

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CAMPUS A. C. SIMÕES  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
METEOROLOGIA

KATYELLE FERREIRA DA SILVA BEZERRA

**VARIAÇÕES E MECANISMOS ATMOSFÉRICOS DE  
FUNDO QUE DESENCADAIAM EVENTOS  
SIMULTÂNEOS DE SECA E ONDAS DE CALOR  
DURANTE O VERÃO SOBRE O NORDESTE DO BRASIL**

Maceió

2022

KATYELLE FERREIRA DA SILVA BEZERRA

**VARIAÇÕES E MECANISMOS ATMOSFÉRICOS DE  
FUNDO QUE DESENCADEIAM EVENTOS SIMULTÂNEOS  
DE SECA E ONDAS DE CALOR DURANTE O VERÃO  
SOBRE O NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Meteorologia da Universidade  
Federal de Alagoas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharelado em  
Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Helber Barros Gomes.  
Coorientador: Prof. Dr. Rakki Baltaci

Maceió

2022

B574v Bezerra, Katyelle Ferreira da Silva .

Variações e mecanismos atmosféricos de fundo que desencadeiam eventos simultâneos de seca e ondas de calor durante o verão sobre o Nordeste do Brasil / Katyelle Ferreira da Silva Bezerra. - 2022.

68 f : il.

Orientador: Helber Barros Gomes.

Coorientador: Rakki Baltaci.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 58-68.

1. Mudanças climática – Nordeste, Brasil. 2. Eventos extremos. 3. Secas. 4. Ondas de calor. 5. Modelagem numérica. I. Título.

Ao meu filho Bernardo, aquele a quem  
canalizo minhas maiores e mais intrínsecas  
motivações.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela insistência da minha vida. Por revelar seu amor diário e infinito.

Ao meu amado filho, que mesmo sem compreender abriu mão da minha presença em alguns momentos de lazer. Por se submeter a alguns sacrifícios nos quais foram necessários. À minha mãe Maria do Socorro, por optar por mim e me acolher em sua vida, serei eternamente grata por sua escolha. Às minhas irmãs por todo carinho. Ao meu querido irmão Iago, pela presença e amizade. À minha madrinha Helena por todo incentivo.

Ao meu orientador, professor Helber Barros Gomes, pela confiança, oportunidade e disponibilidade.

Ao meu coorientador Hakki Baltaci pela orientação e parceria.

Ao grupo de pesquisa DINAC, colegas e principalmente os professores Cristina e Fabrício, pela parceria e solicitude.

Ao professor Heliofábio, pelas oportunidades das monitorias e por se mostrar sempre disponível.

Ao professor Dirceu por ter aceito o convite para fazer parte da banca avaliadora.

Ao professor Glauber pela oportunidade no PIBIC e a professora Natália pela oportunidade de estágio.

A todos que compõem o quadro de professores do ICAT, agradeço por todo conhecimento adquirido que servirá como base para minha profissão.

A todos os meus colegas de curso. Principalmente o Lucas Henrique pelo auxílio no Python.

Ao meu amigo Jeozadaque (in memoriam), por ter me feito conhecer o verdadeiro sentido da amizade gratuita, pelos anos de convivência e sonhos compartilhados.

Aos meus amigos Vanessa e Daniel pela longa jornada de amizade, por todas às vezes nos quais me socorreram, pelo carinho e pela convivência. Amo vocês.

A minha amiga mais que especial Ana Paula, pelos longos anos de amizade e incentivo.

Ao meu amigo querido Flávio José, por se fazer presente no dia da escolha do curso, seu apoio foi fundamental. Obrigada por todos os momentos de convivência.

À CNPQ pela oportunidade de bolsa.

## RESUMO

Muitos estudos foram realizados sobre ondas de calor e secas no hemisfério norte, porém poucos estudos foram apresentados para o hemisfério sul, especialmente no Brasil e quase nenhum estudo para o nordeste, tornando um cenário pouco desenvolvido quanto à mitigação dos efeitos de tais eventos. Os impactos gerados pelos efeitos combinados de seca e ondas de calor refletem na economia, na agricultura e na saúde, podendo até mesmo gerar perda de vidas humanas. Esta pesquisa teve por objetivo diagnosticar as ondas de calor e os eventos de secas quanto à sua frequência, duração e severidade, bem como investigar os fenômenos que desencadearam os eventos simultâneos de seca e ondas de calor durante o período de 1961 a 2015. A metodologia utilizada neste estudo identifica as ondas de calor como um período de três ou mais dias consecutivos com temperatura máxima e mínima diária acima do 90º percentil, após serem identificadas foram analisadas as propriedades de intensidade, duração (dias) e frequência (número de ondas de calor). Quanto ao SPI, ele mensura o excesso ou o déficit de chuva, acumulados em distintas escalas de tempo, em uma determinada área. Para esse trabalho foi utilizado o SPI-3, SPI-6 e SPI-12, onde a análise simultânea desses eventos mostraram que os estados da Bahia, Ceará e Piauí apresentaram as maiores frequências de ondas de calor, principalmente no ano de 2015, bem como seca de nível extremo. Foram encontrados padrões meteorológicos semelhantes em diferentes variáveis nos níveis de 850, 500 e 200 hPa. Os resultados das composições de reanálise sugerem que o mês de fevereiro foi o mais intenso do período analisado, revelando temperaturas máximas, anomalias positivas e maior disponibilidade de umidade. Os resultados para divergência mostraram circulação anticiclônica em baixos e médios níveis, onde os estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, região central de Alagoas, Paraíba e norte do Piauí apresentaram intensidade negativa em baixos níveis, em médios níveis a intensidade negativa prevaleceu do centro do sertão em direção a Pernambuco. Nos resultados de vortacidade, a intensidade negativa foi mais intensa no estado da Bahia e Pernambuco.

**Palavras-chave:** MUDANÇAS CLIMÁTICAS; EVENTOS EXTREMOS; SECAS; ONDAS DE CALOR; MODELAGEM NUMÉRICA.

## **ABSTRACT**

Many studies have been carried out on heat waves and droughts in the northern hemisphere, but few studies have been presented for the southern hemisphere, especially in Brazil and almost no studies for the northeast, making an underdeveloped scenario regarding the mitigation of the effects of such events. The impacts generated by the combined effects of drought and heat waves reflect on the economy, agriculture and health, and may even lead to loss of human life. This work aimed to diagnose heat waves and drought events in terms of their frequency, duration and severity, as well as to investigate the phenomena that triggered simultaneous events of drought and heat waves during the period from 1961 to 2015. The methodology used in this study identifies hot flashes as a period of three or more consecutive days with daily maximum and minimum temperature above the 90th percentile, after being identified, the properties of intensity, duration (days) and frequency (number of hot flashes) were analyzed ). As for the SPI, it measures the excess or deficit of rainfall, accumulated in different time scales, in a given area. For this work, the SPI-3, SPI-6 and SPI-12 were used, where the simultaneous analysis of these events showed that the states of Bahia, Ceará and Piauí had the highest frequencies of heat waves, mainly in the year 2015, as well as extreme level drought. Similar meteorological patterns were found in different variables at the 850, 500 and 200 hPa levels. The results of the compositions suggest that the month of February was the most intense in the analyzed period, revealing maximum temperatures, positive anomalies and greater availability of moisture. The results for divergence showed anticyclonic circulation at low and medium levels, where the states of Pernambuco, Rio Grande do Norte, central region of Alagoas, Paraíba and northern Piauí showed negative intensity at low levels, at medium levels the negative intensity prevailed from the center from the hinterland towards Pernambuco. In the vorticity results, the negative intensity was more intense in the states of Bahia and Pernambuco.

**Keywords:** CLIMATE CHANGE; EXTREME EVENTS; DRY; HEAT WAVES; NUMERICAL MODELING.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudo: Nordeste do Brasil	32
Figura 2 - Frequência anual das ondas de calor para o NEB - CTX90pct	37
Figura 3 - Frequência anual das ondas de calor para o NEB - CTN90pct	38
Figura 4 - Histograma das durações de todos os eventos de OC registrados para o NEB no período de 1960- 2015 - CTX90pct	39
Figura 5 - Mapas de composições para CTX 90pct e CTN 90pct: (a) número de OC para Tmax; (b) número de dias (duração) para Tmax; (c) número de OC para Tmin; (d) número de dias (duração) para Tmin;	40
Figura 6 - Mapa referente aos índices de níveis de Seca - SPI	42
Figura 7 - Climatologia referente a T2m: (a) DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	44
Figura 8 - Campos de composições em níveis únicos para temperatura a 2 metros relativos aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	45
Figura 9 - Campos de composições em níveis únicos para anomalias de temperatura a 2 metros relativos aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	46
Figura 11 - Campos de composições de umidade: (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro sob o nível de 500hPa.	47
Figura 13 - Campos de composições no nível de 850hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) janeiro; (c) fevereiro; (d) dezembro;	48
Figura 14 - Campos de composições no nível de 500hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) janeiro; (c) fevereiro; (d) dezembro;	49
Figura 15 - Campos de composições no nível de 200hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	50
Figura 16 - Campos de composições de divergência do vento ( $m\ s^{-1}$ ) no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	51
Figura 17 - Campos de composições de divergência no nível de 500hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	52
Figura 18 - Campos de composições de divergência no nível de 200hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	53
Figura 19 - Campos de composições de vorticidade para as componentes do vento no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;	54
Figura 20 - Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;	55
Figura 21 - Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 500hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;	55
Figura 22 - Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 200hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;	56



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - registro de dados para CTX90	41
Tabela 2 - registro de dados para CTN90	41

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Base de dados utilizada para condução das análises referentes às composições.	31
Quadro 2 - Correspondência entre valores de SPI e intensidades de seca.	35

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ATN	Atlântico Tropical Norte
ATS	Atlântico Tropical Sul
BA	Bloqueio Atmosférico
ENOS	El Niño Oscilação Sul
NEB	Nordeste do Brasil
OAN	Oscilação do Atlântico Norte
OC	Onda de Calor
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OIP	Oscilação Interdecadal do Pacífico
OMA	Oscilação Multidecadal do Atlântico
SMAS	Sistema de Monções da América do Sul
SPI	Índice de Precipitação Padronizado
TSM	Temperatura Superficial do Mar
VCAN	Vórtice ciclônico de altos níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>26</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>30</b>
2.1 Geral	30
2.2 Específico	30
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
3.1 Dados	31
3.2 Definição de seca	32
3.3 Definição de onda de calor	35
3.4 Eventos simultâneos de secas e ondas de calor para dados observados	36
3.5 Análises das condições meteorológicas durante eventos de Secas e Onda de Calor	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>37</b>
4.1 Resultados dos dados observados	37
4.2 Resultados dos dados de reanálises do ERA5	43
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os extremos climáticos tem sido alvo de muita preocupação devido aos seus altos impactos sociais e ecológicos desproporcionais (IPCC, 2013). Os impactos mais perigosos são decorrentes de uma união de eventos climáticos conhecidos como eventos compostos (IPCC, 2012) que quando comparados com eventos extremos individuais, os compostos têm efeitos mais agravantes nos sistemas naturais e humanos, principalmente quando o evento de seca atua conjuntamente com os eventos de ondas de calor, pois possuem grande extensão espacial e longa duração (MUKHERJEE & MISHRA, 2021; SHI et. al, 2021; ZSCHEISCHLER et. al., 2018; ZSCHEISCHLER & SENEVIRATNE, 2017).

O constante aumento da temperatura da superfície global modifica o padrão espaço-temporal, frequência e magnitude de eventos extremos, como ondas de calor (PERKINS-KIRKPATRICK & LEWIS, 2020; RUSSO et. al, 2014) e seca (AULT, 2020; DAI, 2011; TRENBERTH et. al., 2014; G. WU et. al., 2022). Altas temperaturas podem aumentar consideravelmente a evaporação, agravando assim a severidade da seca (DAI, 2013; DAI et. al., 2004); Quando uma superfície apresenta-se seca, ela se torna favorável para um aquecimento mais sensível da atmosfera e, conseqüentemente, temperaturas do ar elevadas (GREVE et. al. 2014; MUELLER E SENEVIRATNE, 2012; SENEVIRATNE et. al, 2006).

Secas e ondas de calor são eventos climáticos que geram impactos profundos no mundo todo, na sociedade e no meio ambiente. Assim, se faz necessário investigar os fatores determinantes para uma melhor compreensão, visando possíveis adaptações em busca de mitigar tais efeitos. Alguns estudos observaram as características desses eventos compostos em diversas escalas temporais e espaciais e notaram que a frequência desses eventos aumentou durante todo o período observado e que continuará aumentando em cenários futuros em grande parte do mundo (MUKHERJEE & MISHRA, 2021; X. WU et. al., 2020; P. ZHANG et. al., 2020; ZSCHEISCHLER & SENEVIRATNE, 2017).

As secas e ondas de calor que ocorreram em 2003 na Europa, 2010 na Rússia e 2014 na Califórnia são padrões de condições simultâneas de calor e seca extrema (AGHAKOUCHAK ET AL., 2014; FINK et. al, 2004; TRENBERTH E FASULLO, 2012), com perdas econômicas e de vidas humanas. Investigar e compreender os mecanismos associados a relação seca e onda de calor é necessário para estimar os riscos e amenizar as perdas em diversos setores.

O sul da Califórnia é uma região caracteristicamente seca do estado, e as secas são uma característica importante do clima do oeste da América do Norte (GRIFFIN ANCHUKAITES, 2014). Segundo Agha Kouchak et al. (2015), a seca foi motivada simultaneamente por baixos volumes de precipitação e temperaturas muito altas. Há indícios

de que a seca de 2012 - 2016 também foi atribuída às mudanças climáticas antropogênicas (COOK et al., 2015; DIFENBAUGH et al., 2015; MANN E GLEICK, 2015; WANG et al., 2014). De acordo com os resultados da simulação climática, a gravidade da seca no sudoeste dos Estados Unidos continuará no futuro (CAYAN et al; 2010) e que o risco de secas extremas, impulsionadas principalmente por temperaturas mais altas, aumentou no oeste dos Estados Unidos, independentemente das tendências de precipitação (COOK, AULT et al., 2015).

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma das regiões que sofrem com eventos de seca, afetando principalmente os mais vulneráveis, no que diz respeito à disponibilidade hídrica, causando transtorno em diversos setores, trazendo riscos principalmente à segurança alimentar e energética. Um dos principais fatores que desencadeiam a seca na região é a variabilidade climática natural (HASTERRATH, 1984; MAGALHÃES E GLANTZ, 1992; FERREIRA et al., 2018). A variação e distribuição irregular do regime pluviométrico ocorrem devido à execução de sistemas atmosféricos em diferentes escalas de tempo e espaço, como a Zona de Convergência Intertropical, os Vórtices Ciclônicos de Alto Nível, os Sistemas Frontais, os Distúrbios de Ondas da leste, linhas de instabilidade, aglomerados convectivos e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (UVO E NOBRE, 1989; COUTINHO et al. 2010; ASSIS et al. 2015; NEVES, 2018; GOMES et al., 2015, GOMES et al., 2019; OYAMA, 2020). Essa variabilidade também é motivada pela Temperatura superficial do Mar (TSM) do Atlântico tropical. O padrão de anomalias TSM positivas (negativas) no Atlântico sul (norte) está relacionado aos anos úmidos (secos) no NEB (HASTENRATH E HELLER, 1977; NOBRE E SHUKLA, 1996; HASTENRATH et al. 1984; MOURA E SHUKLA, 1988; HASTENRATH, 1990; E RAO et al., 1993). Há fortes indícios de que os extremos da seca estão cada vez mais frequentes e se referem às mudanças climáticas induzidas pelo homem (GLOOR et al., 2013; TRENBERTH et al., 2013; MARENGO E ESPINOZA, 2016). O maior número de pessoas vivendo com pobreza está no nordeste do Brasil e são os mais afetados pela ausência de chuvas, e quase 95% das terras cultivadas são destinadas à agricultura com chuva (IBGE, 2009). Baixos volumes pluviométricos, alta variabilidade espaço temporal e distribuição irregular de chuvas e resultados associados, como falta de irrigação, degradação do solo (devido ao uso inadequado) e pobreza excessiva são uma das razões da região do NEB ser mais vulnerável às mudanças climáticas.

Os vários episódios de eventos climáticos extremos são apontados como um dos produtos mais perigosos da mudança climática (RUSTICUCCI, 2012). Muitos estudos indicam que o aquecimento global antropogênico influenciou os episódios de ondas de calor, bem como secas em várias regiões. Tal aquecimento contribuiu para as ondas observadas nas últimas décadas, como as de 2003 na Europa e 2010 na Rússia (STOTT et al., 2004; DOLE et al., 2011; FISCHER & KNUTTI, 2015). Semelhantes ao evento de ondas de

calor de 2003 recordes de temperatura foram quebrados na Europa durante 2019 e na Sibéria durante 2020 (VAUTARD et al., 2019; CIAVARELLA et al., 2020).

Conrado et al. (2012) apontaram a queima de petróleo e carvão e extração, além de incêndios florestais (aqui podemos citar a Amazônia, onde o número de incêndios nos últimos anos se intensificou) e as emissões de metano de grandes usinas hidrelétricas, culturas inundadas como arroz e grandes rebanhos de gado, como fatores que influenciaram às altas temperaturas.

Segundo Geirinhas et al (2017), estudos sobre a caracterização de ondas de calor, análise de mudanças, comportamento e processos físicos agregados, não ocorrem para a América do Sul e para o Brasil, tornando esse tipo de análise escassa, e o nordeste do Brasil não está isento do aumento da temperatura nos últimos tempos (MARENGO & CAMARGO, 2008). Estudos realizados nas médias latitudes do Hemisfério Norte mostraram que padrões de circulação anticiclônica em larga escala, conhecidos como bloqueios atmosféricos, são os principais responsáveis pela ocorrência de ondas de calor (BLACK et al., 2004; DOLE et al., 2011). No entanto, no Hemisfério Sul, temos poucos estudos sobre essa correspondência, atualmente em alguns estudos (GEIRINHAS et al., 2017; COSTA, 2018; RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; RODRIGUES et al., 2019) foram encontradas correlações estimadas entre eventos de bloqueio atmosférico com extremos de temperatura e anomalias negativas de precipitação sobre o sudeste do Brasil (RODRIGUES & WOOLLINGS, 2017; RODRIGUES et al., 2019).

A fragilidade aos efeitos dos eventos extremos nos quais a sociedade e ecossistemas estão propensos depende muito da localização e área afetada, da extensão temporal do evento e naturalmente dos ecossistemas e culturas em risco (COSTA et. al, 2015), quanto as taxas de mortalidade que esses impactos causam dependem do tipo de população atingida, estrutura etária, bem como da adaptação global da sociedade às temperaturas extremas (FILHO et. al, 2016).

Alguns pesquisadores utilizaram o percentil de precipitação mensal e temperatura a fim de descrever a variação da condição do clima seco-quente (X. WU et. al., 2020; ZHOU & LIU, 2018; ZSCHEISCHLER & SENEVIRATNE, 2017). Em um cenário recente, estudos foram realizados com o objetivo de investigar a variação das características desses eventos compostos definindo-o como um episódio de onda de calor que ocorreram sob condições de seca (FENG et. al., 2020; MUKHERJEE et. al, 2020; MUKHERJEE E MISHRA, 2021), para esses estudos foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizada (SPI) a fim de identificar eventos de seca, enquanto uma onda de calor foi tipicamente definida como um período de dias consecutivos extremamente quentes com a temperatura máxima diária acima de um percentil

fixo (FENG et. al., 2020; MUKHERJEE E MISHRA,2021; SHI et. al,2021; YU & ZHAI, 2020).

Assim, neste estudo foi utilizado o Índice de precipitação padronizada (SPI) e os índices de CTX90 e CTN90 para temperaturas máximas/mínimas diárias, além de dados de reanálises do ERA5 para uma melhor compreensão dos fatores que possam ser determinantes na formação dos eventos simultâneos de secas e ondas de calor sobre o NEB.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Investigar as variações e mecanismos atmosféricos que desencadeiam eventos simultâneos de seca e ondas de calor durante o verão sobre o nordeste do Brasil no período de 1961 a 2015.

### **2.2 Específicos**

- Quantificar o número de frequência de OC e suas durações;
- Analisar a intensidade da seca através de composições;
- Descrever o comportamento das variáveis de temperatura, umidade relativa e componentes através de composições;

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Dados

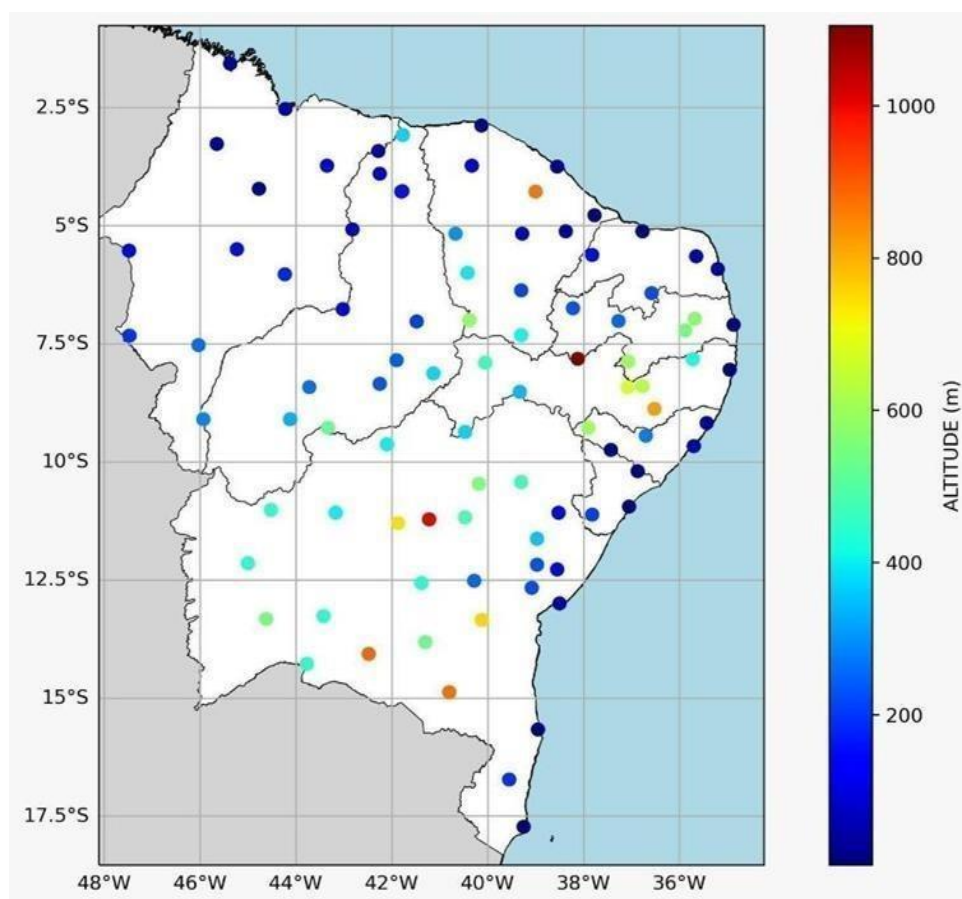
Para este estudo, foram utilizados dados observados do INMET, como também dados de reanálise do ERA5 disponibilizados pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts/ERA5 Reanalysis (ECMWF/ERA5). O dataset ERA5 é uma versão aperfeiçoada do antigo ERA-Interim, e assim como o anterior, combinam de forma otimizada dados de observação e simulações numéricas de estados climáticos passados, fornecendo uma estimativa dos estados atmosféricos menos sensível a erros observacionais e variabilidade microclimática (DEE et al., 2011). Os dados observados foram de temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C) e precipitação (mm) para 96 estações meteorológicas que compreendem nove estados do Nordeste brasileiro, entre eles: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão (MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE) para o verão de 1961 a 2015. Para as reanálises do ERA5, foram utilizadas as variáveis de umidade relativa, temperatura a 2 metros, componentes U e V do vento, referentes aos níveis de 850, 500 e 200hPa e às 00:00 UTC.

As variáveis atmosféricas utilizadas para gerar os resultados apresentados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1, e foram recortadas para as latitudes 20°S a 0°S e longitude 50°W a 34°W, para representar às composições de mapas de linhas de correntes as latitudes foram recortadas para 20°S a 0°S e longitude 55°W a 10°W a fim de obtermos uma melhor visualização das condições meteorológicas durante as janelas de tempo nos quais os eventos ocorreram simultaneamente.

Quadro 1 - Base de dados utilizada para condução das análises referentes às composições.

Variável	Altura/Nível	Fonte	Resolução espacial	Resolução Temporal
Temperatura	2 m	ERA5	0.25°x0.25°	Horária
Umidade relativa	850 hPa; 500 hPa; 200 hPa;	ERA5	0.25°x0.25°	Horária
Vento-U	850 hPa; 500 hPa; 200 hPa;	ERA5	0.25°x0.25°	Horária
Vento-V	850 hPa; 500 hPa; 200 hPa;	ERA5	0.25°x0.25°	Horária

Figura 1 - Área de estudo: Nordeste do Brasil



**Fonte:** elaborado pela autora (2022)

### 3.2 Definição de seca

As secas são desastres naturais conhecidos como o pior desastre natural em termos do número de pessoas afetadas, bem como em grandes perdas financeiras (RAJSEKHAR et al., AGHAKOUCHAK, 2015). As secas fazem uma analogia de natureza temporária do clima de uma região resultante de chuvas abaixo do climatológico normal em um determinado período (MACEDO et al., 2010).

O Nordeste do Brasil (NEB) é uma área conhecida por ter sido afetada por uma seca severa, cujos enormes danos econômicos e sociais causados por ela se tornaram um dos maiores desastres climáticos da região tropical (HASTENRATH et al., 1984; HASTENRATH, 1990). Segundo HERDIES, D. L et. al, o ano de 1933 marcou o Nordeste do Brasil com uma seca severa onde foi associada às condições atípicas do El Niño ao longo do ano. As Possíveis causas foram direcionadas a um aumento na intensificação do ciclone de 200 hPa sobre o NEB associado ao aumento da convecção sobre o Pacífico central equatorial combinados com episódios de ENSO (El Niño Oscilação Sul).

Algumas pesquisas investigaram o evento de seca durante o verão de 2013/2014 e identificaram que o Bloqueio Atmosférico (BA) ativo durante o período analisado influenciou para que houvesse uma supressão da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), devido ao sistema de alta pressão deslocado sobre a América do Sul (COELHO et al., 2015, 2016; GETIRANA, 2015; OTTO et al., 2015; SETH et al., 2015). Rodrigues & Woollings (2017) apontou que anos com número maior de dias de BA coincidem com anos com menos dias de estabelecimento da ZCAS. Alguns autores definem ZCAS como uma permanente banda de nebulosidade e precipitação no sentido noroeste-sudeste que se estende desde o sudeste da Amazônia até sudoeste do oceano Atlântico Sul, sendo estabelecida em condições específicas pela convergência de diferentes massas de ar, sendo o principal sistema meteorológico do verão no Brasil. (ANDRADE, 2007; CARVALHO et al., 2002a, 2004; KODAMA, 1992; SATYAMURTI et al., 1998). Seus episódios são vistos durante o período de estabelecimento do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) entre a primavera e o verão austral, e desempenha um importante papel na distribuição de chuva sobre o sudeste do Brasil (ANDRADE, 2007; DRUMOND, 2005; LOPES, 2016; KOUSKY, 1988).

Rodrigues & Woollings (2017) evidenciaram um crescimento considerável no número de dias de BA durante os meses de DJF para o período de 2000-2014, quando a Oscilação interdecadal do Pacífico (OIP) entrou em sua fase negativa. A fase negativa da OIP na maioria das vezes está associada com a evolução dos ventos alísios sobre o oceano Pacífico, o que leva a um estado semelhante do fenômeno La Niña, com esfriamento das águas superficiais do Pacífico tropical (ENGLAND et al., 2014).

Para evitar os efeitos da seca, ao longo do tempo, esforços foram feitos para desenvolver índices de seca capazes de determinar longos períodos de seca e especificar em termos de intensidade (MACEDO et al., 2010). Assim, foram criados diversos índices de seca que visam quantificar a gravidade, duração e distribuição espacial do evento com base no desenvolvimento das chuvas e, talvez, de outras variáveis climáticas (HAO E SINGH, 2015). Em relação aos índices utilizados, há prioridade para o Índice de Precipitação Padronizado (SPI).

Costa et al (2016) analisaram a ligação entre os eventos de seca ocorridos no Leste do Brasil utilizando diferentes índices climáticos. Em 2013 Santos et al, utilizaram a análise de frequência regional para obter o SPI como forma de determinar períodos de estimativa seca no Alto São Francisco. Santos et al., também destacou a importância detalhada da definição da escala e do período para ter um resultado esperado para a utilização desse monitoramento.

Para avaliar as secas no Nordeste do Brasil (NEB), foi escolhido o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), desenvolvido por McKee et al., 1993, no Centro climático

colorado da Universidade estadual do Colorado, CSU, que é um índice de seca meteorológica (RAJSEKHAR et. al., 2015) como é bem aprovado em pesquisas científicas, sendo um dos índices mais utilizados para monitores de seca, além de ser amplamente utilizado em sistemas de monitoramento e previsão, adicionando apenas dados de precipitação em seu cálculo (MISHRA E SINGH, 2010). Uma das principais vantagens do SPI está na possibilidade do uso de seu cálculo para várias escalas de tempo (MCKEE et al., 1993; STEINEMANN et al., 2005; MISHRA E SINGH, 2010; RAJSEKHAR et al., 2015) como as escalas mais comuns de 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses, o que permite avaliar os impactos da deficiência pluviométrica em diferentes elementos do ciclo hidrológico (MCKEE et al., 1993) assumindo uma série tempo esse estudo foi utilizado o SPI-3, SPI-6 e SPI-12.

Uma vez definida a escala de tempo, os dados são combinados com a distribuição de probabilidade gama para determinar a relação entre probabilidade e precipitação. A distribuição gama incompleta pode ser definida pela função de densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} \quad x > 0, \beta > 0, \quad \gamma > 0 \quad (1)$$

Onde x é a variável aleatória;  $\beta$  é o parâmetro de escala;  $\gamma$  é o parâmetro de forma;  $\Gamma$  é uma função gama. A função gama é representada por:

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} e^{-x} dx, \text{ para } y > 0 \quad (2)$$

Para obter uma probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor de capacidade, é utilizada a equação (THOM, 1958):

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} dx \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{44}{3}} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha} \quad (5)$$

Sendo  $\bar{x}$  a precipitação média e

$$\alpha = \ln \left( \bar{x} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \right) \quad (6)$$

Em que o n corresponde ao número de observações. Assim, a distribuição acumulativa é então alterada para distribuição probabilidade normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um. Posteriormente, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor mensal é estimada. Aplica-se então a essa probabilidade a função normal inversa para encontrar o valor do SPI que segundo a definição de Dos Santos et al (2017) o SPI corresponde a diferença da precipitação observada em relação à média do intervalo de tempo específico:

$$SPI = Z_i = \left( \frac{P_i - \bar{P}_i}{\sigma_i} \right) \quad (7)$$

Onde  $\bar{P}_i$  é a precipitação observada; e  $\sigma_i$ , são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada. A Tabela 2 mostra os valores indicados por McKee et al., 1993 e por Agnew, 2000, para os intervalos de SPI que diferem em secas com níveis diferentes.

Quadro 2 - Correspondência entre valores de SPI e intensidades de seca.

<b>SPI</b> (McKee, et. al, 1993)	<b>Intensidade da seca</b>	<b>SPI</b> (Agnew, 2000)	<b>Intensidade da seca</b>
0,00 a -0,99	Leve	<0,84 e >- 0,84	Normal
-1,00 a -1,44	Moderado	<-0,84	Seca moderada
-1,50 a -1,99	Forte	<-1,28	Seco
-2,00 ou menor	Extremo	< -1,65	Muito seco

### 3.3 Definição de onda de calor

Uma Onda de Calor (OC) pode ser entendida como um intervalo de tempo moderadamente longo, onde as temperaturas máximas e/ou mínimas excedem um determinado limiar, sendo este limiar muitas vezes baseado num percentil de temperatura (FISCHER & SCHÄR, 2010; GEIRINHAS et. al., 2017; PERKINS & ALEXANDER, 2013), no entanto, existem várias definições diferentes para o conceito. No sentido metodológico, foram utilizados os índices CTX90pct e CTN90pct que compreendem uma onda de calor como período de 3 dias consecutivos e percentil 90% para temperaturas máximas (CTX90) e mínimas (CTN90) diárias. Assim, foi considerado como onda de calor tempos acima do

percentil de 90 % e de no mínimo três dias consecutivos.

Após serem identificadas, as OC foram caracterizadas quanto à frequência, número totais durante o período de análise e duração (dias). A Frequência é determinada como sendo o número de eventos de OC observados e a duração a média do número de dias de cada evento. Estas características foram calculadas o verão (DJF) de 1961-2015.

### 3.4 Eventos simultâneos de secas e ondas de calor para dados observados

Para os eventos simultâneos de seca e ondas de calor com dados observados, foram analisados dados nos quais as datas coincidiram, levando em consideração eventos de seca moderada à seca severa.

### 3.5 Análises das condições meteorológicas durante eventos de Secas e Onda de Calor

Para uma melhor análise das condições atmosféricas durante os eventos simultâneos de secas e ondas de calor, mapas de composições foram gerados para cada variável aqui citada nos níveis aqui definidos (tabela 1). Também foram criados mapas de composições de anomalias para todas as variáveis apresentadas, as anomalias foram calculadas subtraindo a climatologia média dos valores diários. As composições foram calculadas de acordo com a janela de tempo nos quais os eventos coincidiram simultaneamente. Campos de composições de vorticidade e divergência com linhas de correntes, também foram criados. Assim, é possível observar as condições atmosféricas em relação à climatologia desses eventos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados dos dados observados

A caracterização climática foi feita analisando para cada estado do nordeste do Brasil e para ambos os índices CTX 90pct e CTN 90pct. A Figura 2 mostra a frequência anual das ondas de calor para os estados do NEB (CTX 90pct). Pode-se notar que o aumento do número de OC ocorreu para alguns estados nos últimos anos, como é o caso dos estados do Piauí, Maranhão, Ceará e Bahia. O estado de Alagoas teve destaque nos anos de 1998 e 2006, apresentando em torno de oito OC. Em 2015, os estados de Bahia, Ceará se destacaram apresentando mais de doze OC, Maranhão com sete OC e Piauí com dez OC.

Marengo e Valverde (2007) em seu estudo confirmaram que as altas temperaturas podem estar relacionadas a fatores naturais, tais como anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico e Oceano Pacífico (El Niño Oscilação Sul – ENOS), como também a fatores antropológicos, tais como queima de combustível fóssil, industrialização, mudanças no uso da terra e subseqüentes queimadas. No processo de aquecimento, há ainda que se considerar a Oscilação do Pacífico (ODP).

Figura 2 - Frequência anual das ondas de calor para o NEB - CTX90pct



Fonte: elaborado pela autora (2022)



A Figura 3 mostra o número de OC para o NEB usando o CTN90pct. Embora os estados apresentem anos divergentes entre si, pode-se observar maiores OC nos estados do Ceará (12 OC), Bahia (10 OC), Sergipe (10 OC), Pernambuco (5 OC) e PI (5 OC).

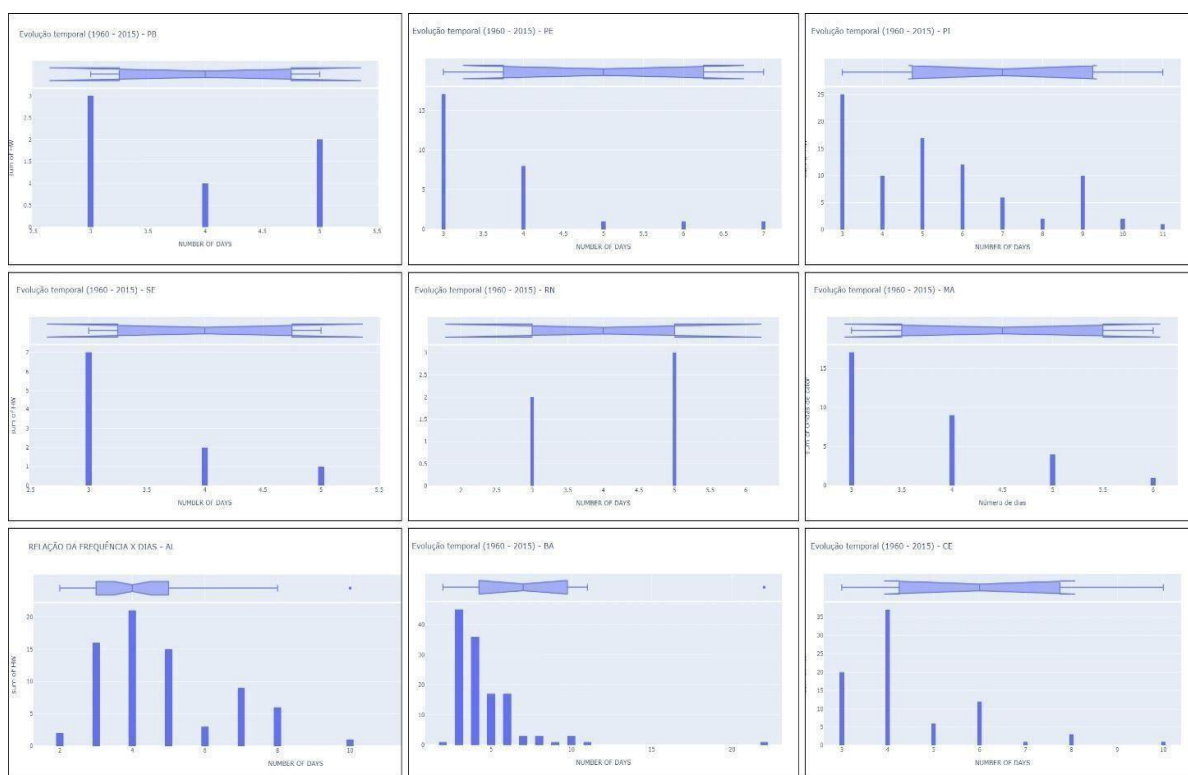
Figura 3 - Frequência anual das ondas de calor para o NEB - CTN90pct



Fonte: elaborado pela autora (2022)

A Figura 4 mostra a relação da duração em dias (total) com o número de ondas de calor (total) registradas em toda série de tempo. Observa-se que os maiores registros de dias ocorreram nos estados da Bahia ultrapassando um período de 20 dias, Piauí apresentando o maior período de 11 dias, Ceará e Alagoas apresentando o máximo de 10 dias e Pernambuco apresentando o máximo de 7 dias. No geral, pode-se observar que grandes quantidades de OC duram cerca de três dias. Quanto maior for a duração em dias, menor será a frequência em termos de quantidades.

Figura 4 - Histograma das durações de todos os eventos de OC registrados para o NEB no período de 1960-2015 - CTX90pct

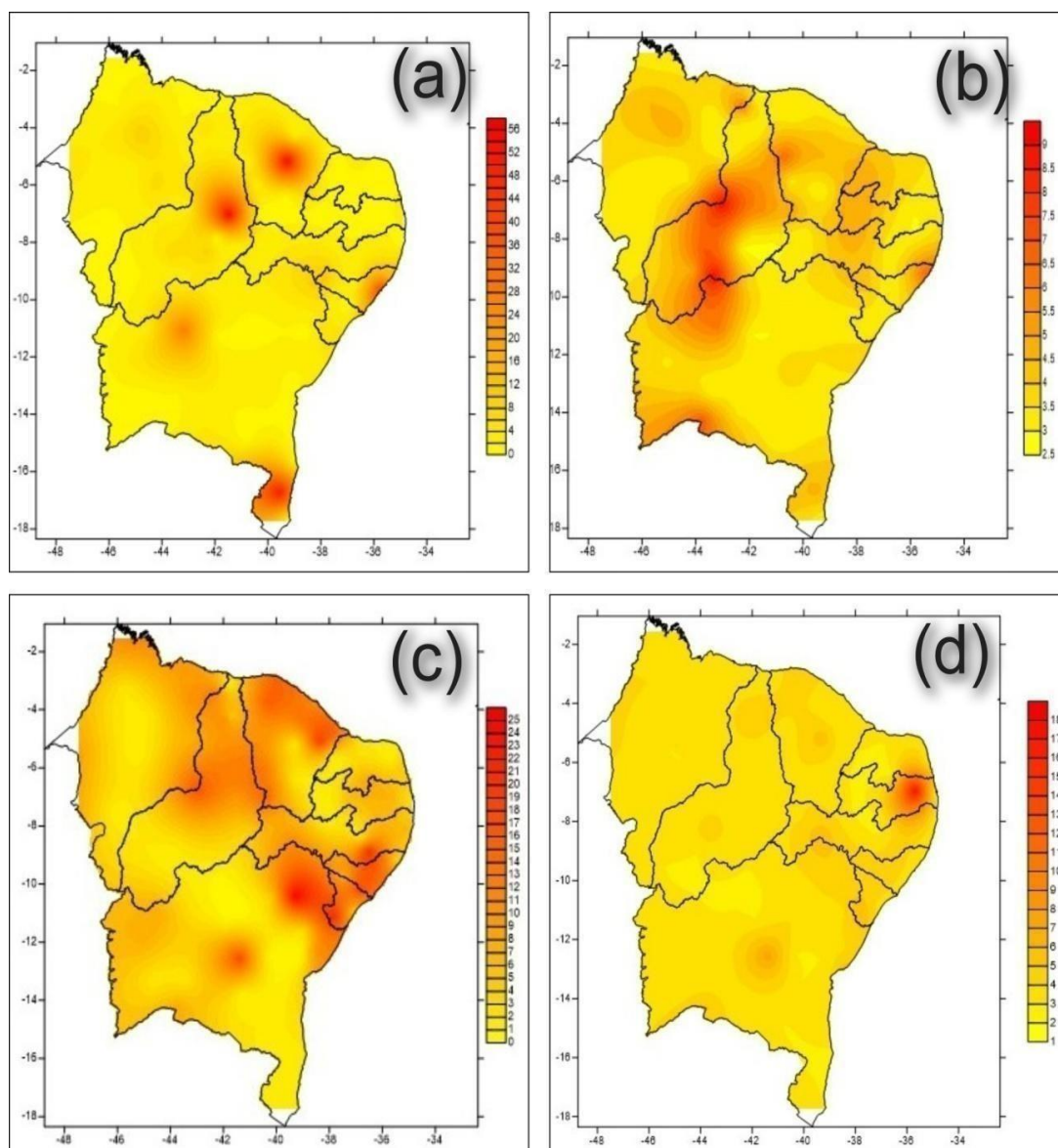


Fonte: elaborado pela autora (2022)

Mapas de composições foram criados a fim de obtermos uma melhor visualização dos dados (Figura 5). A partir da Figura 5 (a), nota-se que as regiões centrais do Ceará e Piauí, oeste e extremo do estado da Bahia, bem como o leste de Alagoas apresentaram maiores intensidades na frequência de OC, com os maiores registros de dias identificados no estado do Piauí e leste da Bahia (fig. 5 (b)). Através desses mapas, foi possível observar também que o número de dias com temperaturas máximas e mínimas se mostram extremamente importantes para entendermos o nível de duração dessas ondas de calor. Nota-se também que para as temperaturas Tmin (fig. 5 (c)) há a frequência de OC intensa nos estados de Alagoas e nordeste e sul da Bahia, seguido pelos estados de Piauí, Ceará, Sergipe e Pernambuco. Quanto a duração (dias) para a Tmin, o estado da Paraíba apresentou maior duração (fig. 5 (d)). Assim, tanto para as temperaturas máximas como para temperaturas mínimas há presença de alta frequência de OC.

A tabela 1 apresenta o somatório ao longo de todo o período analisado (1961-2015) da frequência de OC para CTX90 bem como sua máxima duração ao longo do período. Observa-se que o estado da Bahia apresentou a maior frequência para OC que duraram no mínimo 3 dias, bem como de 4 a 6 dias, já o estado do Piauí foi o que apresentou frequências com durações mais longas, ou seja, maiores que 6 dias. O estado do Rio Grande do Norte apresentou as menores taxas de frequências e duração. O mesmo é apresentado na tabela 2, porém referente ao CTN90, observa-se que o mesmo ocorre para os estados da Bahia apresentando maiores OC de no mínimo 3 dias e maiores OC de 4 a 6 dias, como também o estado do Piauí apresentou a maior duração referente a OC maiores que 6 dias.

Figura 5 - Mapas de composições para CTX 90pct e CTN 90pct: (a) número de OC para Tmax; (b) número de dias (duração) para Tmax; (c) número de OC para Tmin; (d) número de dias (duração) para Tmin;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Tabela 1 - registro de dados para CTX90

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>TOTAL DE OC (MAX DURAÇÃO)</b>	<b>OC DE 3 DIAS</b>	<b>OC DE 4-6 DIAS</b>	<b>OC &gt; 6 DIAS</b>
<b>Bahia</b>	128(22)	46	70	12
<b>Piauí</b>	85 (11)	25	39	21
<b>Ceará</b>	80 (10)	20	55	5
<b>Alagoas</b>	75 (15)	18	39	18
<b>Maranhão</b>	31 (6)	17	14	-
<b>Pernambuco</b>	28 (7)	17	10	1
<b>Sergipe</b>	10 (5)	7	3	-
<b>Paraíba</b>	6 (5)	3	3	-
<b>Rio Grande do Norte</b>	5(5)	2	3	-

Fonte: elaborado pela autora (2022)

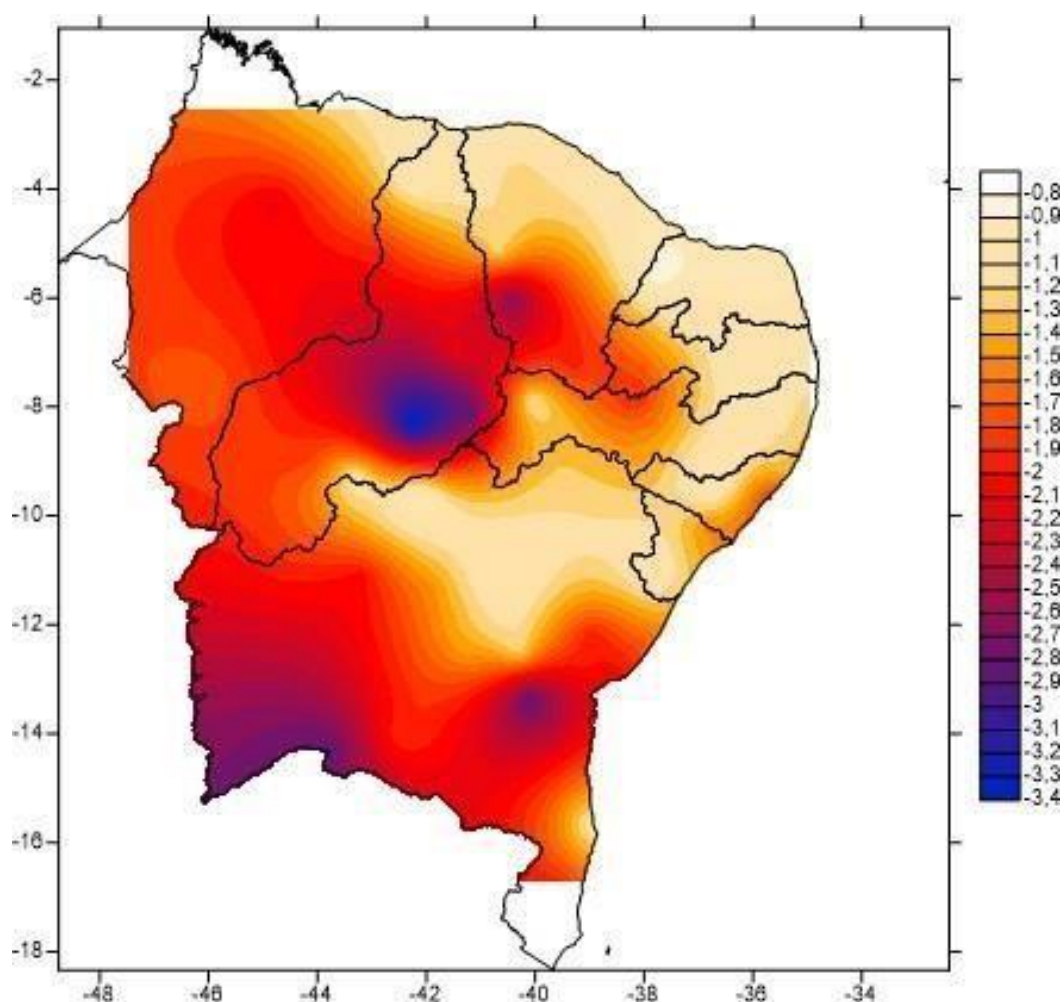
Tabela 2 - registro de dados para CTN90

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>TOTAL DE OC (MAX DURAÇÃO)</b>	<b>OC DE 3 DIAS</b>	<b>OC DE 4-6 DIAS</b>	<b>OC &gt; 6 DIAS</b>
<b>Bahia</b>	146(17)	67	75	4
<b>Piauí</b>	133(19)	62	60	11
<b>Ceará</b>	71 (7)	40	25	6
<b>Alagoas</b>	63 (6)	45	18	-
<b>Maranhão</b>	54 (14)	32	13	9
<b>Pernambuco</b>	44 (17)	16	16	12
<b>Sergipe</b>	24 (6)	14	10	-
<b>Paraíba</b>	19 (28)	13	1	5
<b>Rio Grande do Norte</b>	17	12	4	1

Fonte: elaborado pela autora (2022)

Para a construção do mapa de secas (figura 6), foram analisadas datas que coincidiram eventos de ondas de calor com eventos de seca moderada à seca severa. Observa-se a presença de seca extrema na região central do Piauí em direção a região central do Maranhão, Ceará, leste e oeste da Bahia, com a presença de seca forte nos mesmos estados onde a severidade de seca extrema pode ser observada. Seca moderada no leste de Alagoas, Sergipe e região central do NEB. No norte do Piauí, norte do Ceará, todo o estado do Rio Grande do Norte, região leste e centro de Paraíba, leste de Pernambuco, região central de Alagoas, Bahia e sul de Sergipe, apresentaram seca leve.

Figura 6 - Mapa referente aos índices de níveis de Seca - SPI



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Estudos realizados por Marengo et al. (2016), mostraram que as secas de 2012 à 2015 que afetaram o Nordeste tiveram uma intensidade até então não vista, prejudicando principalmente o setor da agricultura, afetando diretamente a vida de centenas de pessoas, essa seca revelou ser mais intensa no semiárido nordestino, onde coincidentemente ocorreram os maiores registros de ondas de calor, confirmando assim as regiões onde as ondas de calor foram mais intensas, bem como sua duração. Ainda segundo Marengo (2016), esse déficit hídrico que ocorreu de 2012 - 2015 teve um maior acúmulo no norte da Bahia, no oeste de Pernambuco e no leste do Piauí, onde esse quadro ainda se perpetua. O evento em 2015 foi resultante do fenômeno El Niño iniciado em 2012. Assim, os impactos causados para eventos de secas mais intensas quando associados a ondas de calor podem ser ainda mais amplificados.

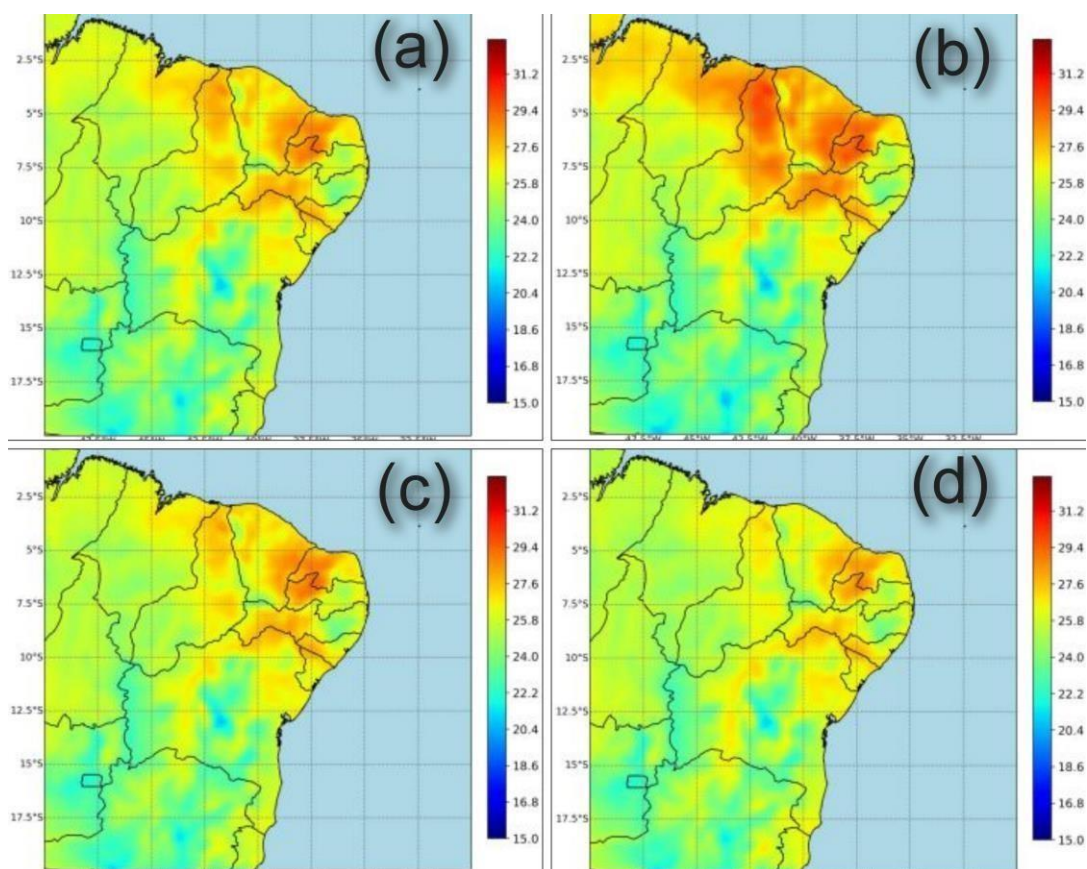
## 4.2 Resultados dos dados de reanálises do ERA5

Com o intuito de caracterizar um cenário das condições dos eventos simultâneos no NEB, foram realizadas composições para as variáveis de temperatura a 2 metros, umidade relativa e componentes do vento com o objetivo de definir e analisar os padrões sinópticos associados aos eventos de seca e ondas de calor, essas composições consistem em médias referentes a valores diários das janelas de tempo, ou seja, as datas nos quais os eventos coincidiram compreendidos entre 1961-2015. As composições de anomalias foram feitas para cada uma das variáveis citadas, onde foram calculadas subtraindo a climatologia média dos valores diários. Assim, é possível analisar as condições atmosféricas para cada variável durante o período desses eventos.

Na Figura 7 temos a climatologia referente à variável da temperatura a 2 metros, onde o mês mais intenso quanto à temperatura foi dezembro, seguido por janeiro. A distribuição espacial da chuva no NEB não é uniforme. Segundo da Silva et al. no semiárido do Nordeste os valores de precipitação, bem como o número de dias com chuva apresentam os menores valores quando é comparado com as demais regiões do litoral e agreste. A variabilidade da precipitação no NEB é maior durante o período seco. Em todo verão (figura 7(a)) as regiões que apresentaram temperaturas mais elevadas foram parte do meio-norte (norte e centro de Piauí e norte de Maranhão) e sertão, seguido pela costa do nordeste com temperaturas variando de 25.8°C a 27.6°C. A região do agreste apresentou temperaturas variando de 24°C a 31.2°C (Alagoas e Rio Grande do Norte). No geral, as regiões que apresentaram temperaturas mais elevadas em todos os meses da figura 7 foram registradas na zona tropical equatorial.



Figura 7 - Climatologia referente a T2m: (a) DJF; (b) dezembro, (c) janeiro; (d) fevereiro;

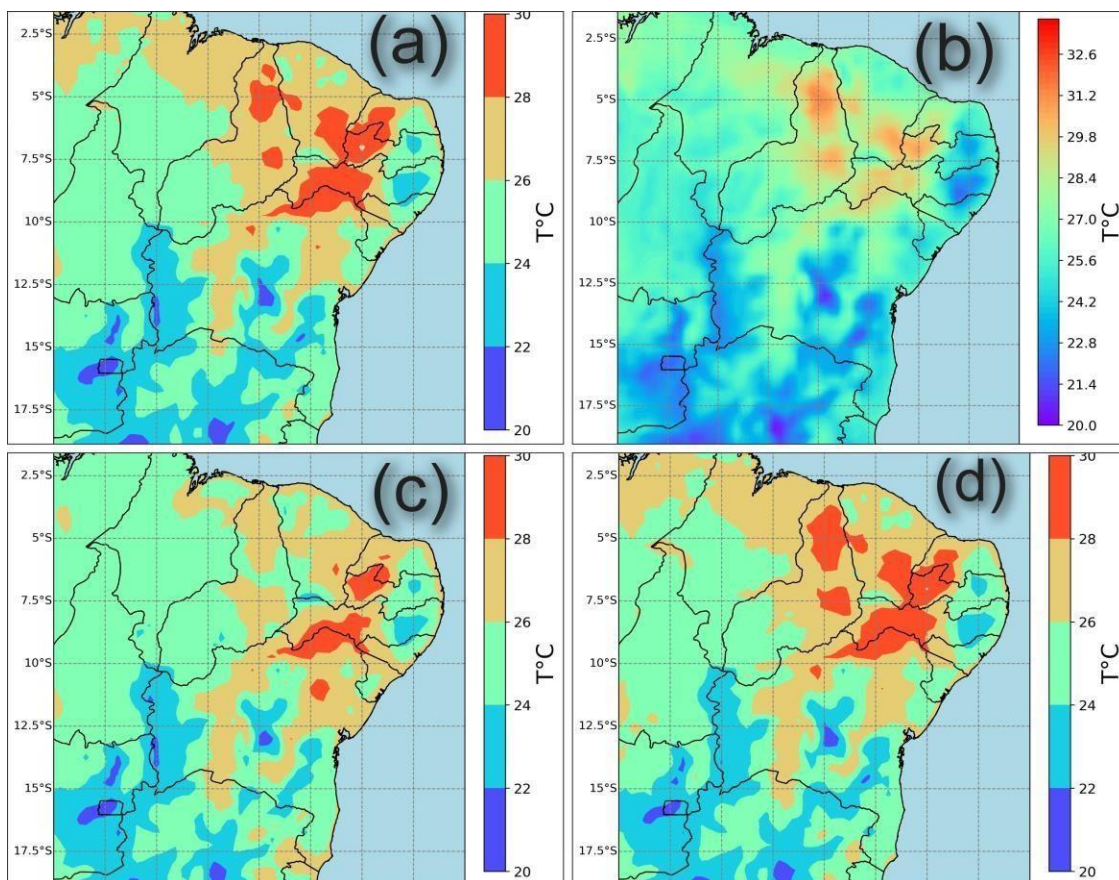


Fonte: elaborado pela autora (2022)

A figura 8 apresenta campos de composições referentes à variável de temperatura a 2 metros de eventos simultâneos de secas e ondas de calor, diferente da climatologia (figura 7) o mês de dezembro foi o menos intenso, com temperaturas mais elevadas no mês de fevereiro. Podemos observar que quase todo polígono das secas representam as temperaturas mais altas em todo verão figura 8 (a) com temperaturas variando de 26°C a 30°C.

Campos de composições para anomalias foram criados a fim de observar padrões para a variável de temperatura a 2 metros (figura 9), de forma geral em todo o verão (figura 9 (a)) Piauí, o sul de Ceará e algumas e parte do Maranhão apresentaram anomalias negativas, enquanto a região da costa e centro do NEB apresentaram anomalias positivas. No mês de janeiro (figura 9 (c)) grande parte do estado do Maranhão, Piauí e região leste da Bahia apresentaram anomalias negativas, o norte do Ceará, bem como grande parte da costa do NEB apresentou anomalia positiva. O mês de fevereiro (figura 9 (d)), os estados do Piauí, Maranhão e região central do NEB apresentaram anomalias negativas e a costa do NEB apresentando anomalias positivas. Já o mês de dezembro (figura 9 (b)) a região da costa do NEB apresentou anomalias negativas com o leste e região central do NEB apresentando anomalias positivas. Observa-se maiores intensidades de anomalias no norte do Piauí.

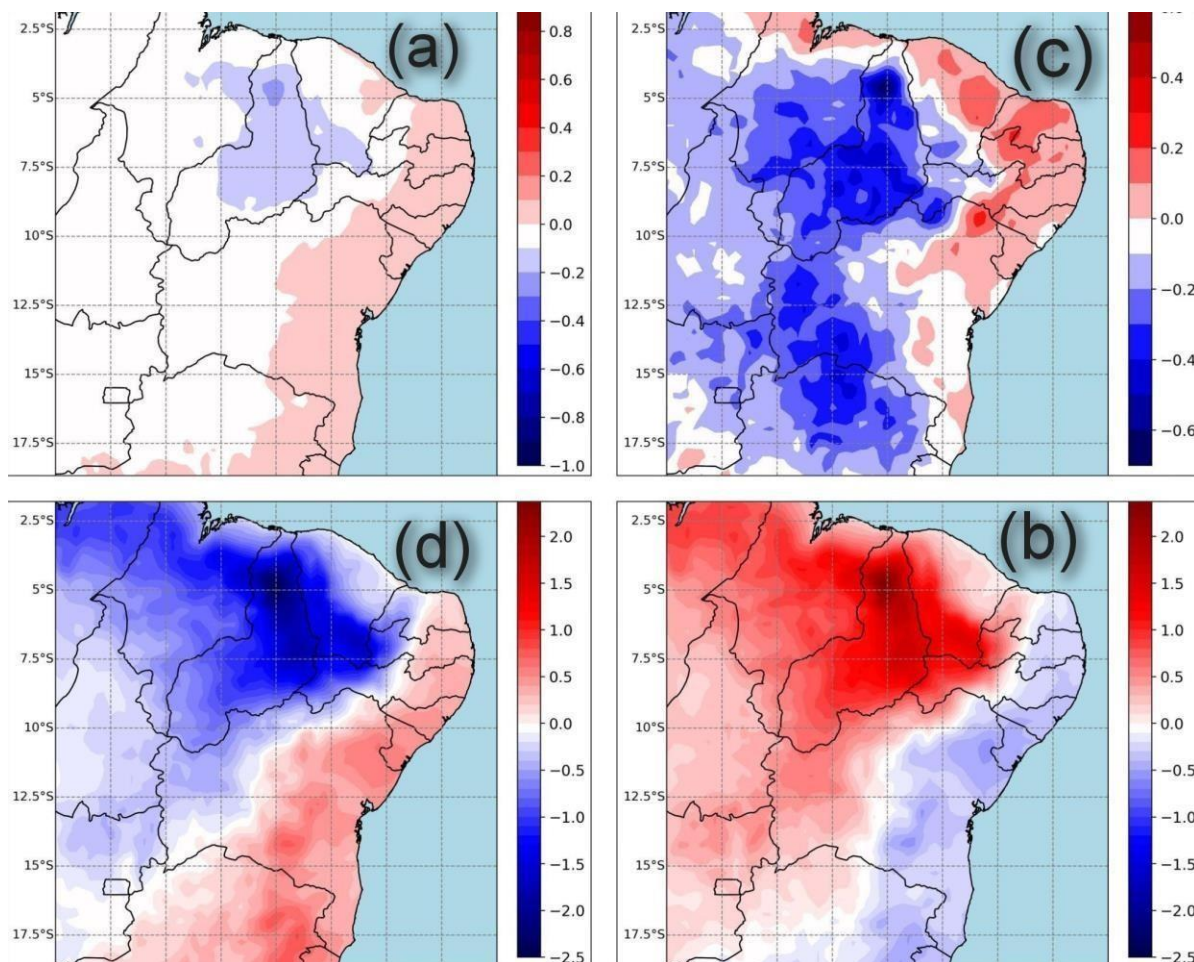
Figura 8 - Campos de composições em níveis únicos para temperatura a 2 metros relativos aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)



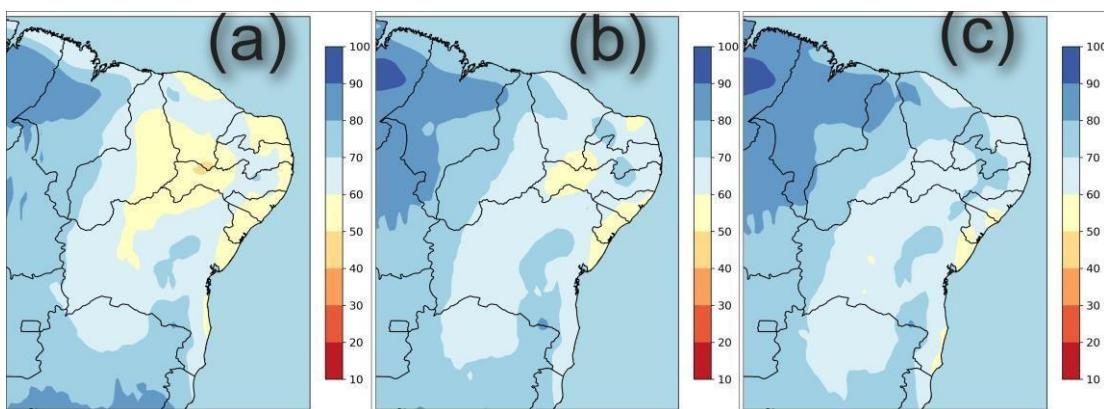
Figura 9 - Campos de composições em níveis únicos para anomalias de temperatura a 2 metros relativos aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

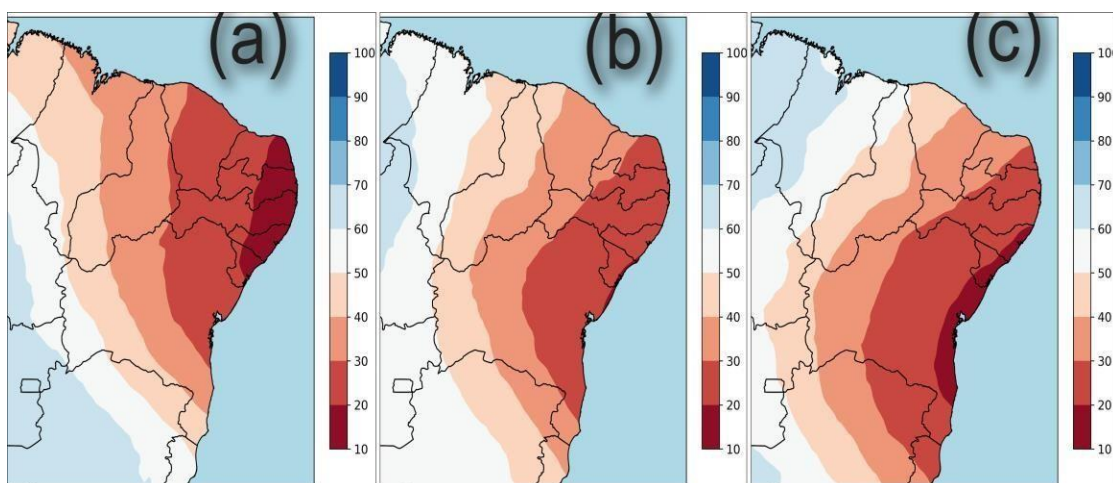
As figuras 10, 11 e 12 mostram os campos de composições de umidade relativa em diferentes níveis. No nível de 850hPa, no mês de dezembro (fig. 11 (a)) a região central, a costa do NEB e o norte do Ceará apresentaram as menores porcentagens de umidade relativa variando de 40% a 60% em comparação com o mês de fevereiro (fig. 11 (c)) onde as taxas de umidade relativa variaram de 60% a 90%. No nível de 500hPa (fig. 11) o mês fevereiro (fig. 11(c)) e o mês de dezembro (fig. 11(a)) não apresentaram grandes diferenças, porém o mês de dezembro apresentou maiores taxas de umidade relativa. No nível de 200hPa (fig. 12) o estado da Bahia apresentou menores taxas de umidade no mês de fevereiro (fig. 12(c)). Com relação à média de todo verão (DJF) nos diferentes níveis de pressão, os níveis de 850hPa e 200hPa apresentaram semelhanças quanto aos percentuais de umidade, pois em ambos predominaram as taxas de 50% - 80%, as menores taxas de umidade foram registradas no semiárido e no tropical litorâneo. As condições atmosféricas da umidade relativa apresentada estão relacionadas a temperaturas máximas.

Figura 10 - Campos de composições de umidade: (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro sob o nível de pressão de 850hPa.



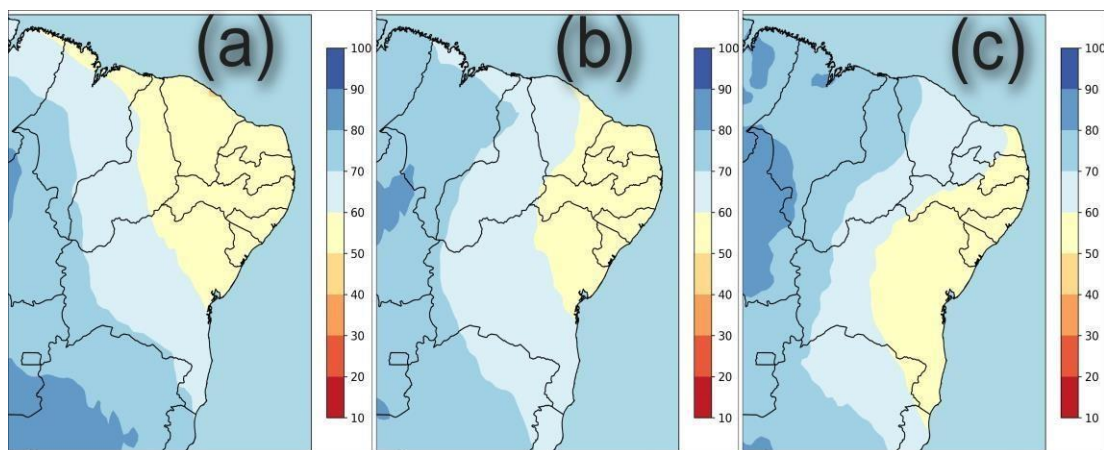
Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 10 - Campos de composições de umidade: (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro sob o nível de 500hPa.



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 12 - Campos de composições de umidade relativa: (a) dezembro, (b) janeiro e (c) fevereiro sob o nível de pressão de 200hPa.



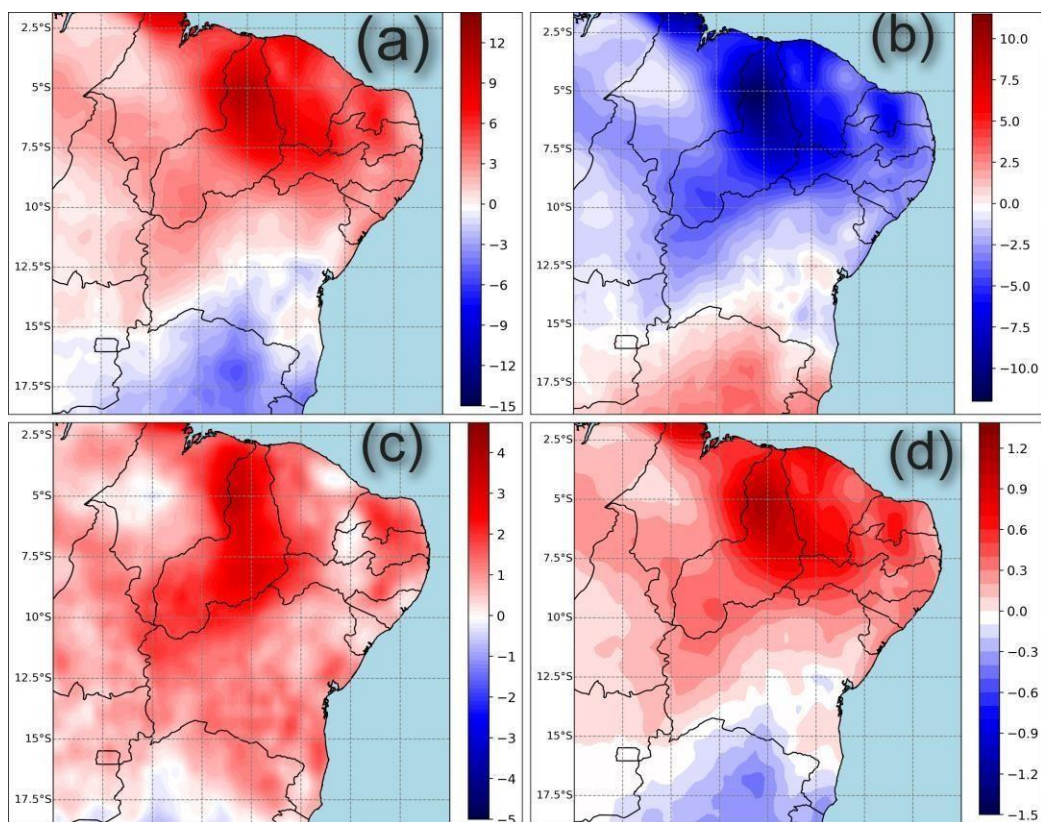
Fonte: elaborado pela autora (2022)



As imagens 13, 14 e 15, apresentam anomalias para a variável de umidade relativa em diferentes níveis, onde os meses de janeiro (fig. 13 (c), 14 (c) e 15 ( c)) e fevereiro (fig. 13(d), 14(d) e 15(d)) apresentaram em sua maior parte anomalias positivas, com o estado do Piauí apresentando maior intensidade positiva. O mês de dezembro (fig. 13(d)) foi marcado por anomalias negativas em quase todo território do NEB (fig. 13 (b)) já nos níveis de 500hPa e 200hPa, o estado da Bahia apresentou anomalias positivas durante os meses de dezembro (fig. 14 (d) e fig. 15 (b)).

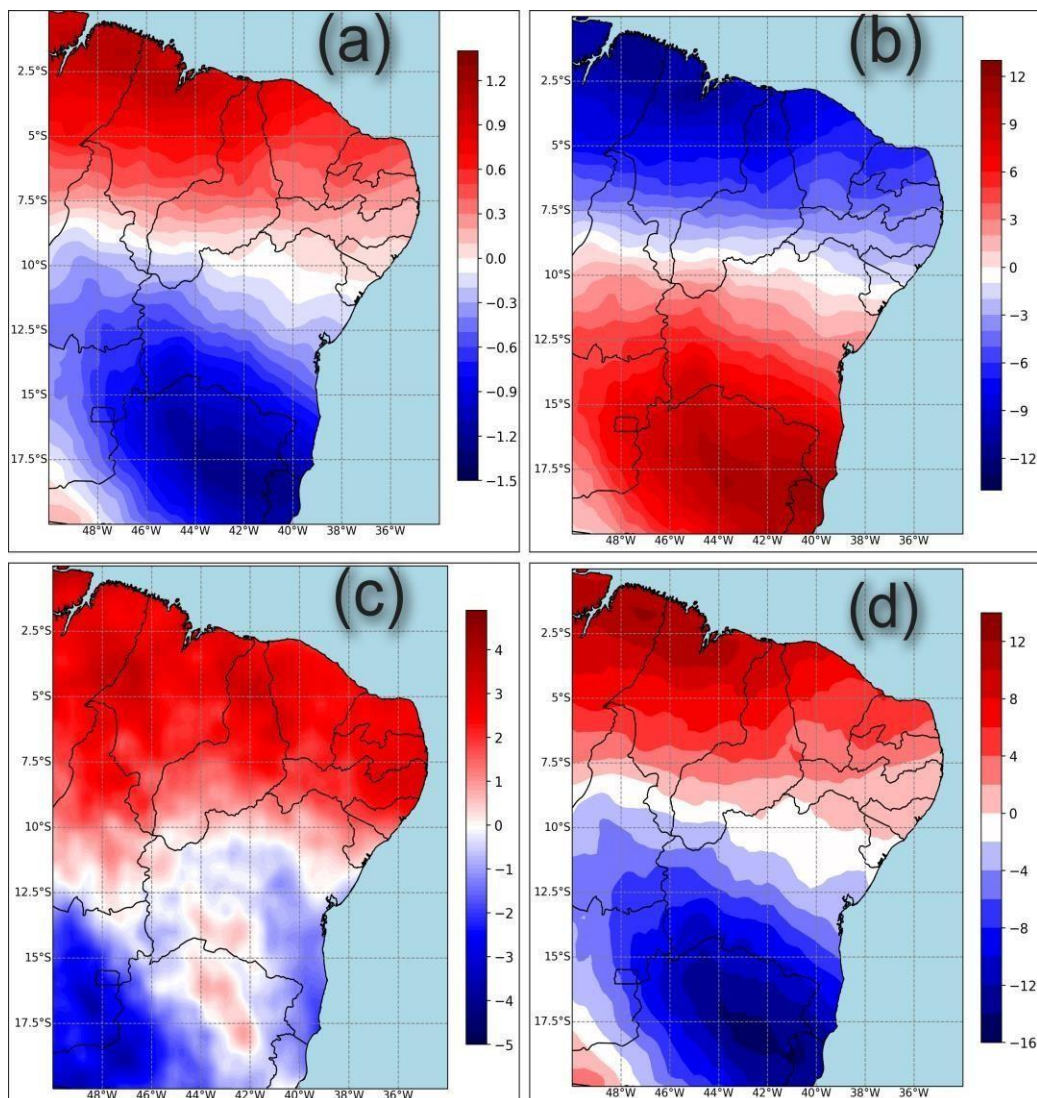
Analisando as médias gerais para todo o verão DJF (fig. 13 (a), 14 (a) e 15 (a)), quase toda extensão do NEB apresentaram anomalias positivas, com o norte do Piauí e Maranhão apresentando maiores intensidades positivas, as anomalias negativas atingiram grande partedo estado da Bahia principalmente nos níveis de 500hPa e 200hPa.

Figura 11 - Campos de composições no nível de 850hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) janeiro; (c) fevereiro; (d) dezembro;



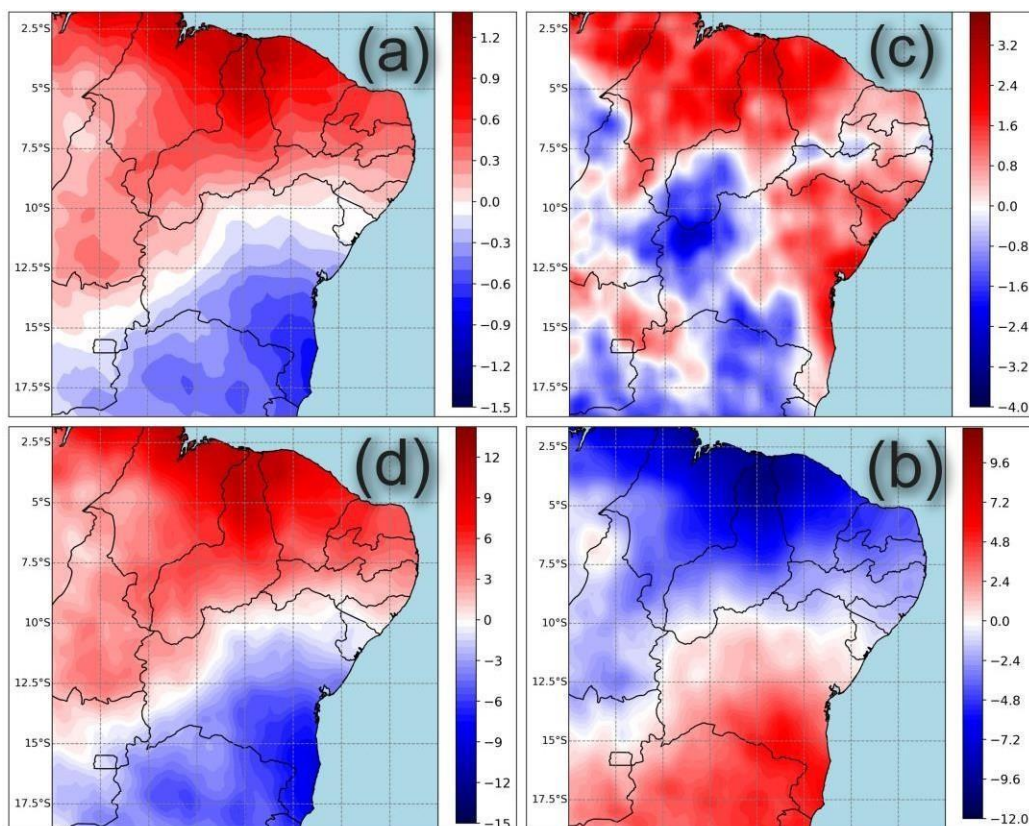
Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 12 - Campos de composições no nível de 500hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) janeiro; (c) fevereiro; (d) dezembro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 13 - Campos de composições no nível de 200hPa, para anomalias de umidade relativa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Com o objetivo de uma melhor análise através de áreas favoráveis que possam ter desencadeados eventos de secas e ondas de calor simultaneamente, foram geradas figuras de divergência e vorticidade em diferentes níveis que nos permitem analisar processos, circulação atmosférica, intensificação ou desintensificação dos sistemas atuantes sobre o nordeste do Brasil. A figura 16 e 17 apresentam circulação anticiclônica, observar-se que no oceano a intensidade do vento é maior que no continente em decorrência da topografia e rugosidade da superfície. Na figura 16, a média ao longo de todo o verão (fig. 16(a)) é bastante similar ao longo dos meses (fig. 16 (b), fig. 16 (c) e fig.16 (d)) quanto à intensidade. O escoamento na figura 17 (a) próximo à costa do NEB tem intensidade positiva e se faz presente em grande parte dos estados do NEB. O Leste da Paraíba e o norte do Piauí apresentaram intensidade negativa durante todo o verão. Nota-se também que no nível de 500hPa (fig. 17) há um escoamento no centro do sertão, que vai de Pernambuco apresentando intensidade negativa até um pouco mais do estado da Bahia aumentando sua intensidade.

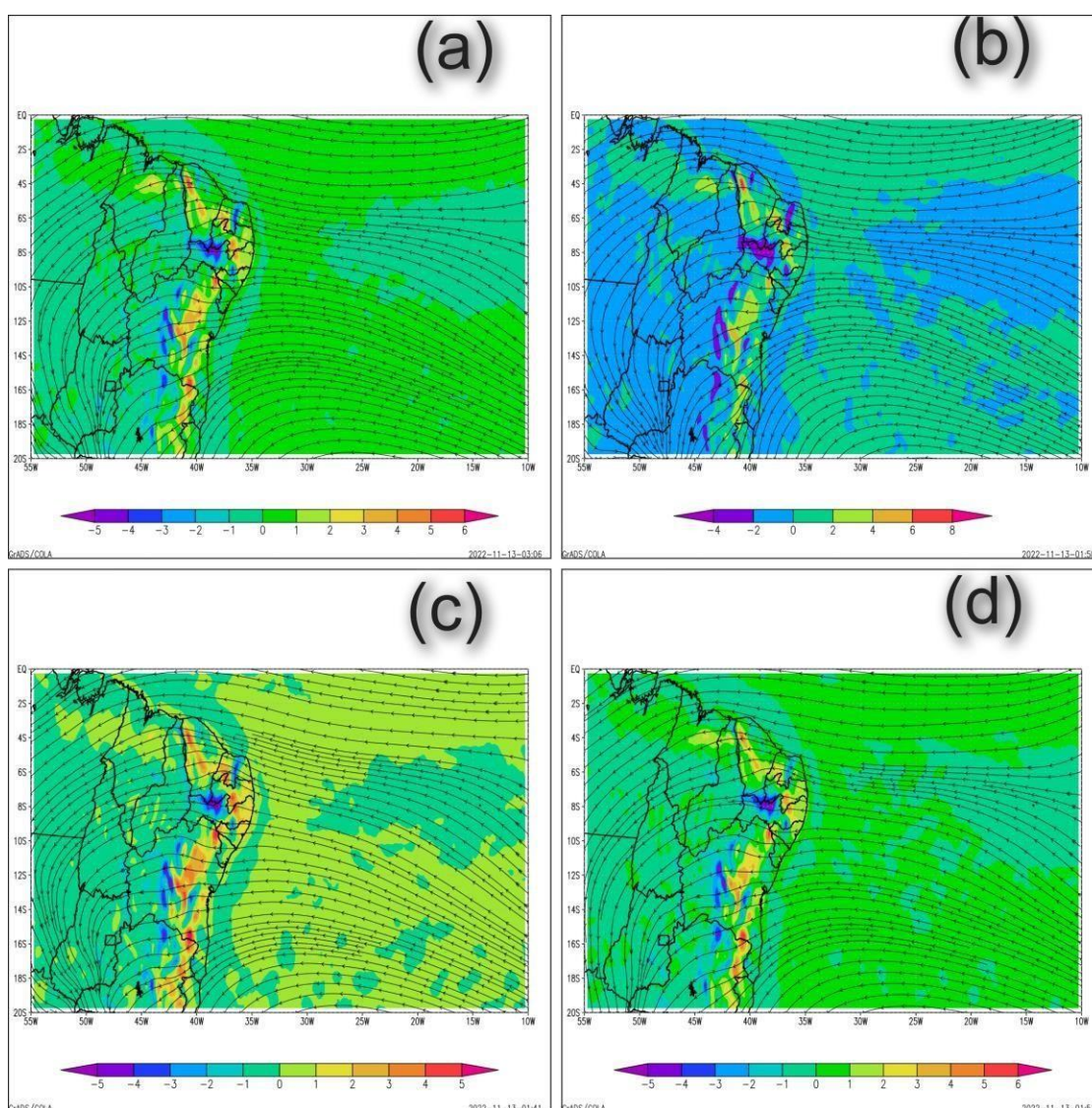
Na figura 18(a) a circulação é ciclônica. O mês de janeiro (fig. 18 (c)) se aproximou da média ao longo de todo o verão (fig. 18 (a)), com o norte do Piauí e Maranhão



apresentando intensidade positiva em todos os meses. No mês de dezembro, a direção do cavado vai em direção ao leste do nordeste (fig. 18(b)) chegando com intensidade negativa.

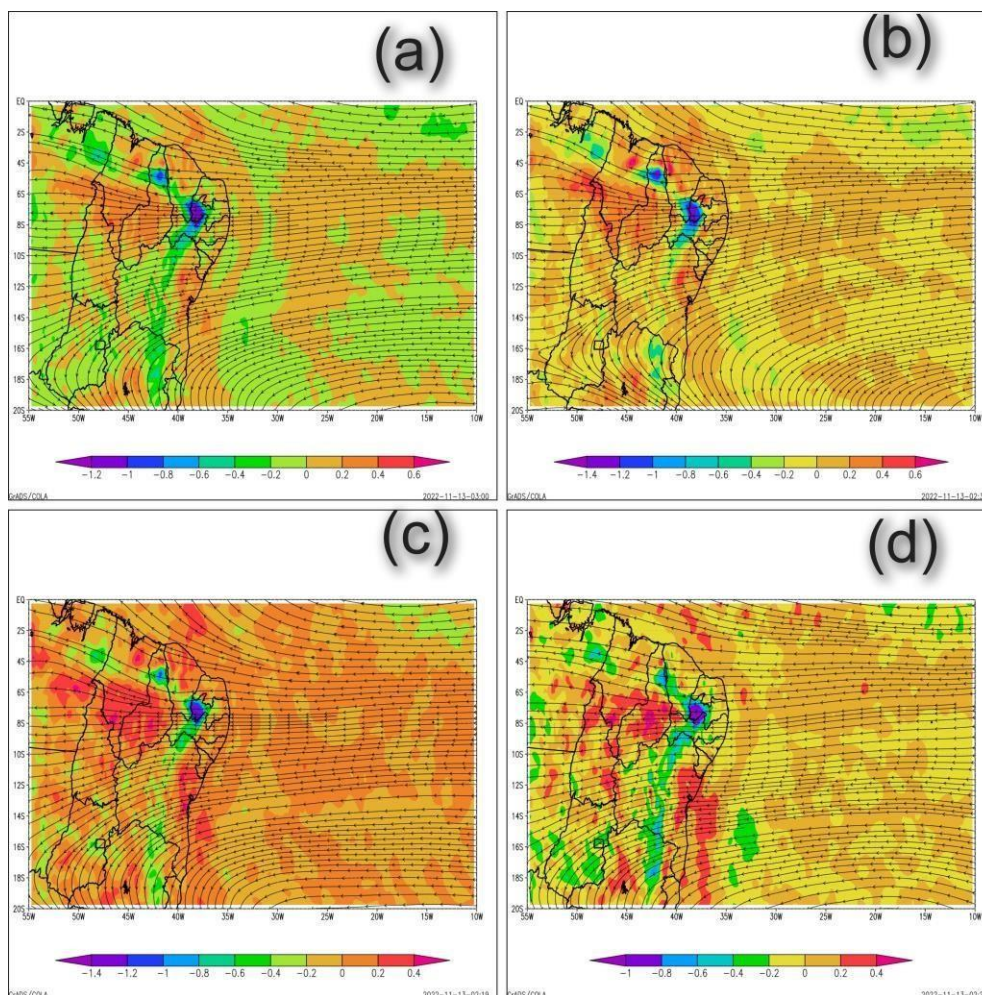
No nível de 850hPa (fig. 19), ao longo dos meses na maior parte do território do NEB a vorticidade se mantém próximo a neutralidade. No norte do NEB, no sul do Rio Grande do Norte (próximo a região de Caiocó) e algumas regiões de Pernambuco e Bahia a vorticidade é positiva. No estado de Alagoas, Sergipe, sertão de Pernambuco, leste do Maranhão, região central do Piauí, regiões da costa e sul da Bahia a vorticidade é predominantemente negativa, com maior intensificação no sul da Bahia e região central de Pernambuco.

Figura 14 - Campos de composições de divergência do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

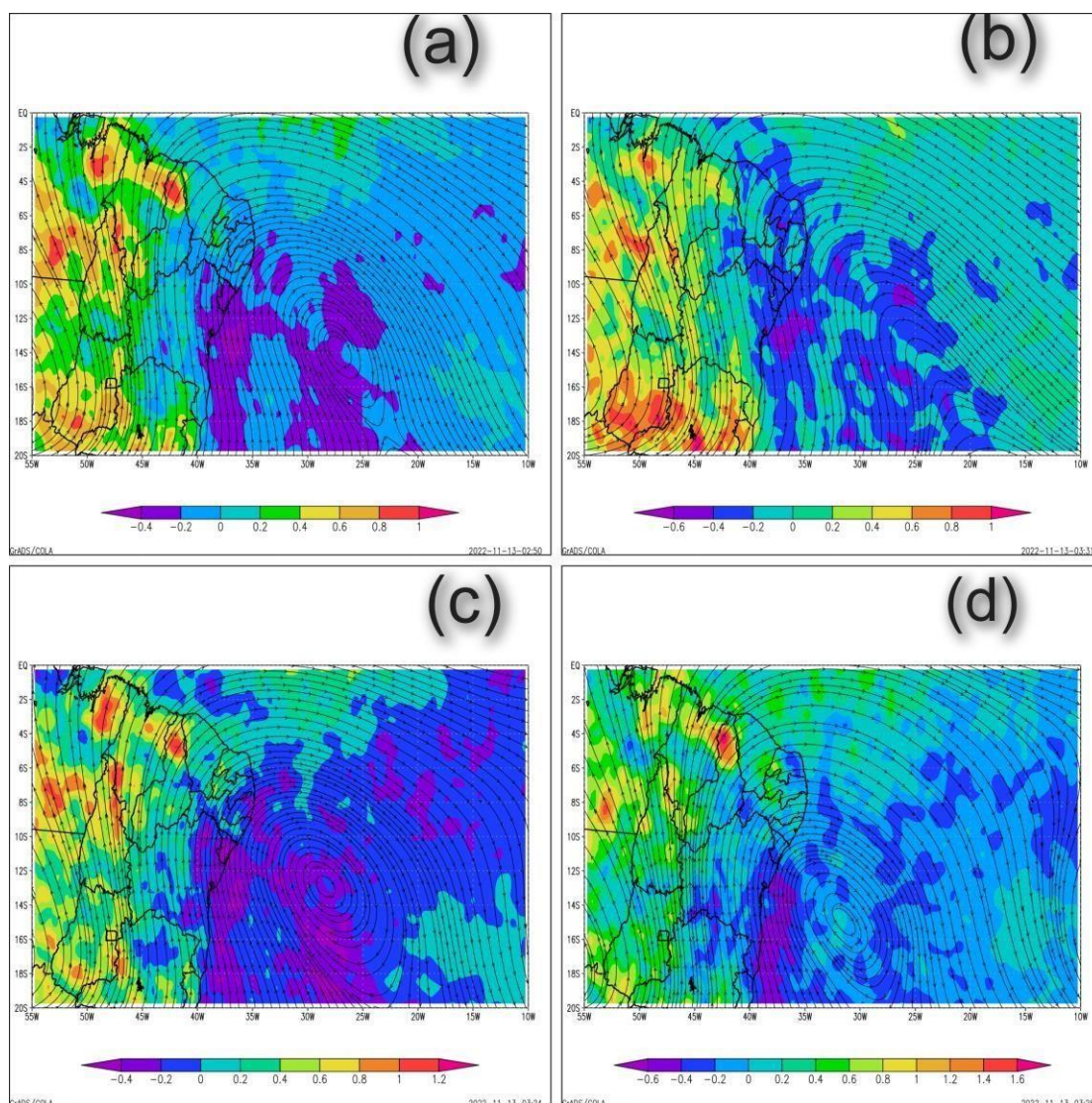
Figura 15 - Campos de composições de divergência no nível de 500hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)



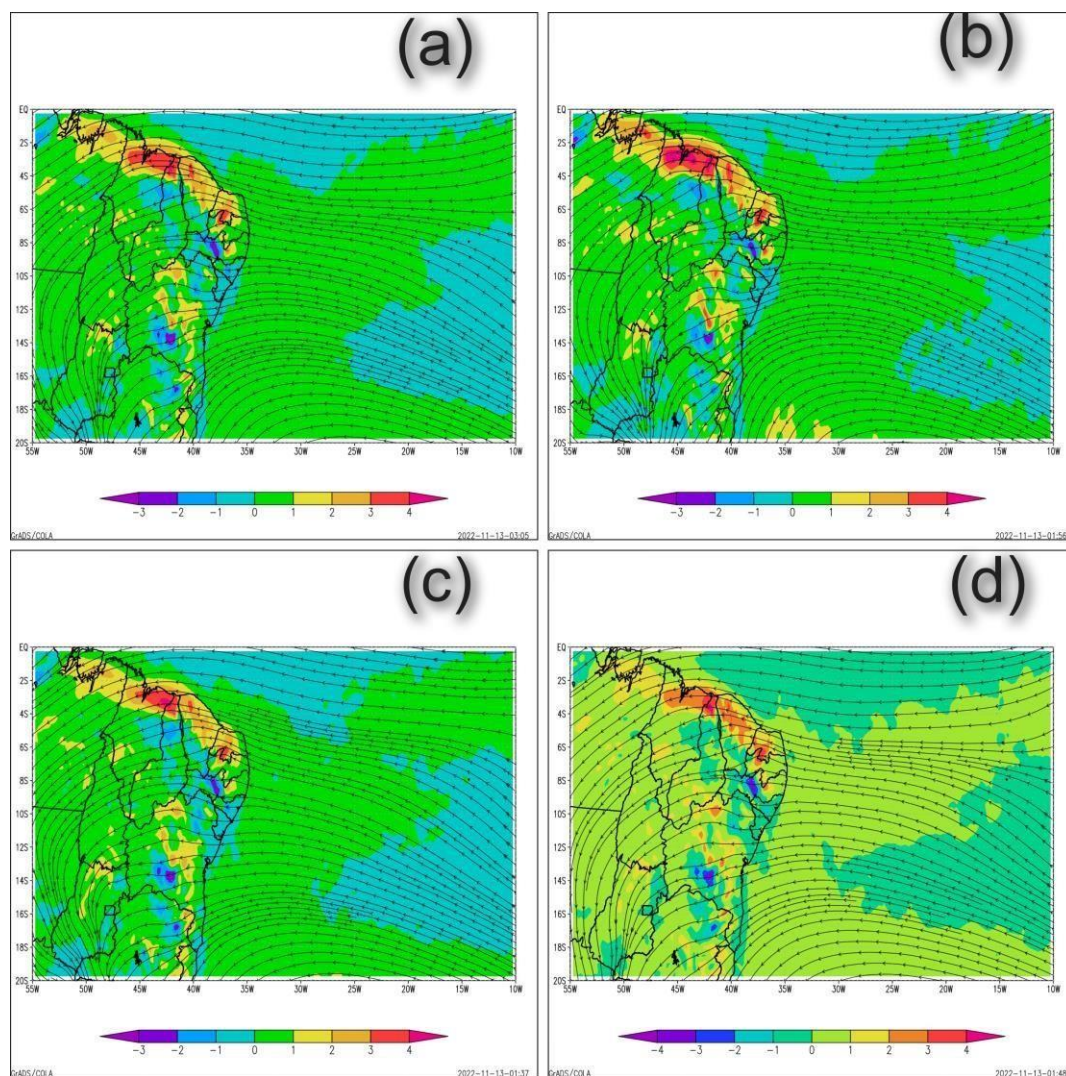
Figura 16 - Campos de composições de divergência no nível de 200hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)



Figura 17 - Campos de composições de vorticidade para as componentes do vento no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) média geral sobre os meses de DJF; (b) dezembro; (c) janeiro; (d) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

O próximo campo a ser observado será a anomalia para as componentes do vento em diferentes níveis que através do comportamento das suas características modulará as circulações atmosféricas sobre o NEB.

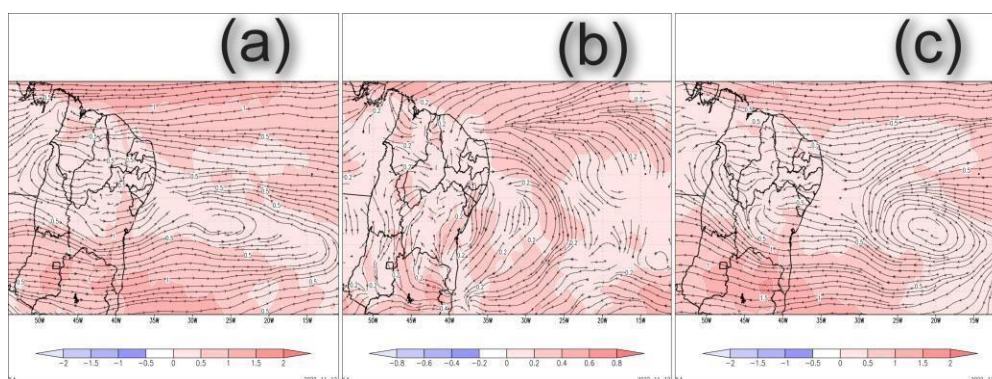
Ao longo de todo o verão em todos os níveis apresentados a anomalia se revelou positiva. No mês de fevereiro (fig. 20 (b)) a circulação é ciclônica e a maior intensidade de anomalia foi registrada no sul da Bahia. De forma geral, os padrões de intensidades para o verão no nível de 850hPa foram semelhantes.

No nível de 500 hPa (fig. 21), o mês de janeiro (fig. 21 (a)) apresentou um ciclone vindo do oceano e chegando no leste do NEB, com anomalias positivas, porém próximo da neutralidade. Ainda no mês de janeiro, o estado da Bahia apresentou uma circulação anticiclônica. O mês de fevereiro (fig. 21 (b)) apresentou circulação anticiclônica no sul da

Bahia e as regiões que apresentaram maiores intensidades foram o norte do Maranhão e sul da Bahia. No mês de dezembro (fig. 21 (c)) parte do estado da Bahia apresentou a maior intensidade de anomalia. Em geral, as regiões norte, leste e oeste do NEB apresentaram menores intensidades de anomalia, todas positivas.

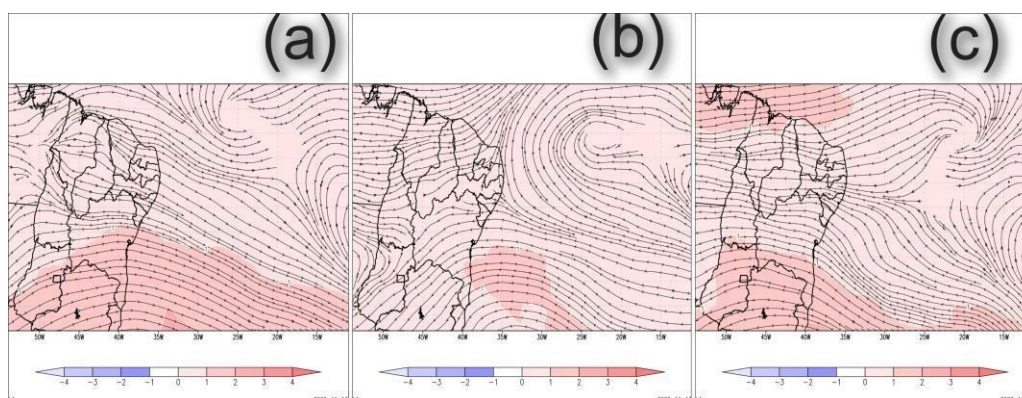
Em altos níveis a intensidade em 200hPa (fig. 22) comparada com os níveis de 850hPa e 500hPa foi mais intensa, principalmente no mês de fevereiro (fig. 22 (b)) no estado de Alagoas e Sergipe seguido por Pernambuco e Paraíba. Ainda no mês de fevereiro podemos identificar a confluência dos ventos no Atlântico que se estende até o continente passando pelo nordeste brasileiro. O mês de janeiro apresenta uma circulação ciclônica, onde a menor intensidade ocorreu nos estados da Bahia, Alagoas e Sergipe. E no mês de dezembro (fig. 22 (c)) apesar de termos a circulação anticiclônica no oceano em direção ao NEB, há um ciclone sobre o NEB com o centro no sul do estado da Bahia.

Figura 18 -Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 850hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;



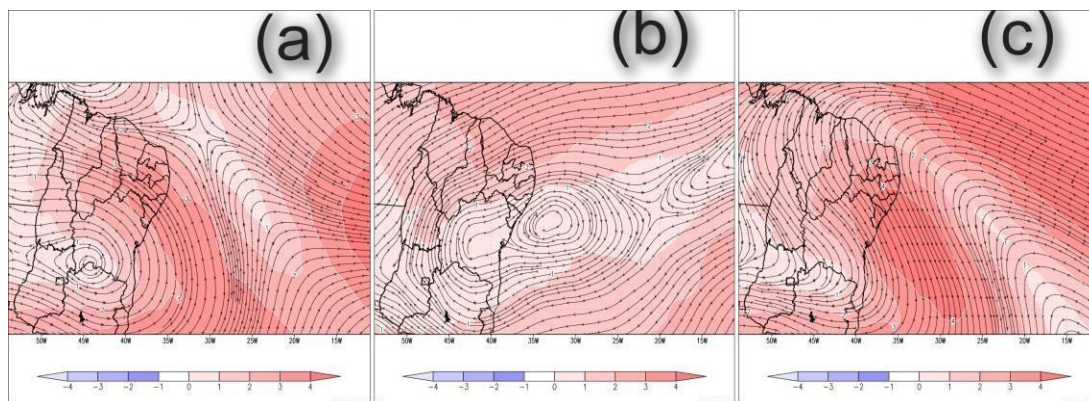
Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 19 - Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 500hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)

Figura 20 - Campos de composições de anomalias para as componentes do vento no nível de 200hPa referente aos episódios intensos de onda de calor e seca registrados para o verão: (a) dezembro; (b) janeiro; (c) fevereiro;



Fonte: elaborado pela autora (2022)



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo dos resultados analisados o presente estudo, procurou mostrar as características climáticas e sinóticas de ondas de calor e secas para o verão do NEB. Analisando simultaneamente os eventos de calor e seca observou-se que o nível de seca extrema afetou significativamente os estados do Piauí, Bahia e Ceará. Vale ressaltar que a seca extrema e a seca de nível forte atingiram também a região do estado do Maranhão. Outro fator importante é que os estados do Piauí, Bahia e Ceará apresentaram maior número de frequência (CTX90pct) de ondas de calor ao longo de todo o período analisado, sendo a maior duração observada nos estados da Bahia (maior que 40 dias), Ceará (maior que 35 dias) e Piauí (maior que 25 dias). Com relação as análises para CTN90pct os mesmos estados também apresentaram o maior número de frequência. No ano de 2015 é possível observar que para o CTX90, as maiores frequências também foram registradas nos estados da Bahia, Ceará e Piauí, ainda em 2015, os maiores registros para o CTN90 foram encontrados nos estados do Piauí e Bahia.

As imagens que correspondem aos resultados sinóticos mostram que o mês de fevereiro do período analisado (1961 – 2015) apresentou o mês mais intenso quanto às variáveis mencionadas nesta pesquisa, apresentando anomalia positiva em quase todo território do NEB, e com grande disponibilidade de umidade no referido mês. Em baixos níveis o mês de dezembro a umidade relativa teve a predominância de uma massa de ar seca que se concentrou no centro e na zona da mata, ainda sobre o mês de dezembro ele apresentou temperaturas mais baixas comparado com os meses de janeiro e fevereiro e anomalia negativa em grande parte do NEB em baixos, médios e altos níveis.

Os resultados para divergência e vorticidade em baixos níveis indicam a presença de circulação anticiclônica com áreas apresentando centros de alta pressão. onde a análise simultânea desses eventos mostrou que os estados da Bahia, Ceará e Piauí apresentaram as maiores frequências de ondas de calor, principalmente no ano de 2015, bem como seca de nível extremo. Foram encontrados padrões meteorológicos semelhantes em diferentes variáveis nos níveis de 850, 500 e 200hPa.

## REFERÊNCIA

AGHAKOUCHAK, A., Cheng, L., Mazdiasni, O., Farahmand, A., 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: insights from the 2014 California drought. *Geophys. Res. Lett.* 41 (24), 8847–8852. <https://doi.org/10.1002/2014gl062308>.

ALEXANDER, Lisa Victoria et al. Mudanças globais observadas nos extremos climáticos diários de temperatura e precipitação. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D5, 2006.

ANDRADE, K. M. Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE -14056-DI/1067, 2007.

ASSIS, J.M.O.; Souza, W.M.; Sobral, M.C.M. Climate analysis of the rainfall in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, v. 2, p. 188-202, 2015.

Ault, TR (2020). Sobre os fundamentos da seca em um clima em mudança. *Ciência*, 368(6489), 256–260. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABC4034> Berg, P., Moseley, C., & Haerter, JO (2013).

Forte aumento na precipitação convectiva em resposta a temperaturas mais altas. *Geociência da Natureza*, 6(3), 181–185. <https://doi.org/10.1038/ngeo1731> austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Clim. Dyn.* 46, 3737– 3752, 2015.

BECKER, Sarah; Sparks, Paul. “It never rains in California”: constructions of drought as a natural and social phenomenon. *Weather And Climate Extremes*, [S.L.], v. 29, p. 100257, set. 2020. <Http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2020.100257>. Disponível em: 10.1016/j.wace.2020.100257. Acesso em: 06 maio 2021.

BITENCOURT, Daniel P.; FUENTES, Márcia V.; FRANKE, Alberto E.; SILVEIRA, Rafael B.; ALVES, Maikon P. A.. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 2464-2478, 12 nov. 2019. <Http://dx.doi.org/10.1002/joc.6345>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.6345>. Acesso em: 07 maio 2021.

BITENCOURT, Daniel Pires, et al. "Impactos da mudança climática no estresse por calor no Brasil - implicações passadas, presentes e futuras para a exposição ocupacional ao calor." *International Journal of Climatology* 41 (2021): E2741-E2756.

BLACK, E., BLACKBURN, M., HARRISON, G., HOSKINS, B., METHVEN, J. Factors

contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather* 59(8): 217–223, 2004.

BRIENEN, RJ, Phillips, OL, Feldpausch, TR, Gloor, E., Baker, TR, Lloyd, J., ... & Zagt, RJ (2015). Declínio a longo prazo do sumidouro de carbono da Amazônia. *Nature*, 519 (7543), 344-348.

BRIFFA, K. R.; SHEFFIELD, J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 1, p. 17 – 22, 2014.

BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 517–529, 2018.

BUEHLER, T., RAIBLE, C. C., STOCKER, T. F. The relationship of winter season North Atlantic blocking frequencies to extreme cold or dry spells in the ERA-40. *Tellus*, 63A, 212– 222, 2011.

CANAMARY, Erica Acioli. Avaliação de índices para fins de monitoramento e previsão de secas no nordeste setentrional. 2015.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, v. 15, p. 2377-2394, 2002a. 44 CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.;

LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. *J. Climate*, 17, p. 88- 108, 2004.

CHAN, E. Y. Y.; HO, J. Y.; HUNG, H. H. Y.; LIU, S.; LAM, H. C. Y. Health impact of climate Change in cities of middle-income countries: the case of China. *British Medical Bulletin*, v. 130, p.5– 24, 2019.

CIAVARELLA, A., COTTERILL, D., STOTT, P., KEW, S., PHILIP, S., OLDENBORGH, G. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4), 1760-1776, 2017.

COELHO, C. A. S. DE OLIVEIRA, C. P., AMBRIZZI, T. et al. The 2014 southeast Brazil COSTA, J. A. 2015. Distribuição Espaço-Temporal do Índice de Anomalia de Chuva Para o estado do Ceará. Universidade Federal do Cariri, Crato.

COSTA, N. V. Impacto dos Bloqueios Atmosféricos no Oceano Atlântico Sul Sudoeste. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2018.

COUTINHO, M. D. L. ; Gan, M. A.; Rao, V. B., 2010. Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região Tropical Sul: validação. *Brasileira de Meteorologia*, 25, 311-323. Cowan, T., Purich, A., Perkins, S., Pezza, A., Boschat, G., & Sadler, K. (2014). More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century. *Journal of Climate*, 27(15), 5851–5871. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00092.1>

Dai, A. (2013). Seca sob o aquecimento global: uma revisão. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Mudanças Climáticas*, 2(1), 45–65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>

DOLE, R., HOERLING, M., PERLWITZ, J., EISCHEID, J., PEGION, P., ZHANG, T., FISCHER E.M, Knutti R. 2014. Detection of spatially aggregated changes in temperature and precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.* 41: 547–554, doi: 10.1002/2013GL058499.

FISCHER E.M, Schar C. 2010. Consistent geographical patterns of changes in “ high-impact European heatwaves. *Nat. Geosci.* 3: 398–403.

FISCHER E.M, Seneviratne SI, Vidale PL, Luthi D, Schar C. 2007. Soil “ moisture– atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *J. Clim.* 20: 5081– 5099.

FISCHER, Erich M.; KNUTTI, Reto. Contribuição antropogênica para a ocorrência global de extremos de precipitação pesada e alta temperatura. *Mudanças climáticas da natureza* , v. 5, n. 6, pág. 560-564, 2015.

FRIEDMAN, Jacinto Buenfil (Ed.). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México*. Instituto Nacional de Ecología, 2009.

Funk, C., Harrison, L., Alexander, L., Peterson, P., Behrangi, A., & Husak, G. (2019). Exploring trends in wet-season precipitation and drought indices in wet, humid and dry regions. *Environmental Research Letters*.

FUNK, Chris; SHUKLA, Shraddhanand. Drought early warning—definitions, challenges, an opportunities. *Drought Early Warning And Forecasting*, [S.L.], p. 23-42, 2020.  
[Http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814011-6.00002-6](http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814011-6.00002-6). Disponível em:  
<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814011-6.00002-6>. Acesso em: 07 maio 2021.

GARCÍA-HERRERA, R., DÍAZ, J., TRIGO, R. M., LUTERBACHER, J., FISCHER, E. M. A GEIRINHAS, J. L. M. Caracterização Climática e Sinóptica das Ondas de Calor no Brasil. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas) - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2016.

GEIRINHAS, J. L., TRIGO, R. M., LIBONATI, R., COELHO, C. A. S., PALMEIRA, A. C.

GEIRINHAS, João L.; TRIGO, Ricardo M.; LIBONATI, Renata; COELHO, Caio A. S.; GLOOR M, Brien RJW, Galbraith D, Feldpausch TR, Schöngart J, Guyot JL, Espinoza JC, Lloyd J and Phillips OL. 2013. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40, 1–5, DOI:10.1002/grl.50377.

GOMES, H. B. et al. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, v. 53, n. 3-4, p. 1393-1411, 2019.

GOMES, H. B. et al. Easterly wave disturbances over Northeast Brazil: an observational analysis. *Advances in Meteorology*, v. 2015, 2015.

Griffin, D., Anchukaitis, K., 2014. How unusual is the 2012-2014 California drought?

*Geophys. Res. Lett.* 41 (24), 9017–9023. <https://doi.org/10.1002/2014gl062433>. Klein, N., 2014. *This Changes Everything: Capitalism vs. The Climate*. Simon & Schuster, New York.

HAO, Zengchao; SINGH, Vijay P. Caracterização da seca a partir de uma perspectiva multivariada: uma revisão. *Journal of Hydrology*, v. 527, p. 668-678, 2015. HARLAN, S.L.; BRAZEL, A.J.; PRASHAD, L.; STEFANOV, W.L.; LARSEN, L. Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, v. 63, n. 11, p. 2847-2863, 2006.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 103, n. 435, p. 77-92, 1977.

HASTENRATH, Stefan. Interannual variability and annual cycle: Mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. *Monthly Weather Review*, v. 112, n. 6, p. 1097- 1107, 1984.

HASTENRATH, Stefan. Previsão de anomalias pluviométricas no Nordeste do Brasil. *Revista do*



Clima, v. 3, n. 8, pág. 893-904, 1990.

J. V., SKÅLEVÅG, A., LORENZ, P., ROBIN, Y., OTTO, F., HAUSER, M., SENEVIRATNE, KARABELL, Zachary; CRAMER, Aron. Excelência sustentável: o futuro dos negócios em um mundo em rápida mudança . Rodale Books, 2010.

KEYANTASH, J. e Dracup, JA (2002) A Quantificação da Seca: Uma Avaliação dos Índices de Seca. Boletim da American Meteorological Society, 83, 1167.

King, A. D., Donat, M. G., Lewis, S. C., Henley, B. J., Mitchell, D. M., Stott, P. A., et al. (2018). Reduced heat exposure by limiting global warming to 1.5°C. *Nature Climate Change*, 8, 549–551. <https://doi.org/10.1038/s41558-0>

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 813-835, 1992.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Rev. Bras. Meteo.*, 3, 217-231, 1984.

LE, Phong V. V.; PHAN-VAN, Tan; MAI, Khiem V.; TRAN, Duc Q.. Space–time variability of drought over Vietnam. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 39, n. 14, p. 5437-5451, 18 jun. 2019. [Http://dx.doi.org/10.1002/joc.6164](http://dx.doi.org/10.1002/joc.6164).

MACEDO, M. J. H.; BRAGA, C. C.; DANTAS, F. R. C.; SILVA, E. D. V. Variabilidade espacial e da pluviometria no Estado do Piauí. 3º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, anais... Canela: Sociedade Brasileira de Meteorologia, outubro, 2009.

MACEDO, Maria José Herculano et al. Análise do índice padronizado de precipitação (SPI) na caracterização das secas do semiárido brasileiro. 2010.

Magalhães, AR, & Glantz, MH (1992). Impactos socioeconômicos das variações climáticas e respostas políticas no Brasil.

MARENGO, Jose A.; CAMARGO, Claudia C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 28, n. 7, p. 893-904, 2008.

MARENGO, José Antonio; ESPINOZA, Jhan Carlo. Secas sazonais extremas e inundações na Amazônia: causas, tendências e impactos. *Revista Internacional de Climatologia*, v. 36, n. 3, pág. 1033-1050, 2016.

MCKEE, Thomas B. et al. A relação da frequência e duração da seca com as escalas de tempo. In: *Anais da 8ª Conferência de Climatologia Aplicada*. 1993. pág. 179-183.

MEEHL, G. A., TEBALDI, C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305(5686): 994–997, 2004.

MISHRA, AK e Singh, VP (2010) Uma Revisão de Conceitos de Seca. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>

Mishra, V., Mukherjee, S., Kumar, R., & Stone, D. A. (2017). Heat wave exposure in India in current, 1.5°C, and 2°C worlds. *Environmental Research Letters*, 12(12), 1–9.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9388>

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the atmospheric sciences*, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.

MUANZA, Gomes Antonio et al. Padrões de circulação atmosféricos associados à ligação da extremidade frontal com a ZCIT. 2018.

Mueller, B., Seneviratne, S.I., 2012. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109 (31), 12398–12403. <https://doi.org/10.1073/pnas.1204330109>.

Mukherjee, S., & Mishra, AK (2021). Aumento de secas e ondas de calor em um mundo em aquecimento. *Cartas de Pesquisa Geofísica*, 48(1). <https://doi.org/10.1029/2020GL090617>

Mukherjee, S., & Mishra, V. (2018). A sixfold rise in concurrent day and night-time heatwaves in India under 2°C warming. *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35348-w>

NEVES, G. Z. F. Distribuição geográfica das chuvas no Estado de Goiás e Distrito Federal: Dinâmica e aplicações nos estudos rítmicos. 2018. 215 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of climate*, v. 9, n. 10, p. 2464-2479, 1996.

NOGUEIRA, P. J.; NUNES, A. R.; NUNES, B.; FALCÃO, J. M.; FERRINHO, P. Internamentos hospitalares associados à onda de calor de Agosto de 2003: evidências de associação entre morbidade e ocorrência de calor. *Revista portuguesa de saúde pública*, v. 27, n. 2, p. 87-102, 2007.

O. J., GEIER, Y. R. C., AMAYA, R. L. C., JÁCOME, H., RAMOS, A. M., ROJAS, C. O., PASTEN, A. M., MITRO, S. S., JIMÉNEZ, C. V., Martínez R., ALEXANDER, L. V., JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planet. Change*, 100, 295–307, 2013.

O'Neill, BC, Tebaldi, C., Van Vuuren, DP, Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., et al. (2016). O projeto de intercomparação de modelos de cenários (Cenário MIP) para CMIP6. *Desenvolvimento de Modelos Geocientíficos*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016> Perkins-Kirkpatrick, SE, & Lewis, SC (2020). Tendências crescentes em ondas de calor regionais. *Natureza Comunicações*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>

PALMEIRA, Ana Cristina. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 19 set. 2017. [Http://dx.doi.org/10.1002/joc.5294](http://dx.doi.org/10.1002/joc.5294). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5294>. Acesso em: 07 maio 2021.

PERKINS, S. E., ALEXANDER, L.V. On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26, 4500–4517, 2013.

PERKINS, SE; ALEXANDER, LV; NAIRN, JR Aumento da frequência, intensidade e duração das ondas de calor globais observadas e períodos de calor. *Cartas de Pesquisa Geofísica*, v. 39, n. 20, 2012.

PFAHL, S., WERNLI, H. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L12807, 2012.

PÖRTNER, Hans Otto et al. Resultado científico do workshop co-patrocinado pelo IPBES- IPCC sobre biodiversidade e mudanças climáticas. 2021.

QUAN, X. W., XU, T., MURRAY, D. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys. Res. Lett.* 38(6): L06702, 2011.

RAJSEKHAR, Deepthi; SINGH, Vijay P.; MISHRA, Ashok K. Índice multivariado de seca: uma abordagem baseada em teoria da informação para avaliação integrada de seca. *Journal of Hydrology* , v. 526, p. 164-182, 2015.

RAO, V. B., M. C. d. Lima, and S. H. Franchito, 1993: Sesasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. *J. of Climate*, 6, 1754-1763.  
review of the European summer heat wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 40(4), 267–306, 2010.

RAO, V. Brahmananda; HADA, Kioshi; HERDIES, Dirceu L. On the severe drought of 1993 innorth-east Brazil. **International journal of climatology**, v. 15, n. 6, p. 697-704, 1995.

RODRIGUES, R. R., TASCHETTO, A. S., GUPTA, A. S., FOLTZ, G. R. Common cause for  
RODRIGUES, R. R., WOOLLINGS, T. Impact of Atmospheric Blocking on South America in Austral Summer. *J. Climate*. 2017; 30: 1821-1837, 2017.

Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, EM (2015). As dez maiores ondas de calor na Europa desde 1950 e sua ocorrência nas próximas décadas. *Ambiente cartas de pesquisa mental*,10(12), 124003.<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>

RUSTICUCCI, M. (2012) Observed and Simulated Variability of Extreme Temperature Events over South America. *Atmospheric Research*, 106, 1-17.

S. I., LEHNER, F., ZOLINA, O. Prolonged Siberian heat of 2020. *World Weather Attribution*, 2020.

SACHS, Jeffrey D. O fim da pobreza . Editora Companhia das Letras, 2005.

SANTOS FERREIRA, Pedro dos et al. Variabilidade espaço-temporal das tendências de precipitação na mesorregião sul Cearense e sua relação com as anomalias de TSM. *Revista brasileira de meteorologia*, v. 33, p. 141-152, 2018.

SATYAMURTI, P., NOBRE, C., SILVA DIAS, P. L. South America. *Meteorology of the Southern Hemisphere*, D. J. Karoly and D. G. Vincent, Eds., Amer. Meteor. Soc., p. 119–139, 1998.

Seneviratne, S.I., Luthi, D., Litschi, M., Schar, C., 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443 (7108), 205–209. <https://doi.org/10.1038/nature05095>. severe

droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. *Nat. Geosci.*, 12, 620–626, 2019.

Shi, X., Chen, J., Gu, L., Xu, C. Y., Chen, H., & Zhang, L. (2021). Impacts and socioeconomic exposures of global extreme precipitation events in 1.5 and 2.0°C warmer climates. *Science of the Total Environment*, 760(1–13), 142665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142665> Shi, Z., Xu, X., & Jia, G. (2021). Urbanization magnified nighttime heat waves in China. *Geophysical Research Letters*, 48(15), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2021gl093603>

SILLMANN, J., CROCI-MASPOLI, M., KALLACHE, M., KATZ, R. W. Extreme cold  
SILVA, P., BASTOS, A., DA CAMARA, C. C., LIBONATI, R. Future projections of fire occurrence in Brazil using EC-earth climate model. *Rev. Brasil. Meteorol.*, 31(3), 288–297, 2017.

SKANSI, M., BRUNET, M., SIGRÓ, J., AGUILAR, E., GROENING, J. A., BENTANCUR, SOARES, D. D. B., LEE, H., LOIKITH, P. C. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *Int. J. Climatol.*, 1493, 1483–1493, 2017.

SODEN, B. Observations: surface and atmospheric climate change. Chapter 3. *Climate Change*, 235– 336, 2007.

STEFANON, M., D’ANDREA, F., DROBINSKI, P. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.*, 7, 014023, 2012.

STEINEMANN, Anne C.; HAYES, Michael J.; CAVALCANTI, Luiz. Indicadores e gatilhos de seca. *Seca e crises hídricas: questões de ciência, tecnologia e gestão*, p. 71-92, 2005.

THOM, Herbert CS. A note on the gamma distribution. *Monthly weather review*, v. 86, n. 4, p. 117-122, 1958.

TIAN, Liyan; QUIRING, Steven M.. Spatial and temporal patterns of drought in Oklahoma (1901–2014). *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 39, n. 7, p. 3365-3378, 11 mar. 2019.

<Http://dx.doi.org/10.1002/joc.6026>. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1002/joc.6026>.

Acesso em: 06 maio 2021.

TRENBERTH, K. E., JONES, P. D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., TANK, A., PARKER, A., RAHIMZADEH, F., RENWICK, J. A., RUSTICUCCI, M., TRENBERTH, K. E.; DAI, A. VAN DER SCHRIER, G.; JONES, P. D.; BARICHIVICH, J.; Trenberth, KE, Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, PD, Barichivich, J., Briffa, KR e Sheffield, J. (2014). Aquecimento global e

mudanças na seca. *Natureza Mudança Climática*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>  
 trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *J. Clim.* 18(23), 5011–5023, 2005.

UKKOLA, Anna M., et al. "Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation." *Geophysical Research Letters* 47.11 (2020): e2020GL087820.

UVO, C. R. B.; NOBRE, C. A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: a posição da ZCIT no Atlântico equatorial. *Climanálise*, v. 4, n. 07, p. 34-40, 1989.

VAUTARD, Robert et al. Contribuição humana para as ondas de calor recordes de junho e julho de 2019 na Europa Ocidental. *Cartas de Pesquisa Ambiental*, v. 15, n. 9, pág. 094077, 2020.

VINCENT, L. A., PETERSON, T. C., BARROS, V. R., MARINO, M. B., RUSTICUCCI, M., CARRASCO, G., RAMIREZ, E., ALVES, L. M., AMBRIZZI, T., BERLATO, M. A., GRIMM, A. M., MARENGO, J. A., MOLION, L., MONCUNILL, D. F., REBELLO E., ANUNCIAÇÃO Y. M. T., QUINTANA J., SANTOS J. L., BAEZ J., CORONEL, G., GARCIA, J., TREBEJO, I., BIDEgain, M., HAYLOCK, M. R., KAROLY, D. Observed WANG, Qianfeng; SHI, Peijun; LEI, Tianjie; GENG, Guangpo; LIU, Jinghui; MO, Xinyu; LI, XIAOHAN; ZHOU, HONGKUI; WU, JIANJUN. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai- Hai Plain of China based on the daily SPEI. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 35, n. 13, p. 3760-3769, 8 jan. 2015. [Http://dx.doi.org/10.1002/joc.4244](http://dx.doi.org/10.1002/joc.4244). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4244>. Acesso em: 06 maio 2021.

WANG, S., HIPPS, L., GILLIES, R., YOON, J., 2014. Probable causes of the abnormal ridge accompanying the 2013-2014 California drought: ENSO precursor and anthropogenic warming footprint. *Geophys. Res. Lett.* 41 (9), 3220–3226. <https://doi.org/10.1002/2014gl059748>.

WILHITE, Donald A. A seca como perigo natural: conceitos e definições. 2000. Winter temperatures in Europe under the influence of North Atlantic atmospheric blocking. *J. Climate*, 24, 5899–5913, 2011.

Wu, G., Chen, J., Shi, X., Kim, J., Xia, J., & Zhang, L. (2022). Impactos do aquecimento global nas secas meteorológicas e hidrológicas e suas propagações. futuro da terra, 10. <https://doi.org/10.1029/2021ef002542>

WU, Z.; XU, Z.; WANG, F.; HE, H.; ZHOU, J.; WU, X.; LIU, Z. Hydrologic Evaluation of Multi-Source Satellite Precipitation Products for the Upper Huaihe River Basin, China. *Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 1-21, 2018.

XOPLAKI, E., GONZÁLEZ-ROUCO, J. F., LUTERBACHER, J. WANNER, H. Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs. *Clim. Dyn.* 20(7–8): 723–739, 2003.

Zscheischler, J., & Seneviratne, SI (2017). A dependência de motoristas afeta os riscos associados a eventos compostos. *Avanços da Ciência*, 3(6), 1–11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700263>

Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, BJJM, Seneviratne, SI, Ward, PJ, Pitman, A., et al. (2018). Risco climático futuro do composto eventos. *Natureza Mudança Climática*, 8(6), 469-477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.