFRJ/ Departamento de Meteorologia, 2010, 68p. Dissertação de monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Meteorologia, 2010.

HALLAK, R., PEREIRA FILHO, A. J.: Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p. 173-206, 2012.

HENRY, W. The Skew-T, Log P Diagram. National Weather Service Training Center, EUA, p. 68, 1987.

HOUZE, R. A., Jr. (1993), Cloud Dynamics, 573 pp., Academic, San Diego, Calif.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K. C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., JENNE, R., & JOSEPH, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *77*(3), 437-472.

LIMA, D. R. O., Diagnóstico de Chuvas e Previsão Meteorológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Manso, Dissertação de M.Sc., Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

LIMA, S. S., & ARMOND, N. B.. (2022). Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. Sociedade & Natureza, 34, e64770. https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64770

MARQUES, V. S., SIQUEIRA, J. R. Estudo de caso de um sistema convectivo de mesoescala intenso ocorrido entre os dias 02 e 03 de janeiro de 2013 no estado do Rio de Janero: Características termodinâmicas. In: VI SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 2015, Natal. SIC, 2015.

MENEZES, W. F., De LIMA, D. R. O., MOURAO, C. E. F.; LIMA, G. D.. A STUDY OF SIMULATED INSTABILITY INDICES AND ITS BEHAVIOR OVER RIO DE JANEIRO. In: 8 th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2006, Foz do Iguaçú - PR. 8 th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. v. 1. p. 1-10.

NASCIMENTO, E. L.. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?. Revista Brasileira de Meteorologia, Brasil, v. 20, n.1, p. 121-140, 2005.

NOBRE, C. et al. “The Record Drought and Water Crises of Summer 2014 in Southeastern Brazil”, in Bulletin of the American Meteorogical Society (accepted), 2015.

OLIVEIRA. P.; AMORIM, H. S.; DERECZYNSKI, C. P.; Investigando a atmosfera com dados obtidos por radiossondas. REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, v. 40, p. 1-8, 2018.

PEREIRA, R. F.; Um Estudo de Características Físicas Associadas a Ventos Convectivos Intensos nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Modelagem Numérica. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

PIMENTEL, L. C. & MARTON, E. & SOARES DA SILVA, M. & JOURDAN, P. (2014). Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Engenharia Sanitaria e Ambiental. 19. 121-132. 10.1590/S1413-41522014000200003.

PRISTO, M. V. DE J., DERECZYNSKI, C. P., REGOTO, P., MENEZES, W. F.. Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro. REVISTA BRASILEIRA DE METEOROLOGIA, v. 33, p. 615-630, 2018.

SCHUMACHER, V., & TEIXEIRA, M. D.. (2016). Relationship between instability indices and extreme rainfall in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Revista Brasileira de Geofísica. 34. 10.22564/rbgf.v34i1.802.

SILVA DIAS, M. A. F.: Índices de Instabilidade para Previsão de Chuva e Tempestades Severas. Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em <www.master.iag.usp.br/ensino/indices.pdf>.

SILVA DIAS, M. A. F., 1987: Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. Rev. Brasil. Meteor., 2, 133-150.

SILVA, F. P.; ROTUNNO FILHO, O. C.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; ARAUJO, A. A. M. Análise do Perfil Termodinâmico da Atmosfera Durante a

Passagem de uma Frente Fria Sobre o Estado do Rio De Janeiro. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis. Anais do XXII SBRH, 2017a.

SILVA, F. P., JUSTI DA SILVA, M. G. A., MENEZES, W. F., ALMEIDA, V. A. 2016. "Atmospheric Indicators Evaluation Using WRF Numerical Model in Rainfall Events in the City of Rio de Janeiro". Anuário do Instituto de Geociências, 38 (2): 81-90.

SILVA, F. P., ROTUNNO FILHO, O. C., ARAUJO, A. A. M.; JUSTI DA SILVA, M. G. A., PIRES, G. D.; SAMPAIO, R. J. Proposta de Avaliação Dinâmica e Termodinâmica da Atmosfera para Eventos Extremos de Chuva em Petrópolis/RJ. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul, Juiz de Fora. Anais do III SRH-PS, 2018.

SILVA, F. P., ROTUNNO FILHO, O. C., JUSTI DA SILVA, M. G. A. *et al.* Observed and estimated atmospheric thermodynamic instability using radiosonde observations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorol Atmos Phys* **132**, 297–314 (2020).

SILVA, F. P., ROTUNNO FILHO, O. C., SAMPAIO, R. J., DRAGAUD, I. C. D. V., ARAÚJO, A. A. M, JUSTI DA SILVA, M. G. A., PIRES, G. D. 2017b. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. Meteorology and Atmospheric Physics.

SILVA, M. T., BARBOSA, H. D. M. J., & JÚNIOR, T. M. P. (2020). Índices termodinâmicos durante a campanha GOAmazon2014/5 e comparação com dados da reanálise ERA-Interim. *Ciência e Natura*, *42*.

SILVA, Y. & FRANÇA, G. & RUIVO, H. & CAMPOS VELHO, H. (2022). Forecast of Convective Events Via Hybrid Model: Wrf and Machine Learning Algorithms. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.4113508.

SILVA, W. & DERECZYNSKI, C. (2014). Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. Anuário do Instituto de Geociências UFRJ. 37_2. 123-138. 10.11137/2014_2_123_138.

SOUSA, F. B. B.; KARAM, H. A. Análise da Estrutura Termodinâmica Associada ao Desenvolvimento de Tempestade Ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, p. 17-26, 2014.

TAVARES, J. P. N., MOTA, M. A. S. DA. Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 207-218, jul. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v27n2/a07v27n2.pdf>.

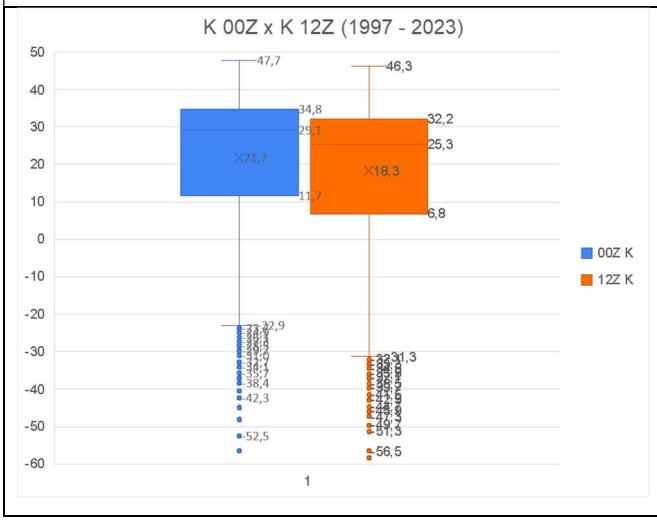
WILKS, D. S.: Statistical methods in the atmospheric sciences. 2 ed. International Geophysics Series, EUA, 2006.

XAVIER, T.M., XAVIER, A.F.S., ALVES, J.M.B. Quantis e eventos extremos – aplicações em ciências da terra e ambientais. Fortaleza: RDS Editora, Livrarias Livro Técnico, 2007. 278p.

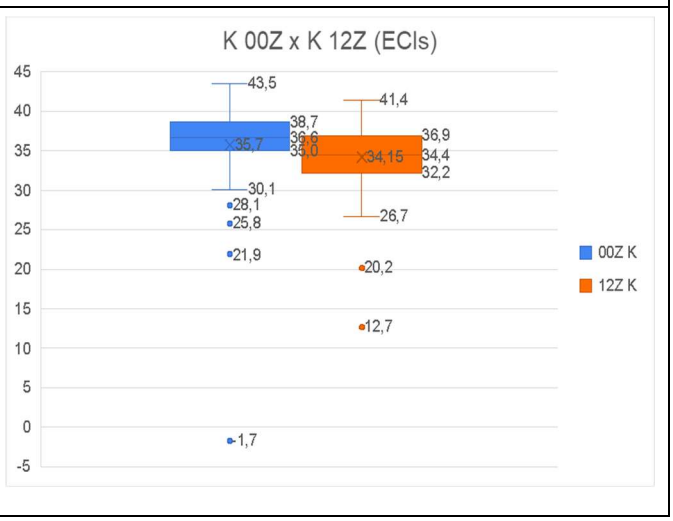
APÊNDICES

APÊNDICE A - Diagramas *boxplot* com *outliers*.

Índice K

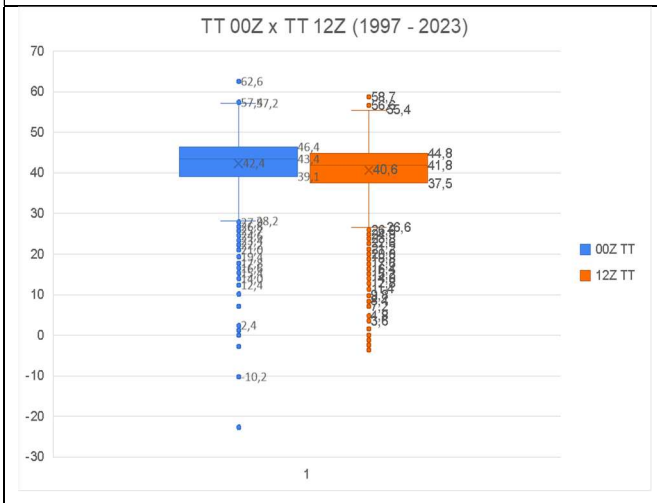


(a)

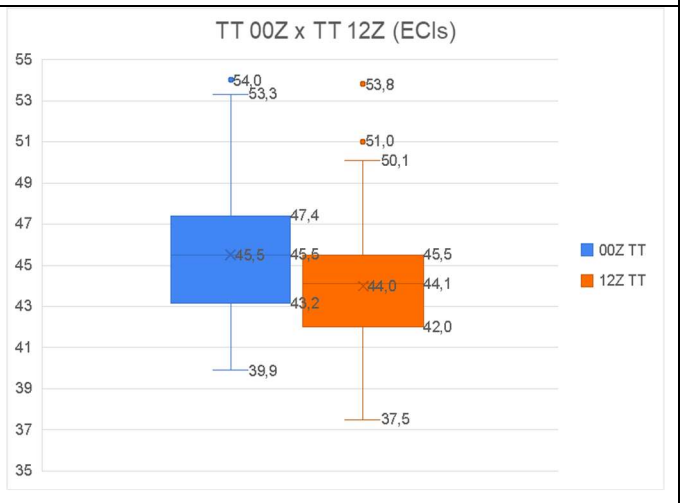


(b)

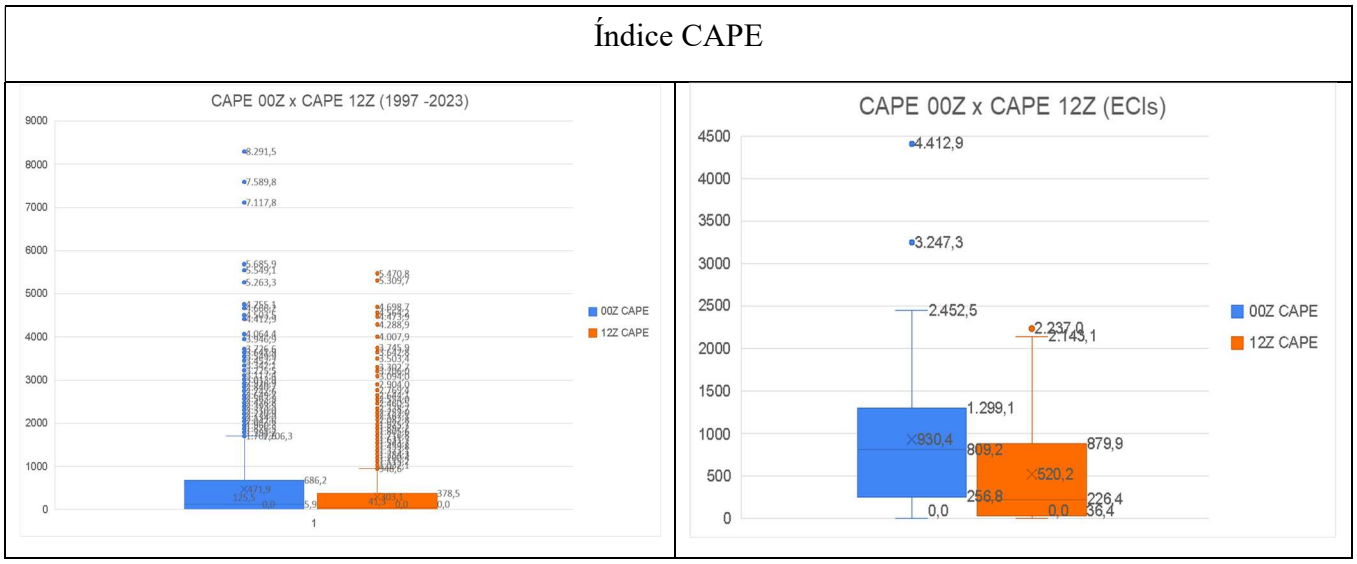
Índice Total Totals



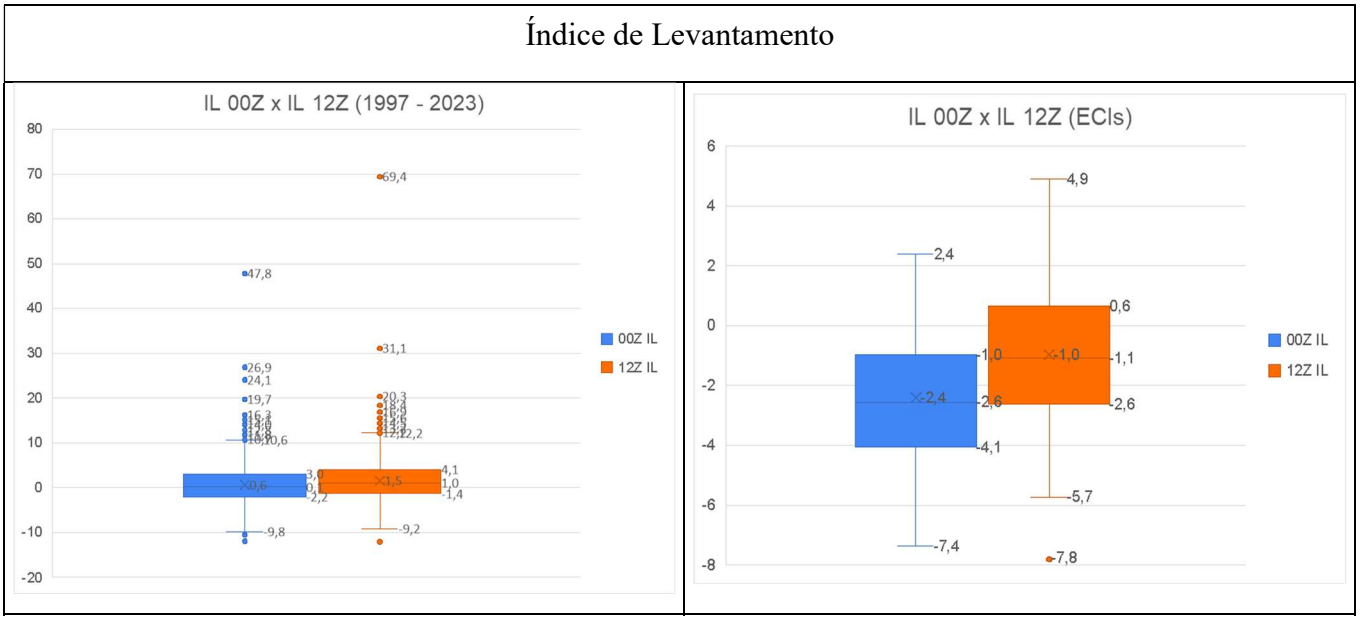
(c)



(d)

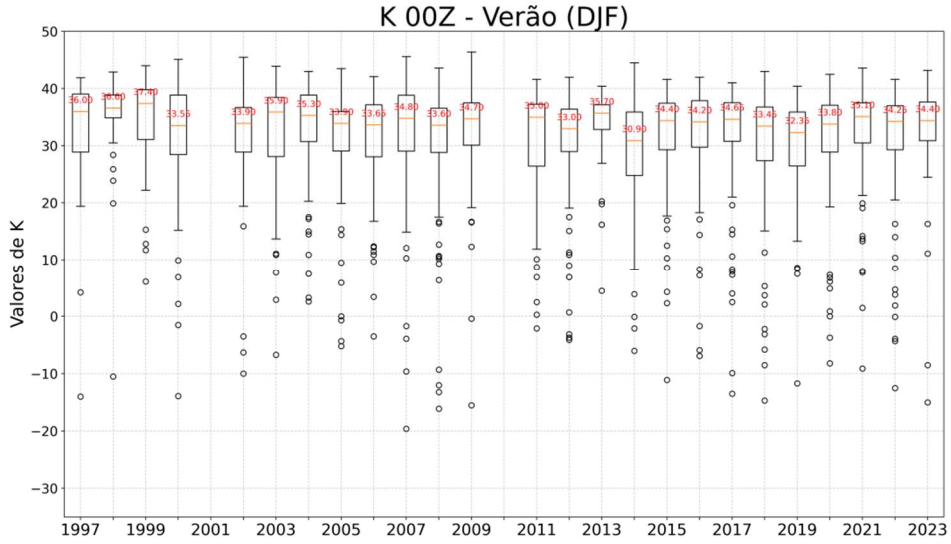


(e) (f)

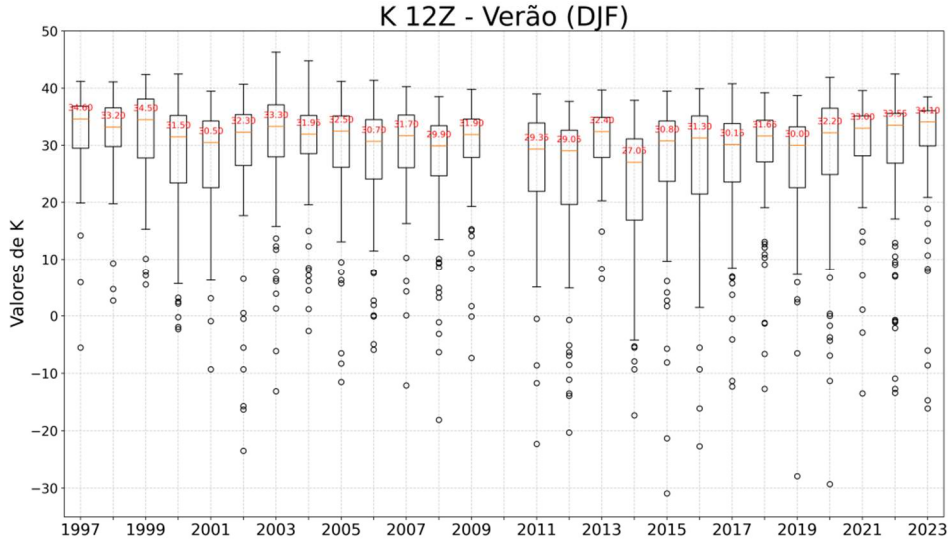


(g) (h)

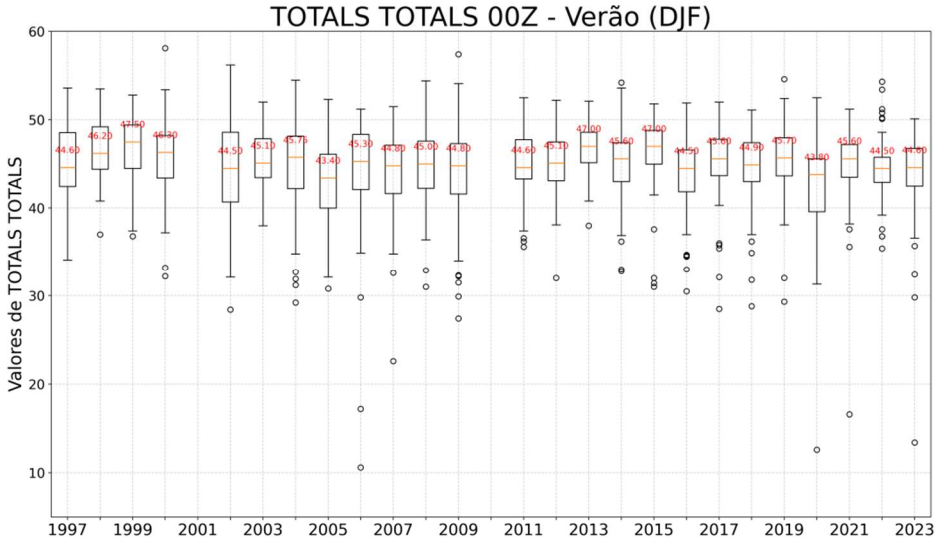
Figura A1: *Boxplot* referente à climatologia dos índices (coluna esquerda) – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e seus valores nos dias de ECIs (coluna direita) – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente.


K 00Z - Verão (DJF)
Valores de K
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

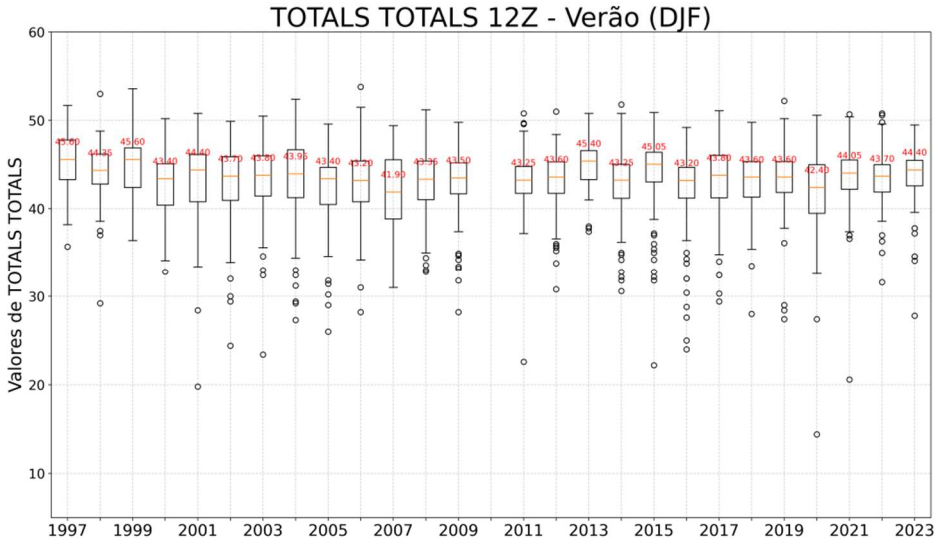
(a)


K 12Z - Verão (DJF)
Valores de K
50
40
30
20
10
0
−10
−20
−30
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

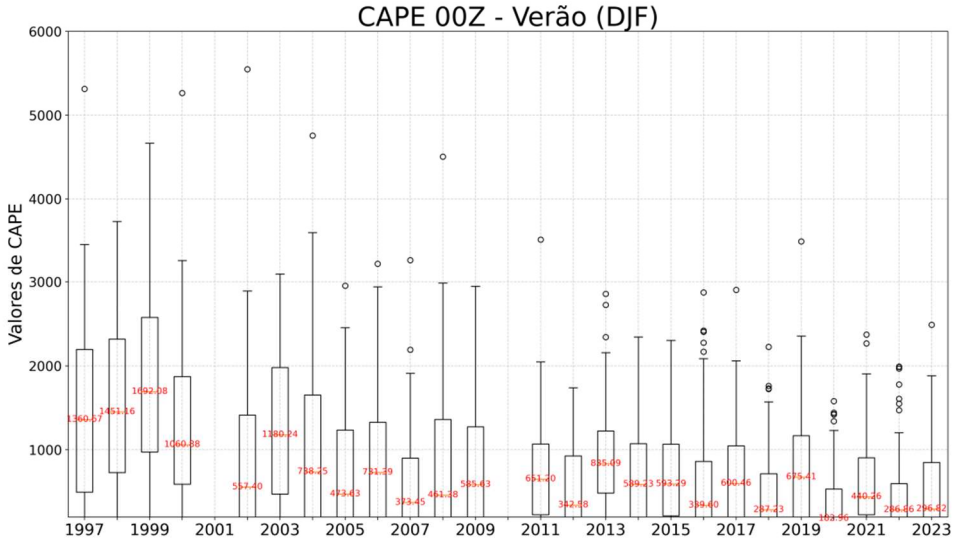
(b)


TOTALS TOTALS 00Z - Verão (DJF)
Valores de TOTALS TOTALS
60
50
40
30
20
10
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

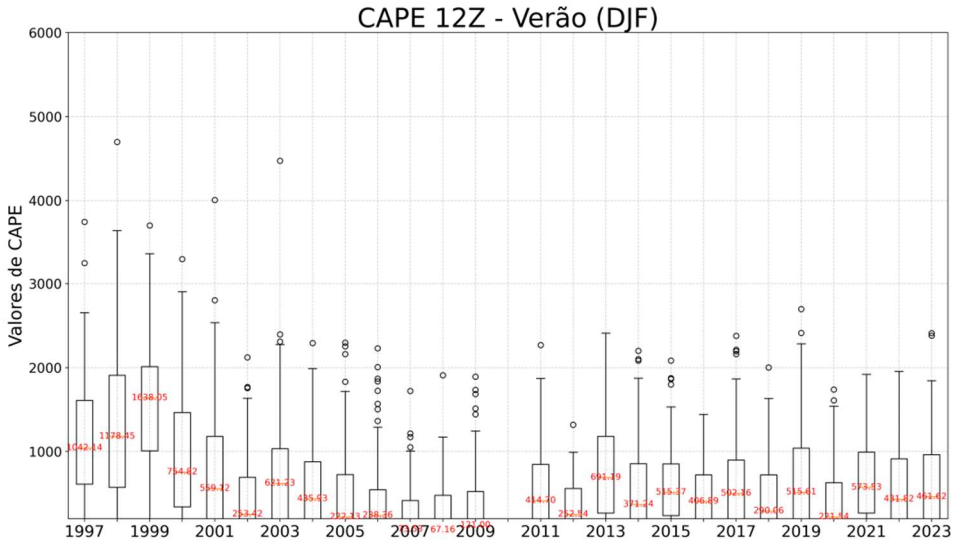
(c)


TOTALS TOTALS 12Z - Verão (DJF)
Valores de TOTALS TOTALS
60
50
40
30
20
10
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

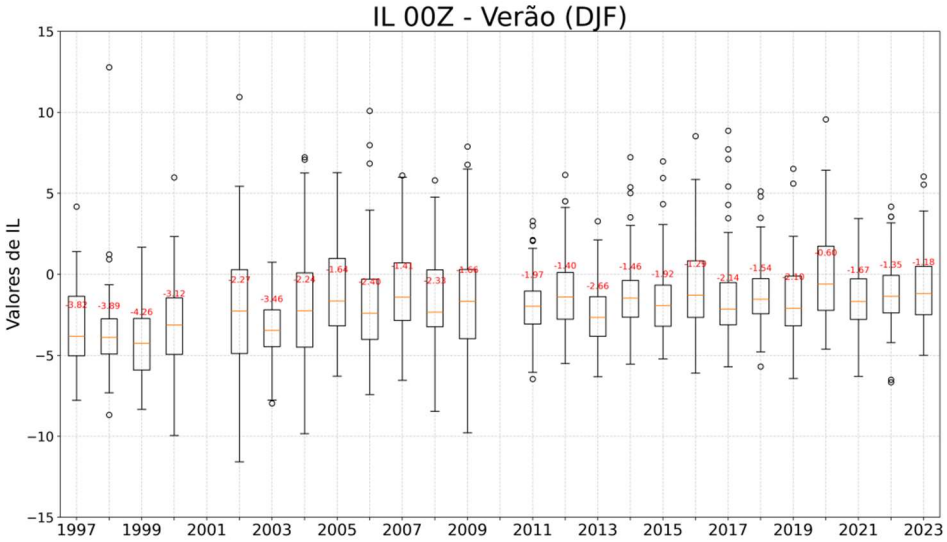
(d)


CAPE 00Z - Verão (DJF)
Valores de CAPE
6000
5000
4000
3000
2000
1000
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

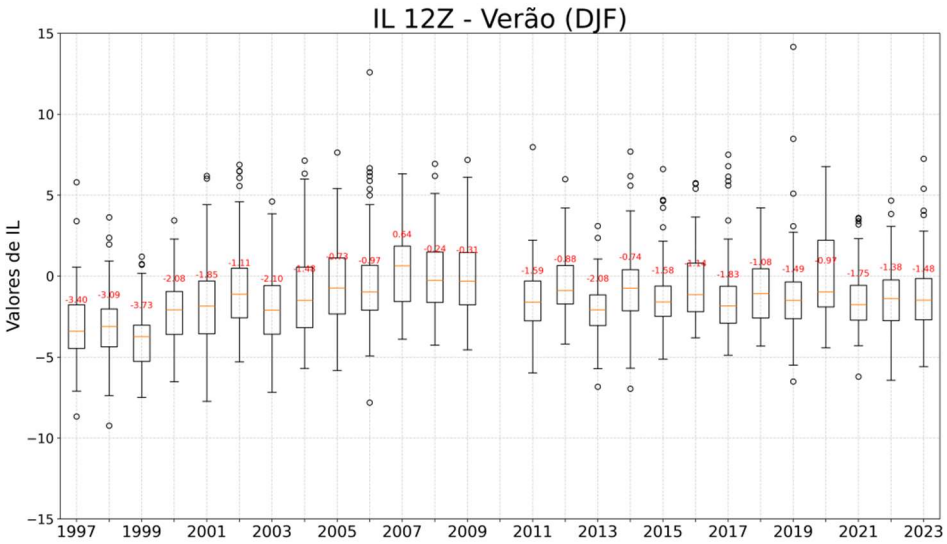
(e)


CAPE 12Z - Verão (DJF)
Valores de CAPE
6000
5000
4000
3000
2000
1000
1997
1999
2001
2003
2005
2007
2009
2011
2013
2015
2017
2019
2021
2023

(f)

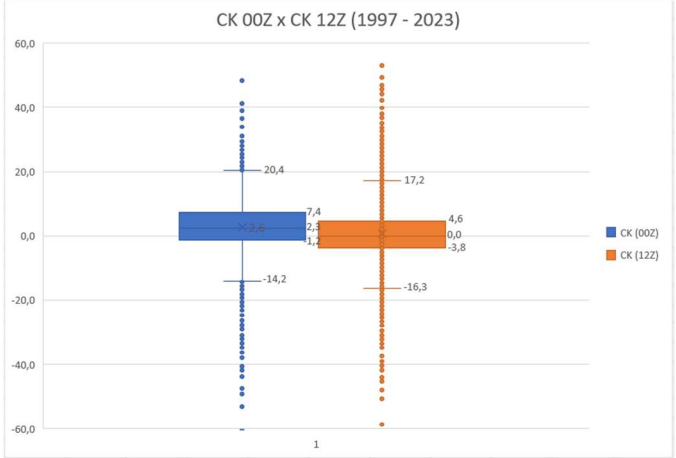


(g)

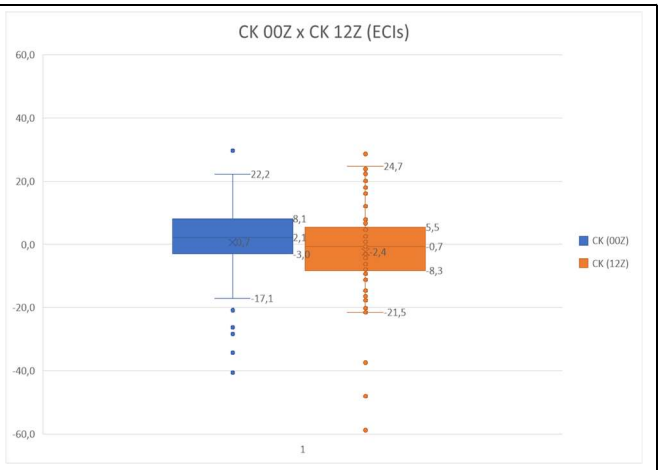


(h)

Figura A2: *Boxplot* da climatologia dos índices para os meses de janeiro (1997 – 2023), às 00Z – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e às 12Z – (b) K, (d) TT, (f) CAPE, (h) IL. A linha laranja se refere à mediana e seus valores estão destacados em vermelho.



(a)



(b)

Figura A3: *Boxplot* (a) referente à climatologia do índice CK (coluna esquerda) e (b) seus valores nos dias de ECIs (coluna direita). São indicados na figura os valores mínimos, primeiro quartil, mediana (linha), média (letra x), terceiro quartil e máximo. Os horários 00Z e 12Z são representados pelas cores azul e laranja, respectivamente.