

Artigo

Ocorrência de Ondas de Calor com Dados de Reanálises em Áreas do Nordeste, Amazônia e Centro-Sudeste do Brasil

Nathiel de Sousa Silva¹ , José Maria Brabo Alves² , Emerson Mariano da Silva² ,
Gislane Maciel de Sousa³

¹*Faculdade de Educação, Ciências e Letras do Sertão Central, Universidade Estadual do Ceará, Quixadá, CE, Brasil.*

²*Mestrado Profissional em Climatologia e Aplicações nos Países da CPLP e África, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

³*Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

Recebido em: 1 de Novembro de 2022 - Aceito em: 15 de Novembro de 2022

Resumo

O aquecimento do sistema climático é um fato. Esse fenômeno impacta globalmente a vida humana e suas atividades. Observações apontam para um aquecimento médio de 1,01 °C e as causas evidenciam a contribuição antropogênica, como a queima de combustíveis fósseis e derivados, bem como atividades ligadas ao uso indiscriminado da terra. Como consequência desse aquecimento, há mais condições para a ocorrência de eventos meteorológicos extremos, como as ondas de calor, secas e enchentes, as quais tem sido mais recorrente e devastadoras. Nesse estudo visa-se diagnosticar a ocorrência de ondas de calor, e seus aspectos sazonais, sobre partes da região Nordeste do Brasil (NEB) entre 1991-2020, comparando-se com áreas dos setores centro-oeste, norte e oeste da Amazônia (AMAZ) e partes da região Centro-Oeste/Sudeste do Brasil (SUDE). Os resultados mostraram que os efeitos do aquecimento global sobre essas regiões nas últimas décadas são inequívocos. Na variabilidade interanual de 1991-2020, e em suas estações, observou-se aumento no número de dias favoráveis e casos de ocorrência de ondas de calor, independente da atuação em dias, bem como de ondas de 3, 4, 5 e 6 dias de duração após os anos 2000 em todas as regiões analisadas, mais evidente na AMAZ e NEB.

Palavras-chave: ondas de calor, mudanças climáticas, aquecimento global.

Occurrence of Heat Waves with Reanalysis Data in Areas of the Northeast, Amazon and Central-Southeast of Brazil

Abstract

The warming of the climate system is a fact. This phenomenon has a global impact on human life and its activities. Observations point to an average warming of 1.01 °C and the causes show the anthropogenic contribution, such as the burning of fossil fuels and derivatives, as well as activities related to the indiscriminate use of land. As a consequence of this warming, there are more conditions for the occurrence of extreme weather events, such as heat waves, droughts and floods, which have been more recurrent and devastating. This study aims to diagnose the occurrence of heat waves, and their seasonal aspects, over parts of the Northeast region of Brazil (NEB) between 1991-2020, comparing with areas of the central-west, north and west sectors of the Amazon (AMAZ) and parts of the Center-West/Southeast region of Brazil (SUDE). The results showed that the effects of global warming on these regions in recent decades are unequivocal. In the interannual variability of 1991-2020, and in its seasons, there was an increase in the number of favorable days and cases of occurrence of heat waves, regardless of the performance in days, as well as waves of 3, 4, 5 and 6 days after the 2000s in all regions analyzed, more evident in AMAZ and NEB.

Keywords: heat waves, climate changes, warm global.

1. Introdução

Segundo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as mudanças climáticas em curso afetam todos os ecossistemas terrestres (IPCC, 2021). Os eventos extremos têm excedido os limites de tolerância de diversos organismos, causando altos riscos de mortalidade em massa, estando cada vez mais difícil de gerenciar (IPCC, 2022). Eventos extremos de temperatura do ar, particularmente eventos relacionados ao calor, serão mais frequentes, mais longos e intensos em um futuro próximo (Perkins *et al.*, 2012).

Desde a revolução industrial, a adoção de combustíveis fósseis e seus derivados, bem como seus usos no desenvolvimento, tem liberado de forma contínua e acentuada, cada vez mais, gases de efeito estufa na atmosfera. Porém, outras atividades humanas também contribuem para esse desequilíbrio climático do planeta, como atividades agrícolas e o uso da terra indiscriminado (Nobre e Marengo, 2017).

Um dos eventos mais comuns às condições meteorológicas severas, que são observados devido às mudanças climáticas em muitas áreas do planeta, são as chamadas ondas de calor (OC). Para Montero *et al.* (2013), as OC carecem de uma definição internacionalmente acordada.

Em geral, uma OC é considerada um período de dias consecutivos em que um determinado limite é ultrapassado, onde alguns estudos consideram somente temperaturas máximas enquanto outros consideram máximas e mínimas (Perkins, 2015; Geirinhas *et al.*, 2017; Feron *et al.*, 2019; Bitencourt *et al.*, 2020). Uma alternativa é considerar percentis de distribuição de temperatura máxima, considerando a variabilidade climática (Rusticucci *et al.*, 2016). Diferentes autores adotam métodos distintos para calcular OC (Oliveira *et al.*, 2021).

Conforme a Organização Mundial de Meteorologia (2015), todos os indivíduos estão potencialmente expostos às OC, porém o nível de risco pode ser modificado por outros fatores, como morar em grandes cidades. As OC se intensificam em áreas urbanas, devido à morfologia das cidades com abundância de materiais de menor albedo (pavimentação asfáltica, concreto entre outros) e carência de cobertura vegetal, acarretando maior emissividade de energia solar para o ambiente urbano, o que eleva as temperaturas e as criam, causando, conseqüentemente, desconforto para a população (Souza *et al.*, 2020). Para Laaidi *et al.* (2012), o risco de morte por exposição às temperaturas altas é maior nas áreas urbanas devido ao efeito das chamadas ilhas de calor.

Os efeitos do aquecimento da superfície devido às mudanças climáticas causam impactos nas mais diversas regiões do globo (Haylock *et al.*, 2006; Marengo, 2009). Muitas partes do mundo estão experimentando temperaturas máximas superiores a 40 °C, bem como temperaturas acima de 50 °C foram observadas em partes da Europa,

África, Oriente Médio, Austrália, Américas e Ásia (World Weather, 2014). Para Coumou e Rahmstorf (2012), já foram observados mais recordes de calor no período atual do que no passado em todos os continentes.

As mudanças climáticas podem impactar a saúde humana por diferentes vias, de forma direta com eventos extremos ou indireta influenciando o aumento da incidência de várias doenças por exemplo (Barcellos, *et al.* 2009). Critchfield (2008) sugere que a saúde humana é mais afetada pela variabilidade climática do que por qualquer outro elemento do meio ambiente. A variabilidade climática pode afetar a saúde humana e as comunidades biológicas de forma indireta e direta, visto que pode incluir mudanças no padrão de chuvas, aumento da temperatura, acidificação e aumento dos oceanos, perda de habitats nos ecossistemas entre outros (HO *et al.*, 2016).

Hoje, tem-se bem estabelecida a existência de uma vasta gama de impactos associados às OC aos ecossistemas e ao homem, particularmente no que diz respeito à saúde pública (Geirinhas *et al.*, 2021). Um aspecto importante da compreensão do risco geral das mudanças climáticas para a saúde humana é como as OC podem afetar no que se refere à morbimortalidade sob um clima em mudança (Patz *et al.*, 2005). A tendência global de aumento dos extremos de calor já levou à morte de milhares de pessoas, tendo as OC sido responsáveis pela maior parte da mortalidade total por temperaturas extremas de acordo com o International Disaster Database (Barriopedro *et al.*, 2011).

Ebi *et al.* (2021) indicam que a exposição ao calor causa danos generalizados à saúde humana. Relacionando condições extremas de calor à mortalidade humana, Mora *et al.* (2017) mostraram as principais áreas no mundo em que as temperaturas diárias excessivas resultaram nesse impacto (Fig. 1), analisando estudos publicados de 1980 até 2014, os quais encontraram 783 casos de mortalidade humana associados ao calor em 164 cidades de 36 países.

Gasparrini *et al.* (2017) estimam que as populações que vivem em regiões da Europa, Sudeste Asiático e América do Sul registrarão um aumento acentuado nos impactos relacionados ao calor. Ressalta-se que os idosos, as crianças, doentes crônicos e as pessoas que trabalham ao ar livre são grupos muito vulneráveis (D'ippoliti *et al.*, 2010; WMO, 2015). Para Guo *et al.* (2017), a associação entre OC e efeitos à saúde humana difere por cidades, países e regiões. Pouca atenção até agora foi dada às projeções dos efeitos das ondas de calor em diferentes regiões (Peng *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2014).

Guo *et al.* (2018) indicam a importância da implementação de políticas climáticas eficazes para minimizar o aumento da temperatura e prevenir os seus impactos negativos. A ideia e o conhecimento da variabilidade climática são informações científicas poderosas que desempenham um papel significativo na gestão da saúde humana e na redução de riscos diversos (Rosenzweig *et al.*, 2018).

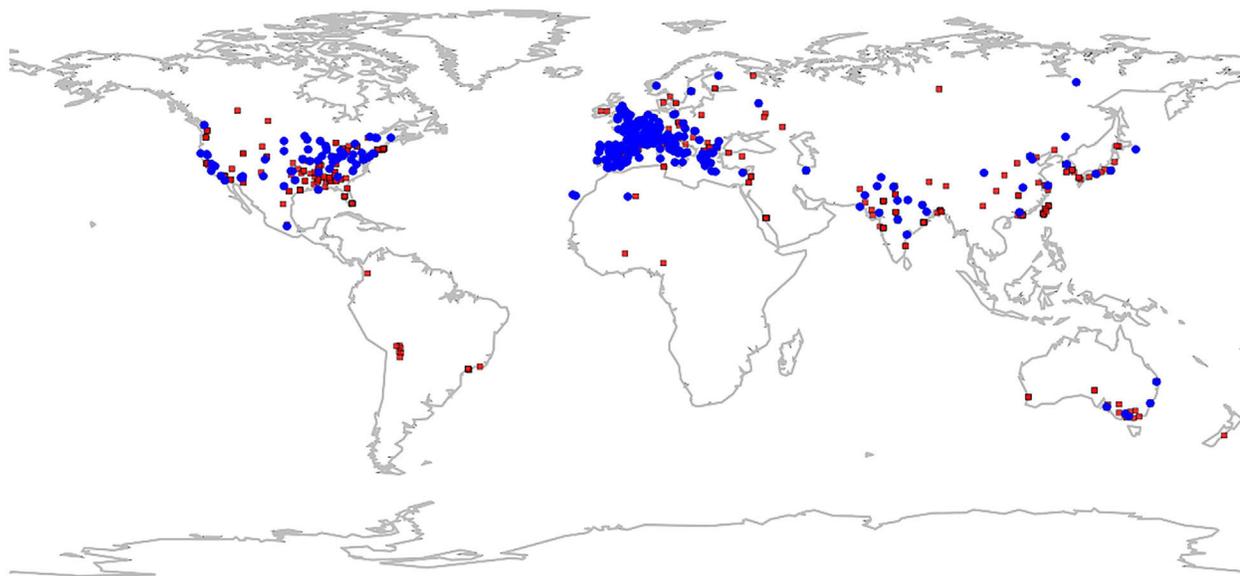


Figura 1 - Áreas do globo com óbitos humanos (pontos vermelhos) relacionadas ao calor intenso (pontos azuis). Fonte: [Mora et al. \(2017\)](#).

Dessa forma, é fundamental se compreender as condições térmicas das atmosferas de níveis locais à globais em vista da saúde humana e ambiental, bem como das atividades que podem vir a ser desenvolvidas. O presente estudo objetiva analisar as características térmicas da atmosfera de parte das regiões brasileiras do: Nordeste; centro, oeste e norte da Amazônia; Sudeste e Centro-Oeste. Assim, verificando a ocorrência de ondas de calor, bem como seus comportamentos sazonais e inferindo mudanças devido à possível atividade antropogênica.

2. Materiais e Métodos

O estudo utilizou dados diários da série de temperaturas máximas diárias próximas à superfície no período de 1991-2020, obtidas de reanálises do National Center for Environment Prediction (NCEP) dos Estados Unidos da

América, com uma resolução espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de longitude e latitude ([Kanamitsu et al., 2002](#)).

Os cálculos foram feitos para uma média nos pontos de grade sobre: uma parte predominantemente semiárida do Nordeste do Brasil (NEB) ($2^\circ \text{ S}-12^\circ \text{ S}$ e $45^\circ \text{ W}-38^\circ \text{ W}$); uma região da Amazônia predominantemente brasileira, destacando a parte central, norte e oeste - AMAZ ($2^\circ \text{ N}-8^\circ \text{ W}-56^\circ \text{ W}$); uma parte região do Sudeste e Centro-Oeste do Brasil - SUDE ($14^\circ \text{ S}-24^\circ \text{ S}$ e $54^\circ \text{ W}-42^\circ \text{ W}$), ressaltando a presença de algumas áreas pertinentes aos estados da Bahia e Paraná. As regiões analisadas são apresentadas na [Fig. 2](#) e as etapas do processo de tratamento de dados e a metodologia são mostradas na [Tabela 1](#).

3. Resultados e Discussões

A [Fig. 3a](#) mostra a variabilidade interanual, quanto ao número de dias favoráveis às OC para as regiões do

Tabela 1 - Etapas do processo de consolidação e análise dos dados.

01. Cálculo da média diária da temperatura máxima do ar para cada dia do ano (01 de janeiro a 31 de dezembro) em cada região de estudo;
02. Contagem mensal diária dos dias consecutivos (ou não) de três, quatro, cinco e seis dias quando a temperatura máxima diária foi maior que o valor do seu percentil de 80%;
03. Cálculo do número de dias favoráveis a uma onda de calor quando a temperatura máxima diária foi superior a temperatura diária máxima do percentil de 80%;
04. Os eventos de dias consecutivos iguais ou maiores que 3, com relação à etapa 3, foram considerados como eventos de ondas de calor;
05. Cálculo do número de ondas de calor, definido quando o número de dias consecutivos foi maior ou igual a três com a temperatura diária máxima acima do valor da mesma no percentil de 80%;
06. Cálculo do número de dias em que a temperatura máxima diária esteve acima de 35° C , valor esse que já sugere risco quando associado à alta umidade do ar ([Mora et al., 2017](#));
07. Procedimento estatístico para todo o período 1991-2020 e por décadas (1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020). As estatísticas foram calculadas considerando as estações do ano: verão (novembro a janeiro), outono (fevereiro a abril), inverno (maio a julho) e primavera (agosto a outubro).

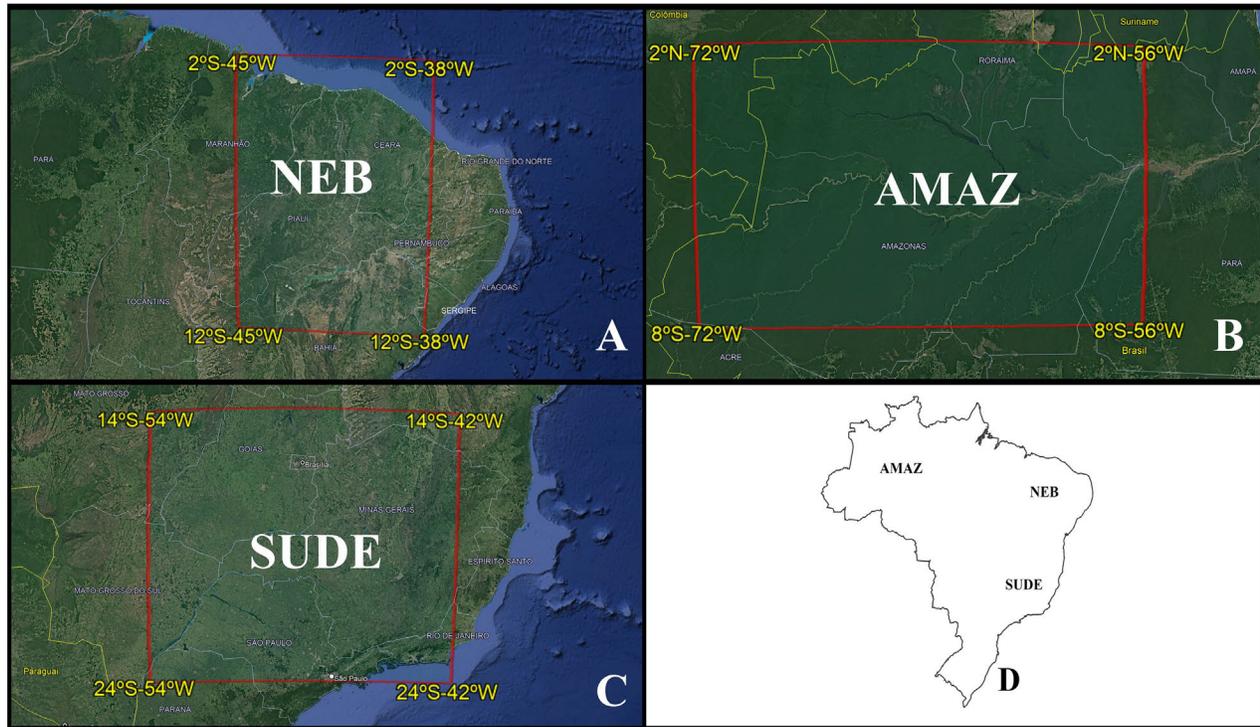


Figura 2 - Áreas analisadas no estudo - NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) - de acordo com as suas simples localizações no território brasileiro (D).

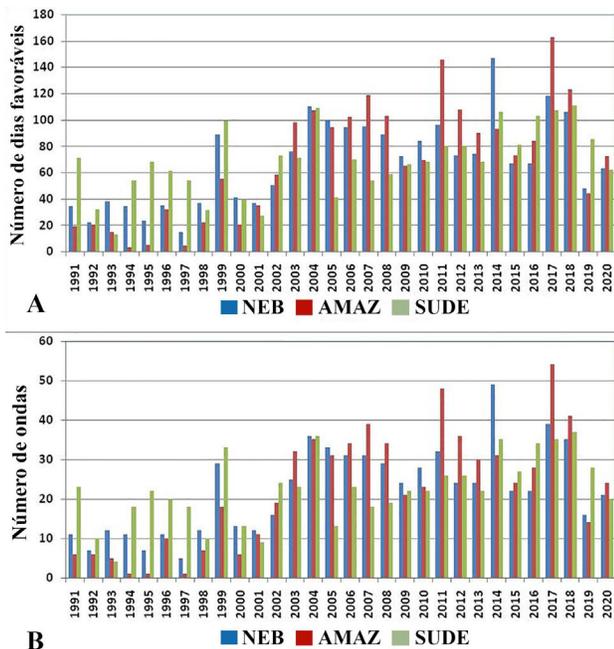


Figura 3 - Número de dias favoráveis às OC nas regiões NEB, AMAZ e SUDE (1991-2020) (A) e número de ocorrências de ondas de calor nas regiões NEB, AMAZ e SUDE (1991-2020) (B).

NEB, AMAZ e SUDE. De forma geral, até o ano de 2001, excetuando o de 1999, o número de dias favoráveis às OC, independente da extensão em dias da onda, foi inferior a

40 dias por ano no NEB e AMAZ, enquanto no sudeste do Brasil esse número geralmente foi superior a 40 dias.

A partir dos anos 2000, há um aparente incremento no número de dias favoráveis às OC em todas as regiões analisadas, mais observado sobre o NEB e AMAZ, tendo, em muitos anos, esse número de dias favoráveis acima de 100. Na AMAZ ressalta-se o maior incremento desses dias favoráveis. De forma geral, até os anos 2000, esse número foi inferior a 20 casos, excetuando os anos de 1996, 1998 e 1999. Esses números foram duplicados, até mesmo, a octuplicados, após o ano 2002. Essa característica observada pode estar associada ao uso inadequado do solo e desmatamento (Dechen *et al.*, 2015; Geirinhas *et al.*, 2017; Lejune *et al.*, 2018; IPCC, 2019).

Na Fig. 3b é mostrada a variabilidade interanual do número de OC, independente do período de extensão, para as regiões NEB, AMAZ e SUDE. Pode-se observar que, até o ano de 2001, excetuando o de 1999, há o menor número de OC independentes considerando um longo período, em particular no NEB e AMAZ. A partir desse ano foi observado um aumento no número de ondas no NEB e AMAZ principalmente, enquanto que no SUDE há destaque para o ano de 2018. Sobre o NEB e AMAZ, destacam-se, respectivamente, os anos de 2014 e 2017, com o número de OC ficando aproximadamente em 50 e acima de 50 ondas anuais respectivamente.

Atividades locais e regionais de queima de biomassa e de modificação de uso do solo influenciam as mudanças

no comportamento de eventos extremos pela alteração no ciclo hidrológico e balanço de energia e, conseqüentemente, as circulações atmosféricas associadas (IPCC, 2013). Há evidências de que as ondas de calor estão se tornando cada vez mais ligadas às secas no Nordeste, Sudeste, Amazônia e no Pantanal brasileiro (Libonati *et al.*, 2022).

Na Fig. 4a mostrou-se uma tendência de aumento da ocorrência das OC após os anos 2000. Dentre os primeiros 10 anos, somente em 1999 foi observado um pico na ocorrência das diferentes OC. No período completo, estratificado em intervalos de 10 anos, observou-se outros picos em 2004 e 2014 com aproximadamente 35 e 50 ondas respectivamente.

Esse incremento no número de ocorrências de OC no NEB é consistente e análogo ao aumento da temperatura do ar à superfície nessas últimas duas décadas em várias áreas do globo, devido à emissão de gases de efeito estufa (Geirinhas *et al.*, 2017). Tanto desflorestamento, quanto as

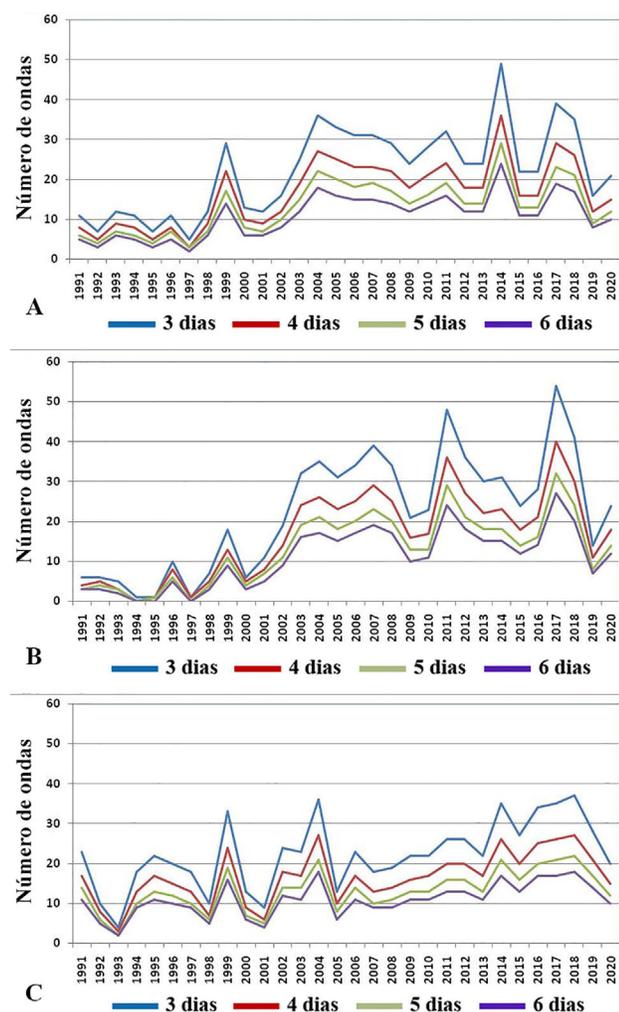


Figura 4 - Número de ocorrências de OC de 3, 4, 5 e 6 dias para as regiões do NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) de 1991-2020.

mudanças do clima global, devido ao aumento das emissões antropogênicas dos gases de efeito estufa, podem afetar o funcionamento dos ecossistemas amazônicos, o que impactam o Brasil como um todo, reduzindo sua capacidade de capturar o carbono da atmosfera, aumentando a temperatura à superfície, reduzindo a umidade do solo, modificando o ciclo hidrológico regional e, conseqüentemente, a reciclagem (Marengo *et al.*, 2011).

Na Fig. 4b observa-se similaridade ao NEB, com um acréscimo do número de OC nas últimas duas décadas. As mudanças no padrão do uso do solo na região amazônica têm sido bastante intensas e podem causar significativas modificações no clima da região (Artaxo *et al.*, 2014). Porém, na Fig. 4c, embora tenha sido observada uma tendência de aumento do número de OC no decorrer desses 30 anos de análise, a diferença para os primeiros 10 anos também foi aparente como ocorreu na região AMAZ, em particular para as ondas de 3 dias. Verificou-se tendência significativa de aumento no número de dias com OC de 1980-2019 para quase toda a região Sudeste e Centro-Oeste brasileiro (Fronza, 2020).

A tendência linear com significância de 95%, segundo o teste t Student foi de: ondas de 3 dias com um aumento de casos, respectivamente, de 23,7, 35,9 e 17,7 para o NEB, AMAZ e SUDE. Para as ondas de 4 e 5 dias, essa tendência de aumento foi de 17,5 e 13,9 para o NEB; 26,6 e 14,9 para a AMAZ; 12,8 e 10,5 casos para o SUDE, nos 30 anos de análises. A menor tendência linear do aumento de OC foi para as de extensão de 6 dias com 12,6, 15,3 e 10,2 casos para as regiões do NEB, AMAZ e SUDE respectivamente.

As análises a seguir serão para os períodos das estações do ano verão, outono, inverno e primavera do hemisfério sul. Nessas análises serão focadas apenas a variabilidade do número de ondas de 3, 4, 5 e 6 dias em cada estação para cada região do estudo. A Fig. 5 mostra essa variação anual sazonal quanto aos casos de ocorrências de OC de 3, 4, 5 e 6 dias para as três regiões mencionadas no verão.

Na Fig. 5a verifica-se a ocorrência de ondas nos verões de 1991 a 2003, apresentando um decréscimo no número de casos. As ondas de 3 dias variaram de dois a dez casos nesses anos; as de 4 dias de um a oito casos; as de 5 e 6 dias de um a cinco/seis casos nesse período. Entre 2004 e 2010, as temperaturas máximas diárias não ficaram acima do percentil de 80% em três ou mais dias consecutivos e não foram observadas OC nesse período, segundo a metodologia aplicada e o banco de dados analisado nesse estudo. Após 2011, no NEB, constatou-se significativa variabilidade de ondas de calor de 3, 4, 5 e 6 dias, com um pico de casos dessas ondas no ano de 2014.

Para a região AMAZ, Fig. 5b, observa-se que as OC ocorreram com razoável variabilidade interanual com destaque para as OC de 3 dias ou superiores nos anos de 1999, 2002 e 2017. Para todas as OC em análise, o período

do, em anos, de maior ocorrência foi entre 1997 e 2004. O número de casos de ondas de 4 dias variou de um a quatro casos; de 5 dias de um a cinco casos; de 6 dias de um a quatro casos.

Na região SUDE, Fig. 5c, observa-se certa similaridade às curvas de ocorrências de OC do NEB. Nos verões entre 1991 a 2005, houve decréscimo no número de casos. As ondas de 3 dias variaram de zero a catorze casos nesses anos; as de 4 dias de zero a dez casos; as de 5 e 6 dias de um a seis/oito casos. Entre 2005 e 2008, as temperaturas máximas diárias não ficaram acima do percentil de 80% em três ou mais dias consecutivos, não sendo observadas OC, segundo a metodologia aplicada e o banco de dados analisado neste estudo. Após 2010, ocorreu uma tendência de acréscimo na ocorrência de todas as OC em análise, com um ápice em 2014.

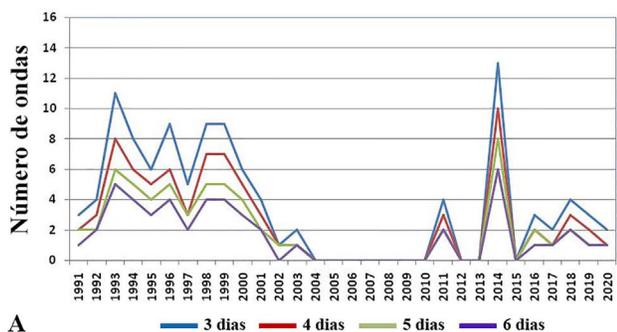
No hemisfério sul, os eventos extremos estão normalmente associados ao bloqueio atmosférico e à intensa radiação solar disponível na primavera e no verão (Rodri-

gues e Woollings, 2017). A variabilidade intrasazonal pode explicar, em média, pelo menos 32% da variação da temperatura no verão, bem como 73% das OC na América do Sul subtropical se desenvolvem em associação com uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) ativa (Cerne e Vera, 2011).

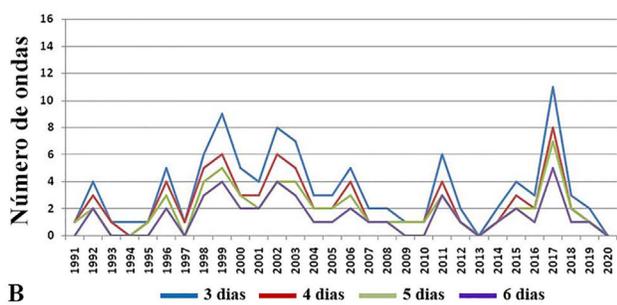
Fronza (2020) observou espacialmente o número médio de dias totais de eventos de OC por verão e as tendências generalizadas de aumento de dias de OC, estatisticamente significativos em praticamente toda a região sudeste, para a maior fração da região centro-oeste e ao nordeste da região sul, também com evento massivo em 2014, incluindo cidades e estados mais ao sul do Brasil.

A Fig. 6 mostra a variabilidade dessas OC de 3, 4, 5 e 6 dias no NEB, AMAZ e SUDE para a estação de outono.

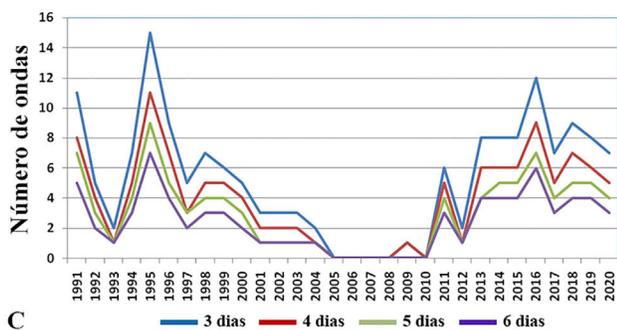
Para o NEB Fig. 6a, as OC ocorreram no outono majoritariamente entre os anos de 1997 e 2010. O número máximo de OC, de todas as extensões de dias em análise,



A

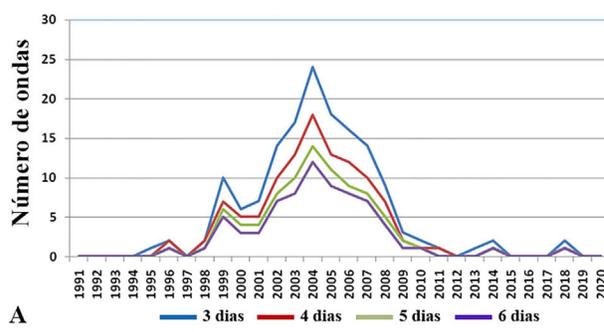


B

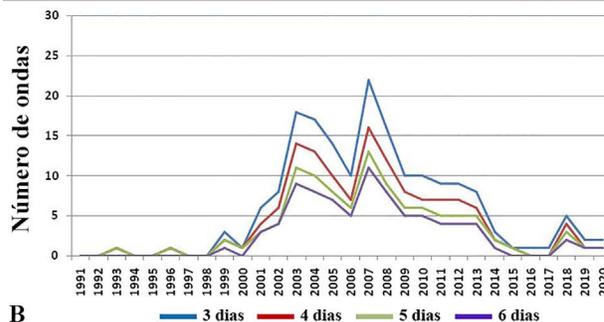


C

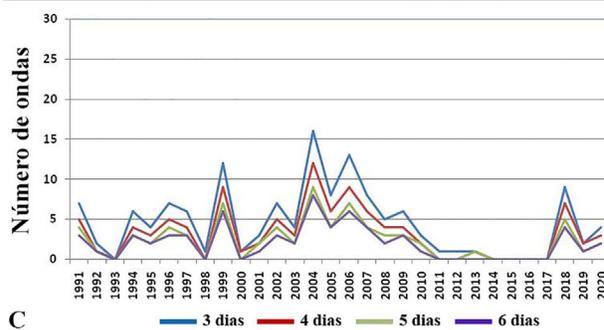
Figura 5 - Número de ocorrências de OC no NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) no verão (1991-2020).



A



B



C

Figura 6 - Número de ocorrências de OC no NEB (A), AMAZ (B), SUDE (C) no outono (1991-2020).

foi observado entre 2003 e 2007. Entre os anos de 1991-1995 e 2012-2020, as ocorrências em todas as categorias de ondas foram mínimas.

Sobre essas características observadas na variabilidade interanual no NEB, considerando que nessa estação se concentram as chuvas desta região semiárida, os anos de maior e menor número de ocorrência de OC de 3, 4, 5 e 6 dias, respectivamente, podem estar associados aos anos com períodos de menor ou maior pluviosidade sobre essa região. Análises mais detalhadas quanto a esse propósito deverão ser investigadas, não sendo o objeto deste estudo. Na região, há um clima tropical quente semiárido com período chuvoso estabelecido de janeiro a maio, concentrando-as de fevereiro a abril (Silva *et al.*, 2020).

Na região da AMAZ, Fig. 6b, foi observado uma singela similaridade com a configuração de ocorrência das OC no NEB. Essas OC ocorreram principalmente entre os anos de 1997 e 2010, com ocorrência acima de 10 casos, em todas as categorias de ondas entre 2003 e 2008. O número máximo de OC de todas as extensões de dias em análise foi observado também entre 2003 e 2007. Destaca-se uma tendência crescente a partir de 1999 e 2006, seguido de decréscimo até o ano de 2020.

Para a região SUDE, Fig. 6c, observa-se que as OC ocorreram em praticamente todos os outonos entre 1991 e 2020, excetuando os anos 2015-2016, apresentando uma oscilação interanual e ressaltando os anos com maior número de casos: 1999, 2004, 2006 e 2018. Oliveira *et al.* (2021), em estudo em São Paulo, mostrou que a duração das OC de 1998-2018 aumentou mais de cinco vezes no outono em comparação com o período anterior e em relação à soma de dias de OC/estação, aumentou sete vezes.

A Fig. 7 mostra a variabilidade dessas ondas de calor de 3, 4, 5 e 6 dias no NEB, AMAZ e SUDE para a estação de inverno.

Nessa estação, a variabilidade interanual apresentou uma configuração de acréscimo nas regiões NEB (Fig. 7a) e AMAZ (Fig. 7b) em número de casos dessas ondas de 3, 4, 5 e 6 dias entre os anos 90 e 2000, sendo mais evidente na AMAZ. Na região SUDE (Fig. 7c), essas OC ocorreram com grande variabilidade em todos os anos e com um número de casos menores do que nas demais regiões, principalmente entre 2010 e 2020. Oliveira *et al.* (2021) indicam menor número de OC no inverno. Em contraste, Cordeiro *et al.* (2019) encontraram OC mais frequentes nesta estação.

Para a estação de primavera, a variabilidade dessas ondas de calor de 3, 4, 5 e 6 dias no NEB, AMAZ e SUDE são apresentadas na Fig. 8.

Para essa estação de primavera, a variabilidade interanual apresentou uma configuração de acréscimo em todas as regiões NEB (Fig. 8a), AMAZ (Fig. 8b) e SUDE (Fig. 8c) no número de casos dessas ondas de 3, 4, 5 e 6 dias entre os anos 90 e 2000. Com o aumento da temperatura, mais provável é a ocorrência de OC em duração, fre-

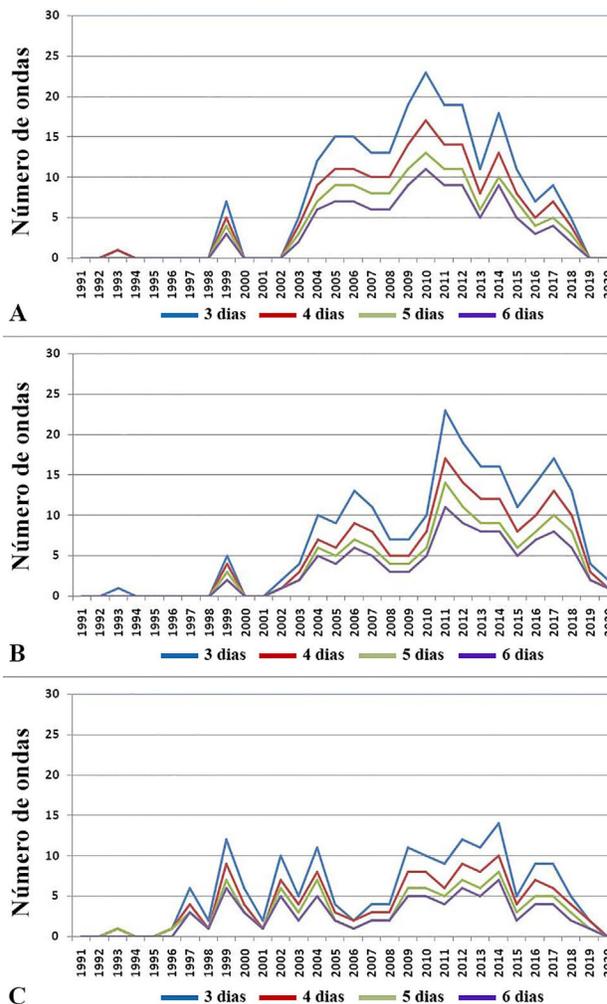


Figura 7 - Número de ocorrências de OC no NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) no inverno (1991-2020).

quência e intensidade devido às mudanças climáticas (Feron *et al.*, 2019). Alguns estudos no Brasil concordam e alinham-se ao constatar maior ocorrência de OC na primavera e verão nas últimas décadas (Bitencourt *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2021).

A Fig. 9 mostra o número de dias anuais com temperatura diária máxima superior a 35 °C para as regiões NEB, AMAZ e SUDE. É perceptível que em todas as regiões os dias com temperaturas máximas de 35 °C aumentaram desde, principalmente, os anos 2000 comparados aos anos 90, em particular sobre o NEB e AMAZ.

Essas características térmicas diárias também corroboram com o acréscimo de OC analisados nas figuras anteriores em todas as regiões. Além disso, são consistentes com as observações e relatos de estudos em que tais eventos estão associados às temperaturas diárias mais elevadas de forma frequente e relacionadas ao aquecimento global tanto no Brasil como em muitas regiões do globo (Geirinhas *et al.*, 2017, Mora *et al.*, 2017; Bitencourt *et al.*, 2020).

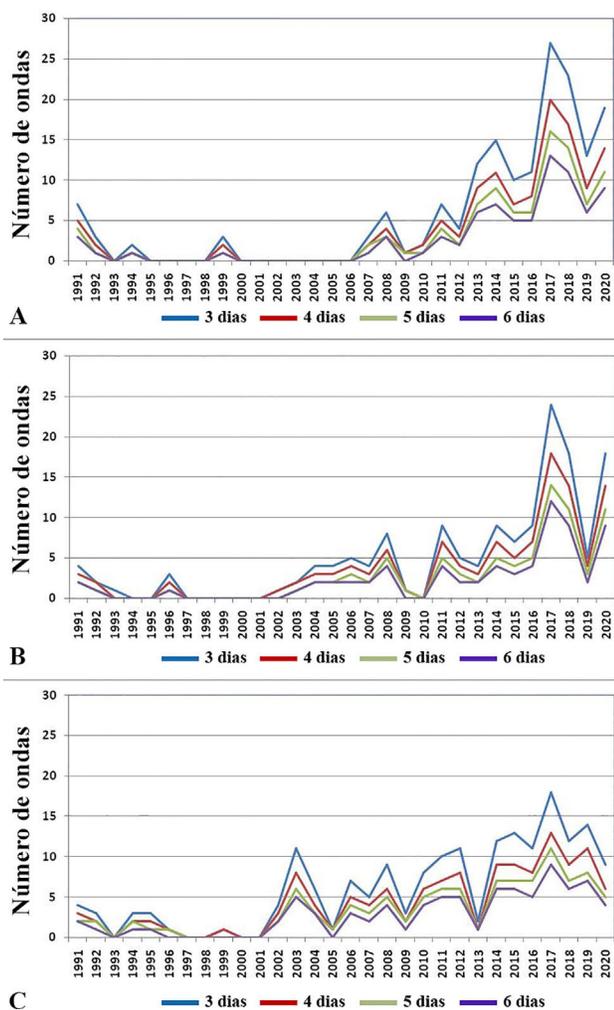


Figura 8 - Número de ocorrências de OC no NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) na primavera (1991-2020).

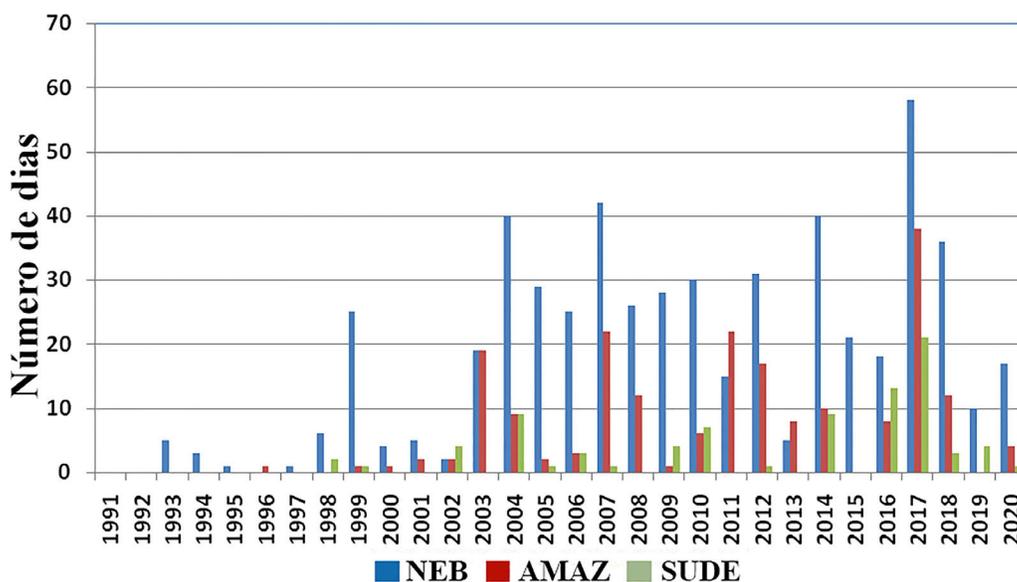


Figura 9 - Número de dias com temperaturas máximas superiores a 35 °C (1991-2020).

O calor intenso ao longo de todo o ano expõe as populações às condições térmicas limites ao conforto térmico da fisiologia, o que é um fato preocupante, principalmente na NEB e AMAZ. Ressalta-se que temperaturas diárias superiores aos 35 °C associados às condições atmosféricas de alta umidade, podem trazer consequências graves e até letais ao ser humano (Mora *et al.*, 2017).

No Brasil, os efeitos combinados do desmatamento e das mudanças climáticas já estão sendo reportados com base em dados observacionais, com valores de calor mais extremos relatados em grandes áreas que sofreram desmatamento entre 2003 e 2018. Modelos climáticos com combinação de mudanças no uso da terra e o aquecimento global mostram que os riscos podem aumentar ainda mais. Fatores induzidos pelo homem, responsáveis pela savanização da floresta amazônica, implicando no país em mais incêndios florestais e expansão de áreas de atividades agrícolas e de mineração, tendem a levar a um crescimento desordenado e a um processo de urbanização não planejada (Oliveira *et al.*, 2021).

A Fig. 10 apresenta o número de ondas de calor de 3, 4, 5 e 6 dias nas regiões do NEB, AMAZ e SUDE no período analisado nesse estudo. Verifica-se um aumento dessas OC nas três regiões estudadas nas últimas duas décadas, com ênfase na NEB e AMAZ.

Na América do Sul, há uma tendência do aumento de 1 °C/década no período 1975-2004, particularmente na fronteira sul e leste da Amazônia, também conhecido como Arco do Desmatamento segundo Barros Soares *et al.* (2017). É possível usar os dados de estações disponíveis para confirmar estas tendências e apontar para aquecimentos significativos das feições de calor extremos sobre a Amazônia e o Nordeste do Brasil (Skansi *et al.*, 2013).

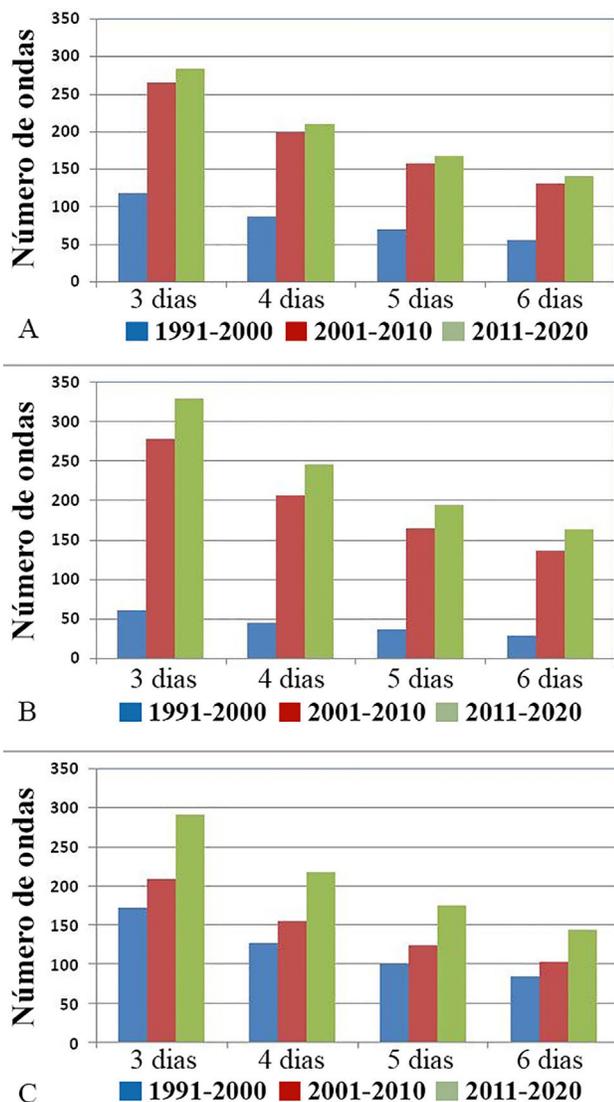


Figura 10 - Número de ondas de 3, 4, 5 e 6 dias por década para a NEB (A), AMAZ (B) e SUDE (C) no período (1991-2020).

4. Considerações Finais

As análises do estudo mostram várias evidências de um aquecimento à superfície inferido pelo acréscimo da temperatura máxima diária e variáveis derivadas sobre a área média do NEB, AMAZ e SUDE. Assim, considera-se:

- Aumento do número anual dos dias favoráveis à ocorrência de OC em todas as regiões estudadas a partir dos anos 2000, mais evidentes nas regiões AMAZ e NEB;
- Acréscimo do número anual e nas estações do ano de OC, independente da persistência em número de dias consecutivos, em todas as regiões estudadas, também mais evidentes na NEB e AMAZ;
- A tendência linear com significância de 95%, segundo teste t Student, mostrou-se positiva para as ondas classificadas nesse estudo em todas as regiões analisadas;

- Sazonalmente (estações do ano), foi observado no verão, em todas as regiões, para OC de 3, 4, 5 e 6 dias uma grande variabilidade interanual na ocorrência de casos. No outono, NEB e AMAZ tiveram similaridades no número de casos dessas ondas de 3, 4, 5 e 6 dias com os anos entre 2000 e 2014, predominando com um maior número de casos e em SUDE as características foram similares ao observado no verão com grande variabilidade interanual. No inverno e primavera foi observado um incremento no número de casos de ocorrências dessas OC, principalmente nas regiões NEB e AMAZ a partir dos anos 2000;
- Aumento no número de dias com temperatura máxima acima de 35° C em todas as regiões analisadas ao longo dos 30 anos de estudo.

Nesse estudo não foram analisados possíveis fatores além do antropogênico, que são implícitos pela emissão de gases de efeito estufa, bem como pelo uso e ocupação da terra e o desmatamento, mais comuns na AMAZ e NEB, bem como os efeitos de ilhas de calor, principalmente sobre SUDE. Para estudos futuros sugere-se a busca de metodologias que possam diferenciar as parcelas dos impactos desses processos no aquecimento à superfície dessas regiões. Além de também, se possível, comparar esses resultados com outros tipos de dados que reflitam esse aquecimento à superfície.

Referências

- ARTAXO, P.; DIAS, M.A.F.S.; NAGY, L.; LUIZÃO, F.J.; CUNHA, H.B.; *et al.* Perspectivas de pesquisas na relação entre clima e o funcionamento da floresta amazônica. **Ciência e Cultura**, v. 66, n. 3, p. 41-46, 2014. [doi](#)
- BARCELLOS, C.; MONTEIRO, A.M.V.; CORVALÁN, C.; GURGEL, H.C.; CARVALHO, M.S.; *et al.* Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiol. Serv. Saude**, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009. [doi](#)
- BARRIOPEDRO, D.; FISCHER, E.M.; LUTERBACHER, J.; TRIGO, R.M.; GARCÍA-HERRERA, R. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. **Science**, v. 332, n. 6026, p. 220-4, 2011. [doi](#)
- BITENCOURT, D.P.; FUENTES, M.V.; FRANKE, A.E.; SILVEIRA, R.B.; ALVES, M.P.A. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 4, p. 2464-2478, 2020. [doi](#)
- CERNE, S.B.; VERA, C.S. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 2265-2277, 2011. [doi](#)
- CORDERO SIMÕES DOS REIS, N.; BOIASKI, N.T.; FERAZ, S.E.T. Characterization and spatial coverage of heat waves in subtropical Brazil. **Atmosphere**, v. 10, n. 5, p. 284-98, 2019. [doi](#)
- COUMOU, D.; RAHMSTORE, S. A decade of weather extremes. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 7, p. 491-496, 2012. [doi](#)

- CRITCHFIELD, H.J. **General Climatology**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1960.
- DECHEN, S.C.F.; TELLES, T.S.; GUIMARAES, M.F.; MARIA, I.C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015. doi
- D'IPPOLITI, D.; MICHELOZZI, P.; MARINO, C.; DONATO, F.; MENNE, B.; *et al.* The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. **Environ. Health**, v. 9, n. 37, p. 1-9, 2010. doi
- GASPARRINI, A.; GUO, Y.; SERA, F.; VICEDO-CABRERA, A.M.; HUBER, V.; *et al.* Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. **Lancet Planetary Health**, v. 1, n. 9, p. 360-367, 2017. doi
- GEIRINHAS, J.L.; TRIGO, R.M.; LIBONATI, R.; COELHO, C.A.S.; PALMEIRA, A.C. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 1760-1776, 2017. doi
- GEIRINHAS, J.L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P.M.; MIRALLES, D.G.; *et al.* Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. **Environ. Res. Lett.**, v. 16, n. 3, 034036, 2021. doi
- GUO, Y.; GASPARRINI, A.; ARMSTRONG, B.G.; TAWAT-SUPA, T.; TOBIAS, A.; *et al.* Heat wave and mortality: A multicountry, multicomunity study. **Environ. Health Perspect**, v. 125, n. 8, 087006, 2017. doi
- GUO, Y.; GASPARRINI, A.; LI, S.; SERA, F.; VICEDO-CABRERA, A.M.; *et al.* Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study. **PLoS Med**, v. 15, n. 7, 1002629, 2018. doi
- EBI, K.L.; CAPON, A.; BERRY, P.; BRODERICK, C.; DE DEAR, R.; *et al.* Hot weather and heat extremes: Health risks. **The Lancet**, v. 398, n. 10301, p. 698-708, 2021. doi
- FERON, S.; CORDERO, R.R.; DAMIANI, A.; LLANILLO, P.J.; JORQUERA, J.; *et al.* Observations and projections of heat waves in South America. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2019. doi
- FRONZA, E.E. **Caracterizando Ondas de Calor no Centro-sul do Brasil, de 1980 a 2019**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- HAYLOCK, M.R.; PETERSON, T.C.; ALVES, L.M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIACAO, M.T.; *et al.* Trends in total and extreme south American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, n. 8, p. 1490-1512, 2006. doi
- HO, H.C.; KNUDBY, A.; XU, Y.; HODUL, M.; AMINIPOURI, M. A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area **Science of the Total Environment**, v. 544, p. 929-938, 2016.
- KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.; HNILO, J.J.; *et al.* NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R2). **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, p. 1631-1643, 2002.
- IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. People, Land and Climate in a Warming World**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 7-19, 2019. Disponível em <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- LAAIDI, K.; ZEGHNOUN, A.; DOUSSET, B.; BRETIN, P.; VANDENTORREN, S.; *et al.* The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. **Environmental Health Perspectives**, v. 120, n. 2, p. 254-259, 2012. doi
- LEJEUNE, Q.; DAVIN, E.L.; GUDMUNDSSON, L.; WINCKLER, J.; SENEVIRATNE, S.I.; *et al.* Historical deforestation locally increased the intensity of hot days in northern mid-latitudes. **Nature Clim Change**, v. 8, n. 5, p. 386-390, 2018. doi
- LIBONATI, R.; GEIRINHAS, J.L.; SILVA, P.S.; DOS SANTOS D.M.; RODRIGUES, J.A.; *et al.* Drought-heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: A comprehensive review. **Annals of the New York Acad. Sci.**, v. 1517, n. 1, p. 44-62, 2022. doi
- MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas, Condições Meteorológicas Extremas e Eventos Climáticos no Brasil. In: **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**. FDBS: Rio de Janeiro, 2009. Disponível em http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; CHOU, S.C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; *et al.* **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido Sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 56 p., 2011. Disponível em http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/relatorio_port.pdf
- MONTERO, J.C.; MIRÓN, I.J.; CRIADO, J.J.; LINARES, C.; DÍAZ, J. Difficulties of defining the term “heat wave” in public health. **Int. J. Environ. Health Res.**, v. 23, n. 5, p. 377-379, 2013. doi
- MORA, C.; DOUSSET, B.; CALDWELL, I.R.; POWELL, F.E.; GERONIMO, R.C.; *et al.* Global risk of deadly heat. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 7, p. 501-506, 2017. doi
- NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A. **Mudanças Climáticas em Rede: Um Olhar Interdisciplinar. Contribuições do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas**. Bauru: Canal 6 Editora, 2017.

- OLIVEIRA, D.S.; COSTA, PDP.; BEZERRA, L.M.; AVILA, A.M.H.; FARIA, E.C. Ondas de calor mais quentes, duradouras e frequentes: Um estudo observacional para a cidade brasileira de Campinas, São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 305-316, 2021. doi
- OLIVEIRA, B.F.A.; BOTTINO, M.J.; NOBRE, P.; NOBRE, C.A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 2, 207, 2021. doi
- PATZ, J.A.; CAMPBELL-LENDRUM, D.; HOLLOWAY, T.; FOLEY, J.A. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, v. 438, n. 7066, p. 310-317, 2005. doi
- PENG, R.D.; BOBB, J.F.; TEBALDI, C.; MCDANIEL, L.; BELL, M.L.; *et al.* Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change. **Environ. Health Perspect.**, v. 119, n. 5, p. 701-706, 2011. doi
- PERKINS, S.E.; ALEXANDER, L.V.; NAIRN, J.R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 20, p. 1-5, 2012. doi
- PERKINS, S.E. A review on the scientific understanding of heatwaves their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. **Atmospheric Research**, v. 164-165, p. 242-267, 2015. doi
- RODRIGUES, R.R.; WOOLLINGS, T. Impact of atmospheric blocking on South America in austral summer. **Journal of Climate**, v. 30, n. 5, p. 1821-1837, 2017. doi
- ROSENZWEIG, Y.; SOLECKI, W.D.; HAMMER, S.A.; MEHROTRA, S. **Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network: Summary for City Leaders**. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. doi
- RUSTICUCCI, M.; KYSELÝ, J.; ALMEIRA, G.; LHOTKA, O. Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 3-4, p. 679-689, 2016. doi
- SILVA, N.S.; ALVES, J.M.B.; SILVA, E.M. Avaliação da relação entre a climatologia, as condições sanitárias (lixo) e a ocorrência de arboviroses (Dengue e Chikungunya) em Quixadá-CE no período entre 2016 e 2019. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 3, p. 485-492, 2020. doi
- SKANSI, M.M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; AREVALO GROENING, J.A.; *et al.* Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global Planet Change**, v. 100, p. 295-307, 2013. doi
- SOARES, D.B.; LEE, H.L.; LOIKITH, P.C.; BARKHORDARIAN, A.; MECHOSO, C.R. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? **Int. J. Climatol.**, v. 37, n. 3, p. 1483-1493, 2017. doi
- SOUZA, C.A.; PARANHOS FILHO, A.C.; GUARALDO, E. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 51-69, 2020. doi
- TARINI, V.A.; VILAS, L.; ZANUTO, R.; SILVA, H.C.; OLIVEIRA, A.S. Calor, exercício físico e hipertermia: epidemiologia, etiopatogenia, complicações, fatores de risco, intervenções e prevenção. **Revista Neurociências**, v. 14, n. 3, p. 144-152, 2006.
- WORLD METEOROLOGY ORGANIZATION. **Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development**. Geneva: WMO, 2015. Disponível em <https://dro.dur.ac.uk/28811/1/28811.pdf>
- WORLD WEATHER. **Climate Extremes Archive**. Arizona: Arizona State University, 2014.
- WU, J.; ZHOU, Y.; GAO, Y.; FU, J.S.; JOHNSON, B.A.; *et al.* Estimation and uncertainty analysis of impacts of future heat waves on mortality in the eastern United States. **Environ Health Perspect**, v. 122, n. 1, p. 10-16, 2014. doi