



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - ICAT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA - PPGMET

FLÁVIA DE FRANÇA SANTOS

**TENDÊNCIAS DE ONDAS DE CALOR E SECAS NO NORDESTE DO BRASIL
E SEUS IMPACTOS NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E
SOJA.**

MACEIÓ – AL

2024

FLÁVIA DE FRANÇA SANTOS

**TENDÊNCIAS DE ONDAS DE CALOR E SECAS NO NORDESTE DO BRASIL
E SEUS IMPACTOS NA AGRICULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E
SOJA.**

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito para obtenção de aprovação no Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, do Instituto de Ciências Atmosféricas, da Universidade Federal de Alagoas.
Orientador: Professor Dra. Helber Barros Gomes
Co-orientadora: Professora Dr. Maria Cristina Lemos da Silva.

MACEIÓ – AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4 - 661

S237t Santos, Flávia de França.
Tendências de ondas de calor e secas no Nordeste do Brasil e seus impactos na agricultura da cana-de-açúcar, milho e soja / Flávia de França Santos. – 2024.
75 f.: il.

Orientador: Helber Barros Gomes.
Coorientadora: Maria Cristina Lemos da Silva.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 66-75.

1. Brasil, Nordeste – Mudanças climáticas. 2. Seca agrícola. 3. Produtividade.
4. Climatologia. I. Título.

CDU: 551.5(812/813)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-207.

“TENDÊNCIAS DE ONDAS DE CALOR E SECAS NO NORDESTE DO BRASIL E SEUS IMPACTOS NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, MILHO E SOJA.”

FLÁVIA DE FRANÇA SANTOS

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente



HELBER BARROS GOMES

Data: 14/11/2024 14:34:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Helber Barros Gomes
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



MARIA CRISTINA LEMOS DA SILVA

Data: 14/11/2024 14:40:01-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Cristina Lemos da Silva
(Coorientadora)

Documento assinado digitalmente



FABRICIO DANIEL DOS SANTOS SILVA

Data: 14/11/2024 08:25:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente



ANA CAROLINE DE MELO BASTOS MORAIS

Data: 15/11/2024 12:34:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ana Caroline de Melo Bastos Moraes
(Membro Externo)

OUTUBRO/2024

Dedico

*A Deus, aos meus irmãos Flávio e
Fernanda, aos meus pais José e Maria
que sempre foram a minha maior
referência e onde tive o apoio necessário.*

AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão e emoção que expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental no meu percurso acadêmico e na concretização deste trabalho.

Aos meus amados pais, Maria Vanuza e José Severino, dedico este momento de conquista. Vocês foram a base sólida que sustentou cada desafio, incentivando-me a persistir nos momentos mais difíceis. Seu amor incondicional é a força motriz por trás de todas as minhas realizações.

Célia, sua amizade e apoio foram uma fonte constante de inspiração. Suas palavras encorajadoras e perspicazes foram um guia valioso ao longo desta jornada, e por isso, expresso minha profunda gratidão.

Aos professores Helber e Cristina, minha gratidão pela orientação cuidadosa e pelo conhecimento compartilhado. Suas orientações e conselhos foram cruciais para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço por dedicarem seu tempo e expertise para moldar meu trabalho e enriquecer minha jornada acadêmica.

Este momento não seria possível sem o apoio de cada um de vocês. Saibam que levarei para sempre em meu coração a contribuição valiosa que deram ao meu crescimento profissional e pessoal.

Muito obrigado a todos.

Com sincera gratidão,

Flávia França.

Mas graças a Deus que sempre nos conduz vitoriosamente em Cristo e por nosso intermédio difunde em todo lugar a fragrância do seu conhecimento.

2 Coríntios 2:14

RESUMO

As mudanças climáticas têm impacto direto na vida cotidiana global, afetando aspectos econômicos e sociais. As ondas de calor e os eventos de seca afetam significativamente a produção agrícola em diversas regiões do mundo. No Nordeste do Brasil, uma região historicamente marcada por variabilidades climáticas extremas, esses eventos têm um impacto particularmente severo, impactando o cultivo de cana-de-açúcar, milho e soja, e diversas outras culturas de importância alimentícia e econômica. O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a tendência de queda na produção associando essas variações às condições climáticas locais, especialmente à escassez de chuva. A metodologia empregada baseou-se na análise de valores do SPI quanto ao número e frequência dos eventos de seca. Foi analisada as séries temporais de produção agrícola desses estados. Modelos de regressão quadrática foram aplicados para identificar tendências de produção ao longo do tempo e correlacioná-las com dados pluviométricos regionais. O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para quantificar a variação explicada pelos modelos, considerando tanto os fatores climáticos quanto as práticas agrícolas adotadas. Com os resultados indicam períodos de extrema seca para todas as regiões estudadas. Com aumento da escala temporal ocorreu a minimização de eventos de seca identificados pelo SPI. Dessa forma houve uma tendência de declínio na produção nos estados analisados. Estes resultados evidenciam que a produção agrícola no Nordeste brasileiro é altamente vulnerável às variações climáticas, particularmente à disponibilidade de água. A prática de irrigação aparece como um elemento essencial para manter a produtividade, reduzindo as perdas de safra e garantindo a sustentabilidade das atividades agrícolas na região, mitigar os impactos das secas e assegurar a viabilidade da produção agrícola a longo prazo. Conclui-se que, na região Nordeste do Brasil, as secas e ondas de calor prejudicam significativamente o setor agrícola, causando perdas consideráveis. Diante desses desafios, torna-se fundamental a adoção de práticas de manejo de água e o uso de tecnologias avançadas de irrigação para garantir a resiliência e a sustentabilidade da produção agrícola.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas, Seca Agrícola, Produtividade.

ABSTRACT

Climate change has a direct impact on daily life worldwide, affecting economic and social aspects. Heat waves and drought events significantly affect agricultural production in several regions of the world. In Northeastern Brazil, a region historically marked by extreme climate variability, these events have a particularly severe impact, impacting the cultivation of sugarcane, corn, and soybeans, among several other crops of food and economic importance. The main objective of this research was to evaluate the downward trend in production by associating these variations with local climate conditions, especially with the lack of rainfall. The methodology used was based on the analysis of SPI values regarding the number and frequency of drought events. The time series of agricultural production in these states were analyzed. Quadratic regression models were applied to identify production trends over time and correlate them with regional rainfall data. The coefficient of determination (R^2) was used to quantify the variation explained by the models, considering both climate factors and the agricultural practices adopted. The results indicate periods of extreme drought for all regions studied. As the time scale increased, the number of drought events identified by the SPI decreased. Thus, there was a tendency for production to decline in the states analyzed. These results show that agricultural production in the Brazilian Northeast is highly vulnerable to climate variations, particularly to water availability. Irrigation practices appear to be an essential element for maintaining productivity, reducing crop losses and ensuring the sustainability of agricultural activities in the region, mitigating the impacts of droughts and ensuring the viability of agricultural production in the long term. It is concluded that, in the Northeast region of Brazil, droughts and heat waves significantly harm the agricultural sector, causing considerable losses. Given these challenges, it is essential to adopt water management practices and use advanced irrigation technologies to ensure the resilience and sustainability of agricultural production.

Keywords: Climate Change, Agricultural Drought, Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Região Nordeste do Brasil e suas coordenadas geográficas.	31
Figura 2. Esquema conceitual do modelo baseado nas diferenças entre a produção observada e estimada pela curva de tendência tecnológica.	36
Figura 3. Análise de índices de secas de 1985 a 2015 para os nove estados do Brasil em SPI-1.	44
Figura 4. Análise de índices de secas de 1985 a 2015 para os nove estados do Brasil em SPI-12.	45
Figura 5. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2015 do Nordeste do Brasil.	46
Figura 6. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2015 em Pernambuco, Brasil.	47
Figura 7. Evolução média de áreas colhidas dos nove estados do Nordeste do Brasil no período de 1990 – 2022.	51
Figura 8. Gráfico de produção média de cana-de-açúcar (t) nos nove estados do Nordeste do Brasil.	56
Figura 9. Gráfico de produção média de milho-em-grão (t) nos nove estados do Nordeste do Brasil.	56
Figura 10. Gráfico de tendências de produtividade milho de Pernambuco demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.	58
Figura 11. Gráfico de tendências de produtividade milho no Piauí, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.	59
Figura 12. Gráfico de tendências de produtividade da cana-de-açúcar de Alagoas, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.	60
Figura 13. Gráfico de tendências de produtividade milho em Alagoas, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.	60
Figura 14. Gráfico de tendência na queda da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Ceará.	62
Figura 15. Gráfico de tendência da produção agrícola para milho no estado do Ceará.	62
Figura 16. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Sergipe.	64

Figura 17. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Rio Grande do Norte.	65
Figura 18. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para soja para o estado do Maranhão.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação climática quanto ao índice de SPI.	34
Tabela 2. Característica das ondas de calor observadas no estado de Alagoas	38
Tabela 3. Características das ondas de calor observadas no estado do Ceará.	38
Tabela 4. Características das ondas de calor observadas no estado da Paraíba.....	39
Tabela 5. Características das ondas de calor observadas no estado de Sergipe.	40
Tabela 6. Características das ondas de calor observadas no estado de Bahia.	40
Tabela 7. Características das ondas de calor observadas no estado de Rio Grande do Norte.	41
Tabela 8. Características das ondas de calor observadas no estado do Maranhão.	41
Tabela 9. Características das ondas de calor observadas no estado de Pernambuco....	42
Tabela 10. Características das ondas de calor observadas no estado de Piauí.	42
Tabela 11. Matriz de correlação pelo método de Pearson para produção de cana-de-açúcar entre todos os estados da região Nordeste do Brasil	49
Tabela 12. Matriz de correlação pelo método de Pearson para produção de milho-em-grãos entre todos os estados da região Nordeste do Brasil.....	50
Tabela 13. Índice médio de perdas agrícolas (%) das culturas sobre o Nordeste e eventos climáticos.....	52
Tabela 14. Índice de perdas agrícolas média (%) das culturas no Nordeste e eventos climáticos.....	53

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Função densidade e probabilidade gamma. ..**Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
AG	Aquecimento Global
ANA	Agência Nacional de Águas
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS El	Niño-Oscilação Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MC	Mudanças Climáticas
NE	Nordeste
NEB	Nordeste brasileiro
OC	Ondas de calor
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
PAM	Produção Agrícola Municipal
PNM	Pressão ao Nível do Mar
SN	Sertão Nordestino
SO	Seca fraca
SPI	Standardized Precipitation Index
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TT	Tendência Tecnológica
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	JUSTIFICATIVA	18
3.	OBJETIVOS	19
3.1.	Objetivo Geral.....	19
3.2.	Objetivos específicos	19
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1.	Climatologia da Região Nordeste.	20
4.2.	Conceito de Seca.....	21
4.3.	Sistemas de variabilidade climática que intensificam a Seca no Nordeste....	22
4.4.	Secas no Nordeste.....	23
4.5.	Ondas de calor.....	24
4.6.	Tendências observadas de ondas de calor.	25
4.7.	Impactos de Onda de calor na agricultura.	26
4.8.	Impactos na produção de Cana-de-Açúcar, Milho e Soja.	29
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1.	Área de estudo.....	31
5.2.	Dados.....	31
5.3.	Análise e identificação de ondas de calor.....	32
5.4.	Índice de Seca	33
5.5.	Estatística Descritiva	35
5.6.	Análise da evolução da produtividade das agriculturas	35
5.7.	Análise de correlação pelo método de Pearson.	36
5.8.	Perdas de Produção Agrícola	37
6.	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	37
6.1.	Tendências de Ondas de Calor e Impactos na Produção Agrícola.	37
6.2.	Índice de precipitação padronizada	43
6.3.	Correlação da produção de cana-de-açúcar, milho e soja entre todos os estados da região Nordeste do Brasil	48
6.4.	Perdas de Produção Agrícola devido a seca.....	52
6.5.	Estimativa de produção ao longo do tempo e tendências de ganhos e perdas. .	57
7.	CONCLUSÕES.....	66
8.	REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água é uma característica de diversos ambientes do planeta, resultante de fatores naturais e antrópica. Entre os fatores naturais que contribuem para essa escassez estão as mudanças climáticas, que ocorrem de forma frequente e acelerada em escala global. Prospecções científicas Brown et al. (2000) e Freitas & Santos, 1999, indicam que a agricultura será afetada negativamente por essas mudanças, especialmente devido ao aumento de secas e ondas de calor em nível global.

Estudos realizados em várias regiões do mundo, inclusive no Brasil, mostram que o aumento das temperaturas mínimas e máximas desde a década de 1960 tem prejudicado significativamente a sociedade (MARENGO; CAMARGO, 2008; SKANSI *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2017). Entre 2013 e 2016, cerca de 48 milhões de pessoas foram afetadas pela seca e pela estiagem, sendo que 83% desses indivíduos residem na região Nordeste do Brasil (NEB), segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2017.

A seca é um fenômeno complexo, podendo ser desencadeada por diversos mecanismos ou fatores contribuintes, como déficits de precipitação e aumento de temperatura e evapotranspiração (KIEM et al., 2016). Uma das principais dificuldades no estudo da seca é a ausência de uma definição precisa e universalmente aceita. Dado que há inúmeras definições em uso, a presença e a intensidade da seca precisam ser avaliadas regionalmente, levando em conta as características climáticas e os impactos resultantes do período de estiagem (WMO, 2006).

Os impactos causados pelo aumento das secas são visíveis em todo o mundo, incluindo o Brasil. Esses impactos afetam usinas de energia, a saúde dos ecossistemas, risco de incêndios florestais e prejudicam setores produtivos como a agricultura. Além dos eventos de secas, têm as ondas de calor (OC), cuja frequência tem aumentado desde o final do século XIX. As chamadas 'ondas de calor' tornaram-se mais evidentes a partir do século XXI, ocorrendo com maior intensidade e frequência, e estabelecendo novos recordes em temperaturas altas e duração (GEIRINHAS et al., 2018).

No Brasil, culturas como a cana-de-açúcar, milho e soja enfrentam o risco de drásticas reduções devido ao aquecimento global. A expansão da cultura da cana ocorreu no NEB durante o período de 1970 a 1975, impulsionada pelo programa do álcool

(Proálcool), especialmente nos tabuleiros costeiros, uma vez que essa região é favorecida por chuvas em determinadas épocas do ano. No entanto, nos últimos anos, a má distribuição e a redução dos volumes de chuva têm sido frequentes na região, causando danos à cultura, como a mortalidade de brotos de cana-de-açúcar, o que força uma renovação prematura dos canaviais. A região do NEB também não tem sido favorável para as culturas de milho e soja devido às suas altas temperaturas.

Os eventos climáticos extremos podem afetar diversos aspectos relacionados à produção de alimentos. O aumento nos custos de produção visa compensar as perdas resultantes desses impactos, enquanto o encarecimento dos alimentos decorre de sua menor disponibilidade para a população, representando uma preocupação para as famílias mais vulneráveis do país. Dessa forma, a intensificação das perdas agrícolas devido às mudanças climáticas pode potencializar os custos e os preços dos alimentos.

Torna-se crucial realizar uma análise dos principais fatores que conectam a produção agropecuária brasileira aos eventos climáticos extremos, com o objetivo de desenvolver medidas para minimizar as perdas de safras e, conseqüentemente, os impactos na disponibilidade e no acesso aos alimentos pela população.

2. JUSTIFICATIVA

À medida que as temperaturas globais médias aumentam, também aumenta a probabilidade de anomalias mais extremas de temperatura quente, resultando em OC (DOSIO *et al.*, 2018). A região NEB é profundamente impactada, tanto econômica quanto socialmente, por eventos naturais, especialmente as secas. Esses eventos resultam em impactos conhecidos, como déficit hídrico, aumento das ondas de calor e efeitos diretos na agricultura (MARENGO; CAMARGO, 2008).

A inserção de um estudo sobre ocorrências e tendências de OC e seca é de suma importância devido aos impactos significativos que esses fenômenos climáticos podem ter na produção agrícola, especialmente nas culturas de cana-de-açúcar, milho e soja.

No caso da cana-de-açúcar, essas condições climáticas adversas podem reduzir o teor de sacarose, afetando tanto a qualidade quanto a quantidade da produção de açúcar e etanol. Além disso, a seca pode comprometer o sistema radicular da cana-de-açúcar, tornando-a mais suscetível a doenças e pragas.

Para o milho e a soja, culturas de grande importância econômica no Brasil, as OC e a seca podem afetar diretamente o desenvolvimento das plantas durante períodos críticos, como o florescimento e o enchimento de grãos, reduzindo assim o rendimento e a qualidade dos produtos (THORNTON et al., 2009).

Portanto, a realização de um estudo detalhado sobre as ocorrências e tendências de ondas de calor e secas é crucial não apenas para compreender os impactos negativos desses eventos climáticos na produção de culturas-chave, como cana-de-açúcar, milho e soja, mas também para fornecer subsídios fundamentais ao desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficazes. Esse estudo é essencial para orientar produtores e gestores na adoção de técnicas que possam minimizar os efeitos adversos das mudanças climáticas, além de contribuir para a formulação de estratégias de adaptação e mitigação. Ao garantir maior resiliência do setor agrícola, essas ações são vitais para proteger a segurança alimentar e promover a sustentabilidade frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Neste contexto, é relevante uma análise de tendências de OC e secas em áreas do NEB, considerando que os processos de desertificação, especialmente em áreas de clima semiárido, geram graves consequências para a agricultura e afetam diretamente a disponibilidade de água, prejudicando também a saúde da população. Sendo assim, esse tema é de grande importância, pois visa demonstrar os problemas decorrentes das alterações climáticas e seus impactos diretos sobre a agricultura.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- O objetivo geral desta pesquisa é identificar e quantificar as tendências de ocorrências de ondas de calor e secas sobre a Região Nordeste do Brasil e seus impactos na produção agrícola das culturas de cana-de-açúcar, milho e soja, durante o período de 1961 a 2022.

3.2. Objetivos específicos

- Analisar a tendência da precipitação total anual da Região Nordeste do Brasil entre os anos de 1961 a 2022;
- Testar a capacidade de índices na caracterização da seca e avaliar se condiz com os impactos observados no mesmo período para o desenvolvimento agrícola;

- Analisar a tendência de distribuição dos dias secos consecutivos visando identificar e caracterizar ondas de calor e seus impactos na produção agrícola;
- Analisar séries históricas de produção anual da agricultura do Nordeste correlacionando-as com os dados climatológicos observados nas culturas da cana-de-açúcar, milho e soja.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Climatologia da Região Nordeste.

O clima das regiões ao redor do mundo é amplamente determinado pela circulação da atmosfera, isso se deve ao aquecimento desproporcional da Terra pela radiação solar, pela distribuição assimétrica dos oceanos e continentes e pelas características topográficas dos continentes (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2017). Os padrões de circulação da atmosfera redistribuem calor, umidade e quantidade de movimentos globalmente (CINTRA, 2010). Entretanto, essa redistribuição é desigual com temperaturas e precipitações fora do normal, que têm grandes impactos sobre a atividade humana, afetando saúde e setores econômicos (BMAC, 1986).

O NEB apresenta predominantemente um clima semiárido, caracterizado por solos rasos e pedregosos, baixos índices pluviométricos, alta taxa de evapotranspiração e relevo variável (ARAÚJO, 2011), que vem se intensificando com o aquecimento global. Contém suas regiões fortemente influenciada por anomalias de temperatura da superfície do Mar (ATSM), especialmente pelo dipolo do Oceano Atlântico (MOURA; SHUKLA, 1981) e El Niño (ROUCOU *et al.* 1996).

Segundo Uvo e Berndtsson (1996), cinco fenômenos são responsáveis pelo regime de chuva do NEB: 1) Eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); 2) Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico, Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM); 3) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); 4) Frentes Frias e 5) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Além deste, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) foram identificados atuando entre os meses de abril a agosto (NEVES; ALCÂNTRA; SOUZA, 2016; GOMES *et al.*, 2019).

A região é frequentemente afetada por secas, resultando em perdas parciais ou totais na agricultura. Essas secas são causadas, principalmente pela irregularidade da estação chuvosa, com chuvas fortes e de curta duração (BRITO *et al.*, 2018). Estudos de Silva (2004), Sousa Júnior (2006) e Brito *et al.* (2018) demonstram que a região tem

sofrido intensas mudanças climáticas, caracterizadas por longos períodos de estiagem. Como resultado, a agricultura não irrigada no semiárido brasileiro tornou-se uma atividade marginal.

Normalmente, a temperatura média anual do NEB fica entre 20°C e 28°C, mas em alguns estados, como Piauí e Maranhão, pode chegar a 40°C. No sertão nordestino, a temperatura também é elevada e o clima é seco. A precipitação é bastante regular nesta região, com duração média de dois meses por ano (INMET, 2023).

4.2. Conceito de Seca.

A seca é um fenômeno natural recorrente que ocorre em todos os regimes climáticos (ZHAO et al., 2018) e cujos impactos afetam diferentes setores da sociedade, tais como a geração de energia elétrica, recursos hídricos, turismo, os ecossistemas e principalmente a agricultura (IONITA et al., 2016). Em termos gerais, as secas são definidas como desastres naturais pois correspondem a uma situação persistente de escassez de água ao longo do tempo, que culminam em impactos negativos significativos nas atividades socioeconômicas e nos ecossistemas (SUDENE, 2022).

Uma segunda definição de seca é que a disponibilidade hídrica não é suficiente para atender as necessidades hídricas de uma determinada área, afetando os sistemas ecológicos, econômicos, sociais e culturais (CASTRO, 2003). Os principais danos e perdas incluem: abastecimento inadequado de água para a população; perda da agricultura e pecuária; deslocamento da população; incêndios florestais; deterioração da qualidade da água; problemas de saúde; conflito e pobreza (FAVERO, 2016). Sabendo dessas consequências estudos e análises (CASTRO, 2003) das secas têm atraído a atenção do mundo que tendem não só a entender as características e o padrão de ocorrência desses fenômenos, como também buscar formas de minimizar ou até mesmo mitigar seus efeitos danosos à população como avisos para se ter uma programação melhor da forma de agir nesses casos.

De modo mais característico, os significados de seca podem ser de dois tipos: as conceituais e as operacionais (WILHITE e GLANTZ, 1985). A definição conceitual, é a que delinea o conceito básico de seca como uma descrição dos processos físicos envolvidos, como escassez da precipitação, deficiência quanto à umidade do solo ou à falta de água nos rios e reservatórios. As definições operacionais de seca, estão

relacionadas às atividades que focam na identificação do início, da duração e do término dos diferentes episódios ocorridos, incluindo a avaliação de sua severidade também. O intuito desses significados operacionais é originar uma série de informações relacionadas aos eventos de secas já ocorridos e permitir que seja dado suporte e avisos prévios sobre os eventos de secas que podem vir a acontecer (MUKHERJEE et al., 2018).

4.3. Sistemas de variabilidade climática que intensificam a Seca no Nordeste.

O clima apresenta características anuais, sazonais, interanuais, interdecadais e variação multidecadal que produz oscilações nos ciclos climáticos em diferentes regiões do planeta (SILVA, 2022). Assim, é necessário avaliar o papel dos modelos de representação da variabilidade climática para entender seus mecanismos e sua influência nas mudanças climáticas (CGEE, 2014).

As chuvas do Brasil são motivadas pela variabilidade climática natural (SILVA, 2022). A variabilidade interanual exhibe modificações no regime de chuva, ainda que seja menor do que a variabilidade sinótica. Além disso, a variabilidade espacial da chuva está associada as médias e baixas latitudes, com característica de secas nas latitudes subtropicais e chuvas em latitudes tropicais do Brasil. Entre os modos de variabilidade que operam sobre o Brasil, o ENOS é a principal causa da variabilidade interanual do clima (SILVA, 2022).

No Brasil, AB e VCAN exercem grande impacto no clima. A variação interanual na localização e intensidade AB estão relacionadas com a precipitação na área, ao passo que o VCAN tem uma relação com o cavado do Nordeste, onde sua percepção sobre o NBE é associada a precipitação do continente africano (FIGUEROA; NOBRE, 1990). A alta variabilidade interanual é comum no NEB, o qual é caracterizado pela ocorrência de anos extremamente secos e outros anos de chuvas fortes, com seca moderada, interferindo diretamente na direção dos Recursos Hídricos (MARENGO; CAMARGO, 2008). Estudos anteriores demonstraram evidências claras de que regiões semiáridas do NEB são afetadas pelos Oceanos Pacífico equatorial e Atlântico tropical (SOUZA; NOGUEIRA; NOGUEIRA, 2017).

Autores como Hirons e Klingaman (2016) e Lyra *et al.* (2017) apontaram a existência de seca severa relacionada modos de variabilidade climática, ENOS e Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Dessa forma, o NEB tem como seu principal

controlador climático as variações das TSM's do Pacífico e do Atlântico, que por sua vez levam a alterações climáticas causando as chuvas e secas (SILVA, 2022).

4.4. Secas no Nordeste.

A seca afeta o NEB há anos, causando a morte de plantas e impactando negativamente a economia, especialmente nos setores de agricultura e pecuária, essenciais tanto para o abastecimento interno quanto para as exportações. Desde 1909, o governo tenta investir em projetos que visem reduzir esses impactos, mas muitos falham por preconceito, ou falta de recursos financeiros (ARAÚJO, 2011). Por outro lado, iniciativas como planos Safra e o Bolsa Estiagem ainda ajudam muitas famílias a sobreviverem.

Na década de 1950, o governo começou a tomar medidas mais rígidas contra a seca como construção de cisternas e canais e criação de programas sociais para as pessoas atingidas (ARAÚJO, 2011). Não se tem registro de mortes em consequência da seca desde 1970, ainda que a saída do semiárido durante as secas continua, em grau muito menor (ARAÚJO, 2011). Santos Leite (2020) destacou que, ainda que se tenha muitas propostas para auxílio da população que sofreu com as secas severas do Nordeste, a aplicação de diferentes programas ainda não atua da forma que deveria.

O semiárido nordestino é marcado pela seca desde o início de sua história. Secas recorrentes atrapalharam o crescimento populacional, onde a ocupação dos sertões nordestinos aumentou só no início do século XVIII, quando uma Carta Régia impediu a criação de gado dentro de 10 léguas da costa até os sertões nordestinos (CAMPOS et al, 2001). A partir daí, a pecuária passou a desempenhar um papel importante na economia regional. Isso continuou até meados do século XIX sem a ocorrência de uma seca mais severa. Durante este período, a população e o rebanho cresceram rapidamente, no entanto, esse crescimento não foi seguido por um crescimento das infraestruturas de água (CAMPOS et al, 2001). O resultado é uma população altamente vulnerável com base na capacidade de armazenamento de água de pequenas barragens e nas águas temporárias de aquíferos aluviais. Em 1777-1779, uma grande seca atingiu a população, sendo estimado que mais de 500.000 pessoas morreram no Ceará e arredores, sendo esta, considerada por alguns pesquisadores, o maior desastre que já atingiu o Brasil (CAMPOS et al, 2001).

Entre 1991 e 2012 os danos das secas no NEB atingiram mais de 41 milhões de pessoas, segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2015).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, no primeiro semestre de 2016, as secas de curto e longo prazo foram muito severas, especialmente nos estados do Maranhão, Bahia, Piauí, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte (as 3 últimas cidades com o maior número de estados de emergência). No decorrer de 2016, todos os estados do Nordeste declararam estado de emergência (cerca de 1.100 municípios), e o Ceará passou por cinco secas consecutivas de 2011 a 2016, com níveis dos reservatórios em 8,8%, o pior em 20 anos (INMET, 2017).

4.5. Ondas de calor.

As OC e/ou os extremos de temperatura são objetos de estudo de diversos pesquisadores ao redor do planeta, Rusticucci (2012) definiu ondas de calor como continuações diárias de irregularidades ou anomalias de temperaturas com mesmo sinal. Para tanto, três parâmetros são considerados: o comprimento ou persistência (número de dias ininterruptos da anomalia, tendo o mesmo sinal), o valor máximo (anomalia positiva) ou mínimo (anomalia negativa) da onda e a “intensidade” (média de anomalias da onda).

Uma OC pode ser entendida como um intervalo de tempo moderadamente longo, onde as temperaturas máximas e/ou mínimas excedem um determinado limiar, sendo este limiar muitas vezes baseado num percentil de temperatura (FISCHER & SCHÄR, 2010; GEIRINHAS et. al., 2017; PERKINS & ALEXANDER, 2013), no entanto, existem várias definições diferentes para o conceito, adotadas por diferentes instituições e autores, como por exemplo a proposta por Robinson (2001) que descreve que as OC se baseiam: “na excedência de um valor absoluto previamente fixado, sendo um desvio relativamente à normal climatológica; ou, ainda, em índices sustentados na combinação dos valores diários da temperatura do ar e da humidade relativa.” Rey *et al.* (2007) consideraram OC como um período de pelo menos três dias consecutivos em que as temperaturas máxima e mínima, são simultaneamente superiores à respetiva proporção.

Linares e Díaz (2008) citam que uma OC do ponto de vista hospitalar é considerada quando a temperatura máxima diária ultrapassa os 36°C, nesse caso eles utilizaram a cidade de Madrid como referência. Já no *Environment Canada*, é o período de no mínimo três dias consecutivos em que a temperatura máxima diária é de pelo menos 32°C ou superior (LINARES e DÍAZ, 2008).

Para Stott *et al.*, 2013 e KONG *et al.*, 2020, essas OC consistem em um período, geralmente com duração de vários dias, com temperaturas significativamente superior aos valores médios ou máximos observados em anos anteriores, considerando as mesmas datas, que ocasionam vários impactos negativos aos ecossistemas marinhos e terrestres. Segundo Marto (2005), OC são fenômenos climatéricos aleatórios, com duração de ao menos três dias consecutivos com temperaturas máximas ou mínimas mais altas do que as esperadas para determinadas localidades e mesma épocas do ano. Já de acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), uma OC ocorre quando, num intervalo de pelo menos seis dias consecutivos, a temperatura máxima diária é superior em 6 °C ao valor médio diário no período de referência.

Fischer e Knutti (2015) e Geirinhas *et al* (2018) destacam que o planeta tem apresentado ocorrência de eventos extremos de calor desde o final do século XIX, contudo, episódios com maiores intensidades passaram a ser mais frequentes a partir do século XXI, com novos recordes de temperatura e longa duração. Segundo IPCC (2014), dentro da comunidade científica há um grande consenso de que os efeitos mais perigosos das alterações no clima global estão relacionados a esses eventos climáticos extremos.

Atualmente, os eventos de OC tornaram-se uma grande preocupação, principalmente devido aos seus efeitos na saúde humana. Existe uma importante corrida mundial para entender e caracterizar as OC, pois este parâmetro influencia diversos ramos da sociedade, como na economia local e global, infraestrutura e atividades agrícolas (GEIRINHAS *et al.*, 2017; SHIVA; CHANDLER; KUNKEL, 2019). Diversos estudos mencionados anteriormente, apontam um aumento na intensidade e frequência em relação a OC ao redor de todo planeta, além disso, existe previsões do aumento nesses extremos durante todo o século XXI (BALDWIN *et al.*, 2019; KHAN *et al.*, 2019; BRESHEARS *et al.*, 2021).

4.6. Tendências observadas de ondas de calor.

Tendência de OC em uma série temporal de dados pode ser definida como uma mudança contínua e sistemática nos parâmetros de uma amostra, onde se exclui mudanças periódicas e quase periódicas, para estudos em séries temporais climáticas recomenda-se que o conjunto de dados tenha no mínimo 30 anos consecutivos (YEVJEVICH; 1972). A análise de tendências permite avaliar se é observada alteração climática diferente da variabilidade natural do clima, indicando mudança temporal

(BACK, 2001). Essa análise pode ser realizada a partir de testes estatísticos de hipótese, que visam avaliar se os resultados apresentam significância estatística a fim de validar os resultados obtidos (LEVINE; WILKS, 2000).

Com temperaturas elevadas, é bastante provável a presença bem maior de ocorrências de OC, com uma tendência de aumento da duração, frequência e intensidade devido às mudanças climáticas (PERKINS-KIRKPATRICK; GIBSON, 2017). No Brasil, Bitencourt *et al.* (2020) mostraram que esse aumento já pode ser observado em todas as regiões do país, com a identificação do aumento de ocorrência de OC após o início deste século. Estudos recentes observaram que a urbanização tem um impacto significativo nas tendências de eventos de temperatura extrema nas partes leste e sudeste da China (LUO; LAU, 2017; YANG *et al.*, 2017). No entanto, ainda não está claro se há uma contribuição da urbanização para as tendências de OC (PAPALEXIOU *et al.*, 2018).

Alguns autores como Rusticucci (2012) e Shiva, Chandler e Kunkel, 2019. Relataram em seus estudos que em diferentes países as OC têm se tornado cada vez mais frequentes, intensas e duradouras, e sugeriram que esse aumento pode estar relacionado com as mudanças climáticas, com o processo de urbanização e uso e cobertura do solo.

4.7. Impactos de Onda de calor na agricultura.

Esses eventos extremos de temperatura elevada podem ter impactos significativos na agricultura, afetando principalmente as plantações. A agricultura depende basicamente de fatores climáticos como radiação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, e principalmente temperatura e precipitação (MORAES, 2005). As MC podem afetar a produção agrícola de várias maneiras, entre elas as mudanças nos fatores climáticos, incluindo a presença e o fortalecimento de eventos extremos.

Redução da produtividade agrícola: As altas temperaturas durante as OC podem causar danos às plantas e diminuir sua produtividade. O calor excessivo pode levar à queima das folhas, desidratação, redução da fotossíntese e alterações no desenvolvimento das culturas. Isso resulta em uma diminuição na produção de alimentos e pode afetar a segurança alimentar. (EMBRAPA, 2022).

Estresse hídrico: O calor intenso aumenta a taxa de evaporação da água no solo, levando a um aumento na demanda hídrica das plantas. Isso pode levar a um estresse hídrico, onde as plantas não recebem água suficiente para suas necessidades fisiológicas. O estresse hídrico durante as OC pode resultar em murchamento das plantas, diminuição na absorção de nutrientes e danos irreversíveis. Schlenker e Roberts (2009).

Mudanças nos padrões de doenças e pragas: O calor excessivo durante as ondas de calor pode alterar os padrões de ocorrência de doenças e pragas nas plantações. Algumas doenças e pragas podem se proliferar mais rapidamente em condições de calor, levando a surtos e danos adicionais às culturas. Isso pode exigir o uso de mais pesticidas e medidas de controle, aumentando os custos de produção e o impacto ambiental. C. et al. (2017)

Prejuízos econômicos: Os impactos das OC na agricultura também têm consequências econômicas significativas. As perdas de colheitas devido a danos causados pelo calor podem resultar em perdas financeiras para os agricultores. Além disso, o aumento dos custos de irrigação para mitigar o estresse hídrico e a necessidade de investir em medidas de adaptação também podem afetar negativamente a viabilidade econômica da agricultura. (EMBRAPA, 2022).

Pesquisas baseadas em modelos de circulação geral mostram que a produtividade de várias culturas tende a diminuir em algumas partes do mundo e aumentar em outras. Como resultado, a produção em regiões tropicais e subtropicais, principalmente na África subsaariana, tende a ser mais afetada devido aos climas áridos e semiáridos generalizados e sua dependência da agricultura (Jones *et al.*, 1997). No Brasil, os impactos devido às OC podem gerar falhas nas safras agrícolas e grandes prejuízos econômicos (Bitencourt *et al.*, 2020). Na última década, intensas oscilações das condições agrometeorológicas causaram efeitos severos na produção de alimentos e na economia, especialmente no sul do país. As culturas mais afetadas em relação a essas oscilações de clima foram as de soja e milho, sendo que na safra da soja em 2005 a produção apresentou uma redução de 75% na produção de grãos, quando comparada à safra de 2003 (IBGE, 2012)

Diversas áreas do setor econômico lidam com a redução da produtividade do trabalhador e das culturas plantadas durante as OC. Universalmente, projeta-se que

2% do total de horas de trabalho seja perdido todos os anos, devido ao calor intenso para trabalhar ou porque os trabalhadores precisam trabalhar em um ritmo mais lento (KJELLSTROM *et al.*, 2019). Acredita-se que a perda de produtividade devido ao estresse térmico no trabalho, particularmente nos países em desenvolvimento, seja avaliada em US \$ 4,2 trilhões de dólares por ano até 2030, gerando mais desigualdade (KJELLSTROM *et al.*, 2019).

No setor agrícola, onde 940 milhões trabalham direta ou indiretamente, as altas temperaturas colocam trabalhadores, plantações e animais em condições extremas para a tolerância fisiológica ao calor e à seca (VITALI *et al.*, 2015). Isso procederá em perda de mão de obra, em colheitas menores para os agricultores, preços mais altos para os consumidores e impactos negativos nos meios de subsistência. Um exemplo dessas perdas ocorreu durante a OC de 2012 nos Estados Unidos, na qual o rendimento do milho caiu 13%. No curto prazo, esses eventos climáticos que resultam em volatilidade dos preços dos alimentos colocarão os países de baixa renda e aqueles com altos índices de dependência de importação de alimentos em risco de insegurança alimentar (VITALI *et al.*, 2015). A exemplo disto, os efeitos combinantes de calor e seca causaram reduções adicionais de rendimento de milho e soja de até 20% em partes dos Estados Unidos, e de até 40% na Europa Oriental e no sudeste da África (Vitali *et al.*, 2015).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) divulgou que uma OC que chegou ao Rio Grande do Sul em janeiro de 2022 e atingiu uma marca recorde de 43°C. Com o clima quente e seco, especialistas alertaram sobre um agravamento no abastecimento de água e no setor agrícola. Fenômenos assim fazem com que mais água seja utilizada para irrigação e consumo próprio, sendo assim, imprescindível um planejamento adequado para evitar o agravamento dos problemas de estiagem.

Em dezembro de 2021, cerca de 200 municípios do RS decretaram emergência à Defesa Civil em razão da estiagem. O governo estadual da região alegou que a seca foi relacionada ao fenômeno La Niña, que provocou chuvas bastante irregulares e mal distribuídas, e que programas de apoio à agricultura familiar e às famílias atingidas já estão sendo disponibilizados (Canal Rural, 2022).

Segundo Ferreira (2010), o calor extremo compromete o crescimento e desenvolvimento das plantações, pois a intensificação do processo de evapotranspiração

faz com que a vegetação perca nutrientes vitais. Estudos recentes têm demonstrado o efeito da ocorrência de temperaturas elevadas sobre a queda de produtividade das principais culturas agrícolas, como soja, milho e algodão. Trabalhos com séries temporais de dados de satélites mostraram que os danos causados às plantas, com diminuição do desenvolvimento da cultura, podem estar associados à vulnerabilidade frente a ocorrência de OC (NEMANI; RUNNING, 1997; LIU; KOGAN, 2002; SCHLENKER; ROBERTS, 2009; GUSSO, 2013).

Prejuízos na produtividade da soja ocorrem mesmo quando as temperaturas médias atingem apenas um ou dois graus acima do ideal para a cultura (GUSSO, 2013). Embora a agricultura seja uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa, também é altamente vulnerável às mudanças climáticas. A Embrapa mostrou que o cenário agrícola do Brasil deve mudar significativamente no futuro (EMBRAPA, 2008), incluindo na região nordeste do país.

O aumento de temperatura associado às mudanças climáticas devido ao aquecimento global, quaisquer que sejam as chuvas que possam ocorrer, são suficientes para causar aumento da evaporação de lagos, represas e reservatórios e aumento das necessidades evaporativas das plantas.

Em resumo, as OC representam um desafio significativo para a agricultura, afetando negativamente a produtividade das plantações, aumentando o estresse hídrico, causando prejuízos econômicos, influenciando os padrões de doenças e pragas, e impactando o bem-estar animal. É crucial implementar estratégias de adaptação e mitigação para minimizar esses impactos e garantir a resiliência do setor agrícola.

4.8. Impactos na produção de Cana-de-Açúcar, Milho e Soja.

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma cultura de porte alto originária do sudeste asiático e da Índia Ocidental (Aranha e Yahn, 1987). Seus produtos incluem açúcar, álcool, aguardente, alimentação animal e energia elétrica (Szmrecsányi e Moreira, 1991). Constitui um dos principais produtos agrícolas do Brasil, com grande importância econômica e social (ALFONSI ET AL., 1987). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com 10,56 milhões de hectares e uma produção de mais de 670 milhões de toneladas de colmos, com um rendimento médio de 71,3 toneladas de colmos por hectare (IBGE, 2023).

Para países como o Brasil, altamente dependentes dos recursos naturais, os impactos dos eventos extremos têm uma importância econômica e social significativa (Thornton et al., 2009). Quase 30% do PIB brasileiro estão relacionados ao agronegócio (Barros, 2009). OC e secas podem afetar negativamente a produtividade e a qualidade da cana-de-açúcar ao reduzir o crescimento das plantas, diminuir a acumulação de biomassa e aumentar a evapotranspiração, resultando em maior demanda por água e estresse hídrico (EMBRAPA, 2008).

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de alta importância econômica, utilizada como alimento humano, animal e para a produção de biocombustíveis. É a segunda cultura mais produzida no Brasil, depois da soja, e destaca-se por sua qualidade nutritiva e versatilidade (WERLE et al., 2011). A temperatura ideal para o cultivo de milho varia entre 24°C e 30°C, mas temperaturas noturnas acima de 24°C podem aumentar a respiração e reduzir a produção (LANDAU et al., 2023). OC podem prejudicar a produtividade do milho ao afetar a polinização e o desenvolvimento dos grãos (LANDAU et al., 2023).

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é uma das commodities mais importantes no mercado nacional e internacional, sendo a quarta mais consumida e produzida no mundo, atrás do milho, trigo e arroz. No Brasil, a soja tem grande importância socioeconômica, gerando riquezas e empregos (Embrapa, 2014). A produção de soja no Nordeste é significativa, apesar dos desafios climáticos específicos da região, como altas temperaturas e escassez de chuvas, que podem reduzir o rendimento e a qualidade dos grãos (IBGE, 2023).

OC e secas podem acelerar o ciclo de desenvolvimento da soja, resultando em maturação mais rápida e redução do período de enchimento dos grãos, afetando negativamente o tamanho, peso e produtividade (Farooq et al., 2009). Além disso, o estresse térmico pode prejudicar a fixação de nitrogênio pela soja, comprometendo seu crescimento saudável (Farooq et al., 2009).

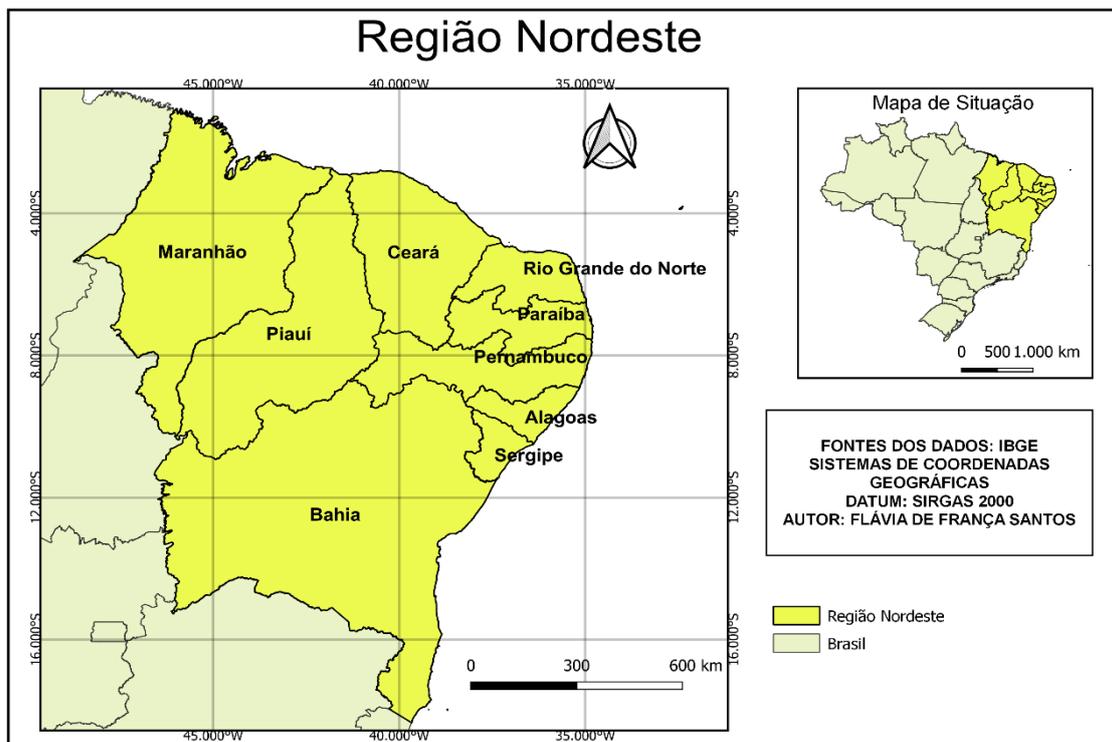
É crucial considerar as condições locais de clima, solo e manejo agrícola ao avaliar os impactos das OC e secas nas culturas agrícolas do NB. Estudos contínuos e estratégias de adaptação são essenciais para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas nas principais culturas agrícolas do país.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

A área em estudo é o Nordeste do Brasil, localizada entre os paralelos de $1^{\circ} 04' 48''$ e $18^{\circ} 19' 12''$ da latitude S e os meridianos $34^{\circ} 48' 36''$ e $48^{\circ} 43' 12''$ de longitude O Grw (FIGURA 1), recebe a máxima intensidade de energia solar, uma vez que essa energia globalmente apresenta excesso no equador e déficit nos polos (SUDENE, 2015). Representando 18% do território brasileiro, abrange uma área de $1.554.257 \text{ km}^2$, (AYOADE, 2017), com a segunda maior população do país (por região), detém 25% da população brasileira, e conta com uma densidade demográfica de, aproximadamente 53 milhões hab./ km^2 (IBGE,2023).

Figura 1. Região Nordeste do Brasil e suas coordenadas geográficas.



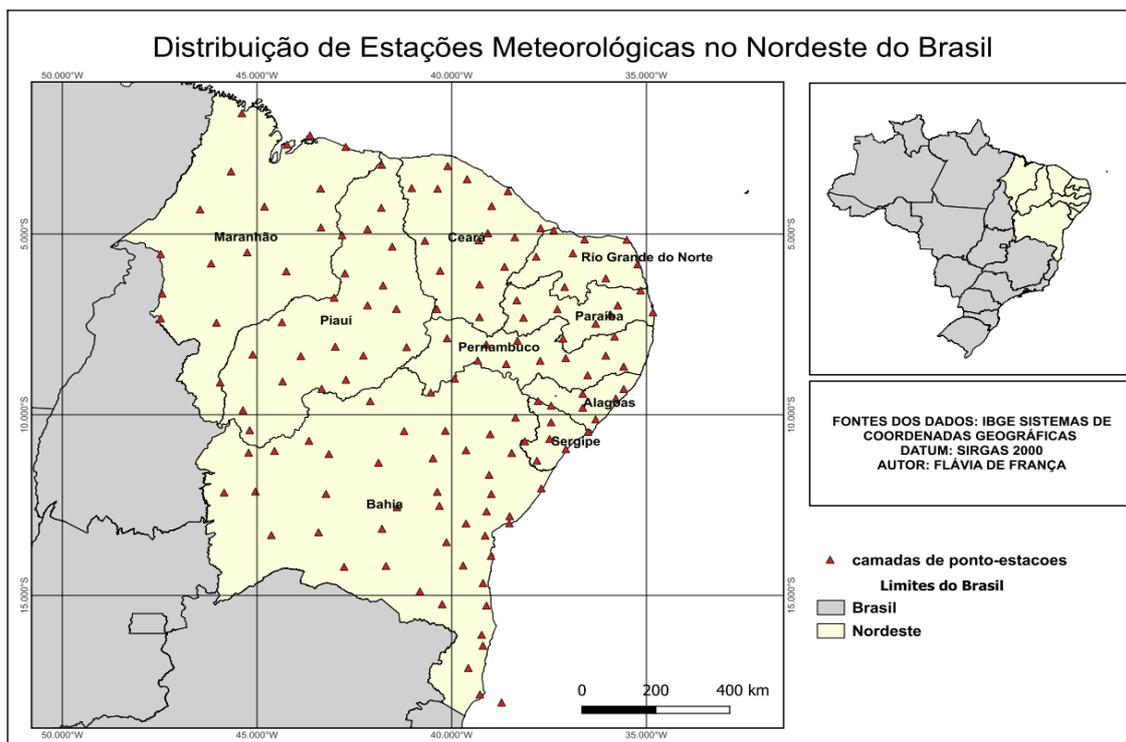
Fonte: A autora (2023)

5.2. Dados

Os dados observados das variáveis meteorológicas sobre a região do NEB foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As variáveis utilizadas neste estudo foram de precipitação (mm), temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura média ($^{\circ}\text{C}$) para 141 estações de superfície que compreendem os 9 estados do NEB (FIGURA 2), a saber: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Maranhão

(MA), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN) e Sergipe (SE).

Figura 2 - Distribuição de Estações Meteorológicas no Nordeste do Brasil.



Fonte: A autora (2024).

Os dados de produção agrícola referentes aos 9 estados do NEB foram adquiridos juntos ao Produção Agrícola Municipal (PAM, 2024). Foi utilizada a variável de rendimento médio da produção (Quilogramas por Hectares) ano X produção das lavouras, para as culturas de cana-de-açúcar, milho e soja.

5.3. Análise e identificação de ondas de calor

Foram utilizados dados diários da temperatura máxima do ar disponibilizados pelo INMET. Os registros foram obtidos a partir de medições de estações meteorológicas convencionais. A operação dessas estações teve início em períodos diferentes, mas a maioria delas possuem registros disponíveis no BDMEP a partir de 1963. No presente estudo, consideramos o período de 02 de dezembro de 1961 a 30 de dezembro de 2022, o que corresponde a 61 anos.

A identificação das OC neste estudo foi baseada no índice CTX90pct, uma metodologia utilizada para detectar eventos de calor extremo. Utilizamos dados diários de temperatura máxima do ar registrados nas estações meteorológicas. Para cada dia do

ano, calculamos a temperatura máxima que representa o percentil 90, usando uma janela temporal de 15 dias ao redor de cada data. Isso significa que para cada dia, determinamos um valor de temperatura que está acima de 90% dos registros históricos desse período, o que nos permitiu ter um valor de referência específico para cada dia do ano, ajustado ao ciclo sazonal. Consideramos uma OC qualquer período em que a temperatura máxima diária excedesse o valor do percentil 90 por três dias consecutivos ou mais. Para medir a intensidade das OC, utilizamos o índice Graus-Dias de Excedência (GDE), que soma os valores de temperatura que excedem o percentil 90 no período de ocorrência de OC. Foram avaliados os ciclos sazonal e anual das OC, para identificar padrões e tendências (PERKINS e ALEXANDER, 2013).

5.4. Índice de Seca

Os indicadores de seca foram desenvolvidos com o propósito de detectar, avaliar e acompanhar a intensidade da seca e sua duração ao longo do tempo. Além disso, têm a capacidade de se adaptar a várias perspectivas ou categorias de seca. Eles representam ferramentas valiosas para a compreensão e avaliação de eventos climáticos, hidrológicos e agrícolas, desempenhando um papel crucial no acompanhamento e na caracterização temporal e espacial desses fenômenos. A combinação desses índices com outras técnicas de análise possibilita a identificação de padrões de variabilidade temporal e espacial, bem como tendências nas regiões de estudos, conforme descrito por Medeiros (2016) e Rosa (2011).

Dos vários índices utilizados para caracterizar a seca, destaca-se o *Standardized Precipitation Index* ou Índice de Precipitação Padronizado, SPI (MCKEE, 1993). O uso do SPI tem se expandindo em todo o mundo e foi a base para as definições de seca neste trabalho. Algumas características da seca são: sua base conceitual porque reflete as diferenças na precipitação em consideração a uma condição normal; sua versatilidade, na medida em que pode ser calculado em diversas escalas e períodos de tempo; sua função apenas da probabilidade, o que permite que se utilize a função de distribuição de probabilidades que melhor se ajuste a amostra de dados de precipitação; sua capacidade de caracterizar tanto períodos secos quanto chuvosos e; sua adequação a qualquer variável hidrológica (MCKEE, 1993).

O SPI apresenta limitações, Mishra e Singh (2010) alegam que a principal delas é a obrigação de longos registros históricos para seu cálculo sólido, o que nem sempre

está disponível, com diversas limitações e dificuldades de serem encontrados. Apesar disto, índices como esse têm sido empregados nos últimos anos em vários estudos que tem como objetivo auxiliar os agricultores e tomadores de decisão no que se refere à avaliação temporal e espacial da seca, em sistemas de monitoramento de secas, e previsão de produtividade das culturas (KUMAR; PANU, 1997; ULIANA *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2020; SOUZA; CARDOSO; SILVA, 2022).

Os dados de precipitação totais mensais, foram somados em escalas diversas, entre 1, 3, 6, 12 meses. Sua formulação é melhorada na função densidade e probabilidade Gamma (Equação 1), que é calculada mensalmente. Os valores atribuídos foram normalizados e transformados para uma distribuição normal, ou seja, média 0 e variância 1 (EDWARDS, 1997). Os cálculos do SPI utilizaram apenas valores de chuva (LYRA *et al.*, 2017), classificando os eventos de seca quando o SPI é continuamente negativo e terminando quando o SPI é positivo (SILVA, 2022). Para mais detalhes sobre as fórmulas matemáticas e procedimentos estatísticos usados para calcular o SPI, ver McKee *et al.* (1993).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

Em que, $\Gamma(\alpha)$ é a função gama, α é a forma do parâmetro ($\alpha > 0$), β é o parâmetro de escala ($\beta > 0$), determinado pelo método da máxima probabilidade, x é a precipitação pluviométrica, que pode ser alterada de acordo com α e β

Após o cálculo, o SPI foi classificado de acordo com a Tabela 1 e analisado em escala anual (SPI-3, SPI-6, SPI-12). Para análise do SPI, foi utilizado o pacote "SCI" da biblioteca do software R versão 4.0.3 (R Core Team, 2020). Neste estudo, foram avaliados os períodos secos anuais e interdecadais da série temporal de 61 anos e sua relação com modelos de variabilidade climática (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação climática quanto ao índice de SPI.

SPI	Classificação
≥ 2.00	Extremamente Úmido
1.00 to 1.99	Muito Úmido
0.50 to 0.99	Moderadamente Úmido

0.49 to -0.49	Próximo ao Normal
-0.50 to -0.99	Moderadamente Seco
-1.00 to -1.99	Muito Seco
≤ -2.00	Extremamente Seco

Fonte: McKee *et al.* (1993)

5.5. Estatística Descritiva

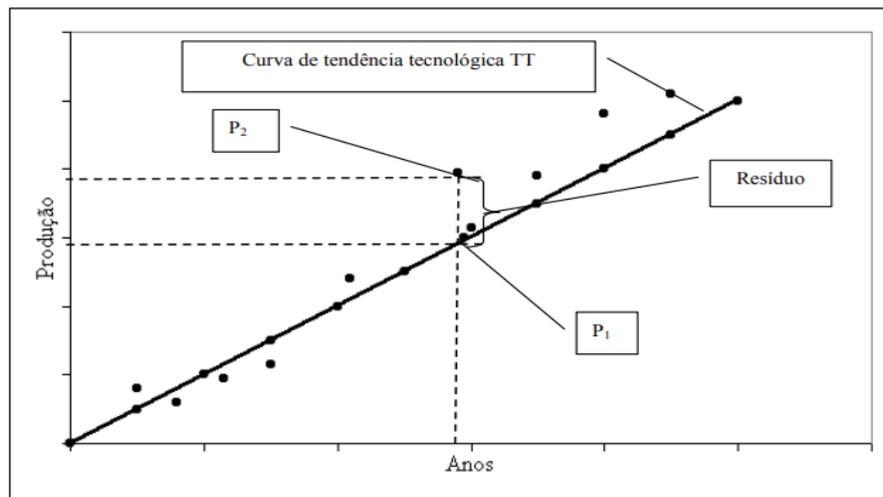
Nesse trabalho utilizou-se estatística descritiva e medidas de dispersão (máximo, mínimo, 1º quartil, 3º quartil, intervalo interquartil - IQR) cálculos para determinar a tendência central (média e mediana), dos dados de precipitação sobre o NEB. Os parâmetros estatísticos utilizados foram determinados através do Excel (SILVA, 2022).

5.6. Análise da evolução da produtividade das agriculturas

Para entender os impactos dos elementos meteorológicos e suas mudanças climáticas sobre as produções agrícolas, foi realizado um estudo nos 9 estados do NEB com a evolução da produção agrícola ao longo dos anos para três (03) culturas, a saber: cana-de-açúcar, milho e soja, através de um ajuste que considera a produção como uma variável dependente e os anos como variável independente. Este ajuste produz uma função chamada Tendência Tecnológica (TT) que pode explicar os efeitos de variáveis técnicas como: Melhorar as práticas de plantio, densidades de plantio, práticas culturais, políticas governamentais, fertilizantes, máquinas agrícolas e novas variedades (COSTA, 1988).

O índice TT é uma maneira matemática de explicar o aumento da variável dependente, neste caso a produção, em função do tempo. Quando não há dados históricos para as variáveis independentes atuando nesse processo, é possível reconhecer essas variáveis como recursos fixos de ano para ano, ou seja, a variável não apresenta mudanças bruscas de um ano para outro. Tendências técnicas plotadas no mesmo diagrama representa a produção esperada em razão da tecnologia e dos dados de produção observadas, ao longo dos anos. Admite-se que a diferença entre os pontos da curva e os pontos de produção para cada ano são resultados de variações climáticas ocorridas nestes anos, ou seja, os resíduos da produção observada e esperada. A figura 2 mostra o esquema conceitual do modelo adotado.

Figura 3. Esquema conceitual do modelo baseado nas diferenças entre a produção observada e estimada pela curva de tendência tecnológica.



Fonte: COSTA, 1988.

A reta representada por TT na figura 2 é a tendência tecnológica, as diferenças entre os pontos da reta e as observações de produção para cada ano (resíduo) são atribuídas às oscilações climáticas ocorridas, onde P_1 = produção esperada devido aos fatores tecnológicos, P_2 = rendimento observado, $P_1 - P_2$ = resíduo devido a fatores técnicos atribuído às variações climáticas. Os ajustes entre os índices climáticos e dados de produção foram verificados através da utilização do coeficiente de determinação (r^2), o erro quadrado médio (EQM), erro médio absoluto (EMA) e o índice de concordância (d) (WILLMOTT,1984).

5.7. Análise de correlação pelo método de Pearson.

Segundo Moore (2007) a correlação é uma avaliação da direção e intensidade da relação linear entre duas variáveis quantitativas, sendo por isso escolhida a correlação de Pearson. Na análise estatística de correlação, o coeficiente de correlação de Pearson está associado a relações que envolvem valores contínuos, sendo amplamente

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}}$$

- Se $0,6 \leq |r| \leq 1$ boa correlação;
- Se $0,3 \leq |r| \leq 0,6$ correlação fraca;
- Se $|r| < 0,3$ praticamente não existe correlação.

empregado, por exemplo, no cálculo de aumentos de temperatura e em diversas outras temáticas.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) tem uma escala de -1 a 1. O sinal atribuído indica a direção do relacionamento, sendo positivo ou negativo, enquanto o valor proporciona uma indicação da intensidade do vínculo entre as variáveis. Uma correlação perfeita, atingindo os extremos de -1 ou 1, sugere que o escore de uma variável pode ser precisamente determinado ao conhecer o escore da outra. Em contrapartida, uma correlação com valor zero indica a ausência de uma relação linear entre as variáveis. Ou seja, uma correlação negativa indica que as duas variáveis se movem em direções opostas. No cálculo do coeficiente de correlação não foram considerados os dados pluviométricos.

5.8. Perdas de Produção Agrícola

As perdas na produção, desde o plantio até a pré-colheita, foram determinadas utilizando o índice de perdas, seguindo o método estabelecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004). Para calcular o índice de perdas agrícolas no Nordeste em três culturas diferentes (Cana-de-Açúcar, Milho em grão e soja em grão), foram empregados dados referentes à produção, área plantada, área colhida e rendimento médio das culturas entre os anos de 1961 e 2022, obtidos do Sistema IBGE de Recuperação Automática (Sidra). Conforme definido pelo IBGE (2004), a soma da produção realizada (Pr) com a produção não realizada (Pn) oferece uma estimativa do potencial de produção até a pré-colheita ($PR = Pr + Pn$), em um determinado ano de referência. O índice de perdas de cada cultura é representado pelo quociente da produção não realizada (Pn) pela produção realizada (PR), expresso como uma porcentagem ($Pe = (Pn / PR) * 100$). A produção não realizada corresponde à diferença entre a área plantada e a área efetivamente colhida de uma determinada cultura, refletindo a área perdida. Essa diferença entre a área plantada e a área colhida foi considerada no cálculo da produção não realizada devido à perda de área.

6. RESULTADO E DISCUSSÃO

6.1. Tendências de Ondas de Calor e Impactos na Produção Agrícola.

As ondas de calor foram identificadas utilizando dados diários de temperatura máxima do ar, registrados nas estações meteorológicas dos nove estados do

Nordeste do Brasil. Considerou-se como onda de calor qualquer período em que a temperatura máxima diária excedesse o valor do percentil 90 por três dias consecutivos ou mais. A frequência das ondas de calor refere-se ao número de eventos de ondas de calor observados em um determinado período. Por exemplo, se um estado experimentou 5 episódios de ondas de calor em uma década, a frequência é de 5 eventos por década, nesse estudo a frequência foi calculada contando o número de eventos de ondas de calor registrados em cada período de estudo. Em Alagoas, foram registrados 40 episódios de ondas de calor entre 1987 e 2015, com um aumento notável na frequência entre as décadas de 1987-1992 e 2011-2015. Este aumento pode estar associado a mudanças nas condições climáticas regionais e possui implicações significativas para a produção agrícola, como observado na diminuição da produtividade de culturas específicas durante períodos de calor intenso. (Tabela 2).

Tabela 2. Característica das ondas de calor observadas no estado de Alagoas

Alagoas				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1987 - 1992	3	5 (12,8%)	25	5
1993 - 1998	6	12 (17,94%)	70	5,83
1999- 2004	5	7(19,94%)	26	3,71
2005 - 2010	4	8(19,94%)	32	4,57
2011 - 2015	5	8(20,51%)	35	4,37

Fonte: A autora (2024)

No estado de Ceará foram registrados 42 episódios de OC no total, e sua frequência também se observa uma diferença de 10 dias entre a primeira (1961-1965) e a última década (2008-2015) (Tabela 3). Paraíba poucos episódios foram identificados com um total de 7 ao longo de 41 anos (Tabela 4).

Tabela 3. Características das ondas de calor observadas no estado do Ceará.

Ceará				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1965	3	3 (7,14%)	20	6,66
1966 - 1971	3	4 (9,52%)	15	3,75

1972 - 1977	1	1 (2,38%)	1	3
1978 - 1983	2	2 (4,76%)	8	4
1984 - 1989	0	0 (0%)	0	0
1990 - 1995	1	1 (2,38%)	3	3
1996 - 2001	5	7 (16,67%)	34	4,85
2002 - 2007	6	11 (26,19%)	46	4,18
2008 - 2015	3	13 (30,95%)	49	3,76

Fonte: A autora (2024)

Tabela 4. Características das ondas de calor observadas no estado da Paraíba.

Ano	Paraíba			
	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1964 - 1969	2	2 (50%)	7	3,5
1970 - 1975	0	0 (0%)	0	0
1976 - 1981	0	1 (0%)	0	0
1982 - 1987	0	1 (0%)	0	0
1988 - 1993	0	1 (0%)	0	0
1994 - 2000	1	1 (25%)	3	3
2001 - 2005	1	1 (25%)	3	3

Fonte: A autora (2024)

No estado de Sergipe durante o período de 1965 a 1970, houve um ano com evento de OC, com uma frequência de 3 dias e uma duração média de 3 dias. No período de 1995 a 2000 ocorreram eventos de OC em três anos, com uma frequência de 10 dias e uma duração média de 3,3 dias. Entre 2001 e 2006, foram registrados eventos em dois anos, com uma frequência de 8 dias e uma duração média de 4 dias (Tabela 5). Na Bahia observa-se um aumento significativo na frequência e na duração média das OC nos períodos de 1991-1996 e 1997-2002, refletindo uma tendência observada em estudos que apontam para o aquecimento global como um fator contribuinte (IPCC, 2021). Esse padrão é também evidente em estados como Alagoas e Ceará, onde há um aumento na frequência e duração das OC. Tabela 6.

Tabela 5. Características das ondas de calor observadas no estado de Sergipe.

Sergipe				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1965 - 1970	1	1 (11,11%)	3	3
1971 - 1976	0	0(0%)	0	0
1977 - 1982	0	0(0%)	0	0
1983 - 1988	1	1 (11,11%)	3	3
1989 - 1994	0	0(0%)	0	0
1995 - 2000	3	3 (33,33%)	10	3,33
2001 - 2006	2	2 (22,22%)	8	4
2007 - 2015	2	2 (22,22%)	6	3

Fonte: A autora (2024)

Tabela 6. Características das ondas de calor observadas no estado de Bahia.

Bahia				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1966	4	8 (9,52%)	29	3,62
1967 - 1972	0	0(0%)	0	0
1973 - 1978	0	0(0%)	0	0
1979 - 1984	1	1 (1,19%)	1	4
1985 - 1990	3	9 (10,71%)	37	4,11
1991 - 1996	5	11 (13,09%)	47	4,27
1997 - 2002	6	15 (17,85%)	68	4,53
2003 - 2008	4	22 (26,19%)	113	5,13
2009 - 2015	5	18 (21,42%)	74	4,11

Fonte: A autora (2024)

Os dados do Rio Grande do Norte mostram um aumento na frequência das OC, especialmente nos últimos 15 anos (Tabela 7). O Estimador de Tendência apontou um aumento médio de 0,4 dias por ano. No Maranhão, os dados indicam um aumento significativo na intensidade das OC. Apresentando uma tendência ascendente com significância estatística, refletindo um aumento na severidade das OC. Tabela 8.

Tabela 7. Características das ondas de calor observadas no estado de Rio Grande do Norte.

Rio Grande do Norte				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1966	0	0(0%)	0	0
1967 - 1972	0	0(0%)	0	0
1973 - 1978	0	0(0%)	0	0
1979 - 1984	0	0(0%)	0	0
1985 - 1990	0	0(0%)	0	0
1991 - 1996	0	0(0%)	0	0
1997 - 2002	1	3 (75%)	10	5
2003 - 2008	0	0 (0%)	0	0
2009 - 2015	1	1 (25%)	3	3

Fonte: A autora (2024)

Tabela 8. Características das ondas de calor observadas no estado do Maranhão.

Maranhão				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1966	0	0(0%)	0	0
1967 - 1972	0	0(0%)	0	0
1973 - 1978	0	0(0%)	0	0
1979 - 1984	0	0(0%)	0	0
1985 - 1990	0	0(0%)	0	0
1991 - 1996	1	2 (9,09%)	11	5,55
1997 - 2002	4	3 (13,63%)	30	3,33
2003 - 2008	3	3 (13,63%)	11	3,6
2009 - 2015	3	8 (36,36%)	28	3,5

Fonte: A autora (2024)

Em Pernambuco, os resultados indicam uma tendência de aumento na frequência e intensidade das OC. Nota-se uma mudança significativa a partir de 1998, que pode estar relacionado com evento de EL Niño (Tabela 9). No Piauí, observa-se uma tendência de aumento na ocorrência e intensidade das OC, com os maiores valores registrados nos últimos 20 anos. (Tabela 10).

Tabela 9. Características das ondas de calor observadas no estado de Pernambuco.

Pernambuco				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1966	2	4 (14,81%)	7	3,5
1967 - 1972	2	2 (7,41%)	6	3
1973 - 1978	0	0(0%)	0	0
1979 - 1984	1	1 (3,70%)	3	3
1985 - 1990	1	1 (3,70%)	3	3
1991 - 1996	0	0(0%)	0	0
1997 - 2002	4	11 (40,74%)	44	4
2003 - 2008	3	7 (25,93%)	24	3,42
2009 - 2015	3	1 (3,70%)	4	4

Fonte: A autora (2024)

Tabela 10. Características das ondas de calor observadas no estado de Piauí.

Piauí				
Ano	Quantidade de anos que registraram eventos	Ocorrência (% de eventos)	Frequência (dias)	Duração média (Dias)
1961 - 1966	1	1(2%)	5	5
1967 - 1972	2	2(4%)	8	4
1973 - 1978	1	1(2%)	5	5
1979 - 1984	5	5(10%)	21	4,2
1985 - 1990	0	0(0%)	0	0
1991 - 1996	3	3 (6%)	18	6
1997 - 2002	5	11(22%)	54	4,9
2003 - 2008	6	15 (30%)	80	5,33
2009 - 2015	5	12 (24%)	60	5

Fonte: A autora (2024)

Os resultados corroboram estudos anteriores de outros autores que indicam um aumento na frequência, duração e intensidade das OC em várias partes do mundo devido às mudanças climáticas (GEIRINHAS et al., 2017; RUSTICUCCI et al., 2016). No Nordeste do Brasil, esse aumento pode estar associado ao processo de urbanização, uso do solo e desmatamento, que agravam as condições de calor extremo (OLIVEIRA et al., 2008; MANDÚ & GOMES, 2019). A intensificação das OC tem implicações diretas na agricultura, exacerbando os efeitos das secas e reduzindo a

produtividade agrícola, o que impacta diretamente a segurança alimentar na região (BITENCOURT et al., 2020).

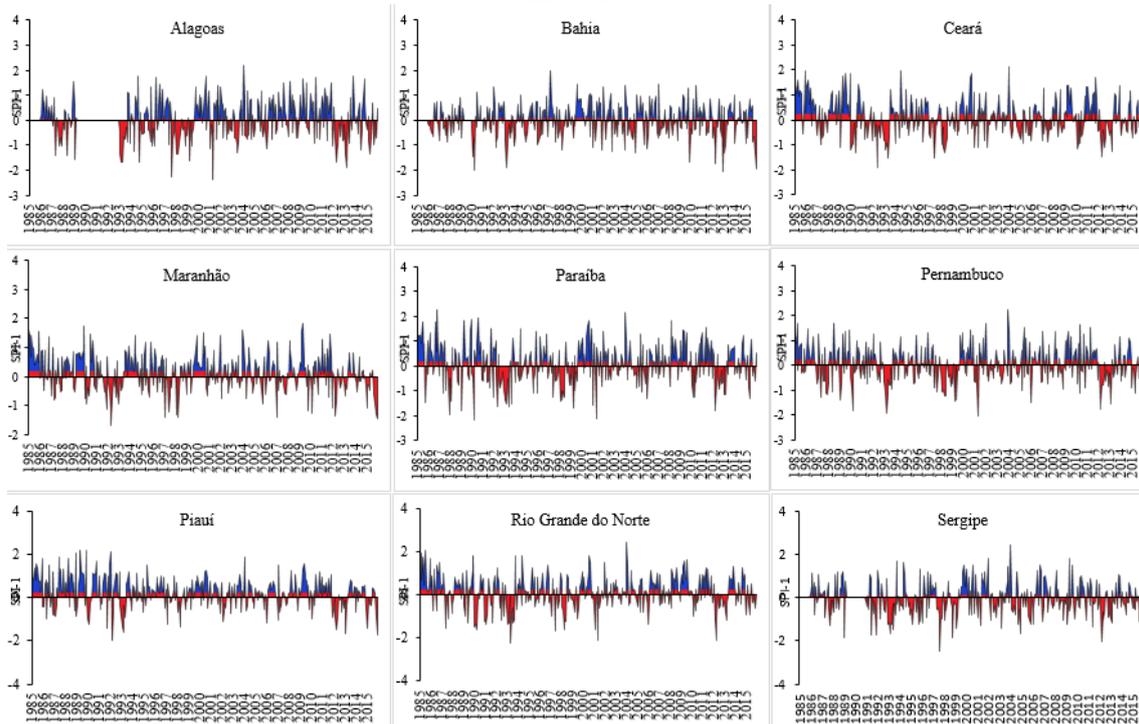
A correlação entre o aumento das OC e os impactos na produção agrícola é clara. Culturas como milho, soja e cana-de-açúcar, que são particularmente sensíveis ao estresse hídrico e térmico, mostram grandes variações e quedas significativas na produção durante anos de OC intensas. Estudos de Santos et al. (2019) e Araújo et al. (2021) demonstra que esses achados, destacando que a adoção de práticas agrícolas adaptativas e tecnologias de irrigação pode mitigar alguns dos impactos negativos, mas a resiliência varia entre as diferentes culturas e regiões. Esses estudos sugerem que, embora as práticas adaptativas possam ajudar a mitigar os efeitos das OC, a implementação dessas práticas enfrenta desafios devido à variabilidade regional e às limitações econômicas.

6.2. Índice de precipitação padronizada

A análise do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) foi conduzida para avaliar a evolução temporal das condições de seca nos nove estados do Nordeste do Brasil entre 1985 e 2015. Os valores de SPI-1 (mensal) e SPI-12 (anual) foram calculados para cada estado, revelando importantes padrões de variabilidade climática.

Durante o período de estudo, o SPI-1 indicou uma alta frequência de episódios de seca de curto prazo, particularmente durante os anos de 1998, 2005 e 2012. Esses eventos foram caracterizados por valores de SPI abaixo de -1.5, indicando condições de seca severa a extrema. Esses anos coincidem com eventos climáticos globais como o El Niño, que exacerbaram as condições de seca na região. (Figura 4).

Figura 4. Análise de índices de secas de 1985 a 2015 para os nove estados do Brasil em SPI-1.



Fonte: A autora (2024)

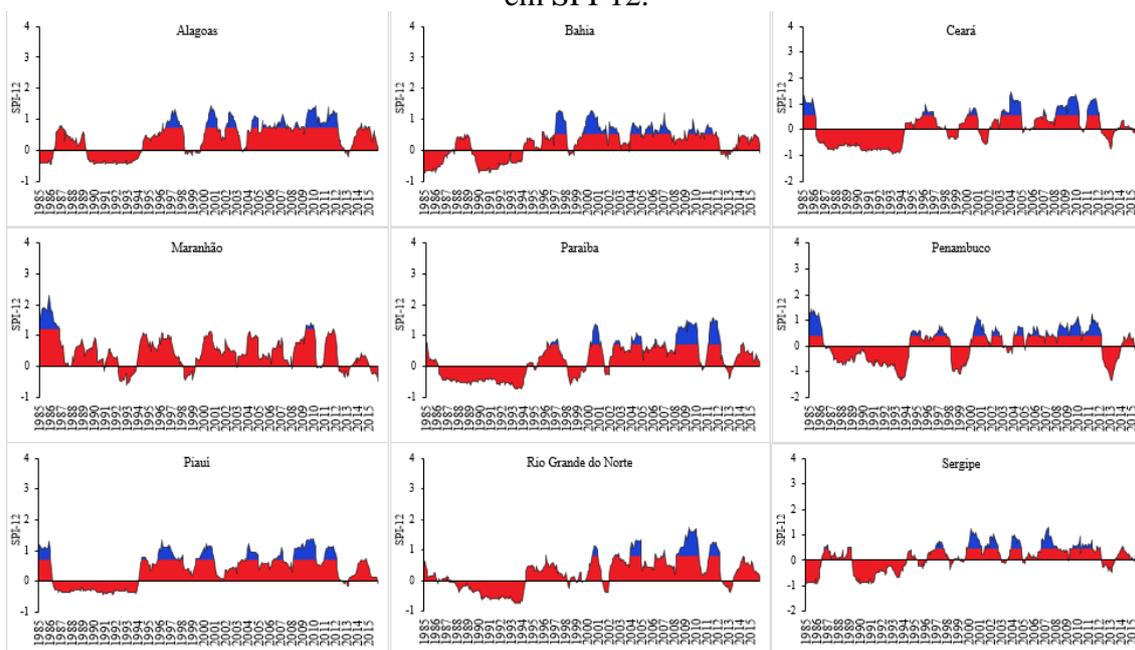
Isso se deve ao fato de que em escalas temporais menores é sensível a eventos que reagem rapidamente às variações na precipitação, enquanto em escalas temporais maiores, o SPI-12 identifica eventos mais persistentes que correspondem a anomalias de chuvas de longo prazo. Para Lloyd-Hughes e Saunders (2002) esse comportamento pode ser atribuído ao fato de o índice se comportar de maneira semelhante a uma média móvel, cuja ordem (k) foi aumentada, conforme descrito. Resultados parecido foram encontrados por Fernandes & Heinemann (2011), onde eles mostraram para as escalas de alta frequência temporal (SPI-1 e SPI-3) nas microrregiões nos Entorno de Brasília, Catalão, Sudoeste de Goiás e Porangatu registraram o maior número de eventos extremos de seca. Contudo, para o SPI-12, que possui baixa frequência temporal, apenas as microrregiões Entorno de Brasília, Meia-Ponte e Porangatu apresentaram o maior número de eventos de seca extrema. Assim, observou-se que a escala temporal do SPI está relacionada à persistência dos eventos de seca e umidade. Em outras palavras,

escalas com baixa frequência temporal são mais eficazes na detecção de eventos extremos de longa duração e, portanto, com maior impacto econômico.

Ao observar o SPI-12 (figura 5) que capta tendências de seca de longo prazo, identificamos períodos prolongados de seca, especialmente entre 1998 e 2001, e novamente entre 2010 e 2012. Esses períodos coincidem com reduções significativas na produtividade agrícola, como observado na queda de 15% na produção de cana-de-açúcar e 20% na produção de milho durante os anos de maior déficit hídrico (Figura 7).

O estudo revelou que os estados de Pernambuco, Sergipe e Bahia foram os mais afetados, apresentando os valores mais baixos de SPI-12 e, conseqüentemente, as secas mais severas e persistentes. Esses resultados destacam a importância de monitorar continuamente o SPI para prever e mitigar os impactos das secas na agricultura, especialmente em regiões vulneráveis como o Nordeste do Brasil. (Figura 4).

Figura 5. Análise de índices de secas de 1985 a 2015 para os nove estados do Brasil em SPI-12.

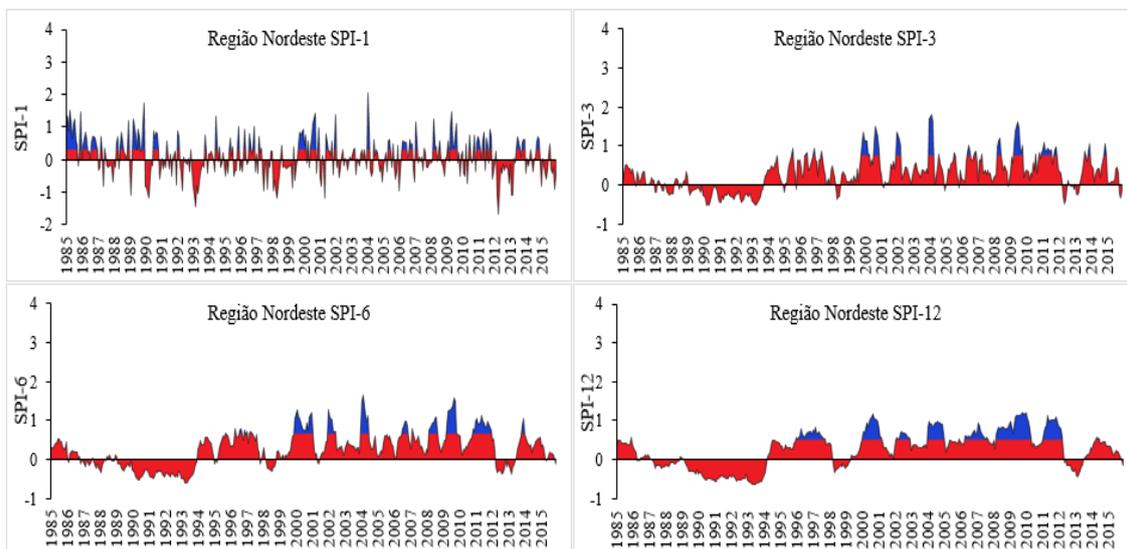


Fonte: A autora (2024)

O SPI é capaz de detectar secas ou enchentes em uma estação específica ao analisar a precipitação atual em relação à média histórica para o mesmo período. Ao observar a série de dados, é evidente a ocorrência de anos particularmente desafiadores ao longo do tempo, e esses períodos críticos tendem a se agrupar à medida que a escala

temporal do SPI aumenta, como mostrado na (Figura 6) onde se tem as análises de SPI da média do nordeste do Brasil.

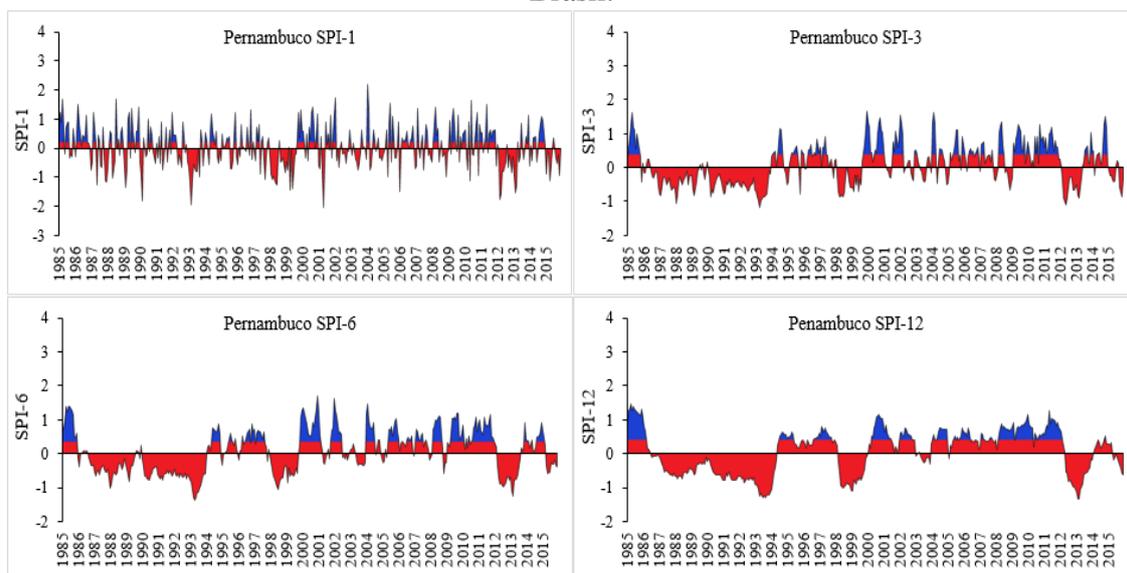
Figura 6. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2015 do Nordeste do Brasil.



Fonte: A autora (2024)

Segundo de Rossato et al. (2017), a região Nordeste do Brasil enfrentou uma das suas piores secas no ano de 2012. Esse fenômeno se faz evidente em todas as diferentes escalas de análise de SPI desse estudo, destacou-se pela sua intensidade e pelos impactos gerados, causando a destruição de vastas áreas de cultivo e afetando centenas de cidades e povoados na região (MARENGO et al., 2016). Pesquisas realizadas por Buriti e Barbosa (2018), Marengo et al. (2016), São José (2019) mostraram que este evento climático foi um dos mais severos das últimas décadas. Neste contexto o estado de Pernambuco se destacou em relação aos outros Estados com índices e históricos de seca como descrito por Asfora et al. (2017) (Figura 7). Autoridades governamentais têm demonstrado crescente preocupação com a severa seca que afeta o estado desde 2011, devido aos grandes déficits na precipitação acumulada ao longo dos últimos anos. Essa situação tem causado impactos significativos em diversos setores agrícolas, incluindo a redução da produtividade de culturas como milho e cana-de-açúcar, além de aumentar a vulnerabilidade econômica das comunidades rurais dependentes da agricultura.

Figura 7. Distribuição temporal do SPI para o período de 1985 a 2015 em Pernambuco, Brasil.



Fonte: A autora (2024)

Quando consideramos as escalas maiores do SPI, de 06 e 12 meses, Pernambuco desfrutou de quase uma década de relativa disponibilidade de água, mas esse padrão se modificou devido à estiagem prolongada dos últimos anos. É importante observar que o SPI leva em consideração apenas a precipitação pluviométrica, deixando de fora os impactos relacionados ao aumento da temperatura, em decorrência as mudanças climáticas. Portanto, os danos reais causados pelas secas podem ser ainda mais graves quando se consideram outros fatores climáticos.

Em relação a frequência de SPI, constatasse que a maior porcentagem dos valores se encontra próximo ao valor de modernamente seco e muito seco para as diferentes escalas, principalmente nos anos de 1990, 1993, 1998, 1999, 2001, 2012, 2013 e 2015 destacaram-se por apresentar anos de índice de seca em SPI-1 e SPI-3 e SPI-6. (Figura 3,4 e 5).

Resultados semelhantes foram encontrados por Da Silva et al. (2021) na Sub-Bacia do Choró, no Ceará, para as escalas SPI-3 e SPI-6. Os principais eventos de seca ocorreram nos anos de 1983, 1992/1993, 1997-1999, 2012/2013 e 2015/2016, sendo classificados como condições de Seca Severa e Extrema. Cunha et al. (2018), identificaram o padrão espacial dos episódios de seca severa na região Nordeste ao longo do período de 1982 a 2013 (30 anos). Os resultados revelaram características específicas

da seca e mostraram que esses eventos se tornam mais pronunciados durante as ocorrências de El Niño.

6.3. Correlação da produção de cana-de-açúcar, milho e soja entre todos os estados da região Nordeste do Brasil

A análise de coeficiente de correlação de Pearson entre a produção em hectares de cana-de-açúcar, milho e soja nos nove estados do Nordeste, mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, variando de -1 a 1. Na Tabela 11, são observadas as correlações entre a produção de cana-de-açúcar em todos os estados da região NEB.

Em Alagoas, observa-se uma forte correlação positiva com o Ceará (0,79), seguida por Pernambuco (0,74). A correlação negativa foi identificada com o Maranhão (-0,44). Sergipe apresenta uma correlação positiva mais alta com o Maranhão (0,90), seguida por Rio Grande do Norte (0,77) e Piauí (0,60), a correlação negativa com Pernambuco (-0,41). A Bahia, mostra uma correlação positiva mais alta foi com Sergipe (0,58), e negativa com Pernambuco (-0,25). No Ceará observa-se uma forte correlação positiva com Pernambuco (0,84), seguida pela Paraíba (0,63) e Alagoas (0,79) e correlações negativas com Maranhão (-0,21) e Rio Grande do Norte (-0,21). O Maranhão apresenta forte correlação positiva com Sergipe (0,90) e Rio Grande do Norte (0,86), e correlação negativa leve com Pernambuco (-0,44). A Paraíba apresenta correlação positiva moderada com Pernambuco (0,61) e leve com Alagoas (0,46), e a correlação negativa leve com Rio Grande do Norte (0,34). Pernambuco mostra correlação positiva com o Ceará (0,84) e correlações negativas com Maranhão (-0,44) e Bahia (-0,25). Em Piauí, a correlação positiva moderada foi com Maranhão (0,67) e leve com Pernambuco (0,56), e a correlação negativa leve foi com Alagoas (-0,25). No Rio Grande do Norte, observa-se correlação positiva com Maranhão (0,86) e Sergipe (0,77), a correlação negativa com Alagoas (-0,33) (Tabela 7). Esses resultados refletem as interações complexas entre os fatores climáticos e de manejo agrícola que afetam a produção de cana-de-açúcar na região Nordeste, destacando a importância de estratégias regionais específicas para otimizar a produtividade agrícola e mitigar os impactos das variabilidades climáticas.

Tabela 11. Matriz de correlação pelo método de Pearson para produção de cana-de-açúcar entre todos os estados da região Nordeste do Brasil

	Alagoas	Sergipe	Bahia	Ceará	Maranhão	Paraíba	Pernambuco	Piauí	Rio Grande do Norte
Alagoas - Cana-de-Açúcar	1								
Sergipe - Cana-de-Açúcar	-0,33	1							
Bahia - Cana-de-Açúcar	0,14	0,58	1						
Ceará - Cana-de-Açúcar	0,79	-0,19	-0,03	1					
Maranhão - Cana-de-Açúcar	-0,44	0,90	0,40	-0,21	1				
Paraíba - Cana-de-Açúcar	0,46	0,32	0,12	0,63	0,27	1			
Pernambuco - Cana-de-Açúcar	0,74	-0,41	-0,25	0,84	-0,44	0,61	1		
Piauí - Cana-de-Açúcar	-0,25	0,60	-0,09	0,16	0,67	0,56	0,03	1	
Rio Grande do Norte - Cana-de-Açúcar	-0,33	0,77	0,29	-0,21	0,86	0,34	-0,30	0,62	1

Fonte: A autora (2024)

Para o milho (Tabela 12), há uma correlação significativa entre os hectares plantados nos nove estados da região. Esse resultado sugere uma forte relação proporcional na produção dessa cultura, indicando uma harmonização notável nas práticas agrícolas desses estados. Alagoas apresenta uma correlação positiva mais forte com Pernambuco (0,85), Paraíba (0,72) e Rio Grande do Norte (0,69), enquanto há uma correlação negativa com Sergipe (-0,03). Em Sergipe, observa-se uma correlação positiva significativa com Bahia (0,64) e uma correlação negativa destacada com Rio Grande do Norte (-0,30). Bahia mostra a maior correlação positiva com Sergipe (0,64) e Ceará (0,53) e uma correlação negativa menor com Maranhão (-0,38). Ceará apresenta uma correlação positiva fraca com Pernambuco (0,54) e uma correlação negativa com Maranhão (-0,20). Maranhão tem uma correlação positiva maior com Piauí (0,64). Na Paraíba, observa-se uma maior correlação positiva com Rio Grande do Norte (0,90) e Pernambuco (0,89). Em Pernambuco, destaca-se uma correlação positiva forte com Paraíba (0,89) e Rio Grande do Norte (0,80). No Piauí, nota-se uma correlação positiva moderada com Maranhão (0,64) e uma correlação negativa fraca com Alagoas (-0,22). Rio Grande do Norte apresenta uma correlação positiva significativa com Pernambuco (0,80) e Paraíba (0,90), e uma correlação negativa com Sergipe (-0,30). Esses resultados estão em conformidade com os dados analisados por Perobelli et al. (2007), que constatam um aumento significativo na produtividade agrícola brasileira entre 1991 e 2003."

Tabela 12. Matriz de correlação pelo método de Pearson para produção de milho-em-grãos entre todos os estados da região Nordeste do Brasil.

	Alagoas -	Sergipe -	Bahia -	Ceará -	Maranhão -	Paraíba -	Pernambuco -	Piauí -	Rio Grande do Norte -
Alagoas - Milho	1								
Sergipe - Milho	-0,03	1							
Bahia - Milho	0,25	0,64	1						
Ceará - Milho	0,33	0,30	0,53	1					
Maranhão - Milho	-0,12	-0,08	-0,38	-0,20	1				
Paraíba - Milho	0,72	-0,18	0,19	0,41	0,15	1			
Pernambuco - Milho	0,85	0,06	0,37	0,54	0,00	0,89	1		
Piauí - Milho	-0,22	0,10	-0,29	0,06	0,64	0,06	-0,05	1	
Rio Grande do Norte - Milho	0,69	-0,30	0,07	0,44	0,11	0,90	0,80	-0,01	1

Fonte: A autora (2024)

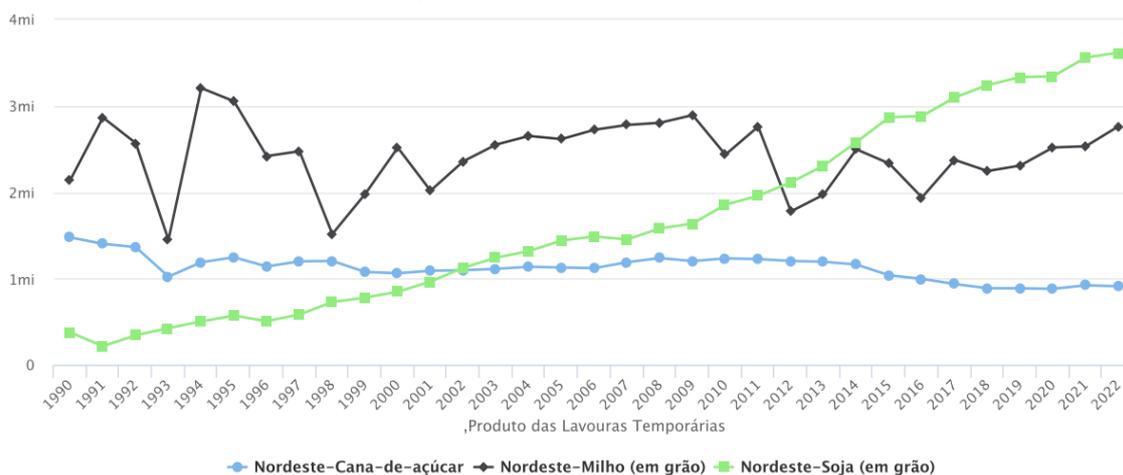
No entanto, ao analisar a correlação para a cultura da soja, dada a natureza relativamente nova do cultivo de soja em todos os estados do Nordeste, os resultados apresentaram um coeficiente que não possui uma base confiável devido à falta de dados consolidados. Isso evidencia a necessidade de uma coleta mais abrangente e consistente de informações ao longo do tempo para melhor compreender a relação entre os hectares destinados à produção de soja nos estados nordestinos. Essa análise oferece insights valiosos sobre a coesão nas práticas agrícolas entre os estados para a cana-de-açúcar e o milho, enquanto destaca a necessidade de um acompanhamento mais detalhado para a cultura emergente da soja na região. Esses resultados contribuem para a compreensão das dinâmicas no setor agrícolas.

De acordo com o estudo do IBGE (2022), o aumento da área plantada com cana-de-açúcar ocorre predominantemente na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, especialmente nos municípios de Delta, Planura, Conceição das Alagoas, Romaria, Uberaba e Araporã. Esses municípios também mostram um aumento significativo na área plantada com soja e, em sua maioria, na área de milho. Contrariamente, nesse estudo, verificou-se, em Alagoas, há uma diminuição na área colhida para a maioria dos produtos agrícolas, especialmente para cana-de-açúcar e milho. Apesar dessa redução, a participação da cana-de-açúcar no sistema produtivo do estado aumenta de aproximadamente 67% da área total de produção estadual para mais de 73% em 2010. Essa mudança correlaciona-se com a redução das áreas de sequeiro e o aumento de áreas irrigadas.

Uma parcela significativa das atividades agrícolas na localidade ocorre em um ecossistema delicado, sujeito a restrições climáticas e de solo. A região enfrenta, historicamente, desafios com a seca, especialmente no Semiárido, que compreende a maior parte do sertão e agreste nordestinos. Dessa forma, os produtores estão cada vez mais em busca de alternativas para evitar perdas agrícolas e aumentar a produção com sistemas de irrigação. Em termos quantitativos, o Semiárido abrange 57% da área total do Nordeste e cerca de 40% de sua população. Nessa área, a média anual de precipitação é inferior a 800 milímetros (Suassuna, 2005).

Os dados fornecidos pela Produção Agrícola Municipal (PAM), representados na Figura 8, mostram que a cultura da soja está crescendo consideravelmente no NEB. Apesar de ser uma cultura nova e com poucos dados históricos, observa-se um aumento significativo em seu cultivo. O milho, por sua vez, apresenta um comportamento oscilante em termos de valor da produção ao longo dos anos. Já a cana-de-açúcar se mantém estável até 2013. A partir de 2014, há uma pequena queda na área colhida, devido à ocorrência de secas nesse período, uma vez que a grande maioria das áreas de cana-de-açúcar são de sequeiro (IBGE, 2022).

Figura 8. Evolução média de áreas colhidas dos nove estados do Nordeste do Brasil no período de 1990 – 2022.



Fonte: A autora (2024)

Entre 1990 e 1993, a produção de cana-de-açúcar diminuiu ligeiramente, indicando o impacto da seca. Durante os anos de 1997 e 1998, a produção se mantém relativamente estável, possivelmente devido à adoção de práticas de irrigação que mitigam os impactos da seca. Entre 2012 e 2017, a produção também se mantém estável,

sugerindo que as práticas de irrigação continuam a desempenhar um papel importante na mitigação dos efeitos da seca.

No caso da cultura do milho, entre 1990 e 1993, a produção cai significativamente durante os anos de seca, refletindo sua alta sensibilidade à falta de água. Entre 1997 e 1998, a produção oscila fortemente, com uma queda notável em 1998, um ano especialmente afetado pelo evento El Niño. Entre 2012 e 2017, a produção também oscila consideravelmente, com uma queda mais acentuada em 2012 e outra, um pouco menor, em 2016.

Em relação à soja, a produção começa a aumentar, e, embora a seca impacte a região, a adoção crescente dessa cultura pode ser impulsionada por práticas agrícolas adaptativas. Isso sugere que a soja é menos impactada pela seca ou que há melhorias significativas em técnicas de manejo e irrigação.

6.4. Perdas de Produção Agrícola devido a seca.

As perdas agrícolas mostraram-se bastante variáveis entre as culturas e ao longo dos anos (Tabela 13) que apresenta a média em escala de 5 anos. Entre as culturas analisadas, todas apresentaram índices de perdas, principalmente em anos que teve a ocorrência de eventos climáticos extremos como a seca. Os valores máximos do índice de perdas agrícolas ano a ano foram: Cana-de-açúcar (6,17%) na seca de 1993, milho (39,90%) na seca de 1993, e para soja os dados obtidos foram insuficientes para uma análise, pois a sua produção ainda é relativamente nova no estado do Nordeste.

Tabela 13. Índice médio de perdas agrícolas (%) das culturas sobre o Nordeste e eventos climáticos.

Ano	Eventos extremos associados	Cana-de-Açúcar (Índice de Perdas %) em média	Milho em Grão (Índice de Perdas %) em média
1998 a 1993	Seca	2,51	15,12
1994 a 1999	Seca	4,09	11,53
2000 a 2005	Estiagem	2,61	10,74
2006 a 2011	Úmido	0,82	7,06
2012 a 2017	seca	0,71	16,23
2018 a 2022	Úmido	0,48	7,46

Fonte: A autora (2024)

As consideráveis perdas nas colheitas agrícolas nesse ecossistema podem ser atribuídas à prolongada seca que atinge a região nos últimos anos. Ao longo do tempo, grandes secas são registradas, sendo uma das mais devastadoras a que ocorreu entre 1877 e 1879, resultando na perda de metade da população e quase todo o gado bovino da região (CGEE, 2020). Antes desse período, outras secas severas também foram documentadas. Após 1877, várias outras grandes secas sucedem, incluindo os anos de 1979-1983, 1987, 1990, 1992-1993, 1997-1998, 2002-2003 e 2010-2015, sendo estas as mais significativas (CGEE, 2020).

Desde 1988, a extensão e a intensidade da seca têm afetado significativamente a economia do Nordeste, prejudicando múltiplos municípios e causando adversidades tanto nas zonas urbanas quanto rurais (Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2020). Os prejuízos na produção resultantes desses períodos de seca são especialmente acentuados nos anos de 1988 a 1993 e de 2012 a 2016, notadamente para culturas como a cana-de-açúcar, que apresentou uma redução de 6,17% e 5,69%, respectivamente, e o milho, com reduções de 27,78% e 39,90% (Tabela 14).

Tabela 14. Índice de perdas agrícolas média (%) das culturas no Nordeste e eventos climáticos.

Ano	Eventos extremos associados	Cana-de-Açúcar (Índice de Perdas %) em média	Milho em Grão (Índice de Perdas %) em média
1988	Estiagem	2,58	5,07
1989	Úmido	4,18	4,50
1990	Seca	1,15	19,66
1991	Seca	0,67	7,25
1992	Seca	0,30	14,36
1993	Seca	6,17	39,90
1994	Úmido	0,41	9,26
1995	Estiagem	5,00	4,88
1996	Úmido	5,69	6,43
1997	Seca	4,57	4,90
1998	Seca	3,80	24,66
1999	Seca	5,07	19,06
2000	Úmido	6,31	3,75
2001	Seca	5,10	21,00
2002	Seca	3,84	13,18

2003	Úmido	0,02	12,21
2004	Úmido	0,11	9,46
2005	Seca	0,28	4,81
2006	Seca	1,24	5,05
2007	Seca	0,11	5,98
2008	Úmido	3,12	6,54
2009	Úmido	0,00	7,47
2010	Úmido	0,11	8,87
2011	Úmido	0,36	8,46
2012	Seca	1,07	27,78
2013	Seca	0,78	13,35
2014	Seca	0,63	11,47
2015	Seca	0,89	13,29
2016	Seca	0,40	21,13
2017	Seca	0,51	10,37
2018	Seca	0,69	13,99
2019	Estiagem	0,10	8,40
2020	Estiagem	0,89	2,45
2021	Estiagem	0,22	7,14
2022	Úmido	0,48	5,33

Fonte: A autora (2024)

Conforme observado por Souza e Aquino (2018), a seca tem um impacto considerável sobre os grãos em outras regiões, resultando em uma diminuição na produção que varia entre 72,6% e 92,9% durante o período de 2012 a 2016. Esses autores também destacam que o milho e a soja são as culturas mais afetadas, com reduções percentuais que oscilam entre 72,5% e 94,8% para o milho, e entre 70,1% e 94,7% para a soja no mesmo período. De acordo com Alvalá et al. (2017) e Conab (2017), há uma diminuição na produção de grãos na região Nordeste de aproximadamente 40%, enquanto a produção de cana-de-açúcar é reduzida em 19% entre os períodos de 2014/2015 e 2015/2016. Martins et al. (2017), ressalta que entre o ano de 2010 e 2017, apenas 2011 não apresenta condições de seca em parte dos estados do Nordeste, o que está em concordância com os dados deste estudo, que classificam 2011 como um ano úmido.

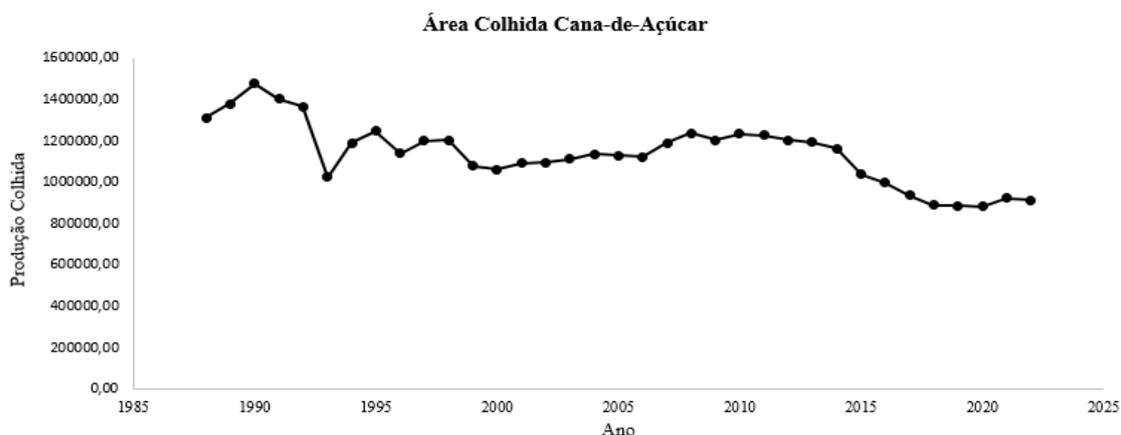
Como já discutido previamente, a gravidade da seca tem impacto direto na agricultura dos territórios estudados, além de estar relacionada à quantidade de chuva anual. Essas categorias de seca não são determinadas apenas pelo volume de chuva, mas

pela combinação de vários indicadores hidrometeorológicos, incluindo aqueles relacionados a períodos de estiagem. Nas Figuras 9 e 10, observa-se a evolução da produção agrícola entre 1988 e 2022 para os estados do Nordeste do Brasil. O plantio de cana-de-açúcar ocorre ao longo de todo o ano, enquanto o de milho e soja ocorre entre os meses de abril e julho. Em relação à colheita, a da cana-de-açúcar ocorre entre dezembro e março, e a do milho e da soja é realizada entre outubro e dezembro (CONAB, 2019). Com base nessas informações, é possível verificar como as categorias de seca afetam as etapas de crescimento dessas culturas.

Conforme evidenciado pelas Figuras 9 e 10, há uma diminuição na produção nos anos de 1990 a 1993, 1998 a 2000 e de 2012 a 2018, coincidindo com a presença de condições de seca excepcional e extrema durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar e do milho, já para a soja mencionado anteriormente o Nordeste é relativamente novo na produção dessa cultura e os dados históricos disponíveis são insuficientes para se construir um gráfico de evolução ao longo dos anos. Embora em 2017 e 2019 também tenham ocorrido condições de seca excepcional e extrema, estas não coincidem com o período crítico de plantio e colheita das culturas, resultando em perdas relativamente menores na produção de grãos.

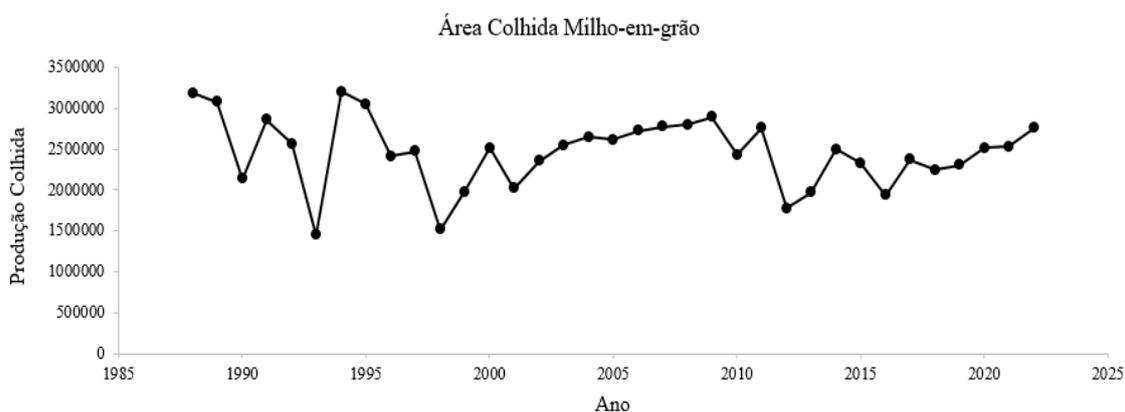
A produção agrícola em 2015 e 2019 registrou níveis mais baixos em comparação com os anos de 2017 e 2020. Isso se deve ao fato de que em 2015 e 2019 houve uma ocorrência significativa de seca severa em todos os nove estados, o que provavelmente resultou em danos à produção de grãos. Por outro lado, nos anos de 2017 e 2020, apesar da presença predominante de condições de seca leve a moderada, a produção agrícola foi robusta, sugerindo que essas duas categorias de seca não tiveram um impacto significativo na produção (Batista e Albuquerque, 2022).

Figura 9. Gráfico de produção média de cana-de-açúcar (t) nos nove estados do Nordeste do Brasil.



Fonte: A autora (2024)

Figura 10. Gráfico de produção média de milho-em-grão (t) nos nove estados do Nordeste do Brasil.



Fonte: A autora (2024)

Em alguns estados do nordeste como Alagoas, Pernambuco, Sergipe e Bahia, a agricultura foi afetada, durante os períodos de 2000 - 2010 e 2011 – 2015 por uma redução da dimensão de seu sistema produtivo, caracterizada pelo efeito escala negativo, conforme nos figura 9 e 10. Além disso, é importante destacar que a cana-de-açúcar apesar de ter perdido área colhida, tomou cerca de 92% da área permutada de outras culturas dentro do sistema como o feijão, milho, fumo, algodão, mandioca, arroz, coco-dabaía e café. Entre essas culturas, o milho, em particular, apresentou um impacto negativo no rendimento. Segundo Souza (2002), no período entre de 1975-1985, a cultura que mais tomou área foi a cana-de-açúcar, ocupando cerca de 90% das terras liberadas pelas culturas de mandioca, algodão herbáceo e milho.

De acordo com Santos (2011), Alagoas é o principal produtor de cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro. Em 2008/2009, o estado alcançou uma produção de 27.309.285 toneladas de cana, posicionando-se em quinto lugar no ranking nacional de produção. A produção de cana em Alagoas sofreu grandes variações ao longo do tempo, principalmente devido às flutuações climáticas decorrentes dos diversos períodos de estiagem prolongada. Já em Pernambuco conforme os cenários econômicos e estudos setoriais do SEBRAE (2008), o aumento da presença da cana-de-açúcar e milho no estado foi impulsionado pelas condições climáticas favoráveis, pela implementação de práticas culturais eficientes, pelo uso de sistemas de irrigação e pela introdução de variedades mais produtivas. Portanto a irrigação teve um papel importante na proteção dessas culturas as secas severas no estado.

6.5. Estimativa de produção ao longo do tempo e tendências de ganhos e perdas.

A produção agrícola no NEB entre 1985 e 2022 apresentou uma tendência de queda significativa, conforme demonstrado pelos dados de produção de milho em Pernambuco e Piauí (Figura 10 e 11). Essa tendência é influenciada principalmente pela baixa precipitação na região, com variações observadas ao longo dos anos.

No estado de Pernambuco, a produção de milho, representada (Figura 10), mostra uma tendência de declínio acentuado ao longo dos anos. A produção caiu significativamente entre 1995 e 2020, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,57, indicando que 57% da variação na produção pode ser explicada pela diminuição das chuvas e outros fatores climáticos adversos. Nos anos de seca mais severa, como em 2001, 2005, 2007, 2010 e 2012, a produtividade caiu para menos de 300 kg/ha, enquanto nos anos de maior precipitação, a produção aumentou para até 1.300 kg/ha. Esta variação demonstra uma perda de safra de aproximadamente 1 tonelada/ha devido às condições climáticas adversas (IBGE, 2023).

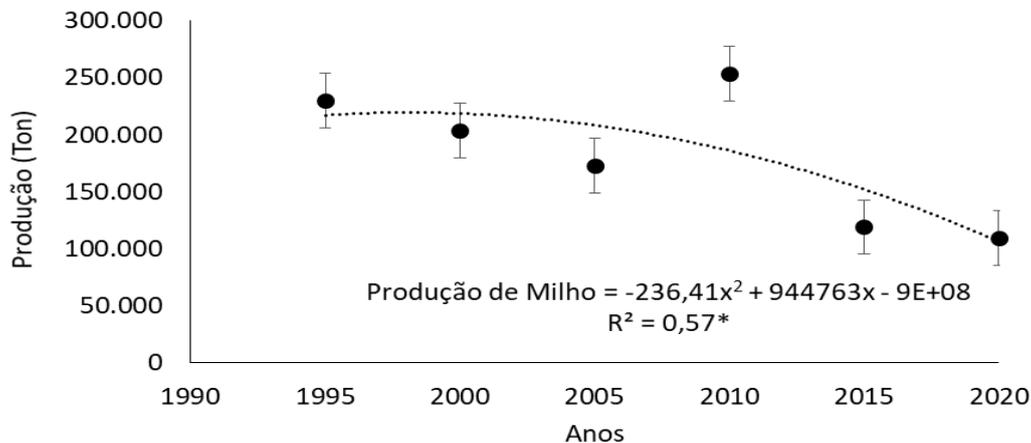
No Piauí, conforme mostrado (Figura 10), a produção de milho também seguiu uma tendência de declínio, embora com um coeficiente de determinação um pouco mais alto ($R^2 = 0,70$), sugerindo que 70% da variação na produção pode ser atribuída às variáveis analisadas. A curva de produção mostra uma redução significativa até 2005, seguida por uma estabilização em níveis mais baixos até 2020. Durante anos de seca, a produtividade do milho caiu para níveis abaixo de 300 kg/ha, enquanto em anos com

melhores condições de chuva, a produção chegou a 1.200 kg/ha. Esses dados reforçam a alta sensibilidade da produção agrícola local às variações climáticas. (IBGE, 2023).

Estudos prévios, como os de Assad et al. (2008) e Gouvêa et al. (2009), indicam que, enquanto há potencial para aumento da área cultivada em outras regiões, como o Centro-Oeste, a dependência da irrigação complementar tende a aumentar, especialmente em áreas do Nordeste. Marin et al. (2012) sugere que o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera pode melhorar a eficiência do uso da água pelas plantas, potencialmente contrabalançando a necessidade de irrigação adicional.

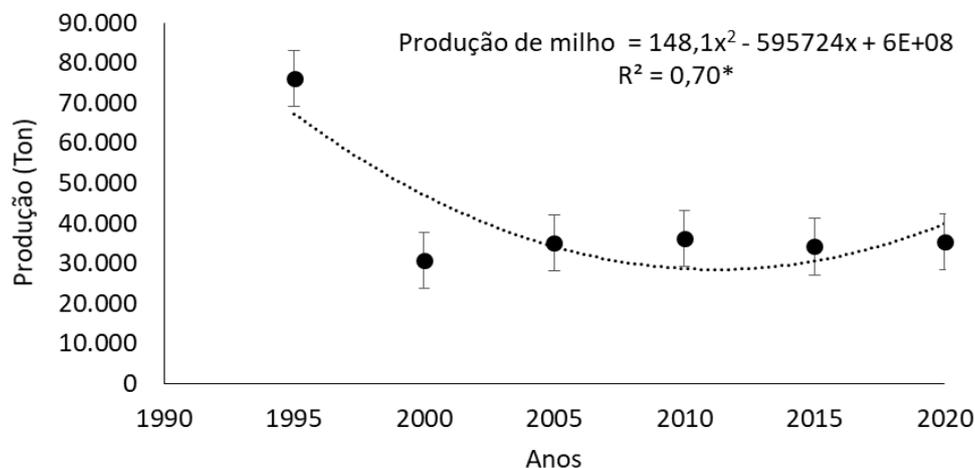
As áreas com crescimento moderado na produção foram aquelas que incorporaram avanços tecnológicos em irrigação, uma prática adotada para mitigar os prejuízos, como a morte precoce das plantas e a necessidade de renovação antecipada dos canais (Farias et al., 2008).

Figura 11. Gráfico de tendências de produtividade milho de Pernambuco demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.



Fonte: A autora (2024)

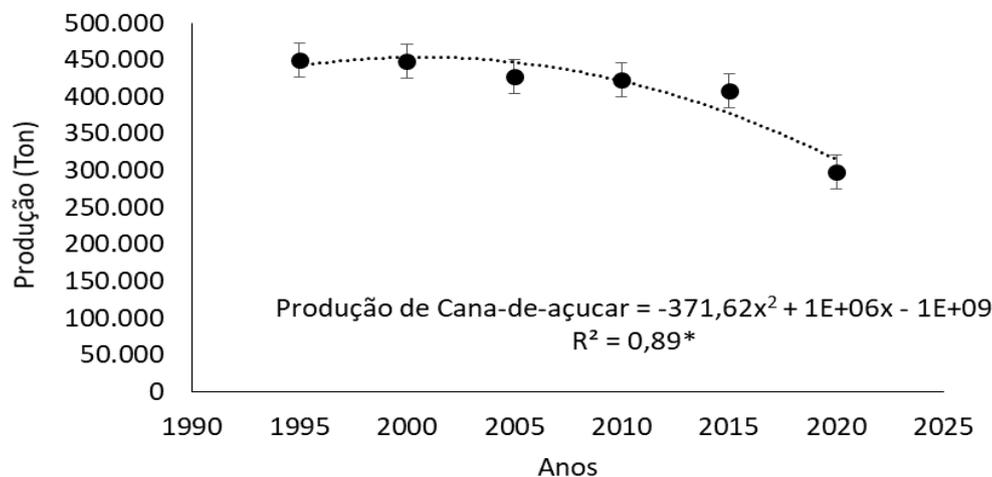
Figura 12. Gráfico de tendências de produtividade milho no Piauí, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.



Fonte: A autora (2024)

Em Alagoas, (Figura 12) ilustra a produção de cana-de-açúcar, que também demonstra uma tendência de declínio entre 1995 e 2020. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,89$) sugere que 89% da variação na produção pode ser explicada por fatores como a diminuição da precipitação. A partir de 2010, observou-se uma queda progressiva, acentuada principalmente em períodos de estiagem. As variações anuais indicam que a redução na produção é fortemente influenciada pela falta de chuvas e pela ausência de irrigação adequada.

Figura 13. Gráfico de tendências de produtividade da cana-de-açúcar de Alagoas, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.

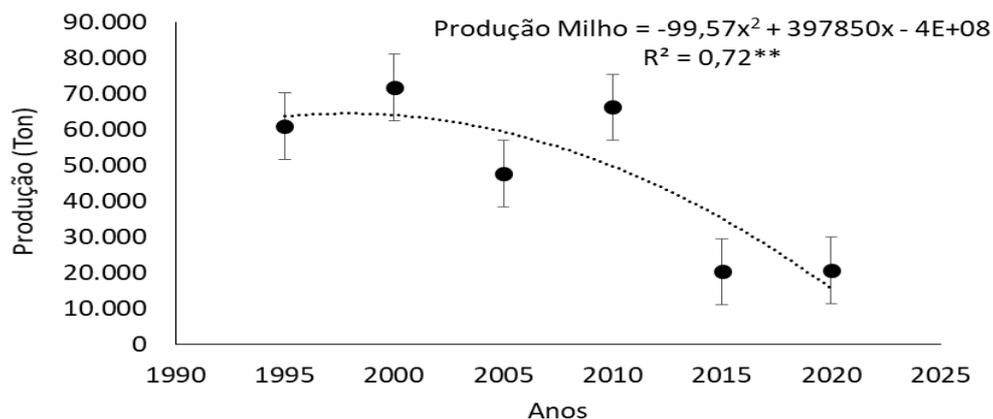


Fonte: A autora (2024)

Os dados apresentados na Figura 13 indicam a tendência temporal da produção de milho (em toneladas) entre os anos de 1995 e 2020 em Alagoas. A análise de regressão quadrática sugere uma tendência de queda ao longo deste período.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,72$) indica que 72% da variabilidade observada nos dados de produção de milho é explicada pelo modelo. Este valor é considerado moderado, sugerindo que, embora a equação forneça um ajuste razoável, ainda existe uma parcela significativa de variabilidade que não é capturada pela regressão quadrática. A produção de milho atinge seu pico por volta do ano 2000, seguido por um declínio constante até 2020. Este resultado está em consonância com os achados de Silva et al. (2018), que também observaram uma diminuição na produção de milho no Brasil devido a fatores como variabilidade climática e redução da área plantada. Similarmente, Oliveira et al. (2019) reportaram uma queda na produtividade do milho associada a mudanças nos padrões de precipitação e temperaturas extremas.

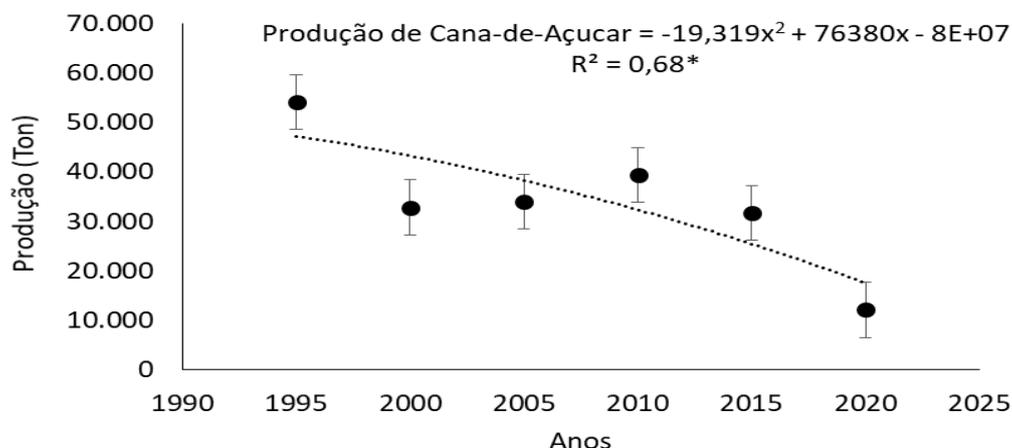
Figura 14. Gráfico de tendências de produtividade milho em Alagoas, demonstrando a tendência da queda na produção agrícola.



Fonte: A autora (2024)

A Figura 14 apresenta a produção de cana-de-açúcar (em toneladas) de 1995 a 2020. Com um coeficiente de determinação ($R^2 = 0,68$), indicando que 68% da variabilidade na produção de cana-de-açúcar é explicada pelo modelo. Este ajuste é ligeiramente inferior ao observado para a produção de milho, sugerindo que outros fatores não incluídos no modelo podem estar influenciando a produção. A produção de cana-de-açúcar mostra um declínio progressivo ao longo do período estudado, com um ponto máximo inicial em torno de 1995-2000. Este padrão de queda está alinhado com os resultados de Santos et al. (2017), que identificaram uma tendência de redução na produção de cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil, relacionada ao aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas. Gonçalves e Pereira (2021) também verificaram uma redução semelhante, destacando a influência do manejo inadequado do solo e do uso ineficiente de insumos agrícolas.

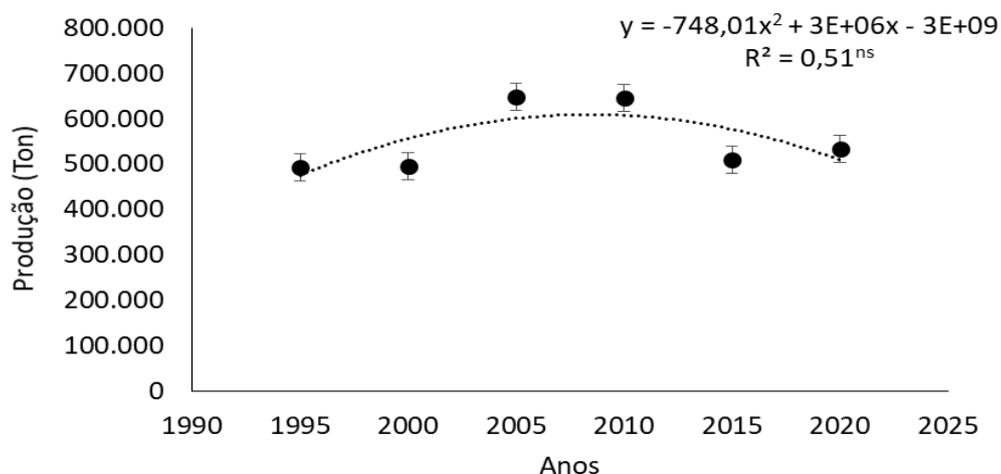
Figura 15. Gráfico de tendência na queda da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Ceará.



Fonte: A autora (2024)

A Produção de milho no Ceará (Figura 16) com um coeficiente de determinação ($R^2 = 0,51$) mostra um crescimento até aproximadamente 2010, seguido por uma diminuição até 2020. A baixa precisão do ajuste indica que há muitos outros fatores não capturados pelo modelo que afetam a produção dessa cultura. Resultados semelhantes foram encontrados por Almeida et al. (2020), que relataram variabilidade na produção agrícola devido à combinação de fatores climáticos, como chuvas irregulares e altas temperaturas, e fatores socioeconômicos, como o custo dos insumos e a adoção de tecnologias de baixo rendimento.

Figura 16. Gráfico de tendência da produção agrícola para milho no estado do Ceará.



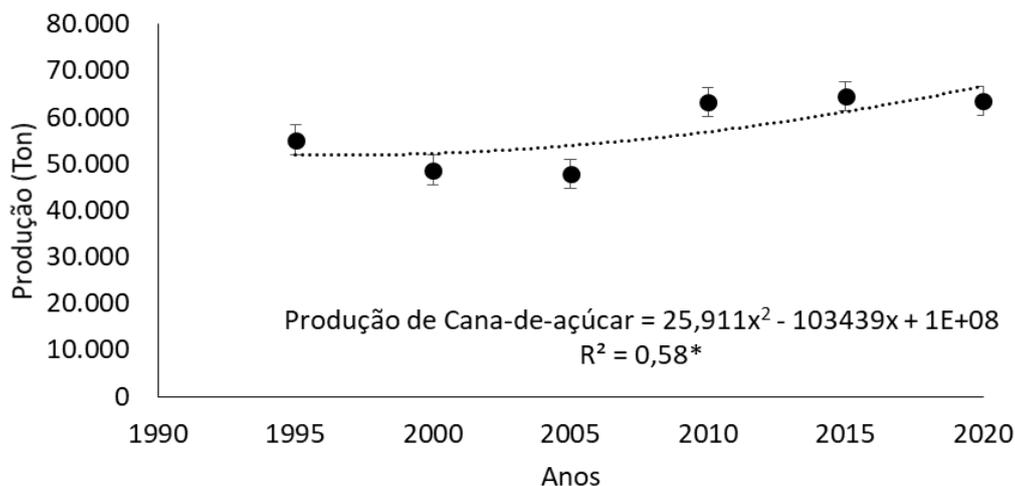
Fonte: A autora (2024)

Esses resultados (Figura 13, 14 e 15) indicam uma tendência geral de declínio na produção agrícola ao longo do período analisado, o que é consistente com diversos estudos recentes sobre os impactos das mudanças climáticas e práticas agrícolas sobre a produtividade. Segundo Lopes et al. (2022), a redução na produção do milho e cana-de-açúcar, pode ser amplamente atribuída à intensificação de eventos climáticos adversos, como secas e ondas de calor, que afetam negativamente o ciclo de crescimento das plantas e o rendimento das colheitas. Além disso, fatores econômicos e sociais, como políticas públicas desfavoráveis e a redução do investimento em tecnologias agrícolas, também desempenham um papel crucial, como destacado por Moreira et al. (2021).

No entanto, a variabilidade observada nas produções de milho e cana-de-açúcar também aponta para a necessidade de modelos mais robustos que incorporem variáveis adicionais, como a qualidade do solo, práticas de irrigação, uso de fertilizantes e políticas de manejo sustentável, Costa et al. (2023).

Em Sergipe (Figura 16) a produção de cana-de-açúcar entre 1995 e 2020 indica um crescimento significativo na produção, especialmente a partir de 2005, onde a curva de tendência quadrática apresenta um leve crescimento na produção ao longo dos anos, com uma concavidade para cima, sugerindo que a taxa de crescimento da produção aumentou, ainda que de forma moderada. O valor de $R^2 = 0,58$ indica que cerca de 58% da variação na produção pode ser explicada por essa equação quadrática, mostrando que o modelo é parcialmente explicativo. A significância estatística (*) indica que a tendência de crescimento é estatisticamente moderada, sugerindo que outros fatores, não capturados pela equação quadrática, também podem estar influenciando a produção de cana-de-açúcar ao longo do tempo.

Figura 17. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Sergipe.

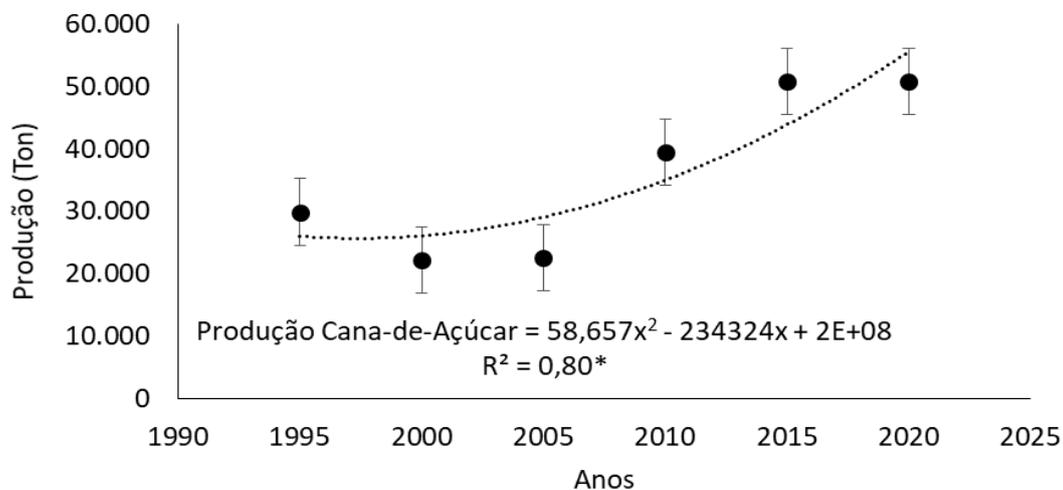


Fonte: A autora (2024)

No estado do Rio Grande do Norte (Figura 17), para a produção de cana-de-açúcar evidencia uma tendência de crescimento mais acentuada na produção, com uma curva mais pronunciada para cima, indicando que a taxa de crescimento se intensificou ao longo do período analisado. A melhoria expressa na taxa de crescimento da produção pode estar relacionada a inovações tecnológicas e práticas agrícolas mais eficientes. Conforme discutido por Sousa et al. (2019), o desenvolvimento e a adoção de variedades de cana-de-açúcar geneticamente melhoradas, associadas a práticas de manejo sustentável, como a irrigação de precisão, contribuíram significativamente para o aumento da produtividade agrícola em regiões produtoras do Brasil. Esse estudo observou um aumento médio de 30% na produtividade em áreas que adotaram práticas tecnológicas avançadas, o que é consistente com a tendência mais acentuada de crescimento apresentada no segundo gráfico.

Por outro lado, Ferreira e Silva (2020) destacam a importância das políticas públicas e dos incentivos econômicos na expansão da produção de cana-de-açúcar. Segundo os autores, o período entre 2005 e 2015 foi marcado por políticas governamentais voltadas para a expansão do setor sucroenergético, como programas de financiamento para pequenos e médios produtores e subsídios para a implementação de tecnologias inovadoras. Essas políticas podem ter contribuído para a intensificação do crescimento observado na figura 17, alinhando-se ao período de crescimento mais acentuado.

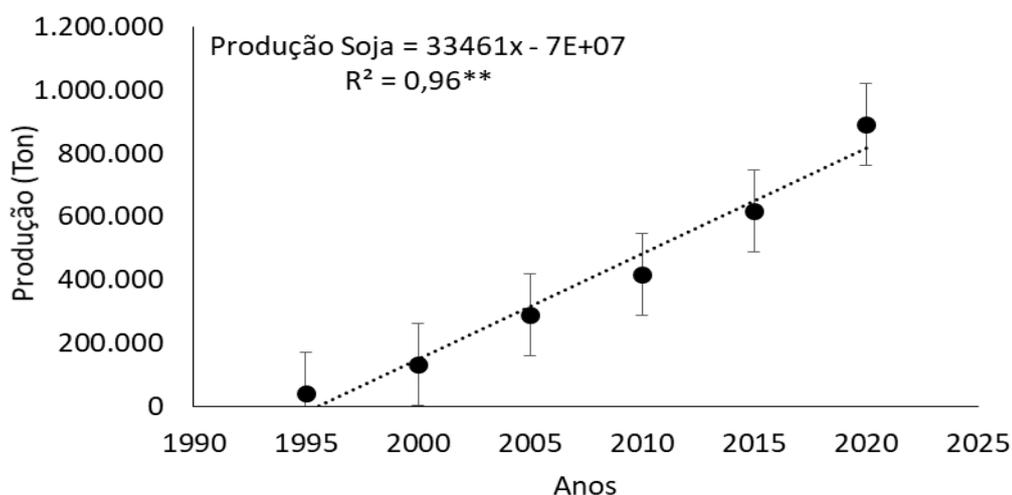
Figura 18. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para a cana-de-açúcar para o estado do Rio Grande do Norte.



Fonte: A autora (2024)

A figura 18 mostra a produção de soja entre 1995 e 2020, o coeficiente de determinação $R^2=0,96$ indica que 96% da variação na produção ao longo dos anos pode ser explicada por essa função linear, sugerindo um crescimento consistente e previsível ao longo do tempo. Esse crescimento linear pode ser atribuído a fatores como o aumento da demanda global por soja, investimentos em tecnologias agrícolas, melhoramento genético das plantas e expansão das áreas cultivadas.

Figura 19. Gráfico de tendência no aumento da produção agrícola para soja para o estado do Maranhão.



Fonte: A autora (2024)

De forma geral, é improvável que a região nordeste tenha melhorias na produtividade devido às mudanças climáticas, dessa forma produtores tente a procurar

mais tecnologias de irrigação. Entre todas as culturas examinadas, a cana-de-açúcar foi a que registrou as maiores quedas médias de produtividade, especialmente nos cenários em que as temperaturas simuladas eram mais altas. É evidente que, tanto a médio quanto a longo prazo, todos os estados do Nordeste verão reduções em seus níveis de produtividade. Estados como Alagoas e Pernambuco enfrentarão grandes prejuízos.

No cultivo do milho se falando em comparação com a produtividade média simulada para toda a região nordeste, independentemente do cenário considerado, a Maranhão, Piauí e Sergipe registrou ganhos de produtividade, mesmo que em pequenas escalas. Por outro lado, os outros estados são previstos as maiores perdas de produtividade.

Na cultura da soja, considerando-se que é uma cultura relativamente nova na região Nordeste, os dados coletados não foram suficientemente abrangentes para permitir uma análise estatística mais aprofundada e rigorosa. Essa limitação decorre do fato de que a implantação da soja em larga escala no Nordeste é um fenômeno recente, o que resulta em uma menor disponibilidade de séries históricas de dados agrônômicos, climáticos e de manejo, necessários para um estudo mais detalhado. Consequentemente, a interpretação dos resultados deve ser feita com cautela, levando em consideração a falta de dados consistentes e a necessidade de monitoramento contínuo para entender plenamente os padrões de produtividade e os fatores que afetam essa cultura na região.

7. CONCLUSÃO

Por meio das análises realizadas, verificou-se que as ondas de calor e secas têm um papel determinante na queda da produção de cana-de-açúcar, milho e soja no Nordeste do Brasil. O aumento na frequência e intensidade desses eventos climáticos, impulsionado por mudanças climáticas e fatores regionais, impacta negativamente a produtividade agrícola e revela a vulnerabilidade das culturas à variabilidade climática.

A análise do Índice de Precipitação Standardizado (SPI) revelou uma tendência crescente de eventos de seca, especialmente em anos com fenômenos como El Niño. As secas severas impactaram substancialmente a produção agrícola, com reduções de até 39,90% no milho e 6,17% na cana-de-açúcar durante períodos críticos. A soja, ainda em expansão na região, requer práticas adaptativas para minimizar futuros impactos.

A correlação entre a produção das culturas nos diferentes estados do NEB mostra a influência das condições climáticas e das práticas agrícolas, destacando a necessidade de soluções regionais coordenadas. Investimentos em práticas de irrigação emergem como uma estratégia eficaz para mitigar os efeitos das secas e das ondas de calor, garantindo a sustentabilidade da produção agrícola.

Conclui-se que os impactos ambientais crescentes interferem diretamente na produção de cana-de-açúcar, milho e soja. Dessa forma é fundamental a realização de estudos adicionais para aprofundar essa lógica e desenvolver soluções adaptativas. Investimentos em sistemas de irrigação são recomendados como medida crucial para enfrentar os desafios climáticos na região Nordeste do Brasil.

8 REFERÊNCIAS

- Abeyssekara, W. C. S. M., Siriwardana, M., & Meng, S. (2023). Economic consequences of climate change impacts on the agricultural sector of South Asia. *A case study of Sri Lanka. Economic Analysis and Policy*, , 700.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, *111*(D5). doi:10.1029/2005jd006290
- Alvalá, R. C. S., Cunha, A. P. M. A., Brito, S. S. B., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L. L., & Carvalho, M. A. (2019). Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *91*(suppl 1), e20170209. doi:10.1590/0001-3765201720170209
- Alves, J. B., Silva, E. M. da, & Rickes, C. P. (2017). Downscaling dinâmico de precipitação e veranicos no estado do Ceará. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, *2*(4), 385–393. doi:10.24221/jeap.2.4.2017.1428.385-393
- Araújo, L. C. (1930). *Memória sobre o clima do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: Tipografia do Serviço de Informações do Ministério da Agricultura*. 100.
- Araújo, S. M. S. (2011). Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. *Rios Eletrônica - Revista Científica da FASETE*, 89–98.
- Assad, E. D., Pinto, H. S., Zullo, J., Evangelista, S. R. M., Otavian, A. F., Avila, A. M. H., ... Coral, G. (2008). Aquecimento Global e a Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil. *Campinas: EMBRAPA*, (2).
- Ayoade, J. O. (2007). *Introdução à climatologia para os trópicos*. Bertrand Brasil.
- Baldwin, J. W., Dessy, J. B., Vecchi, G. A., & Oppenheimer, M. (2019). Temporally compound heat wave events and global warming: An emerging hazard. *Earth's Future*, *7*(4), 411–427. doi:10.1029/2018ef000989

- Barros, G. S. A. C. (2009). *Brazil as an economic superpower? Understanding Brazil's changing role in the global economy* (L. Martinez-Diaz, Org.). Washington: The Brookings Institution.
- Batista, D. F., & Albuquerque, T. M. A. (2022). Impacto da Seca na Agricultura dos Territórios Agreste Central, Alto Sertão e Centro-Sul de Sergipe. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1), 81–88. doi:10.1590/0102-77863710001
- Bem-vindo a Home Page da Embrapa Milho e Sorgo. ([s.d.]). Recuperado 11 de novembro de 2024, de Embrapa.br website: http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/climaesolo.htm
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Franke, A. E., Silveira, R. B., & Alves, M. P. A. (2020). The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 40(4), 2464–2478. doi:10.1002/joc.6345
- Black, E., Blackburn, M., Harrison, G., Hoskins, B., & Methven, J. (2004). Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 59(8), 217–223. doi:10.1256/wea.74.04
- Boletim de Monitoramento e Análise Climática – Climanálise - Número Especial. (1986). *SP*, 125.
- Breshears, D. D., Fontaine, J. B., Ruthrof, K. X., Field, J. P., Feng, X., Burger, J. R., ... Hardy, G. E. S. J. (2021). Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves. *The New Phytologist*, 231(1), 32–39. doi:10.1111/nph.17348
- Campos, J., Nilson Bezerra, & Studart, T. (2001). Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. *Fourth Inter-American Dialogue on Water Management*.
- Castro, A. (2003). Manual de Desastres: desastres naturais. Em *Ministério da Integração Nacional*. Brasília (DF).
- Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2022). Cambridge University Press.
- Cíntia, & Berndtsson, R. (1996). Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in Northeast Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 4221–4233.
- Cintra, R. (2010). *Assimilação de dados com redes neurais artificiais em modelo de circulação geral da atmosfera*. São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Clima e Tempo. ([s.d.]). Recuperado 11 de novembro de 2024, de Ministério da Agricultura e Pecuária website: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=>
- Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p.996. (2007). *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2014). Cambridge University Press.
- Companhia Nacional, D. E. (2017). *Disponível em: Acesso em*.

- Cortez, H., Santos, Lima, G., Peixoto De, & Sakamoto, M. (2017). A seca 2010-2016 e as medidas do Estado do Ceará para mitigar seus efeitos. *Parcerias Estratégicas*, 83–118.
- Costa, I., Moreira, & Mateus, A. (2014). Escalas temporais e tendências observadas nas temperaturas máximas no Estado do Ceará. *AMBIÊNCIA*, 10, 465–487.
- Costa, L. (1988). Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. *Minas Gerais*.
- Cunha, A. P. M. (2019). *Desenvolvimento e Avaliação de Indicadores Combinados de Monitoramento de Secas para o Brasil*. São José dos Campos, SP.
- Cunha, A. P. M. A., Tomasella, J., Ribeiro-Neto, G. G., Brown, M., Garcia, S. R., Brito, S. B., & Carvalho, M. A. (2018). Changes in the spatial–temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*, 19(10). doi:10.1002/asl.855
- Cunha, A. P. M. do A., Brito, S. S. de B., Rossato, L., Alvalá, R. C. dos S., Cunningham, C., Zeri, M., ... Carvalho, M. A. (2017). AVALIAÇÃO DE INDICADOR PARA O MONITORAMENTO DOS IMPACTOS DA SECA EM ÁREAS DE PASTAGENS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL. *Revista brasileira de cartografia*, 69(1). doi:10.14393/rbcv69n1-44034
- Cunha, G. R. (2012). *Zoneamento agroclimático para a cultura do milho no Brasil* (Vol. 73). Londrina: Embrapa Soja.
- Da Silva, D. F., Lima, M. J. D. A. S., Souza Neto, P. F. D. E., Gomes, H. B., Silva, F. D. dos S., Almeida, H. R. R. de C., ... Pereira, M. P. S. (2020). Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no Índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 449–464. doi:10.26848/rbgf.v13.2.p449-464
- de Claudino-Sales, V. (2022). Mudanças climáticas e ambientais globais. Em *Curso formação de mediadores em educação para redução de riscos de desastres no estado da Paraíba* (p. 71–83). Editora SertãoCult.
- Díaz, S. C. (2019). Biodiversity and Ecosystem Services in the Americas: Findings from the Americas Regional Assessment. *Journal of Geophysical Research*.
- Dole, R., Hoerling, M., Perlwitz, J., Eischeid, J., Pegion, P., Zhang, T., ... Murray, D. (2011). Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave?: THE 2010 RUSSIAN HEAT WAVE. *Geophysical Research Letters*, 38(6). doi:10.1029/2010gl046582
- Dosio, A. (2018). Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, (5).
- Edwards, D. C. (1997). Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Scales. *Atmospheric Science Paper*, 634.
- Efeitos da Seca de 2012 no Setor Agropecuário de Santa Catarina. (2012). *Florianópolis: Fundação CEPA*.
- Fagundes, R. (2020). Understanding heat wave impacts on sugarcane yield and growth across Brazilian regions. *Climate Research*, 82, 91–108.

- Farias, C. H. de A., Fernandes, P. D., Azevedo, H. M., & Dantas Neto, J. (2008). Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*, 12(4), 356–362. doi:10.1590/s1415-43662008000400004
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. Em *Sustainable Agriculture* (p. 153–188). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Favero, E. (2006). *A seca na vida das famílias rurais de Frederico Westphalen - RS*. Rio Grande do Sul.
- Fernandes, D. S., & Heinemann, A. B. (2011). *Estimativa da variação da produtividade do arroz em diferentes escalas temporais do índice SPI*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (Vol. 46). Brasília, v.
- Fiedler, N., Catão, Breshears, D. D., & Anderson-Teixeira, K. J. (2021). Compound Heatwave and Drought Events: A Review of Impacts on Terrestrial Ecosystems. *Nature Climate Change*, (10), 121–125.
- Figueroa, Silvio N., & Nobre, C. A. (1990). Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise*, 36–45.
- Figueroa, Silvio Nilo, Satyamurty, P., & Da Silva Dias, P. L. (1995). Simulations of the summer circulation over the south American region with an eta coordinate model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(10), 1573–1584. doi:10.1175/1520-0469(1995)052<1573:sotsco>2.0.co;2
- Fischer, E. M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6), 560–564. doi:10.1038/nclimate2617
- Geirinhas, J. (2018). *Caracterização Climática de Ondas de Calor no Brasil*. *Anuario do Instituto de Geociencias*.
- Geirinhas, J. L., Trigo, R. M., Libonati, R., Coelho, C. A. S., & Palmeira, A. C. (2018). Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil: CHARACTERIZATION OF HEAT WAVES IN BRAZIL. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 38(4), 1760–1776. doi:10.1002/joc.5294
- Gois, G. (2020). *Statistical normality and homogeneity of a 71-year rainfall dataset for the state of Rio de Janeiro-Brazil*. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 141. 1573–1591.
- Gonçalves, A. D. ([s.d.]). Droughts and Agricultural Impacts in Brazil: Identifying Vulnerabilities in Brazilian Agricultural Systems. *Climatic Change*.
- Gouvêa, J. R. F., Sentelhas, P. C., Gazzola, S. T., & Santos, M. C. (2009). Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil. *Scientia agricola*, 66(5), 593–605. doi:10.1590/s0103-90162009000500003

- Gusso, A. (2013). Integração de imagens NOAA/AVHRR: rede de cooperação para monitoramento nacional da safra de soja. *Revista CERES*, 60(2), 194–204. doi:10.1590/s0034-737x2013000200007
- Guzmán, D. de A. (2005). Del Priore, Mary, Revisão do Paraíso: os brasileiros e o Estado em 500 anos de história, Rio de Janeiro: Campus, 2000, 366 p. *Nuevo mundo mundos nuevos*. doi:10.4000/nuevomundo.356
- Harari, Y. N. (2018). *21 Lessons for the 21st Century* (Vol. 372). New York: Random House.
- Hastenrath, S., & Heller, L. (1977). Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society. Royal Meteorological Society (Great Britain)*, 103(435), 77–92. doi:10.1256/smsqj.43504
- Hirons, L., & Klingaman, N. L. (2016). *Historical Impact Analysis. Evidence on Demand Climate and Environment Infrastructure/Livelihoods*.
- Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, v, 22, 1571–1592.
- Ionita, M., Scholz, P., & Chelcea, S. (2016). Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index. *Natural Hazards (Dordrecht, Netherlands)*, 81(3), 1483–1498. doi:10.1007/s11069-015-2141-8
- IPCC - Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (ISBN 978 0521 88009-1 Hardback)*. (2007). 978, 521–70596.
- Jesus, N. O., Ribeiro, R. C. A. S., Teixeira, A. H. C., Bezerra, B. G., & Cunha, J. S. (2020). Cenários de Mudanças Climáticas e Impactos na Agricultura do Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*.
- Jones, J. W., Pickering, N. B., Rosenzweig, C., & Boote, K. J. (1995). Simulated impacts of global climate change on crops. Em *Climate Change and Rice* (p. 218–231). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Junior, A. R. C., Dantas, A. S., & Oliveira, C. R. M. (2018). Impacto das Ondas de Calor em Culturas Agrícolas no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, (1), 42–48.
- Kane, S., & Yohe, G. (2000). Societal adaptation to climate variability and change: An introduction. Em *Societal Adaptation to Climate Variability and Change* (p. 1–4). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Katzenstein, M. F. (2021). *The Role of Water Scarcity in Resilience and Vulnerability Assessment of Socioecological Systems*. *Water*, v. 13.
- Khan, N., Shahid, S., Ismail, T., Ahmed, K., & Nawaz, N. (2019). Trends in heat wave related indices in Pakistan. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment: Research Journal*, 33(1), 287–302. doi:10.1007/s00477-018-1605-2
- Kiem, A. S., Johnson, F., Westra, S., van Dijk, A., Evans, J. P., O'Donnell, A., ... Mehrotra, R. (2016). Natural hazards in Australia: droughts. *Climatic Change*, 139(1), 37–54. doi:10.1007/s10584-016-1798-7

- Kjellström, T. (2019). *Working on a warmer planet: The effect of heat stress on productivity and decent work*. International Labour Organization.
- Kong, Q. (2020). *Increases in summertime concurrent drought and heatwave in Eastern China*. *Weather and Climate Extremes*, *v. 28*.
- Kousky, V. E., & Chug, P. S. (1978). Fluctuations in annual rainfall for northeast Brazil. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, *56*(5), 457–465. doi:10.2151/jmsj1965.56.5_457
- Kumar, V., & Panu, U. (1997). Predictive Assessment of Severity of Agricultural Droughts Based on Agro-Climatic Factors 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, (33), 1255–1264.
- Lima, J. R., & Magalhães, A. R. (2018). Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. *Parcerias Estratégicas*, *46*, 191–212.
- Linares, C., & Díaz, J. (2008). Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality (Madrid). *European Journal of Public Health*, *18*(3), 317–322. doi:10.1093/eurpub/ckm108
- Liu, W. T., & Kogan, F. (2002). Monitoring Brazilian soybean production using NOAA/AVHRR based vegetation condition indices. *International journal of remote sensing*, *23*(6), 1161–1179. doi:10.1080/01431160110076126
- Livada, I., & Assimakopoulos, V. D. (2007). Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology*, *89*(3–4), 143–153. doi:10.1007/s00704-005-0227-z
- Lopes, A. B., Andreoli, R. V., Souza, R. A. F., Cerón, W. L., Kayano, M. T., Canchala, T., & de Moraes, D. S. (2022). Multiyear La Niña effects on the precipitation in South America. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, *42*(16), 9567–9582. doi:10.1002/joc.7847
- Luo, M., & Lau, N.-C. (2017). Heat waves in southern China: Synoptic behavior, long-term change, and urbanization effects. *Journal of Climate*, *30*(2), 703–720. doi:10.1175/jcli-d-16-0269.1
- Lyra, G. B., Oliveira-Júnior, J. F., Gois, G., Cunha-Zeri, G., & Zeri, M. (2017). Rainfall variability over Alagoas under the influences of SST anomalies. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *129*(2), 157–171. doi:10.1007/s00703-016-0461-1
- Magrin, G. (2014). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Em *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Marengo, J. A. (2018). *Mudanças Climáticas e seus Impactos na Agricultura do Nordeste Brasileiro*.
- Marengo, J., Antonio, & Espinoza, J. (2016). Secas sazonais extremas e inundações na Amazônia: causas, tendências e impactos. *Revista Internacional de Climatologia*, *36*, 1033–1050.

- Marengo, Jose A., & Camargo, C. C. (2008). Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 28(7), 893–904. doi:10.1002/joc.1584
- Marin, F. R., Jones, J. W., Singels, A., Royce, F., Assad, E. D., Pellegrino, G. Q., & Justino, F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, 117(1–2), 227–239. doi:10.1007/s10584-012-0561-y
- Marques, D. A. B. (2022). Estudos de viabilidade de cultivares de milho transgênico. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*.
- Martins, E. S. P. R., Magalhães, A. R., & Fontenele, D. (2017). A seca plurianual de 2010-2017 no Nordeste e seus impactos. *Parcerias Estratégicas*, 17–40.
- Marto, N. (2005). Ondas de calor. Impacto sobre a saúde. *Acta Médica Portuguesa*, 18, 467–474.
- Mckee, T. B. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Em *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (p. 179–183).
- Medeiros, G. C. S., Maia, A. G., & Medeiros, J. D. F. (2016). *Seca Hidrológica: uma abordagem sob a perspectiva da demanda hídrica*. 1–8.
- Mendes, J. S. (2021). Efeitos de eventos climáticos extremos na produtividade de cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 230–244.
- Milhorance, C., Sabourin, E., & Mendes, P. (2021). Adaptação às mudanças climáticas no Semiárido brasileiro: desafios de coordenação e implementação de políticas públicas. Em *A ação pública de adaptação da agricultura à mudança climática no Nordeste semiárido brasileiro* (p. 81–98). E-papers Serviços Editoriais.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
- Moonen, A. C. (2019). Climate change impacts on rainfed agriculture in the Brazilian semi-arid region. *Climatic Change*, 97–113.
- Moore, D. S. (2007). *Segurança alimentar x agrocombustíveis: a controvérsia entre a produção de alimentos e a produção de etanol no Brasil*. New York, Freeman Moreira RCGGS.
- Moura, A. D., & Shukla, J. (1981). On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(12), 2653–2675. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<2653:otdodi>2.0.co;2
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate Change and Drought: A Perspective on Drought Indices. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 145–163. doi:10.1007/s40641-018-0098
- Nemani, R., & Running, S. (1997). *Land cover characterization using multitemporal red, near-IR, and thermal-IR data from NOAA/AVHRR. Ecological applications*. 79–90.
- Neves, D. J., Delgado, Alcântara, C., Rodrigues, & Souza, E. (2016). Estudo de caso de um distúrbio ondulatório de leste sobre o Estado do Rio Grande do Norte-Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v, 31, 490–505.

- Oliveira, D., Evangelista, Assis, D., Couto, & Ferreira, C. (2018). A Dinâmica Climática Regional em Municípios da Zona da Mata, Campos das Vertentes e Sul Sudoeste de Minas Gerais: Efeitos das Ondas de Frio e de Calor nas Atividades Agrícolas. *Revista Brasileira de Climatologia*, (1).
- Oliveira, J. F. de, Júnior, Lyra, G. B., Góis, G., Brito, T. T., & Moura, N. da S. H. de. (2012). Análise de Homogeneidade de Séries Pluviométricas para Determinação do Índice de Seca IPP no Estado de Alagoas. *Floresta e Ambiente*, 19(1), 101–112. doi:10.4322/floram.2012.011
- Papalexiou, S. M., AghaKouchak, A., Trenberth, K. E., & Foufoula-Georgiou, E. (2018). Global, regional, and megacity trends in the highest temperature of the year: Diagnostics and evidence for accelerating trends. *Earth's Future*, 6(1), 71–79. doi:10.1002/2017EF000709
- Perkins, S. E., & Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. doi:10.1175/jcli-d-12-00383.1
- Perkins-Kirkpatrick, S. E., & Gibson, P. B. (2017). Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature. *Scientific Reports*, 1–12.
- Ponciano, N. J. (2018). Changes in the frequency of heatwaves over the past two decades in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38, 1283–1296.
- Porto, A. G. (2020). *Comportamento da Temperatura do Ar em Cana-de-Açúcar (Saccharum spp) em Cultivos Irrigados e de Sequeiro no Nordeste do Brasil. Anais do XXV Congresso Brasileiro de Meteorologia.*
- Rabelo, U. P., & Lima, I. E., Neto. (2018). Efeito de secas prolongadas nos recursos hídricos de uma região semiárida: uma análise comparativa para o Ceará. *Revista DAE*, 66(212), 61–79. doi:10.4322/dae.2018.023
- Rodrigues, V. S., Sousa, G. G., Saraiva, S. E. L., Cardoso, E. R. C., Pereira Filho, J. V., & Viana, T. V. A. (2018). Atributos químicos do solo em área cultivada com milho sob irrigação com água salina. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. Fortaleza*. v, 12, 3129–3138.
- Rosa, R. G. T. D. (2011). *Índices de Seca: Aplicação ao Continente Português.*
- Rossato, L., Alvalá, R. C. dos S., Marengo, J. A., Zeri, M., Cunha, A. P. M. do A., Pires, L. B. M., & Barbosa, H. A. (2017). Impact of soil moisture on crop yields over Brazilian semiarid. *Frontiers in environmental science*, 5. doi:10.3389/fenvs.2017.00073
- Roucou, P., Rocha de Aragão, J. O., Harzallah, A., Fontaine, B., & Janicot, S. (1996). Vertical motion changes related to North-East Brazil rainfall variability: A gcm simulation. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 16(8), 879–891. doi:10.1002/(sici)1097-0088(199608)16:8<879::aid-joc56>3.0.co;2-b
- Rusticucci, M. (2012). Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research*, 106, 1–17. doi:10.1016/j.atmosres.2011.11.001

- Schlenker, W., & Michael, J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of sciences*, *106*, 15594–15598.
- Shiva, J., Shafiei, Chandler, D. G., & Kunkel, K. E. (2019). Localized changes in heat wave properties across the United States. *Earth's Future*, *300–319*.
- Silva, C. M. C. A. C., Barbosa, R. S., Nascimento, C. W. A. do, Silva, Y. J. A. B. da, & Silva, Y. J. A. B. da. (2018). Geochemistry and spatial variability of rare earth elements in soils under different geological and climate patterns of the Brazilian northeast. *Revista brasileira de ciencia do solo*, *42(0)*. doi:10.1590/18069657rbc20170342
- Silva, D. M. (2018). Impactos da seca nas safras agrícolas no Nordeste do Brasil. *Boletim Técnico*.
- Silva, G. K. da, Marcos Júnior, A. D., Lima, C. E. S., Silva, M. V. M. da, Silveira, C. da S., Silva, E. M. da, & Lima, I. R. de. (2021). Análise da Variabilidade Espaço-Temporal do SPI: Um Estudo de Caso para a Sub-Bacia Choró, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *36(3 suppl)*, 539–549. doi:10.1590/0102-77863630005
- Silva, I. J. D. (2022). *Períodos úmidos e secos no estado de Alagoas via índice de seca / Iago*.
- Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. ([s.d.]-a). Recuperado 11 de novembro de 2024, de Gov.br website: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/>.
- Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. ([s.d.]-b). Recuperado 11 de novembro de 2024, de Gov.br website: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>
- Situação da seca observada nas regiões norte e nordeste do Brasil em.* (2016).
- Skansi, M. de L. M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., ... Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, *100*, 295–307. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.004
- Sm, V.-S., Van Der Schrier, G., Beguería, S., & Azorin-Molina C E Lopez-Moreno, J. I. (2015). *Contribuição da precipitação e evapotranspiração de referência para índices de seca sob diferentes climas*. Wada Y.
- Soares, D. (2017). Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *International Journal of Climatology*, *1483–1493*.
- Sousa Júnior, I. (2006). A influência da urbanização no clima da cidade de Campina Grande-PB. *Dissertação de Mestrado*.
- Souza, A., Rodrigues, Cardoso, A., De Oliveira, & Silva, W. (2022). Identification of rainfall indexes for monthly streamflow forecast in the Tucuruí station-Tocantins. *Brazilian Journal of Development*, *12*, 78599–78620.
- Souza, C. L. O. de, Nogueira, V. de F. B., & Nogueira, V. D. S. (2017). Variabilidade interanual da precipitação em cidades do semiárido brasileiro entre os anos de 1984

- e 2015. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 12(4), 740. doi:10.18378/rvads.v12i4.5626
- Souza, E. M., & Aquino, J. R. (2012). A grande seca e seus efeitos na produção agropecuária do Rio Grande do Norte. Em *Revista GeoNordeste* (p. 174–195). São Cristóvão, Ano XXIX.
- Souza, M. C. C. (2019). A Importância da Gestão de Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas: o caso do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 629–641.
- Stott, P. A. (2013). Attribution of weather and climate-related events. *Climate Science for Serving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities*, 307–337.
- Streck, N. A. ([s.d.]). Modelagem do Desenvolvimento e Crescimento da Cultura da Soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Ciencia Rural*.
- Suassuna, J. (2005). Potencialidades hídricas do nordeste brasileiro. *Parcerias estratégicas*, 20, 131–156.
- Tavares, P., & Da, S. ([s.d.]). *Análise da tendência das ondas de calor no Nordeste do Brasil*. Climatic Research Unit. Norwich, UK.
- Thornton, P. K., Jones, P. G., Alagarswamy, G., & Andresen, J. (2009). Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 19(1), 54–65. doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.08.005
- Uliana, E. M., Mendes, M. A. dos S. A., Almeida, F. T. de, Reis, E. F. dos, Xavier, A. C., & Silva, J. G. F. da. (2017). Índice de precipitação padronizado: estudo de caso para região noroeste do Estado do Espírito Santo, Brasil. *Nativa*, 5(5), 330–336. doi:10.5935/2318-7670.v05n05a05
- Vicente-Serrano, S. M. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index - SPEI. *Journal of Climate*, (23), 1696–1718.
- Vincent, L. A., Peterson, T. C., Barros, V. R., Marino, M. B., Rusticucci, M., Carrasco, G., ... Karoly, D. (2005). Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate*, 18(23), 5011–5023. doi:10.1175/jcli3589.1
- Vitali, A., Felici, A., Esposito, S., Bernabucci, U., Bertocchi, L., Maresca, C., ... Lacetera, N. (2015). The effect of heat waves on dairy cow mortality. *Journal of Dairy Science*, 98(7), 4572–4579. doi:10.3168/jds.2015-9331
- Vujica, M. (1972). *Structural analysis of hydrologic time series*.
- Wallace-Wells, D. (2019). A terra inabitável: uma história do futuro. Em *Editora Companhia das Letras*.
- Werle, A. J. K., Nicolay, R. J., Santos, R. F., Borsoi, A., & Secco, D. (2011). Avaliação de híbridos de milho convencional e transgênico (Bt), com diferentes aplicações de inseticida em cultivo safrinha. Em *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias* (p. 150–159). Guarapuava.

- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. doi:10.1080/02508068508686328
- Williams, A. P. (2021). Future dry and warm events in Africa and impacts on agriculture. *Environmental Research Letters*, (8).
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models* (p. 443–460). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Yang, X., Ruby Leung, L., Zhao, N., Zhao, C., Qian, Y., Hu, K., ... Chen, B. (2017). Contribution of urbanization to the increase of extreme heat events in an urban agglomeration in east China: Urbanization and the Increase of EHEs. *Geophysical Research Letters*, 44(13), 6940–6950. doi:10.1002/2017gl074084
- Zhao, Q., Chen, Q., Jiao, M., Wu, P., Gao, X., Ma, M., & Hong, Y. (2018). The temporal-spatial characteristics of drought in the Loess Plateau using the remote-sensed TRMM precipitation data from 1998 to 2014. *Remote Sensing*, 10(6), 838. doi:10.3390/rs10060838