

CHUVAS INTENSAS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

HEAVY RAINFALL IN THE CITY OF RIO DE JANEIRO

LLUVIAS INTENSAS EN LA CIUDAD DE RÍO DE JANEIRO

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-049>

Data de submissão: 05/11/2025

Data de publicação: 05/12/2025

Thaíssa Melanye Busch

Mestre em Meteorologia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: thaissabusch@yahoo.com.br

Edilson Marton

Doutorado em Meteorologia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Meteorologia,

Instituto de Geociências

E-mail: edilson.marton@igeo.ufrj.br

Wallace Figueiredo Menezes

Doutorado em Meteorologia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Meteorologia,

Instituto de Geociências

E-mail: wallace.menezes@igeo.ufrj.br

Vinícius Albuquerque de Almeida

Doutorado em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: vinicius@lma.ufrj.br

Fernando Augusto Eulálio de La Rocque

Mestrando em Meteorologia

Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

E-mail: fernandorocque@gmail.com

RESUMO

O presente estudo buscou indicadores atmosféricos com base em índices termodinâmicos para sinalizar situações com potencial para o desenvolvimento de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro. O desenvolvimento do presente trabalho contou com avaliação de índices termodinâmicos da atmosfera (IL, K, TT e CAPE) oriundos de radiossondagens do aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro, juntamente com eventos de chuvas intensas (ECI) identificados de acordo com a metodologia utilizada. Os ECI foram definidos pelo percentil 95 dos acumulados de chuva em períodos de 15 minutos e de 24 horas, considerando dados de 33 estações pluviométricas na cidade do Rio de Janeiro. No total, foram analisados 100 dias de ECI, avaliando a relação entre os índices termodinâmicos e os eventos registrados. Valores de referência desses índices foram sugeridos como limiares de atenção para o desenvolvimento de chuvas que possam causar significativos transtornos na cidade do Rio de Janeiro.

Palavras-chave: Chuva Intensa. Índice Termodinâmico. Rio de Janeiro.

ABSTRACT

The present study investigated atmospheric indicators based on thermodynamic indices to identify conditions with the potential for the development of heavy rainfall in the city of Rio de Janeiro. The analysis incorporated thermodynamic atmospheric indices (IL, K, TT, and CAPE) derived from radiosonde data collected at Galeão Airport, in conjunction with heavy rainfall events (ECI) identified according to the adopted methodology. The ECI were defined using the 95th percentile of rainfall accumulations over 15-minute and 24-hour intervals, based on data from 33 rain gauge stations across the city of Rio de Janeiro. In total, 100 ECI days were examined to assess the relationship between the thermodynamic indices and the observed events. Reference values for these indices were proposed as threshold indicators for conditions favorable to the development of rainfall capable of causing significant impacts in the city of Rio de Janeiro.

Keywords: Heavy Rainfall. Thermodynamic Index. Rio de Janeiro.

RESUMEN

El presente estudio investigó indicadores atmosféricos basados en índices termodinámicos con el fin de señalar situaciones con potencial para el desarrollo de lluvias intensas en la ciudad de Río de Janeiro. El desarrollo de este trabajo incluyó la evaluación de índices termodinámicos de la atmósfera (IL, K, TT y CAPE) derivados de radiosondeos realizados en el aeropuerto de Galeão, junto con eventos de lluvias intensas (ECI) identificados según la metodología adoptada. Los ECI fueron definidos a partir del percentil 95 de los acumulados de precipitación en intervalos de 15 minutos y de 24 horas, considerando datos provenientes de 33 estaciones pluviométricas distribuidas en la ciudad de Río de Janeiro. En total, se analizaron 100 días de ECI, evaluando la relación entre los índices termodinámicos y los eventos registrados. Se propusieron valores de referencia para dichos índices como umbrales de atención para el desarrollo de precipitaciones capaces de generar impactos significativos en la ciudad de Río de Janeiro.

Palabras clave: Lluvia Intensa. Índice Termodinâmico. Río de Janeiro.

1 INTRODUÇÃO

A cidade do Rio de Janeiro é uma metrópole que sofre constantemente com os danos causados pelas fortes chuvas, principalmente no período de verão. Os principais maciços existentes na região tais como Maciço da Tijuca, Gericinó/Mendanha e da Pedra Branca, contribuem significativamente para a variabilidade espacial da precipitação (DERECZYNSKI *et al.*, 2009) e a ocupação humana em áreas de risco torna ainda mais vulnerável essa população diante de fortes chuvas. Devido à importância social e econômica da cidade do Rio de Janeiro, o conhecimento do padrão médio da chuva do ponto de vista espacial e temporal (climatologia da precipitação) é muito importante para o direcionamento das diversas atividades relacionadas ao comércio, indústria, turismo, além do próprio planejamento urbano. De acordo com Dereczynski *et al.* (2009), os principais agentes atmosféricos responsáveis por chuvas que acometem a cidade são os sistemas frontais, por vezes associados a sistemas convectivos de mesoescala nos casos de chuvas mais intensas. As chuvas 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).

Na literatura especializada são encontrados diversos trabalhos com o propósito de validar e criar ferramentas que possam auxiliar o setor operacional nas previsões de tempo de algumas horas a alguns dias. Essas ferramentas procuram resumir, por meio de indicadores termodinâmicos, as condições atmosféricas propícias ao desenvolvimento de chuvas e ventos intensos (NASCIMENTO, 2005; PEREIRA, 2015; FRANCO *et al.*, 2020, MENEZES *et al.*, 2006, entre outros). Um desses indicadores são os conhecidos índices termodinâmicos, os quais são 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 com base em índices termodinâmicos que possam sinalizar situações atmosféricas com potencial para o desenvolvimento de chuvas intensas na cidade do Rio de Janeiro. O desenvolvimento do presente trabalho contou com uma avaliação de índices termodinâmicos da atmosfera, juntamente com episódios de chuvas intensas identificadas de acordo com a metodologia utilizada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Índices termodinâmicos, tais como K, TT, IL e CAPE, são rotineiramente utilizados na avaliação das condições atmosféricas favoráveis ao desenvolvimento de convecção e à consequente formação de nuvens de tempestade. Embora esses índices tenham um caráter essencialmente

diagnóstico, eles podem ser empregados como apoio à previsão do tempo nas horas seguintes (previsão de curto prazo), sobretudo quando analisados em conjunto com mecanismos dinâmicos da atmosfera (MENEZES et al., 2006). A seguir, destacam-se alguns trabalhos que abordam eventos de chuvas intensas e o uso desses índices termodinâmicos.

Pristo *et al.* (2018) elaboraram uma climatologia de eventos de chuvas intensas para o município do Rio de Janeiro, no período 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 o verão como a estação mais chuvosa para a cidade do Rio de Janeiro. Quanto à frequência de ocorrência de ECI, os autores verificaram que ocorre aproximadamente 30 dias de ECI por ano, sendo que cerca de 70% ocorrem no período chuvoso (dezembro a abril).

Oliveira *et al.* (2018) explicaram como o perfil 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 e são capazes de coletar dados de pressão, temperatura, umidade relativa do ar e vento em diversos níveis da atmosfera. Esses dados são capturados por rádio ou por meio de sítios da internet 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 autores verificaram que 56% da precipitação extrema apresentava ambiente de forte instabilidade, com CAPE maior que 1000 J/kg. Os 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*). Através dos resultados obtidos, os autores observaram que na região Sudeste há maiores variações nos valores dos índices de instabilidade. 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.

A relação entre índices de instabilidade e chuva extrema no Rio Grande do Sul foi o foco do estudo em Schumacher e Teixeira (2016). Nesse trabalho, foram estudados 105 eventos extremos e 342 eventos comuns que ocorreram entre os anos de 2000 e 2009. Os resultados destacaram correlações lineares bastante significativas entre os índices de instabilidade e chuva extrema.

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 indicou, entretanto, que 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.

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", 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 do modelo atmosférico.

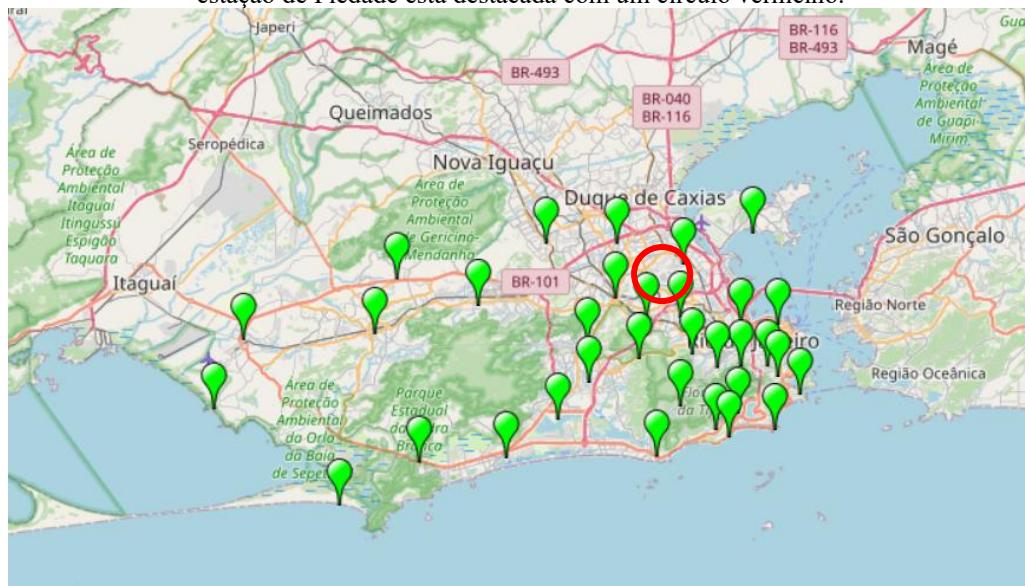
3 ÁREA DE ESTUDO, DADOS E METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO E DADOS

O local de interesse deste trabalho é a cidade do Rio de Janeiro, capital do Estado de mesmo nome. O município possui cerca de 1200 Km² de área e população em torno de 6,775 milhões de pessoas (IBGE, 2021).

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 na cidade, com dados acumulados a cada 15 minutos (Fonte: site do Alerta Rio). A Figura 1 apresenta a localização dos postos pluviométricos.

FIGURA 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.



Fonte: Elaborada pelos autores.

No presente trabalho, foram utilizados dados de precipitação referentes ao período de 26 anos, entre 1997 e 2023. Embora o termo "climatologia" seja usualmente 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 a seguir.

3.2 METODOLOGIA

No presente trabalho, o método de avaliação entre chuva e índices termodinâmicos segue o procedimento descrito a seguir.

Inicialmente, calculou-se o percentil 95 dos acumulados diários (24 horas) de chuva e também de 15 minutos para cada uma das 33 estações pluviométricas do Sistema Alerta Rio, apresentados na Tabela 1. A seguir, foi definido dia de chuva intensa a ocorrência simultânea de P95 diário com o P95 de 15 minutos. A chuva intensa pode ocorrer tanto de forma isolada (detectada em poucas estações), como também se estender em uma área mais abrangente. Para fazer essa distinção, a estação de Piedade, posicionada em ponto aproximadamente central na cidade, foi aleatoriamente escolhida para compor datas de ocorrência de chuvas intensas com pelo menos mais outras dez estações, simultaneamente. Quando essa coincidência de datas ocorreu, definiu-se um Evento de Chuva Intensa (ECI). Ou seja, para ser considerado ECI a chuva intensa precisa ocorrer simultaneamente em Piedade e em pelo menos mais outras 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 isolados de chuva, mas sim de forma espacialmente mais abrangente. A definição de ECI aqui apresentada difere, portanto, daquela dada em Pristo *et al.* (2018). De acordo com o exposto, foram obtidas 100 datas de ECI, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - 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

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 2 - Datas de ECI 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

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.2.1 Índices termodinâmicos

Os índices termodinâmicos IL, K, TT e CAPE dos horários 00Z e 12Z, para as mesmas datas de ECI, foram também considerados com o propósito de contrastar os valores desses índices em situação atmosférica convectivamente realçada, frente a valores climatológicos. Algumas datas, entretanto, não tiveram registros desses índices, 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 em 70 dias de forma completa e simultânea às datas de ECI. Uma comparação entre a climatologia dos índices e os valores referentes aos casos de ECI é feita e apresentada na sessão

de resultados com base em gráficos *boxplot* e diagramas de dispersão entre chuva e índices termodinâmicos.

De acordo com a literatura especializada, uma breve descrição desses índices é feita a seguir.

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 (T) e do ponto de orvalho (Td) em 850 hPa, a temperatura do ar em 500 hPa e a depressão do bulbo úmido (Dep) em 700 hPa. Proposto por George em 1960, este 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 (NASCIMENTO, 2005).

$$K = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - Dep_{700} \text{ [°C]} \quad (1)$$

3.2.1.1 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 *lapse-rate* nos níveis médios da atmosfera também pode aumentar os valores de TT, por isso não se recomenda analisar este índice isoladamente (NASCIMENTO, 2005).

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

3.2.1.2 CAPE:

O índice CAPE leva em sua equação os valores da temperatura virtual da parcela (Tvp) e a temperatura virtual do ambiente (Tva). Este índice foi formulado por Houze (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).

$$CAPE = g \int_{NCE}^{NE} \frac{T_{vp}(z) - T_{va}(z)}{T_{va}(z)} dz \quad [J \, kg^{-1}] \quad (3)$$

3.2.1.3 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 ($T''p_{500}$), 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 inferiores a $-5^{\circ}C$, e se chegar a ser menor que $-10^{\circ}C$ irá configurar uma atmosfera extremamente instável. O índice de Levantamento é uma boa ferramenta para traçar o perfil de instabilidade atmosférica, principalmente quando combinado à CAPE (NASCIMENTO, 2005).

$$IL = T_{500} - T''p_{500} \quad [^{\circ}C] \quad (4)$$

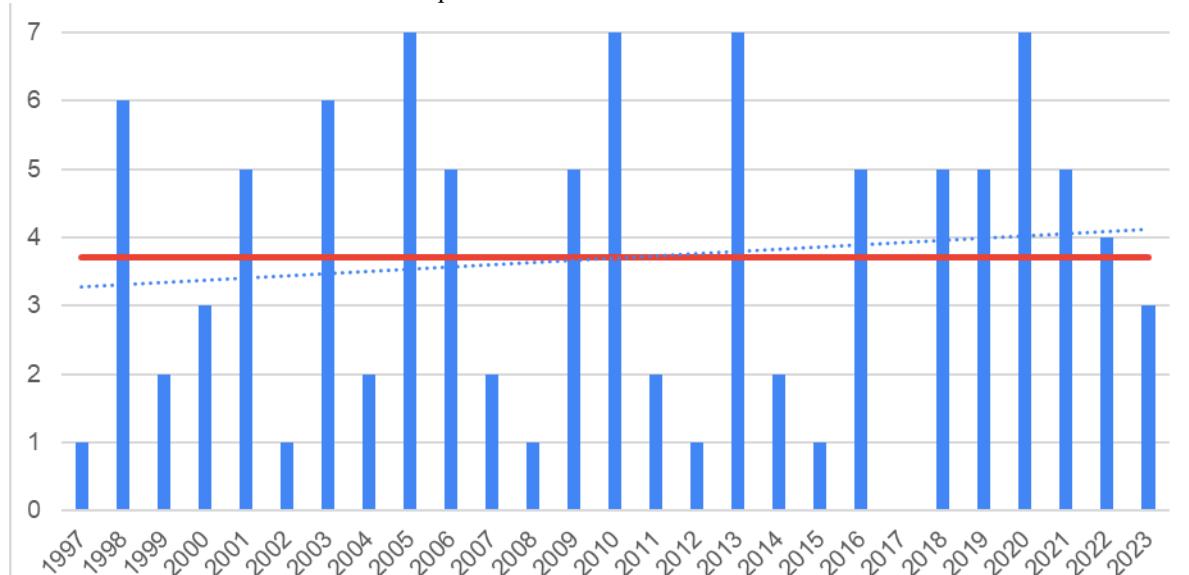
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ECI

A seguir, tem-se um panorama geral da ocorrência de ECI para cada ano, bem como sua distribuição sazonal. Na Figura 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 registros de ECI, enquanto a média climatológica é de 3,7 registros por ano, destacada pela linha horizontal vermelha na figura. Nota-se ainda que, segundo a metodologia adotada, não houve ocorrência de ECI no ano de 2017. A linha de tendência exibida na figura (linha azul tracejada) revela tendência de aumento de ECI no período, como destacado também em Pristo *et al.* (2018), mesmo para uma classificação de ECI menos restritiva.

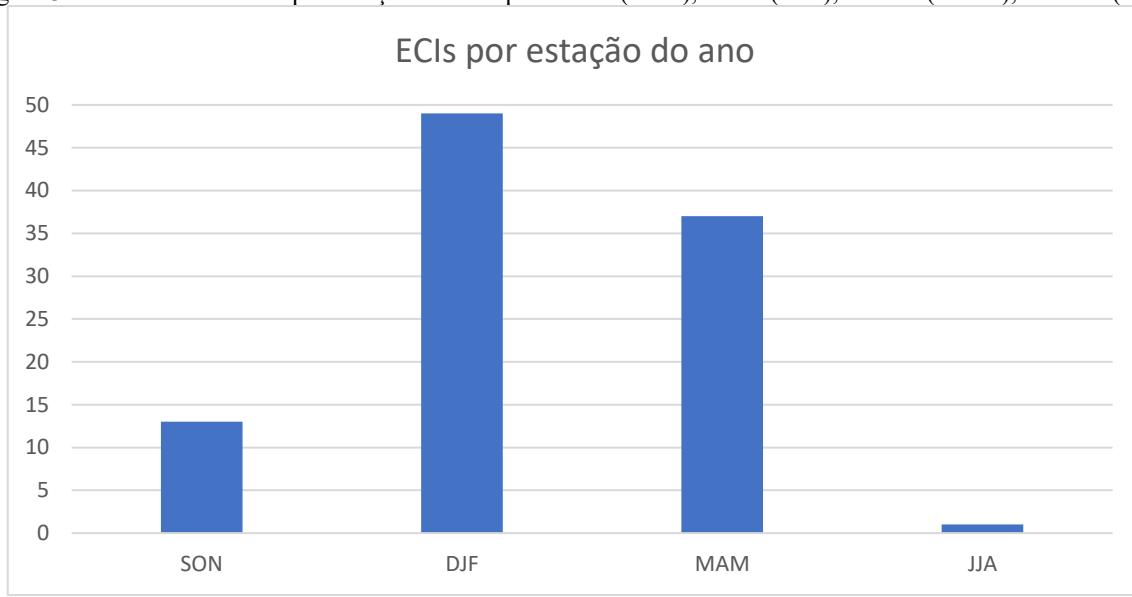
Em relação à sazonalidade (Figura 3), um número maior de eventos ocorre no verão (DJF), com 49 ocorrências de ECI. A segunda maior ocorrência desses eventos ocorre na estação de outono (MAM), com 37 registros de ECI.

Figura 2 - Ocorrência de ECI ao longo dos anos de 1997 a 2023. A linha vermelha representa o valor médio e a linha azul pontilhada destaca a tendência.



Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 3 - Ocorrência de ECI por estação do ano: primavera (SON), verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA).



Fonte: Elaborada pelos autores

Sabe-se que a chuva ao longo do dia pode apresentar momentos de maior ou menor volume. Nesse sentido, a Tabela 3 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 dos máximos 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). Por outro lado, em relação a períodos individuais de 4h indicados na mesma tabela, destacam-se os acumulados de 120,8 mm e de 113,2 mm, registrados nas faixas horárias 04-08h e 00-04h, respectivamente.

Tabela 3 - Faixa horária 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
Total de precipitação (mm)	728,1	517,5	201,4	273,9	1086,9	1042,2

Fonte: Elaborada pelos autores

4.2 ÍNDICES TERMODINÂMICOS - *BOXPLOT*

A seguir são apresentados resultados dos índices termodinâmicos no formato *boxplot* sem valores discrepantes (*outliers*).

A Figura 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 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 obtido por meio da expressão do índice apresentado na sessão 3.2.1.

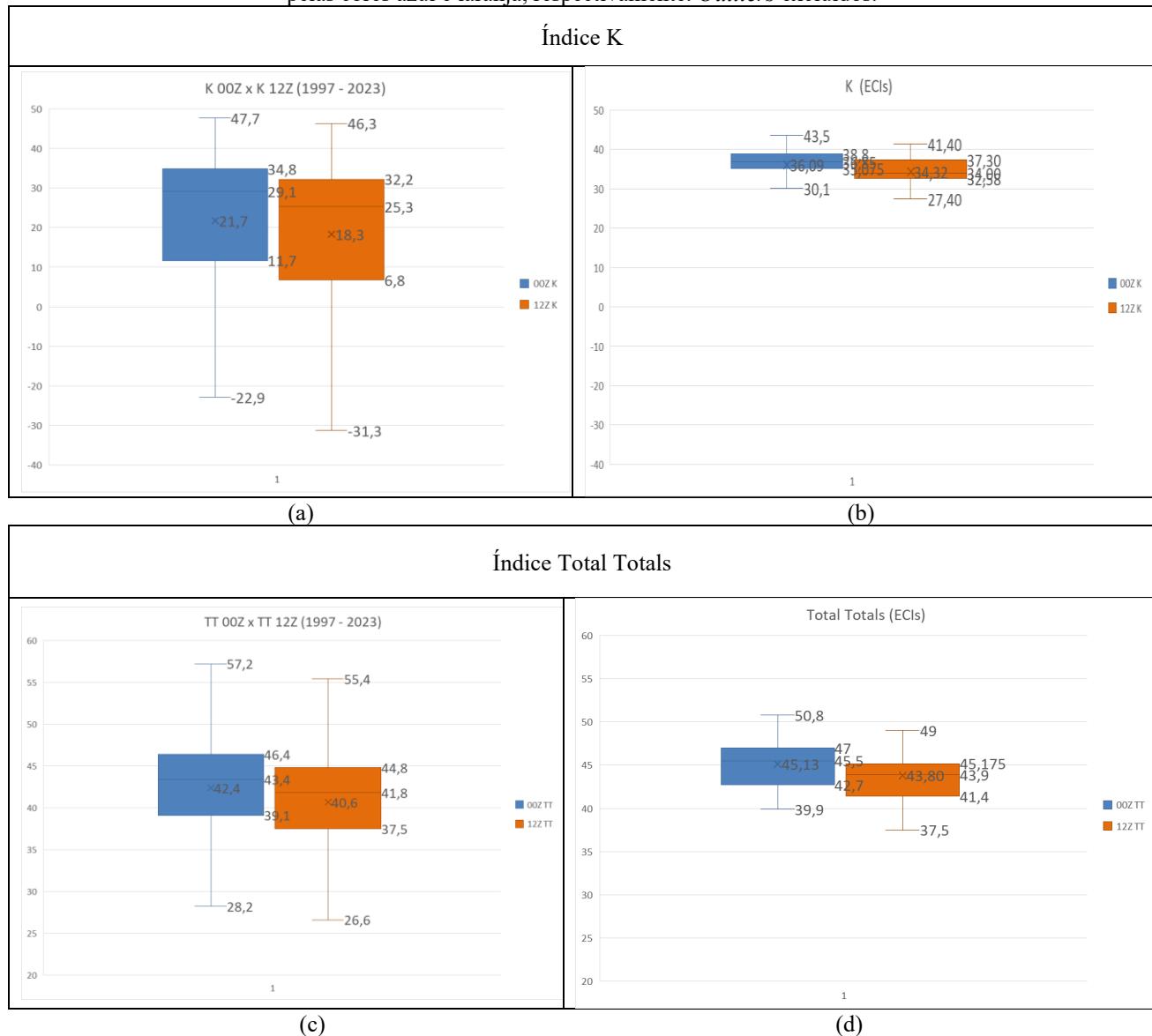
A Tabela 4 resume os valores da mediana e do terceiro quartil (Q3), obtidos diretamente dos gráficos *boxplot* para os índices termodinâmicos analisados neste estudo. Esses valores são destacados em dois cenários distintos, climatologia e dias de ECI, considerando ambos os horários analisados (00Z e 12Z). É notável que os valores do terceiro quartil desses índices ficam bem próximos daqueles indicados na sessão 3.2.1 para o desenvolvimento de intensas tempestades. Sugere-se, portanto, que os valores da mediana e do terceiro quartil apresentados na Tabela 4 sejam testados nos centros operacionais de previsão do tempo de forma a avaliar o potencial de formação de eventos de chuva intensa, especialmente quando os índices forem utilizados em conjunto com outros indicadores atmosféricos.

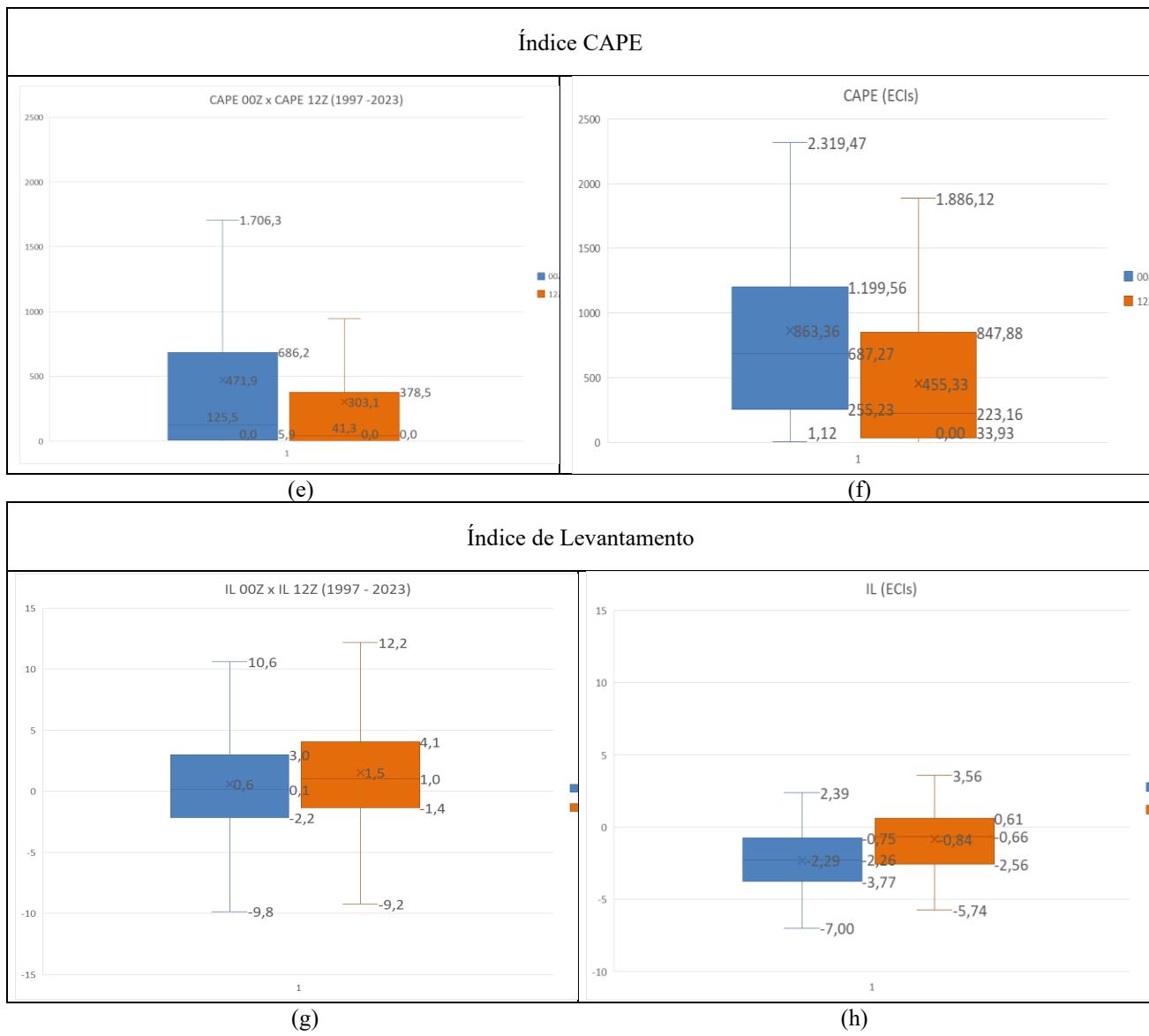
Tabela 4 - Valores da mediana e terceiro quartil obtidos dos gráficos *boxplot* da climatologia e dias de ECI dos índices termodinâmicos. (*)Foi utilizado no índice IL o primeiro quartil, pois este índice é negativo.

ÍNDICE S	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 (*)

Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 4 - *Boxplot* referente à climatologia dos índices (coluna esquerda) – (a) K, (c) TT, (e) CAPE, (g) IL – e seus valores nos dias de ECI (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.



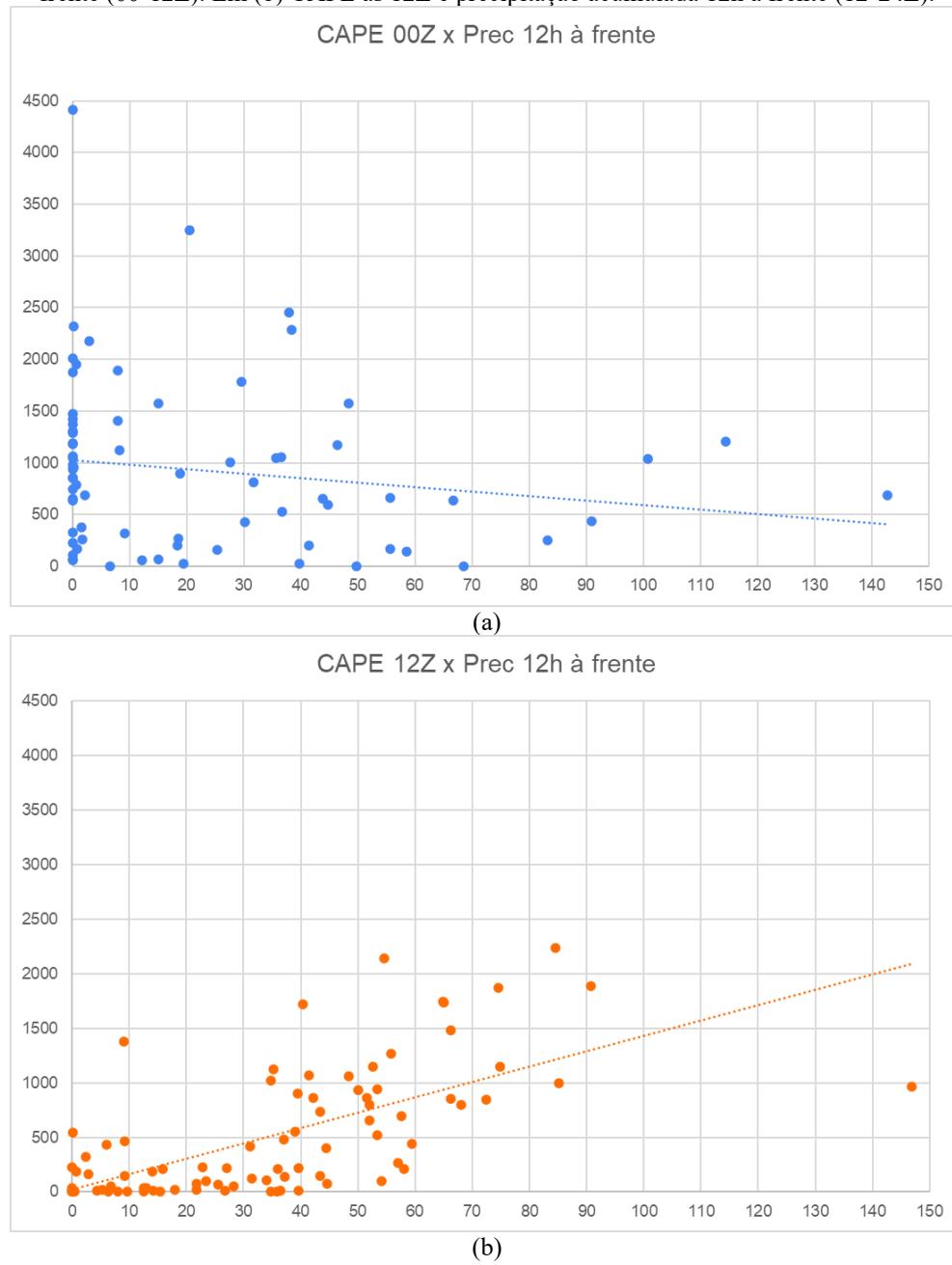


4.4 ÍNDICES TERMODINÂMICOS X ECI

Uma análise inicial entre chuva diária e índices termodinâmicos em casos de ECI, revelou baixos valores de correlação (figura não apresentada). Assim sendo, procedeu-se uma visualização em gráfico de dispersão para esses mesmos índices, mas combinados com a chuva acumulada 12h à frente do horário do índice, como apresentado na Figura 5 para o índice CAPE. É notável a melhor representação entre chuva acumulada na segunda metade do dia (12-24h) com a CAPE no horário 12Z. Situação similar também foi verificada para os demais índices termodinâmicos (figuras não mostradas). Isso pode ser entendido 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 5 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. As melhores correlações sempre acontecem para índices às 12Z com chuva 12 horas à frente (12-24h).

Figura 5 - Gráficos de dispersão do índice CAPE x precipitação. Em (a) CAPE às 00Z e precipitação acumulada 12h à frente (00-12Z). Em (b) CAPE às 12Z e precipitação acumulada 12h à frente (12-24Z).



Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 5 - Correlações entre acumulados de precipitação diária (24 h) e de 12 horas com os índices termodinâmicos às 00Z e 12Z. As faixas destacadas indicam as máximas correlações.

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

Fonte: Elaborada pelos autores

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou indicadores termodinâmicos com a finalidade de sinalizar situações atmosféricas de grande potencial para o desenvolvimento de chuvas intensas. A comparação entre climatologia dos índices com seus respectivos valores no contexto de chuvas intensas (ECI) permitiu sugerir referências a partir da mediana e terceiro quartil como valores de atenção para o desenvolvimento de chuvas que possam causar significativos transtornos na cidade do Rio de Janeiro. Sugere-se, portanto, que esses valores apresentados na Tabela 4 sejam testados nos centros operacionais de previsão do tempo de forma a avaliar o potencial de formação de chuvas intensas, principalmente quando associados a outros indicadores atmosféricos de desenvolvimento de convecção.

Outra contribuição importante desse trabalho foi notar que os índices termodinâmicos das 00Z e 12Z ficam melhor correlacionados com a chuva acumulada no período de 12 horas à frente, ao invés de se considerar o acumulado diário, como muitas vezes encontrado na literatura. Além disso, essa correlação ficou especialmente incrementada entre índices às 12Z com a chuva 12 horas à frente (12-24h), como apresentado na Tabela 5.

Esses resultados têm grande importância no dia a dia do previsor em um centro operacional de previsão do tempo, pois representam contribuições baseadas em dados atmosféricos obtidos na própria localidade e em análises relativamente simples, as quais podem auxiliar na tomada de decisão em conjunto com informações provenientes de outros produtos atmosféricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia – PPGM/IGEO/UFRJ, pela oportunidade de desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- DEREZYNSKI, 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.
- FERREIRA, R. C.; REBOITA, M. S.; HERDIES, D. L.; BENETI, C. A. Tendência dos índices de instabilidade na América do Sul. *Ciência e Natura*, 38(1), 164-169. 2016.
- FRANCO, R. M.-C.; MENEZES, W. F.; VASCONCELLOS, F. C. 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. 2020.
- HOUZE, R. A., Jr. *Cloud Dynamics*, Academic, San Diego, Calif., 573 pp. 1993.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Brasileiro de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.
- 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, Foz do Iguaçu – PR, v. 1. p. 1-10. 2006.
- 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.
- OLIVEIRA, P.; AMORIM, H. S.; DEREZYNSKI, C. P.; Investigando a atmosfera com dados obtidos por radiosondas. *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) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.
- PRISTO, M. V. DE J., DEREZYNSKI, 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. 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. 2016.
- 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, 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, 2017.

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>>.