



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE RISCOS E
DESASTRES
NATURAIS NA AMAZÔNIA (PPGGRD)

ADRILENE SILVA DOS SANTOS

ONDAS DE CALOR E RISCOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA: análise espaço-
temporal em Santarém-PA por meio de geotecnologias

BELÉM - PA

2025

ADRILENE SILVA DOS SANTOS

ONDAS DE CALOR E RISCOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA: análise espaço-temporal em Santarém-PA por meio de geotecnologias

Dissertação de Mestrado apresentado à Pós-Graduação de Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, e cumprimento às exigências para obtenção de grau de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia.

Área de concentração: Minimização de Riscos e Mitigação de Desastres Naturais na Amazônia
Linha de pesquisa: Ameaças Naturais no Ambiente Amazônico

Orientador (a): Dr. Giordani Rafael Conceição Sodré.

BELÉM-PA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237o Santos, Adrilene Silva dos.
Ondas de Calor e riscos climáticos na Amazônia : análise
espaço- temporal em Santarém-PA por meio de geotecnologias /
Adrilene Silva dos Santos . — 2025.
65 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Giordani Rafael Conceição Sodré
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Gestão
de Risco e Desastre na Amazônia, Belém, 2025.
1. Ondas de calor. 2. Mudanças climáticas. 3. Riscos
climáticos. I. Título.

CDD 536.2509811

ADRILENE SILVA DOS SANTOS

**ONDAS DE CALOR E RISCOS CLIMÁTICOS NA AMAZÔNIA: análise
espaçotemporal em Santarém-PA por meio de geotecnologias**

Dissertação de Mestrado, apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais da Amazônia, pela Universidade Federal do Pará.

Área de concentração: Minimização de Riscos e Mitigação de Desastres Naturais na Amazônia

Linha de pesquisa: Ameaças Naturais no Ambiente Amazônico

Data de Aprovação: 04/04/2025

Conceito: Aprovada

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **GIORDANI RAFAEL CONCEICAO SODRE**
Data: 03/06/2025 19:43:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Giordani Rafael Conceição Sodré –
Orientador

Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **JOAO DE ATHAYDES SILVA JUNIOR**
Data: 03/06/2025 19:22:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. João de Athaydes Silva Júnior –
Membro Interno
Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do
Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **LAYRSON DE JESUS MENEZES GONCALVES**
Data: 03/06/2025 18:28:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Layrson de Jesus Menezes Gonçalves
– Membro Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 **DARLENE SAUSEN**
Data: 02/06/2025 13:42:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Darlene Sausen – Membro Interno
Doutora em Agronomia
Comissão de Aeroportos da Região Amazônica
– COMARA

A minha mãe, minhas irmãs e meus amigos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que permitiu que meu caminho pudesse ser trilhado mais uma vez em direção ao conhecimento e me deu condições para realizar mais este trabalho. Agradeço à minha família, em especial à minha mãe, Edleusa Silva, às minhas irmãs Girlene e Gleyci Rocha, às minhas sobrinhas Lorena e Giovana, e aos meus amigos, em especial à Manuella Raiol, que me apresentou o programa de pós-graduação, à Priscila Ferro, que foi essencial para o meu projeto, e ao Vandrê Viegas, por todo o seu apoio no início dessa jornada. Agradeço também aos meus colegas de turma, Hugo Ferreira e Thiago Costa, por todo o apoio e dedicação em todos os momentos desse processo. Sou grato ainda aos meus amigos Alex Brown e Rodrigo Bonwoart por todo o suporte. Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, e ao meu orientador, Prof. Dr. Giordani Rafael Conceição Sodré, pelas valiosas contribuições, observações e conselhos, que foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Agradeço aos coordenadores e professores do curso, que disponibilizaram seu tempo para compartilhar seus conhecimentos. Por fim, agradeço a todos os colegas da turma de Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia pela interação e troca de experiências e saberes durante nossas disciplinas e demais atividades acadêmicas.

*“Nada é impossível para aquele que
persiste.” (Alexandre, o Grande)*

RESUMO

A presente pesquisa analisa a dinâmica espaço-temporal das ondas de calor e os riscos climáticos em Santarém, Pará, utilizando ferramentas de geotecnologia. A região amazônica tem registrado mudanças climáticas significativas, incluindo aumento das temperaturas, alterações no regime de chuvas e intensificação de eventos extremos, como secas severas e ondas de calor. O estudo considera os anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023, períodos marcados por extremos climáticos. A metodologia empregou dados de satélite e modelagem climática para calcular anomalias de temperatura e precipitação. Foram utilizados bancos de dados como CHIRPS (para precipitação), ERA5 e WorldClim (para temperatura do ar) e MapBiomas (para análise da cobertura do solo). A análise das ondas de calor seguiu a definição da Organização Meteorológica Mundial, considerando períodos consecutivos de temperaturas máximas acima da média. Além disso, o Índice de Precipitação Evapotranspiração Padronizado (SPEI) foi aplicado para avaliar a intensidade das secas na região. Os resultados indicam um aumento da frequência e duração das ondas de calor ao longo das últimas décadas, além de uma tendência de intensificação das secas. O ano de 2023 destacou-se como um dos mais críticos, registrando os maiores períodos de estiagem e as ondas de calor mais prolongadas. O estudo aponta que a interação entre eventos climáticos extremos e alterações no uso do solo contribui para a vulnerabilidade da região a riscos climáticos, impactando diretamente a população, a biodiversidade e as atividades socioeconômicas. A pesquisa reforça a necessidade de estratégias de mitigação e adaptação aos impactos das mudanças climáticas na Amazônia, considerando políticas públicas voltadas para a conservação ambiental e a resiliência climática das comunidades locais.

Palavras-chave: ondas de calor; mudanças climáticas; riscos climáticos.

ABSTRACT

This study examines the spatiotemporal dynamics of heatwaves and climate risks in Santarém, Pará, Brazil using geotechnological tools. The Amazon region has experienced significant climate changes, including rising temperatures, alterations in rainfall patterns, and an intensification of extreme events such as severe droughts and heatwaves. The analysis focuses on the years 1998, 2005, 2010, 2015, and 2023, which were marked by climate extremes. The methodology employed satellite data and climate modeling to calculate temperature and precipitation anomalies. Data sources such as CHIRPS (precipitation), ERA5 and WorldClim (air temperature), and MapBiomas (land cover analysis) were used. Heatwaves were analyzed based on the World Meteorological Organization's definition, considering consecutive periods of maximum temperatures above average. Additionally, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was applied to assess drought intensity in the region. Results indicate an increase in the frequency and duration of heatwaves over the last decades, along with a trend of intensified droughts. The year 2023 stood out as one of the most critical, with the longest drought periods and most prolonged heatwaves recorded. The study highlights that the interaction between extreme climatic events and land use changes contributes to the region's vulnerability to climate risks, directly impacting the population, biodiversity, and socioeconomic activities. The research emphasizes the need for mitigation and adaptation strategies to address the impacts of climate change on Amazon, considering public policies focused on environmental conservation and climate resilience for local communities.

Keywords: heatwaves; climate change; climate risks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo – Santarém-PA	23
Quadro 1 – Dados de coeficiente de Pearson	32
Figura 2 – Mapa de Evolução do uso e cobertura do solo em Santarém (1985-2023)	33
Figura 3 – Mapa de anomalias de temperatura máxima (1998, 2005, 2010, 2015, 2023)	35
Figura 4 – Mapa de Anomalias de precipitação no período menos chuvoso (1998-2023).....	36
Figura 5 – Gráfico da Frequência e duração das ondas de calor ao longo das décadas	38
Figura 6 – Gráfico da evolução das ondas de calor (1998-2023)	39
Quadro 2 – Comparação dos anos chaves da série de Ondas de Calor	40
Figura 7 – Gráfico da Evolução da intensidade do SPEI em Santarém (1994-2023)	41
Figura 8 – Gráfico de Relação entre o Índice SPEI e Duração Máxima das Ondas de Calor (1998-2023)	42
Quadro 3 – Correlação entre Queimadas, Duração e Número de Ondas de Calor e SPEI	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

BR – Brasil

CHIRPS – Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Station

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRU-TS – Climatic Research Unit Time-Series

DIGEO – Diretoria de Geotecnologias

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather

Forecasts EL Niño/ENOS – El Niño Oscilação Sul

ERA5 – Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis

FAO – Food and Agriculture Organization

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MAPBIOMAS – Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no

Brasil MEI – Multivariate ENSO Index

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PET – Evapotranspiração Potencial

Proarco – Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais na Amazônia Legal

QGIS – Quantum Geographic Information System

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SPI – Standardized Precipitation Index

SPEI – Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UCSB – University of California, Santa Barbara

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
4 METODOLOGIA	23
4.1 Caracterização da Área de Estudo	23
4.2 Materiais.....	24
4.2.1 Dados de precipitação do CHIRPS	24
4.2.2 Dados de Temperatura do ar do ERA5 e WorldClim	26
4.2.3 Dados de cobertura e uso do solo do MAPBIOMAS.....	28
4.2.4 Dados dos índices de seca SPEI	30
4.3 Método.....	31
5 RESULTADOS.....	33
5.1 Análise do uso e cobertura do solo de Santarém	33
5.2 Análise de temperatura do ar de Santarém	34
5.3 Análise de Precipitação de Santarém	36
5.4 Análise das Ondas de Calor de Santarém	38
5.5 Análise dos dados SPEI de Santarém	41
5.6 Análise da metodologia de Pearson	44
6 DISCUSSÃO.....	46
7 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS.....	53
APÊNDICE A	62

1 INTRODUÇÃO

A ocupação demográfica da Amazônia Legal foi intensificada na década de 1970, impulsionada principalmente por políticas governamentais voltadas à integração territorial e ao desenvolvimento econômico da região e, desde então, tem contribuído para níveis alarmantes de desmatamento. O governo militar brasileiro implementou programas como o Plano de Integração Nacional (PIN), que incentivaram a migração para a Amazônia por meio de diversos projetos, como a construção de rodovias — BR-230 (Transamazônica) e BR-163 (Cuiabá-Santarém) —, a promoção de programas de colonização agrária e a concessão de incentivos fiscais para atividades agropecuárias (Brasil, 2019). Tais iniciativas não apenas facilitaram o acesso e a ocupação da região, como também impulsionaram transformações profundas no uso e cobertura da terra, desencadeando processos de degradação ambiental que persistem até os dias atuais.

Esse processo, embora tenha promovido o crescimento populacional e econômico em algumas áreas, também trouxe impactos negativos, como desmatamento, conflitos fundiários e deslocamento de populações indígenas. A expansão foi marcada pela exploração intensa dos recursos naturais, transformando significativamente o ecossistema amazônico. Com o intuito de conter esse avanço acelerado, os governos criaram técnicas de controle do desflorestamento; no entanto, as medidas, em sua maioria, não têm efeito imediato. Uma das ações estabelecidas como forma de prevenção à exploração desenfreada foi a criação das Unidades de Conservação (UCs), introduzidas no Brasil a partir de 1937 (Brito, 2000). Atualmente, cerca de 9,2% do território brasileiro está protegido por UCs, sendo 2,26% localizadas no estado do Pará (Brasil, 2019). Embora importantes, essas áreas protegidas enfrentam desafios de gestão e fiscalização, o que compromete sua eficácia na preservação da biodiversidade e na contenção do avanço do desmatamento.

Toda a mudança que ocorre na cobertura do solo na Amazônia é monitorada pelo satélite Landsat desde 1984, e resultou em uma ferramenta indispensável para uma estimativa precisa da área total que foi desflorestada ao ano (Ferreira; Trancoso; Nogueira Filho, 2005). As práticas de Sensoriamento Remoto, subsidiadas por Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), têm demonstrado eficácia no suprimento de informações atualizadas às necessidades de mapeamento e monitoramento dos ecossistemas brasileiros, contribuindo com as formas de controle e fiscalização (Santos, 2006). Dados de satélites estão cada vez mais sendo aplicados

na área florestal, principalmente em análises multitemporais de recursos florestais, devido à possibilidade de obtenção de informações de uma determinada região em diferentes períodos (Howard, 1991). No monitoramento por meio de imagens de satélite, é comum a comparação entre mapas elaborados em épocas distintas, permitindo inferências retrospectivas na análise de séries temporais para compreender as razões históricas das modificações ambientais (Kronka *et al.*, 2005). Esse tipo de abordagem tem se consolidado como um instrumento essencial para a formulação de políticas públicas voltadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais na Amazônia.

A cada nova década, a região amazônica tem experimentado mudanças significativas em suas condições climáticas, como o aumento da temperatura média, alterações no regime de chuvas, maior prolongamento e intensidade das secas, além do desmatamento e sua relação com o clima (Nobre *et al.*, 2016). Estudos sobre climatologia se dedicam a caracterizar o estado médio da atmosfera em determinados períodos. Nesse contexto, busca-se entender como as atividades humanas, como o manejo da terra e a emissão de gases poluentes, têm provocado alterações profundas no clima da região, contribuindo para o aquecimento global e as mudanças climáticas (Nobre; Sellers; Shukla, 1991). Com base nesse conhecimento, torna-se evidente a urgência de estratégias integradas que considerem tanto a mitigação dos impactos ambientais quanto a adaptação das populações locais às novas condições climáticas.

A intensificação de episódios de estiagens e secas também constitui uma das mudanças climáticas que vêm ocorrendo com maior frequência na Amazônia. Diversas regiões têm enfrentado reduções nos níveis normais de precipitação, o que pode acarretar efeitos negativos relevantes sobre os ecossistemas locais. Um desses efeitos é a diminuição da umidade do ar e do solo, resultando no aumento da inflamabilidade da vegetação e, conseqüentemente, no risco de incêndios florestais. Entre os fenômenos naturais que contribuem para esse cenário, destaque o El Niño, que provoca um aquecimento superficial anômalo e alterações nos padrões de vento em ampla área do Oceano Pacífico tropical, com repercussões significativas em escala global (Sampaio, 2001). Com isso, a vulnerabilidade da floresta amazônica diante de eventos extremos se acentua, exigindo atenção redobrada nas estratégias de monitoramento e mitigação.

A Amazônia é a maior morada (oikos) de água doce do planeta, abriga milhares de cursos d'água superficiais subterrâneos, como o aquífero Alter do Chão, além dos rios atmosféricos, conhecidos como rios voadores. No processo dialético da vida amazônica, a relação entre secas e cheias faz parte do equilíbrio dinâmico da região. Porém, estudos sobre mudanças climáticas e suas manifestações nas planícies de inundação revelam o aumento da

frequência e da intensidade de fenômenos naturais atípicos, como secas e inundações (Marengo; Spinoza, 2015; Anderson *et al.*, 2013; Borma; Nobre, 2013; Marengo *et al.*, 2009). Tais fenômenos podem ser potencializados por ações antrópicas em nível local e regional.

Santarém, objeto de análise deste estudo, é uma cidade de porte médio localizada na mesorregião do Baixo Amazonas, no estado do Pará, que exerceu papel fundamental na intensificação e consolidação da ocupação do território oeste paraense. O município tem gerado preocupação tanto para a comunidade científica quanto para os moradores das áreas ribeirinhas, devido aos recentes episódios de seca amplamente noticiados pela mídia nacional e internacional. Santarém apresenta grandes áreas de influência agrícola, especialmente nas redondezas, com destaque para o cultivo de grãos em regiões tradicionalmente ocupadas pela pecuária, o que evidencia a relevância de se analisar as condições meteorológicas e climáticas locais, dada sua influência direta sobre a produtividade. Além disso, o município abriga um dos maiores polos turísticos da região, Alter do Chão, que vem sendo afetado por severas consequências ambientais, como a seca de rios, lagos e igarapés, além do aumento de incêndios florestais, provocando danos significativos aos ecossistemas e à população local (Aragão *et al.*, 2018). Esses impactos reforçam a urgência de medidas integradas de monitoramento ambiental e planejamento territorial sustentável.

A região Amazônica vem experimentando a ocorrência e recorrência de episódios climáticos extremos, tanto de excesso quanto de déficit pluviométrico, de modo que a população tem sofrido com secas e estiagens intensas e duradouras, bem como com períodos chuvosos fortes e prolongados, frequentemente associados a enchentes e inundações. Durante os períodos de pluviosidade escassa, os níveis fluviométricos reduzem-se consideravelmente, comprometendo a produção de alimentos, como a agricultura e a pesca. Por outro lado, em situações de precipitação excessiva, municípios com grandes áreas urbanas e infraestrutura precária enfrentam sérios impactos sociais e econômicos, como o aumento de doenças tropicais transmitidas por vetores, danos materiais decorrentes do alagamento de vias e residências, queda de árvores e até perdas humanas (Fearnside, 2007; Jakimow *et al.*, 2018). Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de políticas públicas adaptativas que considerem a variabilidade climática e suas múltiplas consequências para a população amazônica.

Nas últimas décadas, uma série de extremos climáticos deflagraram impactos nas comunidades e ecossistemas da Amazônia. Por exemplo, as secas de 1998, 2005, 2010 e 2015 caracterizaram-se pela severidade e área de abrangência, impactando grande parte dos estados amazônicos, cujos registros de nível fluviométrico de alguns importantes rios atingiram marcas

mínimas históricas (Lewis *et al.*, 2011; Marengo *et al.*, 2008; Marengo *et al.*, 2013; Zeng *et al.*, 2008), além de um aumento de incêndios florestais (Cardoso *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2006). Analogamente, os períodos chuvosos extremos, como aqueles ocorridos em 2009 e 2012 causaram efeitos adversos em vários setores da economia (Marengo *et al.*, 2013). Essa proximidade de ocorrência de tais extremos climáticos está em conformidade com os prognósticos do relatório do IPCC, que indicam uma maior frequência de eventos anômalos em cenários de clima futuro (Ipcc, 2013).

Outra fonte de alteração do regime de chuvas está associada ao processo de desmatamento. Por exemplo, os estudos de Spracklen *et al.* (2012) e Spracklen *et al.* (2015) mostram que há uma redução da quantidade de chuva da Amazônia transportada para outros locais nas massas de ar que viajam sobre áreas desmatadas. Isso significa que o desmatamento causa alterações no ciclo hidrológico que, por sua vez, impacta na vazão dos rios amazônicos, além de outros impactos nos ecossistemas e sistemas produtivos da população.

Pesquisadores têm demonstrado grande preocupação em identificar tendências climáticas nos elementos meteorológicos, especialmente na temperatura do ar, tanto em escala local quanto regional e global, devido ao fato de essa variável apresentar rápida resposta às mudanças na cobertura do solo (Anunciação, 2001; Frich *et al.*, 2002; Vincent *et al.*, 2005; Minuzzi; Vianello; Sediyaama, 2010; Silva, 2015). Esse interesse decorre da importância da temperatura como indicador sensível das alterações ambientais, fundamental para compreender os impactos das atividades humanas e naturais no clima.

Nesse sentido, este trabalho visa contribuir com os estudos sobre o comportamento do clima em escala regional, levando em conta os episódios mais recentes onde é possível observar os agravos climáticos que ocorrem nos anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023, períodos marcados pelas secas mais intensas registradas na região amazônica. Dessa forma, analisar cada período de forma isolada pode ajudar a entender como as ações antrópicas associadas a extremos climáticos podem criar ambientes vulneráveis a riscos climáticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Elaborar um mapeamento de risco climático indicando quais parâmetros ambientais serão mais afetados, a temperatura do ar média, mínima, máxima, intensidade dos episódios de ondas de calor e variabilidade de precipitação em Santarém-PA.

2.2 Específicos

- Avaliar as mudanças no uso e cobertura do solo e sua influência sobre a variabilidade dos parâmetros climáticos em Santarém-PA nos anos de extremos climáticos (1998, 2005, 2010, 2015 e 2023);
- Analisar a frequência, duração e intensidade das ondas de calor na região, correlacionando-as com padrões de precipitação e períodos de seca prolongada;
- Investigar como as atividades antrópicas modulam a ocorrência e intensificação dos eventos de seca e ondas de calor.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O planeta tem registrado eventos extremos de calor desde o final do século XIX. Contudo, a partir do século XXI, esses episódios se intensificaram, com novos recordes de temperatura e duração sendo estabelecidos (Fischer; Knutti, 2015). Um exemplo notável ocorreu em 1995, quando a região norte dos Estados Unidos enfrentou uma onda de calor histórica, com temperaturas médias em junho superando os 38°C (Kunkel *et al.*, 1996). Na Europa central e ocidental, ondas de calor severas e prolongadas atingiram a região em 2003 e 2010, estabelecendo novos recordes máximos de temperatura (Barriopedro *et al.*, 2011; Schär *et al.*, 2004). Esses eventos globais fornecem um panorama das mudanças climáticas que também impactam a América do Sul, onde se observa uma redução na frequência e intensidade de eventos extremos de frio, acompanhada por um aumento moderado de eventos extremos de calor (Skansi *et al.*, 2013).

Rusticucci (2012) identificou, para a América do Sul, uma tendência positiva na frequência de extremos quentes relacionados à temperatura mínima durante a segunda metade do século XX, enquanto a ocorrência de eventos extremos de frio apresentou tendência negativa. Esse comportamento reflete o aumento das temperaturas médias anuais na região, padrões também observados no Brasil desde 1960 (Marengo; Camargo, 2008; Skansi *et al.*, 2013; Soares; Lee; Loikith, 2017; Vincent *et al.*, 2005).

No Brasil, desde 1960, a maior parte do território registra um aumento significativo nas temperaturas mínimas e máximas (Marengo; Camargo, 2008). Entre 1901 e 2012, observou-se um aumento médio na temperatura da superfície entre 1,75°C e 2,5°C nas regiões Centro e Sul (Ipcc, 2014). No período de 1961 a 2008, Ricce *et al.* (2009) identificaram tendências positivas nas temperaturas máxima, média e mínima anuais no estado do Paraná, localizado no sul do Brasil. De forma semelhante, Sansigolo e Kayano (2010) verificaram um aumento significativo na temperatura mínima, em torno de 1,6°C, no período de 1910 a 2010. O Nordeste brasileiro, conhecido por seu clima árido e histórico de grandes secas, tem apresentado um aumento progressivo no número, intensidade e duração de eventos extremos de calor desde a década de 1990 (Moura, 2016). Em dezembro de 2012, o Rio de Janeiro atingiu a temperatura recorde de 43,2°C, a mais alta registrada desde 1915. Em fevereiro de 2010, o litoral de São Paulo enfrentou uma onda de calor que provocou 32 mortes. Outros eventos extremos incluem temperaturas recordes em Cuiabá, Brasília e Manaus, com impactos significativos na infraestrutura urbana e na saúde pública (Inmet, 2015).

Apesar desses registros, os estudos sobre ondas de calor no Brasil ainda são insuficientes para representar adequadamente a vasta extensão territorial do país. Bitencourt *et al.* (2016) destacaram a necessidade de pesquisas regionais que analisem aspectos como frequência, duração e intensidade desses eventos.

No estado do Pará, por exemplo, as principais atividades agrícolas, como a produção de arroz, feijão, milho e mandioca, são diretamente afetadas pelas variações de temperatura e precipitação (Santos; Oliveira, 2017; Aguilla *et al.*, 2020). As ondas de calor representam um risco tanto para a produtividade agrícola quanto para a qualidade de vida da população local.

Dada a relevância de compreender a ocorrência de ondas de calor no estado do Pará, especialmente no município de Santarém, essa pesquisa se propõe a investigar um fenômeno que ainda não possui suas principais características devidamente compreendidas. Santarém ocupa uma posição estratégica no cenário nacional, destacando-se economicamente pela exploração de recursos naturais, como a madeira, e pela agricultura, embora essas atividades enfrentem desafios relacionados à sustentabilidade. Além disso, a cidade é um ponto de conexão crucial para o escoamento de produtos provenientes do interior da Amazônia. Tais eventos climáticos não afetam apenas a economia local, mas também a infraestrutura urbana e a qualidade de vida da população.

No âmbito ambiental, eventos como o El Niño intensificam as ondas de calor, alterando padrões de precipitação e contribuindo para secas severas. Em 1998, por exemplo, uma intensa seca afetou mais de 5 milhões de hectares de florestas no Brasil, causando prejuízos ambientais e econômicos significativos (Cochrane, 2003). Em 2005, outra seca severa, atribuída ao aquecimento do Atlântico Norte, levou a uma redução histórica nos níveis dos rios na Amazônia, agravando a vulnerabilidade ambiental e social da região (Inmet; Cptec, 2005). Trazendo à tona o viés ambiental, Souza *et al.* (2009) destacam que as mudanças climáticas, incluindo as ondas de calor, desempenham um papel crucial nas alterações nos padrões de precipitação, acarretando impactos significativos nos ciclos hidrológicos e nos recursos hídricos. O autor ressalta que essas mudanças influenciam a temperatura média e a distribuição das chuvas, aumentando sua variabilidade.

Essa maior variabilidade pode resultar em eventos extremos, como inundações e secas, que se tornam mais intensos e frequentes. A intensificação dos incêndios florestais é um exemplo citado por Soriano *et al.* (2020), que apontam sua forte relação com essas secas severas. Segundo os autores, a intensidade desses eventos está diretamente ligada à umidade relativa e à temperatura do ar, sendo ainda influenciada pela velocidade dos ventos, que desempenha um papel significativo na propagação e na gravidade do fogo.

Ao tratar das questões relacionadas às alterações climáticas, é fundamental identificar o fenômeno em termos de escala espacial e temporal. Uma mudança climática é caracterizada pela variação em uma das principais componentes do clima, como temperatura ou precipitação, em uma escala macro ou regional, ao longo de um período superior a trinta anos consecutivos. Caso essa variação ocorra em um intervalo de tempo menor, é classificada como oscilação climática (Livi, 2002).

Os estudos do IPCC apontam que a temperatura média global aumentou $0,7^{\circ}\text{C}$ no último século. Contudo, esses valores variam quando analisados em cidades específicas da América do Sul. Por exemplo, Quito, no Equador, registrou um aumento de apenas $0,1^{\circ}\text{C}$, enquanto São Paulo, no Brasil, apresentou um incremento de $0,6^{\circ}\text{C}$ (Marengo; Valverde, 2007). Esses dados destacam a relevância dos estudos de climatologia regional em diferentes escalas espaciais, considerando que a dinâmica climática global se manifesta de maneiras diversas sobre a superfície terrestre.

De acordo com Marengo e Valverde (2007), os modelos do IPCC indicam um aquecimento significativo durante os invernos e nas estações de transição, além de uma tendência para noites mais quentes, com um aumento mais acentuado nas temperaturas mínimas em comparação às máximas. Essa configuração eleva o risco de ocorrência de fenômenos como ondas de calor. Apesar de os modelos apresentarem apenas tendências para cenários futuros, é possível realizar análises meteorológicas e climáticas que fundamentem esses estudos ou até mesmo proponham novas abordagens sobre os diversos fenômenos que afetam uma localidade específica.

Segundo Miller (2021), “é provável que as alterações climáticas afetem as economias não somente pelo aquecimento, mas também pelo aumento de eventos extremos prolongados, como ondas de calor”. O aumento da temperatura tem sido amplamente estudado, e, diante dos cenários críticos atuais, o tema tem ganhado crescente importância devido aos riscos sociais e ambientais associados. Em muitas regiões do mundo, o calor extremo afeta significativamente diversos setores da sociedade. Períodos prolongados de temperaturas elevadas impactam severamente a produtividade agrícola e pecuária, além de provocar aumentos consideráveis na demanda por energia elétrica.

Conforme Moreira *et al.* (2022), “o aumento da temperatura atmosférica e do nível oceânico de forma não natural começa a acarretar outras mudanças que prejudicam a vida saudável do homem no ambiente e provocam alterações radicais na biodiversidade”. Assim, pode-se estabelecer uma relação de causa e efeito, evidenciando os impactos negativos para o meio ambiente.

De acordo a Organização Mundial de Meteorologia (2015), embora todos os indivíduos estejam potencialmente expostos às ondas de calor, o nível de risco pode variar devido a fatores como residir em grandes cidades. As OC tornam-se mais intensas em áreas urbanas devido à configuração dessas regiões, caracterizadas por uma abundância de materiais com menor albedo, como pavimentação asfáltica e concreto, e pela escassez de cobertura vegetal. Esses fatores aumentam a emissividade de energia solar no ambiente urbano, elevando as temperaturas e gerando desconforto para a população (Souza *et al.*, 2020). De acordo com Laaidi *et al.* (2012), o risco de mortalidade associado à exposição a altas temperaturas é mais elevado em áreas urbanas, em razão do fenômeno das ilhas de calor. No âmbito social, vários estudos em áreas urbanas revelam uma associação entre o aumento da mortalidade e as altas temperaturas, seja por meio das temperaturas máximas ou mínimas, índices de calor ou, em alguns casos, outras condições meteorológicas. Os efeitos na saúde estão frequentemente relacionados à exposição prolongada do corpo humano a temperaturas elevadas, superiores àquelas com as quais a população está acostumada (McGehee; Mirabelli, 2001).

A análise de diversos períodos de ondas de calor indica que episódios de longa duração e com temperaturas elevadas têm um impacto mais significativo na mortalidade, a principal causa de morte diretamente associada ao calor é a insolação, embora as ondas de calor também causem aumentos na mortalidade por outras condições, especialmente doenças circulatórias e respiratórias. Estudos epidemiológicos indicam que o excesso de vítimas se concentra em grupos de risco específicos, como idosos, pessoas com condições médicas crônicas e indivíduos socialmente isolados, que são particularmente vulneráveis. O uso de ar-condicionado é considerado o fator de proteção mais eficaz contra distúrbios relacionados ao calor. As ondas de calor podem causar doenças de maneira indireta, agravando condições crônicas, e de forma direta, provocando doenças associadas ao calor (HRI). As HRI clássicas incluem erupções cutâneas, câibras de calor, síncope de calor, exaustão pelo calor e insolação. A insolação, em particular, é uma emergência médica caracterizada por hipertermia e disfunção do sistema nervoso central (Hajat *et al.*, 2002).

Em 1998, ano em que ocorreu um evento El Niño muito intenso (Sampaio; Satyamurty, 1998), mais de 5 x106 ha de florestas no Brasil foram atingidos por ocorrência accidental de fogo (Cochrane, 2003). Um incêndio que aconteceu naquele ano em Roraima (Kirchoff; Escada, 1998) foi talvez o desastre ambiental mais conhecido da Amazônia, motivando a expansão de programas de monitoramento de queimadas e de risco de incêndios florestais para toda a região, como o Programa de Prevenção e Controle de Queimadas e Incêndios Florestais

na Amazônia Legal (Proarco/IBAMA).

Em 2005 constatou-se também uma redução importante nos valores de precipitação sobre a Amazônia, atingindo principalmente regiões a oeste e sudoeste desta bacia, onde o nível de vários rios abaixou significativamente (Inmet; Cptec, 2005). Por exemplo, os rios Acre, Madeira, Juruá e Solimões apresentaram cotas de nível substancialmente baixas (ANA, 2006). Eventos de estiagem nestas regiões são raros, e os registros indicam que o ano de 2005 teve o menor índice de precipitação das últimas décadas (Inmet; Cptec, 2005).

Contudo, diferente do El Niño em 1998, as anomalias de precipitação que ocorreram em 2005 na Amazônia foram atribuídas a um aquecimento anormal das águas superficiais do Atlântico Norte, o que intensificou os padrões de subsidência sobre a Amazônia causando inibição da formação de chuva (Inmet; Cptec, 2005). Apesar das condições meteorológicas de grande escala em 1998 serem diferentes das de 2005 sobre a Amazônia, os efeitos sobre o aumento da flammabilidade e ocorrência de fogo na vegetação foram potencialmente semelhantes. A constatação desse fato pode ser observada com total de focos de calor detectados pelo satélite NOAA-12 em setembro de 2005 no Acre, Amazonas e Rondônia, que foram substancialmente maiores em relação ao mesmo período no ano anterior (Inmet; Cptec, 2005). Além dos dados de sensoriamento remoto, houve também relatos na imprensa de áreas com ocorrência fogo e poluição atmosférica por fumaça.

Os episódios de El Niño e La Niña, responsáveis pela intensificação das ondas de calor, estão associados às fases positiva e negativa do fenômeno El Niño/Oscilação do Sul (ENOS). Esses episódios resultam da resposta do oceano ao enfraquecimento ou fortalecimento dos ventos alísios que sopram próximos à linha do Equador, causando o aquecimento ou resfriamento da temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Sul (Kousky; Kagano; Cavalcanti, 1984). A relação entre El Niño e precipitação é bem estabelecida em regiões tropicais (Ropelewski; Halpert, 1987). Nas regiões Nordeste e Norte do Brasil, por exemplo, há uma forte ligação entre a intensidade do El Niño e a ocorrência de secas, enquanto na região Sul do Brasil verifica-se uma tendência de aumento na precipitação durante esses eventos, devido ao fortalecimento do jato subtropical na alta atmosfera.

O ano de 2023 apresentou desafios climáticos severos para a Amazônia, marcados por uma das piores secas dos últimos 125 anos (Marengo *et al.*, 2018). Os impactos da seca extrema foram vastos, afetando profundamente o meio ambiente, a sociedade e a economia da região. A mortandade em massa de espécies aquáticas, especialmente em lagos e afluentes ao longo da calha norte dos rios Solimões e Amazonas, foi um dos resultados mais graves. Esse evento comprometeu o acesso a alimentos e água potável para as comunidades ribeirinhas, além de

provocar perdas econômicas significativas, devido às dificuldades no transporte de alimentos e bens essenciais (Ottoni *et al.*, 2023).

Dentre os fenômenos climáticos que contribuíram para esse cenário, o El Niño (ENSO), caracterizado pelo aquecimento das águas do oceano Pacífico na região equatorial, teve papel central. Adicionalmente, o aquecimento das águas do Atlântico tropical também desempenhou um papel relevante, com ambos contribuindo para secas anômalas na Amazônia (Cai *et al.*, 2020). No entanto, estudos recentes indicam que o impacto do El Niño pode ter sido secundário frente às mudanças climáticas globais que agravaram a seca em 2023, sugerindo um papel predominante do aquecimento global na intensificação desse fenômeno extremo (Clarke *et al.*, 2024). Neste contexto, o estudo contribuirá para a compreensão do comportamento climático em escala regional, considerando os episódios mais recentes, nos quais se observam os agravamentos climáticos ocorridos nos anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023, períodos marcados pelas secas mais intensas registradas na região amazônica.

As ondas de calor também geram impactos consideráveis na saúde pública, particularmente em áreas urbanas. A Organização Mundial de Meteorologia (2015) aponta que materiais como asfalto e concreto contribuem para o fenômeno das ilhas de calor, elevando as temperaturas em cidades e exacerbando os riscos para grupos vulneráveis, como idosos e pessoas com doenças crônicas (Souza *et al.*, 2020). Além disso, o calor extremo está associado a um aumento na mortalidade por doenças circulatórias e respiratórias (Hajat *et al.*, 2002).

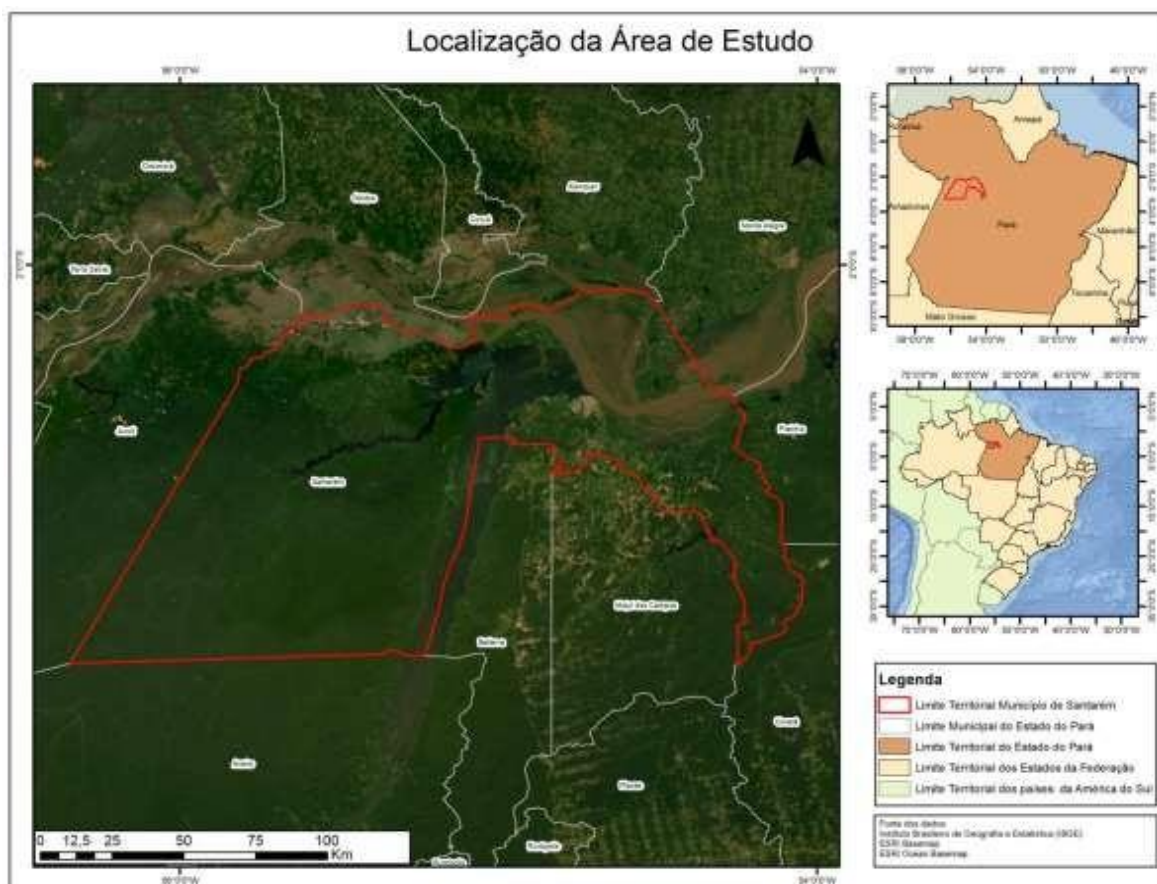
Por fim, é essencial ampliar os estudos sobre os impactos das ondas de calor no Brasil, com foco em soluções regionais para mitigar seus efeitos. Considerando as projeções do IPCC e as observações recentes, é fundamental implementar medidas de adaptação que reduzam os impactos ambientais, econômicos e sociais desse fenômeno, especialmente em um cenário de crescente mudança climática global.

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da Área de Estudo

Esta pesquisa foi realizada em Santarém, município localizado na Amazônia Oriental, região oeste do Pará, mesorregião do Baixo Amazonas, entre Belém e Manaus, nas coordenadas 02°26'18"S e 54°42'00"W (Figura 1). É um município que retrata a diversidade amazônica, na abundância e exuberância de seus rios. É o terceiro município mais populoso do Estado do Pará, com 31.942 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024). O município possui 17.898,389km², com 1/6 de seu território banhado pela bacia do rio Amazonas. Aproximadamente 98.262.155km² (5,49%) são áreas de várzea, um ecossistema característico da Amazônia sempre capaz de surpreender o observador por sua incomparável diversidade e heterogeneidade (Homma, 2008), das diversas faces da Amazônia ou das “amazônias” (Porto-Gonçalves, 2008).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo — Santarém-PA



4.2 Materiais

A metodologia de pesquisa baseia-se em um levantamento bibliográfico e documental de publicações, artigos, teses, notas técnicas, além de matérias jornalísticas e reportagens sobre eventos de ondas de calor, secas e variabilidade climática em Santarém-PA.

Como produto final, foi gerado um Mapa de Risco Climático, que indicou quais parâmetros ambientais e sociais foram mais afetados, considerando os limiares de temperatura média e máxima do ar (que configuram a onda de calor) e a duração desses eventos. Com a finalidade de identificar quais parâmetros ambientais foram mais afetados, a temperatura do ar média, mínima, máxima, intensidade dos episódios de ondas de calor e variabilidade de precipitação em Santarém-PA, foram utilizados alguns bancos de dados essenciais para construção deste estudo, como os Dados de precipitação do CHIRPS (*Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Station*); Dados de Temperatura do ar do ERA5 e WorldClim; Dados de cobertura e uso do solo do MAPBIOMAS; e Dados dos índices de seca SPEI.

4.2.1 Dados de precipitação do CHIRPS

O CHIRPS é um banco de dados global de precipitação com cobertura espacial que se estende entre as latitudes de 50°S e 50°N e abrange mais de 30 anos de registros, desde 1981.

Com resolução espacial de 0,05°, os dados são interpolados utilizando informações de estações meteorológicas in situ, o que permite criar séries temporais adequadas para análise de tendências e monitoramento climático. A metodologia empregada combina estimativas de precipitação geradas pela técnica *Cold Cloud Duration* (CCD) com dados de superfície, com a finalidade de fornecer uma base confiável para o estudo climático, sendo uma ferramenta alternativa útil, especialmente no território brasileiro (Costa *et al.*, 2019; Santos; Cunha; Ribeiro Neto, 2019; Silva *et al.*, 2019; Pereira *et al.*, 2018; Castelhana; Pinheiro; Roseghini, 2017).

A precipitação desempenha um papel crucial no diagnóstico de condições de seca, pois sua análise pode indicar períodos críticos de escassez de chuvas, facilitando a identificação de episódios de seca e fornecendo subsídios para medidas preventivas. A alta resolução temporal e espacial dos dados do CHIRPS permite, além disso, monitorar eventos extremos, como chuvas intensas ou secas prolongadas, essenciais para compreender fenômenos climáticos extremos, incluindo as ondas de calor.

Outro aspecto importante é a interação entre precipitação e temperatura. O equilíbrio hídrico da atmosfera impacta diretamente as variações térmicas, e o uso dos dados do CHIRPS pode proporcionar uma visão mais clara das condições que favorecem o surgimento de ondas de calor. Ao longo do tempo, esses dados ajudam a detectar mudanças no padrão

climático, como variações na distribuição e na intensidade das chuvas.

Esses dados também são amplamente aplicados em modelos climáticos para prever tendências futuras. A adição de dados precisos sobre precipitação melhora a acuracidade das projeções climáticas, permitindo um entendimento mais detalhado da variabilidade climática e possibilitando uma análise das possíveis ocorrências de eventos extremos, como ondas de calor. Além disso, a precipitação tem grande relevância para a saúde dos ecossistemas e dos recursos hídricos, sendo essencial para a gestão sustentável desses recursos.

Em resumo, os dados do CHIRPS são fundamentais para o estudo das condições climáticas, incluindo as flutuações na precipitação e eventos extremos, contribuindo para o entendimento das ondas de calor e da variabilidade climática. Tais informações são vitais tanto para pesquisas climáticas como para a elaboração de estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

Os mapas apresentados foram gerados a partir dos dados do CHIRPS, que fornece estimativas de precipitação com alta resolução espacial e temporal. Desenvolvido pelo *Climate Hazards Group* da Universidade da Califórnia, Santa Bárbara (UCSB), em parceria com o *United States Geological Survey* (USGS), esse conjunto de dados combina informações de satélites com dados de estações meteorológicas, oferecendo uma cobertura global desde 1981. Sua alta resolução de $0,05^\circ$ possibilita a análise de tendências climáticas e variações de precipitação, essenciais para monitoramento de secas e outros eventos climáticos extremos.

Para este estudo, foram utilizados dados mensais de precipitação dos meses de junho a novembro entre 1994 e 2024. Com base nesses dados, foram calculados os acumulados de precipitação de cada ano, e a média desses acumulados foi então determinada para calcular as anomalias, comparando os valores anuais com a média dos acumulados.

A geração das imagens raster a partir dos dados do CHIRPS permitiu identificar padrões espaciais das anomalias de precipitação em Santarém, no Pará, nos anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023.

As anomalias foram calculadas em relação à média climatológica de longo prazo, destacando variações significativas, como períodos de seca ou excesso de precipitação. Esses dados oferecem uma análise detalhada das mudanças climáticas e permitem um planejamento ambiental mais eficaz, com foco na adaptação a eventos extremos como secas ou chuvas excessivas, especialmente na região amazônica.

A construção do mapa utilizou fontes confiáveis e precisas, com a base cartográfica fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023). Esse instituto garantiu informações detalhadas sobre os limites municipais e a rede hidrográfica, assegurando

alta acuracidade espacial e aderência aos padrões normativos. Além disso, imagens raster do CHIRPS foram incorporadas para fornecer dados climáticos relevantes, garantindo que o mapeamento refletisse com precisão as condições geográficas e climáticas da área estudada.

4.2.2 Dados de Temperatura do ar do ERA5 e WorldClim

Tendo em vista os dados do ERA5 (*5th Generation of European ReAnalysis*), este banco de dados possui resolução temporal de 1 hora e uma grande gama de dados climatológicas como temperatura do ar, precipitação velocidade do vento entre outras, dispostos em 137 camadas da atmosfera o que confere ao ERA5 a capacidade de detectar fenômenos atmosféricos mais sutis que outros bancos de dados (Hersbach *et al.*, 2020). Os dados do ERA5 também são de acesso livre. Ele possui bom desempenho em representar variáveis climáticas diversas como a velocidade do vento, temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração em diversas regiões do globo incluindo o Brasil (Dullaart *et al.*, 2020; Di Napoli *et al.*, 2020; Karimi *et al.*, 2020; Souza; Reboita, 2020; Ullah *et al.*, 2020).

Os dados de temperatura do ar do ERA5 (*Reanalysis 5*) são uma fonte valiosa de informações para o estudo de ondas de calor e a análise da variabilidade de parâmetros climáticos. O ERA5 é um projeto de reanálise global realizado pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF) e fornece estimativas consistentes e coerentes de variáveis climáticas em uma grade espacial e temporal. Algumas maneiras de como esses dados podem ser utilizados:

Os dados de temperatura do ar fornecidos pelo ERA5 permitem identificar eventos de temperatura extrema, como ondas de calor. Isso é crucial para compreender a frequência, intensidade e duração desses eventos. Ao longo do tempo, os dados podem ser usados para analisar tendências nas temperaturas do ar. Isso inclui a detecção de mudanças de longo prazo nas condições climáticas, o que é relevante para entender a variabilidade climática.

Outra forma de utilização é através da caracterização da variabilidade climática em diferentes escalas temporais. Isso é fundamental para distinguir entre padrões climáticos normais e anomalias associadas a eventos extremos, como ondas de calor. Além de analisar a média das temperaturas, os dados do ERA5 permitem avaliar extremos térmicos, como temperaturas máximas e mínimas, fornecendo insights sobre a variabilidade diurna. Permitindo assim, a comparação entre as temperaturas observadas e as médias climatológicas podendo revelar anomalias térmicas, indicando variações significativas em relação às condições normais.

Os dados do ERA5 também são frequentemente utilizados como entrada para modelos

climáticos, ajudando a simular e prever eventos climáticos, incluindo ondas de calor. Isso é crucial para entender as possíveis implicações futuras das mudanças climáticas. À medida que temperaturas extremas têm implicações na saúde humana, ecossistemas e agricultura. Os dados do ERA5 podem fornecer informações essenciais para pesquisas sobre os impactos dessas condições extremas.

A compreensão da variabilidade climática é fundamental para a formulação de políticas de adaptação às mudanças climáticas. Os dados do ERA5 oferecem informações confiáveis que são essenciais para embasar essas políticas.

Os dados do ERA5 foram utilizados para calcular a frequência das ondas de calor, utilizamos os dados de temperatura máxima diária no período de 1994 a 2023 (30 anos), somente para o período menos chuvoso (junho a novembro).

Também foram utilizados os dados do WorldClim no formato geotiff com o objetivo de calcular a anomalia espacial da temperatura média máxima para os anos de interesse. Os dados de temperatura máxima utilizados na elaboração dos mapas a seguir foram extraídos da base "*Historical Monthly Weather Data*" do WorldClim, que disponibiliza informações climáticas históricas de alta resolução espacial. Essas informações são compiladas a partir de diversas fontes meteorológicas globais, incluindo estações terrestres e sensores remotos.

A anomalia de temperatura foi calculada comparando os valores observados de temperatura máxima com a média climática de um período de referência específico. Esse procedimento é essencial para avaliar variações térmicas ao longo do tempo e seus impactos ambientais e climáticos. Os dados do WorldClim foram escolhidos devido à sua confiabilidade e abrangência global, permitindo uma análise detalhada das tendências de aquecimento ou resfriamento em diferentes regiões.

A metodologia aplicada na obtenção dos dados do WorldClim envolve interpolação espacial avançada, garantindo maior precisão na estimativa das temperaturas para áreas sem cobertura direta de estações meteorológicas. Assim, a utilização dessa base de dados proporciona uma representação robusta das variações climáticas, fundamental para estudos de mudanças ambientais e modelagem climática.

Os dados históricos mensais de temperatura abrangem o período de 1960 a 2018 e foram ajustados a partir do CRU-TS-4.06 pela *Climatic Research Unit*, da *University of East Anglia*, utilizando o WorldClim 2.1 para correção de viés. As variáveis disponíveis incluem temperatura mínima média (°C), temperatura máxima média (°C) e precipitação total (mm), com resolução espacial de 2,5 minutos (~21 km² no equador), 5 minutos (~85 km²) ou 10 minutos (~340 km²).

Cada download consiste em um arquivo compactado ("zip") contendo 120 arquivos

GeoTiff (.tif), representando os dados mensais para um período de 10 anos.

Para o cálculo das anomalias dos anos de interesse do estudo, foram utilizados somente os dados de temperatura máxima dos anos de 1990 a 2021 dos meses de junho a novembro, que representam os meses mais secos. Esse recorte temporal foi escolhido para garantir a análise das variações climáticas mais recentes, possibilitando conclusões mais precisas sobre tendências térmicas e seus impactos ambientais.

Dessa forma, a escolha do WorldClim como fonte de dados para a determinação das anomalias de temperatura máxima reforça a qualidade e a confiabilidade das análises, permitindo inferências mais seguras sobre as mudanças climáticas em nível local, regional e global.

Este estudo analisou as anomalias de temperatura máxima em Santarém entre os anos de 1998, 2005, 2010 e 2015, utilizando dados processados no software QGIS. As anomalias de temperatura foram representadas em mapas temáticos, com variações térmicas indicadas por uma escala de cores, conforme a legenda. Valores negativos da anomalia indicam um resfriamento anômalo em relação à média histórica, enquanto valores positivos refletem um aquecimento anormal.

4.2.3 Dados de cobertura e uso do solo do MAPBIOMAS

O projeto MapBiomass possui o propósito de colaborar para o entendimento da dinâmica do uso do solo no Brasil e em outros países tropicais, tendo como base o desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil a partir de 1985 até os dias atuais (com posterior atualização anual); criação de uma plataforma para facilitar a disseminação da metodologia para outros países e regiões interessadas utilizando a mesma base de algoritmos; e o estabelecimento de uma rede colaborativa de especialistas nos biomas brasileiros para o mapeamento da cobertura do solo e da sua dinâmica de mudanças (MapBiomass, 2023).

O surgimento das mudanças de uso e cobertura do solo ocorre geralmente em conformidade com as necessidades e padrões exigidos pela economia mundial, que possui diferentes efeitos principalmente na sociedade e nos ecossistemas. Deste modo, a análise das possíveis modificações na paisagem, bem como os seus impactos, é uma ação complexa, tornando-se cada vez mais importante o prosseguimento de pesquisas que avaliem com precisão a intensidade das mudanças no uso e na cobertura do solo (Galharte; Villela; Crestana, 2014).

Os métodos desequilibrados de uso e ocupação de terra e, sobretudo, o uso intenso dos bens naturais são fatores relevantes que vêm gerando preocupações com o meio ambiente. Há

também um acréscimo da demanda associada à compreensão dos padrões ambientais a nível regional, permitindo o conhecimento e a formação relevante dos sistemas paisagísticos e particularidades da fauna e da flora de uma região (Carvalho; Carvalho, 2012).

A substituição das paisagens naturais por diversos tipos de usos da terra é o que mais tem contribuído com o aumento da fragmentação florestal. Isso ocorre principalmente pelos modelos econômicos exploratórios dos recursos naturais e os diferentes ciclos de crescimento e dispersões populacionais (Ribeiro *et al.*, 2009; Tabarelli *et al.*, 2010).

A partir do projeto MapBiomias, será possível exportar dados de cobertura do solo, a fim de acompanhar o comportamento das mudanças ao longo dos anos de interesse desse estudo (1998; 2005; 2010; 2015; 2023). Os dados obtidos pelo MapBiomias podem ser cruciais para o estudo de ondas de calor e a análise da variabilidade de parâmetros climáticos, pois a cobertura do solo desempenha um papel significativo na regulação térmica e nos padrões climáticos.

O mapeamento multitemporal do uso e cobertura do solo no município de Santarém foi realizado utilizando dados da plataforma MapBiomias. Inicialmente, o site da plataforma foi acessado, onde foi utilizado um código disponibilizado pela própria equipe do MapBiomias, referente à Coleção Nove, a versão mais recente lançada. O município de Santarém foi selecionado como área de estudo. A partir dessa seleção, foram obtidas imagens para o ano de 1985 (primeiro ano disponível na plataforma e utilizado como referência) e para os anos de interesse da pesquisa: 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023. Para esses anos, foram utilizadas imagens Landsat.

As imagens foram processadas no software QGIS com o auxílio de um plug-in desenvolvido pela Diretoria de Geotecnologias (DIGEO) da Secretaria de Meio Ambiente do Estado. Esse plug-in permite a extração de feições de cada pixel em formato vetorial, já classificadas de acordo com o uso e ocupação do solo, conforme o manual do MapBiomias.

Os dados foram categorizados em dois grandes grupos: uso natural e uso antrópico. O grupo uso natural incluirá subclasses como formação florestal, formação savânica, mangue, floresta alagável, restinga arbórea, campo alagado, áreas pantanosas, formação campestre, apicum, afloramento rochoso e restinga herbácea, todas agrupadas em uma única classe. O grupo uso antrópico também foi consolidado em uma única classe, subdividindo-se em pastagem, agricultura e silvicultura.

Por fim, foi realizado o cálculo da área ocupada em hectares para cada classe, e o arquivo vetorial será finalizado para análise e interpretação dos resultados. A produção do mapa será realizada com base em dados provenientes de diferentes fontes confiáveis. Foi utilizada a base cartográfica disponibilizada pelo IBGE (IBGE, 2023), que fornecerá informações sobre limites

municipais e hidrografia, garantindo precisão espacial e conformidade com padrões nacionais. Complementarmente, foram integrados os dados do MapBiomas, que são fundamentais para representar aspectos específicos do uso e cobertura do solo. A combinação dessas bases permitirá a criação de um mapa detalhado e consistente, adequado para análises espaciais.

4.2.4 Dados dos índices de seca SPEI

Os índices de seca são amplamente utilizados para caracterizar e monitorar os impactos da variabilidade climática, permitindo uma avaliação mais precisa dos períodos de estiagem e seus efeitos. O *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI) é um dos principais indicadores para essa finalidade, pois combina dados de precipitação e evapotranspiração potencial, permitindo uma análise mais abrangente da disponibilidade hídrica (Vicente-Serrano; Beguería; López-Moreno, 2010). Esse índice tem sido amplamente aplicado tanto no Brasil quanto no cenário global, sendo utilizado para a caracterização de secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas (Beguería *et al.*, 2014).

O SPEI é um índice multiescalar que permite a avaliação da variabilidade climática, incorporando os efeitos das mudanças de temperatura na demanda atmosférica de água. Essa característica o torna mais sensível às variações climáticas do que índices baseados exclusivamente na precipitação, como o *Standardized Precipitation Index* (SPI) (McKee; Doesken; Kleist, 1993). Além disso, o SPEI mantém a flexibilidade multitemporal do SPI, podendo ser aplicado a diferentes escalas temporais, desde eventos meteorológicos de curto prazo até tendências hidrológicas e agrícolas de longo prazo (Vicente-Serrano; Beguería; López-Moreno, 2010).

O Monitor Global de Secas SPEI fornece informações quase em tempo real sobre as condições de seca em escala global, com resolução espacial de 1 grau e resolução temporal mensal, o que possibilita o acompanhamento detalhado das variações climáticas (Vicente-Serrano *et al.*, 2017). O monitor disponibiliza valores de SPEI para escalas de 1 a 48 meses, sendo calibrado para o período de janeiro de 1950 a dezembro de 2010. O início do conjunto de dados é 1955, garantindo compatibilidade entre diferentes escalas temporais do índice e permitindo sua aplicação em estudos climáticos de longo prazo (Hobbins *et al.*, 2016).

Para a estimativa da evapotranspiração potencial (PET), o Monitor Global de Secas SPEI utiliza a equação de Thornthwaite, devido à escassez de dados globais em tempo real para métodos mais precisos, como o modelo FAO-56 Penman-Monteith (Thornthwaite, 1948; Allen *et al.*, 1998). A principal vantagem desse monitor é sua capacidade de fornecer informações quase instantâneas, tornando-se uma ferramenta valiosa para alertas precoces de seca e gestão

de riscos climáticos (Hao *et al.*, 2014). No entanto, para estudos climatológicos de longo prazo, recomenda-se a utilização do conjunto de dados SPEIbase, que emprega o método FAO-56 Penman-Monteith, garantindo estimativas mais robustas e representativas da PET (VicenteSerrano *et al.*, 2017).

O índice de seca, SPEI, pode auxiliar na análise de ondas de calor e variabilidade climática. A ocorrência de secas severas está frequentemente associada a temperaturas mais elevadas, devido à redução da umidade do solo e ao aumento do déficit hídrico, o que intensifica a probabilidade de ondas de calor (Zhang *et al.*, 2019). Além de identificar períodos de seca, esses índices permitem avaliar a variabilidade climática em geral, contribuindo para a compreensão das tendências de precipitação, evapotranspiração e temperatura, fatores determinantes na ocorrência e intensidade dos eventos extremos (Gonçalves *et al.*, 2021).

4.3 Método

Para atingir o objetivo 1, foram utilizados os dados de uso e cobertura do solo, temperatura do ar e de precipitação. Com os dados de uso do solo foi calculada a perda vegetal de cada ano de estudo e analisado a intensidade da anomalia das variáveis climáticas.

Para atingir o objetivo 2, foram utilizados os dados de temperatura do ar e do índice de temperatura da superfície do mar (TSM) do Oceano Pacífico (MEI INDEX). A partir da temperatura do ar será calculada a ocorrência de ondas de calor, que segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM) é definida como cinco ou mais dias consecutivos os quais a temperatura do ar máxima diária ultrapassa a temperatura do ar máxima média mensal em 5 °C ou mais. Em seguida será contabilizado quantas ondas de calor ocorreram em cada ano de extremos e correlacionar o número de ondas de calor com a intensidade da anomalia de TSM.

A metodologia de correlação foi a de Pearson (Quadro 1). Esse coeficiente é normalmente representado por ρ , o qual assume apenas valores entre -1 e 1, onde o resultado de $\rho = 1$ significa uma correlação positiva perfeita entre as duas variáveis, ou seja, se uma aumenta a outra também aumenta. Se $\rho = -1$ significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta a outra diminui. E quando $\rho = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Na análise da correlação os sinais de positivo e negativo indicam a direção, e o tamanho da variável indica a força da correlação (Pacheco; Silva Júnior; Oliveira, 2012).

Quadro 1 – Dados de coeficiente de Pearson

Coeficiente r	Interpretação
$r = 1$	Correlação perfeita
$0,80 < r < 1$	Muito alta
$0,60 < r < 0,80$	Alta
$0,40 < r < 0,60$	Moderada
$0,20 < r \leq 0,40$	Baixa
$0 < r \leq 0,20$	Muito baixa
$r = 0$	Nula

Fonte: (Definición ..., 2017)¹.

Para atingir o objetivo 3, foram utilizados os dados dos índices de seca PSEI com o intuito de determinar a intensidade dos episódios de seca na região de estudo. O índice SPEI, proposto por Vicente-Serrano *et al.* (2009), é calculado a partir dos dados de precipitação (P) e evapotranspiração (ET) para cada mês de cada ano da série histórica analisada. Para estimar os valores de evapotranspiração, foi utilizada a equação de Hargreaves (Equação 1), recomendada no relatório FAO 56, que se baseia nas diferenças entre as temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) e mínimas diárias (T_{min}), cujos dados são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet).

$$ET_0 = 0,0023(T_{\text{med}} + 17,8)(T_{\text{máx}} - T_{\text{min}})^{0,5} R_a \quad (1)$$

R é um fator de radiação que depende da latitude do posto analisado. Em suma, os dados de entrada para o cálculo do SPEI serão: $T_{\text{máx}}$, T_{min} e a latitude do posto. Neste estudo será calculado o SPEI para a escala de tempo de 12 meses entre os anos de 1998, 2005, 2010, 2015, e 2023.

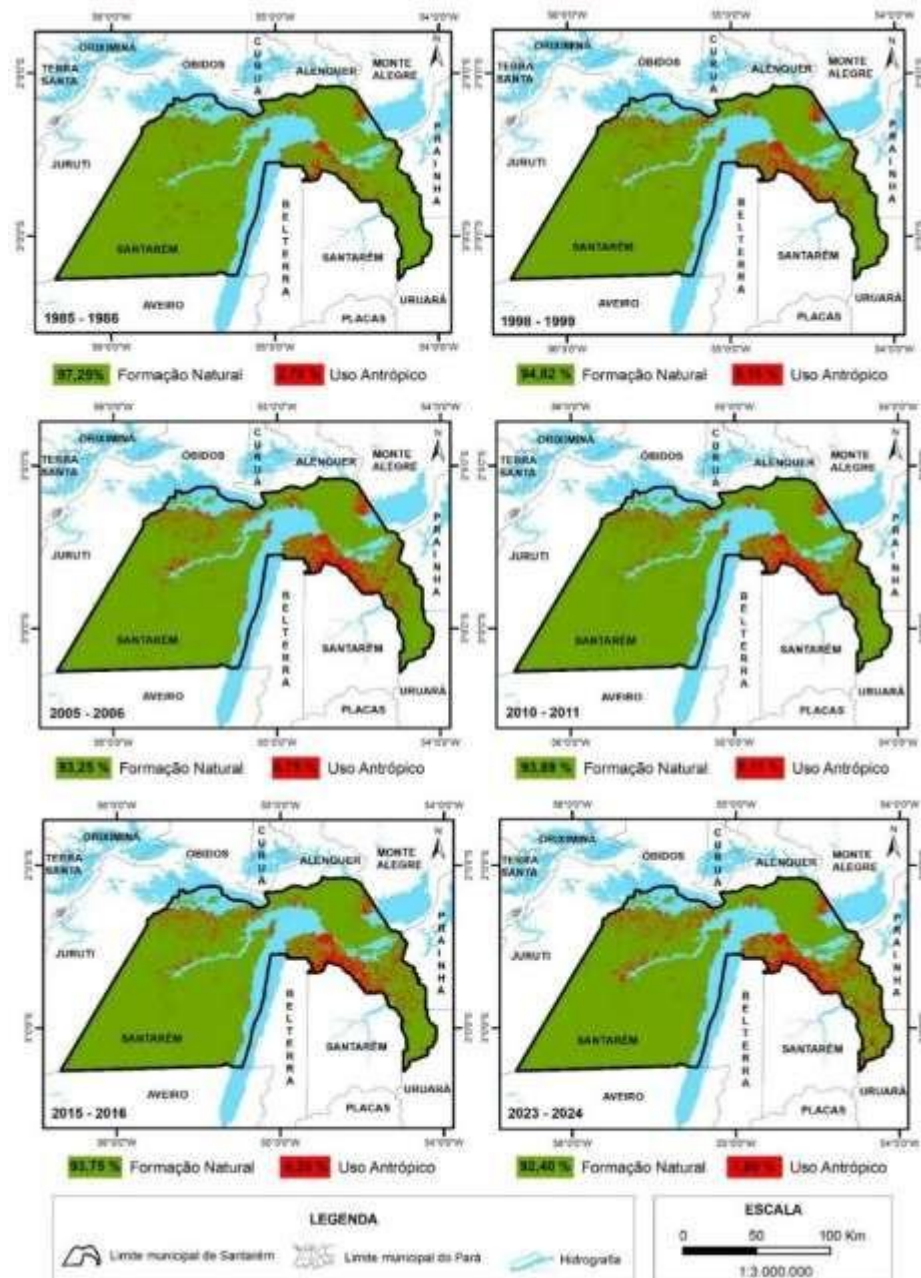
Assim, este trabalho tem como objetivo a análise comparativa entre os índices SPI e SPEI para a região de Santarém, no Pará. A comparação entre esses índices permitirá avaliar a semelhança nos anos críticos relacionados aos eventos extremos de seca nos períodos analisados.

¹ <https://unach-tic-aperez-7a.blogspot.com/2017/10/definicion-de-correlacion-de-pearson-y.html>

5 RESULTADOS

5.1 Análise do uso e cobertura do solo de Santarém

Figura 2 – Mapa de Evolução do uso e cobertura do solo em Santarém (1985-2023)



A análise da evolução do uso e cobertura da terra na região de Santarém, Pará, ao longo das últimas décadas, revela uma tendência progressiva de conversão da vegetação natural em áreas antrópicas (Figura 1). Entre os períodos de 1985-1986 e 2023-2024, a formação natural reduziu-se de 97,25% para 92,40%, enquanto o uso antrópico aumentou de 2,75% para

7,60%.

Observa-se que a maior perda de vegetação ocorreu entre 1998-1999 e 2005-2006, quando a área antrópica cresceu de 5,18% para 6,75%, indicando um período de intensa transformação da paisagem.

A distribuição espacial do uso antrópico demonstra uma maior incidência de alteração da paisagem em áreas próximas às margens dos rios e nos arredores das cidades de Santarém e Belterra. Esse padrão sugere uma expansão da fronteira agrícola e urbana, contribuindo para a conversão da cobertura florestal em áreas voltadas à agropecuária e infraestrutura. Nos anos mais recentes, entre 2015-2016 e 2023-2024, o avanço antrópico continuou, embora a uma taxa relativamente menor, com um acréscimo de 6,25% para 7,60% na ocupação humana e uma consequente redução da vegetação natural.

Os dados indicam que o processo de conversão da paisagem pode estar associado à intensificação da agropecuária, principal atividade econômica da região, bem como ao crescimento populacional e à ampliação da infraestrutura. Apesar da redução no ritmo de desmatamento em comparação com períodos anteriores, a perda progressiva da cobertura vegetal persiste, evidenciando a necessidade de políticas de conservação e manejo sustentável que conciliem desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

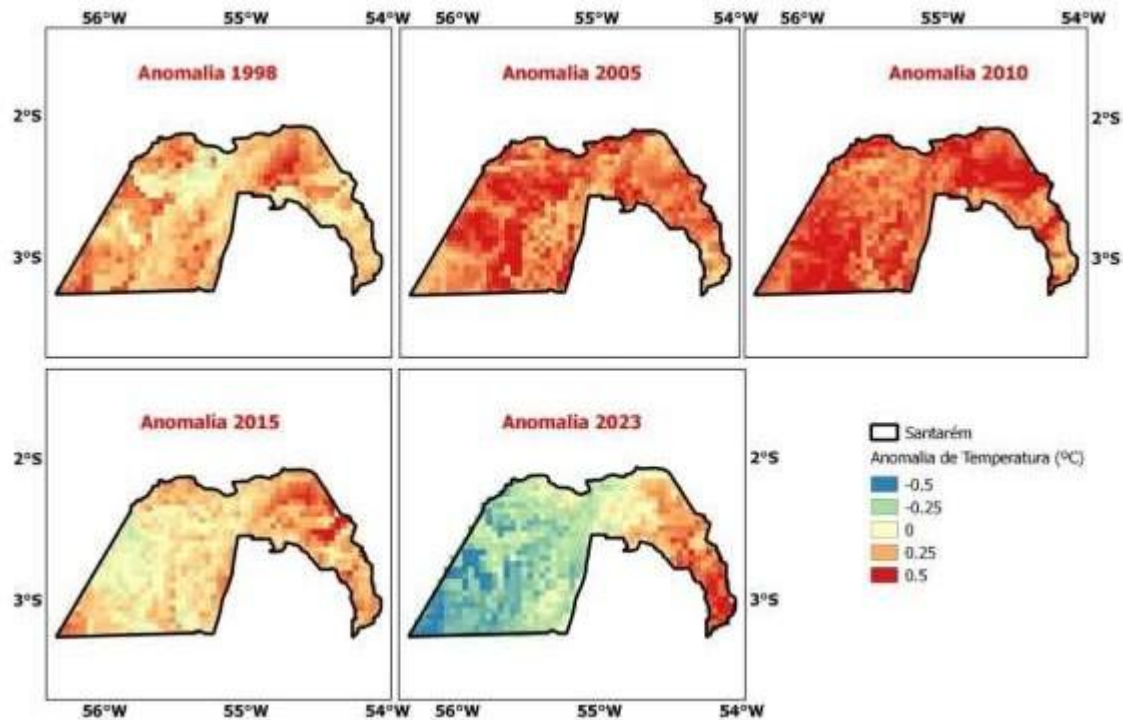
5.2 Análise de temperatura do ar de Santarém

A Figura 2 ilustra a distribuição espacial das anomalias de temperatura máxima no município de Santarém para os anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023, com base em um período de referência de 1990 a 2021. As anomalias são representadas em °C e classificadas em uma escala de cores que varia de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (resfriamento intenso, em azul) até $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (aquecimento intenso, em vermelho escuro).

No ano de 1998, observa-se uma predominância de anomalias próximas de zero, com áreas pontuais apresentando aquecimento moderado (entre $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), especialmente nas porções oeste e leste do município. Esse padrão indica um leve aumento da temperatura máxima, ainda com distribuição relativamente equilibrada.

Em 2005, o aquecimento se torna mais evidente e generalizado. A maior parte do território apresenta anomalias positivas entre $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, com destaque para o setor central e nordeste do município, sugerindo um aumento significativo da temperatura máxima em comparação com a média do período de referência.

Figura 3 – Mapa das anomalias de temperatura máxima (1998, 2005, 2010, 2015, 2023)



O ano de 2010 registra o aquecimento mais intenso de toda a série analisada. Quase toda a área do município está coberta por tons alaranjados e vermelhos, indicando anomalias superiores a $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esse padrão revela uma elevação generalizada e acentuada das temperaturas máximas, possivelmente associada à ocorrência de eventos climáticos como o El Niño e a intensificação de processos de degradação ambiental já observado no mapa de uso e cobertura do solo.

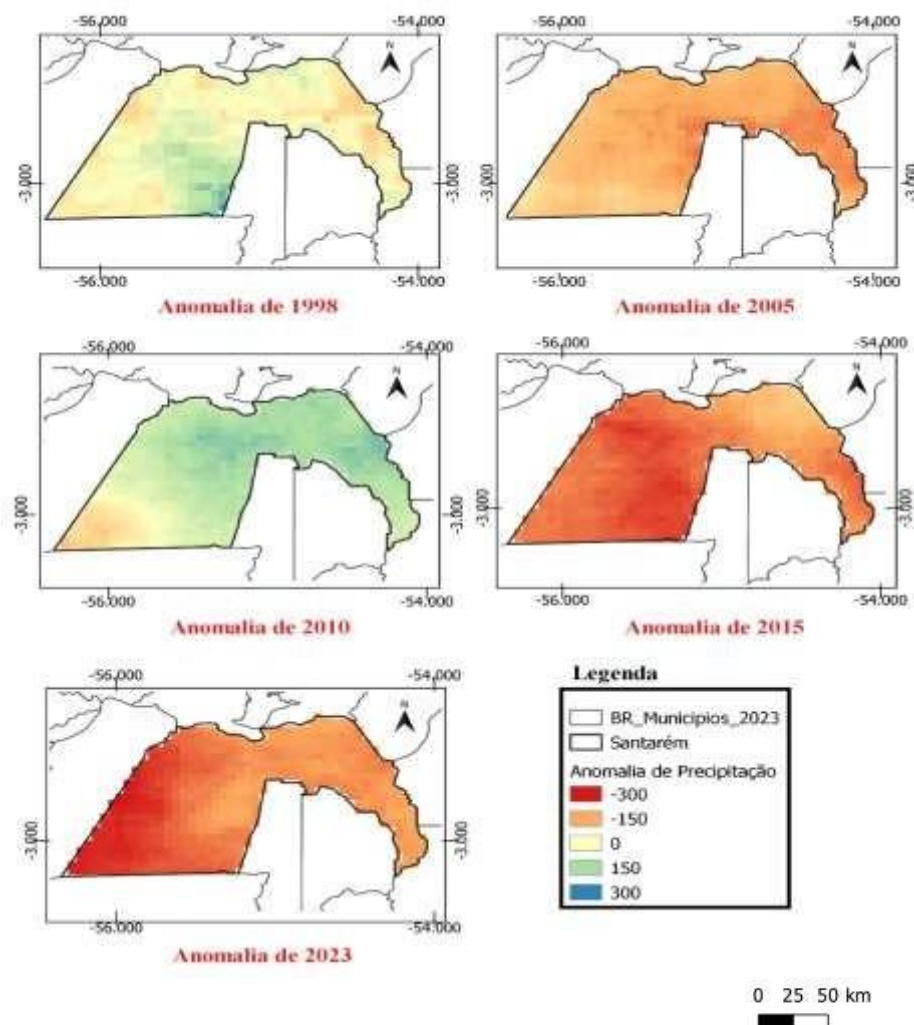
Em 2015, o padrão de aquecimento ainda persiste, embora em menor intensidade do que em 2010. As anomalias variam entre $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na maior parte do município, com algumas regiões apresentando valores mais baixos. O setor sudeste mantém um aquecimento mais acentuado, enquanto áreas do oeste e do sul apresentam uma leve redução nas anomalias.

Já em 2023, observa-se uma inversão no comportamento térmico. Pela primeira vez na série, surgem anomalias negativas significativas (entre $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), principalmente nas regiões oeste e sudoeste do município. O setor leste, contudo, continua com anomalias positivas. Esse contraste espacial evidencia uma mudança no padrão climático local, com resfriamento anômalo em parte do território, possivelmente associado a fatores atmosféricos regionais, como o La Niña, aumento da cobertura vegetal ou alterações na dinâmica de circulação de massas de ar.

Em síntese, os resultados indicam uma tendência clara de aquecimento progressivo entre 1998 e 2010, estabilização relativa em 2015 e resfriamento localizado em 2023. A variabilidade espacial e temporal das anomalias de temperatura máxima revela a complexidade dos processos climáticos que atuam na região e aponta para a influência conjunta de fatores globais (como variações oceânicas e mudanças climáticas) e locais (como desmatamento, uso do solo e alterações na cobertura vegetal).

5.3 Análise de Precipitação de Santarém

Figura 4: Mapa das Anomalias de precipitação no período menos chuvoso (1998-2023)



A análise das anomalias de precipitação na região de Santarém, Pará, ao longo dos anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023 revela um padrão de variação significativa na disponibilidade hídrica. Os mapas apresentados indicam a distribuição espacial das anomalias, utilizando uma escala de cores onde tons azulados representam excedentes de precipitação e

tons avermelhados indicam déficits.

A análise dos mapas sugere uma intensificação dos períodos de seca ao longo das últimas décadas, especialmente em 2005, 2015 e 2023, onde predominam anomalias negativas de precipitação (tons alaranjados e vermelhos). Por outro lado, o ano de 2010 apresentou uma exceção, com predominância de anomalias positivas (tons esverdeados), indicando um aumento na precipitação em comparação com a média histórica. Essa variação pode estar relacionada a fenômenos climáticos de grande escala, como El Niño e La Niña, que influenciam a distribuição da precipitação na Amazônia.

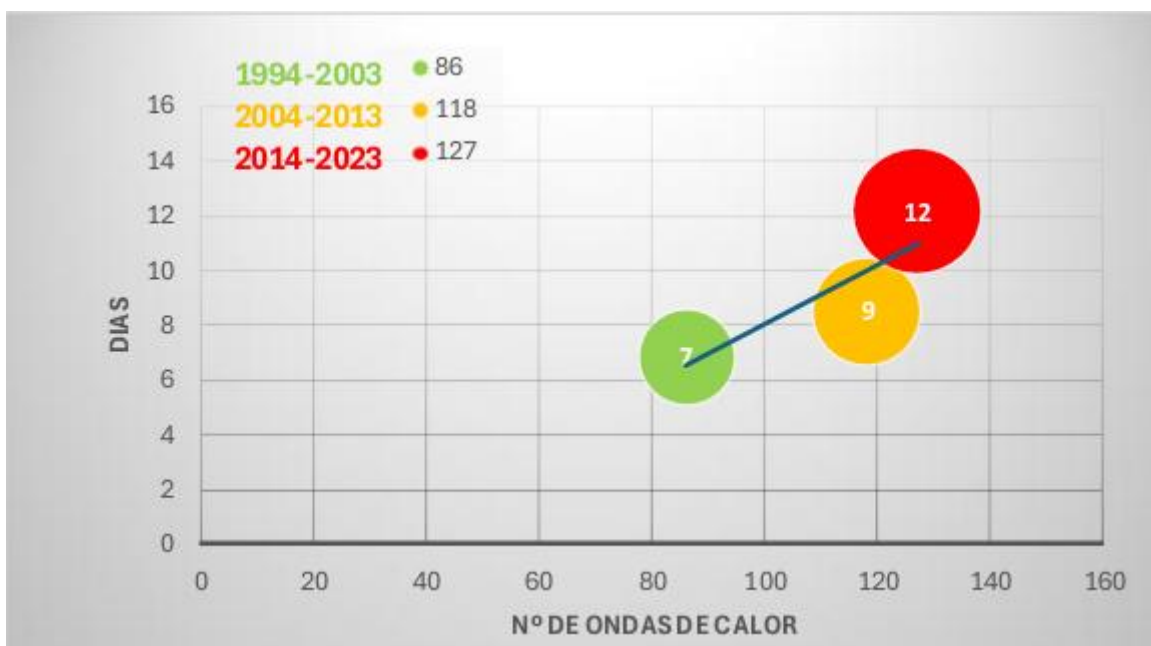
No ano de 1998, observa-se uma distribuição relativamente equilibrada das anomalias, com predominância de valores próximos à neutralidade (tons amarelados) e áreas pontuais com leve déficit (tons alaranjados) ou excesso de precipitação (tons esverdeados). Em 2005, há um aumento significativo das anomalias negativas, caracterizando uma redução na precipitação em grande parte da região, o que pode estar associado a eventos climáticos extremos, como secas prolongadas.

Em contrapartida, o ano de 2010 se destaca por apresentar predominância de anomalias positivas, indicando um aumento na precipitação em comparação com a média climatológica. Esse padrão sugere um comportamento distinto em relação aos outros anos analisados. No entanto, em 2015, verifica-se um retorno ao padrão de déficit hídrico, com amplas áreas exibindo tons alaranjados e vermelhos, evidenciando uma nova redução significativa na precipitação.

O ano de 2023 apresenta as anomalias negativas mais intensas entre os períodos analisados, com predominância de tons vermelhos em toda a região. Esse resultado indica uma intensificação das condições de seca, possivelmente associada a mudanças climáticas globais e variações nos padrões atmosféricos regionais. A análise dos dados sugere uma tendência de aumento na frequência e intensidade de eventos de déficit hídrico ao longo das últimas décadas, o que pode ter implicações significativas para a disponibilidade de recursos hídricos, a biodiversidade local e as atividades socioeconômicas dependentes da precipitação na região amazônica.

5.4 Análise das Ondas de Calor de Santarém

Figura 5 – Gráfico da Frequência e duração das ondas de calor ao longo das décadas



O estudo apresentado analisa a evolução das ondas de calor em três períodos distintos: 1994-2003, 2004-2013 e 2014-2023. A análise revelou uma tendência crescente na frequência e duração desses eventos extremos, apontando uma possível conexão com as mudanças climáticas globais e regionais. A evidência de um aumento tanto no número de ocorrências quanto na duração média dessas ondas de calor destaca a necessidade de ações de adaptação e mitigação diante dos impactos climáticos adversos.

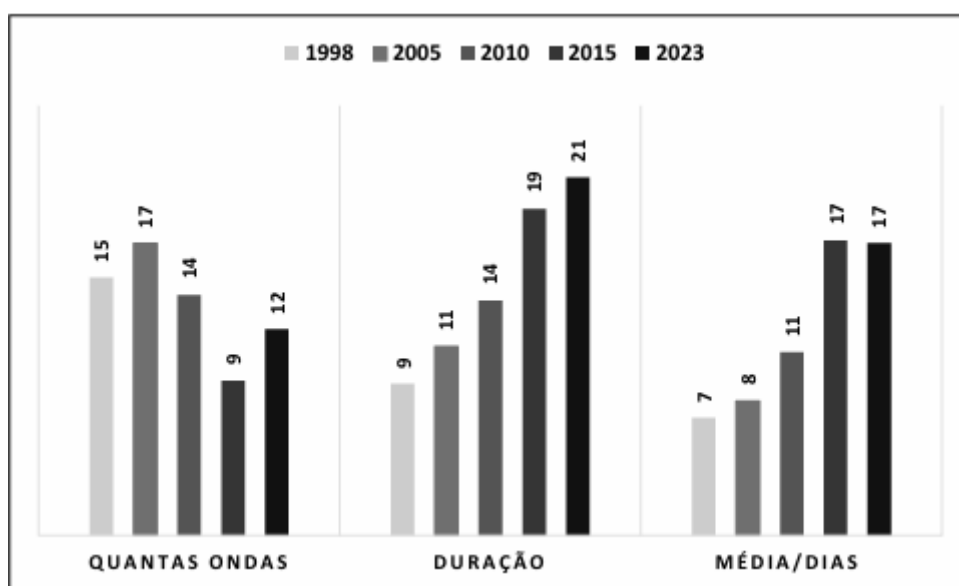
A frequência das ondas de calor experimentou um aumento substancial ao longo das três décadas analisadas. Entre 1994 e 2003, ocorreram 86 eventos, número que subiu para 118 no período de 2004 a 2013, representando um aumento de 37%. O período de 2014 a 2023 registrou 127 eventos, um acréscimo de 8% em relação à década anterior, o que resulta em um aumento total de 47% desde 1994. Este crescimento na frequência sugere uma ampliação dos padrões de extremos térmicos, possivelmente impulsionados por modificações climáticas, como o aquecimento global e a maior ocorrência de fenômenos meteorológicos intensos.

Além do aumento na frequência, observou-se também uma ampliação na duração média das ondas de calor. Entre 1994 e 2003, a duração média de cada evento foi de 7 dias. Esse valor aumentou para 9 dias no período de 2004-2013, e alcançou 12 dias na última

década.

A prolongação dos períodos de calor extremo pode intensificar os impactos negativos sobre a saúde humana, como o aumento de doenças relacionadas ao calor, além de afetar negativamente os ecossistemas, a agricultura e a produção de energia. A gestão de recursos hídricos e estratégias de resfriamento urbano, portanto, tornam-se ainda mais necessárias para mitigar esses impactos.

Figura 6 – Gráfico da evolução das ondas de calor (1998-2023)



O gráfico apresenta três variáveis que descrevem a evolução das ondas de calor nos anos de 1998, 2005, 2010, 2015 e 2023: a quantidade de ondas registradas, a duração média de cada onda e a média de dias sob condição de onda de calor. A análise dos dados revela um padrão significativo de mudanças ao longo do tempo, indicando um agravamento na intensidade e persistência desses eventos extremos.

No eixo referente ao número de ondas de calor, observa-se que em 1998 foram registradas 15 ondas, seguido por um aumento em 2005 para 17 eventos. No entanto, a partir de 2010, houve uma tendência de redução, com 14 ondas nesse ano, 9 em 2015 e 12 em 2023. Esse comportamento sugere que, embora o número de ondas de calor tenha diminuído nos anos mais recentes, outros fatores como duração e intensidade podem ter compensado essa redução.

A duração média de cada onda de calor confirma essa hipótese. Em 1998, as ondas duravam, em média, 9 dias. Esse valor aumentou para 11 dias em 2005, 14 dias em 2010, 19 dias em 2015 e atingiu o maior valor em 2023, com 21 dias. Isso indica que, ao longo dos anos, os eventos de calor extremo passaram a ser mais prolongados, impactando mais

fortemente o ambiente e a sociedade.

A última variável analisada, a média de dias sob condição de onda de calor, também reforça essa tendência de intensificação. Em 1998, o total médio era de 7 dias, aumentando para 8 em 2005, 11 em 2010 e atingindo 17 dias em 2015 e 2023. O fato de que, nos anos mais recentes, o tempo total exposto ao calor extremo praticamente dobrou em relação ao início da série sugere um agravamento significativo da situação climática.

De forma geral, o padrão observado indica que, ao longo dos anos, as ondas de calor se tornaram menos frequentes, porém mais duradouras e severas. O ano de 2023 se destaca como o mais extremo de toda a série, apresentando a menor quantidade de ondas, mas a maior duração e o maior número de dias sob condições extremas. Isso reforça a tendência de aumento da persistência do calor e da gravidade das ondas de calor, um indicativo preocupante diante das mudanças climáticas em curso.

Quadro 2 – Comparação dos anos chaves da série de Ondas de Calor

Anos mais significativos da série			
Ano	Quantas ondas	Duração	Média/dias
2005	17	19	8
2015	9	19	17
2023	12	21	17

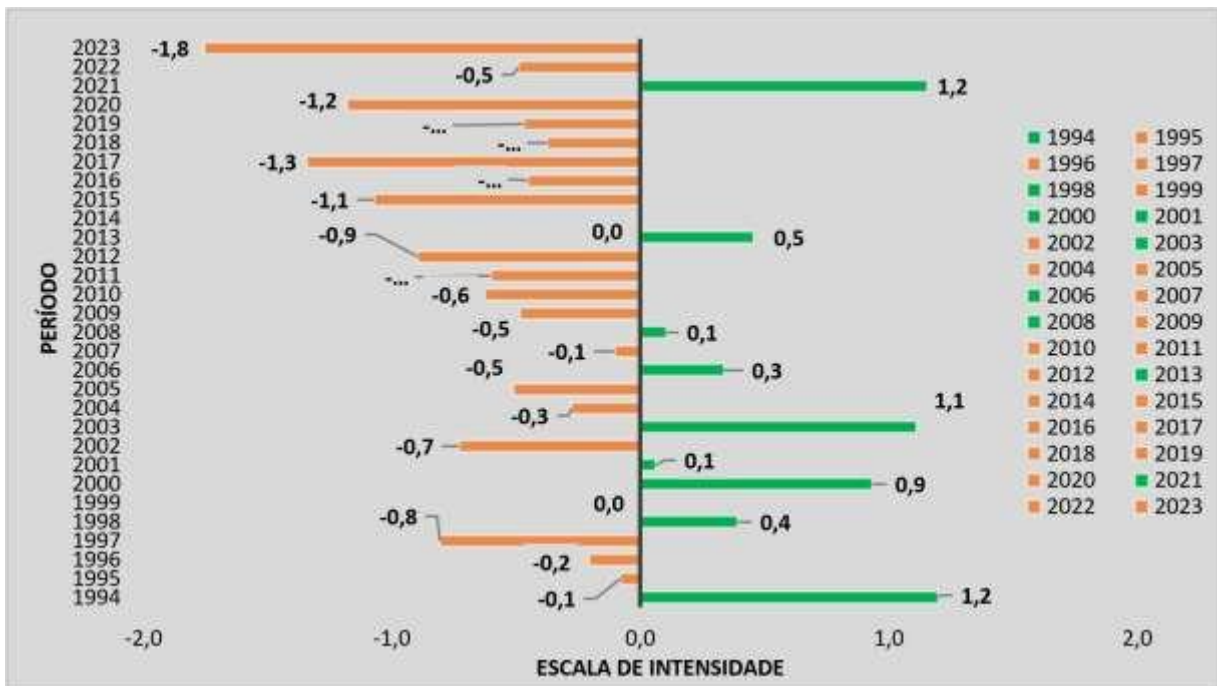
O Quadro 2 apresentado destaca os anos mais significativos da série temporal analisada em relação à ocorrência de ondas de calor. Observa-se que, em 2005, registrou-se o maior número de eventos, totalizando 17 ondas, com uma duração de 19 dias e uma média de 8 dias por evento. Já em 2015, houve uma redução no número de ondas (9), mantendo a mesma duração total de 19 dias, porém com um aumento expressivo na média de dias por evento (17 dias). Em 2023, verificou-se um aumento na quantidade de ondas de calor (12) e a maior duração total da série (21 dias), mantendo-se a média de 17 dias por onda. Esses dados sugerem um padrão de variabilidade temporal na ocorrência e intensidade das ondas de calor, com um intervalo de 10 anos entre os eventos mais significativos de 2005 e 2015, enquanto entre 2015 e 2023 esse intervalo reduziu-se para 8 anos.

Esse comportamento pode indicar uma tendência de intensificação das ondas de calor ao longo do tempo, potencialmente associada às mudanças climáticas regionais e globais. A redução do intervalo entre os eventos mais severos sugere uma possível aceleração na

frequência desses fenômenos extremos, o que reforça a importância de estudos contínuos para avaliar os impactos dessas variações térmicas e suas implicações para o clima local e global.

5.5 Análise dos dados SPEI de Santarém

Figura 7 – Gráfico de Evolução da intensidade do SPEI em Santarém (1994-2023)



O *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI) é uma métrica essencial para avaliar as condições hídricas de uma região, considerando o balanço entre precipitação e evapotranspiração potencial. Os dados analisados cobrem o período de 1990 a 2023, e o SPEI pode ser calculado para diferentes períodos (de 1 a 12 meses). Neste estudo, utilizou-se o SPEI6, que representa a média dos últimos seis meses, permitindo avaliar o período seco de cada ano. A análise dos valores do SPEI para Santarém entre os anos de 1994 e 2023 indica uma tendência crescente de condições de seca, especialmente a partir de 2015. Essa análise permite compreender padrões climáticos regionais e seus impactos nos recursos hídricos e ecossistemas locais.

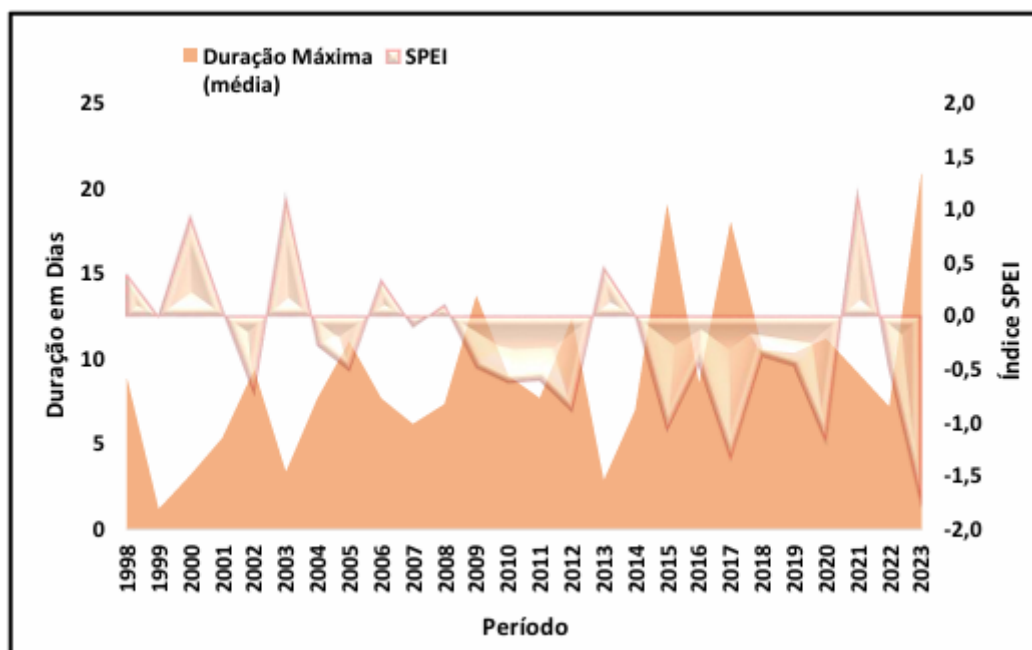
A tendência geral observada no período analisado revela uma predominância de valores negativos do SPEI, o que sugere a ocorrência mais frequente de condições secas. Os anos mais críticos foram 2023 (-1,8), 2017 (-1,3), 2020 (-1,2) e 2015 (-1,1), indicando anos de seca moderada a severa. O ano de 2023 apresentou o menor valor do SPEI registrado, sugerindo que as condições de seca nesse período foram particularmente intensas. Esse

comportamento pode estar associado a eventos climáticos extremos, como El Niño, que influenciam os padrões de precipitação na região amazônica.

Por outro lado, alguns anos apresentaram valores positivos do SPEI, indicando períodos mais úmidos. Os anos de 1994 e 2006 (+1,2), 2003 (+0,9) e 2013 (+0,5) foram os mais favoráveis em termos de disponibilidade hídrica. Esses períodos podem estar associados a padrões climáticos favoráveis, com maior volume de chuvas e menor evapotranspiração. No entanto, a ocorrência de anos úmidos tem sido menos frequente em comparação com os eventos de seca.

Nos últimos anos, observa-se uma tendência de agravamento das condições de seca, com valores negativos consecutivos desde 2015. Essa sequência sugere um possível impacto das mudanças climáticas globais, que podem estar alterando o regime de chuvas e aumentando a evapotranspiração na região. A redução da disponibilidade hídrica pode trazer impactos significativos para a agricultura, a biodiversidade e os sistemas hídricos locais, exigindo medidas de monitoramento e adaptação climática. Dessa forma, os resultados do SPEI para Santarém entre 1994 e 2023 evidenciam uma tendência preocupante de aridificação progressiva.

Figura 8 – Gráfico de Relação entre o Índice SPEI e a Duração Máxima das Ondas de Calor (1998-2023)



O gráfico analisado apresenta a relação entre a duração máxima média das ondas de calor e o índice SPEI (*Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*) ao longo do período de 1998 a 2023. A duração das ondas de calor, representada pela área preenchida em

laranja, demonstra um comportamento variável ao longo dos anos, com uma tendência geral de aumento a partir da década de 2000. Observa-se que, no final dos anos 1990, a duração máxima das ondas de calor era relativamente baixa, situando-se entre 0 e 5 dias. No entanto, a partir dos anos 2000, ocorre um aumento acentuado, com valores superiores a 15 dias em 2003. Esse crescimento coincide com um SPEI levemente negativo, sugerindo o início de um período de déficit hídrico. Durante os anos seguintes, entre 2004 e 2010, a duração das ondas de calor apresenta grande variabilidade, com picos elevados, como em 2005, quando ultrapassou 15 dias, seguidos de períodos de menor intensidade. Esse comportamento pode estar associado a padrões climáticos de variabilidade interanual, como o fenômeno El Niño, que influencia as temperaturas e a disponibilidade hídrica na região.

A partir de 2010, a duração das ondas de calor mantém-se em níveis mais elevados, com valores médios superiores a 10 dias em grande parte dos anos analisados. Os picos mais expressivos ocorrem em 2016, 2019 e 2023, períodos que coincidem com secas severas conforme indicado pelos valores negativos do índice SPEI. O SPEI, representado pela linha translúcida no gráfico, exibe variações significativas ao longo do tempo, alternando entre períodos de disponibilidade hídrica normal ou excessiva (SPEI positivo) e períodos de seca (SPEI negativo). A correlação entre o SPEI e a duração máxima das ondas de calor sugere uma relação inversa entre as variáveis, em que valores negativos do SPEI estão associados a eventos de calor extremo mais duradouros. Os anos de 2003, 2005, 2010, 2016 e 2023 apresentam picos na duração das ondas de calor que coincidem com SPEI negativo, indicando que a redução da disponibilidade hídrica pode favorecer a persistência desses eventos. Em contraste, anos como 2007, 2012 e 2021, nos quais o SPEI apresenta valores próximos de zero ou levemente positivos, coincidem com durações menores das ondas de calor, sugerindo que a umidade disponível pode atuar como um fator moderador na persistência do calor extremo.

Nos últimos anos da série temporal, especialmente a partir de 2015, o índice SPEI permanece predominantemente negativo, com poucas recuperações para valores positivos. Esse padrão coincide com o aumento na duração máxima das ondas de calor, indicando que a intensificação da seca pode estar contribuindo para eventos de calor cada vez mais longos. Analisando anos-chave do período, nota-se que em 2003-2005 há um forte aumento na duração das ondas de calor, com valores acima de 15 dias, enquanto o SPEI já mostra sinais de déficit hídrico. O ano de 2010 destaca-se como um período crítico, com um dos maiores picos de duração das ondas de calor, ultrapassando 15 dias, associado a um dos valores mais negativos do SPEI na série. O ano de 2016 também apresenta um evento extremo significativo, coincidindo com seca intensa conforme indicado pelo SPEI. Já em 2023, observa-se uma

nova elevação expressiva na duração das ondas de calor, acompanhada por um SPEI fortemente negativo, reforçando a relação entre seca e persistência do calor extremo. A análise desses dados evidencia a forte correlação entre períodos de seca e o prolongamento das ondas de calor, sugerindo que a redução da precipitação e o aumento da evapotranspiração contribuem para a intensificação desses eventos. O SPEI negativo, ao indicar menor disponibilidade hídrica, aponta para condições ambientais que favorecem o acúmulo de calor e impedem a dissipação térmica por meio da evaporação. Nos últimos anos, a tendência observada sugere que as ondas de calor estão se tornando mais frequentes e duradouras, possivelmente em resposta a um contexto climático de aquecimento global e intensificação das secas.

5.6 Análise da metodologia de Pearson

Quadro 3 – Correlação entre Queimadas, Duração e Número de Ondas de Calor e SPEI

PEARSON	
Queimadas X Número de Ondas de calor	0,33
Queimadas X Duração de Ondas de calor	0,32
Queimadas X SPEI	-0,17
Número de Ondas de calor X SPEI	-0,45
Duração de Ondas de calor X SPEI	-0,76

A tabela apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre variáveis relacionadas a queimadas, ondas de calor e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI). A análise dessas correlações busca compreender as interações entre esses fenômenos e suas possíveis implicações ambientais e climáticas.

Os resultados indicam que, entre as correlações testadas, apenas a duração das ondas de calor apresenta uma forte relação com o SPEI, com um coeficiente de -0,76. Esse achado sugere que períodos mais secos estão fortemente associados a ondas de calor mais prolongadas. A redução da disponibilidade hídrica impacta a evapotranspiração, limitando a capacidade do solo e da vegetação de resfriarem o ambiente, o que favorece a persistência e intensidade das ondas de calor. Esse resultado destaca o SPEI como um indicador relevante para a previsão de eventos térmicos extremos na região de Santarém.

Por outro lado, a correlação entre o número de ondas de calor e o SPEI apresenta um

valor de -0,45, indicando uma relação moderada. Esse resultado sugere que períodos de seca podem estar associados ao aumento da frequência de ondas de calor, ainda que outros fatores também influenciem essa dinâmica.

As correlações entre queimadas e ondas de calor apresentaram valores de 0,33 para o número de eventos e 0,32 para a duração, indicando relações positivas moderadas. Embora sugiram que queimadas possam estar associadas a um aumento na frequência e persistência de ondas de calor, os valores não são suficientemente altos para afirmar uma relação determinante. Além disso, a correlação entre queimadas e SPEI foi de -0,17, o que indica uma associação fraca, tornando incerta qualquer inferência sobre a influência direta da seca na ocorrência de queimadas.

Diante desses resultados, conclui-se que, entre as variáveis analisadas, a relação mais significativa ocorre entre a duração das ondas de calor e o SPEI. Isso reforça a importância do índice na previsão e monitoramento desses eventos extremos na região de Santarém. As demais correlações, por serem baixas ou moderadas, não permitem afirmar que há uma interferência determinante entre as variáveis testadas.

6 DISCUSSÃO

A análise da evolução do uso da terra e as variações climáticas em Santarém, Pará, revela uma interdependência entre a conversão da vegetação natural em áreas antrópicas e os impactos térmicos e hídricos observados ao longo das últimas décadas. Entre 1985-1986 e 2023-2024, a cobertura de vegetação natural foi reduzida de 97,25% para 92,40%, enquanto as áreas antrópicas aumentaram de 2,75% para 7,60%. Esse processo reflete o avanço contínuo da fronteira agrícola e urbana, um fenômeno intimamente relacionado ao crescimento das atividades econômicas na Amazônia, especialmente a agropecuária (Fearnside, 2001).

Entre 1998 e 2015, as anomalias térmicas na região de Santarém se tornaram mais pronunciadas, refletindo um aquecimento progressivo, que pode ser explicado tanto por fatores globais, como as mudanças climáticas, quanto por alterações locais no uso da terra. A conversão de áreas florestais em urbanas e agrícolas resulta no aumento da absorção de calor e na diminuição da capacidade de resfriamento natural da vegetação, fenômeno conhecido como "efeito de ilha de calor urbano" (Defries *et al.*, 2004).

A análise dos mapas de anomalias térmicas de Santarém revela que esse aquecimento é particularmente acentuado a partir de 2010, quando os valores de temperatura atingem os níveis mais elevados. Esse aumento das temperaturas locais tem implicações diretas na saúde pública e nos ecossistemas. Estudo de Luber e McGeehin (2008) associa o aumento das temperaturas a doenças cardiovasculares e respiratórias, cujos efeitos se tornam mais pronunciados com o aumento da frequência de ondas de calor. Além disso, as anomalias de precipitação também têm demonstrado uma tendência crescente de déficits hídricos. A ocorrência de secas severas, como em 2005, 2015 e 2023, está relacionada a uma intensificação de eventos climáticos extremos. O desmatamento altera o ciclo hidrológico, reduzindo a evapotranspiração da vegetação nativa e diminuindo a umidade atmosférica necessária para a formação de chuvas (Nobre *et al.*, 2016). Em anos de El Niño, como em 2005, esse processo é amplificado (Marengo *et al.*, 2008), resultando em secas severas com déficit hídrico significativo. A diminuição da cobertura florestal compromete ainda mais a capacidade da região de se manter ecologicamente resiliente, com consequências negativas para a agricultura e os recursos hídricos locais.

O agravamento das secas, como observado em 2023, reforça a tendência de aridificação progressiva da região, sugerida por Malhi *et al.* (2008), que indicam que a perda de cobertura florestal pode contribuir para um ciclo vicioso de secas prolongadas. Esse processo é particularmente visível nas regiões de Santarém e Belterra, que, devido à alta taxa de

desmatamento, apresentam uma maior vulnerabilidade ao aquecimento local e ao déficit hídrico. A expansão das áreas antrópicas, especialmente para atividades agropecuárias, intensifica ainda mais esses problemas, comprometendo a capacidade de resiliência ecológica da região (Walker *et al.*, 2002).

Embora tenha ocorrido uma desaceleração no ritmo do desmatamento nos últimos anos, a perda contínua de vegetação natural continua a ser uma preocupação, especialmente no que se refere à manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática e a preservação da biodiversidade (Lambin *et al.*, 2003). A redução da cobertura florestal não só afeta a temperatura e a precipitação locais, mas também impacta a segurança alimentar e hídrica das populações que dependem desses recursos. A intensificação da agropecuária, principal atividade econômica da região, contribui diretamente para a conversão da paisagem, com impactos significativos a longo prazo na resiliência ecológica e na estabilidade climática (Walker *et al.*, 2002).

A análise das ondas de calor em Santarém, entre os períodos de 1994-2003, 2004-2013 e 2014-2023, revela um aumento significativo na frequência e na duração desses eventos. A frequência das ondas de calor aumentou 37% entre 1994-2003 e 2004-2013, e mais 8% entre 2014-2023, alinhando-se com os padrões globais de intensificação dos fenômenos climáticos extremos (Diffenbaugh *et al.*, 2017). Esse aumento é impulsionado pela maior concentração de gases de efeito estufa e, em regiões tropicais como a Amazônia, pela redução da cobertura florestal, que diminui a capacidade de regulação térmica local (Silva *et al.*, 2019; Nepstad *et al.*, 2008). Além disso, a duração média das ondas de calor aumentou de 7 para 12 dias entre 1994 e 2023, refletindo o aquecimento global, como documentado por Tebaldi *et al.* (2006). Isso tem sérias implicações para a saúde humana, além de afetar a agricultura e os ecossistemas (Porter; Semenov, 2005).

A persistência de padrões meteorológicos de bloqueio e o efeito de ilha de calor urbano amplificam os impactos das ondas de calor nas áreas urbanas, como Santarém, exigindo estratégias de gestão urbana adequadas, como o uso de materiais reflexivos e a criação de espaços verdes, conforme sugerido por Coumou e Rahmstorf (2012) e Oke (1982). O aumento tanto na frequência quanto na duração das ondas de calor está diretamente relacionado às mudanças climáticas, que alteram a dinâmica atmosférica e amplificam os eventos extremos (Ipcc, 2021). O desmatamento e as mudanças no uso da terra exacerbam

esses efeitos, uma vez que a perda de vegetação nativa reduz a capacidade de evapotranspiração, intensificando os períodos de calor extremo (Davidson *et al.*, 2012).

Os resultados confirmam a tendência global de aumento das ondas de calor e indicam que Santarém, assim como outras regiões da Amazônia, está cada vez mais vulnerável aos impactos das mudanças climáticas. A intensificação da frequência e duração desses eventos exige ações urgentes para mitigar seus efeitos. Políticas públicas voltadas à restauração florestal, promoção de práticas agrícolas sustentáveis e planejamento urbano resiliente são essenciais para reduzir os danos. A adaptação às mudanças climáticas deve ser uma prioridade, especialmente em regiões tropicais que já enfrentam múltiplos desafios ambientais e sociais.

A análise do *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI), entre 1994 e 2023, revela uma tendência crescente de condições de seca, especialmente a partir de 2015. Esse fenômeno está em linha com os achados de Liu *et al.* (2020), que observaram um aumento na frequência e intensidade das secas na região amazônica, associando esses eventos a fenômenos climáticos como El Niño, que amplifica a evapotranspiração e reduz a precipitação. Segundo Seneviratne *et al.* (2012), anos de El Niño costumam provocar desequilíbrios no ciclo hidrológico, resultando em secas mais severas. Além disso, estudos de Giorgi *et al.* (2008) e Salazar *et al.* (2018) confirmam que as mudanças climáticas globais estão intensificando as alterações nos padrões de precipitação e evapotranspiração, provocando secas mais prolongadas e intensas, especialmente a partir da década de 2010.

A aplicação do SPEI na região de Santarém confirma a tendência de aridificação, com um aumento no número de anos com valores negativos, refletindo déficits hídricos e maior vulnerabilidade aos impactos das mudanças climáticas. A literatura também destaca a aplicabilidade do SPEI para monitoramento regional, como indicado por Martins *et al.* (2020), o que facilita a interpretação dos dados e a elaboração de políticas de gestão hídrica para a região. A redução da disponibilidade hídrica, como apontado por Salazar *et al.* (2018), tem impactos profundos na agricultura e na biodiversidade, exigindo estratégias de adaptação e mitigação para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Estudos indicam que as ondas de calor estão associadas a um aumento na taxa de mortalidade, especialmente entre populações vulneráveis, como idosos e crianças (SciELO, 2025). Além disso, a infraestrutura urbana de cidades como Santarém pode amplificar esses efeitos devido à formação de ilhas de calor, resultantes da predominância de asfalto e concreto, que retêm mais calor e elevam as temperaturas locais (Ecodebate, 2025).

No contexto ambiental, as ondas de calor podem provocar a redução da umidade do solo

e da vegetação, aumentando o risco de incêndios florestais. Na Amazônia, eventos de calor extremo têm sido associados à mortalidade de árvores de grande porte, o que compromete a capacidade da floresta em absorver dióxido de carbono e agrava o aquecimento global (Los Forenses..., 2024).

Assim, as ondas de calor representam um desafio crescente para regiões como Santarém, exigindo ações integradas que considerem tanto a saúde pública quanto a preservação ambiental. A adoção de medidas preventivas e adaptativas é essencial para minimizar os impactos negativos desses eventos climáticos extremos.

Os coeficientes de correlação de Pearson obtidos neste estudo indicam relações significativas entre queimadas, ondas de calor e disponibilidade hídrica, representada pelo SPEI. A correlação positiva moderada entre queimadas e o número de ondas de calor (0,33), bem como entre queimadas e a duração dessas ondas (0,32), sugere que a ocorrência de queimadas pode estar associada a um aumento na frequência e persistência de eventos térmicos extremos. Esses achados corroboram estudos que apontam as queimadas como fatores que intensificam o aquecimento regional devido à liberação de aerossóis e gases de efeito estufa, além da redução da cobertura vegetal, o que diminui a umidade do solo e altera o balanço térmico local (Santos; Rodrigues; Carvalho, 2020). Esse efeito pode ser explicado pelo fato de que a remoção da vegetação reduz a capacidade da superfície terrestre de dissipar calor, favorecendo a ocorrência de ondas de calor mais intensas e prolongadas (Pereira; Almeida, 2019).

A correlação negativa entre queimadas e o SPEI (-0,17) sugere que a seca tem uma influência fraca na ocorrência de queimadas, indicando que outros fatores, como atividades antrópicas e variáveis meteorológicas, podem desempenhar um papel mais relevante. No entanto, a literatura aponta que correlações fracas podem refletir relações indiretas ou mediadas por outras variáveis, uma vez que a correlação de Pearson mede apenas associações lineares, sem necessariamente indicar causalidade (Definición..., 2023). Embora a seca meteorológica não seja uma condição necessária nem suficiente para a ocorrência de incêndios, sua presença pode intensificar significativamente o risco, uma vez que a seca contribui para o ressecamento de combustíveis vegetais, aumentando sua inflamabilidade e a taxa de propagação do fogo. Além disso, mesmo períodos relativamente curtos de aridez anômala, com duração de 30 dias ou mais, podem ser suficientes para elevar esse risco, independentemente da ocorrência de secas prolongadas (Littell *et al.*, 2016). Dessa forma, apesar da correlação observada entre seca e queimadas ser fraca, a relação entre esses fatores pode ser mais complexa, sendo influenciada por outros elementos, como a frequência de ignições antrópicas e as condições climáticas específicas (Souza *et al.*, 2021).

As correlações negativas entre o SPEI e as ondas de calor reforçam a hipótese de que períodos mais secos favorecem a intensificação dos eventos térmicos. O coeficiente de correlação de -0,45 entre o número de ondas de calor e o SPEI indica que a redução da umidade disponível está associada a um aumento na frequência desses eventos. Esse efeito é ainda mais evidente na relação entre a duração das ondas de calor e o SPEI, cuja correlação negativa de 0,76 sugere uma forte associação entre condições de seca e persistência do calor extremo. De acordo com a definição estatística da correlação de Pearson, valores próximos de -1 indicam uma relação inversamente proporcional forte, o que, nesse caso, confirma que a redução da umidade agrava significativamente a duração das ondas de calor (Definición ..., 2023). Além disso, estudos anteriores já apontaram que a umidade do solo desempenha um papel crucial na regulação térmica da superfície terrestre, e sua redução pode contribuir para a intensificação de eventos extremos (Mendonça; Lima, 2018).

Esses resultados evidenciam que a dinâmica das ondas de calor está fortemente associada à disponibilidade hídrica e que a ocorrência de queimadas pode contribuir para a intensificação desses eventos. A correlação moderada entre queimadas e ondas de calor sugere que, embora haja uma relação direta, fatores adicionais, como variabilidade climática e mudanças no uso do solo, podem modular essa interação. Além disso, a forte correlação negativa entre SPEI e duração das ondas de calor ressalta a importância da umidade do solo na regulação térmica do ambiente. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva e Rocha (2022), que observaram que períodos prolongados de seca podem aumentar a recorrência de ondas de calor, afetando ecossistemas e sistemas produtivos.

Dessa forma, este estudo reforça a necessidade de monitoramento contínuo das condições climáticas e do impacto das queimadas na variabilidade térmica. A compreensão dessas interações pode subsidiar políticas de mitigação e adaptação frente ao aumento da frequência e intensidade dos eventos extremos em cenários de mudanças climáticas. Conforme destaca a literatura, a adoção de estratégias de gestão ambiental pode reduzir os impactos das mudanças climáticas e minimizar os riscos associados às ondas de calor e queimadas (Lopes; Silva; Ferreira, 2020).

7 CONCLUSÃO

Em suma, a análise dos dados de 1998 a 2023 revela uma correlação significativa entre a duração das ondas de calor e o índice de precipitação e evapotranspiração (SPEI), indicando que a relação entre seca e calor extremo tem se intensificado ao longo dos anos. Esse aumento na frequência e duração das ondas de calor reflete claramente o impacto das mudanças climáticas globais e destaca a crescente vulnerabilidade da região de Santarém a esses eventos extremos. A persistência de valores negativos no SPEI reforça a necessidade de monitoramento contínuo e ações eficazes para mitigar os impactos das mudanças climáticas, garantindo a resiliência ecológica e social da região diante dos extremos climáticos.

As ondas de calor, eventos climáticos caracterizados por períodos prolongados de temperaturas anormalmente elevadas, têm se tornado mais frequentes e intensas, o que pode causar sérios impactos tanto na saúde humana quanto no meio ambiente. Em regiões como Santarém, no oeste do Pará, a exposição a temperaturas extremas resulta em uma série de problemas de saúde, incluindo desidratação, estresse térmico e o agravamento de condições cardiovasculares e respiratórias. Além disso, o aumento da temperatura afeta processos vitais das plantas, como a fotossíntese, comprometendo o crescimento e a reprodução das espécies vegetais, o que pode ter consequências negativas para a biodiversidade local e a agricultura.

A correlação observada entre seca e calor extremo exige a implementação de políticas de adaptação robustas, com foco na restauração florestal, manejo sustentável da terra e planejamento urbano resiliente. A perda contínua de vegetação natural, associada a práticas de uso da terra inadequadas, intensifica esses eventos extremos, tornando a região ainda mais suscetível aos impactos das mudanças climáticas. Assim, medidas como a restauração da cobertura florestal, a promoção de práticas agrícolas sustentáveis e a criação de espaços urbanos verdes são fundamentais para mitigar os efeitos do aquecimento global e melhorar a qualidade de vida das populações locais.

Em Santarém, iniciativas como a construção do Centro Integrado de Meio Ambiente (CIMAD) têm buscado facilitar o acesso a serviços de licenciamento ambiental e promover políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável. O aumento de áreas verdes urbanas, por exemplo, pode desempenhar um papel crucial na redução do efeito das ilhas de calor, proporcionando um ambiente urbano mais confortável e contribuindo para a melhoria do bem-estar da população. Essas ações são essenciais para adaptar a população e o meio ambiente às novas condições climáticas, minimizando os danos e promovendo a resiliência da região frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Portanto, é imperativo que Santarém e outras regiões da Amazônia adotem estratégias integradas de adaptação às mudanças climáticas, visando reduzir os impactos das ondas de calor, melhorar a gestão dos recursos hídricos e promover o equilíbrio ecológico necessário para garantir a sustentabilidade a longo prazo. O enfrentamento eficaz dessas questões climáticas exige um compromisso contínuo com políticas públicas, práticas de gestão ambiental e o fortalecimento da resiliência comunitária.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Boletim de monitoramento da região Amazônica**. Brasília, DF: ANA, Superintendência de Usos Múltiplos, 2006.
- ANDERSON, L. O. *et al.* Impactos de secas nas florestas amazônicas. *In*: BORMA, L. de S.; NOBRE, C. (org.). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 148p.
- ANUNCIÇÃO, V. S. da. **O clima urbano de Campo Grande, MS**. 2001. 3143p... Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, FCT, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2001.
- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2018.
- BARRIOPEDRO, D. *et al.* The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. **Science**, v. 332, n. 6026, p. 220-224, 2011.
- BEGUERÍA, S. *et al.* Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 10, p. 3001-3023, 2014.
- BITENCOURT, D. P. *et al.* Frequência, duração, abrangência espacial e intensidade das ondas de calor no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 506-517, 2016.
- BORMA, L. de S.; NOBRE, C. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. **Dados consolidados do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastronacionalde-ucs.html>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- BRITO, M. C. W. **Unidades de conservação: intenções e resultados**. São Paulo: Annablume, 2000.
- BROWN, I. F. *et al.* Fires in rain forests of southwestern Amazonia: multinational satellite imagery for monitoring and for informing the public. **EOS Transactions**, American Geophysical Union, v. 87, n. 26, p. 253–264, 2006.
- CAI, W. *et al.* Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 1, p. 215–231, 2020.
- CARDOSO, M. F. *et al.* Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 9, p. 656-669, 2003.
- CARVALHO, T. M. E.; CARVALHO, C. M. Sistemas de informações geográficas aplicadas à descrição de habitats. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 34, n. 1, p. 79-90, 2012.

CASTELHANO, F. J.; PINEHIRO, G. M.; ROSEGHINI, W. F. F. Correlação entre precipitação estimada por satélite e dados de superfície para aplicação em estudos climatológicos. **Geosul**, Florianópolis, v. 32, p. 179-192, mai./ago. 2017.

CLARKE, B. *et al.* **Climate change, not El Niño, main driver of exceptional drought in highly vulnerable Amazon river basin.** [S.I.] Grantham Institute for Climate Change, 2024, 143p.

COCHRANE, M. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, p. 913-919, 2003.

COSTA, J. *et al.* Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 15, v. 24, jan./jun. 2019.

COUMOU, D.; RAHMSTORF, S. A decade of weather extremes. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 7, p. 491-496, 2012.

DAI, A. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation, temperature, and drought. **Journal of Climate**, v. 26, n. 9, p. 3247–3264, 2013.

DAVIDSON, E. A. *et al.* The impacts of land use change on the climate system. **Science**, v. 336, n. 6083, p. 300-305, 2012.

DEFRIES, R. S. *et al.* Land use change and climate in the Amazon basin. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 755-773, 2004.

DEFINICIÓN de correlación de pearson y alfa cronbach. definición de correlación de Pearson y Alfa cronbach. 2017. Disponível em: <https://unach-tic-aperez-7a.blogspot.com/2017/10/definicion-de-correlacion-de-pearson-y.html> . Acesso em: 7 mar. 2025.

DI NAPOLI, C. *et al.* A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. **Geoscience Data Journal**, v. 8, n. 1, p. 2-10, 2021.

DIFFENBAUGH, N. S. *et al.* Temperature extremes: Future projections and variability. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 9, p. 666-674, 2017.

DULLAART, J. C. *et al.* Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 1, p. 1007-1021, 2020.

FEARNSIDE, P. M. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: The environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon. **Environmental Management**, v. 39, p. 601- 614, 2007.

FEARNSIDE, P. M. The effects of deforestation on the economy of the Amazon basin. *In*: FEARNSIDE, P. M. (org.). **The Amazon: landscape and species diversity.** [S.i.]: Elsevier, 2001. p. 355-380.

FERREIRA, D. A. C.; TRANCOSO, R.; NOGUERA FILHO, S. P. Uso dos focos de calor imageados pelo satélite NOAA-AVHRR para identificação das áreas em processo de desflorestamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., Paragominas, PA, 2005. **Anais [...]**. Paragominas, PA: SBSR, 2005, p. 2145-2142.

FISCHER, E. M.; KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy precipitation and high-temperature extremes. **Nature Climate Change**, v. 5, p. 560–564, 2015.

FRICH, P. *et al.* Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the century. **Climate Research, Roskilde**, v. 19, p. 193-212, 2002.

GALHARTE, C. A.; VILLELA, J. M. E.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 199-201, 2014.

GILLET, N. P. *et al.* Impacts of land use change on climate extremes in the Amazon. **Nature Communications**, v. 7, p. 12212, 2016.

GIORGI, F. *et al.* Climate change projections for the Mediterranean region. **Global and Planetary Change**, v. 63, n. 2-3, p. 90-104, 2008.

GONÇALVES, S. T. N. *et al.* Índices e metodologias de monitoramento de secas: uma revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 495-511, 2021.

HAJAT, S. *et al.* Impact of hot temperatures on death in London: a time series approach. **Journal of Epidemiology and Community Health**, v. 56, n. 5, p. 367-372, maio 2002.

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HOBBS, M. T. *et al.* The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative demand. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 6, p. 1745-1761, 2016.

HOMMA, A. K. O. Benefícios da domesticação dos recursos extrativos vegetais. In: ALBUQUERQUE, A.; SILVA, G. (org.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

HOWARD, A. J. **Remote sensing of forest resources: theory and application**. London: Chapman & Hall, 1991. 420 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>. Acesso em: 7 fev. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Seca na Amazônia em 2005**. Local: Agência CT, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Infoclima. **Boletim de Informações Climáticas. Previsão de Consenso**, n. 10, p. 1-6, out. 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Summary for policymakers**. In: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **AR5 synthesis report: climate change 2014**. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2021: the physical science basis**. Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JAKIMOW, B. *et al.* Mapping pasture management in the Brazilian Amazon from dense Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 453-468, 2018.

KARIMI, M. *et al.* Recent trends in atmospheric evaporative demand in Southwest Iran: implications for change in drought severity. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 142, n. 3, p. 945-958, 2020.

KIRCHOFF, V. W. J. H.; ESCADA, P. A. S. **O megaincêndio do século** – 1998. São José dos Campos: Transtec Editora, 1998.

KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T.; CAVALCANTI, I. F. A. A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus**, v. 36A, p. 490-503, 1984.

KRONKA, F. J. N. *et al.* Monitoramento da vegetação natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais [...]**. Goiânia, Brasil, [s.n.], 2005.

KUNKEL, K. E. *et al.* The July 1995 heat wave in the Midwest: A climatic perspective and critical weather factors. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 7, p. 1507–1518, 1996.

LAAIDI, K. *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.

LAMBIN, E. F. *et al.* Dynamics of land-use and land-cover change in the Amazon. **Global Environmental Change**, v. 13, n. 4, p. 225-234, 2003.

LEWIS, S. L. *et al.* The 2010 Amazon Drought. **Science**, v. 331, p. 554, 2011.

LIU, Z. *et al.* Human influence on the frequency of extremes in the tropical Pacific. **Nature Climate Change**, v. 10, p. 1-6, 2020.

LITTELL, J. S. *et al.* A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. **Global change biology**, v. 22, n. 7, p. 2353-2369, 2016.

LIVI, F. P. **O CLIMA EM PORTO ALEGRE NO SÉCULO XX**: uma análise de séries temporais. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LOPES, F. R.; SILVA, M. A.; FERREIRA, J. P. Gestão ambiental e mitigação dos impactos das mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, n. 3, p. 45-60, 2020.

LOS FORENSES que estudian de qué mueren los árboles más grandes del Amazonas. **El País**, 2024. Disponível em: <https://elpais.com/planeta-futuro/2024-09-29/los-forenses-que-estudian-de-que-mueren-los-arboles-mas-grandes-del-amazonas.html>. Acesso em: 25 fev. 2025.

LUBER, G.; MCGEEHIN, M. A. Climate change and extreme heat events. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 35, n. 5, p. 429-435, 2008.

MALHI, Y. *et al.* Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-173, 2008.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass** – coleção 2023 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>. Acesso em: 27 jan. 2024.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 7, p. 893-904, 2008.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v.36, n.3, p. 1033-1050, 2016.

MARENGO, J. A.; SOUZA JUNIOR, C. **Mudanças climáticas**: impactos e cenários para a Amazônia. São Paulo: ALANA, 2018.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, n. 1, p. 5-28, 2007.

MARENGO, J. *et al.* **Aquecimento global e mudança climática na Amazônia**: retroalimentação clima-vegetação e impactos nos recursos hídricos. Amazonia and Global Change Geophysical Monograph, Series 186, Direitos Autorais, 2009 da American Geophysical Union.

MARENGO, J. A. *et al.* Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073-1097, 2009.

MARENGO, J. A. *et al.* Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: vulnerabilities and human adaptation. **American Journal of Climate Change**, v. 2, p. 87-96, 2013.

MARENGO, J. A. *et al.* The drought of Amazonia in 2005. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 7, L17708, 2008.

MARENGO, J. A. *et al.* The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2008.

MARTINS, F. R. *et al.* Validação da SPEIbase para a Região Sudeste Brasileira. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 209-223, 2020.

MCGEEHIN, M. A.; MIRABELLI, M. The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. **Environmental Health Perspectives**, v. 109, Suppl. 2, p. 185-189, 2001.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, p. 179183, 1993.

MENDONÇA, A. A.; LIMA, R. S. Influência da umidade do solo na regulação térmica e intensificação das ondas de calor. **Revista de Meteorologia Aplicada**, v. 12, n. 2, p. 78-92, 2018.

MILLER, S. *et al.* Heat waves, climate change, and economic output. **Journal of the European Economic Association**, v. 19, n. 5, p. 26582694, out. 2021.

MINUZZI, R. B.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C. Oscilações climáticas em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 227-236, 2010.

MOURA, M. O. Anomalies of extreme air temperatures in Fortaleza, CE, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 6, p. 1588-1600, 2016.

MOREIRA, A. T. R. *et al.* O impacto da ação antrópica no meio ambiente: aquecimento global. **Revista Educação em Foco**, n. 14, 2022.

NEPSTAD, D. *et al.* The effects of Amazonian deforestation on regional climate. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 6, L06405, 2008.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, n. 4, p. 957-987, 1991.

NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change in the Amazon: An overview of the trends and challenges. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, 093001, 2016.

- OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.
- Ondas de calor são um risco crescente à saúde e à qualidade de vida. **ECODEBATE**, 2025. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2025/01/22/ondas-de-calor-sao-umrisco-crescente-a-saude-e-a-qualidade-de-vida>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- OTTONI, F. P. *et al.* Extreme drought threatens the Amazon. **Science**, v. 382, p. 1253–1255, 2023.
- PEREIRA, C. F.; ALMEIDA, T. A. Impacto das queimadas no balanço térmico regional: uma análise climatológica. **Journal of Environmental Studies**, v. 25, n. 1, p. 30-47, 2019.
- PEREIRA *et al.* Análise da variabilidade da precipitação para o estado de Minas Gerais (1981-2017). **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 14 – Edição Especial Dossiê Climato.
- PETERSON, A. T. *et al.* Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. **Ecological Modelling**, v. 144, n. 1, p. 21-30, 2001.
- PORTER, J. R.; SEMENOV, M. A. Crop responses to climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: **Biological Sciences**, v. 360, n. 1463, p. 2021-2035, 2005.
- PORTO-GONÇALVES, C. W. Temporalidades amazônicas: uma contribuição à Ecologia Política. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 17, p. 21-31, 2008.
- RIBEIRO, M. C. *et al.* Mata Atlântica brasileira: quanto resta e como está distribuída a floresta remanescente? Implicações para a conservação. **Conservação Biológica**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.
- RICCE, W. S. *et al.* Análise de tendências na temperatura e precipitação em Londrina, Estado do Paraná. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Belo Horizonte, MG, 2009. **Anais[...]**. Belo Horizonte, MG, 2009.
- RIMA, E.; UHL, C. Pecuária na Amazônia Oriental: desempenho atual e perspectivas futuras. **Série Amazônia**, v. 1, p. 40, 1996.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, p. 1606-1626, 1987.
- RUSTICUCCI, M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. **Atmospheric Research**, v. 106, p. 1–17, 2012.
- SALAZAR, L. F. *et al.* Climate change in Amazonia and its implications for biodiversity. **Nature**, v. 558, p. 232-238, 2018.
- SAMPAIO, G. **O El Niño e você** - o fenômeno climático. São José dos Campos: Editora Transtec, 2001.

SAMPAIO, G.; SATYAMURTY, P. El Niño de 1997/98: evolução e impactos no Brasil. *In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, 10., 1996, Brasília, DF, 1998. **Anais[...]**. Brasília, DF: [s.n.], 1998.

SANSIGOLO, C. A.; KAYANO, M. T. Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913-2006 period. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 209-216, 2010.

SANTOS, E. J.; RODRIGUES, L. M.; CARVALHO, P. R. Efeitos das queimadas sobre a temperatura e precipitação na Amazônia. **Clima e Mudanças Ambientais**, v. 9, n. 4, p. 102118, 2020.

SANTOS, J. R. dos. Avanços das pesquisas e aplicações de sensoriamento remoto no monitoramento da paisagem: contribuições aos estudos do Pantanal. *In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL*, 1., 2006, Campo Grande, Brasil. **Anais[...]**. Campo Grande, Brasil, [s.n.], 2006.

SCHÄR, C. *et al.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. **Nature**, v. 427, n. 6972, p. 332-336, 2004.

SERRANO, S. M. V. *et al.* A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, p. 1-23, 6 out. 2009.

SILVA, C. B. *et al.* Precipitação na América do Sul – dados obtidos em estações meteorológicas automáticas e sistemas orbitais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, jul./dez. 2019.

SILVA, R. B.; ROCHA, D. P. Ondas de calor e secas prolongadas: impactos ambientais e socioeconômicos. **Revista Brasileira de Geociências e Clima**, v. 19, n. 2, p. 55-70, 2022.

SKANSI, M. *et al.* Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295307, 2013.

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? **International Journal of Climatology**, v. 1493, p. 1483-1493, 2017.

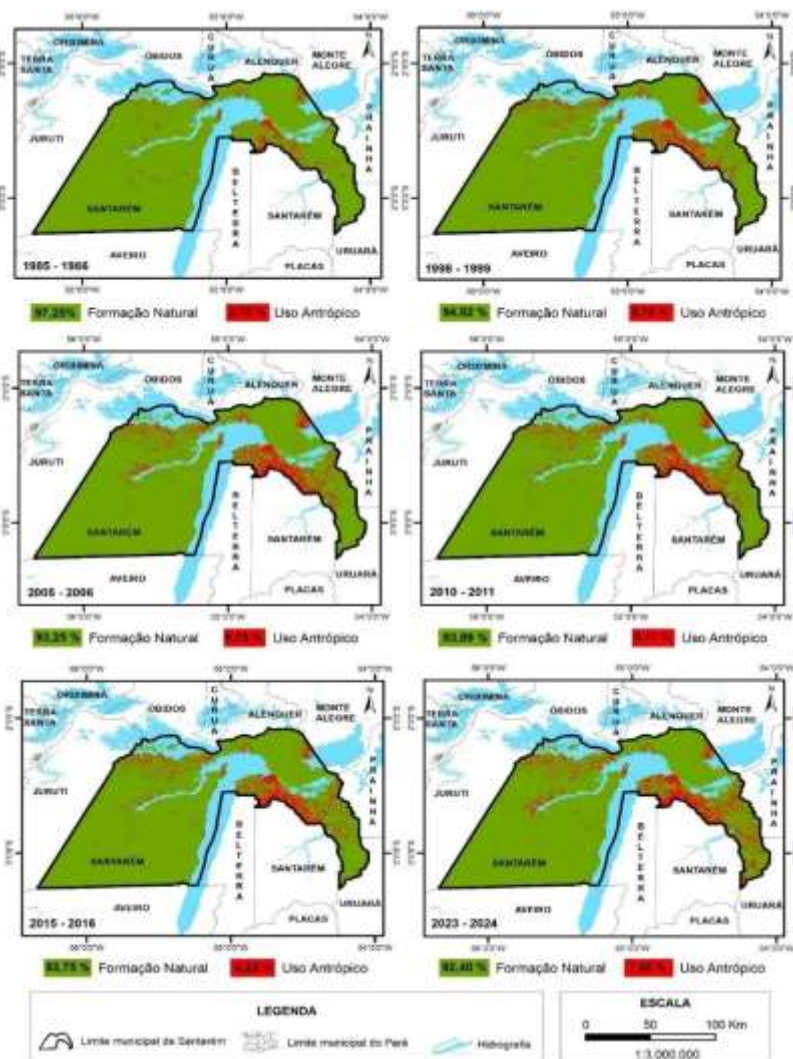
SORIANO, B. M. A. *et al.* Uso do fogo para o manejo da vegetação no Pantanal. *In: SORIANO B. M. A. (org.). Uso do fogo para o manejo da vegetação no Pantanal: Documentos 164.* - Corumbá: Embrapa Pantanal, 2020, 18p.

SOUZA, C. A.; REBOITA, M. S. Intensidade do vento de dois ciclones tropicais obtida por diferentes conjuntos de dados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 067075, 2020.

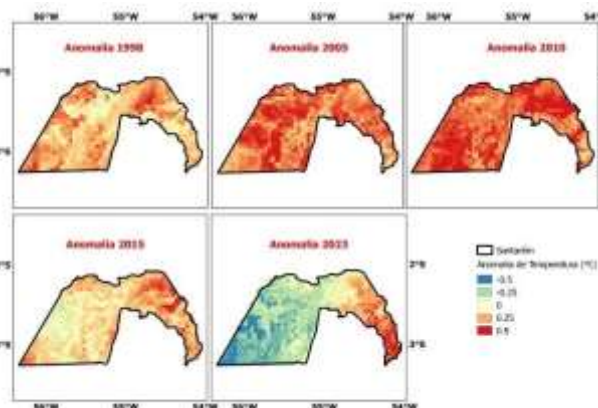
SOUZA, C. A.; PARANHOS FILHO, A. C.; GUARALDO, E. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 51-69, 2020.

- SOUZA, A. *et al.* Distribuição espacial da relação precipitação/número de dias de chuva em Campo Grande – MS. *In: II Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul*, Taubaté, Brasil, 2009. p. 221-226.
- SOUZA, C. M. *et al.* Conservation policy and the future of biodiversity in the Brazilian Amazon. **Environmental Science & Policy**, v. 100, p. 26-32, 2019.
- SOUZA, G. H.; ALVES, M. T.; FERREIRA, D. R. A relação entre queimadas e variabilidade climática: uma abordagem regional. **Estudos Climáticos**, v. 15, n. 1, p. 90-105, 2021.
- SOLECKI, W. D. *et al.* Urban heat island mitigation and adaptation strategies. **Environmental Science & Policy**, v. 76, p. 56-65, 2017.
- TABARELLI, M. *et al.* Perspectivas para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica: lições do envelhecimento de paisagens modificadas pelo homem. **Conservação Biológica**, v. 143, n. 10, p. 2328-2340, 2010.
- TEBALDI, C. *et al.* Estimating the future evolution of heat waves in the United States. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 8, L08701, 2006.
- TEMPERATURA nas alturas: como enfrentar os impactos das ondas de calor. **A Gazeta**, 2025. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/artigos/temperatura-nas-alturas-comoenfrentar-os-impactos-das-ondas-de-calor-0225>. Acesso em: 25 fev. 2025.
- ULLAH, I. *et al.* Evaluating the meteorological drought characteristics over Pakistan using in situ observations and reanalysis products. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. 4437-4459, 2021.
- VINCENT, L. A. *et al.* Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America, 1960-2000. **Journal of Climate**, **Boston**, v. 18, p. 5011-5023, 2005.
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.
- WALKER, B. H. *et al.* Resilience management in social–ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. **Conservation Ecology**, v. 6, n. 1, p. 14, 2002.
- WANG, X. *et al.* Impacts of deforestation on the regional climate in Amazonia. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 12, e2020GL087678, 2020.
- WU, H. *et al.* Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 1, p. 67-79, 2007.
- ZENG, N. *et al.* Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 1, p. 014002, 2008.

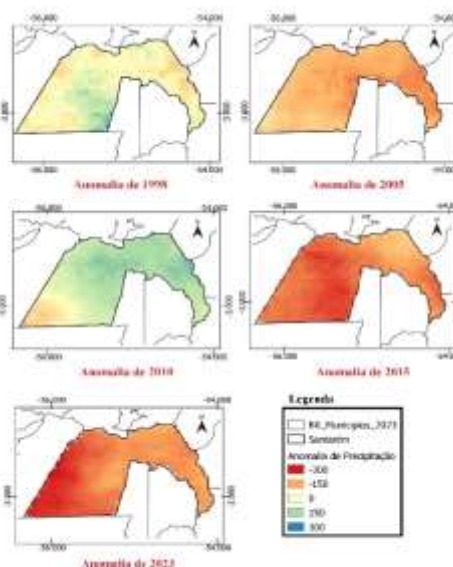
ANÁLISE MULTITEMPORAL DO USO E COBERTURA DO SOLO EM SANTARÉM – 1985,1998,2005,2010,2015 e



Anomalia de Temperatura Máxima



Anomalia de Precipitação do período menos chuvoso.



A correlação entre os mapas de uso e cobertura do solo, anomalias de temperatura máxima e anomalias de precipitação indica uma forte relação entre a urbanização e as mudanças climáticas locais em Santarém. O aumento das áreas de uso antrópico ao longo dos anos coincide com um aumento significativo nas anomalias térmicas positivas, sugerindo que a conversão de áreas naturais em áreas urbanizadas intensifica o aquecimento local. Além disso, as anomalias de precipitação no período menos chuvoso indicam uma possível influência dessas mudanças no regime hídrico da região.

Como isso pode ajudar no Plano Diretor de Santarém:

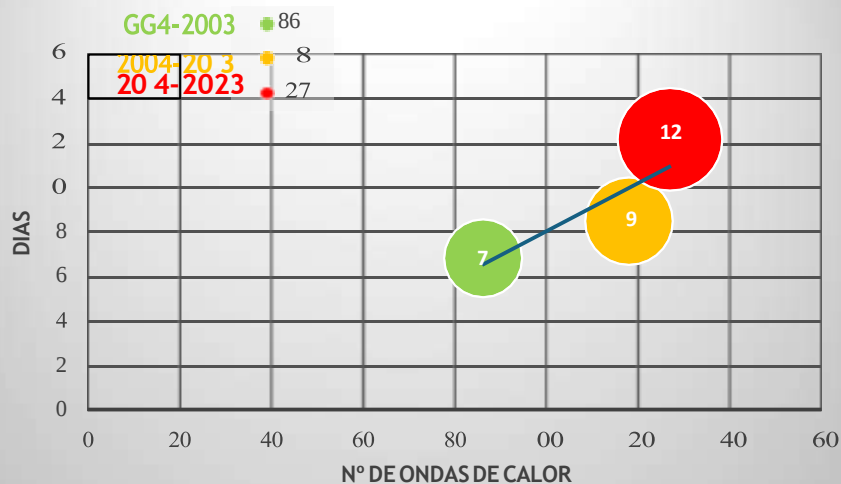
1. Ordenamento Territorial Sustentável – Limitar a expansão desordenada da urbanização e priorizar projetos que preservem áreas naturais para mitigar os efeitos das ilhas de calor.
2. Infraestrutura Verde – Implementar corredores ecológicos, arborização urbana e telhados verdes para reduzir a absorção de calor e melhorar a infiltração da água.
3. Gestão Hídrica – Adaptar o sistema de drenagem urbana para lidar com alterações na precipitação, prevenindo enchentes e otimizando o uso da água em períodos de seca.
4. Monitoramento Climático – Incorporar o uso de dados climáticos no planejamento urbano para antecipar impactos ambientais e sociais das mudanças no clima.

Essas diretrizes podem tornar o crescimento urbano de Santarém mais resiliente e sustentável, garantindo qualidade de vida para a população e preservação dos recursos naturais.

Tendência de Ondas de Calor e sua Duração em Santarém

64

Evolução das Ondas de Calor e sua Duração ao Longo das Décadas

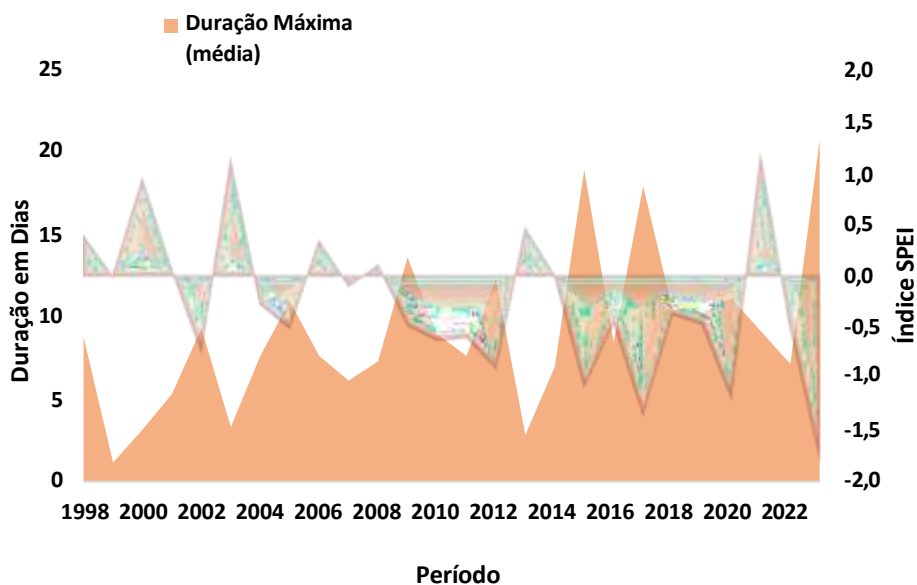


Os gráficos demonstram um aumento expressivo na frequência e duração das ondas de calor em Santarém ao longo das décadas, sendo o período de 2014-2023 o mais crítico. A correlação com o Índice SPEI indica que os períodos mais secos estão associados a ondas de calor mais prolongadas, evidenciando um padrão climático preocupante. Se não houver um planejamento adequado, a cidade pode enfrentar graves consequências, incluindo o aumento da poluição atmosférica. O calor excessivo e a seca intensificada favorecem a concentração de poluentes no ar, prejudicando a qualidade de vida e aumentando problemas respiratórios na população. Além disso, pode haver mais incêndios urbanos e florestais, agravando ainda mais a poluição.

Para mitigar esses impactos, o Plano Diretor deve incluir: Ampliação de áreas verdes e arborização urbana para reduzir as ilhas de calor e melhorar a qualidade do ar; Revisão das políticas de mobilidade urbana, incentivando transportes sustentáveis para minimizar emissões; Gestão hídrica eficiente, garantindo abastecimento em períodos secos e reduzindo impactos da baixa umidade; Criação de sistemas de alerta para ondas de calor, protegendo a população mais vulnerável.

Sem essas medidas, Santarém pode enfrentar um cenário de calor extremo aliado a um aumento da poluição, tornando o ambiente urbano mais hostil e impactando diretamente a saúde pública.

Análise da Relação entre o Índice SPEI e a Duração Máxima das Ondas de Calor (1998-2023).



Evolução da Intensidade do SPEI: Tendências de Seca e Umidade (1994-2023).

