



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL-PPGECA**

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DA CULTURA DE SOJA NA
REGIÃO DO MATOPIBA, BRASIL (1985–2020)**

CAMPINA GRANDE/PB

2024

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DA CULTURA DE SOJA NA
REGIÃO DO MATOPIBA, BRASIL (1985–2020)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof. Dr^a. Iana Alexandra Alves Rufino.

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Brito Silva.

CAMPINA GRANDE/PB

2024

A663a Araújo, Mayara Lucyanne Santos de.
Análise da resiliência climática da cultura de soja na região do
Matopiba, Brasil (1985–2020) / Mayara Lucyanne Santos de Araújo. –
Campina Grande, 2024.
129 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,
2024.
"Orientação: Profa. Dra. Iana Alexandra Alves Rufino, Prof. Dr.
Fabrício Brito Silva".
Referências.

1. Soja – Cultura. 2. Mudanças Climáticas. 3. Recursos Hídricos.
4. Geotecnologias. 5. *Commodity* Agrícola. 6. Saneamento Ambiental.
I. Rufino, Iana Alexandra Alves. II. Silva, Fabrício Brito. III. Título.

CDU 633.34(043)

MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO

**ANÁLISE DA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DA CULTURA DE SOJA NA
REGIÃO DO MATOPIBA, BRASIL (1985–2020)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 08/03/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a. Iana Alexandra Alves Rufino

Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. Fabrício Brito Silva

Coorientador – Universidade Ceuma – CEUMA

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão

Membro Interno – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha

Membro Interno – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. Edson Eyji Sano

Membro Externo – EMBRAPA e Universidade de Brasília – UNB

Prof. Dr. Edson Luis Bolfe

Membro Externo – EMBRAPA e Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

2. ALUNO(A): MAYARA LUCYANNE SANTOS DE ARAÚJO / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. FABRÍCIO BRITO SILVA - CEUMA - COORIENTADOR, DR. JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA - PPGECA/UFMG - EXAMINADOR INTERNO, DR. CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO - PPGECA/UFMG - EXAMINADOR INTERNO, DR. EDSON EYJI SANO - EMBRAPA/UNB - EXAMINADOR EXTERNO, DR. EDSON LUIS BOLFE - EMBRAPA/UNICAMP - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 15/2024). / TÍTULO DA TESE: "ANÁLISE DA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA DA CULTURA DE SOJA NA REGIÃO DO MATOPIBA, BRASIL (1985-2020)" / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 14:30 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEOCONFERÊNCIA.

3. EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEOCONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) ALUNO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA TESE, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA", SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA, CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE TESE, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE "APROVADO". NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO(A), ALUNO(A) E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.

4. CAMPINA GRANDE, 08 DE MARÇO DE 2024

5.

6.

7.

8.

Fabrício Brito Silva

9.

DR. FABRÍCIO BRITO SILVA - COORIENTADOR

10.

Documento assinado digitalmente

11.

gov.br

EDSON EYJI SANO

Data: 08/03/2024 20:20:27-0300

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

12.

13.

14.

DR. EDSON EYJI SANO - EXAMINADOR EXTERNO

15.

Documento assinado digitalmente

16.

gov.br

EDSON LUIS BOLFE

Data: 09/03/2024 10:15:56-0300

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

17.

18.

19.

DR. EDSON LUIS BOLFE - EXAMINADOR EXTERNO



Documento assinado eletronicamente por JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 08/03/2024, às 17:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por CARLOS DE OLIVEIRA GALVAO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 08/03/2024, às 17:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por IANA ALEXANDRA ALVES RUFINO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 08/03/2024, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por Mayara Lucyenne Santos de Araújo, Usuário Externo, em 08/03/2024, às 17:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador 4257934 e o código CRC 178738AE.

Referência: Processo nº 23096.013510/2024-14

SEI nº 4257934



Documento assinado digitalmente

FLAVIO PEREIRA DA CUNHA

Data: 12/03/2024 14:42:31-0300

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

“Não temas, porque eu sou contigo;
Não te assombres, porque eu sou teu Deus;
Eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça”.

– Isaías 41:10.

Ao meu Deus, Senhor Jesus e Espírito Santo.

Com todo amor e carinho.

Por ser meu refúgio e fortaleza diariamente.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Na Bíblia, em Êxodo 13, Deus manda seus filhos ao deserto. Era um lugar de provação, de mudanças, de transformações e de muitos aprendizados. Deus nunca disse que seria fácil, mas sempre garantiu que estaria adiante deles para que caminhassem e chegassem a terra prometida. Eles chegaram, pois Deus havia feito uma promessa ao seu povo. Da mesma forma, Deus me fez uma promessa e me direcionou até aqui. Não foi fácil, foi um lugar de lutas e batalhas emocionais gigantescas, mas Ele nunca me deixou desistir e sempre me fortaleceu. Hoje olho para trás e vejo o quão necessário foi esse processo. Finalizo o doutorado com aprendizados que vão além da vida acadêmica. Conheci o Deus do impossível de uma forma sobrenatural e sou eternamente grata.

Obrigada Deus, Senhor Jesus e Espírito Santo. Por ser meu refúgio e fortaleza diariamente, pela Sua Graça e misericórdia sem fim. Por me sustentar em Suas Palavras, que sejam sempre lâmpadas para os meus pés e luz para os meus caminhos. Muito obrigada, Deus. Obrigada pelo amor, paz e força a cada dia, pelas inúmeras bênçãos em minha vida. Obrigada por existir. Eu te amo, Deus.

Agradeço à minha mãe, Luzia Santos, no qual as suas orações me sustentaram até aqui. A força de uma guerreira na fé. Obrigada, mãe, por tudo. Obrigada por todas as orações e intercessões. A senhora é um exemplo e peço a Deus que um dia eu seja uma grande mãe, como a senhora é para mim. Eu te amo. Obrigada ao meu pai, Francisco Araújo, mas conhecido como Franzeh. Sei o tamanho do orgulho que sente dos seus filhos e de tudo que conquistaram até aqui, mediante uma vida de lutas ao sair ainda pequeno do interior do Ceará. O senhor nos ensinou a sermos fortes e sempre nos deu a base para toda essa trajetória, a educação. Amo você, pai. Obrigada por tudo.

Agradeço ao meu esposo, Joseph Pessoa. Esse processo não foi fácil para nós dois, mas foi o fortalecimento para uma vida. Obrigada por todo amor, carinho e companheirismo nessa trajetória. Você é um presente de Deus e sou grata por tudo que construímos até aqui, e tudo que ainda vamos construir juntos. Eu te amo e que possamos colher juntos os lindos frutos que o Senhor já reservou para nós.

Às minhas queridas irmãs, Natália e Letícia. Obrigada por todo o companheirismo de uma vida. Vocês são presentes de Deus. Sei o tamanho da admiração e felicidade em cada uma das minhas conquistas. Que estejamos sempre unidas, uma apoiando a outra. Amo vocês. À minha querida sobrinha Maria Alice. Uma pequena que chegou para encher de luz a nossa família. Você nunca terá ideia o quanto

seus abraços acalmaram a minha alma nesse processo. A sua tia/mãe te ama muito. À Nina, você é um ser de luz muito especial. Obrigada por me acompanhar durante a produção desse documento, mesmo sendo na sua soneca da tarde.

À minha família Campinense, Sra. Cleide, Sr. Gedeão, Gabrielle, Gecianne, Giselle, Douglas, Ana Luiza, meu eterno agradecimento. O acolhimento de vocês durante essa trajetória foi um lindo presente de Deus. Como sou grata a Deus pelos momentos lindos que pude viver ao lado de vocês. Muito obrigada. Também agradeço à minha família na fé, em especial ao Pr. Aldemir, Pr. Jonathan e Pr. Joelson, servos usados pelo Senhor nessa jornada e que me entregaram Palavras valiosas, verdadeiros tesouros.

Agradeço de uma forma mais que especial a minha querida orientadora, prof. Iana Rufino. Obrigada por sua empatia durante esses longos anos, sou eternamente grata. Obrigada por não desistir desse processo e lutar ao meu lado até o fim. Obrigada por toda a confiança e disponibilidade em ajudar, e por todo conhecimento compartilhado. Deus lhe abençoe grandiosamente. Ao meu querido co-orientador, prof. Fabrício Silva, muito obrigada. Ao longo desses 12 anos de orientação, o senhor me ensinou muito nessa jornada. Agradeço por todos os ensinamentos até aqui compartilhados, por toda confiança, conselhos e disponibilidade em ajudar. Gratidão por tudo.

Ao meu grande amigo José Benito Vieira (*in memoriam*), um ser de luz que nos deixou tão cedo. Era de uma grande inteligência, de um coração tão puro e sincero, sempre disposto a ajudar. Erámos grandes companheiros na universidade. Sou grata ao Senhor pela oportunidade de ter convivido e aprendido tanto com você, por ter lhe arrancado risos com a minha tagarelice, por ter conhecido um Benito que poucos tiveram a oportunidade de conhecer. Você sempre será especial e está guardado em meu coração.

Agradeço ao PPGECA, em especial ao querido BU, Laboratório de Hidráulica II, e a todos que fazem parte dessa linda família. Aos queridos professores desse programa, muito obrigada por todos os conhecimentos compartilhados. Em especial ao querido prof. Carlos Galvão, o senhor é uma pessoa maravilhosa. Também agradeço de forma especial ao prof. Adriano Lucena, coordenador do PPGECA, por toda disponibilidade em ajudar. Wellington e Flávio, muito obrigada. Obrigada especial à Higor Brito, sempre disposto a ajudar, muito obrigada, você vai longe e estarei sempre na torcida por você.

Ao querido Laboratório de Geotecnologias e à Universidade Ceuma, em São Luís/MA, por ser um grande apoio durante a formação dessa pesquisa, muito obrigada. Aos meus amigos Jessflan, Neurianne, Lorena, Gabriel e Poli, por todo incentivo durante essa trajetória. À Daniella, minha psicóloga, como você se tornou especial e muito importante nesse processo. O autoconhecimento é libertador.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte financeiro à pesquisa desenvolvida.

Enfim, agradeço a todos os amigos e colegas que contribuíram direta indiretamente para a concretização desse doutorado. As palavras de motivação e orações também foram essenciais.

Sonhar, viver e sempre agradecer. Muito obrigada.

RESUMO

Mudanças climáticas têm sido o centro de diversas discussões nos meios científico, econômico, político e público. Este estudo tem, como objetivos, analisar as mudanças climáticas na região do Matopiba e avaliar a sua relação com o uso e cobertura da terra, a produção e o produtividade da cultura de soja e as anomalias oceano-atmosfera *El Niño* Multivariado (MEI), Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO), no período de 35 anos (1985–2020). Foram utilizados os dados diários de precipitação e temperatura provenientes de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados agrícolas de produção e produtividade da cultura de soja dos municípios do Matopiba foram obtidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados de uso e cobertura da terra do Matopiba e dos *buffers* ao entorno das estações meteorológicas da região foram provenientes da plataforma MapBiomas. As anomalias oceano-atmosfera foram obtidas da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Os dados foram analisados utilizando técnicas estatísticas e geoestatísticas. Foi utilizado o teste *Mann-Kendall* para a avaliação de tendências climáticas e agrícolas. A temperatura máxima anual e intra-anual apresentou tendência de elevação no decorrer dos anos no Matopiba. Foi observada tendência de decréscimo significativo da precipitação anual na região em 90,90% no período analisado. A avaliação das tendências climáticas intra-anuais proporciona resultados mais específicos das mudanças climáticas para utilização em calendários agrícolas. Em 35 anos, houve uma expressiva mudança no uso e cobertura da terra do Matopiba, sendo a agropecuária o uso com maior acréscimo e as áreas florestas (floresta e savana) o uso com maior decréscimo. Dos municípios analisados, 68,18% possuem tendências de aumento da produção e produtividade de soja no decorrer dos anos. Não houve correlação entre as tendências de mudanças climáticas e a produção e produtividade de soja nos dados avaliados. A Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO) apresentou uma correlação positiva com as variáveis agrícolas de soja. Há evidências anuais e intra-anuais de mudanças climáticas no Matopiba e indícios de adaptação e resiliência climática para a produção e produtividade de soja na região. Os resultados fornecem subsídios para os planejamentos agrícolas e ambientais no Matopiba.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Geotecnologias; *Commodity* agrícola.

ABSTRACT

Climate change has been at the center of various scientific, economic, political, and public discussions. This study aims to analyze climate change in the Matopiba region and evaluate its relationship with land use and cover, soybean crop production and yield, and the ocean-atmosphere anomalies of Multivariate El Niño Index (MEI), Pacific Decadal Oscillation (PDO), and Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) over 35 years (1985–2020). Daily precipitation and temperature data from the National Institute of Meteorology (INMET) stations were used. Agricultural data on soybean production and yield in the Matopiba municipalities were obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Land use and cover data for Matopiba and buffers around the region's meteorological stations were sourced from the MapBiomias platform. Ocean-atmosphere anomalies were obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The data were analyzed using statistical and geostatistical techniques. The Mann-Kendall test was used to evaluate climatic and agricultural trends. The annual and intra-annual maximum temperatures rose over the years in Matopiba. A significant decreasing trend of annual precipitation was observed in the region in 90.90% of the period analyzed. Evaluating intra-annual climatic trends provides more specific results of climate change for use in agricultural calendars. In 35 years, there has been a significant change in land use and cover in Matopiba, with agriculture showing the most significant increase and forested areas (forest and savanna) the most significant decrease. Of the municipalities analyzed, 68.18% showed trends of increasing soy production and yield over the years. The evaluated data showed no correlation between climate change trends and soy production and yield. The Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) positively correlated with soy agricultural variables. There is annual and intra-annual evidence of climate change in Matopiba and signs of climate adaptation and resilience for soy production and yield in the region. The results provide support for agricultural and environmental planning in Matopiba.

Keywords: Climate trends; Geotechnologies; Commodity agricultural.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e delimitação geográfica do Matopiba.....	55
Figura 2. Delimitação territorial das mesorregiões pertencentes ao Matopiba..	56
Figura 3. Delimitação territorial das Regiões Geográficas Intermediárias pertencentes ao Matopiba..	57
Figura 4. Biomas brasileiros da região do Matopiba.....	58
Figura 5. Características climáticas da região do Matopiba.....	59
Figura 6. Solos da região do Matopiba.....	60
Figura 7. Declividade da região do Matopiba..	61
Figura 8. Altimetria da região do Matopiba..	61
Figura 9. Unidades hidrográficas da região do Matopiba..	62
Figura 10. Área cultivada com soja na região do Matopiba no ano de 2020..	64
Figura 11. Fluxograma metodológico da atual tese de doutorado.....	68
Figura 12. Distribuição geográfica das 22 estações meteorológicas nas mesorregiões do Matopiba.....	69
Figura 13. Precipitação (média total anual e desvio-padrão) (a), temperatura máxima (máximo anual, média anual e desvio-padrão) (b) e temperatura mínima (máximo anual, média anual e desvio-padrão) (c) do período de 1985 a 2020 nas 22 estações meteorológicas na região do Matopiba.....	80
Figura 14. Dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra na região do Matopiba, baseado em dados do MapBiomas.	85
Figura 15. Dinâmica espaço-temporal da formação natural e da ação antrópica na região do Matopiba, baseado em dados do MapBiomas, para os anos de 1985 e 2020.	86
Figura 16. Mudança no uso e cobertura da terra no Matopiba com ênfase na redução da formação natural para elevação da ação antrópica, baseado em dados do MapBiomas, entre os anos de 1985 a 2020.....	86
Figura 17. Dinâmica espaço-temporal da formação natural e ação antrópica nos <i>buffers</i> de 60 km das estações meteorológicas do Matopiba para os anos de 1985 e 2020, baseado em dados do MapBiomas. Para identificação de mesorregiões e estações meteorológicas, <i>vide</i> Figura 12.....	87
Figura 18. Dinâmica espaço-temporal da produção de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1985, 2000 e 2020. Para identificação de mesorregiões, <i>vide</i> Figura 12.	88

Figura 19. Dinâmica espaço-temporal da produtividade de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1985, 2000 e 2020. Para identificação de mesorregiões, *vide* Figura 12. 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos impactos negativos das mudanças climáticas na agropecuária.	38
Tabela 2. Descrição dos estádios vegetativos da soja.....	45
Tabela 3. Descrição dos estádios reprodutivos da soja.....	45
Tabela 4. Descrição dos efeitos do estresse por calor na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.....	47
Tabela 5. Descrição dos efeitos do estresse por seca na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.....	47
Tabela 6. Descrição dos efeitos do estresse por frio na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.....	48
Tabela 7. Os 10 principais municípios produtores de soja no Matopiba no ano de 2022.	65
Tabela 8. A área de soja no Bioma Cerrado, por estado, obtida a partir de imagens de satélite para as safras na região do Matopiba.	65
Tabela 9. Descrição e localização geográfica das estações meteorológicas convencionais do INMET distribuídas no Matopiba.....	69
Tabela 10. Reclassificação das imagens do MapBiomas (coleção 6) para análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra no Matopiba.....	75
Tabela 11. Reclassificação das imagens do MapBiomas (coleção 6) em duas classes, formação natural e ação antrópica.	77
Tabela 12. Tendências de precipitação anual e intra-anual analisadas pelo teste <i>Mann-Kendall</i> para as estações meteorológicas do Matopiba.	81
Tabela 13. Tendências de temperatura máxima anual e intra-anual analisadas pelo teste <i>Mann-Kendall</i> para as estações meteorológicas do Matopiba.....	82
Tabela 14. Tendências de temperatura mínima anual e intra-anual analisadas pelo teste <i>Mann-Kendall</i> para as estações meteorológicas do Matopiba.....	83
Tabela 15. Tendências de produção e produtividade da cultura de soja analisadas pelo teste <i>Mann-Kendall</i> para os municípios com estações meteorológicas na região do Matopiba.....	89
Tabela 16. Coeficientes de correlação de Pearson (<i>r</i>) entre as tendências de mudanças climáticas com os resultados agrícolas e de uso e cobertura da terra.....	90

Tabela 17. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados de produção e produtividade agrícola de soja com as anomalias oceano-atmosfera..... 92

LISTA DE SIGLAS

AMO	Oscilação Mutidecadal do Atlântico
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
BA	Bahia
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COP	Conferência das Partes
COP26	26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
COP27	27ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
COP28	28ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENSO	<i>El Niño</i> Oscilação Sul
EUA	Estados Unidos
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GITE	Grupo de Inteligência Territorial Estratégica
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAF	Índice de Área Foliar
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MA	Maranhão
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MEI	<i>El Niño</i> Multivariado
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>

OC	Observatório do Clima
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PAM	Produção Agrícola Municipal
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDO	Oscilação Decadal do Pacífico
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
ROL	Radiação de Onda Longa
SBC	Soja Baixo Carbono
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TO	Tocantins
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
WASP	Programa Mundial de Ciência da Adaptação
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
1.1 Apresentação	22
1.2 Justificativa.....	24
1.3 Hipótese.....	27
1.4 Objetivos.....	27
1.4.1 Objetivo geral	27
1.4.2 Objetivos específicos.....	27
1.5 Estrutura do trabalho	27
CAPÍTULO 2.....	29
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1 Resiliência climática.....	29
2.2 Mudanças climáticas.....	33
2.3 A expansão da cultura de soja	41
2.4 Cultura de soja.....	43
2.5 Risco agroclimático para a cultura de soja	46
2.6 Uso e cobertura da terra.....	50
CAPÍTULO 3.....	55
ÁREA DE ESTUDO.....	55
CAPÍTULO 4.....	67
MATERIAL E MÉTODOS	67
4.1 Fluxograma metodológico.....	67
4.2 Dados climáticos	68
4.3 Anomalias oceano-atmosfera	72
4.4 Dados agrícolas	74
4.5 Dados de uso e cobertura da terra.....	75
4.6 Relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera.....	77

CAPÍTULO 5	79
RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1 Resultados.....	79
5.1.1 Análise climática	79
5.1.2 Análise de uso e cobertura da terra.....	84
5.1.3 Análise agrícola	87
5.1.4 Resultado da relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera.....	90
5.2 Discussão	92
CAPÍTULO 6	97
CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1.1 Apresentação

Evidências de mudanças nos padrões climáticos globais, regionais e locais e os impactos observados de tais mudanças trouxeram inúmeras discussões sobre o tema no ambiente científico, econômico, político e público (Abrahams, 2020; IPCC, 2020; 2021; 2022; Muluneh, 2020). As crescentes atividades antrópicas que geram emissões de gases de efeito estufa têm elevado o aquecimento do planeta Terra e causado mudanças significativas no sistema climático, como o aumento da temperatura ambiente, a variabilidade da precipitação e a frequência de eventos extremos, como secas, inundações e ondas de calor (IPCC, 2018, 2022).

Segundo o relatório do IPCC “Global Warming of 1.5 °C”, as emissões antropogênicas de CO₂ precisam ser reduzidas pela metade até 2030, caso contrário, mudanças devastadoras ocorrerão no oceano e na terra (IPCC, 2018). Conforme definido na 27^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP27), pretende-se limitar o aquecimento global bem abaixo de 2 °C e manter viva a meta estabelecida no ano anterior, em que o mundo precisa atingir zero emissões líquidas de carbono até meados do século e limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C (COP27, 2022).

Apesar da redução das emissões de CO₂, as mudanças climáticas são inevitáveis (COP26, 2021; IPCC, 2022). Determinadas mudanças como a elevação do nível do mar são atuais e irreversíveis ao longo de centenas a milhares de anos (IPCC, 2021). Conforme balanço geral concluído na 28^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP28), o progresso para o cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris foi lento em todas as áreas da ação climática, desde a redução das emissões de gases de efeito de estufa até o reforço da resiliência às alterações climáticas e à obtenção de apoio financeiro e tecnológico para nações vulneráveis (COP28, 2023).

O termo “mudanças climáticas” passou de um conceito teórico abstrato para uma realidade que agora é evidente ao analisar bancos de dados ambientais. O clima já está mudando e continuará mudando mesmo com a redução das emissões dos gases de efeito estufa (COP26, 2021). A melhoria nos sistemas de alerta precoce e defesas contra inundações e a construção de infraestrutura e agricultura resilientes são duas

importantes ações que podem evitar perdas de vidas, meios de subsistência e *habitats* naturais, as quais já estão ocorrendo e sucederão com as mudanças climáticas (COP26, 2021). A análise de sistemas agrícolas com respostas positivas em cenários de mudanças climáticas, buscando aumentar, de forma sustentável, a produtividade e os rendimentos de culturas, são essenciais, principalmente tendo em conta a crescente população mundial e a segurança alimentar (FAO, 2023).

Eventos climáticos extremos causados pelas mudanças climáticas tiveram sérios impactos negativos sobre o desenvolvimento econômico de todos os países do mundo (Funatsu et al., 2019). As mudanças climáticas causam impactos na produção agrícola, no cultivo de safras e na pecuária, nos insumos de produção agrícola e perdas econômicas (Assad et al., 2019; Bocchiola et al., 2019; Islam et al., 2019; Vale et al., 2020). Os eventos climáticos extremos tornaram-se mais frequentes no mundo (IPCC, 2021), por isso faz-se necessário a adaptação e resiliência de sistemas agrícolas à variabilidade e às mudanças climáticas.

Conceitos como adaptação, vulnerabilidade e resiliência são usualmente utilizados na literatura. A resiliência pode ser definida como a capacidade de se adaptar positivamente às condições adversas (Barthélemy et al., 2021; IPCC, 2022). O conceito de resiliência é um fenômeno complexo, multidisciplinar e multidimensional. O desenvolvimento resiliente às alterações climáticas integra medidas de adaptação e mitigação para promover o desenvolvimento sustentável para todos (IPCC, 2022). Nas últimas duas décadas, vários estudos foram conduzidos para analisar, medir e provar a resiliência às mudanças climáticas (Jamaliah & Powell, 2017; Melkonyan et al., 2017; Moat et al., 2017; Totschnig et al., 2017; Klimek et al., 2019; Rana, 2020; Feldmeyer, 2021; Guo et al., 2021; Fan et al., 2022; Lu et al., 2022). A resiliência do mundo, dos países e das regiões ao clima é fundamental para um futuro sustentável.

Para alcançar a resiliência climática e aumentar a subsistência sustentável, é necessário analisar e melhorar os sistemas agrícolas (Rathi, 2022). Nesse sentido, o conhecimento da resiliência climática em áreas agrícolas, mediante cenários de mudanças climáticas, é essencial para que os agricultores e todos os elos da cadeia produtiva do agronegócio, a sociedade e as políticas públicas, na busca pela segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável, possam minimizar os efeitos adversos previstos, como também auxiliar os planejamentos ambientais, hídricos, logísticos, sociais e econômicos no Brasil e no mundo (Santos et al., 2022).

Muitos estudos têm revelado estratégias de adaptação diferentes para mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas, como a redução da área e mudança dos padrões de cultivo, variedades resistentes à seca, melhoria dos sistemas de transferência de água, redução do número de animais, mudança dos ingredientes da ração e alimentação suplementar (Keshavarz & Karami, 2014; Karimi et al., 2018; Wetende et al., 2018; Matewos, 2020). Por outro lado, a adaptação às mudanças climáticas é específica para cada contexto diferente (IPCC, 2013; Santos et al., 2022) e pode ser afetada por fatores naturais, humanos e socioeconômicos (Rose et al., 2019).

Por isso, compreender onde, como e quando as mudanças climáticas ocorrem é de suma importância no ambiente científico, econômico, político e público. Analisar as mudanças climáticas, com ênfase na variabilidade espaço-temporal das tendências climáticas anuais e intra-anuais, e investigar sistemas agrícolas regionais e locais que são capazes de se manterem elevados mediante estratégias de adaptação a eventos climáticos extremos, tornando-se resilientes as mudanças climáticas, são essenciais. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar a resiliência climática da cultura de soja no Matopiba, mediante avaliação da variabilidade espaço-temporal das mudanças climáticas na região e a sua relação com o uso e cobertura da terra, dados agrícolas e anomalias oceano-atmosfera.

1.2 Justificativa

As mudanças climáticas constituem-se no principal desafio a ser enfrentado por toda a sociedade no século XXI, já que seus impactos já estão e ainda serão sentidos em grande escala entre as diversas atividades econômicas e localidades ao redor do planeta (Carlos et al., 2019; IPCC, 2022). No Brasil, tais impactos já podem ser observados, como o aumento da temperatura, variabilidade nos padrões de precipitação, além das alterações dos extremos climáticos, tornando o cenário brasileiro condizente com as projeções atuais de mudanças no clima global (Solomon et al., 2007; Chou et al., 2014).

Alterações nos padrões de temperatura e precipitação nos biomas brasileiros acarretarão consequências diretas na disponibilidade e utilização de recursos para os meios de vida humano e animal (Milhorange et al., 2019). O Nordeste brasileiro apresenta um elevado índice de localidades em processo de desertificação, com impactos negativos especialmente para os indicadores socioeconômicos regionais.

Evidências revelam que as mudanças climáticas, associadas às condicionantes ambientais e socioeconômicas, atuam no comportamento das doenças e agravos sobre a saúde (MMA, 2016; IPCC, 2022). Estudos confirmam a relação presente entre a severidade dos impactos das mudanças do clima e os níveis de desidratação, problemas respiratórios e redistribuição de doenças infecciosas decorrentes de eventos de migração (PBMC, 2013; IPCC, 2022).

No setor agrícola, as mudanças climáticas provocam eventos de secas intensas e inundações, aumento da temperatura e disponibilidade hídrica, elevação da taxa fotossintética em decorrência da duplicação do CO₂ e redução das terras cultiváveis, devido à elevação da salinidade do solo (Rosenzweig & Hillel, 1998; FAO, 2017; Assad et al., 2019). Tais impactos causam diminuição da produção e da produtividade agrícola, limitação da oferta de alimentos e produtos primários, elevação de preços agrícolas e penalização de populações, principalmente as mais vulneráveis (Assad et al., 2019). As mudanças climáticas são um risco para a segurança alimentar do Brasil e do mundo.

Devido ao crescimento elevado e constante da população dos países emergentes como a China, Índia, Brasil, Rússia, Indonésia, México e Turquia, é previsto um aumento da demanda global de alimentos até 2050 (60% de elevação), constituindo-se em um dos grandes desafios das nações atualmente (Searchinger et al., 2019). A agricultura contribui significativamente para a segurança alimentar e para a economia mundial. A produção agrícola brasileira fornece uma parte significativa dos alimentos consumidos no planeta (Zilli et al., 2020).

No Brasil, o setor agrícola ao longo das últimas quatro décadas (1975–2019) passou de 38,1 milhões de toneladas para 232,6 milhões de toneladas na produção de grãos, equivalente a um aumento de 510% (IBGE, 2020). Os principais *commodities* agrícolas do Brasil são a soja, o milho e a cana-de-açúcar que, juntos, representaram 84,4% da área de produção agrícola brasileira no ano de 2017. Em 2018, correspondeu a 47,64% do total das exportações agrícolas mundiais (CONAB, 2019). Em 2020, o Brasil foi o maior exportador mundial de soja, com aproximadamente 50% do comércio (Aragão & Contini, 2021). A maior importadora da soja brasileira é a China (Lima et al., 2018).

A soja é a cultura mais produzida e consumida globalmente. Essa oleaginosa, rica em óleos e proteínas, é consumida pelos seres humanos e animais (Doorenbos & Kassam, 1979; FAO, 2017). O Brasil ocupa o primeiro lugar na produção mundial da oleaginosa, seguido dos Estados Unidos e da Argentina, alcançando, em 2020, 126

milhões de toneladas, mais de um terço da produção mundial (Aragão & Contini, 2021). Na safra 2022/23, a produção da cultura de soja foi estimada em 322,8 milhões de toneladas (CONAB, 2023). A produção brasileira de biodiesel depende fortemente do óleo de soja (Cremones et al., 2015), constituindo-se em 69,2% da matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil no ano de 2023 (ANP, 2023).

A nova fronteira agrícola do país, com destaque na produtividade da cultura de soja, corresponde à região do Matopiba, um acrônimo formado pela junção das siglas dos quatro estados, Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Araújo et al., 2019). A região do Matopiba é considerada a área com maior potencial de crescimento de terras agricultáveis no Brasil. Na safra 2018/2019, o Matopiba foi responsável por aproximadamente 11% da produção nacional de soja, o que correspondeu a 13,3 milhões de toneladas (CONAB, 2019). A região somou a produção total de 18,5 milhões de toneladas de soja na safra 2022/23, com o plantio de 4,8 milhões de hectares da cultura, o que representa cerca de 12,3% do total produzido no Brasil (EMBRAPA, 2023).

Limitada a oeste pela Amazônia Legal e a leste pelo semiárido nordestino, a região passou por intensas transformações em suas características socioambientais. A mudança no cenário ambiental da região do Matopiba foi decorrente do crescimento agrícola e urbano, sobretudo nas últimas duas décadas, o que gerou mudanças substanciais no uso e cobertura da terra do Matopiba (Salvador & Brito, 2018). Diante do cenário atual, a região do Matopiba necessita de estudos sobre mudanças climáticas anuais e intra-aneais que permitam traçar mecanismos de intervenções nos sistemas produtivos de diversas culturas, principalmente a cultura de soja, aliados à resiliência climática e ao uso e cobertura da terra. Apesar do número crescente de trabalhos que analisam as mudanças climáticas na região do Matopiba, ainda permanecem alguns questionamentos:

- 1) Quais as tendências climáticas anuais e intra-aneais da precipitação e temperatura na região do Matopiba?
- 2) Qual a dinâmica espaço-temporal de uso e cobertura da terra no Matopiba?
- 3) Qual a dinâmica espaço-temporal da produção e produtividade da cultura de soja no Matopiba?
- 4) Qual a relação entre as mudanças climáticas observadas com as alterações no uso e cobertura da terra, os dados agrícolas de soja e as anomalias oceano-atmosfera? e

- 5) Há resiliência climática na produção e produtividade da cultura de soja no Matopiba?

1.3 Hipótese

A dinâmica espaço-temporal das variáveis climáticas, agrícolas e de uso e cobertura da terra em cenário de mudanças climáticas confirmam que a produção e o produtividade da cultura de soja na região do Matopiba apresentam resiliência climática.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é analisar a possível resiliência climática da produção e produtividade da cultura de soja na região do Matopiba, mediante a variabilidade espaço-temporal das tendências climáticas e a sua relação com o uso e cobertura da terra, dados agrícolas e anomalias oceano-atmosfera.

1.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar as tendências climáticas anuais e intra-aneais no Matopiba;
- ✓ Analisar a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra no Matopiba e nos *buffers* ao entorno das estações meteorológicas da região;
- ✓ Observar a produção e o produtividade da cultura de soja no Matopiba;
- ✓ Avaliar a relação das mudanças climáticas observadas e as variáveis de uso e cobertura da terra, produção e produtividade agrícola da cultura de soja e sistemas oceânico-atmosféricos de grande escala;
- ✓ Observar se há resiliência climática da cultura de soja na região do Matopiba.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho de tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) foi estruturado em seis capítulos, sendo estes: i) considerações iniciais; ii) fundamentação teórica; iii) caracterização da área de estudo; iv) material e métodos; v)

resultados e discussão; e vi) considerações finais. Os resultados dessa tese foram publicados como artigo na revista *Sustainability*, intitulado “*The Relationship between Climate, Agriculture and Land Cover in Matopiba, Brazil (1985–2020)*”, DOI <https://doi.org/10.3390/su16072670>.

No primeiro capítulo, foram abordadas a apresentação e a justificativa da relevância do trabalho de tese que foi elaborado, perguntas de investigação, a hipótese e os objetivos da pesquisa. No segundo capítulo, foi apresentada a fundamentação teórica da pesquisa, com alguns conceitos, metodologias e aplicações da tese de doutorado. No terceiro capítulo consta a caracterização geográfica, biofísica e ambiental da região do Matopiba. O quarto capítulo compreende o material e métodos que foram utilizados na pesquisa, com suas definições, fórmulas e aplicações na atual tese de doutorado. No quinto capítulo, tem-se os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. No último capítulo, é realizado um apanhado geral das informações compartilhadas no presente texto de tese de doutorado em forma de considerações finais.

O mundo enfrenta o grande desafio das mudanças climáticas (Xu & Deng, 2024). As atuais mudanças no clima já afetam significativamente os processos humanos e naturais (IPCC, 2021). As mudanças climáticas tornaram-se um desafio significativo para a humanidade, uma vez que têm consequências locais, regionais e globais substanciais (Dai et al., 2016; Santos et al., 2022). Em decorrência das mudanças climáticas, há impactos ambientais, sociais, políticos e econômicos que já são observados, tais como mudanças no ciclo hidrológico, inundações frequentes, secas, maior incidência de pragas e doenças, e um desafio maior da agricultura mundial na produção de grãos e alimentos (IPCC, 2021). Por isso, o desafio global consiste em entender onde, quando e como as mudanças climáticas afetam as populações mundiais para analisar, medir e provar processos de adaptação e resiliência climática (Rana, 2020; Feldmeyer, 2021).

Desta maneira, com o objetivo de estruturar informações de artigos científicos indexados, livros, relatórios, teses, entre outros, para subsidiar a fundamentação teórica da atual pesquisa de tese de doutorado, abordaram-se os seguintes tópicos: Resiliência climática; Mudanças climáticas; A expansão da cultura de soja; Cultura de soja; Risco agroclimático para a cultura de soja; e Uso e cobertura da terra.

2.1 Resiliência climática

A palavra resiliência é originada do termo latino *resiliere*, que significa se recuperar. Também pode ser entendida como a capacidade de se adaptar em face de adversidade, trauma, tragédia, ameaças ou mesmo fontes significativas de ameaça. Segundo Odum (1971), o termo resiliência significa a capacidade de um sistema em desenvolver mecanismos para reconquistar um equilíbrio funcional. Holling (1973) aplicou pela primeira vez o conceito de resiliência à ecologia usando “a resiliência e a estabilidade dos ecossistemas” para explicar as características não lineares das mudanças nos ecossistemas. A resiliência é um processo dinâmico que evolui ao longo do tempo e implica um tipo de funcionamento adaptativo que especificamente nos permite enfrentar as dificuldades observando um equilíbrio inicial ou voltando como uma oportunidade de crescimento (Hosseini et al., 2016; Sisto et al., 2019).

Conforme Figueiredo et al. (2021), a resiliência evoluiu para uma compreensão transformacional e evolutiva, em contrapartida, de uma compreensão focada no equilíbrio. Segundo Wang et al. (2023), a resiliência é a capacidade de controlar a estrutura e o funcionamento de um sistema após experimentar intensas mudanças externas e de se transformar para responder à essas mudanças e aumentar a capacidade adaptativa. A resiliência, como a resiliência ecológica, a resiliência ao nível de um sistema e a resiliência urbana, tornou-se uma ferramenta poderosa para resolver problemas complexos em campos multidisciplinares (Zhang et al., 2020; Shi et al., 2022). O termo resiliência é uma palavra abrangente que se tornou cada vez mais proeminente entre pesquisadores de todas as áreas (Lv et al., 2024). A resiliência alcançou enorme popularidade em publicações acadêmicas na última década.

O termo resiliência é aplicado em diversos setores da sociedade atual, principalmente os que envolvem a interação humano-ambiente, como na agricultura (Buitenhuis et al., 2020; Aboah et al., 2021; Dardonville et al., 2021; Mallick et al., 2024), riscos ambientais e desastres (Sapountzaki, 2012; Manyena et al., 2019), planejamento urbano e desenvolvimento (Leichenko, 2011; Jabareen, 2013; Meerow et al., 2016; Nunes et al., 2019; Jamshed et al., 2019; Sun et al., 2021; Zhang et al., 2023; Paszkowski et al., 2024), energia (Sharifi & Yamagata, 2016; Zeng et al., 2021; Li & Mostafavi, 2024), ciência da sustentabilidade (Roostaie et al., 2019), hidrologia (Keys et al., 2019; Imani et al., 2021; Wang et al., 2024), segurança alimentar e fome (Tendall et al., 2015) e saúde (Barthélemy et al., 2021; Riehm et al., 2021), entre outros.

Destacam-se os estudos sobre resiliência climática, principalmente devido ao desafio mundial em adaptação às mudanças climáticas e aos eventos extremos relacionados ao clima já esperados no futuro (Chen et al., 2018; Manyena et al., 2019). Nos últimos cinco anos, o Fórum Econômico Mundial tem classificado esses extremos entre os principais riscos globais em termos de probabilidade, impactos e ameaças a longo prazo para os seres humanos (McLennan, 2021; 2022). Uma situação tão alarmante levou a maioria das nações a alocar fundos específicos para a adaptação às mudanças climáticas (Buchanan et al., 2022), a penalizar as emissões excessivas de gases com efeito de estufa (Cheng et al., 2021) e a mudar as prioridades estratégicas para o desenvolvimento sustentável e resiliente (Fekete et al., 2021). Por isso, constantes estudos sobre resiliência climática é de extrema importância em escalas globais, regionais e locais, como os descritos abaixo.

- Vargas et al. (2019) Analisaram criticamente o conceito de resiliência e propuseram elementos complementares de aplicação em sistemas agroecológicos frente às mudanças e variabilidades climáticas.
- Feldmeyer et al. (2020) Analisaram o aumento da resiliência climática urbana e desenvolveram um conjunto de indicadores para resiliência climática regional. Estudo de caso no estado de Baden-Württemberg, na Alemanha.
- Adzawla et al. (2020) Analisaram os impactos, a vulnerabilidade e a resiliência das mudanças climáticas percebidas pelas famílias agrícolas no Gana.
- Szymczak et al. (2020) Estudaram a resiliência climática de sistemas agrícolas quando sujeitos a diferentes fatores ambientais externos (por exemplo, clima, insumos e variabilidade de preços) ao longo de cinco anos experimentais em uma área no Rio Grande do Sul, Brasil.
- Eeswaran et al. (2021) Avaliaram a resiliência climática em termos de lucratividade e risco para uma rotação milho-soja-trigo de longo prazo sob diferentes sistemas de tratamento. Estudo de caso no Michigan, Estados Unidos.
- Keshavarz et al. (2021) Identificaram os impactos da variabilidade e mudanças climáticas nos sistemas agrícolas, e a resiliência das famílias rurais à essas condições. Também determinaram os impulsionadores da resiliência rural das famílias aos extremos climáticos. O estudo foi conduzido na província de Khorasan Razavi, Irã.
- Tham et al. (2023) Examinaram a adoção e a eficácia de soluções baseadas na

natureza pelos produtores de cacau para aumentar a resiliência climática em Adansi Asokwa, no Gana.

A resiliência climática é geralmente considerada a capacidade de recuperar ou mitigar a vulnerabilidade aos choques relacionados com o clima, como inundações e secas (Grasham et al., 2021). O foco do aumento da resiliência climática é reduzir a vulnerabilidade climática que a sociedade, os estados e os países têm atualmente em relação aos numerosos efeitos das mudanças climáticas. Atualmente, os esforços para construir resiliência climática abrangem estratégias sociais, econômicas, tecnológicas e políticas que são implementadas em todas as escalas da sociedade (IPCC, 2022).

Diante dos estudos apresentados, é possível notar que a resiliência climática é apresentada em diversas análises agrícolas. Nesse contexto, pode ser definida como a capacidade de um sistema agrícola de acompanhar suas estruturas e garantir o provisionamento de suas funções em face da variabilidade e extremos climáticos (Eeswaran et al., 2021). Essas condições podem ser alcançadas melhorando as capacidades de resiliência, ou seja, robustez, adaptabilidade e transformabilidade das práticas agrícolas (Tendall et al., 2015; Urruty et al., 2016; Meuwissen et al., 2019).

Robustez é a capacidade do sistema agrícola de resistir a extremos climáticos. Adaptabilidade é a capacidade de mudar as práticas agrícolas, *marketing* e gestão de risco para reduzir os impactos dos extremos climáticos sem alterar as estruturas e o mecanismo de *feedback* do sistema. Transformabilidade é a capacidade de alterar substancialmente as estruturas, mecanismos de *feedback* e funções em resposta a extremos climáticos (Meuwissen et al., 2019; Benabderrazik et al., 2022).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a *Climate-Smart Agriculture* (em português, Agricultura Inteligente para o Clima), é uma abordagem integrada para ajudar as pessoas que geram sistemas agrícolas a responder eficientemente às mudanças climáticas, visando aumentar, de forma sustentável, a produtividade e os rendimentos, adaptar-se às alterações climáticas e, sempre que possível, neutralizá-las, reduzindo as emissões de gases de efeito de estufa provenientes da agricultura e, ao mesmo tempo, tendo em conta a crescente população mundial, garantindo a segurança alimentar (FAO, 2023). O planejamento adequado da ação adaptativa envolve uma análise das opções, suas potencialidades e limitações, e as incertezas associadas às mudanças climáticas (Cunha et al., 2015).

Piedra-Bonilla et al. (2020) analisaram a influência da variabilidade climática nas categorias de diversificação de culturas, a fim de compreender seu papel como medida adaptativa em resposta às mudanças climáticas. A produção de soja não foi considerada no estudo citado. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura e precipitação não afetaram cada categoria da mesma forma e a diversificação de culturas aparece como uma estratégia de adaptação. Estudos complementares sobre a resiliência climática em ambientes agrícolas devem ser realizados com a finalidade de analisar a robustez, adaptabilidade e transformabilidade de culturas agrícolas.

Nos sistemas agrícolas atuais, existem opções de adaptações potenciais disponíveis para alcançar a resiliência climática. Estes incluem, por exemplo, desenvolvimentos tecnológicos, programas governamentais de seguro agrícola e mudanças nas práticas de produção e gestão agrícola. Portanto, um dos objetivos de melhorar a resiliência climática inclui o aumento do rendimento das culturas em face dos extremos climáticos (Peterson et al., 2018). Porém, fenômenos de resiliência muitas vezes carecem de dados sobre a dimensão ambiental e social em escalas temporais e espaciais específicas (Feldmeyer et al., 2019; Schaefer et al., 2020).

2.2 Mudanças climáticas

O clima está mudando e a ênfase sobre o tema está cada vez mais relevante. Cientistas estão observando mudanças no clima da Terra em todas as regiões e em todo o sistema climático. Algumas dessas mudanças, como a elevação constante do nível do mar, são atuais e impossíveis de serem revertidas em um período de centenas a milhares de anos (IPCC, 2021). As discussões científicas sobre a variabilidade climática global e seus impactos ambientais têm levado à necessidade de compreender melhor os efeitos dos eventos climáticos extremos (Assad et al., 2019).

Simulações de modelos climáticos, análises e métodos estatísticos, combinam várias linhas de evidências que resultam na compreensão da influência humana em uma gama mais ampla de variáveis climáticas, incluindo clima e extremos climáticos (IPCC, 2021; 2022). De fato, pesquisas e ações voltadas para a segurança hídrica e a pressão ambiental causada por eventos climáticos extremos devem ser enfatizados (Skansi, 2013; Myers, 2017; Silva, 2019). As mudanças climáticas têm consequências negativas para a saúde humana, bem como para o desenvolvimento econômico a longo prazo (IPCC, 2022).

Nas décadas de 1980 a 1990, por meio do estabelecimento da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change* ou UNFCCC) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change* ou IPCC), a visão da questão do clima foi consolidada como um problema global (Lahn, 2020). A UNFCCC e o IPCC são órgãos científicos e políticos de autoridade global aos quais a questão climática é delegada. O objetivo da UNFCCC é alcançar uma estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível que evite interferências antrópicas perigosas no sistema climático, em um período de tempo que permita a adaptação natural dos ecossistemas e possibilite o desenvolvimento sustentável (Oppenheimer & Petsonk, 2005; Boykoff et al., 2009; UNCC, 2023).

O IPCC foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM ou WMO, em inglês) e pelo programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (em inglês, *United Nations Environment Programme*), em 1988. Responsável pelo avanço do conhecimento sobre as mudanças climáticas, o IPCC fornece volumosos relatórios de avaliação de alto nível da compreensão do estado atual do clima, incluindo como isso está mudando e o papel da influência humana, o estado de conhecimento sobre os possíveis futuros climáticos e informações climáticas relevantes para regiões e setores (Hulme & Mahony, 2010; Lahn, 2020; IPCC, 2021).

Em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6), o IPCC afirmou que as emissões de gases de efeito estufa das atividades humanas são responsáveis por aproximadamente 1,1 °C de aquecimento desde 1850–1900 e concluiu que, em média, nos próximos 20 anos, a temperatura global deve atingir ou ultrapassar 1,5 °C de aquecimento. A 2 °C de aquecimento global, os extremos de calor atingiriam mais frequentemente os limites de tolerância críticos para a agricultura e saúde (IPCC, 2021).

Projeta-se que as mudanças climáticas aumentarão em todas as regiões e haverá ondas de calor crescentes, estações quentes mais longas e estações frias mais curtas. Para as cidades, os aspectos das mudanças climáticas serão amplificados, como o calor intenso, enchentes devido a eventos de forte precipitação e aumento do nível do mar nas cidades costeiras. Reduções fortes e sustentadas nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa limitariam as mudanças climáticas. Embora os benefícios para a qualidade do ar venham a surgir rapidamente, podem levar de 20 a 30 anos para que as temperaturas globais se estabilizem (IPCC, 2021).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC é baseado em conjuntos de dados observacionais aprimorados para avaliar o aquecimento histórico, bem como o progresso na compreensão científica da resposta do sistema climático às emissões de gases de efeito estufa causadas pelo homem. Pela primeira vez, o IPCC fornece uma avaliação regional mais detalhada das mudanças climáticas, incluindo um foco em informações relevantes das regiões. Bem como o AR6, a presente tese de doutorado busca analisar regionalmente as mudanças climáticas de forma anual e intra-anual. Estudos regionais e locais informam a avaliação de risco, adaptação e outras tomadas de decisões precisas e direcionadas para regiões de interesse.

Compreender o papel das mudanças climáticas na intensificação de eventos climáticos e meteorológicos específicos, como ondas de calor extremas e chuvas intensas, é um dos focos do AR6. Como também essa tese de doutorado, que pretende avaliar as tendências climáticas de precipitação e temperatura na região do Matopiba, analisando as tendências agrícolas da cultura de soja mediante os cenários observados de mudanças climáticas de forma regional e local.

A Conferência das Partes (COP) é uma reunião da UNFCCC, realizada anualmente por representantes de vários países com a finalidade de debater as mudanças climáticas, buscar soluções para os problemas ambientais que afetam o planeta e realizar acordos. A 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP26) foi realizada em novembro de 2021, na Escócia, com intensas negociações entre quase 200 países ao longo de duas semanas. O principal resultado do evento foi o Pacto Climático de Glasgow, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C de aquecimento. Tal objetivo só será alcançado se houver a substituição gradual do uso de energia a carvão, interromper e reverter o desmatamento, agilizar a mudança para veículos elétricos e declinar as emissões de metano (COP26, 2021).

O Pacto Climático de Glasgow também tem por objetivo realizar a mitigação das mudanças climáticas pela redução das emissões de gases de efeito estufa, o financiamento e viabilização das metas climáticas de cada país, a cooperação pela união de esforços para alcançar objetivos maiores e a adaptação com assistência aos já impactados pelas mudanças climáticas (COP26, 2021). É imprescindível um esforço global, conjunto e imediato para que se cumpram todos os compromissos firmados na conferência e no Pacto Climático de Glasgow.

A 27ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP27) foi realizada em novembro de 2022, no Egito. O resultado principal do evento foi a criação

do Fundo de Perdas e Danos. Esse fundo possui como objetivo ajudar financeiramente países vulneráveis a se recuperarem dos efeitos causados por desastres climáticos (COP27, 2022). A COP27 resultou em países que reafirmaram seu compromisso de limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C, fortaleceu a ação dos países para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e se adaptar aos impactos inevitáveis decorrentes das mudanças climáticas, além de aumentar o apoio financeiro, tecnológico e de capacitação necessário aos países em desenvolvimento.

A 28ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP28) foi realizada em novembro de 2023, em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, e foi considerada a maior do gênero. O evento marcou a conclusão do primeiro “balanço global” dos esforços mundiais para enfrentar as mudanças climáticas no âmbito do Acordo de Paris, concluindo que o avanço foi lento em todas as áreas da ação climática (COP 28, 2023). Os países responderam com a decisão de acelerar as ações em todas as áreas até 2030, principalmente na transição dos combustíveis fósseis às energias renováveis, como a energia eólica e solar, até a próxima conferência de compromissos climáticos.

Para que lacunas de conhecimento sobre adaptação climática sejam preenchidas, foi criado o Programa Mundial de Ciência da Adaptação (WASP, na sigla em inglês). Este conecta pesquisadores, formuladores de políticas e profissionais para criar e compartilhar conhecimento que pode moldar as políticas e ações de adaptação. A WASP busca garantir que as lacunas de conhecimento sobre adaptação climática sejam preenchidas para informar políticas, soluções e ações baseadas em evidências para uma adaptação às novas condições climáticas (WASP, 2022). Esta tese de doutorado também busca preencher lacunas de conhecimento sobre a adaptação agrícola às mudanças climáticas em uma região de elevada importância brasileira e global.

As mudanças climáticas estão afetando os padrões de precipitação. Em altas latitudes, é provável que a precipitação aumente, enquanto se prevê que diminua em grandes partes das regiões subtropicais. Esperam-se mudanças na precipitação das monções, que variam de acordo com a região (Marengo, 2019; IPCC, 2021). No Brasil, a precipitação anual total aumentaria sobre a Amazônia Ocidental e Sul do Brasil (Marengo et al., 2012) e diminuiria sobre a Amazônia Oriental e Nordeste (Marengo et al., 2009; 2012), Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Bombardi & Carvalho, 2009). A Amazônia experimentou secas em 2005, 2010 e 2016, e enchentes em 2009, 2012 e 2014 (Marengo & Souza, 2018). O Nordeste apresenta o pior ciclo de chuvas da história

entre 2012 e 2017, desde que as medições se iniciaram, no final do século 19 (Marengo, 2019).

As projeções das mudanças climáticas para o século XXI sugerem um aumento da temperatura média, em maior intensidade na parte central do Brasil (Chou et al., 2016), incluindo aumento no número de dias com temperatura acima de 34 °C (Assad et al., 2016). Além de dias mais quentes, o número de dias secos consecutivos também aumentaria (Marengo et al., 2009; 2010; 2012; Marengo, 2019). Em janeiro de 2019, algumas capitais do Centro-Sul do Brasil registraram temperaturas até 9 °C mais altas que a média histórica para o mês (Marengo, 2019).

Salvador & Brito (2018) analisaram as mudanças no clima da região do Matopiba por meio dos dados de 11 estações meteorológicas, no período de 1970–2012. A partir de dados diários de temperaturas máximas e mínimas, os autores derivaram em séries de temperatura máxima anual e temperatura mínima anual. A maioria dos índices aplicados apresentou forte tendência de aumento da temperatura do ar na região do Matopiba. Assim como o trabalho de Salvador e Brito (2018), a presente tese de doutorado tem como um de seus objetivos a análise das mudanças climáticas na região do Matopiba mediante fatores climáticos de temperatura e precipitação de forma anual, e inovadoramente de forma intra-anual. O conhecimento das mudanças climáticas durante os meses de crescimento da cultura é essencial para o planejamento anual agrícola.

No Brasil, os impactos negativos das mudanças climáticas na agricultura podem levar a perdas econômicas substanciais, uma vez que o agronegócio é responsável por grande parte do seu Produto Interno Bruto (PIB) de 24,1% (CEPEA, 2023). As estimativas mostram que podem incorrer em perdas de produtividade agrícola entre 19% e 40%, a médio e longo prazo, respectivamente (Assunção & Chein, 2016). Estima-se que os eventos extremos e a variabilidade do clima no Brasil expliquem as flutuações anuais de cerca de 0,8 toneladas de milho por hectare e sejam responsáveis por 25% a 38% e 26% a 34% da variabilidade da produção de arroz e soja, respectivamente (Assad et al., 2019). Os impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira podem causar perdas de produtividade (milho, soja, trigo e arroz) de até 25% até 2050, o que levaria a uma redução nas exportações e no consumo interno (Nelson et al., 2014). O estudo de Cunha et al. (2015) indicou que a agricultura de sequeiro brasileira pode sofrer perdas econômicas de até 14% em meados do século XXI.

Os resultados de Pires et al. (2016) sugerem perdas de rendimento na produção de soja nas regiões centro-norte do Brasil até 2050. Além disso, as áreas com dupla safra, um dos maiores fatores de sucesso da agricultura brasileira, podem ser drasticamente reduzidas até 2050 (Abrahão & Costa, 2018; Costa et al., 2019). Todos esses efeitos negativos podem causar graves consequências em nível global, regional e local, principalmente nas regiões mais pobres do país e para os pequenos agricultores. Existem vários estudos na literatura que mostram efeitos negativos na agricultura brasileira em decorrência das mudanças climáticas. Na Tabela 1 estão descritos os principais impactos ambientais negativos das mudanças climáticas na agropecuária.

Tabela 1. Descrição dos impactos negativos das mudanças climáticas na agropecuária.

Ambiente	Fator	Impacto Ambiental
Clima Local	Aumento	<ul style="list-style-type: none"> • Incêndios; • Temperatura Máxima; • Temperatura Média; • Temperatura Mínima; • Ventos Fortes à Superfície; • Precipitação (Sul).
	Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitação (SE e NE); • Umidade do Ar Máximo; • Umidade do Ar Mínimo.
Eventos Extremos	Aumento	<ul style="list-style-type: none"> • Chuvas Intensas; • Desastres Naturais; • Dias Secos Consecutivos; • Ondas de Calor; • Secas.
	Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Ondas de frio.
Fatores Biológicos	Aumento/Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Doenças de Plantas.
	Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Ambiência Animal; • Conservação da Biodiversidade; • Polinizadores.
Fatores	Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Ganhos Socioeconômicos;

Socioeconômicos		<ul style="list-style-type: none"> • Produtividade.
Solos	Aumento	<ul style="list-style-type: none"> • Erosão; • Disponibilidade de Água (Sul).
	Redução	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de Água (SE e NE); • Fertilidade; • Qualidade da Água.

Fonte: Adaptado de Assad et al. (2019). Org.: Próprio autor.

Reis et al. (2020a) analisaram a influência do *El Niño* – Oscilação Sul (ENSO) e da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical (também conhecido como Modo Meridional Atlântico) na variabilidade espacial e temporal da produtividade da cultura de soja no Matopiba, sob a ótica de condições climáticas favoráveis e desfavoráveis à ocorrência de chuvas. Os resultados demonstraram que, em um cenário úmido favorável, houve maior probabilidade de aumento da produtividade da soja, enquanto, no cenário seco desfavorável, esses valores foram menores. Os resultados mostraram que os diferentes cenários climáticos podem alterar os padrões espaciais de risco agrícola. Assim como no trabalho de Reis et al. (2020a), a presente tese de doutorado pretende avaliar a relação de mecanismos oceânico-atmosférico de grande escala na região do Matopiba. Porém, pretende-se avaliar mecanismos complementares e diferentes dos utilizados no trabalho descrito, sendo estes o índice *El Niño* multivariado (MEI), o índice de oscilação decadal do Pacífico (PDO) e o índice de oscilação multidecadal do Atlântico (AMO).

Vale et al. (2020) analisaram a relação entre a produtividade das principais culturas de subsistência (milho, feijão e mandioca) e o comportamento dos índices de eventos extremos de chuva para o estado do Rio Grande do Norte, no período de 1980 a 2013. Os autores concluíram que as maiores produtividades foram fortemente associadas com anos mais úmidos. Os índices climáticos foram influenciados por sistemas atmosféricos caracterizados por diferentes padrões extremos, o que permitiu a identificação de áreas com melhor ou pior aptidão agrícola em relação a essas culturas.

Vale et al. (2020) sugeriram ainda novas pesquisas científicas com o objetivo de explicar e compreender a dinâmica regional dos sistemas atmosféricos e como se relacionam com as principais culturas locais. Esta tese de doutorado pretende complementar o estudo realizado por Vale et al. (2020), ao analisar a produtividade da

cultura de soja na região do Matopiba mediante eventos extremos. Esses dados de elevada importância para o desenvolvimento de políticas de incentivo que possam garantir o sucesso da agricultura de subsistência.

Brumatti et al. (2020) modelaram os efeitos de uma estação chuvosa mais curta e um clima mais quente na produtividade de dupla safra soja-milho e avaliaram como a adaptação de cultivares de ciclo mais curto impactam a viabilidade desse sistema até meados do século, no estado de Mato Grosso e no Matopiba. Os resultados deste estudo sugerem que a adaptação através da adoção de cultivares de ciclo mais curto e um atraso nas datas de semeadura podem não ser suficiente para manter um sistema de dupla safra altamente produtivo até 2050 nas regiões analisadas. Atrasar as datas de semeadura da soja devido ao início da estação chuvosa compensa as perdas na produção da cultura, mas diminui a produção do milho.

Brumatti et al. (2020) sugeriram mais investigações para avaliar o impacto dos efeitos previstos em sistemas de dupla safra em outras cadeias produtivas que dependem tanto da soja e, mais criticamente, do milho. Esta tese de doutorado busca, por meio da análise das tendências climáticas e agrícolas, avaliar o efeito das mudanças climáticas na produção e produtividade da cultura de soja no Matopiba.

As mudanças climáticas estão associadas a fatores de grande escala, como o aquecimento global, e a fatores locais, como ações antrópicas (Salvador & Brito, 2018). A agricultura também contribui para as mudanças climáticas, uma vez que as emissões diretas do setor e o desmatamento envolvido na conversão em terras agrícolas auxiliam nas emissões antrópicas de gases de efeito estufa. A evidência é clara que o dióxido de carbono (CO₂) é o principal impulsionador das mudanças no clima, mesmo que outros gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos também o afetem (IPCC, 2021). No Brasil, as emissões relacionadas às mudanças no uso da terra e na agricultura representam aproximadamente 73% do total de gases emitidos em 2016 (SEEG, 2021a).

A agricultura e pecuária correspondem a ocupação de 28% a 32% do território nacional (Coalizão, 2019; Assad et al., 2019). Entre 1985 e 2019, o mapeamento anual de uso e cobertura da terra avaliou que o bioma Cerrado perdeu 28,6 milhões de hectares de sua vegetação nativa, e no mesmo período, 25,5 milhões de hectares foram convertidos em terras agrícolas e de pastagem. Na mesma série temporal, as áreas agrícolas aumentaram 225% em todo o bioma, deixando apenas 53% de sua vegetação original (MapBiomias, 2021a). Portanto, um planejamento de adaptação adequado exige a adoção de práticas agrícolas que contribuam para uma produção mais limpa. Os

agricultores podem, assim, gerar sinergias entre práticas adaptativas e medidas de mitigação de emissões (Smith et al., 2013; Campbell et al., 2016).

2.3 A expansão da cultura de soja

Nativa da Ásia, a cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma oleaginosa rica em proteínas, fibras, vitaminas e minerais, considerada um alimento funcional (Zakir & Freitas, 2015). Foi cultivada na China a 4.000 a 5.000 anos atrás (Ma, 1984), inicialmente localizada na costa leste da Ásia, ao longo do rio Yangtze, na China (Araújo, 2018). Segundo relatos históricos, a cultura de soja era considerada selvagem e crescia de maneira rasteira às margens dos lagos e rios chineses. Posteriormente, após o melhoramento da cultura realizado pelos cientistas da China antiga, foram desenvolvidas espécies adequadas para o consumo humano (Qiu & Chang, 2010).

O cultivo da soja se espalhou para outros países asiáticos há cerca de 2.500 anos, como Coreia e Japão (Hymowitz, 1970; Wu et al., 2004), porém, sua produção em elevadas quantidades ficou restrita à China e Japão. Apenas em 1739 foi introduzida na Europa, exclusivamente com a finalidade de ornamentação dos jardins botânicos da Inglaterra e Alemanha (Castro, 1981). De forma lenta no continente europeu, as pesquisas envolvendo a produção de óleo e nutrição animal para consumo da soja iniciaram-se há cerca de 300 anos após a inserção da espécie no continente (Câmara, 1998a). Durante as pesquisas científicas, a Rússia não obteve resultados positivos para a produção de soja, principalmente por conta dos fatores climáticos (Pallieux, 1880).

Em 1765, foi introduzida nos Estados Unidos (EUA) como planta forrageira, e no início do século XX conseguiu atingir a produção comercial. Em 1921, foi criada a fundação American Soybean Association nos EUA, representando o marco comercial mundial para consolidação da cadeia produtiva da cultura de soja (Assis, 2020). Com o desenvolvimento de novas variedades de espécies tolerantes às condições climáticas do país, foi possível a colheita de cultivares de maior qualidade e a expansão da soja para o México em 1858 e posteriormente para o Brasil em 1882 e Argentina em 1956 (Bonetti, 1981). A partir de então, iniciou sua rápida expansão de produção para outras regiões do mundo, com o desenvolvimento das primeiras variedades comerciais de soja adaptadas (Federizzi, 2005; Dall'Agnol et al., 2007).

Em 1882, a soja chegou no Brasil e foi inicialmente introduzida na Bahia, em 1891, em São Paulo e, em 1914, no Rio Grande do Sul (Silva, 2018). Devido ao clima

temperado e favorável para a cultura, a soja adaptou-se facilmente na região Sul do Brasil e, no final da década de 1960, tornou-se uma opção de rotação com o trigo e começou a crescer comercialmente (Brown et al., 2005; Mundstock & Thomas, 2005). Devido ao clima temperado, em 1960, a soja era cultivada principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (Sano et al., 2019).

Em 1970, após investimentos do governo brasileiro em programas de pesquisa e políticas públicas no país (Guimarães & Leme, 1997), novas variedades foram adaptadas às condições climáticas e de acidez dos solos de outras regiões do Brasil (Araújo, 2018; Assis, 2020). Os solos de baixa fertilidade natural foram corrigidos, tornando-os com grande potencial agrícola (Delgado, 1985). Assim, foi possível a expansão da soja nos estados que compõem o bioma Cerrado e em alguns estados do bioma Amazônia (norte do Mato Grosso, Pará e Rondônia) (Assis, 2020).

O desenvolvimento de toda cadeia produtiva da soja estruturou-se com investimentos públicos e privados em estruturas de armazenagem, unidades de processamento do grão e modais para transporte e exportação da soja. No Brasil, a soja tornou-se a cultura representante da agricultura nacional, posicionando o país como o primeiro em volume de exportações e o primeiro maior produtor mundial (Aragão & Contini, 2021). Características como a grande extensão territorial, clima adequado para o cultivo, vários tipos de solos e disponibilidade de água foram favoráveis a produção agrícola da cultura de soja (Araújo, 2018). No período de aproximadamente quatro décadas, a produção de soja brasileira cresceu 774%. O setor agrícola contribuiu com 21,4% para o PIB e 43% das exportações do país em 2019 (CNA, 2020).

De 2010 a 2018, a produção brasileira de soja e milho aumentou 61% (IBGE, 2021a). A produção de soja na safra 2020/2021 teve uma produção recorde estimada em 135,5 milhões de toneladas, em cerca de 38,47 milhões de hectares, um aumento de 8,9% em relação à safra 2019/2020 (CONAB, 2021). Estima-se que a safra de 2024/2025 seja em torno de 126,2 milhões de toneladas de grãos de soja (BRASIL, 2015; Seixas et al., 2020). Atualmente, a cultura de soja é a *commodity* agrícola mais comercializada internacionalmente (Escobar et al., 2020), usada principalmente como ração animal, integrando as cadeias produtivas de animais como bovinos, suínos, aves e na piscicultura (Comtrade, 2021).

Projeta-se que a produção agrícola da cultura de soja brasileira aumente neste século para atender parte da crescente demanda global por alimentos. Também cresce o consumo da soja orgânica na sociedade em consequência do aumento da demanda por

uma alimentação saudável e pelas políticas ambientais que buscam práticas agrícolas sustentáveis. Devido à preocupação internacional com as mudanças climáticas, o agronegócio brasileiro tem recebido uma série de questionamentos internacionais quanto aos presumíveis impactos ambientais decorrentes da cadeia da soja, especialmente quanto às emissões de gases de efeito estufa.

Em 2021, para estímulo à adoção de práticas e tecnologias que confirmam a redução das emissões de gases de efeito estufa e avaliem métricas que atestem a sustentabilidade da soja brasileira, o governo propôs um novo conceito de soja sustentável chamado Soja Baixo Carbono (SBC) (Nepomuceno et al., 2021). O programa foi pensado pela Embrapa Soja e a Embrapa Gado de Corte e está em processo de avaliação. A concessão do selo SBC será estruturada por meio de um processo de certificação esquematizada sob um sistema de controle com indicação de maior eficiência e sustentabilidade ambiental. A mitigação das emissões de gases de efeito estufa na SBC será norteada por princípios, critérios e diretrizes rigorosos, com base em conhecimentos científicos comprovados. Para garantir a confiabilidade e a efetividade das medidas adotadas, serão seguidas as regras, normas e metodologias preconizadas e aceitas pela comunidade científica internacional (Nepomuceno et al., 2023).

No cenário atual, a área com maior potencial de expansão de terras agricultáveis no Brasil é o acrônimo Matopiba (Polizel et al., 2021). O Matopiba, integração dos municípios produtores nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Miranda et al., 2014a), é a nova fronteira agrícola do Brasil, considerada a grande fronteira para o investimento do agronegócio (Anderson et al., 2016). Apresenta elevado crescimento e potencial na produção de grãos, com destaque para o cultivo de soja. No Matopiba, a cultura de soja tem ocupado grandes áreas e transformado a paisagem da região. É uma das maiores fronteiras agrícolas em expansão no mundo, considerado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como ponto estratégico para o desenvolvimento econômico de todo o país.

2.4 Cultura de soja

A soja pertence à ordem *Fabales*, família *Fabaceae* (*Leguminosae*), subfamília *Faboideae* (*Papilionoideae*), gênero *Glycine* e espécie *Glycine max*. A leguminosa é um vegetal herbáceo, com caule hispido, ereto, revestido de pelo, com em média de 0,5 a

1,5 m de altura, pouco ramificado e com raízes do tipo pivotante (um eixo vertical principal) (Alvarez Filho, 1988), de onde partem as raízes secundárias que se ramificam, constituindo um sistema radicular axial (Silva, 2018). Integram uma associação simbiótica com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, que são capazes de fixar nitrogênio atmosférico, fornecendo-o à planta (Sediyama, 2016).

As folhas são do tipo cotiledonares, unifolioladas ou trifolioladas, sendo as cotiledonares as primeiras a emergir por ocasião da germinação; as unifoliadas possuem duas folhas de lâminas simples e surgem após as cotiledonares; e as trifolioladas possuem duas estípulas em sua base e estípelas na base dos folíolos, tem pecíolos grandes, medindo de 7 a 15 cm de comprimento (Araújo, 2018; Silva, 2018). A soja possui folhas classificadas como desenvolvidas quando os bordos dos folíolos da folha do nó não tocam o mesmo, estando ligeiramente superiores (Alvarez Filho, 1988).

A cultura de soja tem flores de fecundação autógama, do tipo hermafrodita, de cor branca, roxa ou intermediária bicolor (Alvarez Filho, 1988). Nascem nas axilas das folhas ou no ápice das ramificações do caule. Seu fruto é denominado vagem (legume) e, à medida que amadurecem, mudam da cor verde para marrom-claro, podendo conter de uma a cinco sementes lisas por pedúnculo, são elípticas ou globosas, de coloração verde, preta, amarela, castanha ou bicolor (Alvarez Filho, 1988). O reconhecimento do desenvolvimento dos estádios da soja ocorre por meio da contagem dos nós do caule (Monteiro, 2011). Estes são estruturas protuberantes, desassociadas e dispostas ao longo do caule da leguminosa que dão origem às folhas e às flores (Araújo, 2018).

Possui um ciclo anual que varia entre 75 a 210 dias. O ciclo da cultura é de 90 a 150 dias para as variedades geneticamente modificadas e adaptadas às condições ambientais do Brasil (Sediyama, 2009). Contém variações de acordo com as condições da região, da época de semeadura, da altitude, da latitude e da fertilidade do solo. Apresenta dias curtos e é influenciada por fotoperíodos decrescentes. Além disso, possui quatro fases de crescimento, o estágio inicial, que começa no plantio e chega até atingir ~ 10% de cobertura do solo; o estágio de desenvolvimento, que vai até o início da floração; o estágio médio, que vai até o início da maturação (enchimento dos grãos); e o estágio final, que vai até a colheita (Allen et al., 1998; Araújo, 2018).

As fases de crescimento da soja são classificadas em estádios vegetativos (VE, VC, V1, V2... Vn) (Tabela 2) e estádios reprodutivos (R1, R2, R3..., R8) (Tabela 3) (Fehr & Caviness, 1977). O ponto de maturação fisiológica é caracterizado pelo estágio reprodutivo R7. Os estádios vegetativos (V) caracterizam o desenvolvimento vegetativo

da soja, sendo o VE (emergência) e acontece quando os cotilédones estão acima da superfície do solo em um ângulo $\geq 90^\circ$ em relação ao hipocótilo. O estágio VC ocorre quando os cotilédones se encontram completamente abertos e expandidos, ou seja, quando as bordas das folhas unifolioladas não mais se tocam (Seixas et al., 2020).

Tabela 2. Descrição dos estádios vegetativos da soja.

Estádio	Denominação	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
VC	Cotilédone	Cotilédones completamente abertos
V1	Primeiro Nó	Folhas unifolioladas e completamente desenvolvidas
V2	Segundo Nó	Primeira folha trifoliolada e completamente desenvolvida
V3	Terceiro Nó	Segunda folha trifoliolada e completamente desenvolvida
V...
Vn	Enésimo Nó	Ante-enésima folha trifoliolada e completamente desenvolvida

Fonte: Fehr e Caviness (1977), adaptado de Araújo (2018). Org.: Próprio autor.

Tabela 3. Descrição dos estádios reprodutivos da soja.

Estádio	Denominação	Descrição
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste
R2	Florescimento pleno	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós da haste
R3	Início da formação da vagem	Vagem com 5 cm
R4	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2 cm
R5	Início do enchimento do grão	Grão com 3 mm
R6	Grão verde ou vagem cheia	Uma vagem contendo grãos verdes
R7	Início da maturação	Uma vagem normal na haste principal (coloração de madura)
R8	Maturação plena	95% das vagens com coloração de madura

Fonte: Fehr & Caviness (1977), adaptado de Araújo (2018). Org.: Próprio autor.

Para proporcionar elevada produtividade, a cultura de soja deve reunir algumas características essenciais: estatura da planta igual ou superior a 0,65 m; inserção dos primeiros legumes superior a 0,10 m da superfície do solo; resistência a doenças, insetos, pragas, nematoides, acamamento e deiscência (abertura prematura das vagens); boa qualidade fisiológica da semente; adaptação às condições locais de ambiente e sistema agrícola; alta capacidade de extração de fósforo; e tolerância a deficiências e excessos hídricos (Costa, 1996). Plantios precoces ou tardios, assim como, a menor duração do período vegetativo, relacionada a atrasos na semeadura, usualmente resultam em cultivares com porte inferior do que na época considerada ideal (Abel, 1968; Sedyama et al., 1972; Saccol, 1975; Tragnago & Bonetti, 1984; Marcos Filho, 1986; Bhering, 1989; Câmara, 1991).

A Embrapa lançou cerca de 50 variedades de soja para o Cerrado em suas diferentes regiões edafoclimáticas nos últimos 30 anos, com características como a precocidade, elevado potencial produtivo, rusticidade, resistência a nematoides de cisto e de galha, ou resistência a doenças e insetos (Fagan et al., 2020). A produtividade de uma cultura está diretamente relacionada na interação entre o manejo de sua produção, o genótipo da planta e fatores agroclimáticos.

2.5 Risco agroclimático para a cultura de soja

Dentre os fatores predominantes e intrínsecos à produção agrícola, o clima é o mais limitante as máximas produtividades. Os principais impactos das mudanças do clima na agricultura são: alterações nos ritmos de ganho de biomassa vegetal; modificação nos padrões fenológicos; diminuição da fertilidade vegetal; e aumento da susceptibilidade a doenças (Assad et al., 2019). As variáveis temperatura, fotoperíodo e disponibilidade hídrica possuem a maior influência sobre o comportamento e desenvolvimento da cultura de soja (Steduto et al., 2012).

As análises dos riscos sobre a fisiologia, crescimento e componentes dos rendimentos da soja torna-se uma questão extremamente relevante, visto que a agricultura é uma atividade altamente vulnerável as perdas e oscilações nos seus rendimentos finais (Assad et al., 2013). Nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6 estão descritos os principais efeitos do estresse por calor, por seca e por frio, respectivamente, na fisiologia, crescimento e componentes dos rendimentos da soja.

Tabela 4. Descrição dos efeitos do estresse por calor na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.

Principais distúrbios fisiológicos do estresse por calor	Redução dos processos no nível do dossel	Redução dos componentes do rendimento	Parâmetros de temperatura
Redução da atividade do fotossistema	<ul style="list-style-type: none"> • Fotossíntese; • Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> • N° e tamanho das sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Breve exposição a temperaturas maiores de 40 °C.
Desnaturação e desativação das enzimas	<ul style="list-style-type: none"> • Fotossíntese; • Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> • N° e tamanho de sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Breve exposição a temperaturas maiores de 40 °C.
Taxa de desenvolvimento acelerada	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de crescimento da cultura pelo encurtamento do período VE a R5. 	<ul style="list-style-type: none"> • N° de sementes. 	Em dias curtos a taxa de desenvolvimento aumenta com a temperatura.

Fonte: Board & Kahlon (2011). Org.: Próprio autor.

Tabela 5. Descrição dos efeitos do estresse por seca na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.

Principais distúrbios fisiológicos do estresse por seca	Redução dos processos no nível do dossel	Redução dos componentes do rendimento	Parâmetros de seca
Expansão celular reduzida	<ul style="list-style-type: none"> • Área foliar IAF; • Interceptação da luz; • Fotossíntese; • Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> • N° e tamanho das sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Decréscimo do potencial de água na folha a -80 MPa ou menos, reduz a pressão de turgor e a expansão celular.
Fixação de N reduzida	<ul style="list-style-type: none"> • Fotossíntese; • Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> • N° e tamanho de sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Decréscimo começa de -0,2 a -0,4 MPa

Taxa de Assimilação Líquida reduzida	<ul style="list-style-type: none"> Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> Nº e tamanho das sementes, dependendo da época do estresse; Nº de sementes (menor nº de nós); Tamanho de sementes devido à menor duração do enchimento de grãos. 	<ul style="list-style-type: none"> Os períodos mais críticos vão de R1 a R6; Irrigação recomendada quando o solo atingir 50% da CAD (Capacidade de Água Disponível); Sensibilidade à seca do período final de enchimento de grãos (R6-R7) é menos da metade daquela de R1 a R6.
--------------------------------------	---	--	---

Fonte: Board & Kahlon (2011). Org.: Próprio autor.

Tabela 6. Descrição dos efeitos do estresse por frio na fisiologia, crescimento e componentes do rendimento da soja.

Principais distúrbios fisiológicos do estresse por frio	Redução dos processos no nível do dossel	Redução dos componentes do rendimento	Parâmetros de temperatura
Taxas reduzidas de reações metabólicas	<ul style="list-style-type: none"> Fotossíntese; Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> Nº e tamanho das sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> T= 25 °C é ótima para a fotossíntese; T < de 15° C, sob condições naturais, diminuem os rendimentos.
Estresse de frio (mau funcionamento das membranas, inativação das enzimas, vazamento de íons)	<ul style="list-style-type: none"> Fotossíntese; Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> Nº e tamanho de sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> T= 10-12 °C, o rendimento é mais afetado pelo frio durante o enchimento dos grãos do que no florescimento/ formação das vagens.
Danos aos tecidos da planta por congelamento (morte das células)	<ul style="list-style-type: none"> Fotossíntese; Taxa de crescimento da cultura. 	<ul style="list-style-type: none"> Nº e tamanho das sementes, dependendo da época do estresse. 	<ul style="list-style-type: none"> T= 0-10° C, o rendimento é mais afetado pelo estresse de frio durante o florescimento/ formação das vagens do que no enchimento dos grãos.

Fonte: Board & Kahlon (2011). Org.: Próprio autor.

A temperatura é o fator principal para a planta alcançar o estado juvenil e interfere no rendimento de grãos, no porte da planta, na altura de inserção da primeira vagem e outras características da soja (Bergamaschi et al., 1977). A temperatura ideal

para o desenvolvimento da cultura de soja é de 30 °C, com condições ótimas entre 20 °C e 30 °C (Embrapa, 2013). O desenvolvimento é baixo ou nulo em temperaturas menores ou iguais a 10 °C, pois as temperaturas baixas podem provocar atrasos nas diferentes fases da cultura (Marcos Filho, 1986). Temperaturas acima de 40 °C causam perdas na floração e diminuem a aptidão de retenção das vagens, podendo provocar florescimento precoce, distúrbios na frutificação e acelerar a maturação dos grãos, ocasionando reduções na produção.

A baixa umidade eleva os indícios de problemas mecânicos durante a colheita, e a elevada umidade promove uma queda na qualidade da semente (Embrapa, 2013; Araújo, 2018). Em períodos chuvosos, com baixas temperaturas, ocorre um atraso na colheita de soja, com retenção foliar. A deficiência hídrica no período de floração e enchimento de grãos causa alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático, enrolamento das folhas e queda prematura de folhas, flores e vagens, acarretando perda no rendimento de grãos (Embrapa, 2013). A disponibilidade hídrica é essencial para alcançar o resultado esperado na produção de soja, pois a água participa de todos os processos metabólicos que vão estabelecer o crescimento e o desenvolvimento da cultura (Doorenbos & Kassam, 1994).

A radiação solar é fundamental para a fotossíntese e para os processos de alongamento da haste principal e das ramificações, expansão foliar e nodulação (Thomas, 1994; Câmara, 1998b). A época de semeadura da cultura depende do fotoperíodo, fator limitante para a sua produtividade. A soja floresce em dias curtos, com menos de 13 horas de duração, afetando de forma acentuada na arquitetura e no comportamento da planta. Por isso, para as condições brasileiras, o período mais recomendável para a semeadura dessa cultura se estende de outubro a dezembro (Nakagawa et al., 1983; Embrapa, 1996). A floração da soja é induzida em temperaturas do solo acima de 13 °C, com temperaturas do solo mais elevadas ocorre a floração precoce da soja, com diminuição na sua altura (Embrapa, 2013).

Portanto, o melhoramento genético realizado pela Embrapa, com sementes resistentes a seca, ao calor e ao frio (Lima et al., 2018), e as análises de riscos climáticos, como o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) produzido anualmente pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (MAPA, 2024), contribuem para o aumento da produtividade de soja na região do Matopiba. Estudos de mudanças climáticas são imprescindíveis para o planejamento

agrícola atual, elaboração de políticas públicas, diretrizes de exportação, mudanças nos modelos de produção e medidas de adaptação para cultivares de soja.

2.6 Uso e cobertura da terra

A mudança no uso e cobertura da terra é uma questão ambiental de suma importância, considerada um componente relevante no processo de mudança ambiental global. As interações entre a transformação da paisagem e as várias consequências da dinâmica de uso e cobertura da terra estão ameaçando a sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos em escalas local, regional, nacional e global. Incluem, por exemplo, mudanças no clima, a perda de fertilidade do solo, poluição ambiental, efeito de ilha de calor urbana, perda de habitats, desertificação, etc.

Para discutir a questão das mudanças do clima no contexto brasileiro, foi criado o Observatório do Clima. Trata-se de uma rede que reúne entidades da sociedade civil para articular os atores sociais para que o governo brasileiro manifeste comprometimento e crie políticas públicas concretas em buscar a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas (Observatório do Clima, 2021).

O Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) é uma iniciativa deste observatório e abrange a produção de estimativas anuais das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. São gerados documentos analíticos sobre a evolução das emissões, com métodos e dados disponibilizados gratuitamente na internet. A SEEG utiliza as diretrizes do IPCC, com base nos dados dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa, elaborado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e em dados obtidos junto a relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais (SEEG, 2021b).

O SEEG promoveu, em março de 2015, um seminário na cidade de São Paulo com a participação de especialistas em sensoriamento remoto e mapeamento de vegetação, com a finalidade de analisarem a possibilidade da produção de mapas anuais de uso e cobertura da terra para todo o Brasil. O objetivo era uma produção substancialmente mais ágil, econômica e atualizada, com a possibilidade de recuperação do histórico das últimas décadas (MapBiomass, 2021b).

Após o evento, foi firmado um termo de cooperação técnica com a *Google* para elaborar uma plataforma para o processamento dos inúmeros dados com alto grau de

automatização do processo, tendo como base a plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Especificamente em julho de 2015, o projeto teve início com um treinamento da equipe sobre o GEE na cidade de Mountain View, na Califórnia. Posteriormente, foi criado o Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, também conhecido como MapBiomias.

O MapBiomias reúne uma equipe de especialistas em usos da terra, biomas, sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas (SIG) e ciência da computação, com o objetivo principal de contribuir para o entendimento da dinâmica de uso e cobertura da terra no Brasil e em outros países tropicais. Opera com processamento em nuvem e classificadores automatizados, baseada no algoritmo de árvore de decisão *Random Forest*, para gerar uma série histórica de mapas anuais de uso e cobertura da terra com base no desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo. Os mapas estão sendo produzidos desde 1985 até os dias atuais (e posterior atualização anual).

O projeto é realizado em rede com instituições responsáveis por diferentes biomas e temas transversais para otimizar as soluções, e o processamento dos dados é distribuído e automatizado pelo GEE (MapBiomias, 2021b). Além dos mapas de uso e cobertura da terra (formato matricial de pixel de 30x30m), o MapBiomias possui, como produtos, uma plataforma web de consulta pública com imagens, mapas e estatísticas das coleções, como também, mosaicos de imagens de satélite para cada ano da série histórica, com a composição dos melhores pixels de cada conjunto de imagens de um local, em um determinado período, com alta qualidade, menos nuvens e ruídos, com resolução espacial máxima de 30 m. Cada mosaico contém até 105 camadas de informações incluindo as bandas espectrais, frações e índices espectrais como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação realçado (EVI).

Os produtos do MapBiomias estão em constante evolução, por isso são divididos em coleções. A Coleção 1 foi publicada em abril de 2016, para o período de 2008 a 2015. Os produtos foram iniciados com legenda simplificada, incluindo sete turmas. A Coleção 6, analisada nesta tese de doutorado, foi publicada em agosto de 2021 e inclui 25 classes e abrange o período de 1985 a 2020. A principal forma de avaliação da qualidade do mapeamento realizado pelo MapBiomias é a análise de acurácia. A acurácia geral do mapeamento da Coleção 6 foi de 90,8%; para o bioma Amazônia, foi de 97,0%; Cerrado com 83,0%; e Caatinga, de 81,1% (MapBiomias, 2021a). O MapBiomias foi originalmente desenvolvido para uma escala regional, mapeando todo o

território brasileiro em seus diversos biomas, por isso é importante ter cautela ao utilizá-lo em escala local.

O projeto MapBiomas contribui com a eliminação das barreiras do conhecimento ao possibilitar e facilitar o acesso de pesquisadores e estudantes de diferentes regiões aos dados em nuvem, além de disponibilizar a coleção de *scripts* de processamento e classificação das imagens, com possibilidade de multiplicação e adaptação das informações para outros contextos e localidades. Por meio desse projeto, foram realizadas abundantes publicações acadêmicas nos últimos anos, validando a relevância dos dados de uso e cobertura da terra gerados pelo MapBiomas em inúmeras aplicações, como as descritas abaixo.

Nunes et al. (2020) Utilizaram as séries temporais de dados anuais de uso e cobertura da terra do MapBiomas para gerar as primeiras estimativas de extensão, idade e absorção líquida de carbono da vegetação secundária na Amazônia brasileira, no período de 1985 a 2017.

Fernandes et al. (2021) Avaliaram os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra nos estoques de carbono na Bacia do Rio São Francisco, Brasil, em 1997, 2007 e 2017. A dinâmica de uso e cobertura da terra foi avaliada com dados do projeto MapBiomas.

Polizel et al. (2021) Investigaram o comportamento espaço-temporal da vegetação e de áreas agrícolas na região do Cerrado, Matopiba, no período de 1990 a 2017. As classes de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas foram usadas para explorar as terras agrícolas e as áreas de vegetação nativa do bioma Cerrado, além de caracterizar as classes dentro dos polígonos de desmatamento.

Alves et al. (2021) Avaliaram os efeitos dos desenhos espaciais em projetos de assentamento, desmatamento e fragmentação da paisagem na Amazônia Ocidental Brasileira, entre 1985 e 2015, em

- Rondônia. Os autores utilizaram os dados de uso e cobertura da terra do projeto Mapbiomas, técnicas de geoprocessamento e métricas de paisagem.
- Hernandes et al. (2021) Utilizaram as informações georreferenciadas sobre áreas de cana-de-açúcar e declive do solo combinadas com os mapas de classificação de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas para atualizar o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar original e identificar as áreas mais adequadas para a expansão da cana-de-açúcar no Brasil.
- Brito et al. (2021) Implementaram um modelo baseado em autômatos celulares para desenvolver cenários futuros de uso e cobertura da terra com foco em impulsionadores de atividades humanas. Utilizaram as séries de dados do projeto MapBiomas para a Bacia do Alto Curso do Rio Paraíba, estado da Paraíba.
- Mucida et al. (2023) Caracterizaram o potencial de uso da terra quanto ao uso agrossilvipastoril e conservação do solo. Cruzaram os dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas de 2019 com o mapa de potencial de uso para conservação. Estudo realizado no estado de Minas Gerais, Brasil.
- Martines et al. (2023) Analisaram o uso e cobertura da terra em três comunidades quilombolas com diferentes graus de sobreposição com unidades de conservação da Mata Atlântica brasileira. Utilizaram a plataforma MapBiomas para integrar os dados de uso e cobertura da terra das áreas de influência indireta.

O monitoramento do uso e cobertura da terra ao longo dos anos e sua relação com as mudanças climáticas fornecem informações valiosas (Santos et al., 2022). Dinâmicas espaço-temporais têm sido estudadas em diferentes regiões para avaliar as mudanças no clima e sua relação em processos humanos e naturais de uso e cobertura da terra (Silva et al., 2020a; Santos et al., 2022). Isso ajuda os cientistas a prever e

mitigar os impactos das mudanças climáticas em diversas atividades humanas, como na agricultura, permitindo que os agricultores se adaptem às condições climáticas e obtenham um maior rendimento em suas produções.

O termo Matopiba representa um acrônimo referente as iniciais e as siglas dos estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA). Os quatro estados brasileiros constituem, parcialmente, a delimitação geográfica considerada a última grande fronteira agrícola do Brasil, cultivada com as principais *commodities* agrícolas (Polizel et al., 2021; Lima & Kmoch, 2021). A expressão Matopiba também é conhecida como Mapitoba e Mapito, principalmente entre os estrangeiros. O Matopiba é constituído pelo sul do Piauí, metade do Maranhão, oeste da Bahia e a totalidade do Tocantins. A região do Matopiba está localizada entre o Norte e Nordeste brasileiro, entre as coordenadas 2° 30' e 15° 15' de latitude Sul e 50° 00' e 42° 00' de longitude Oeste, e integra uma área total de aproximadamente 73 milhões de hectares (Figura 1).

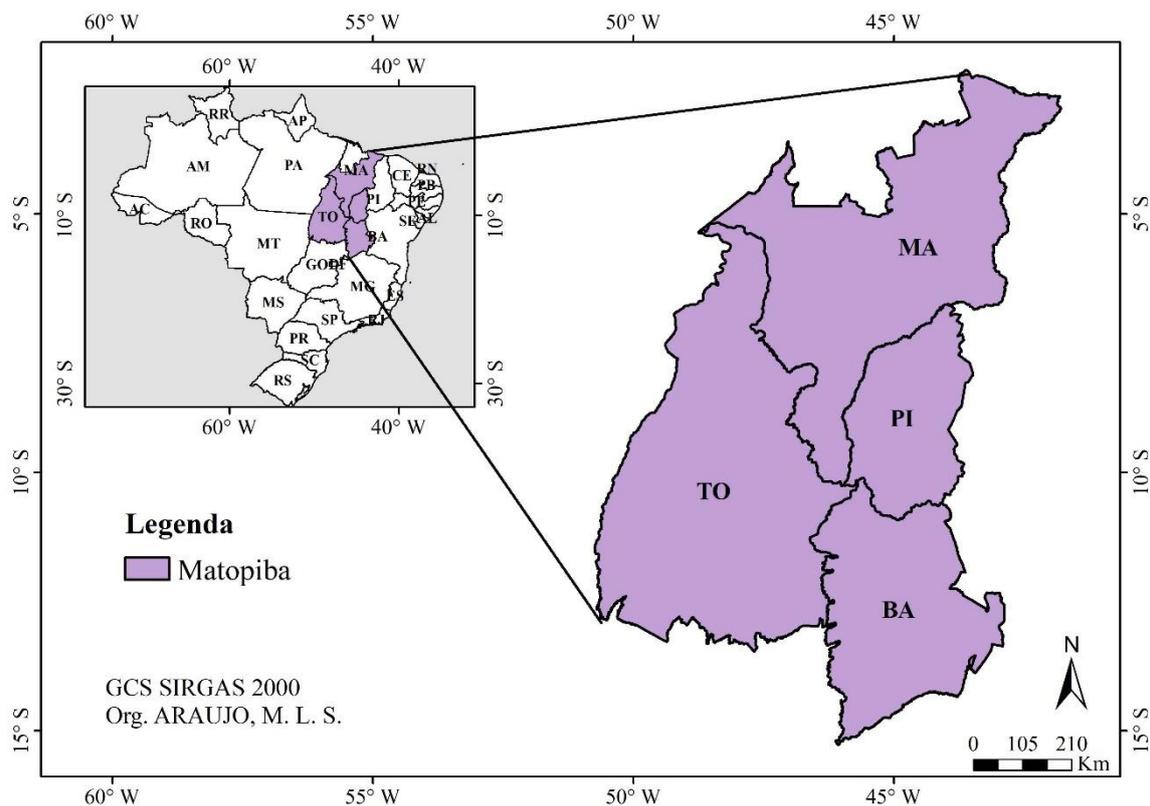


Figura 1. Localização e delimitação geográfica do Matopiba. Fonte: IBGE (2021b).
Org.: Próprio autor.

A delimitação geográfica oficial do Matopiba foi realizada pelo Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE), em Campinas/SP, no ano de 2013 (Araújo,

2018). O grupo GITE faz parte de uma cooperação técnica entre o Ministério do Desenvolvimento Agrário, através do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A base para a delimitação da região de estudo foram as áreas de cerrados existentes nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, a dimensão socioeconômica, principalmente os dados relativos à produção agropecuária e florestal. O Matopiba é constituído por um total de 337 municípios brasileiros, localizados em 10 mesorregiões e 31 microrregiões dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Figura 2).

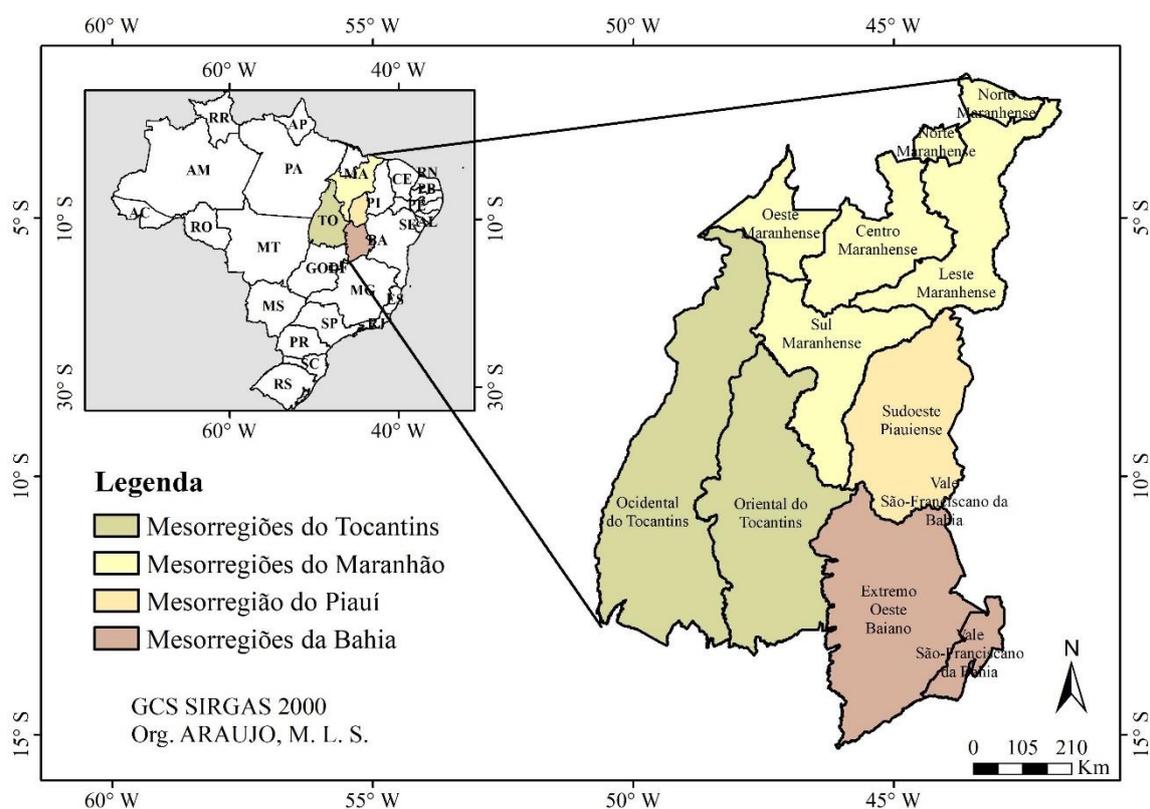


Figura 2. Delimitação territorial das mesorregiões pertencentes ao Matopiba. Fonte: IBGE (2021b). Org.: Próprio autor.

No Maranhão, integra cinco mesorregiões, 15 microrregiões, 135 municípios e aproximadamente 23 milhões de hectares. Em Tocantins, abrange duas mesorregiões, oito microrregiões, 139 municípios e cerca de 27 milhões de hectares. Na Bahia, constitui-se de duas mesorregiões, quatro microrregiões, 30 municípios e por volta de 13 milhões de hectares. No Piauí, integra uma mesorregião, quatro microrregiões, 33 municípios e cerca de oito milhões de hectares. A região do Matopiba totaliza-se em

aproximadamente 33% no Maranhão, 38% no Tocantins, 18% na Bahia e 11% no Piauí (Miranda et al., 2014b; Araújo, 2018; Pereira et al., 2018; Salvador & Brito, 2018).

Segundo a nova divisão regional do Brasil em Regiões Geográficas Intermediárias e Regiões Geográficas Imediatas, lançados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017, a região do Matopiba é constituída por um total de 12 Regiões Geográficas Intermediárias e 37 Regiões Geográficas Imediatas. A nova divisão regional do Brasil integra um novo aspecto vinculado aos processos sociais, políticos e econômicos sucedidos em território nacional desde a última versão da Divisão Regional do Brasil publicada na década de 1990 (IBGE, 2017). As Regiões Geográficas Intermediárias integram cinco no Maranhão, duas no Piauí, duas na Bahia e três no Tocantins (Figura 3). As Regiões Geográficas Intermediárias compreendem 17 no Maranhão, cinco no Piauí, quatro na Bahia e 11 no Tocantins.

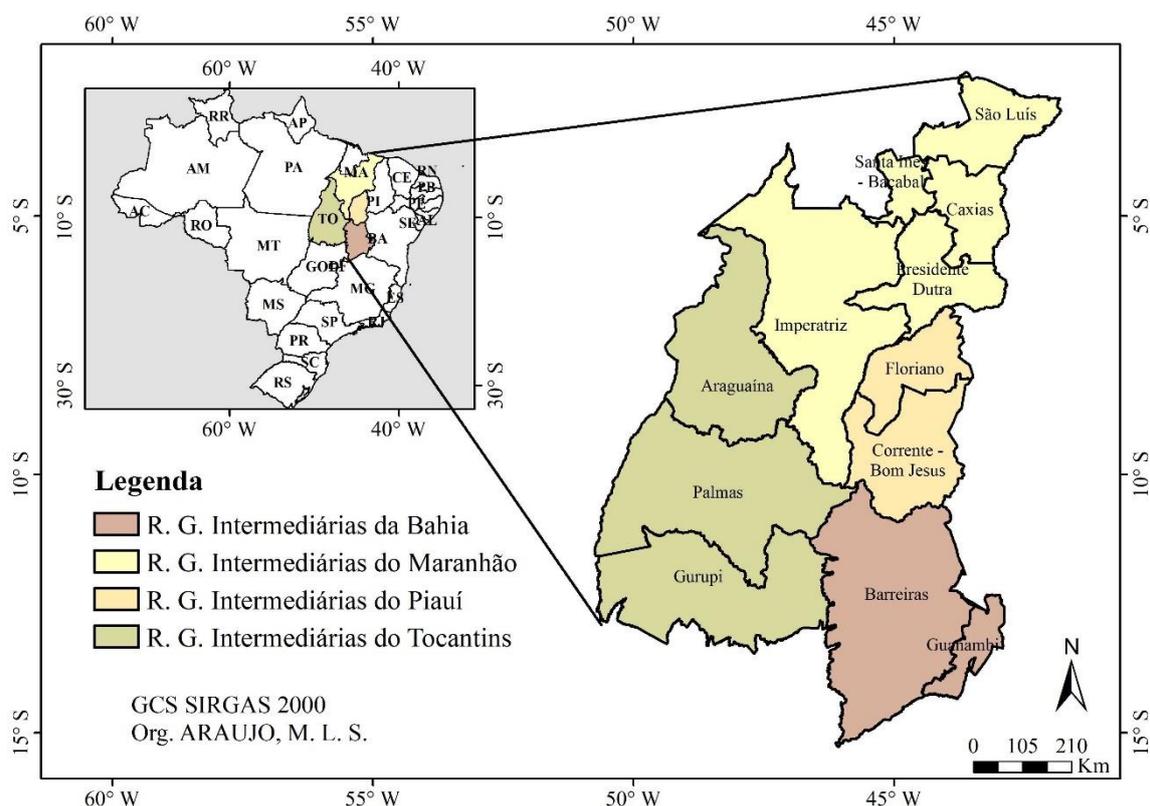


Figura 3. Delimitação territorial das Regiões Geográficas Intermediárias pertencentes ao Matopiba. Fonte: IBGE (2017). Org.: Próprio autor.

O Matopiba é formado por três biomas brasileiros, o Cerrado (91%), a Amazônia (7,3%) e a Caatinga (1,7%) (IBGE, 2021b) (Figura 4). O Cerrado é o maior bioma do Matopiba, com cerca de 66 milhões de hectares de área. Possui características

de elevada diversidade de ecossistemas, com fisionomias que incluem as formações florestais, savânicas e campestres. Em torno de 61% da área do Matopiba é de formações savânicas, 11% do território de formações florestais, localizadas principalmente na região nordeste, e 9% de formações pioneiras e vegetação secundária (Magalhães & Miranda, 2014). O bioma Amazônia agrega por volta de cinco milhões de hectares, localizados no limite noroeste do Matopiba. O bioma Caatinga integra cerca de um milhão de hectares e está localizado na região leste da área de estudo. Cerca de 62% da região do Matopiba constituem áreas de Amazônia Legal (Magalhães & Miranda, 2014). O Matopiba possui 46 unidades de conservação (8.334.679 ha), 35 terras indígenas (4.157.189 ha), 745 assentamentos de reforma agrária (2.782.754 ha) e 36 áreas quilombolas (250.330 ha), totalizando 19% da região (Miranda, 2015).

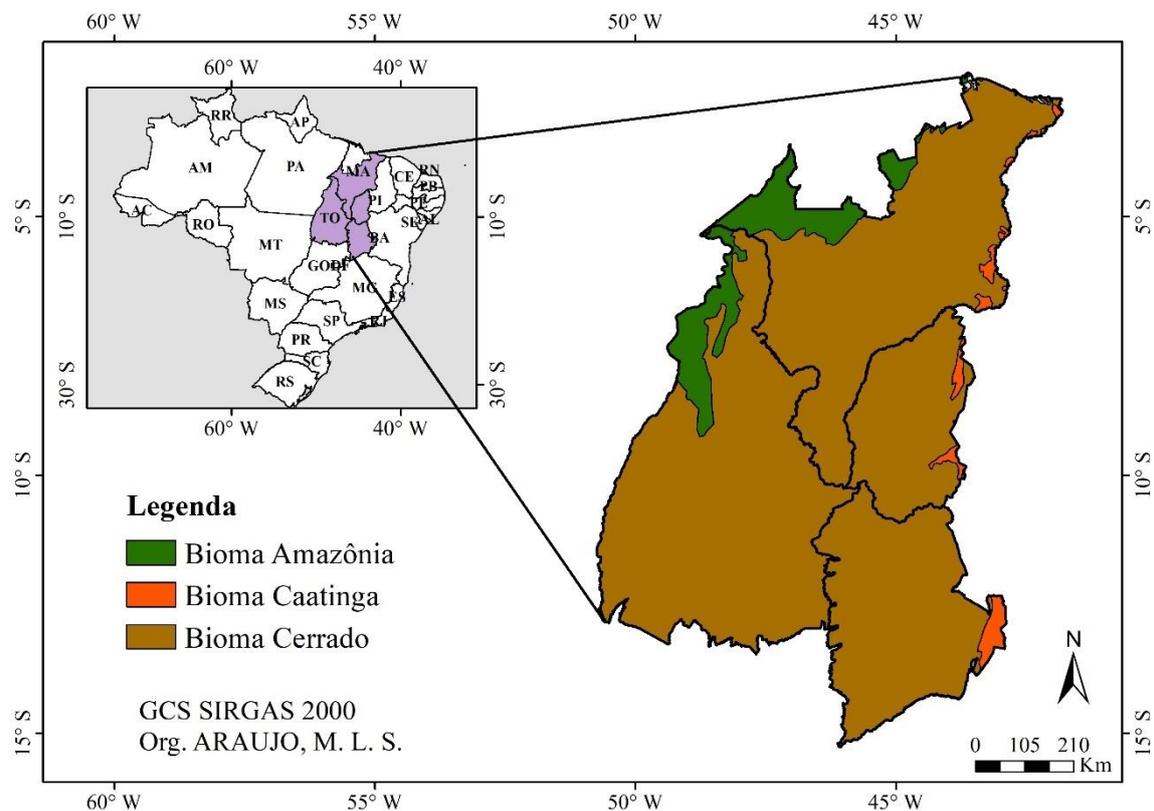


Figura 4. Biomas brasileiros da região do Matopiba. Fonte: IBGE (2021b). Org.: Próprio autor.

De acordo com a classificação de Köppen, a região do Matopiba apresenta o clima tropical úmido com inverno seco (Aw). A área de estudo possui três características climáticas: úmido, semiúmido e semiárido (Figura 5) (Araújo, 2018). A região central do Matopiba possui períodos de seca de até cinco meses e temperaturas

médias acima de 18 °C em todos os meses do ano. As temperaturas médias mensais variam entre 25 a 27 °C, e a precipitação média anual de 800 a 2.000 mm (Reis et al., 2020b). A estação seca ocorre de maio a setembro, e a estação chuvosa de outubro a abril (Alvares et al., 2014; Reis et al., 2020b). O regime de chuvas da região é determinado principalmente pelo posicionamento equatorial da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), pela formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e pela propagação de sistemas frontais (Oliveira et al. 2014, 2017; Reis et al., 2020c). A delimitação climática da área do Matopiba é definida pela zona climática equatorial (3%), tropical equatorial (44%) e tropical Brasil central (53%) (Magalhães & Miranda, 2014).

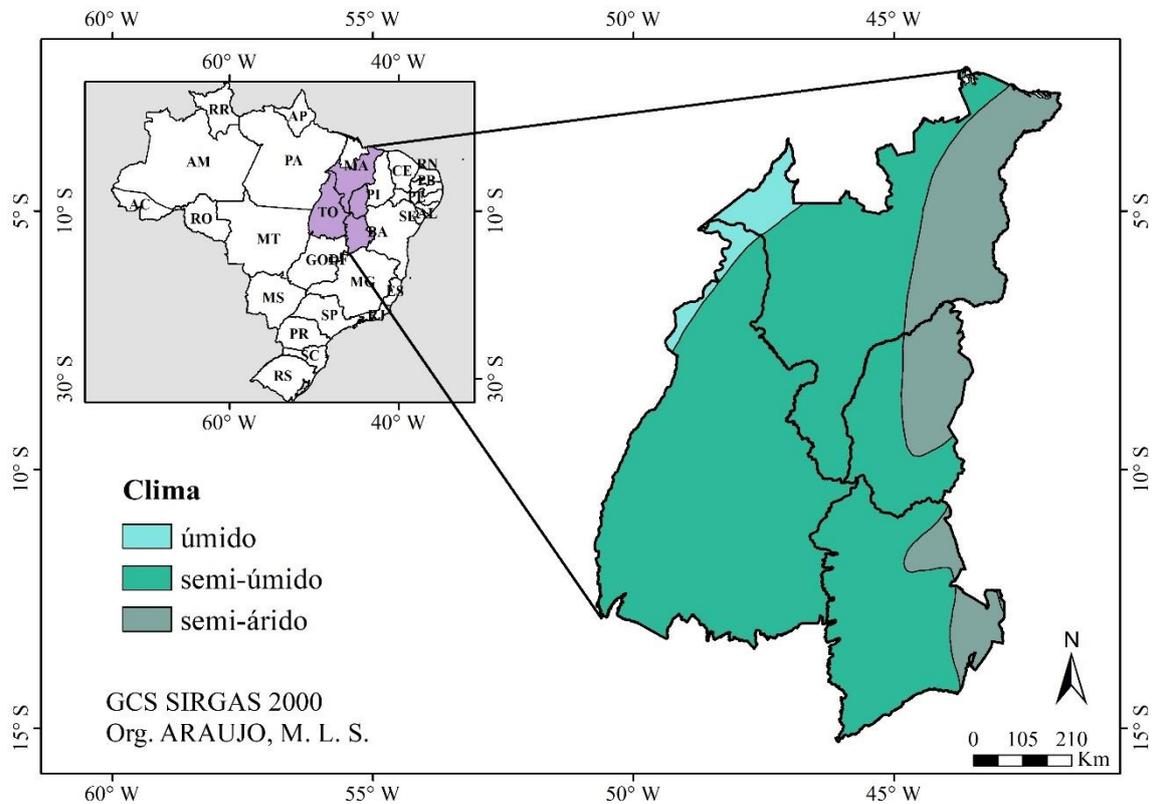


Figura 5. Características climáticas da região do Matopiba. Fonte: IBGE (2021b). Org.: Próprio autor.

O solo da região do Matopiba é constituído predominantemente pela classe Latossolo (38% da sua área) (Figura 6). Em domínio os Latossolos Amarelos, que são destaque na ocupação para o cultivo de soja (Reis et al., 2020b). Os Latossolos possuem características físicas favoráveis a atividade agrícola, isto é, são bem desenvolvidos e profundos e normalmente apresentam elevada porosidade, ótima permeabilidade e baixa

fertilidade (Araújo, 2018). Nota-se também a presença, em 25% do território do Matopiba, de Neossolos quartzarênicos e litólicos e, em cerca de 19% da região, os Plitossolos (Santos et al., 2018). Os Plitossolos possuem uma elevada acidez, por isso, possuem baixa fertilidade natural. Além das classes de solos citadas anteriormente, a região do Matopiba possui, em menor área territorial, os Argissolos, Gleissolos, Cambissolos, Nitossolos, Luvisolos, Chernossolos, Planossolos, Dunas e Vertissolos.

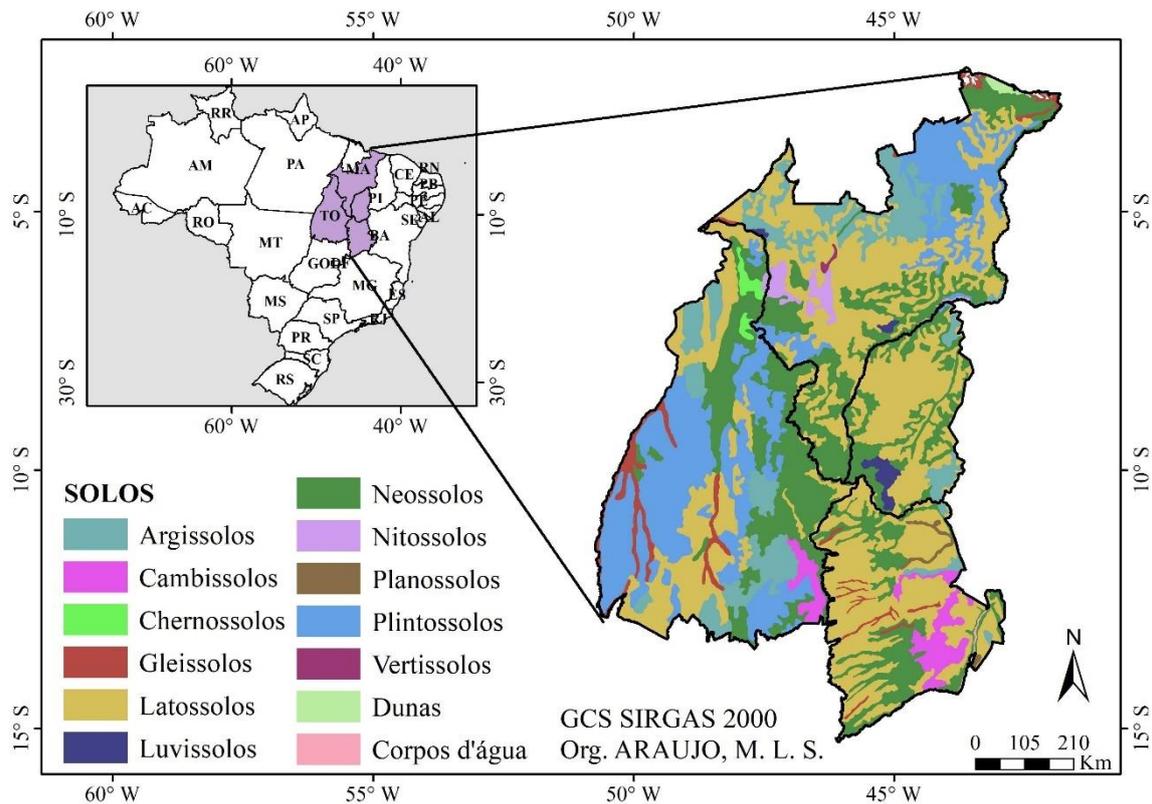


Figura 6. Solos da região do Matopiba. Fonte: Embrapa (2011). Org.: Próprio autor.

A declividade da região do Matopiba é, em destaque, plana, com variações de zero a 3% de declividade (Figura 7), ou seja, uma declividade favorável à mecanização das atividades agrícolas (Araújo, 2018). A altitude da região do Matopiba varia entre 0 a 1.258 metros acima do nível do mar (Figura 8). As áreas mais elevadas do Matopiba localizam-se no Extremo Oeste baiano, e as mais baixas da região são observadas no Norte maranhense.

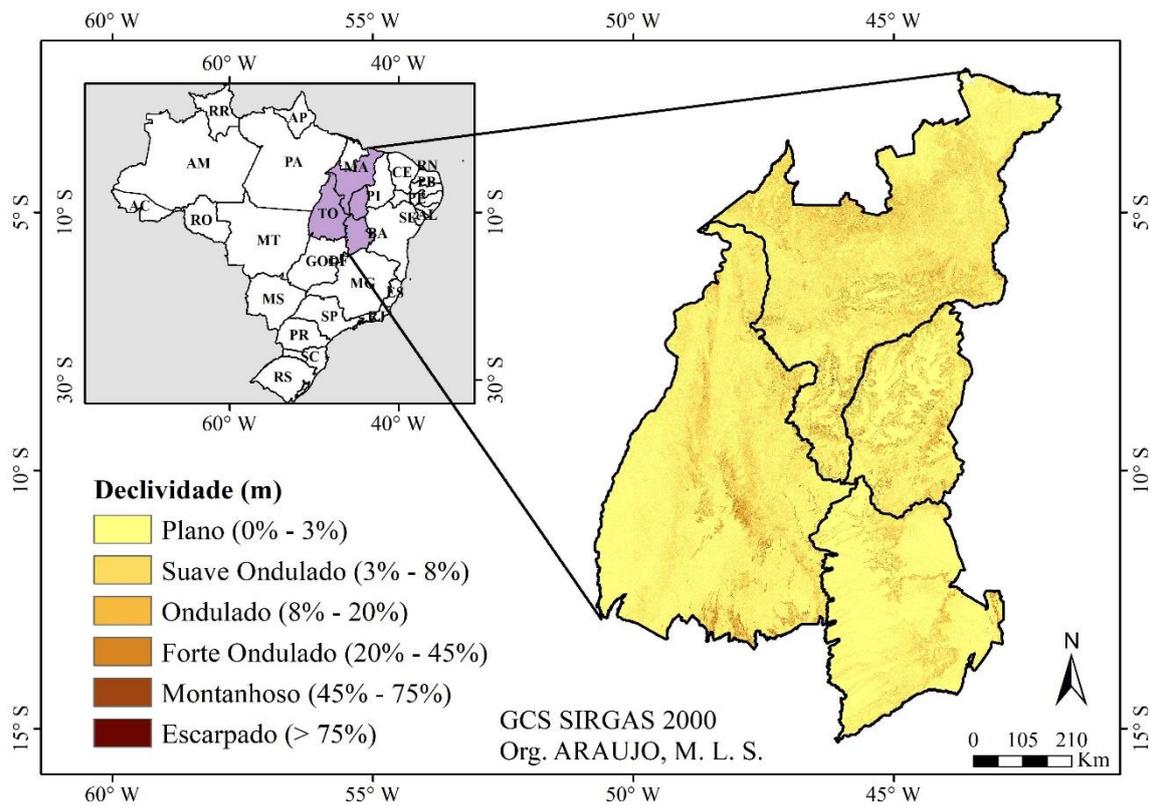


Figura 7. Declividade da região do Matopiba. Base: SRTM (30 m). Org.: Próprio autor.

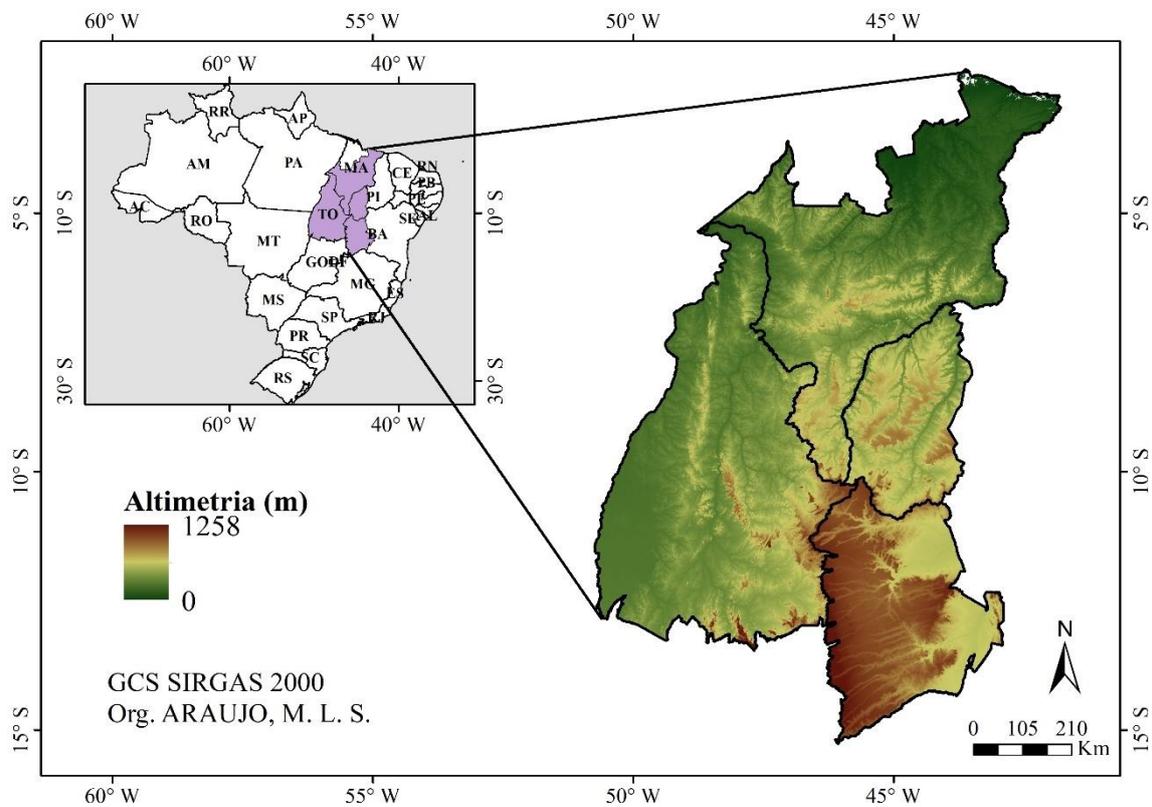


Figura 8. Altimetria da região do Matopiba. Base: SRTM (30 m). Org.: Próprio autor.

O Matopiba possui três grandes bacias hidrográficas em sua extensão territorial, a Bacia do Rio Tocantins (43%), a Bacia do Atlântico Norte/Nordeste (40%) e a Bacia do Rio São Francisco (17%). A região do Matopiba possui quatro unidades hidrográficas, o Tocantins-Araguaia (42,1%), o Parnaíba (20,16%), o Atlântico Nordeste Ocidental (19,61%) e o São Francisco (18,11%) (Figura 9). Os rios Tocantins, Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Itapecuru, Mearim, Gurupi e Pindaré são os principais rios que cortam o Matopiba.

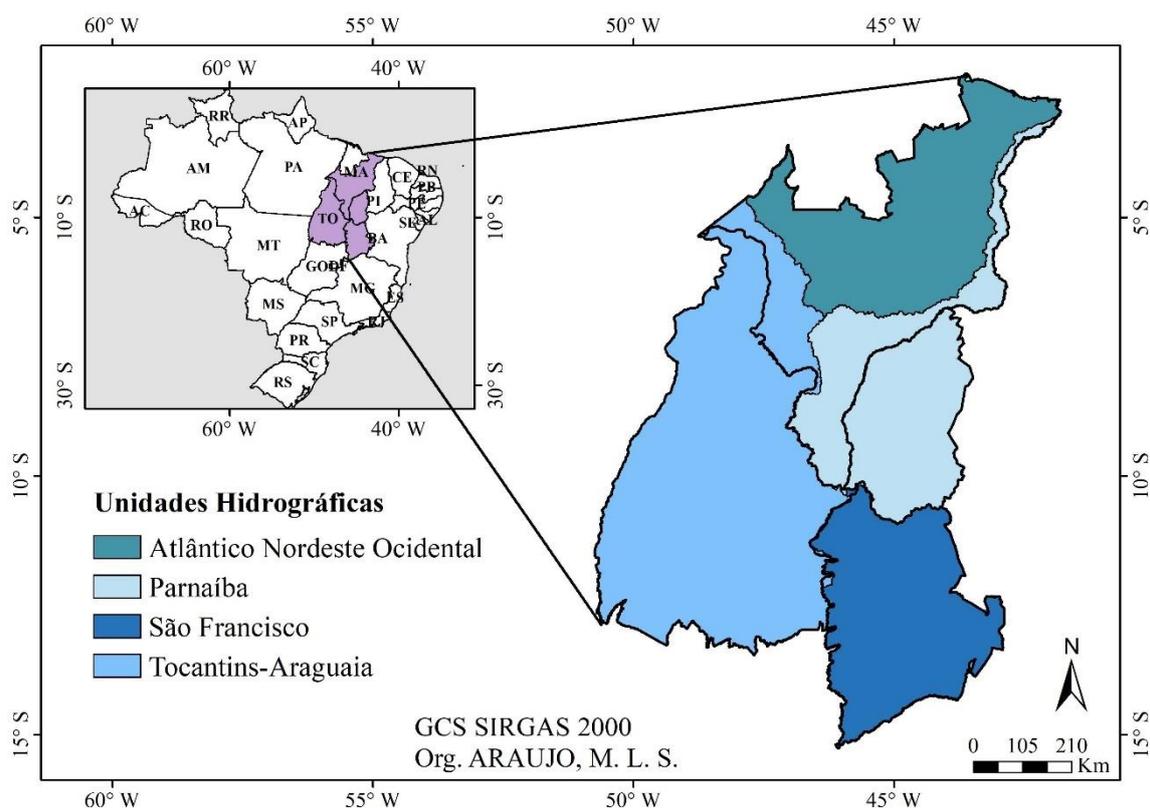


Figura 9. Unidades hidrográficas da região do Matopiba. Fonte: ANA (2006). Org.: Próprio autor.

O Matopiba é considerado a área com maior potencial de crescimento de terras agricultáveis no Brasil. Em decorrência do elevado crescimento agrícola na região nos últimos 20 anos, em 2015, o governo federal brasileiro estabeleceu o Plano de Desenvolvimento Agropecuário para o Matopiba e a criação do comitê gestor via Decreto Federal nº 8.447, de 6 de maio de 2015. O decreto estabeleceu, como objetivo, “promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico sustentável fundado nas atividades agrícolas e pecuárias que resultem na melhoria da qualidade de vida da população” (BRASIL, 2015). O plano é uma maneira do governo

brasileiro apoiar e observar o crescimento agrícola no Matopiba, principalmente com base nos aspectos socioeconômicos e ambientais.

A área destinada à agropecuária no Matopiba teve um aumento de 258% nos últimos 36 anos, passando de 5,6 milhões de hectares para 14,6 milhões de hectares, uma área superior à do estado do Amapá (MapBiomias, 2021c). Conforme números e imagens de satélite, a Bahia quintuplicou a área de agricultura de 1985 a 2020, o Piauí triplicou a área agrícola no trecho do bioma Cerrado a partir do final da década de 1990 e o Tocantins teve a maior supressão de vegetação nativa do Cerrado nos últimos dez anos (1,11 milhão de hectares), seguido do Maranhão (890 mil ha) (MapBiomias, 2021c). A região do Matopiba apresenta condições favoráveis para a agricultura, pois são áreas extensas e planas, com disponibilidade de água e clima propício, com elevada intensidade de sol e solos de alto potencial produtivo (Pereira et al., 2018).

O rápido desmatamento no Matopiba também desperta atenção em termos de cumprimento do Código Florestal Brasileiro. A Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, também conhecida como novo "Código Florestal", estabelece normas para proteção da vegetação nativa em áreas de preservação permanente, reserva legal, uso restrito, exploração florestal e assuntos relacionados. No bioma Cerrado, o Novo Código Florestal determina que 35% das fazendas devam ser preservadas por vegetação nativa (Reserva Legal), e 20% em imóveis localizados em áreas de campos gerais. Além disso, os agricultores devem proteger áreas consideradas de preservação permanente (por exemplo, matas ciliares ao longo de córregos).

Os agricultores que praticam o desmatamento ilegal têm sua área embargada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e não estão autorizados a vender seus produtos até que a área seja restaurada (Araújo et al., 2019). As ações de autuação e embargo realizadas no Brasil pelo IBAMA e Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), até maio de 2023, atingiram apenas 2,4% dos alertas de desmatamento e 10,2% da área desmatada identificada de 2019 a 2022 (MapBiomias, 2023).

No Matopiba, foram contabilizadas 4.975 alertas e 541.803 hectares desmatados, uma elevação de 37% da área desmatada em relação ao ano de 2021. Em 2022, concentrou-se 26,3% da área desmatada no Brasil (MapBiomias, 2023). Entre os estados que compõem o Matopiba, o Maranhão teve a maior área de soja com desmatamento no período de 2014 a 2021 (0,190 milhão de hectares), seguido por Tocantins (0,185

milhão de hectares), Bahia (0,184 milhão de hectares) e Piauí (0,138 milhão de hectares) (Agrosatélite, 2023).

O Matopiba tem uma importante participação nas lavouras temporárias, principalmente nas culturas de soja, milho e algodão. A produção da cultura de soja se destaca entre as principais regiões produtoras do Matopiba (Figura 10), com crescimento elevado no decorrer dos anos. A mesorregião Extremo Oeste Baiano, localizada na Bahia, é a segunda maior produtora brasileira de soja, atrás apenas do estado do Mato Grosso.

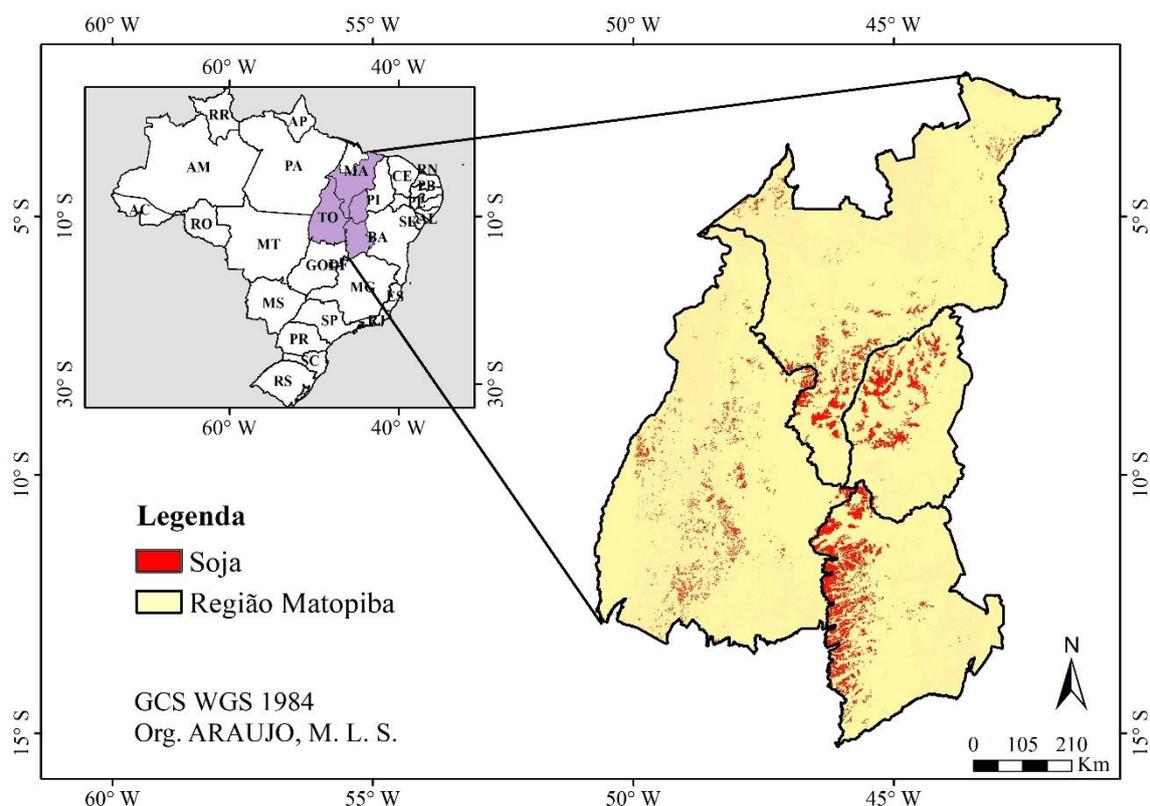


Figura 10. Área cultivada com soja na região do Matopiba no ano de 2020. Fonte: MapBiomias (2021a). Org.: Próprio autor.

Segundo dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, por meio da plataforma Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2023), entre os 10 municípios com a maior produção de soja no Matopiba, no ano de 2022, seis corresponderam a municípios da Bahia (Formosa do Rio Preto, São Desidério, Barreiras, Correntina, Luís Eduardo Magalhães e Riachão das Neves), dois municípios do Piauí (Baixa Grande do Ribeiro e Uruçuí) e dois municípios do Maranhão (Tasso Fragoso e Balsas) (Tabela 7).

Tabela 7. Os 10 principais municípios produtores de soja no Matopiba no ano de 2022.

	UF	Município	Soja (t)
1	BA	Formosa do Rio Preto	1.576.620
2	BA	São Desidério	1.434.027
3	PI	Baixa Grande do Ribeiro	812.354
4	BA	Barreiras	777.504
5	BA	Correntina	655.961
6	BA	Luís Eduardo Magalhães	646.854
7	MA	Tasso Fragoso	640.548
8	MA	Balsas	599.350
9	PI	Uruçuí	588.747
10	BA	Riachão das Neves	495.000

Fonte: Produção Agrícola Municipal (PAM) (IBGE, 2023). Org.: Próprio autor.

No Matopiba, a área de soja passou de 965.000 hectares em 2000/01 para 5,1 milhões de hectares em 2021/22, um aumento mais de cinco vezes, elevando a participação desta região na área de soja do Cerrado de 13% para 24% (Agrosatélite, 2023). Dos estados que compõe o Matopiba, a maior área plantada corresponde ao estado da Bahia, com 1,92 milhões de hectares na safra 2021/2022 (Tabela 8). As áreas do entorno de Balsas no Maranhão, de Baixa do Rio Grande no Piauí, bem como as regiões do entorno de Barreiras na Bahia, e de Porto Nacional no Tocantins, se destacam pela intensa expansão da sojicultura, cuja área cresceu de quatro a cinco vezes nos últimos 21 anos (Agrosatélite, 2023).

Tabela 8. A área de soja no Bioma Cerrado, por estado, obtida a partir de imagens de satélite para as safras na região do Matopiba.

	MA	TO	PI	BA	Matopiba
2000/2001	220.838	77.279	59.385	607.305	964.806
2006/2007	437.129	258.419	226.330	765.005	1.686.883
2013/2014	682.536	675.573	629.328	1.419.428	3.406.864
2016/2017	750.764	916.883	671.529	1.606.627	3.945.804
2018/2019	818.397	1.020.581	741.964	1.609.218	4.190.160

2019/2020	833.834	1.089.378	732.856	1.665.150	4.321.218
2020/2021	904.794	1.171.838	819.459	1.837.307	4.733.398
2021/2022	1.006.071	1.284.372	867.573	1.927.707	5.085.723

Fonte: Adaptado de Agrosatélite (2023). Org.: Próprio autor.

A análise da resiliência climática da cultura de soja na região do Matopiba foi realizada conforme o fluxograma metodológico mostrado na Figura 11. A aquisição dos dados foi dividida em quatro partes: (1) dados climáticos; (2) anomalias oceano-atmosfera; (3) dados agrícolas; e (4) uso e cobertura da terra. Os dados foram provenientes de fontes diferentes, de forma a serem cruzados para gerar produtos de boa qualidade e proporcionar a resposta à hipótese gerada. Os dados da região do Matopiba adquiridos também foram analisados em quatro partes: (1) tendências de mudanças climáticas anuais e intra-aneais; (2) dinâmica espaço-temporal de uso e cobertura da terra; (3) dinâmica espaço-temporal da produção e da produtividade da cultura de soja; e (4) relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera.

4.1 Fluxograma metodológico

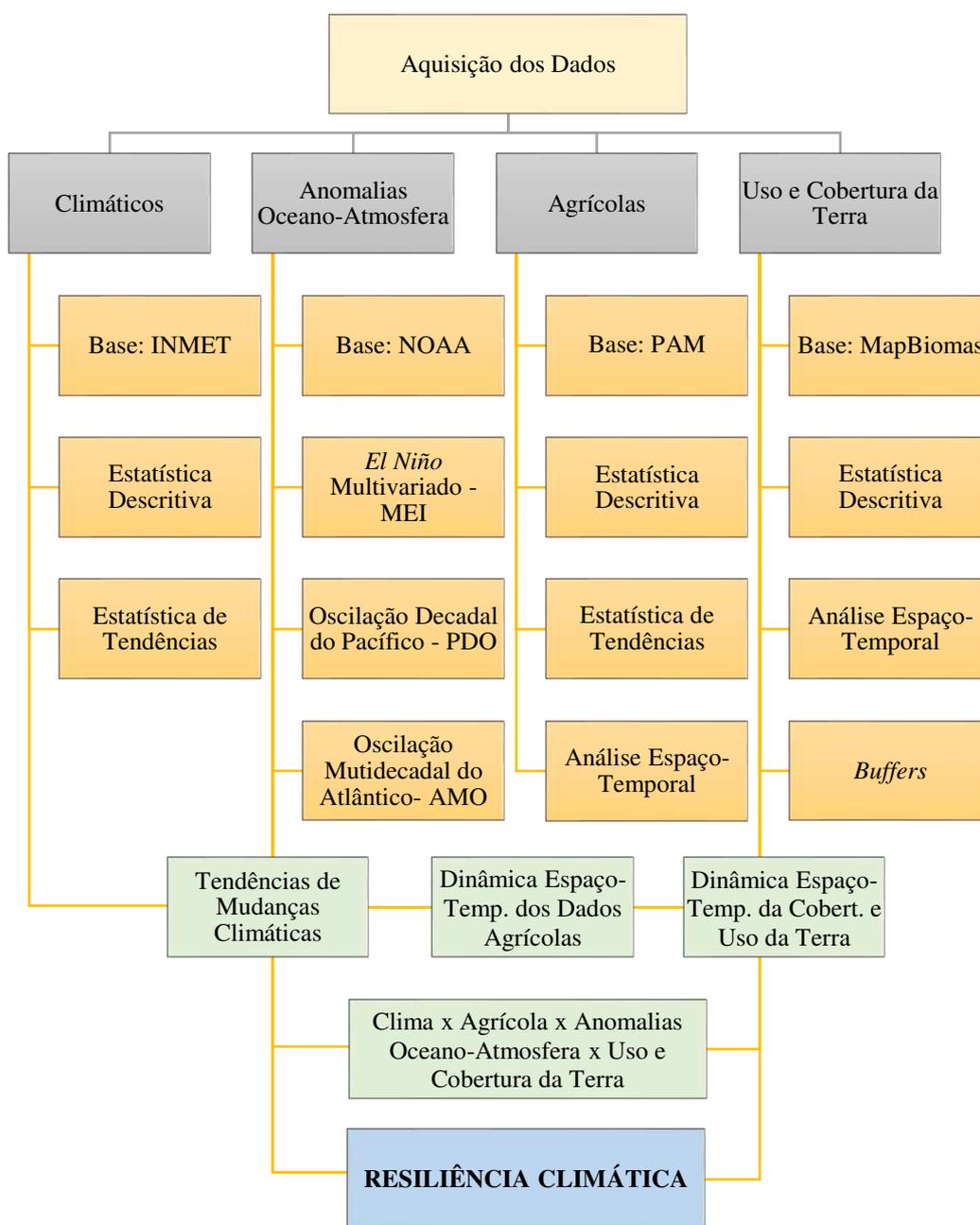


Figura 11. Fluxograma metodológico da atual tese de doutorado. Org.: Próprio autor.

4.2 Dados climáticos

A construção do banco de dados climáticos iniciou-se por meio das informações provenientes das estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizados gratuitamente na plataforma Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Na região do Matopiba, são encontradas 22 estações

meteorológicas convencionais do INMET, sendo nove estações no estado do Maranhão, seis em Tocantins, duas no Piauí e cinco na Bahia (INMET, 2020). A Figura 12 apresenta a distribuição geográfica das estações meteorológicas analisadas nesse estudo. A Tabela 9 descreve o nome, código e localização geográfica das estações meteorológicas analisadas.

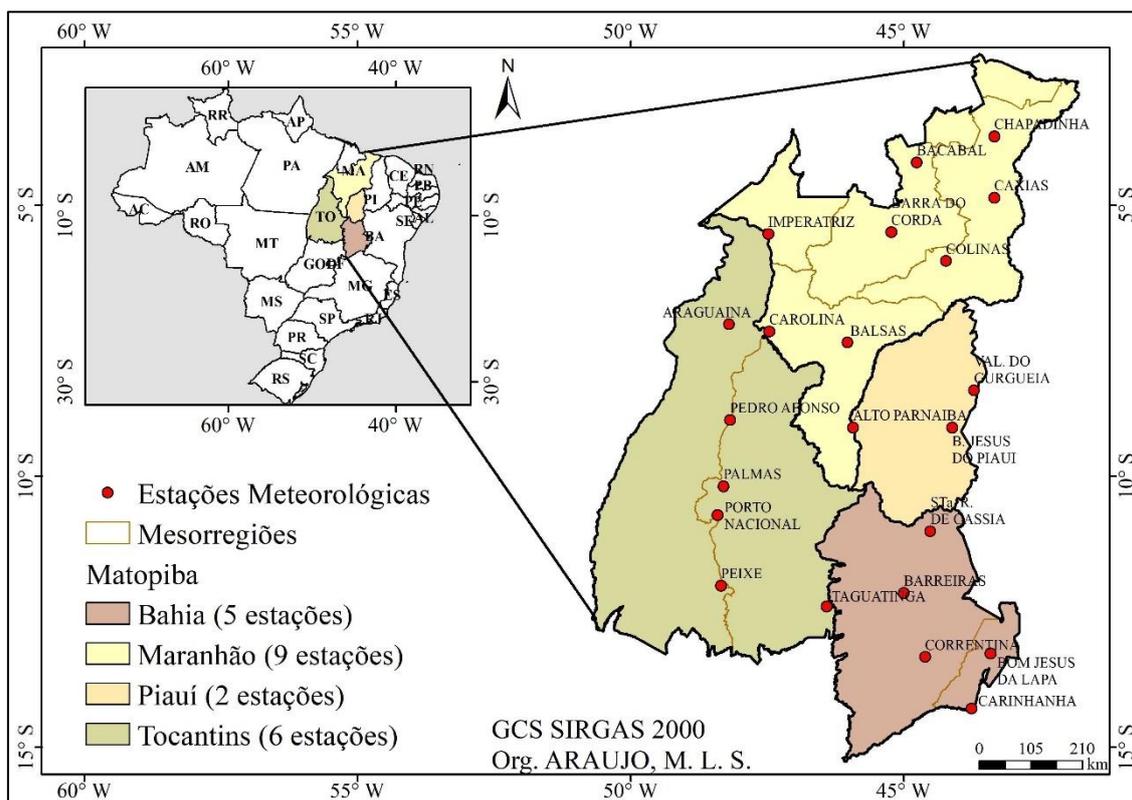


Figura 12. Distribuição geográfica das 22 estações meteorológicas nas mesorregiões do Matopiba. Fonte: IBGE (2021b). Org.: Próprio autor.

Tabela 9. Descrição e localização geográfica das estações meteorológicas convencionais do INMET distribuídas no Matopiba.

UF	Código	Nome	Latitude	Longitude
BA	83076	Sta. R. de Cássia	11°01'S	44°31'W
	83236	Barreiras	12°09'S	45°00'W
	83286	Correntina	13°20'S	44°37'W
	83288	Bom Jesus da Lapa	13°16'S	43°25'W
	83408	Carinhanha	14°17'S	43°46'W
MA	82382	Chapadinha	03°44'S	43°21'W
	82460	Bacabal	04°13'S	44°46'W
	82476	Caxias	04°52'S	43°21'W
	82564	Imperatriz	05°32'S	47°29'W

	82571	Barra do Corda	05°30'S	45°14'W
	82676	Colinas	06°02'S	44°14'W
	82765	Carolina	07°20'S	47°28'W
	82768	Balsas	07°32'S	46°02'W
	82970	Alto Parnaíba	09°06'S	45°56'W
PI	82870	Vale do Gurgueia	08°25'S	43°43'W
	82975	Bom Jesus do Piauí	09°06'S	44°07'W
TO	82659	Araguaína	07°12'S	48°12'W
	82863	Pedro Afonso	08°58'S	48°11'W
	83033	Palmas	10°11'S	48°18'W
	83064	Porto Nacional	10°43'S	48°25'W
	83228	Peixe	12°01'S	48°21'W
	83235	Taguatinga	12°24'S	46°25'W

As estações meteorológicas do INMET são instalações dotadas com instrumentos e sensores para medir as variáveis atmosféricas, particularmente temperatura, precipitação, umidade, pressão atmosférica, velocidade do vento e direção do vento. Nas estações meteorológicas convencionais, as medições são realizadas ao menos uma vez por dia por observadores humanos, à medida que, nas estações meteorológicas automatizadas, as medições são realizadas e transmitidas pelo menos uma vez por hora automaticamente por aparelhos autônomos (WMO, 2018).

Nesta tese de doutorado, trabalhou-se com os dados das estações meteorológicas convencionais do INMET. O principal motivo da escolha foi a possibilidade da utilização de séries de dados temporalmente mais prolongadas, o que podem caracterizar-se como normais climatológicas. Mesmo com a baixa quantidade de estações meteorológicas convencionais disponíveis na região do Matopiba, principalmente pela dependência diária do elemento humano, essa desvantagem foi compensada pela excelente distribuição geográfica das estações meteorológicas convencionais na área de estudo (Figura 12).

Foram considerados os dados diários de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima do período de 1985–2020, totalizando 35 anos de dados climáticos. De acordo com a OMM, as normais climáticas são normalmente definidas como as médias de três décadas de parâmetros meteorológicos (Arguez & Vose, 2011). Os dados faltantes das estações meteorológicas não foram considerados nesse estudo. Após aquisição e organização, os dados foram analisados por meio da estatística descritiva, com a medida de tendência central e de variabilidade de dados. Posteriormente, foi aplicada a estatística de tendências nos dados climáticas de precipitação, temperatura

máxima e temperatura mínima. As variáveis foram analisadas de forma anual e intra-anual.

As análises estatísticas de tendências foram baseadas no teste *Mann-Kendall* (Mann, 1945). Esse teste corresponde a uma análise sequencial e não-paramétrica, sugerida pela OMM para observações de tendências em séries temporais de dados ambientais (Silva et al., 2016). Esse teste é normalmente utilizado para verificar se uma série de dados possui tendência de alteração temporal estatisticamente definida e é dado por (Eq. 1):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

Onde S é o teste *Mann-Kendall*, x_j e x_k são valores de séries temporais em instâncias de tempo j e k em n observações.

Nesta abordagem, as diferenças entre cada valor sequencial $\text{sgn}(\dots)$ são calculadas para representar aumento (+1), decréscimo (-1) ou neutralidade (0) (Eq. 2).

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Valores negativos de S indicam uma tendência temporal de decréscimo, enquanto valores positivos indicam uma tendência de acréscimo. É indispensável avaliar a probabilidade associada com os valores de S e a dimensão da amostra n . Após essa análise, é possível avaliar se a tendência é estatisticamente significativa ou não. O parâmetro estatístico admitido para número de amostras superiores a 10 é o valor da variância de S (Eq. 3):

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n-1) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (3)$$

Onde p é o número de grupos empatados e t_j é o número de valores iguais em um certo grupo j da série temporal. Sendo S distribuído e com média zero e variância dada pela Eq. 1, pode-se verificar se a tendência positiva ou negativa é significativamente

diferente de zero. Se S é significativamente diferente de zero, H_0 é rejeitada para certo nível de significância, apontando existência de tendência (hipótese H_1 é aceita). O parâmetro estatístico para número de amostras pequenas e com distribuição normal, é o valor da estatística de Z (Eq. 4).

$$|Z| = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{V(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O teste *Mann-Kendall* foi processado no software XLSTAT (XLSTAT, 2021). O XLSTAT é um *software* estatístico e de análise de dados que opera como uma extensão do Microsoft Excel. Esse software oferece uma ampla gama de ferramentas para profissionais, pesquisadores e estudantes que trabalham com planilhas do Excel. O XLSTAT fornece uma análise qualitativa dos dados antes do processamento da tendência *Mann-Kendall*. Essa análise qualitativa é crucial para garantir que os dados utilizados na análise de tendências sejam confiáveis e adequados para o propósito pretendido.

4.3 Anomalias oceano-atmosfera

A interação oceano-atmosfera altera toda a configuração climática em todo o planeta. Temperaturas mais quentes ou mais frias do que o habitual do oceano podem afetar os padrões climáticos em todo o mundo, influenciando os sistemas de alta e baixa pressão, ventos e precipitação (NOAA, 2021a). As anomalias oceano-atmosfera foram analisadas no presente estudo por meio dos índices *El Niño* Multivariado (MEI), Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO). A aquisição dos dados das anomalias para os Oceanos Pacífico e Atlântico foram obtidos da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), no portal do *Physical Sciences Laboratory*, disponibilizados gratuitamente no site <https://psl.noaa.gov/>.

O *El Niño* e a *La Niña*, juntos chamados de *El Niño* Oscilação Sul (ENSO), são variações periódicas das temperaturas esperadas da superfície do mar. É considerado o principal preditor de perturbações climáticas globais e produz efeitos climáticos

regionais graves (NOAA, 2021b). Tais anomalias modificam, por exemplo, a célula de Walker sobre o norte da América do Sul. Em anos de *El Niño* ocorrem condições de baixa pluviometria sobre a região do Nordeste brasileiro, decorrente do ar descendente da célula de Walker. Avaliar a condição do ENSO é essencial na tomada de decisão de ações para o abastecimento de água, segurança alimentar, saúde e segurança pública.

O índice MEI combina variáveis oceânicas e atmosféricas para a avaliação do *El Niño* e *La Niña*, com indicações em tempo real da sua intensidade e, por meio de análise histórica, fornece um contexto comparativo significativo das suas condições de crescimento. O índice é disponibilizado em forma bimestral e compõe uma série temporal da principal função ortogonal empírica combinada das variáveis de pressão ao nível do mar, Temperatura da Superfície do Mar (TSM), componentes zonal e meridional do vento de superfície e Radiação de Onda Longa (ROL) de saída sobre a bacia do Pacífico tropical (em latitude 30°S–30°N e longitude 100°E–70°W) (NOAA, 2021b).

As principais características dos eventos MEI positivos (calor, *El Niño*) incluem a TSM anormalmente quente em todo o Pacífico Centro-Leste equatorial, a pressão ao nível do mar anormalmente alta sobre a Indonésia e o Pacífico tropical ocidental e baixa sobre o Pacífico tropical oriental, a redução ou reversão dos ventos de leste do Pacífico tropical (ventos alísios), a convecção tropical suprimida (ROL positiva) sobre a Indonésia e Pacífico Ocidental, e convecção intensificada (ROL negativa) sobre o Pacífico central. As principais características dos eventos MEI negativos (frio, *La Niña*) são as características opostas dos eventos MEI positivos (NOAA, 2021b).

No Brasil, a alteração das chuvas pode estar associada ao fenômeno *El Niño* em escala interanual, normalmente o fenômeno segue de 6 a 18 meses, e pode estar associada à Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) em escala interdecadal (Salvador, 2014). A Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) é um padrão de variabilidade climática do Pacífico de longa duração, semelhante ao ENSO. Quando as TSM's são anormalmente frias no interior do Pacífico Norte e quentes ao longo da costa do Pacífico, e quando as pressões ao nível do mar estão abaixo da média no Pacífico Norte, o PDO tem um valor positivo (Mantua et al., 1997; NOAA, 2021c).

A Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) é um fenômeno de variabilidade natural que ocorre no Oceano Atlântico e que tem a sua principal ênfase na mudança de longa duração na Temperatura da Superfície do Mar (TSM). As séries temporais são calculadas a partir do conjunto de dados Kaplan SST (Kaplan et al., 1998) e são

atualizadas mensalmente, com fases frias e quentes que podem durar várias décadas e uma diferença de cerca de 1°F entre os extremos. A AMO é fundamentalmente um índice das temperaturas do Atlântico Norte, sendo uma fase positiva, com o Atlântico Norte mais aquecido, e outra negativa, com o Atlântico mais frio. A AMO está relacionada com mudanças na atividade dos furacões, padrões e intensidade das chuvas e mudanças nas populações de peixe.

4.4 Dados agrícolas

Os dados de produção e produtividade agrícola utilizados nessa tese de doutorado foram obtidos por meio da Produção Agrícola Municipal (PAM) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mediante a plataforma Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2021a). Os dados são disponibilizados gratuitamente no site <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>, com o objetivo de fornecer informações estatísticas de base agrícola municipal em escalas anual e mensal para todo o país.

Nesse estudo foram utilizados os dados municipais de quantidade produzida, em toneladas, e produtividade média, em quilogramas por hectare, da cultura de soja nos anos de 1985–2020, dos 337 municípios que integram o Matopiba. Os dados do IBGE, assim como outras fontes de dados, possuem suas limitações. Alguns municípios apresentaram falhas em suas séries de dados, porém os mesmos não foram considerados e esse fato não interferiu no resultado final encontrado. Os dados agrícolas foram analisados espaço-temporalmente por meio de técnicas disponíveis no Sistema de Informações Geográficas (SIG), transformados em vetores para composição de mapas. Também foram analisados por meio da estatística descritiva, envolvendo medida de tendência central.

Posteriormente, os dados agrícolas de produção e produtividade de soja foram analisados por meio da estatística de tendências, baseados no teste *Mann-Kendall* (Mann, 1945). O teste foi aplicado na série histórica dos dados pertencentes aos municípios que possuem estação meteorológica convencional do INMET na região do Matopiba, ou seja, 22 municípios. O estudo das tendências agrícolas realizado no presente trabalho permite uma visualização do ambiente na qual a cultura de soja tende a estar inserida mediante às tendências de mudanças climáticas.

A agricultura passa por transformações que ocorrem em elevada velocidade e impactam o mundo rural brasileiro. Por isso, o estudo agrícola realizado na presente tese de doutorado objetiva proporcionar um apoio a tomada de decisão atual, ao planejamento estratégico das ações de ciência, tecnologia e inovação, políticas públicas e privadas, no ambiente agrícola brasileiro.

4.5 Dados de uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra da região do Matopiba foi analisado por meio dos dados disponíveis na plataforma do projeto Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, o MapBiomias. O MapBiomias é uma iniciativa multi-institucional com o objetivo de contribuir com o entendimento das transformações do território brasileiro por meio do mapeamento anual do uso e cobertura da terra no país. O projeto gerou um mapa anual de uso e cobertura da terra para cada ano desde 1985 até o atual estudo, com resolução de 30 m em todo território brasileiro (MapBiomias, 2021b).

A presente tese de doutorado utilizou a coleção 6, cobrindo o período de 1985–2020 e publicada em agosto de 2021. Os mapas disponibilizados na plataforma MapBiomias são produzidos a partir da classificação pixel por pixel das imagens do satélite Landsat. Cada processo é feito com algoritmos de aprendizado de máquina abrangentes por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que oferece elevada eficiência em processamento em nuvem.

O acesso aos dados foi realizado mediante a plataforma GEE. Primeiramente, buscou-se o recorte das imagens por meio da delimitação do Matopiba, área de estudo da presente tese. A série temporal selecionada para análise foram os anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020. A reclassificação dos dados, usando o ambiente e *scripts* do GEE (Gorelick et al., 2017), foi realizada inicialmente de acordo com o descrito na Tabela 10, de maneira a melhor se adequar na análise descritiva do uso e cobertura da terra da área de estudo. Após a reclassificação, os dados de uso e cobertura da terra da região do Matopiba foram descritos e analisados espaço-temporalmente.

Tabela 10. Reclassificação das imagens do MapBiomias (coleção 6) para análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra no Matopiba.

Floresta	Soja
----------	------

Formação Florestal	Lavoura Temporária – Soja
Savana	Agropecuária
Formação Savânica	Pastagem
Outras Formações Florestais	Lavoura Temporária – Outras
Mangue	Lavoura Perene
Restinga Arborizada (beta)	Silvicultura
Formação Natural não Florestal	Mosaico de Agricultura e Pastagem
Campo Alagado e Área Pantanosa	Área não Vegetada
Formação Campestre	Praia, Duna e Areal
Apicum	Área Urbanizada
Afloramento Rochoso	Mineração
Outras Formações não Florestais	Outras Áreas não Vegetadas
Corpo D'água	
Rio, Lago e Oceano	
Aquicultura	

Posteriormente, as imagens foram reclassificadas em duas classes, formação natural e ação antrópica, conforme a Tabela 11. Após as imagens reclassificadas foram realizados *buffers* de 60 km em cada ponto geográfico das 22 estações meteorológicas do Matopiba, visando quantificar e analisar o processo de ocupação humana e alteração da cobertura vegetal no entorno das estações meteorológicas do Matopiba. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM ou WMO), a área representativa de uma estação meteorológica pode abranger um raio de até 100 km ao seu redor (WMO, 2018). Portanto, é importante analisar a sensibilidade da série de dados em resposta às mudanças na cobertura da terra ao redor do ponto de amostragem (Li et al., 2015; Zhao & Wu, 2017). Têm-se dados mais precisos sobre as condições climáticas naturais, facilitando a compreensão e a previsão do clima, quando ocorre uma menor influência antrópica nos dados das estações meteorológicas.

Em uma região central semiárida dos EUA, Hubbard (1994) determinou que as distâncias máximas necessárias para explicar mais de 90% da variação entre locais foram 60 km para temperatura máxima, 30 km para temperatura mínima e 5 km para precipitação pluvial. Neste trabalho os *buffers* foram realizados com 60 km, pois o Matopiba é em sua maior extensão formado pelo semiárido brasileiro. Importante destacar que as imagens produto do MapBiomas foram desenvolvidas para uma escala regional, por isso as incertezas aumentam quando a análise é reduzida para um raio de 60 km. Com as imagens reclassificadas e os *buffers* prontos, os dados foram analisados espaço-temporalmente.

Tabela 11. Reclassificação das imagens do MapBiomas (coleção 6) em duas classes, formação natural e ação antrópica.

Formação Natural	Ação Antrópica
Formação Florestal	Pastagem
Formação Savânica	Lavoura Temporária
Mangue	Lavoura Perene
Restinga Arborizada (beta)	Silvicultura
Campo Alagado e Área Pantanosa	Mosaico de Agricultura e Pastagem
Formação Campestre	Área Urbanizada
Apicum	Mineração
Afloramento Rochoso	Aquicultura
Outras Formações não Florestais	
Praia, Duna e Areal	
Outras Áreas não vegetadas	
Rio, Lago e Oceano	

4.6 Relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera

A análise final para verificar a hipótese proposta pela presente tese de doutorado foi avaliar a relação entre os resultados obtidos das mudanças de tendências climáticas anuais com os dados agrícolas da cultura de soja e os dados de uso e cobertura da terra dos *buffers* das estações meteorológicas do Matopiba, como também a relação entre os dados agrícolas de soja e as anomalias oceano-atmosfera.

A avaliação da relação entre os dados foi obtida usando a correlação de Pearson (r) (Pearson, 1920; Santos et al., 2022). As análises climáticas foram realizadas para as tendências de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima. Os resultados de uso e cobertura da terra utilizados na análise foram as áreas de formação natural (1985 e 2020), de ação antrópica (1985 e 2020) e da mudança de uso e cobertura da terra durante os 35 anos de análise. Foram utilizados no estudo a média e a tendência agrícola para as variáveis de produção e produtividade da cultura de soja.

O teste bicaudal foi aplicado para verificar a significância de $p \leq 0,05$. A fórmula de correlação de Pearson, também conhecida como coeficiente de correlação de Pearson (r), é comumente usada para medir o grau e a direção da relação linear entre duas variáveis, é dada por (Eq. 5):

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2]} \sqrt{[n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (5)$$

Onde n é o número de pares de observações, $\sum xy$ é a soma dos produtos de cada par de observações, $\sum x$ é a soma das observações da primeira variável, $\sum y$ é a soma das observações da segunda variável, $\sum x^2$ é a soma dos quadrados das observações da primeira variável, $\sum y^2$ é a soma dos quadrados das observações da segunda variável.

O material produzido e reunido forneceu uma análise específica dos dados e uma resposta da resiliência climática da cultura de soja na região do Matopiba, com a observação da capacidade do sistema agrícola dessa cultura de garantir o funcionamento de suas funções em face das mudanças climáticas. Os resultados alcançados podem subsidiar planejamentos agrícolas, ambientais, hídricos, econômicos, sociais e de políticas públicas. Além disso, proporciona também subsídios para outros estudos agrícolas e ambientais, que podem ser aplicados em outras regiões e culturas agrícolas.

Os resultados desta tese de doutorado foram estruturados em quatro fases. Na primeira fase, têm-se os resultados das análises climáticas verificadas na região do Matopiba, com ênfase nas observações das tendências climáticas anuais e intra-anuais. Na segunda fase, têm-se os produtos do estudo de uso e cobertura da terra da região, com destaque para a dinâmica espaço-temporal e a geração de *buffers* para verificações. Na terceira fase, têm-se os resultados das análises agrícola, com ênfase na dinâmica espaço-temporal da produção e da produtividade da cultura de soja na área de estudo.

Na última fase, têm-se a relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera observadas, de forma a avaliar a hipótese proposta que há resiliência climática na região do Matopiba. Na sequência, a discussão do estudo é detalhada, com o intuito de contextualizar os resultados dentro de pesquisas realizadas tanto em âmbito nacional quanto internacional sobre o tema proposto na presente da tese de doutorado.

5.1 Resultados

5.1.1 Análise climática

A região do Matopiba apresentou maiores volumes de precipitação no estado do Tocantins (Figura 13.a). A precipitação média total anual variou de 769,07 mm (Bom Jesus da Lapa/BA) a 1.807,75 mm (Araguaína/TO). Os altos valores do desvio-padrão na média total anual de precipitação demonstram a grande variabilidade da região entre os períodos seco e chuvoso. A média anual da temperatura máxima na área de estudo oscilou de 31,58 °C (Correntina/BA) a 34,15 °C (Caxias/MA) (Figura 13.b). A temperatura máxima de valor máximo foi de 44,70 °C, na localidade de Bom Jesus do Piauí/PI. A média anual da temperatura mínima variou entre 18,07 °C (Correntina/BA) a 23,31 °C (Bacabal/MA) (Figura 13.c).

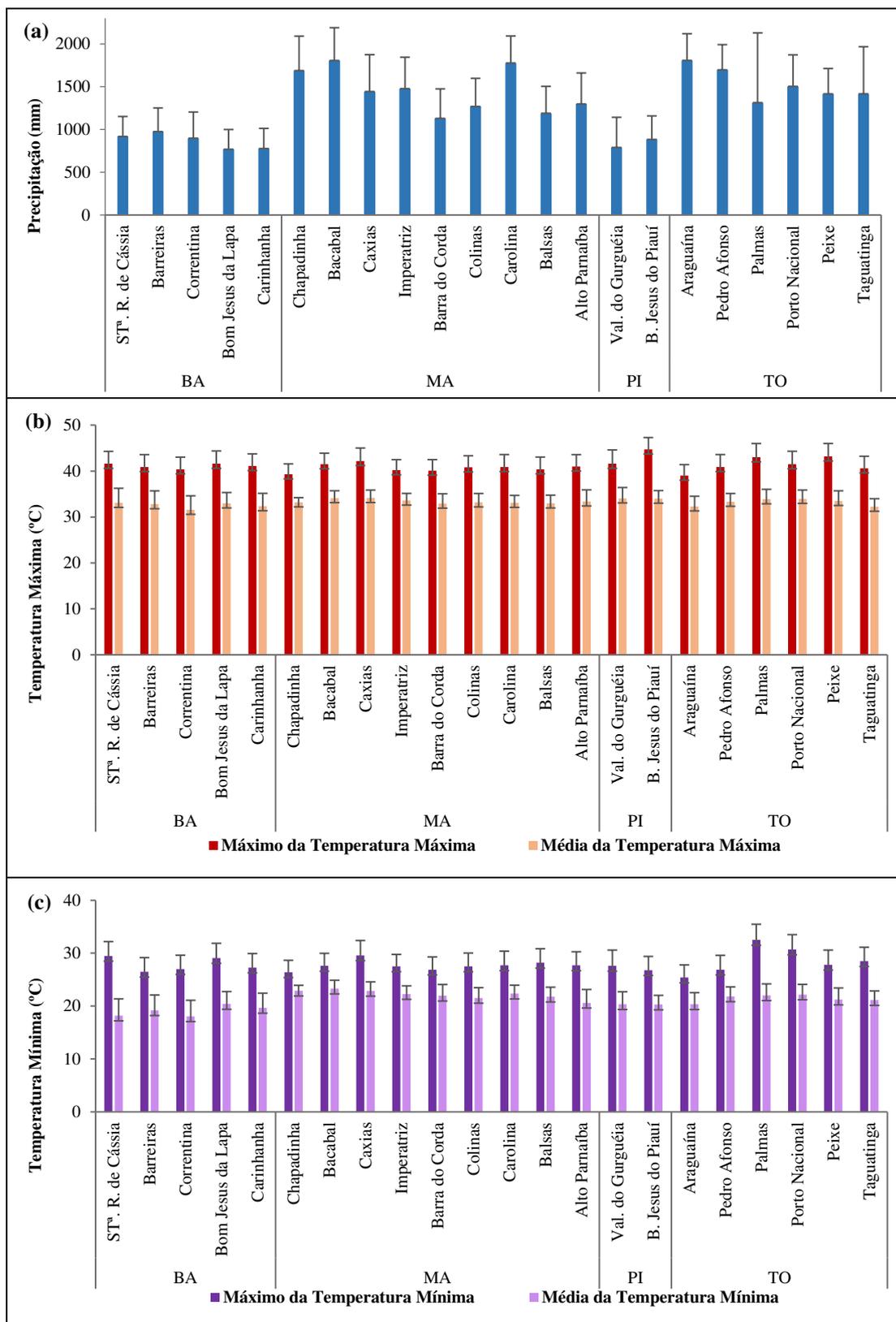


Figura 13. Precipitação (média total anual e desvio-padrão) (a), temperatura máxima (máximo anual, média anual e desvio-padrão) (b) e temperatura mínima (máximo anual, média anual e desvio-padrão) (c) do período de 1985 a 2020 nas 22 estações meteorológicas na região do Matopiba.

A aplicação do teste *Mann-Kendall* na série temporal anual dos dados das 22 estações meteorológicas analisadas indicou tendência significativa ($p \leq 0,05$) de declínio da precipitação no decorrer dos próximos anos em 20 localidades do Matopiba (Tabela 12). A maior e a menor tendência de declínio foram em Colinas, Sul Maranhense ($p < 0,0001$ e $S -0,069$ mm/ano) e em Carinhanha, Vale São-Franciscano da Bahia ($p 0,027$ e $S -0,012$ mm/ano), respectivamente.

As tendências da série intra-anual desta variável foram significativas ($p \leq 0,05$), em sua maioria, para tendências de decréscimo da precipitação mensal, principalmente no mês de dezembro, com o declínio da precipitação em 16 estações meteorológicas. Na localidade de Colinas, Sul Maranhense, 9 meses do ano possuem tendências de declínio da precipitação estatisticamente significativas. Palmas, Oriental Tocantinense, foi a única estação que apresentou tendência significativa de acréscimo da precipitação intra-anual, sendo no mês de janeiro ($p 0,009$ e $S 0,063$ mm/ano).

Tabela 12. Tendências de precipitação anual e intra-anual analisadas pelo teste *Mann-Kendall* para as estações meteorológicas do Matopiba.

UF	Estações	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
BA	Barreiras	-0,056	-0,020	-0,001	0,009	-0,029	-0,051	-0,041	-0,062	-0,063	-0,122	-0,043	-0,109	-0,052
	Bom Jesus da Lapa	-0,084	-0,002	0,008	0,006	-0,003	-0,005	-0,080	-0,052	-0,068	-0,050	-0,017	-0,147	-0,038
	Carinhanha	-0,034	-0,009	0,041	0,021	0,011	-0,013	-0,067	-0,049	-0,045	-0,023	-0,009	-0,110	-0,015
	Correntina	-0,074	-0,008	0,009	0,034	0,013	0,006	-0,070	-0,029	-0,078	-0,058	-0,015	-0,147	-0,022
	Santa Rita de Cássia	-0,036	-0,018	-0,018	-0,033	-0,057	-0,007	-0,029	-0,019	-0,081	-0,049	0,012	-0,100	-0,034
MA	Alto Parnaíba	-0,020	-0,006	0,037	-0,027	-0,007	0,003	-0,030	0,005	-0,056	-0,057	-0,009	-0,099	-0,024
	Bacabal	-0,011	0,034	-0,046	-0,019	-0,023	-0,033	-0,065	-0,013	0,008	-0,080	-0,035	-0,017	-0,032
	Balsas	0,037	0,029	-0,050	-0,033	-0,002	-0,018	0,025	-0,023	-0,036	-0,033	-0,037	-0,103	-0,030
	Barra do Corda	-0,007	-0,012	-0,039	-0,042	0,033	-0,006	-0,011	-0,021	0,010	-0,021	-0,033	-0,029	-0,018
	Carolina	-0,015	0,001	-0,010	-0,006	0,000	0,000	0,007	-0,011	-0,036	-0,054	-0,019	-0,063	-0,022
	Caxias	-0,029	-0,007	-0,074	-0,048	-0,048	-0,079	-0,045	-0,056	-0,016	-0,027	-0,052	-0,062	-0,052
	Chapadinha	-0,005	0,014	-0,036	-0,022	-0,022	0,008	-0,014	-0,091	-0,092	-0,039	0,031	-0,005	-0,022
	Colinas	-0,046	-0,034	-0,089	-0,107	-0,048	-0,065	0,001	-0,042	-0,060	-0,055	-0,080	-0,111	-0,069
	Imperatriz	0,002	0,002	-0,026	-0,013	0,002	-0,033	-0,016	-0,027	-0,042	-0,011	-0,041	-0,008	-0,012
PI	Bom Jesus do Piauí	0,009	0,017	0,025	-0,067	0,030	-0,020	0,004	-0,044	-0,051	-0,029	-0,063	-0,034	-0,022
	Vale do Gurguéia	-0,031	-0,018	-0,032	-0,007	-0,047	-0,112	-0,058	-0,013	-0,097	-0,079	-0,022	-0,077	-0,044
TO	Araguaína	-0,035	0,040	0,007	-0,030	0,004	-0,019	0,002	-0,029	-0,050	-0,059	-0,015	-0,050	-0,020
	Palmas	0,063	0,026	0,025	0,036	-0,014	0,019	-0,035	-0,014	-0,008	-0,025	0,012	-0,015	0,006
	Pedro Afonso	-0,004	-0,015	-0,021	0,026	0,030	0,010	-0,021	-0,023	-0,045	-0,073	-0,014	-0,073	-0,020
	Peixe	-0,038	-0,048	-0,039	-0,019	-0,001	-0,008	-0,045	-0,099	-0,041	-0,035	-0,020	-0,079	-0,029
	Porto Nacional	-0,009	-0,022	-0,008	-0,027	0,028	0,010	-0,048	-0,059	-0,070	-0,078	-0,034	-0,069	-0,028
	Taguatinga	-0,042	-0,060	0,035	-0,001	-0,027	0,031	-0,059	-0,054	-0,052	-0,055	0,027	-0,116	-0,022

Os valores destacados em negritos apresentam significância $p \leq 0,05$.

A temperatura máxima anual apresentou tendência significativa ($p \leq 0,05$) de acréscimo em todas as estações meteorológicas da região do Matopiba. A localidade de Caxias, Leste Maranhense, registrou a maior tendência de aumento da temperatura máxima anual ($p < 0,0001$ e $S 0,254$ °C/ano) (Tabela 13). Nesta localidade, o valor máximo da temperatura máxima foi de 42,2 °C, no ano de 2016, sendo 8,05 °C acima da média. Balsas, Sul Maranhense, teve a segundo maior tendência de aumento anual desta variável ($p < 0,0001$ e $S 0,225$ °C/ano). Para os dados intra-anuais, a temperatura máxima possui tendência de acréscimo significativo ($p \leq 0,05$) em todos os meses do ano. Somente sete casos analisados não se mostraram significativos. O mês de setembro apresentou o maior valor do índice *Mann-Kendall* para tendência de elevação da temperatura máxima, na localidade de Caxias, Leste Maranhense ($p < 0,0001$ e $S 0,488$ °C/ano).

Tabela 13. Tendências de temperatura máxima anual e intra-anual analisadas pelo teste *Mann-Kendall* para as estações meteorológicas do Matopiba.

UF	Estações	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
BA	Barreiras	0,145	0,049	0,119	0,048	0,114	0,081	0,061	0,055	0,105	0,183	0,103	0,195	0,101
	Bom Jesus da Lapa	0,205	0,111	0,146	0,070	0,078	0,144	0,138	0,120	0,179	0,207	0,100	0,215	0,128
	Carinhanha	0,173	0,047	0,072	0,035	0,070	0,156	0,130	0,118	0,144	0,162	0,088	0,163	0,087
	Correntina	0,176	0,129	0,169	0,090	0,112	0,164	0,155	0,132	0,203	0,212	0,101	0,211	0,131
	Santa Rita de Cássia	0,238	0,134	0,140	0,135	0,183	0,201	0,169	0,153	0,161	0,218	0,121	0,198	0,154
MA	Alto Parnaíba	0,096	0,053	0,120	0,152	0,210	0,258	0,268	0,248	0,278	0,257	0,114	0,211	0,138
	Bacabal	0,195	0,159	0,228	0,234	0,253	0,329	0,298	0,341	0,347	0,376	0,287	0,166	0,202
	Balsas	0,165	0,159	0,258	0,267	0,297	0,412	0,451	0,414	0,437	0,301	0,199	0,282	0,225
	Barra do Corda	0,184	0,205	0,270	0,319	0,303	0,348	0,415	0,405	0,422	0,372	0,278	0,197	0,198
	Carolina	0,146	0,137	0,215	0,169	0,206	0,289	0,350	0,391	0,354	0,256	0,185	0,246	0,170
	Caxias	0,275	0,180	0,290	0,345	0,351	0,426	0,411	0,482	0,488	0,445	0,304	0,261	0,254
	Chapadinha	0,199	0,158	0,294	0,290	0,259	0,268	0,299	0,348	0,379	0,387	0,247	0,122	0,162
	Colinas	0,179	0,192	0,244	0,234	0,246	0,343	0,370	0,374	0,403	0,324	0,206	0,220	0,186
	Imperatriz	0,162	0,130	0,254	0,217	0,195	0,285	0,384	0,456	0,456	0,348	0,239	0,200	0,201
PI	Bom Jesus do Piauí	0,239	0,204	0,219	0,242	0,189	0,141	0,037	0,015	-0,012	0,019	0,067	0,171	0,119
	Vale do Gurguéia	0,158	0,118	0,132	0,135	0,223	0,235	0,152	0,154	0,148	0,189	0,104	0,166	0,122
TO	Araguaína	0,028	0,029	0,064	0,055	0,120	0,133	0,130	0,183	0,225	0,202	0,115	0,141	0,092
	Palmas	0,087	0,075	0,121	0,122	0,314	0,483	0,444	0,415	0,330	0,170	0,107	0,135	0,163
	Pedro Afonso	0,182	0,169	0,241	0,207	0,200	0,249	0,314	0,337	0,364	0,292	0,221	0,273	0,177
	Peixe	0,106	0,094	0,135	0,150	0,202	0,204	0,139	0,132	0,237	0,204	0,115	0,185	0,129
	Porto Nacional	0,103	0,086	0,096	0,109	0,178	0,297	0,269	0,275	0,289	0,192	0,130	0,182	0,126
	Taguatinga	0,080	0,063	0,079	0,089	0,133	0,106	0,116	0,117	0,194	0,247	0,106	0,186	0,114

Os valores destacados em negritos apresentam significância $p \leq 0,05$.

A temperatura mínima anual apresentou tendência significativa ($p \leq 0,05$) de acréscimo em 19 estações meteorológicas da região do Matopiba (Tabela 14). Barra do Corda, Centro Maranhense, registrou a maior tendência de aumento da temperatura mínima anual ($p < 0,0001$ e S 0,347 °C/ano). As localidades de Correntina ($p < 0,0001$ e S -0,023 °C/ano) e Sta. Rita de Cássia ($p < 0,0001$ e S -0,060°C/ano), ambos no Extremo Oeste Baiano, possuem tendências significativas ($p \leq 0,05$) de decréscimo dessa variável no decorrer dos anos.

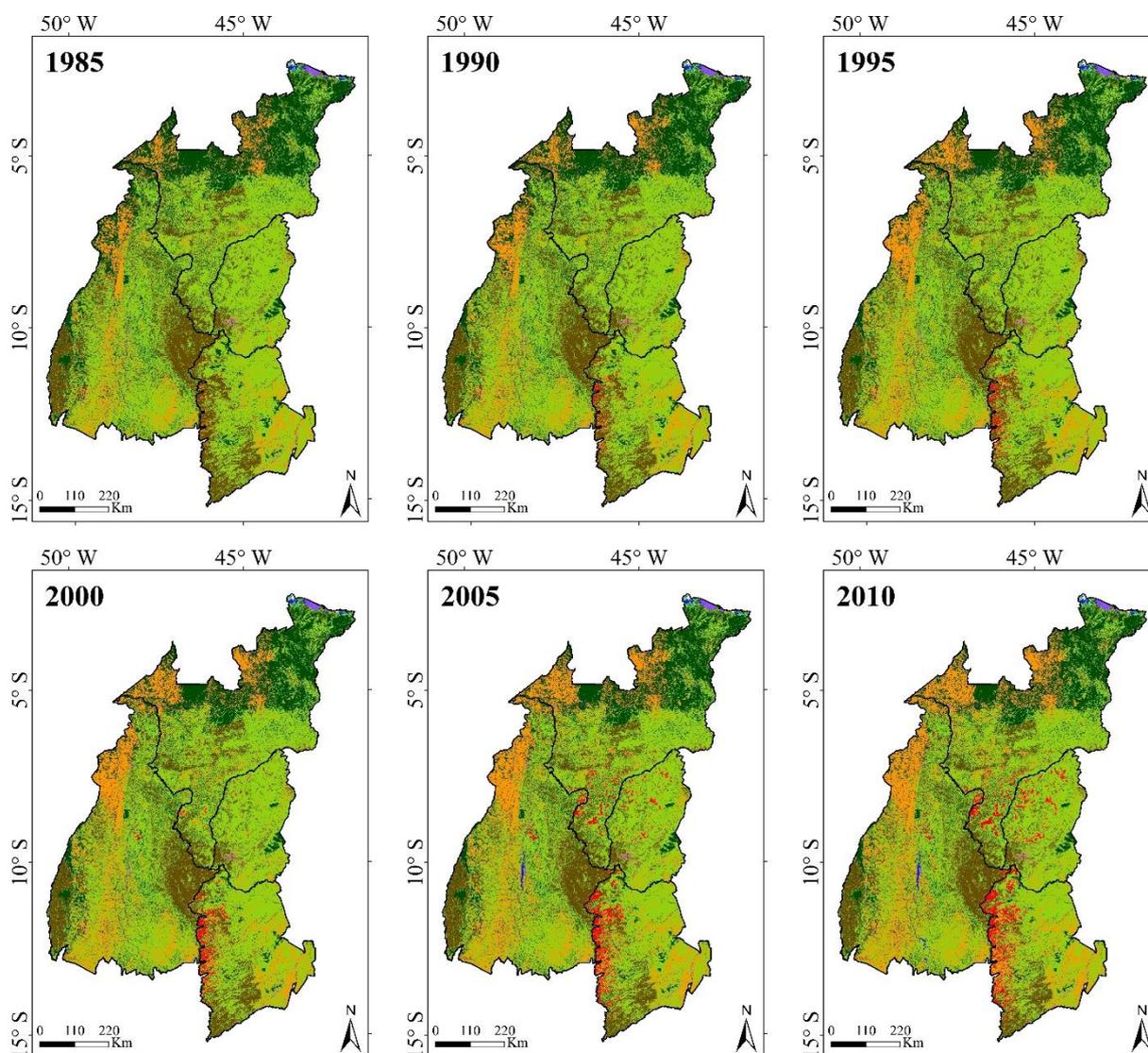
O resultado das tendências na série intra-anual da temperatura mínima foi significativo ($p \leq 0,05$) em maior parte para acréscimo desta variável. O mês de outubro apresentou o maior valor do índice *Mann-Kendall* para tendência de acréscimo da temperatura mínima, na localidade de Barra do Corda, Centro Maranhense ($p < 0,0001$ e S 0,494 °C/ano). No mês de setembro observou-se o menor valor do índice *Mann-Kendall* para tendência de decréscimo da temperatura mínima, na localidade de Bom Jesus do Piauí, Sudoeste Piauiense ($p < 0,0001$ e S -0,225 °C/ano).

Tabela 14. Tendências de temperatura mínima anual e intra-anual analisadas pelo teste *Mann-Kendall* para as estações meteorológicas do Matopiba.

UF	Estações	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
BA	Barreiras	0,227	0,194	0,263	0,200	0,121	0,134	0,067	0,092	0,044	0,139	0,234	0,173	0,095
	Bom Jesus da Lapa	0,347	0,332	0,338	0,290	0,198	0,185	0,205	0,261	0,248	0,286	0,313	0,319	0,196
	Carinhanha	0,307	0,256	0,336	0,245	0,177	0,228	0,212	0,195	0,190	0,145	0,290	0,281	0,157
	Correntina	-0,023	-0,033	0,086	-0,035	-0,063	-0,083	-0,098	-0,086	-0,105	-0,096	-0,005	-0,100	-0,023
	Santa Rita de Cássia	-0,126	-0,142	-0,150	-0,156	-0,073	-0,038	-0,038	-0,006	-0,030	-0,041	-0,046	-0,191	-0,060
MA	Alto Parnaíba	0,133	0,162	0,168	0,127	0,106	0,026	-0,017	0,002	0,014	0,063	0,174	0,082	0,062
	Bacabal	0,213	0,203	0,219	0,190	0,254	0,241	0,212	0,142	0,184	0,195	0,144	0,161	0,190
	Balsas	0,026	0,019	0,026	0,017	0,072	-0,034	0,029	0,079	0,124	0,172	0,153	0,134	0,049
	Barra do Corda	0,386	0,400	0,440	0,461	0,464	0,338	0,333	0,359	0,476	0,494	0,472	0,419	0,347
	Carolina	0,108	0,084	0,189	0,182	0,234	0,173	0,138	0,091	0,193	0,234	0,157	0,128	0,131
	Caxias	0,143	0,190	0,211	0,206	0,314	0,278	0,251	0,178	0,312	0,409	0,378	0,310	0,243
	Chapadinha	0,222	0,256	0,316	0,333	0,353	0,374	0,341	0,290	0,343	0,372	0,325	0,319	0,288
	Colinas	0,062	0,119	0,099	0,082	0,165	0,073	0,084	0,090	0,157	0,207	0,178	0,127	0,090
Imperatriz	-0,093	-0,022	0,028	-0,041	0,084	0,072	0,160	0,059	0,035	-0,044	-0,080	-0,118	-0,008	
PI	Bom Jesus do Piauí	-0,126	0,046	0,001	-0,051	0,040	0,158	0,156	0,034	-0,225	-0,038	0,063	0,118	0,020
	Vale do Gurguéia	0,420	0,354	0,343	0,276	0,269	0,223	0,283	0,312	0,322	0,433	0,415	0,376	0,288
TO	Araguaína	0,116	0,125	0,181	0,169	0,200	0,203	0,173	0,135	0,135	0,138	0,174	0,112	0,101
	Palmas	0,042	0,096	0,147	0,160	0,229	0,321	0,369	0,369	0,385	0,289	0,196	0,133	0,195
	Pedro Afonso	0,177	0,202	0,252	0,260	0,232	0,115	0,033	0,040	0,074	0,238	0,309	0,246	0,137
	Peixe	0,156	0,153	0,155	0,145	0,024	0,042	-0,079	-0,061	-0,015	0,158	0,200	0,144	0,064
	Porto Nacional	0,196	0,202	0,237	0,314	0,253	0,260	0,233	0,195	0,237	0,277	0,281	0,231	0,183
	Taguatinga	0,291	0,230	0,240	0,239	0,247	0,211	0,160	0,156	0,162	0,253	0,166	0,277	0,187

5.1.2 Análise de uso e cobertura da terra

A região do Matopiba sofreu intensas transformações no uso e cobertura da terra ao longo de 35 anos (Figura 14), com ênfase na redução das áreas de floresta e savana para a elevação das áreas de agropecuária, principalmente pelo cultivo de soja. Em 1985, as áreas com vegetação (floresta, savana e outras formações florestais) no Matopiba totalizavam aproximadamente 534 mil km², em 2020, esse valor ficou em torno de 443 mil km².



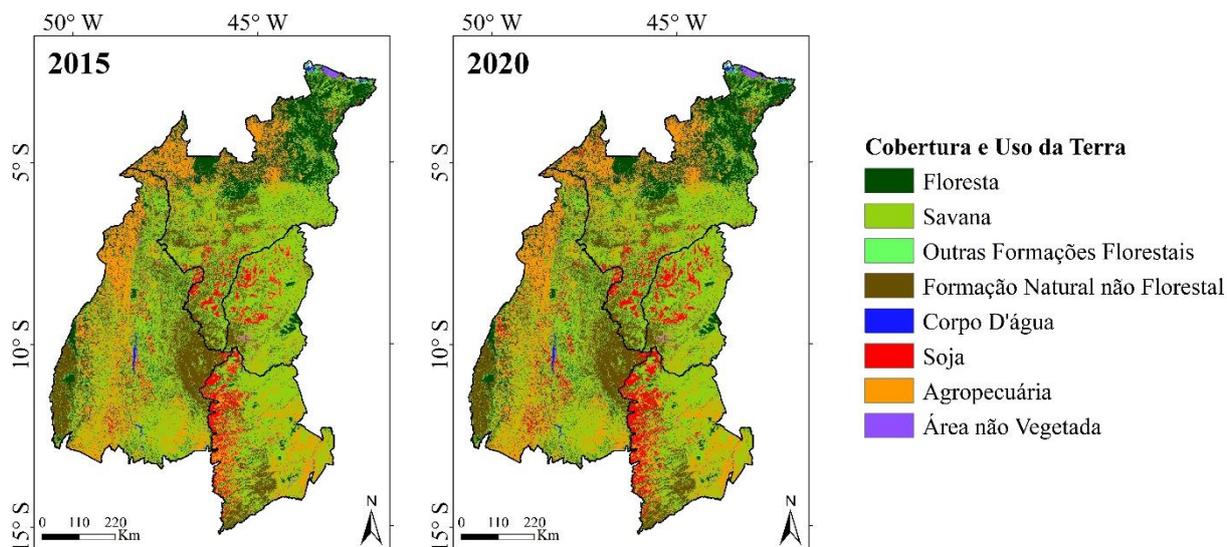


Figura 14. Dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra na região do Matopiba, baseado em dados do MapBiomias.

As atividades agropecuárias no Matopiba (com exceção do plantio de soja, que foi avaliado separadamente), ocupavam uma área de 84 mil km² em 1985. Em 2000, obteve um crescimento territorial de 34 mil km², totalizando 118 mil km². Em 2020, ocupavam um total de 152 mil km². Essa elevação ocorreu principalmente no Ocidental do Tocantins, Centro Maranhense e Oeste Maranhense. A soja, principal cultura do Matopiba, em 1985 ocupava um território de 42 km². Em 2000, a área de soja na região totalizava cerca de 5 mil km². Em um processo de elevada ascensão na região, em 2020 a soja estava em uma área de 41 mil km² no Matopiba. A maior produção da cultura no ano de 2020 foi no Extremo Oeste Baiano, Sul Maranhense e Sudoeste Piauiense.

Em 1985, a formação natural no Matopiba era em torno de 661 mil km², já no ano de 2020 foi totalizado aproximadamente 550 mil km². Ou seja, um avanço de cerca de 111 mil km² da ação antrópica nas áreas de formação natural ao longo de 35 anos na região do Matopiba (Figura 15). Conforme a análise realizada na Figura 16, destacando a redução da formação natural para elevação da ação antrópica em um intervalo de 5 anos para o período de 1985 a 2020, o maior avanço territorial foi observado entre os anos de 2000 e 2005.

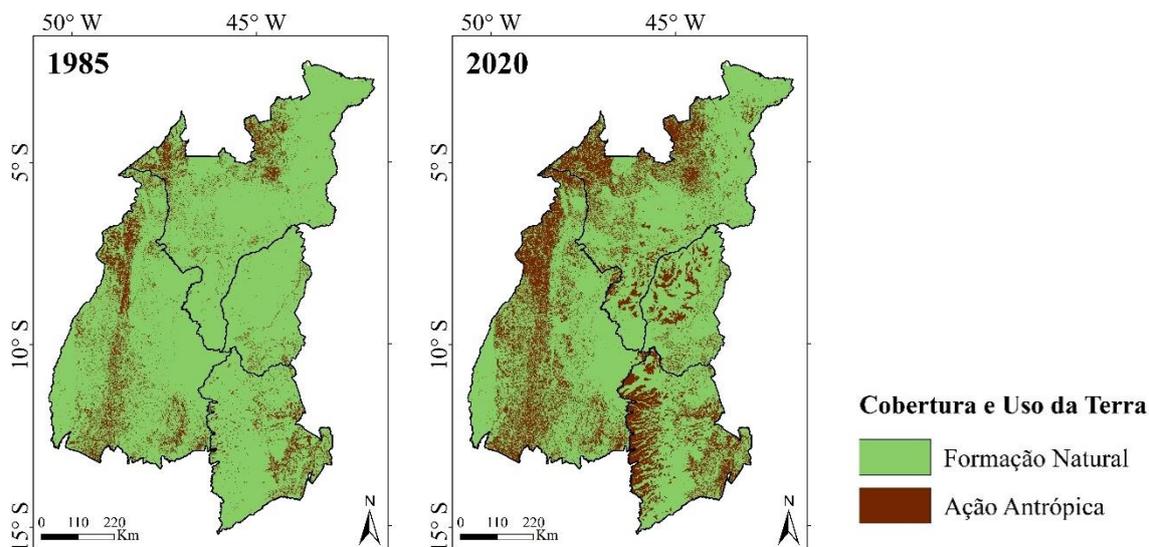


Figura 15. Dinâmica espaço-temporal da formação natural e da ação antrópica na região do Matopiba, baseado em dados do MapBiomas, para os anos de 1985 e 2020.

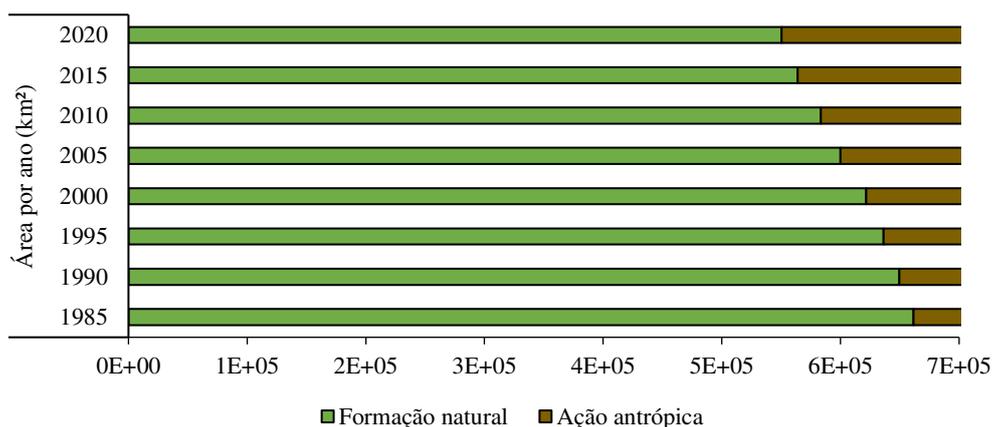


Figura 16. Mudança no uso e cobertura da terra no Matopiba com ênfase na redução da formação natural para elevação da ação antrópica, baseado em dados do MapBiomas, entre os anos de 1985 a 2020.

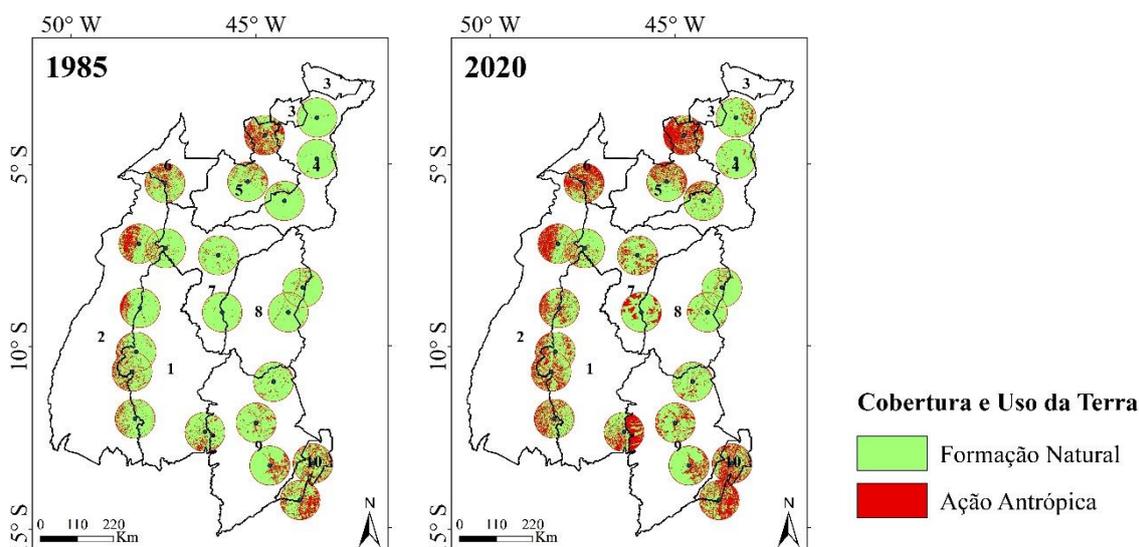


Figura 17. Dinâmica espaço-temporal da formação natural e ação antrópica nos *buffers* de 60 km das estações meteorológicas do Matopiba para os anos de 1985 e 2020, baseado em dados do MapBiomias. Para identificação de mesorregiões e estações meteorológicas, *vide* Figura 12.

Para analisar a alteração da cobertura vegetal devido à elevação da ação antrópica no período de 35 anos no entorno das estações meteorológicas da região do Matopiba, foram realizados *buffers* de 60 km em cada ponto geográfico das 22 estações, quantificados pelas imagens do MapBiomias e reclassificação conforme a Tabela 11 (Figura 17). Em 1985 e em 2020, o entorno da estação Bacabal, Centro Maranhense, apresentou a maior área com ação antrópica de todas as analisadas. O *buffer* com menor área de ação antrópica em 1985 foi o entorno da estação Chapadinha, Leste Maranhense. Em 2020, o entorno da estação Caxias apresentou a menor área com ação antrópica. Ao longo dos 35 anos analisados, o *buffer* que sofreu a maior alteração no uso e cobertura da terra foi o entorno da estação Taguatinga, Oriental do Tocantins.

5.1.3 Análise agrícola

Os dados agrícolas de produção e produtividade da cultura de soja caracterizaram um crescimento da cultura no Matopiba durante a série temporal analisada (1985 – 2020) (Figura 18 e Figura 19, respectivamente). A produção de soja totalizava 143.792 t em 1985. Em 2000 produziu 2.208.221 t. E em 2020 a produção de soja foi de 14.331.294 t. No ano de 1985, a maior produção de soja era no município de

Barreiras e de São Desidério, respectivamente, ambos no Extremo Oeste Baiano. Posteriormente, notou-se uma expansão da produção no sentido de sul para o norte, entre o Extremo Oeste Baiano, Sul Maranhense e Sudoeste Piauiense, as mesorregiões de destaque atualmente na produção de soja no Matopiba. No ano de 2016, ocorreu uma queda de aproximadamente 3,8 milhões de toneladas na produção agrícola de soja comparado ao ano de 2015, o que também foi observado em menor intensidade nos anos de 1987, 1990, 1996, 2006, 2009, 2013 e 2019, equiparados ao ano anterior.

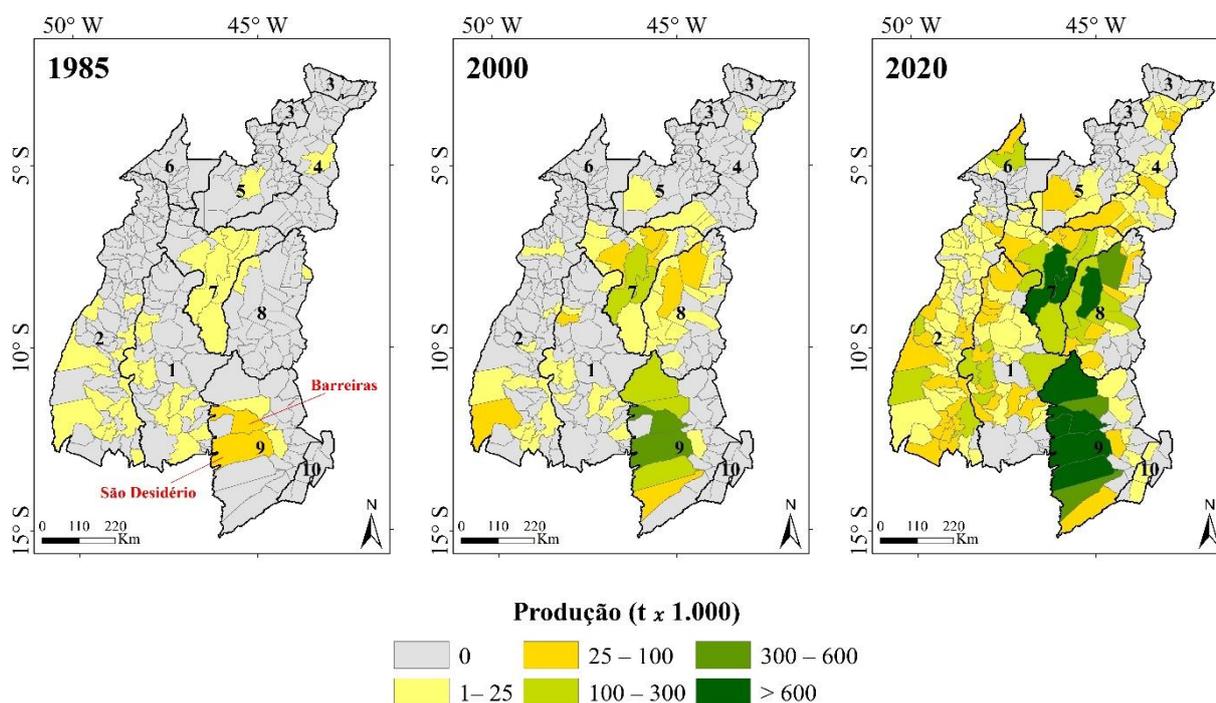


Figura 18. Dinâmica espaço-temporal da produção de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1985, 2000 e 2020. Para identificação de mesorregiões, *vide* Figura 12.

No início da série temporal, em 1985, a produtividade de soja no Matopiba era de 56.861 kg ha⁻¹. Em destaque os municípios Araguacema (2.099 kg ha⁻¹) e Miracema do Tocantins (2.040 kg ha⁻¹), ambos localizados no Ocidental do Tocantins. Em 2020, final da série temporal analisada, a produtividade total de soja foi de 581.760 kg ha⁻¹. Em evidência o município de Figueirópolis (4.000 kg ha⁻¹), também no Ocidental do Tocantins. As mesorregiões Extremo Oeste Baiano e Vale São-Franciscano da Bahia tiveram uma elevada produtividade em comparação as outras mesorregiões do Matopiba, com valor máximo no município de Carinhanha (4.133 kg ha⁻¹).

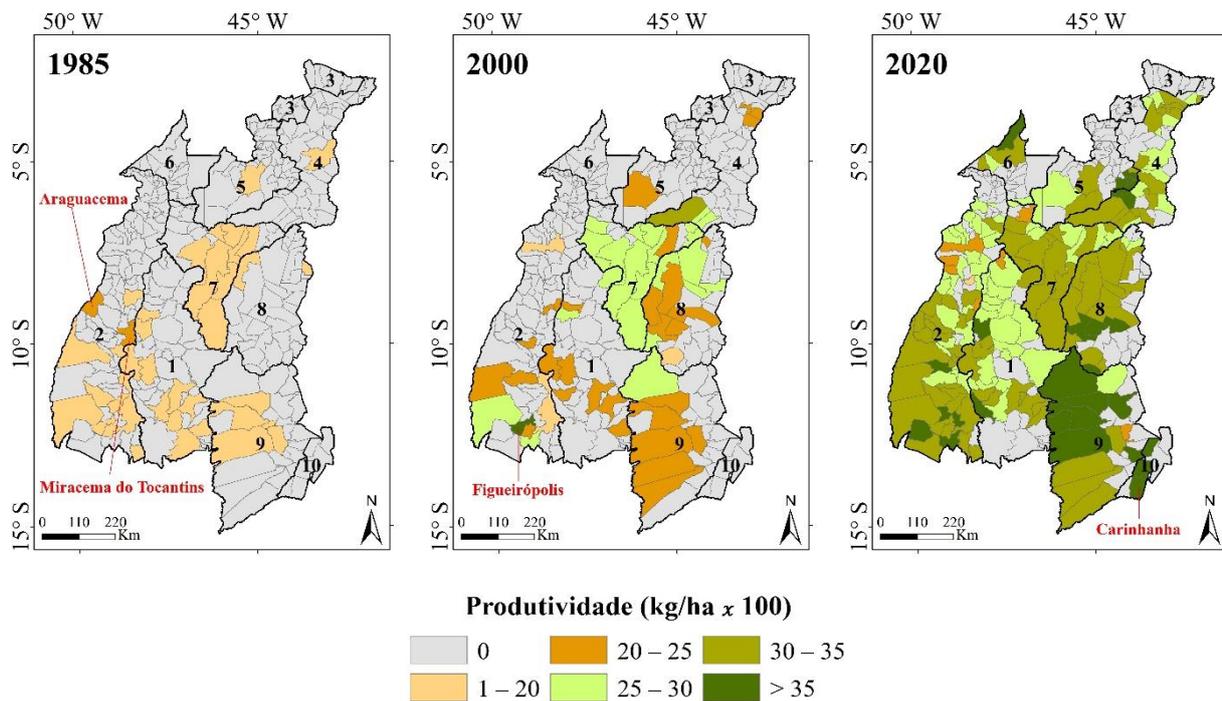


Figura 19. Dinâmica espaço-temporal da produtividade de soja no Matopiba, baseado em dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE para os anos de 1985, 2000 e 2020. Para identificação de mesorregiões, *vide* Figura 12.

A aplicação do teste *Mann-Kendall* na série temporal dos dados agrícolas de produção e produtividade da cultura de soja, no período de 1985–2020, indicou tendência significativa ($p \leq 0,05$) de crescimento para as duas variáveis no decorrer dos próximos anos, resultado em 15 dos 22 municípios considerados (Tabela 15). Os municípios Bom Jesus da Lapa, Sta. R. de Cássia, Barra do Corda e Taguatinga não apresentaram tendências *Mann-Kendall* com significância de $p \leq 0,05$. Os municípios Bacabal, Imperatriz e Vale do Gurgueia não foram considerados na análise por não produzirem soja, segundo dados do IBGE (IBGE, 2021a). Em destaque o município Porto Nacional, localizado na mesorregião Oriental do Tocantins, com a maior tendência de elevar a eficiência da produção agrícola por unidade de área cultivada.

Tabela 15. Tendências de produção e produtividade da cultura de soja analisadas pelo teste *Mann-Kendall* para os municípios com estações meteorológicas na região do Matopiba.

UF	Municípios	Produção	Produtividade	UF	Municípios	Produção	Produtividade
----	------------	----------	---------------	----	------------	----------	---------------

	Barreiras	0,635	0,699		Alto Parnaíba	0,879	0,637
	Bom Jesus da Lapa	-0,182	-0,182		Bacabal	-	-
BA	Carinhanha	0,446	0,456		Balsas	0,889	0,640
	Correntina	0,841	0,610		Barra do Corda	-0,115	-0,093
	Santa Rita de Cássia	0,208	0,214	MA	Carolina	0,828	0,686
	Araguaína	0,449	0,370		Caxias	0,572	0,464
	Palmas	0,763	0,700		Chapadinha	0,808	0,675
TO	Pedro Afonso	0,391	0,532		Colinas	0,698	0,633
	Peixe	0,681	0,641		Imperatriz	-	-
	Porto Nacional	0,707	0,719	PI	Bom Jesus do Piauí	0,828	0,631
	Taguatinga	0,175	0,244		Vale do Guruguéia	-	-

Os valores destacados em negritos apresentam significância $p \leq 0,05$.

5.1.4 Resultado da relação entre as mudanças climáticas, agrícolas, de uso e cobertura da terra e anomalias oceano-atmosfera

A Tabela 16 apresenta o coeficiente de Pearson (r) obtido a partir da correlação entre os resultados das tendências de mudanças climáticas com os resultados agrícolas e de uso e cobertura da terra dos *buffers* das estações meteorológicas do Matopiba. Os valores em negrito representam significância $p \leq 0,05$ de probabilidade (95% de confiança). As análises foram realizadas para as 15 localidades com tendências de elevação da produção agrícola (municípios, estações meteorológicas e seus respectivos *buffers*), ou seja, que apresentam tendência positiva significativa para a produção e a produtividade da cultura de soja (Tabela 15).

Tabela 16. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as tendências de mudanças climáticas com os resultados agrícolas e de uso e cobertura da terra.

	Precipitação <i>Mann-Kendall</i>	Temperatura Máxima <i>Mann-Kendall</i>	Temperatura Mínima <i>Mann-Kendall</i>
Produção – Média	-0,214	-0,101	-0,506
Produção – <i>Mann-Kendall</i>	0,067	0,203	-0,283
Produtividade – Média	0,103	0,043	-0,389
Produtividade – <i>Mann-Kendall</i>	0,002	0,062	-0,044
Mudança de uso e cobertura da terra	0,168	-0,066	-0,010
Formação natural (1985)	-0,359	0,626	0,005
Ação antrópica (1985)	0,359	-0,649	-0,039
Formação natural (2020)	-0,364	0,534	0,009
Ação antrópica (2020)	0,365	-0,557	-0,036

Os valores destacados em negrito apresentam significância $p \leq 0,05$.

As tendências de temperatura máxima apresentaram uma correlação significativa ($p \leq 0,05$) positiva com a formação natural e negativa com a ação antrópica para os anos de 1985 e 2020 nos *buffers* das estações meteorológicas do Matopiba. A correlação observada não implica necessariamente em uma relação causal. É importante destacar que as áreas correlacionadas foram os *buffers* de 60 km ao entorno das estações meteorológicas convencionais do INMET. Para garantir a confiabilidade das medições climáticas, o INMET define uma série de critérios rigorosos para a instalação e o monitoramento das estações, incluindo a ausência de interferências antrópicas no entorno, sendo um fator crucial que pode comprometer a qualidade e a precisão dos dados coletados. Ao minimizar as influências antrópicas, é possível obter dados mais precisos sobre as condições climáticas naturais, facilitando a compreensão e a previsão do clima.

As correlações entre as tendências de mudanças climáticas com as médias e tendências agrícolas de produção e produtividade da cultura de soja não apresentaram significância $p \leq 0,05$. Ou seja, as tendências de alterações climáticas identificadas não possuem uma relação linear forte com a produção e a produtividade agrícola para essas localidades. A falta de uma correlação significativa pode ser explicada pela presença de fatores intermediários, como as melhorias genéticas e tecnológicas no Matopiba, que no decorrer dos anos minimizam os efeitos das alterações climáticas na agricultura da região.

A Tabela 17 apresenta a correlação de Pearson (r) obtida entre a produção e a produtividade total anual de soja dos municípios do Matopiba e os índices *El Niño* Multivariado (MEI), Oscilação Decadal do Pacífico (PDO) e Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO). A análise apresentou uma correlação positiva e significativa ($p \leq 0,05$) entre a AMO e os dados agrícolas de soja. Ou seja, quando a AMO está em fase positiva, com temperaturas do Atlântico Norte mais quentes que a média, observa-se um aumento na produção e na produtividade de soja devido a maior disponibilidade de água para a cultura e temperaturas mais amenas.

Não houve correlação significativa ($p \leq 0,05$) entre as variáveis agrícolas de soja e os índices PDO e MEI, o que pode ser explicado pela adaptação e resiliência climática dos agricultores no cultivo de soja na região. Como também, a grande extensão territorial do Matopiba que possibilita resultados distintos em anos de *El Niño*. Por exemplo, as áreas ao norte do Matopiba tendem a ter uma redução mais acentuada na precipitação, enquanto áreas ao sul podem ter uma redução menor na precipitação.

Tabela 17. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os dados de produção e produtividade agrícola de soja com as anomalias oceano-atmosfera.

	Média da Produção	Média da Produtividade
Oscilação Decadal do Pacífico (PDO)	-0,108	-0,186
<i>El Niño</i> Multivariado (MEI)	-0,167	-0,242
Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO)	0,553	0,621

Os valores destacados em negritos apresentam significância $p \leq 0,05$.

5.2 Discussão

Estudos sobre mudanças climáticas são imprescindíveis nas tomadas de decisões dos planejamentos e desenvolvimentos agrícolas locais, regionais e globais. É essencial o conhecimento dos padrões e tendências de variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, para analisar o desempenho de culturas ao longo do tempo. Vários estudos evidenciaram que o clima da Terra mudou em diversas escalas (IPCC, 2021).

Por meio de um conjunto de dados analisados por densas redes observacionais, os resultados mostram claramente que o nosso planeta está aquecendo (Bathke et al., 2014; IPCC, 2021). As alterações na temperatura e na precipitação representam apenas alguns indicadores primários de uma mudança climática, mas afetam significativamente a sociedade (Santos et al., 2022). Por isso, as análises realizadas neste estudo evidenciando as mudanças climáticas e sua relação com a produção e produtividade da cultura de soja, fornecem importantes subsídios para o desenvolvimento da agricultura na região do Matopiba, principalmente para o desenvolvimento ambientalmente sustentável.

A elevação da temperatura causa diversas consequências na agricultura, como o aumento das taxas de evapotranspiração, no qual a cultura necessita de um maior consumo de água, como também, a redução do ciclo das culturas, tornando-as mais sensíveis à deficiência hídrica (Zhu & Troy, 2018). Os solos de textura arenosa, de baixa disponibilidade hídrica, são mais suscetíveis aos impactos da elevação da temperatura, o que leva a uma intensa preocupação nas áreas do Nordeste brasileiro. Para o desenvolvimento de soja no Brasil, a temperatura ideal é de 30 °C, com condições ótimas entre 20 °C e 30 °C (Embrapa, 2013). O desenvolvimento é baixo ou nulo em temperaturas menores ou iguais a 10 °C, as temperaturas baixas podem provocar atrasos nas diferentes fases da cultura (Marcos Filho, 1986).

Temperaturas acima de 40 °C causam perdas na floração, diminuição na aptidão de retenção das vagens, podendo provocar florescimento precoce, distúrbios na frutificação e aceleração na maturação dos grãos de soja, ocasionando reduções na produção. A deficiência hídrica no período de floração e enchimento de grãos causam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático, enrolamento das folhas e queda prematura de folhas, flores e vagens, acarretando em perda no rendimento de grãos (Embrapa, 2013). Segundo Assad et al. (2016), ao realizar projeções futuras de temperatura e precipitação estimadas por modelos climáticos globais e regionais, é esperada uma redução de 66% na área destinada à produção de soja no Brasil e uma redução de 85% das áreas aptas para a produção de milho até 2050, principalmente o milho de segunda safra.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), criada com o objetivo de criar modelos tecnológicos para a agricultura e pecuária do país, lançou uma cultivar de soja que atendeu às necessidades do Oeste Baiano e das outras áreas do Matopiba. A cultivar apresenta tolerância às variações climáticas e potencial de atingir altas produtividades mesmo em regiões com ocorrência de veranicos frequentes. Os curtos períodos de estiagem durante a época de chuvas prejudicam o desenvolvimento de soja, ocasionando perdas aos agricultores (Embrapa, 2019a). Dessa forma, as análises das tendências climáticas auxiliam nas pesquisas de melhoramento genético e tecnológico de culturas agrícolas, como também é possível notar a adaptação e resiliência dos agricultores na região do Matopiba na produção e produtividade de soja, onde se têm tendências de crescimento agrícola em cenário de mudanças climáticas.

O uso da tecnologia digital nas propriedades rurais torna a agricultura mais competitiva e com maior agregação de valor (Bolfé, 2023). O modelo agrícola brasileiro, intensamente apoiado em ciência e conhecimento, inseriu o Brasil em destaque na produção de alimentos nos trópicos. A conjunção das condições do solo, clima, relevo, ciência, tecnologia, políticas públicas e a competência dos agricultores tornaram o Brasil um dos líderes mundiais na produção e exportação agrícola (Bolfé, 2023). As práticas da agricultura brasileira ganham mais equilíbrio nas três vertentes da sustentabilidade (econômica, social e ambiental), em linha com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Lopes, 2023).

A Agenda 2030, instituída pela Organização das Nações Unidas (ONU), criou os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para promover um plano de ação em busca da prosperidade e proteção do planeta. Nesse contexto, os resultados obtidos

nesse estudo servem de subsídios para o poder público e privado no planejamento e ações de alcance dos objetivos de fome zero e agricultura sustentável (segundo ODS); indústria, inovação e infraestrutura (nono ODS); consumo e produção responsáveis (décimo segundo ODS); ação contra a mudança climática global (décimo terceiro ODS); e vida terrestre (décimo quinto ODS) (Machado et al., 2022; ONU, 2024).

Matopiba é considerada uma das últimas grandes fronteiras agrícolas do Brasil. A produção de grãos na região já representa 13% da produção total no Brasil (Silva et al., 2020b), sendo a soja a principal cultura agrícola do Matopiba (MAPA, 2023). Segundo Araújo et al. (2019), a região do Matopiba apresentou um crescimento expressivo na produção da cultura de soja durante a série temporal analisada (1990–2015). Os autores observaram que a produção e a produtividade de soja seguem padrões espaciais que refletem aptidão local e regional para a cultura. As zonas mais produtivas de soja estiveram localizadas na região do Extremo Oeste Baiano, Sul Maranhense e Sudoeste Piauiense (Araújo et al., 2019), em concordância com o resultado observado no atual estudo, no qual foi constatado tendências de crescimento agrícola nos municípios de Barreiras, Correntina, Balsas, Alto Parnaíba, Carolina e Bom Jesus do Piauí, localizados nas mesorregiões citadas por Araújo et al. (2019).

O atual estudo concluiu que, no ano de 2020, as mesorregiões Extremo Oeste Baiano e Vale São-Franciscano da Bahia apresentaram destaque na produtividade da cultura de soja. Isto também observado em um estudo da Embrapa, no qual foi observado que, entre as safras 2011/12 e 2017/18, houve um aumento de 99% na produção de soja da Bahia, decorrente da expansão em área (43,7%) e da produtividade recorde obtido na safra 2017/18 (3.960 kg ha⁻¹) (Embrapa, 2019b). Esse resultado foi atribuído principalmente às condições climáticas favoráveis, geografia do Extremo Oeste Baiano e adaptação de tecnologias às suas condições edafoclimáticas.

Nos cenários de mudanças climáticas, o aprimoramento de pacotes tecnológicos oferece diversos benefícios como a mitigação dos riscos das mudanças climáticas e a intensificação do uso do solo de forma mais eficiente e sustentável (Dou et al., 2023). Segundo Hirakuri et al. (2017), são necessárias tecnologias mais adaptadas à realidade local do Matopiba em razão das características edafoclimáticas da região. Estudos de mudanças climáticas em áreas de intensa atividade agrícola auxiliam na adaptação de culturas, na produção de alimentos e na preservação de áreas ambientais (Sentelhas et al., 2015).

Chou et al. (2014) simularam alguns cenários de mudanças climáticas em todo o Nordeste do Brasil e, em um desses cenários, foi observada uma redução da precipitação, resultado que concorda com o presente estudo. Silva et al. (2016) analisaram as tendências climáticas de precipitação e temperatura no estado do Maranhão por meio do teste *Mann-Kendall*. Os resultados evidenciaram uma elevação na temperatura em todas as estações do estado. Reis et al. (2020c) também observaram evidências de um aumento nas temperaturas na região do Matopiba. Salvador e Brito (2018) analisaram as variabilidades climáticas de temperatura na região do Matopiba por meio dos índices de extremos climáticos e observaram um processo de aquecimento significativo nas últimas três décadas, com uma tendência positiva e significativa para a maior frequência de dias quentes durante o ano para a maioria das estações analisadas. Esses resultados corroboram com o encontrado nesta pesquisa, no qual todas as estações do Matopiba apresentam tendências significativas de elevação da temperatura máxima.

Estudos de tendências climáticas intra-anuais na região do Matopiba são escassos, apesar de relevantes. A análise da dinâmica intra-anual das mudanças climáticas é muito importante para os produtores agrícolas nas tomadas de decisões, principalmente na realização do calendário agrícola mensal de culturas (CONAB, 2023). No Matopiba, é comum a produção agrícola ser realizada por meio da intercalação com outras culturas, de forma a garantir maiores ganhos para o produtor, principalmente devido à sazonalidade de culturas. Segundo Pino (2014), as mudanças climáticas na sazonalidade agrícola induzem na oferta dos cultivares e no preço de diferentes níveis de comercialização, causam deficiências nas demandas requeridas pelo mercado, custos com importações e sobrecarga na infraestrutura de transporte. Portanto, o conhecimento dos dados de tendências intra-anuais é interessante para que cultivares possam atingir níveis considerados ótimos para o seu potencial genético de produção e produtividade agrícola.

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), criado pelo governo brasileiro, é uma ferramenta de gestão de risco que auxilia sobre as épocas ideais para o cultivo de espécies agrícolas, ponderando as variações espaço-temporais do clima para minimizar os riscos de perda de produtividade (Guimarães et al., 2020). O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) lança portarias anuais da ZARC de cada estado brasileiro, contendo a lista de cultivares indicadas para cada região e a relação de municípios com os seus respectivos calendários de plantio (MAPA, 2024).

Os resultados encontrados nessa pesquisa, como também a metodologia aplicada, pode auxiliar na construção das novas portarias do ZARC divulgadas anualmente.

A interação entre o oceano e a atmosfera é fundamental para o clima da Terra. Compreender o impacto dessas interações é crucial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e garantir processos de mitigação. Estudos mostram que o fenômeno *El Niño* Oscilação Sul e a variabilidade da temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical desempenham papel fundamental na alternância entre anos secos e chuvosos, bem como na cobertura espacial da seca no Nordeste brasileiro (Kayano & Andreoli, 2007; Marengo et al., 2017; Timmermann et al., 2018; Utida et al., 2019).

Segundo Reis et al. (2020c), a precipitação do Matopiba é modulada pela ocorrência de sistemas atmosféricos em diferentes escalas aliados a um conjunto de fatores ecossistêmicos e fisiográficos (transição entre a Amazônia e o semiárido). O presente estudo identificou que as fases positivas da Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO) favorecem o aumento da produção e da produtividade de soja, principalmente pela elevação da precipitação na região. Marengo & Souza (2018) observaram que as secas mais recentes de 2005, 2010 e 2016 foram associadas ao Oceano Atlântico Tropical Norte e somente a seca de 2016 aconteceu em um ano sob influência do *El Niño*.

As práticas agrícolas avançadas como irrigação eficiente e manejo adequado de solos ajudam a mitigar os impactos negativos do clima e manter as produções e as produtividades elevadas, mesmo em condições adversas. Além disso, a pesquisa contínua e o desenvolvimento de variedades de culturas resistentes ao estresse hídrico e às variações climáticas contribuem para a adaptação e resiliência da agricultura na região. Portanto, a construção de um conjunto de dados sobre variáveis relacionadas ao clima e à produção agrícola em uma escala mais precisa de agregação espacial é essencial para avaliar diretamente o impacto das mudanças climáticas na agricultura, a adaptação e a resiliência climática de culturas agrícolas. Os resultados deste estudo contribuem significativamente para a compreensão dos processos de mudanças climáticas e seus possíveis efeitos na produção e produtividade agrícola na cultura de soja na região do Matopiba. Esta análise, baseada em evidências, fornece uma base para o desenvolvimento de políticas eficazes relacionadas ao clima e ajudar a mitigar os impactos adversos das mudanças climáticas nos processos ambientais, agrícolas e socioeconômicos.

O Matopiba, localizado entre o Norte e Nordeste brasileiro, área de transição entre os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga, possui elevado interesse ambiental, econômico, social, agrícola e hídrico. Em consequência de sua importância, o governo brasileiro instituiu, em 6 de maio de 2015, o Decreto Federal nº 8.447 que criou o Plano de Desenvolvimento Agropecuário para o Matopiba, com o objetivo de promover políticas públicas para o desenvolvimento econômico e sustentável na região. É nítida a relevância do Matopiba para o Brasil e para o mundo na produção agroalimentar. Por isso, trabalhos de interesse científico no Matopiba agregam grande valor, principalmente por ainda existir inúmeros questionamentos a serem respondidos na região sobre processos como expansão, retração, diversificação e intensificação agrícola.

Neste estudo, mudanças climáticas puderam ser evidenciadas na região do Matopiba mediante a aplicação do teste de tendência *Mann-Kendall* nas variáveis de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima. Foi possível concluir que a temperatura máxima anual e intra-anual possui uma tendência de aumento significativo na região. A temperatura mínima anual possui tendência significativa de elevação em 19 estações meteorológicas e de declínio em duas estações. A temperatura mínima intra-anual possui tendência de acréscimo dessa variável para a maioria das localidades analisadas. A tendência de precipitação anual se mostrou significativa para decréscimo em 20 estações meteorológicas do Matopiba. O mês de dezembro possui tendência significativa de declínio da precipitação em 16 estações meteorológicas da região.

O uso e cobertura da terra no Matopiba sofreu intensas transformações, principalmente pela redução das áreas de floresta e savana ao longo de 35 anos (1985–2020). Em destaque, o aumento da atividade agropecuária na região, principalmente pelo cultivo da cultura de soja. Houve uma mudança da cobertura de formação natural para usos antrópicos de aproximadamente 111 mil km² no período analisado. A produção de soja na região passou de 143.792 t em 1985 para 14.331.294 t em 2020. A produtividade da cultura no Matopiba foi de 56.861 kg ha⁻¹ em 1985 para 581.760 kg ha⁻¹ em 2020. Dos 22 municípios que possuem estações meteorológicas no Matopiba, 15 possuem tendências significativas de elevação da produção e da produtividade agrícola de soja.

As tendências de produção e produtividade da cultura de soja não apresentaram uma correlação positiva significativa com as tendências de mudanças climáticas de precipitação e temperatura na região do Matopiba. A produção e a produtividade total anual de soja de alguns municípios do Matopiba apresentaram uma correlação positiva e significativa com a Oscilação Mutidecadal do Atlântico (AMO). As análises realizadas neste estudo evidenciam a adaptação e resiliência climática da produção e da produtividade de soja na região do Matopiba, no qual possui tendências de crescimento agrícola em cenários de mudanças climáticas.

Portanto, os questionamentos realizados nesta tese de doutorado são relevantes e atuais. Com os resultados obtidos, foi possível constatar que existem mudanças climáticas regionais e locais, anuais e intra-aneais na precipitação, temperatura máxima e mínima no Matopiba. Essas mudanças são distintas espaço-temporalmente, e identificar onde e como essas mudanças estão ocorrendo é de grande relevância para o planejamento agrícola e econômico do Brasil e do mundo. O método de análise de tendências aplicado a dados para avaliar as mudanças climáticas é válido.

Defende-se estudos futuros para o contínuo monitoramento da evolução das tendências climáticas, pois novas estações meteorológicas devem ter suas tendências analisadas e com medidas de mitigação, algumas tendências podem ser revertidas. Recomenda-se também a continuidade do desenvolvimento de variedades de culturas adaptadas às condições do Matopiba, bem como a construção de um conjunto de dados abrangentes sobre variáveis climáticas, como a umidade do ar e as reservas de umidade do solo, para uma avaliação mais completa das condições de crescimento das culturas. Como também, a análise de outras *commodity* agrícola, como o milho.

O atual estudo fornece subsídios nas tomadas de decisões (públicas e privadas) e para o planejamento agrícola na escala global, regional e local, além de contribuir em novas pesquisas e análises nas áreas ambiental, hídrica, social e econômica em uma região de interesse mundial. As evidências deste estudo são essenciais para produtores agrícolas, principalmente para a construção do calendário agrícola de culturas, assim como para pesquisadores de melhoramento genético de cultivares, de forma a otimizar o potencial produtivo agrícola e manter elevadas a produção e a produtividade das culturas ao longo do tempo. Como também, auxiliar na mitigação dos impactos adversos das mudanças climáticas nos processos ambientais, agrícolas e socioeconômicos na região, contribuindo para um planejamento agrícola e ambiental mais sustentável no Matopiba.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abel, G. H. Response of soybean to dates of planting in the Imperial Valley of Califórnia. **Agonomy Journal**, v. 53, n. 2, p. 95–98, 1968.

Aboah, J.; Wilson, M. M. J.; Bicknell, K.; Rich, K. M. Ex-ante impact of on-farm diversification and forward integration on agricultural value chain resilience: A system dynamics approach. **Agricultural Systems**, v. 189, 103043, 2021.

Abrahams, D. Conflict in abundance and peacebuilding in scarcity: Challenges and opportunities in addressing climate change and conflict. **World Development**, v. 132, 104998, 2020.

Abrahão, G. M.; Costa, M. H. Evolution of rain and photoperiod limitations on the soybean growing season in Brazil: The rise (and possible fall) of double-cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256, p. 32–45, 2018.

Adzawla, W.; Azumah, S. B.; Anani, P. Y.; Donkoh, S. A. Analysis of farm households' perceived climate change impacts, vulnerability and resilience in Ghana. **Scientific African**, v. 8, e00397, 2020.

Agrosatélite Applied Geotechnology Ltd. **Geospatial analysis of soy expansion in the Cerrado Biome: 2000/01 to 2021/22 - An update and reanalysis with the new boundary of the biome**. Florianópolis/SC, Brazil, 2021, 30 p.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma, Itália: FAO. Irrigation and Drainage Paper, v. 56, 1998, 297 p.

Alvarez Filho, A. Botânica e desenvolvimento. In: Satos, O. S. (coord.) **A cultura da soja – 1**. Rio de Janeiro: Globo, p. 27–35, 1988.

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Moraes, G.; Leonardo, J.; Sparovek, G. Köppens climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p.711–728, 2014.

Alves, M. T. R.; Piontekowski, V. J.; Buscardo, E.; Pedlowski, M. A.; Sano, E. E.; Matricardi, E. A. T. Effects of settlement designs on deforestation and fragmentation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 109, 105710, 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas. 2006. **Catálogo de Metadados da ANA. Sub-bacias do Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>> Acesso em: 22 fev. 2021.

Anderson, M. C.; Zolin, C. A.; Sentelhas, P. C.; Hain, C. R.; Semmens, K.; Yilmaz, M. T. et al. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, n. 174, p. 82–99, 2016.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil). **Painel Dinâmico Produtores de Biodiesel**. 2023. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: 11 jan. 2022.

Aragão, A.; Contini, E. **O agro no Brasil e no mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020**. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

Araújo, M. L. S. A. **Dinâmica espaço-temporal da cultura de soja na região do Matopiba, Brasil (1990-2015)**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica), Brasília, UnB, 2018, 84 p.

Araújo, M. L. S. A.; Sano, E. E.; Bolfe, E. L.; Santos, J. R. N.; Santos, J. S.; Silva, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, p. 57–67, 2019.

Arguez, A.; Vose, R. S. The definition of the standard WMO climate normal: The key to deriving alternative climate normal. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, p. 699–704, 2011.

Assad, E. D.; Martins, S. C.; Beltrão, N. E. M.; Pinto, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 1–8, 2013.

Assad, E. D.; Oliveira, A. F.; Nakai, A. M.; Pavão, E.; Pellegrino, G.; Monteiro, J. E. Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas. In: Teixeira, B. S.; Orsini, J. A. M.; Cruz, M. R. **Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil**, Brasília: MCTI, p. 127–187, 2016.

Assad, E. D. et al. **Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas**. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. 2019. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>>. Acesso em: 01 jul. 2021.

Assis, T. **Dinâmica espaço-temporal da cultura de soja no Cerrado, analisada por meio de estatística espacial e dados físicos, socioeconômicos e ambientais**. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica), Brasília, UnB, n. 56, 2020, 97 p.

Assunção, J.; Chein, F. Climate change and agricultural productivity in Brazil: future perspectives. **Environment and Development Economics**, v. 21, p. 581–602, 2016.

Barthélemy, E. J.; Thango, N. S.; Hohne, J.; Lippa, L.; Kolias, A.; Germano, I. M. **World Neurosurgery**, v. 146, p. 280–284, 2021.

Bathke, D. J.; Oglesby, R. J.; Rowe, C. M.; Whilhite, D. A. **Understanding and assessing climate change: implications for Nebraska**. Lincoln, 2014, 73 p.

Benabderrazik, K.; Kopainsky, B.; Monastyrnaya, E.; Thompson, W.; Tazi, L.; Joerin, J.; Six, J. Climate resilience and the human-water dynamics. The case of tomato production in Morocco. **Science of the Total Environment**, v. 849, 157597, 2022.

Bergamaschi, H.; Berlato, M. A.; Westphalen, S. L. Época de semeadura de soja no Rio Gande do Sul: avaliação e interpretação dos ensaios ecológicos de soja. **IPAGRO Informa**, v. 18, p. 7–4, 1977.

Bhering, M. C. **Influência de épocas de plantio sobre algumas características agronômicas e qualidade das sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 57 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1989.

Board, J. E.; Kahlon, C. S. Soybean yield formation: what controls it and how it can be improved. In: El-Shamy, H. A. (Ed.) **Soybean physiology and biochemistry**. Rijeka, Croatia: IntechOpen. p. 1–36, 2011.

Bocchiola, D.; Brunetti, L.; Soncini, A.; Polinelli, F.; Gianinetto, M. Impact of climate change on agricultural productivity and food security in the Himalayas: A case study in Nepal. **Agricultural Systems**, v. 171, p. 113–125, 2019.

Bolfe, E. L. **Transformação digital e o futuro sustentável da agricultura**. In. Olhares para 2030: Desenvolvimento Sustentável. Embrapa, 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/olhares-para-2030>> Acesso em: 04 abr. 2024.

Bombardi, R. J.; Carvalho, L. M. V. IPCC global coupled model simulations of the South America monsoon system. **Climate Dynamics**, v. 33, p. 893–916, 2009.

Bonetti, L. P. Distribuição da soja no mundo. In: Miyasaka, S.; Medina, J. C. **A soja no Brasil**. Campinas, Instituto de Tecnologia de Alimentos, p. 1–6, 1981.

Boykoff, M.T.; Frame, D.; Randalls, S. Discursive stability meets climate instability: A critical exploration of the concept of ‘climate stabilization’ in contemporary climate policy. **Global Environmental Change**, v. 20, p. 53–64, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2014/2015 a 2024/2025**. Assessoria de Gestão Estratégica. Brasília, 2015, 133 p.

Brito, H. C.; Rufino, I. A. A.; Djordjević, S. Cellular automata predictive model for man-made environment growth in a Brazilian semi-arid watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, 323, 2021.

Brown, J. C.; Koeppe, M.; Coles, B.; Price, K. P. Soybean production and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: The case of Vilhena, Rondônia, Ambio. **A Journal of the Human Environment**, v. 34, n. 6, p. 462–469, 2005.

Brumatti, L. M.; Pires, G. F.; Santos, A. B. Challenges to the adaptation of double cropping agricultural systems in Brazil under changes in climate and land cover. **Atmosphere**, v. 11, 1310, 2020.

Buchanan, T.; Ackland, J.; Lloyd, S.; Linden, S. V. D.; de-Wit, L. Clear consensus among international public for government action at COP26: Patriotic and public health frames produce marginal gains in support. **Climatic Change**, 2022.

Buitenhuis, Y; Candel, J. J. L.; Termeer, K. J. A. M.; Feindt, P. H. Does the common agricultural policy enhance farming systems' resilience? Applying the Resilience Assessment Tool (ResAT) to a farming system case study in the Netherlands. **Journal of Rural Studies**, v. 80, p. 314–327, 2020.

Câmara, G. M. de S. **Efeito do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (Glycine max (L.) Merrill)**. 266 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1991.

Câmara, G. M. S. Origem, difusão geográfica e importância da soja. In: Câmara, G. M. S. (Org.). **Soja: Tecnologia da Produção**. 1ª ed, Piracicaba, p. 1–25, 1998a.

Câmara, G. M. S. Ecofisiologia da soja e rendimento. In: Câmara, G. M.S. **Soja: tecnologia de produção**. Piracicaba: ESALQ, p. 256–277, 1998b.

Campbell, B. M.; Vermeulen, S. J.; Aggarwal, P. K.; Corner-Dolloff, C.; Girvetz, E.; Loboguerrero, A. M.; Wollenberg, E. Reducing risks to food security from climate change. **Global Food Security**, v. 11, p. 34–43, 2016.

Carlos, S. M.; Cunha, D. A.; Pires, M. V. Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57 n. 3, p. 455-471, 2019.

Castro, P. R. R. Efeitos de fitoreguladores na produtividade da soja (*Glycine max* cv. Davis) em competição. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 1, p. 289–298, 1981.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. 2023. **PIB do Agronegócio Brasileiro**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Avaliado em: 29 fev. 2024.

Chen, Y.; Moufouma-Okia, W.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A. Recent progress and emerging topics on weather and climate extremes since the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 43, p. 35–59, 2018.

Cheng, Y.; Sinha, A.; Ghosh, V.; Sengupta, T.; Luo H. Carbon tax and energy innovation at crossroads of carbon neutrality: Designing a sustainable decarbonization policy. **Journal of Environmental Management**, v. 294, 112957, 2021.

Chou, S. C.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Pilotto, I.; Gomes, J. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512–525, 2014.

Chou, S. C.; Silva, A.; Lyra, A.; Mourão, C.; Dereczynski, C.; Rodrigues, D.; Campos, D. Simulações em alta resolução das mudanças climáticas sobre a América do Sul. In: Teixeira, B. S.; Orsini, J. A. M.; Cruz, M. R. **Modelagem Climática e**

Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. p. 49-90, 2016.

CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Panorama do Agro.** 2020. Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

Coalizão Clima, Floresta e Agricultura (Coalizão). **Brazil: land use and land cover data and intelligence.** 2019, 14 p.

Comtrade. Chatham House. **Resource Trade. Earth.** 2021. Disponível em: <<https://resourcetrade.earth>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Safra 2018/19 - Oitavo Levantamento.** 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 28 out. 2020.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **12º Levantamento – Safra 2020/21.** 2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> Acesso em: 12 set. 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **12º Levantamento – Safra 2022/23.** 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> Acesso em: 12 jan. 2024.

COP26. 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. 2021. **The Glasgow climate pact.** Disponível em: <<https://ukcop26.org/the-glasgow-climate-pact/>> Acesso em: 08 ago. 2022.

COP27. 27ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. 2022. **COP 27.** Disponível em: <<https://unfccc.int/event/cop-27>> Acesso em: 09 jan. 2023.

COP28. 28ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. 2023. **COP28**. Disponível em: < <https://unfccc.int/cop28> > Acesso em: 15 jan. 2024.

Costa, J. A. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Ed. do autor, 1996, 233 p.

Costa, M. H.; Fleck, L. C.; Cohn, A. S.; Abrahão, G. M.; Brando, P. M.; Coe, M. T.; Soares-Filho, B. S. Climate risks to Amazon agriculture suggest a rationale to conserve local ecosystems. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 17, n. 10, p. 584-590, 2019.

Cremones, P. A., Feroldi, M., Feiden, A., Teleken, J. G., Gris, D. J., Dieter, J., et al. Current scenario and prospects of use of liquid biofuels in South America. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 352–362, 2015.

Cunha, D. A.; Coelho, A. B.; Féres, J. G. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, p. 57–79, 2015.

Dai, S.; Shulski, M. D.; Hubbard, K. G.; Takle, E. S. A spatiotemporal analysis of Midwest US temperature and precipitation trends during the growing season from 1980 to 2013. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 517–525, 2016.

Dall'agnol, A.; Rosseing, A. C.; Lazzarotto, J. J.; Hiraçuri, M. H.; Oliveira, A. B. de. O complexo agroindustrial da soja brasileira. **Circular Técnica**, n. 3, p. 1–12, 2007.

Dardonville, M.; Bockstaller, C.; Therond, O. Review of quantitative evaluations of the resilience, vulnerability, robustness and adaptive capacity of temperate agricultural systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, 125456, 2021.

Delgado, G. C. **Capital financeiro e agricultura no Brasil**. Campinas: Unicamp/Cone, 1985, 240 p.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979, 212 p.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H. **Efeitos da água no rendimento das culturas**. Roma: FAO, 1994, 212 p.

Dou, Y.; Silva, R. F. B.; Batistella, M.; Torres, S.; Moran, E.; Liu, J. Mapping crop producer perceptions: The role of global drivers on local agricultural land use in Brazil. **Land Use Policy**, v. 133, 106862, 2023.

Eeswaran, R.; Nejadhashemia, A. P.; Miller, S. R. Evaluating the climate resilience in terms of profitability and risk for a long-term corn-soybean-wheat rotation under different treatment systems. **Climate Risk Management**, v. 32, 100284, 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa da Soja. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1996/97**. Londrina: Embrapa, 1996, 149 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Solos Brasileiros**. 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>> Acesso em: 10 fev. 2021.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja – Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013, 265 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2019a. **Soja tolerante a veranicos é lançada na Bahia**. Bahia: Embrapa Cerrados. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/43736399/soja-tolerante-a-veranicos-e-lancada-na-bahia>> Acesso em: 1 abr. 2022.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2019b. **A Evolução da Produção de Soja na Macrorregião Sojícola 4**. Embrapa Soja. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/201375/1/p-25.pdf>> Acesso em: 01 fev. 2023.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sobre o Matopiba**. 2023. Brasília, DF, Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-matopiba/sobre-o-tema>> Acesso em: 18 jan. 2024.

Escobar, N.; Tizado, E. J.; Ermgassen, E. K. H. J.; Löfgren, P.; Börner, J.; Godar, J. Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. **Global Environmental Change**, v. 62, 102067, 2020.

Fagan, E. B.; Rodrigues, J. D.; Ono, E. O.; Teixeira, W. F.; Neto, D. D. 2020. **Soja: Fisiologia da produção**. Editora: AndreI, 247 p.

Fan, Y.; Shi, X.; Li, X.; Feng, X. Livelihood resilience of vulnerable groups in the face of climate change: a systematic review and meta-analysis. **Environmental Development**, v. 44, 2022.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017. **Climate-smart crop production**. Disponível em: <<http://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/production-resources/module-b1-crops/b1-overview/en/>> Acesso em: 02 fev. 2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2023. **Climate-Smart Agriculture**. Disponível em: <<https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/overview/en/>> Acesso em: 28 fev. 2024.

Federizzi, L. C. A soja como fator de competitividade no Mercosul: histórico, produção e perspectivas futuras. In. **III Encontro CEPAN: vantagens competitivas dos agronegócios no Mercosul**. Porto Alegre, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios – CEPAN/UFRGS, 2005.

Fehr, W. R.; Caviness, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service, 1977, 12 p.

Fekete, H.; Kuramochi, T.; Roelfsema, M.; den Elzen, M.; Forsell, N.; Höhne, N.; Luna, L.; Hans, F.; Sterl, S.; Olivier, J.; van Soest, H.; Frank, S.; Gusti, M. A review of

successful climate change mitigation policies in major emitting economies and the potential of global replication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 110602, 2021.

Feldmeyer, D.; Wilden, D.; Kind, C.; Kaiser, T.; Goldschmidt, R.; Diller, C.; Birkmann, J. Indicators for monitoring urban climate change resilience and adaptation. **Sustainability**, v. 11, 2931, 2019.

Feldmeyer, D.; Wilden, D.; Jamshed, A.; Birkmann, J. Regional climate resilience index: A novel multimethod comparative approach for indicator development, empirical validation and implementation. **Ecological Indicators**, v. 119, 106861, 2020.

Feldmeyer, D.; Nowak, W.; Jamshed, A.; Birkmann, J. An open resilience index: Crowdsourced indicators empirically developed from natural hazard and climatic event data. **Science of the Total Environment**, v. 774, 145734, 2021.

Fernandes, M. M.; Fernandes, M. R. M.; Garcia, J. R.; Matricardi, E. A. T. et al. Land use and land cover changes and carbon stock valuation in the São Francisco river basin, Brazil. **Environmental Challenges**, v. 5, p. 100247, 2021.

Figueiredo, R.; Nunes, P.; Brito, M. C. The resilience of a decarbonized power system to climate variability: Portuguese case study. **Energy**, v. 224, 120125, 2021.

Funatsu, B. M.; Dubreuil, V.; Racapé, A.; Debortoli, N. S.; Nasuti S.; Tourneau, F. M. Le. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. **Global Environ. Change**, v. 57, 101923, 2019.

Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

Grasham, C. F.; Calow, R.; Casey, V.; Charles, K. J.; Wit, S.; Dyer, E.; Fullwood-Thomas, J.; Hirons, M.; Hope, R.; Hoque, S. F.; Jepson, W.; Korzenevica, M.; Murphy, R.; Plastow, J.; Ross, I.; Ruiz-Apilánez, I.; Schipper, E. L. F.; Trevor, J.; Walmsley, N.;

Zaidi, H. Engaging with the politics of climate resilience towards clean water and sanitation for all. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 1, p. 76–84, 2021.

Guimarães, E. N.; Leme, H. J. C. Caracterização histórica e configuração espacial da estrutura produtiva do Centro-Oeste. In: **Redistribuição da população e meio ambiente: São Paulo e Centro-Oeste**. Campinas: Unicamp/Nepo, p. 25–65, 1997.

Guimarães, D. P.; Landau, E. C.; Menezes, C. B.; Tardin, F. D. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para o sorgo granífero no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020, 18 p.

Guo, H.; Huang, Z.; Tan, M.; Ruan, H.; Awe, G. O.; Are, K. S.; Abegunrin, T. P.; Hussain, Z.; Kuang, Z.; Liu, D. Crop resilience to climate change: a study of spatio-temporal variability of sugarcane yield in a subtropical region, China. **Smart Agricultural Technology**, v. 1, 100014, 2021.

Hernandes, T. A. D.; Duft, D. G.; Luciano, A. C. S.; Leal, M. R. L. V.; Cavalett, O. Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, 125318, 2021.

Hirakuri, M. H. **Avaliação econômica da produção de soja nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul na safra 2016/17**. Londrina: Embrapa Soja, 2017, 14 p.

Holling, C.S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 4, p. 1–23, 1973.

Hosseini S.; Barker K.; Ramirez-Marquez J. E. A review of definitions and measures of system resilience. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 145, p. 47–61, 2016.

Hubbard, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 29–41, 1994.

Hulme, M.; Mahony, M. Climate change: What do we know about the IPCC? **Progress in Physical Geography**, v. 34, p. 705–718, 2010.

Hymowitz, T. On the domestication of the soybean. **Economic Botany**, v. 24, p. 408–421, 1970.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão Regional do Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/divisao-regional/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?=&t=sobre>> Acesso em: 06 out. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2020. **Sidra: banco de tabelas estatísticas: índice nacional de preços ao consumidos amplo – setembro 2020**. Brasília: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. 2021a. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 28 jan. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências**. 2021b. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/todos-os-produtos-geociencias.html>> Acesso em: 28 jan. 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. 2023. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em: 28 jan. 2024.

Imani, M.; Hasan, M. M.; Bittencourt, L. F.; Clymont, K. M.; Kapelan, Z. A novel machine learning application: Water quality resilience prediction Model. **Science of the Total Environment**, v. 768, 144459, 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Mapa das Estações Meteorológicas**. 2020. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>> Acesso em: 04 mar. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Geneva, 2013, 222 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global Warming of 1.5°C**. Geneva, 2018, 616 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers**. Geneva, 2020, 41 p.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers**. In: *Climate Change 2021: The physical science basis*. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3–32, 2021.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Summary for Policymakers**. In: *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3–33, 2022.

Islam, M. M.; Barman, A.; Kundu, G. K.; Kabir, M. A.; Paul, B. Vulnerability of inland and coastal aquaculture to climate change: evidence from a developing country. **Aquaculture and Fisheries**, v. 4, n. 5, p. 183–189, 2019.

Jabareen, Y. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk. **Cities**, v. 31, p. 220–229, 2013.

Jamaliah, M. M.; Powell, R. B. Ecotourism resilience to climate change in Dana biosphere reserve, Jordan. **Journal of Sustainable Tourism**, v. 26, n. 4, p. 519–536, 2017.

Jamshed, A.; Rana, I. A.; McMillan, J. M.; Birkmann, J. Building community resilience in post-disaster resettlement in Pakistan. **International Journal of Disaster Resilience**, v. 10, p. 301–315, 2019.

Kaplan, A.; Cane, M.; Kushnir, Y.; Clement, A.; Blumenthal, M.; Rajagopalan, B. Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 18, p. 567–589, 1998.

Karimi, V.; Karami, E.; Keshavarz, M. Vulnerability and adaptation of Iranian livestock producers to climate variability and change. **Rangeland Ecology & Management**, v. 71, n. 2, p. 175–184, 2018.

Kayano, M. T.; Andreoli, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific decadal oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 531–540, 2007.

Keshavarz, M.; Karami, E. Farmers' decision-making process under drought. **Journal of Arid Environments**, v. 108, p. 43–56, 2014.

Keshavarz, M.; Moqadas, R. S. Assessing rural households' resilience and adaptation strategies to climate variability and change. **Journal of Arid Environments**, v. 184, 104323, 2021.

Keys, P. W.; Porkka, M.; Wang-Erlandsson, L.; Fetzer, I.; Gleeson, T.; Gordon, L. J. Invisible water security: Moisture recycling and water resilience. **Water Security**, v. 8, 100046, 2019.

Klimek, P.; Poledna, S.; Thurner, S. Quantifying economic resilience from input-output susceptibility to improve predictions of economic growth and recovery. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, 1677, 2019.

Lahn, B. Changing climate change: The carbon budget and the modifying-work of the IPCC. **Social Studies of Science**, v. 51, p. 3–27, 2020.

Leichenko, R. Climate change and urban resilience. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 3, p. 164–168, 2011.

Li, Y. B.; Shi, T.; Yang, Y. J.; Wu, B. W.; Wang, L. B.; Shi, C. E.; et al. Satellite-based investigation and evaluation of the observational environment of meteorological stations in Anhui Province, China. **Pure and Applied Geophysics**, v. 172, p. 1735–1749, 2015.

Li, B.; Mostafavi, A. Unraveling fundamental properties of power system resilience curves using unsupervised machine learning. **Energy and AI**, v. 16, 100351, 2024.

Lima, D. P.; Fiorioli, J. C.; Padula, A. D.; Pumi, G. The impact of Chinese imports of soybean on port infrastructure in Brazil: A study based on the concept of the “Bullwhip Effect”. **Journal of Commodity Markets**, v. 9, p. 55–76, 2018.

Lima, M. G. B.; Kmoch, L. Neglect paves the way for dispossession: The politics of “last frontiers” in Brazil and Myanmar. **World Development**, v. 148, 105681, 2021.

Lopes, M. A. **A Agricultura brasileira na Agenda Global de Desenvolvimento Sustentável**. In. Olhares para 2030: Desenvolvimento Sustentável. Embrapa, 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/olhares-para-2030>> Acesso em: 04 abr. 2024.

Lu, C. P.; Ji, W.; Hou, M. C.; Ma, T. Y.; Mao, J. H. Evaluation of efficiency and resilience of agricultural water resources system in the Yellow River Basin, China. **Agricultural Water Management**, v. 266, 107605, 2022.

Lv, O.; Sarker, N. I.; Firdaus, R. B. R. Disaster resilience in climate-vulnerable community context: Conceptual analysis. **Ecological Indicators**, v. 158, 111527, 2024.

Ma, Y. H. Development of soybean genetic and breeding research in China. In. Wong, S. (Ed.) **Proceedings of the 2nd U.S.-China Soybean Symposium**, Changchun, China, p. 15–19, 1984.

Machado, P. L. O. A.; Ferreira, C. M.; Carvalho, M. T. M.; Silva, M. A. S.; Madari, B. E. **Mudança do clima e a agropecuária brasileira. Noções, mitigação e adaptação**. Santo Antônio de Goiás, Embrapa Arroz e Feijão. Documentos 322, 2022, 36 p.

Magalhães, L. A.; Miranda, E. E. **MATOPIBA: Quadro Natural**. Campinas, Embrapa. Nota Técnica GITE 5, 2014, 41 p.

Mallick, M.; Singh, P. K.; Pandey, R. Harvesting resilience: Tribal home-gardens as socio-ecological solutions for climate change adaptation and sustainable development in a protected area. **Journal of Cleaner Production**, v. 445, 141174, 2024.

Mann, H. B. Nonparametric test against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945.

Mantua, N. J.; Hare, S. R.; Zhang, Y.; Wallace, J. M.; Francis, R.C. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 1069–1079, 1997.

Manyena, B.; Machingura, F.; O'Keefe, P. Disaster Resilience Integrated Framework for Transformation (DRIFT): A new approach to theorising and operationalising resilience. **World Development**, v. 123, 104587, 2019.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio. Brasil 2022/23 a 2032/33. Projeções de Longo Prazo**. Brasília: MAPA, 2023, 108 p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático. Portarias**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico>>. Acesso em: 09 abr. 2024.

MapBiomas. **Projeto MapBiomas – Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. 2021a. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/download>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

MapBiomas. **O Projeto**. 2021b. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

MapBiomias. **Agropecuária cresce 258% no Matopiba desde 1985 e ocupa área maior que o Amapá.** 2021c. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/agropecuaria-cresce-258-no-matopiba-desde-1985-e-ocupa-area-maior-que-o-amapa>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

MapBiomias. **Relatório Anual de Desmatamento no Brasil (RAD 2022).** [São Paulo]: MapBiomias Alerta, 2023, 72 p.

Marcos Filho, J. Germinação de sementes. In: **Semana de Atualização em Produção de Sementes.** Campinas: Fundação Cargill, p.11–39, 1986.

Marengo, J. A.; Jones, R.; Alves, L. M.; Valverde, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009.

Marengo, J. A.; Ambrizzi, T.; Rocha, R. P.; Alves, L. M.; Cuadra, S. V.; Valverde, M. C.; Torres, R. R.; Santos, D. C. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, v. 35, p. 1073–1097, 2010.

Marengo, J. A.; Chou, S. C.; Kay, G.; Alves, L.M.; Pesquero, J.F.; et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829–1848, 2012.

Marengo, J. A.; Torres, R. R.; Alves, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189–1200, 2017.

Marengo, J.; Souza, M. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia.** São Paulo, 2018, 33 p.

Marengo, J. **Mudanças climáticas, impactos e políticas públicas para reduzir impactos**. Dialogos do Antropoceno, ano 05, nº 12, 2019.

Martines, M. R.; de Souza, A. M.; Arena, M. V. N.; Prado, H. M.; Toppa, R. H. Spatial signatures of traditional and protected areas under different overlap degrees in the Brazilian Atlantic Forest. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 29, 100916, 2023.

Matewos, T. The state of local adaptive capacity to climate change in drought-prone districts of rural Sidama, southern Ethiopia. **Climate Risk Management**, v. 27, 100209, 2020.

McLennan, M. **The Global Risks Report 2021**. 16^a ed. Geneva: World Economic Forum, 2021, 144 p.

McLennan, M. **The Global Risks Report 2022**. 17^a ed. Geneva: World Economic Forum, 2022, 116 p.

Meerow, S.; Newell, J. P.; Stults, M. Defining urban resilience: A review. **Landscape and Urban Planning**, v. 147, p. 38–49, 2016.

Melkonyan, A.; Krumme, K.; Gruchmann, T.; Torre, G. D. L. Sustainability assessment and climate change resilience in food production and supply. **Energy Procedia**, v. 123, p. 131–138, 2017.

Meuwissen, M. P. M.; Feindt, P. H.; Spiegel, A. A framework to assess the resilience of farming systems. **Agricultural Systems**, v. 176, 102656, 2019.

Milhorance, C.; Mendes, P.; Mesquita, P.; Morimura, M.; Reis, R.; Rodrigues Filho, S.; Bursztyn, M. O desafio da integração de políticas públicas para a adaptação às mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 175–195, 2019.

Miranda, E. E.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. **Um sistema de inteligência territorial estratégica para Matopiba**. Campinas, Embrapa Monitoramento por Satélite, 2014a.

Miranda, E. E.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. **Proposta de delimitação territorial do Matopiba**. Campinas, Embrapa. Nota técnica GITE 1, 2014b, 18 p.

Miranda, E. E. **Caracterização Territorial Estratégica do Matopiba**. Campinas, Embrapa. 2015, 66 p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Volume II: Estratégias Setoriais e Temáticas**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/PNA-Volume2.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2021.

Moat, J.; Williams, J.; Baena, S.; Wilkinson, T.; Gole, T. W.; Challa, Z. K.; Demissew, S.; Davis, A. P. Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**, v. 3, 17081, 2017.

Monteiro, R. N. F. **Zoneamento agrícola de risco climático para a cultura da soja no Estado do Piauí, em cenários de mudanças climáticas**. Dissertação (Mestrado) – Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011, 97p.

Mucida, D. P.; Gorgens, E. B.; Rech, A. R.; Christofaro, C.; da Silva, R. S.; Pereira, I. M.; de Moraes, M. S.; da Costa, A. M.; França, L. C. J. Designing optimal agrosilvopastoral landscape by the potential for conservation use in Brazil. **Sustainable Horizons**, v. 5, 100045, 2023.

Mulneh, A. Impact of climate change on soil water balance, maize production, and potential adaptation measures in the Rift Valley drylands of Ethiopia. **Journal of Arid Environments**, v. 179, 104195, 2020.

Mundstock, C.; Thomas, A. L. **Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Evangraf, 2005, 31p.

Myers, S.S.; Smith, M.R.; Guth, S.; Golden, C.D.; Vaitla, B.; Mueller, N.D.; Dangour, A.D.; Huybers, P. Climate change and global food systems: Potential impacts on food security and undernutrition. **Annual Review of Public Health**, v. 38, p. 259–277, 2017.

Nakagawa, J.; Rosolem, C. A.; Machado, J. R. Épocas de semeadura de soja: Efeitos na produção de grãos e nos componentes da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.18, n.11, p.1187–1198, 1983.

Nelson, G. C.; Valin, H.; Sands, R. D.; Havlík, P.; Ahammad, H.; Deryng, D.; Kyle, P. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, p. 3274–3279, 2014.

Nepomuceno, A. L.; Rufino, C. F. G.; Debiasi, H.; Nogueira, M. A.; Franchini, J. C.; Alves, F. V.; Almeida, R. G. de; Bungenstab, D. J.; Dall’Agnol, V. F. **Marca-Conceito “Soja Baixo Carbono”: um novo conceito para a soja sustentável**. Londrina: Embrapa Soja; Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2021. Nota Técnica.

Nepomuceno, A. L.; Balbinot Junior, A. A.; Rufino, C. F. G.; Debiasi, H.; Nogueira, M. A.; Franchini, J. C.; Alves, F. V.; Monteiro, R. A. C.; Almeida, R. G. de; Bungenstab, D. J.; Agnol, V. F. D. **Programa SBC - Soja Baixo Carbono: um novo conceito de soja sustentável**. 2a ed. Londrina: Embrapa Soja; Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2023. Nota Técnica.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **El Niño Southern Oscillation (ENSO)**. Disponível em: <<https://www.psl.noaa.gov/enso/>>. Acesso em: 16 out. 2021a.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)**. Disponível em: <<https://www.psl.noaa.gov/enso/mei/>>. Acesso em: 16 out. 2021b.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Pacific Decadal Oscillation (PDO)**. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>>. Acesso em: 16 out. 2021c.

Nunes, D. M.; Tomé, A.; Pinheiro, M. D. Urban-centric resilience in search of theoretical stabilisation? A phased thematic and conceptual review. **Journal of Environmental Management**, v. 230, p. 282-292, 2019.

Nunes, S.; Oliveira Jr., L.; Siqueira, J.; Morton, D. C.; Souza Jr., C. M. Unmasking secondary vegetation dynamics in the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, 034057, 2020.

Observatório do Clima. **Nossa história**. 2021. Disponível em: <<https://www.oc.eco.br/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 12 set. 2021.

Odum, E. P. **Fundamentos de Ecologia**. 4a ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971, 927p.

Oliveira, P. T.; Santos e Silva, C. M.; Lima, K. C. Linear trend of occurrence and intensity of heavy rainfall events on Northeast Brazil. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, p. 172–177, 2014.

Oliveira, P. T.; Santos e Silva, C. M.; Lima, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 77–90, 2017.

Oppenheimer, M.; Petsonk, A. Article 2 of the UNFCCC: Historical origins, recent interpretations. **Climatic Change**, v. 73, p. 195–226, 2005.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 04 abr. 2024.

Pallieux, A. **Le soya, sa composition chimique, ses variétés, sa culture et ses usages**. France, v. 3, p. 538–576, 1880.

Paszkowski, A.; Laurien, F.; Mechler, R.; Hall, J. Quantifying community resilience to riverine hazards in Bangladesh. **Global Environmental Change**, v. 84, 102778, 2024.

PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013, 28 p.

Pearson, K. Notes on the history of correlation. **Biometrika**, v. 13, p. 25–45, 1920.

Pereira, C. N.; Castro, C. N. de; Lanza, G. **Dinâmica econômica, infraestrutura e logística no Matopiba**. Brasília: IPEA, 2018, 44 p.

Peterson, C. A.; Eviner, V. T.; Gaudin, A. C. M. Ways forward for resilience research in agroecosystems. **Agricultural Systems**, v. 162, p. 19–27, 2018.

Piedra-Bonilla, E. B.; Cunha, D. A.; Braga, M. J. Climate variability and crop diversification in Brazil: An ordered probit analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 120252, 2020.

Pino, A. F. Sazonalidade na agricultura. **Revista de Economia Agrícola**, v. 61, n. 1, p. 63–93, 2014.

Pires, G. F.; Abrahão, G. M.; Brumatti, L. M.; Oliveira, L. J. C.; Costa, M. H.; Liddicoat, S. et al. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286–298, 2016.

Polizel, S. P.; Vieira, R. M. S. P.; Pompeu, J.; Ferreira, Y. C. et al. Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy**, v. 109, 105713, 2021.

Qiu, L. J.; Chang, R. Z. The origin and history of soybean. In: Singh, G. (Ed.) **The Soybean: Botany, Production and Uses**. Oxford, CABI Publishing, 2010.

Rana, I. A. Disaster and climate change resilience: A bibliometric analysis. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 50, 101839, 2020.

Rathi, A. Is agrarian resilience limited to agriculture? Investigating the “farm” and “non-farm” processes of agriculture resilience in the rural. **Journal of Rural Studies**, v. 93, p. 155–164, 2022.

Reis, L.; Silva, C. M. S.; Bezerra, B.; Mutti, P.; Spyrides, M. H.; Silva, P.; Magalhães, T.; Ferreira, R.; Rodrigues, D.; Andrade, L. Influence of climate variability on soybean yield in MATOPIBA, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, 1130, 2020a.

Reis, L. C.; Silva, C. M. S.; Bezerra, B. G.; Mutti, P. R.; Spyrides. Caracterização da variabilidade da precipitação no MATOPIBA, região produtora de soja. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, p. 1425–1441, 2020b.

Reis, L. C.; Silva, C. M. S.; Bezerra, B. G.; Mutti, P. R.; Spyrides, M. H. C.; Silva, P. E. Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, p. 4457–4478, 2020c.

Riehm, K. E.; Brenneke, S. G.; Adams, L. B. et al. Association between psychological resilience and changes in mental distress during the COVID-19 pandemic. **Journal of Affective Disorders**, v. 282, p. 381–385, 2021.

Roostaie, S.; Nawari, N.; Kibert, C. J. Sustainability and resilience: a review of definitions, relationships, and their integration into a combined building assessment framework. **Building and Environment**, v. 154, p. 132–144, 2019.

Rose, D. C.; Sutherland, W. J.; Barnes, A. P.; Borthwick, F.; Foulkes, C.; Hall, C.; Moorby, J. M. Integrated farm management for sustainable agriculture: Lessons for knowledge exchange and policy. **Land Use Policy**, v. 88, p. 834–842, 2019.

Rosenzweig, C.; Hillel, D. **Climate Change and the Global Harvest: Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture**. Oxford University Press, 1998.

Saccol, A. V. Ecologia e época de semeadura da soja. In: **A cultura da soja**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1975. p. 50–62. (Boletim Técnico, D. F. – 5).

Salvador, M. A. **Análise da variabilidade climática na nova fronteira agrícola do Brasil: região do Matopiba**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Campina Grande, UFCG, 2014, 95p.

Salvador, M. A.; Brito, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the Matopiba region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253–261, 2018.

Sano, E. E. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, e00138, 2019.

Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araujo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**. 5a ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018, 356 p.

Santos, C. A. C.; Neale, C. M. U.; Mekonnen, M. M.; Gonçalves, I. Z.; Oliveira, G.; Ruiz-Alvarez, O.; Safa, B.; Rowe, C. M. Trends of extreme air temperature and precipitation and their impact on corn and soybean yields in Nebraska, USA. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 147, p. 1379–1399, 2022.

Sapountzaki, K. Vulnerability management by means of resilience. **Natural Hazards**, v. 60, p. 1267–1285, 2012.

Schaefer, M.; Thinh, N. X.; Greiving, S. How can climate resilience be measured and visualized? Assessing a vague concept using gis-based fuzzy logic. **Sustainability**, v. 12, n. 2; 635, 2020.

Searchinger, T.; Waite, R.; Hanson, C.; Ranganathan, J. **Creating a sustainable food future**. Washington D. C., 2019, 564 p.

Sediyama, C. S.; Vieira, C.; Sediyama, T.; Cardoso, A. A.; Estevão, H. H. Influência do retardamento da colheita sobre a deiscência das vagens e sobre a qualidade e poder germinativo das sementes de soja. **Experientiae**, v. 14, n. 5, p. 117–141, 1972.

Sediyama, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenas, 2009, 314p.

Sediyama, T. **Produtividade da soja**. Viçosa: Editora UFV, 2016, 310 p.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). **Emissões Por Setor**. 2021a. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/#>>. Acesso em: 15 set. 2021.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). **O que é o SEEG?** 2021b. Disponível em: < <https://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg>>. Acesso em: 15 set. 2021.

Seixas, C. D. S.; Neumaier, N.; Balbinot Junior, A. A.; Krzyzanowski, F. C.; Leite, R. M. V. B. de C. **Tecnologias de Produção da Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020, 347 p.

Sentelhas, P. C.; Battisti, R.; Câmara, G. M. S.; Farias, J. R. B.; Hampf, A.; Nendel, C. The soybean yield gap in Brazil—magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1394–1411, 2015.

Sharifi, A.; Yamagata, Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1654-1677, 2016.

Shi, C.; Guo, N.; Gao, X.; Wu, F. How carbon emission reduction is going to affect urban resilience. **Journal of Cleaner Production**, v. 372, 133737, 2022.

Silva, F. B.; Santos, J. R. N.; Feitosa, F. E. C. S.; Silva, I. D. C.; Araújo, M. L. S.; Guterres, C. E.; Santos, J. S.; Ribeiro, C. V.; Bezerra, D. S.; Neres, R. L. Evidências de mudanças climáticas na região de transição Amazônia-Cerrado no estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 330–336, 2016.

Silva, R. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Campina Grande, UFCG, 2018, 113 p.

Silva, P. E.; Silva, C. M. S. E.; Spyrides, M. H. C.; Andrade, L. D. M. B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 579–595, 2019.

Silva, V. P. R.; Silva, R. A.; Maciel, G. F.; Souza, E. P.; Braga, C. C.; Holanda, R. M. Soybean yield in the Matopiba region under climate changes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 8–14, 2020a.

Silva, W. K. de M.; Medeiros, S. E. L.; Silva, L. P. da; Coelho Junior, L. M.; Abrahão, R. Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, 392, 2020b.

Sisto, A.; Vicinanza, F.; Campanozzi, L. L.; Ricci, G.; Tartaglini, D.; Tambone, V. Towards a transversal definition of psychological resilience: A literature review. **Medicina**, v. 55, 745, 2019.

Skansi, M. D. L. M.; Brunet, M.; Sigró, J.; Aguilar, E.; Groening, J. A. A.; Bentancur, O. J.; Geier, Y. R. C.; Amaya, R. L. C.; Jácome, H.; Ramos, A. M.; et al. Warming and

wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295–307, 2013.

Smith, P.; Haberl, H.; Popp, A.; Erb, K. H.; Lauk, C.; Harper, R.; Masera, O. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? **Global Change Biology**, v. 19, p. 2285–2302, 2013.

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller, H. L. **Climate Change 2007: the Physical Science Basis**. Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, Cambridge University Press, Cambridge and New York, p. 235–336, 2007.

Steduto, P.; Raes, D. Hsiao, T. C.; Fereres, E. **AquaCrop: concepts, rationale and operation**. In: Crop Yield Response to Water. Irrigation & Drainage, v. 66, FAO, Rome, 2012.

Sun, H.; Zhen, F.; Xie, Z. Urban resilience assessment based on contradiction between supply and demand of the daily activity–environment system: A case study on Nanjing, China. **Science of the Total Environment**, v. 765, 144567, 2021.

Szymczak, L. S.; Carvalho, P. C. F.; Lurette, A. et al. System diversification and grazing management as resilience-enhancing agricultural practices: The case of crop-livestock integration. **Agricultural Systems**, v. 184, 102904, 2020.

Tham-Agyekum, E. K.; Ntem, S.; Sarbah, E.; Anno-Baah, K.; Asiedu, P.; Bakang, J. E. A.; Jones, E. O. Resilience against climate variability: The application of nature based solutions by cocoa farmers in Ghana. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 20, 100310, 2023.

Tendall, D. M.; Joerin, J.; Kopainsky, B. et al. Food system resilience: Defining the concept resilience sustainability. **Global Food Security**, v. 6, p. 17–23, 2015.

Thomas, J. F. Ontogenetic and morphological plasticity in crop plants. In: Boote, K. J. et al. (Comp.) **Physiology and determinations of crop yield**. Cap. 7B, p. 181–185, 1994.

Timmermann, A.; An, S. I.; Kug, J. S.; Jin, F. F.; Cai, W.; Capotondi, A.; et al. *El Niño* — Southern Oscillation complexity. **Nature**, v. 559, p. 535–545, 2018.

Totschnig, G.; Hirner, R.; Müller, A.; Kranzl, L.; Hummel, M.; Nachtnebel, H. P.; Stanzel, P.; Schicker, I.; Formayer H. Climate change impact and resilience in the electricity sector: The example of Austria and Germany. **Energy Policy**, v.103, p. 238–248, 2017.

Tragnago, J. L.; Bonetti, L. P. Diferentes épocas de semeadura no rendimento e outras características de alguns cultivares de soja no Rio Grande do Sul. In: Seminário Nacional de Pesquisa de Soja. Campinas. **Anais...** Londrina: EMBRAPA. p. 57–69, 1984.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2023. **About the secretariat**. Disponível em: <<https://unfccc.int/about-us/about-the-secretariat>> Acesso em: 29 fev. 2024.

Urruty, N.; Tailliez-lefebvre, D.; Huyghe, C.; Tailliez-lefebvre, D. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p. 1–15, 2016.

Utida, G.; Cruz, F. W.; Etourneau, J.; Bouloubassi, I.; Schefuß, E.; Vuille, M.; et al. Tropical South Atlantic influence on northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9, 1698, 2019.

Vale, T. M. C.; Spyrides, M. H. C.; Andrade, L. de M. B.; Bezerra, B. G.; Silva, P. E. Subsistence agriculture productivity and climate extreme events. **Atmosphere**, v. 11, p. 1287, 2020.

Vargas, C. A. C.; Romero, S. H.; Sicard, T. L. Key points of resilience to climate change: a necessary debate from agroecological systems. **Climate and Development**, v. 12, n. 6, p. 564-574, 2019.

Wang, Y.; Shi, F.; Yao, P.; Sheng, Y.; Zhao, C. Assessing the evolution and attribution of watershed resilience in arid inland river basins, Northwest China. **Science of the Total Environment**, v. 906, 167534, 2024.

WASP. World Adaptation Science Programme. **About WASP**. 2022. Disponível em: <<https://wasp-adaptation.org/>> Acesso em: 29 fev. 2024.

Wetende, E.; Olago, D.; Ogara, W. Perceptions of climate change variability and adaptation strategies on smallholder dairy farming systems: Insights from Siaya Sub-County of Western Kenya. **Environmental Development**, v. 27, p. 14–25, 2018.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. World Meteorological Organization, Genebra, 2018.

Wu, Z. S.; Schenk-Hamlin, D.; Zhan, W. Y.; Ragsdale, D. W.; Heimpel, G. E. The soybean aphid in China: a historical review. **Annals of the Entomological Society of America**, v. 97, p. 209-218, 2004.

XLSTAT. **Software XLSTAT**. 2021. Disponível em: <<https://www.xlstat.com/en/>>. Acesso em: 06 jul. 2021.

Xu, H.; Deng, H. Short-term impact of climate change on labor market in China: Quantitative spatial analysis based on an oligopsony model. **China Economic Review**, 102142, 2024.

Zakir, M. M.; Freitas, I. R. Benefícios à saúde humana do consumo de isoflavonas presentes em produtos derivados da soja. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v. 2, n.3, p.107–116, 2015.

Zeng, Z.; Fang, Y.; Zhai, Q.; Du, S. A Markov reward process-based framework for

resilience analysis of multistate energy systems under the threat of extreme events. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 209, 107443, 2021.

Zhao, D.; Wu, J. Contribution of urban surface expansion to regional warming in Beijing, China. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, p. 1551–1559, 2017.

Zhang, Y. Y.; Yang, Y.; Chen, Z.; Zhang, S. Multi-criteria assessment of the resilience of ecological function areas in China with a focus on ecological restoration. **Ecological Indicators**, v. 119, 106862, 2020.

Zhang, T.; Sun, Y.; Zhang, X.; Yin, L.; Zhang, B. Potential heterogeneity of urban ecological resilience and urbanization in multiple urban agglomerations from a landscape perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 342, 118129, 2023.

Zhu, X.; Troy, T. J. Agriculturally relevant climate extremes and their trends in the world's major growing regions. **Earth's Future**, v. 6, p. 656–672, 2018.

Zilli, M.; Scarabello, M.; Soterroni, A. C.; Valin, H.; Mosnier, A.; Leclère, D. et al. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, 2020.