



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia



UNIDADE DE PESQUISA DO
MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



CAROLINA GOMES VERGETI AMIM

CARACTERIZAÇÃO DAS SECAS E MUDANÇAS DE USOS DO SOLO NA REGIÃO DE MATOPIBA, BRASIL

2022

CAROLINA GOMES VERGETI AMIM

**CARACTERIZAÇÃO DAS SECAS E MUDANÇAS DE USOS DO SOLO NA
REGIÃO DE MATOPIBA, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE pelo Programa de Pós-Graduação em DESASTRES NATURAIS.

Área: Desastres Naturais. Linha de pesquisa: Desastres associados a eventos extremos, secas, estiagens, incêndios florestais e escassez de água.

Orientador: Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha

Coorientador: Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá

São José dos Campos

2022

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2022]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Amim, Carolina Gomes Vergeti

Caracterização das secas e mudanças de usos do solo na região de Matopiba, Brasil / Carolina Gomes Vergeti Amim. - São José dos Campos : [s.n.], 2022. 61 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Pós-graduação em Desastres Naturais - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2022.

Orientador: Ana Paula Martins Do Amaral Cunha

Coorientador: Regina Célia dos Santos Alvalá

1. Secas. 2. Uso do solo. 3. Impactos antropogênicos. 4. Bioma Cerrado. 5. Agricultura. I. Cunha, Ana Paula Martins Do Amaral , orient. II. Alvalá, Regina Célia dos Santos , coorient. III. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. V. Universidade Estadual Paulista (Unesp). VI. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden). VII. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha (orientador)

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

São José dos Campos

José Antonio Marengo Orsini

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden)

São José dos Campos

Rita Marcia da Silva Pinto Vieira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

São José dos Campos

São José dos Campos, 11 de agosto de 2022.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo exemplo e pela incansável dedicação em me fortalecer, com amor, em toda a minha trajetória. Em especial aos meus pais, que nunca mediram esforços para que mais este sonho se realizasse. A eles minha eterna gratidão e todas as dedicatórias de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Divino, por me conceder saúde, fé, garra e inquietude para estar onde eu busquei chegar.

Aos meus pais, Mary Ornellas e José Augusto, pois sem eles eu jamais teria tanta dedicação e amor em ser reflexo de seus preciosos ensinamentos. À minha mãe, por ser minha inspiração, por seu amor incondicional, seu caráter, e por me fortalecer em todas as circunstâncias. Ao meu pai, por ser meu maior orgulho, pelo coração singular, seus sorrisos em todas as tempestades.

Aos meus irmãos, Thiago Vergeti e Bruno Gomes, que sempre estiveram ao meu lado como um elo maior que a conta sanguínea, mas sim a amizade que é a verdadeira irmandade.

Aos meus sobrinhos João Vitor e Beatriz, por serem minha fonte de energia e determinação em atuar pelo exemplo.

Aos amigos Bernardo Moscardini Fabiani e Rodrigo Marques, pela confiança depositada durante todo este ciclo, por atuarem pelo exemplo na TerraMagna e pela forte inspiração em ser e fazer o extraordinário sempre - e com paixão e bravura.

Aos amigos Larissa Soares, Yasmin Mattos, Luis Cláudio Holanda, Lucas Oliveira e Evelyn Spano, por se fazerem sempre presentes e renovarem meus sorrisos e forças diárias.

A Tânia Hoffmann, Thais Issii e Marina Grandchamp, pela parceria e força diária durante essa trajetória.

A Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, pela excelente iniciativa ao criar um programa de pós-graduação de tamanha relevância.

A Dra. Ana Paula Martins do Amaral Cunha e Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, por toda mentoria nesta jornada.

A Lidiane Cristina Costa pelo suporte e inspiração diante dos desafios da pesquisa.

A todos os professores, por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional. Por toda dedicação em não somente ensinar, mas por terem se comprometido com o aprendizado mútuo e constante.

A CAPES, pelo incentivo à pesquisa mesmo diante de tantas adversidades políticas, faltas de incentivos e desvalorização da ciência.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, minha eterna gratidão.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.”

Aristóteles

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1 Caracterização da região do Matopiba	12
2.2 Caracterização do avanço agrícola no Matopiba.....	14
2.3 Índices de secas	18
2.3.1 Índice de Precipitação Padronizado – SPI.....	19
2.3.2 Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado – SPEI	20
2.3.3 Índice de Saúde da Vegetação (VHI).....	20
2.4 Mudanças do uso e cobertura da terra no Matopiba	20
2.5 Análise de tendências das variáveis climáticas no Matopiba.....	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
3.1 Ocorrência de eventos extremos	24
3.2 Dinâmica de uso e cobertura da terra	29
3.3 Análise de tendências climáticas	36
4 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	47

Amim, C. G. V. **Caracterização das secas e mudanças de usos do solo na região de Matopiba, Brasil**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desastres Naturais) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), São José dos Campos, 2022.

RESUMO

A expansão da fronteira agrícola na região conhecida como Matopiba, Brasil, associa-se como o principal responsável pelas intensas transições de uso do solo no bioma Cerrado. As mudanças antropogênicas e naturais estão interagindo de forma não linear, causando impactos negativos nos ecossistemas e meios produtivos, o que coloca sob risco a região e o Brasil, país cujo desenvolvimento é amplamente baseado no uso de recursos naturais. No cenário de mudanças climáticas, o sinergismo entre secas, desmatamentos e uso intensivo do solo exacerba impactos outrora minimizados pelo uso sustentável associado a medidas de adaptação. Partindo desta concepção, essa pesquisa tem por objetivo avaliar os padrões de secas e as mudanças dos usos e coberturas da terra, a fim de caracterizar a região, uma vez que a interação entre o clima e as atividades antrópicas apresentam padrões espaço-temporais singulares. Como resultados, o estudo identificou que os eventos de secas se tornaram mais severos e duradouros desde a década de 1980. As áreas agro produtivas cresceram na mesma proporção em que os desmatamentos ocorreram, ou seja, a redução de 15,2% da vegetação natural representa, na verdade, a conversão destas em terras produtivas, isto em função dos interesses na expansão (101,1%) e exploração da fronteira agrícola. As tendências são positivas para ocorrência de secas, estresse da vegetação e aumento de temperaturas, bem como para redução de precipitação. As atividades antrópicas e seus impactos no meio ambiente em escala global, à luz de comprovações científicas, caracterizam a necessidade de redução de riscos. Impactos exacerbados e deflagrados pela falta de gestão estratégica podem comprometer a segurança alimentar, o desenvolvimento agrícola e corroborar o êxodo rural.

Palavras-chave: secas; uso do solo; impactos antropogênicos; bioma Cerrado; agricultura.

AMIM, C. G. V. **Characterization of droughts and land use change in the Matopiba region, Brazil**. 2022. Dissertation (Master's degree in Natural Disaster) - São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (Cemaden), São José dos Campos, 2022.

ABSTRACT

The expansion of the agricultural frontier in the region known as Matopiba, Brazil, is associated with the main responsible for the intense land use transitions in the Cerrado biome. Anthropogenic and natural changes are interacting in a non-linear way, causing negative impacts on ecosystems and productive means, which puts at risk the region and Brazil, a country whose development is largely based on the use of natural resources. In the climate change scenario, the synergism between droughts, deforestation, and intensive land use exacerbates impacts once minimized by sustainable use. Based on this conception, this research aims to evaluate the patterns of droughts and changes in land use and land cover in order to characterize the region, since the interaction between climate and anthropic activities present unique spatial-temporal patterns. As a results, the study identified that drought events have become more severe and long lasting in recent decades. The agro-productive areas have grown in the same proportion that deforestation has occurred, that is, the 15.2% reduction in natural vegetation represents, in fact, the conversion of these areas into productive lands, due to the interests in expansion (101.1%) and exploration of the agricultural frontier. The trends are positive for the occurrence of droughts, vegetation stress and temperature increase, as well as for precipitation reduction. Anthropic activities and their impacts on the environment on a global scale, in light of scientific evidence, characterize the need for risk reduction. Exacerbated impacts triggered by the lack of strategic management can compromise food security, agricultural development, and corroborate the rural exodus.

Keywords: droughts; land use; anthropogenic impacts; Cerrado biome; agriculture.

1 INTRODUÇÃO

A região Matopiba, que compreende o bioma Cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, é considerada a grande fronteira agrícola do Brasil (EMBRAPA, 2020). A área, apesar de não se caracterizar pela tradição na agricultura até o final da década de 1980, atualmente responde por grande parte da expansão territorial para atividades intensivas e extensivas (INPE, 2015), fato impulsionado pelos avanços nas técnicas agrícolas, as condições favoráveis para a mecanização, iniciativas governamentais e o baixo custo da terra (BICKEL; DROS, 2003).

O rápido e intenso processo de conversão da vegetação natural e dos usos da terra do Cerrado em áreas produtivas tem relação direta com a crescente taxa de desmatamento e consequente aumento dos incêndios das últimas décadas (CASSMAN et al., 2005; FALEIRO e SOUZA, 2007; GRECCHI et al., 2015). Esta conversão acarreta diversos impactos ambientais, tais como a perda de biodiversidade, a redução e fragmentação dos ecossistemas, a perturbação hídrica de bacias hidrográficas e a intensificação de processos erosivos (INPE, 2015; SOARES e BATISTA, 2007; MATAVELI, 2019). Além disso, os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) podem colocar sob risco irreversível uma área considerada hotspot mundial por apresentar um elevado endemismo (MYERS et al., 2000).

No Matopiba, aproximadamente 4.677 km² (0,63%) está sob fortes sinais de degradação, principalmente em áreas de pastagens, as quais são caracterizadas por baixa resiliência. Apesar de não ser uma área grande, o dado sugere que a combinação de práticas de manejo insustentáveis (como o uso do fogo), a substituição da floresta por áreas agro produtivas e as atividades antrópicas são o principal fator que desencadeia processos de degradação (VIEIRA et al., 2021). Complementarmente, Santos et al. (2021) destacaram riscos produtivos em função de impactos nas propriedades físicas dos solos, relacionados à textura do solo, compactação, porosidade, armazenamento de água e estabilidade.

Os impactos no ciclo hidrológico decorrentes das mudanças climáticas poderiam frustrar as ambições do Brasil de aumentar as áreas produtivas e a própria produção na fronteira agrícola do Brasil, visto que os impactos nos rendimentos das colheitas estão fortemente relacionados com a ocorrência de secas, tanto nos sistemas de sequeiro quanto para os irrigados (RATTIS et al., 2021). Além disso, as mudanças ambientais antropogênicas e naturais estão interagindo de forma não linear, causando impactos negativos nos ecossistemas e meios produtivos, o que poderia ser mitigado se o foco estivesse em aumentar

a produtividade das pastagens, bem como incentivar a expansão agrícola em terras já convertidas (MARENGO et al., 2021).

De modo geral, os desmatamentos tendem a refletir um padrão relacionado a incêndios deliberados, uma vez que o uso do fogo compreende parte do manejo frequentemente praticado para limpar a área e introduzir outros usos do solo (SCHROEDER et al., 2009; NASCIMENTO et al., 2012; LIBONATI et al., 2016). Considerando um cenário de aumento das temperaturas, redução de chuvas e intensificação da velocidade do vento na superfície, combinado ao elevado volume de biomassa seca e um estrato gramíneo natural e altamente inflamável, as áreas queimadas não correspondem apenas às parcelas desmatadas, mas desencadeia a propagação do fogo em áreas intocadas (ARAGÃO et al., 2014, BRAGA, 2015). Nesta perspectiva, o sinergismo (ou retroalimentação) entre secas, desmatamentos e o uso do solo intensivo exacerba os impactos outrora minimizados pela ocorrência menos frequente de eventos extremos.

Historicamente, a agricultura desempenha papel imprescindível em todos os países, bem como enfrenta desafios com o objetivo de atender às melhores práticas de manejo e maximizar a produtividade. Assim, motivada pela crescente demanda por alimentos e pela preocupação com a preservação das áreas de vegetação nativas, surge a ideia do crescimento vertical da agricultura conciliada à sistemas de irrigação, o que permite um melhor aproveitamento das áreas agrícolas já consolidadas e, conseqüentemente, possibilita alta dinâmica, redução temporal dos ciclos (precocidade) e diversidade de culturas (FORMAGGIO e SANCHES, 2017). Neste contexto, tem-se amplas discussões sobre os impactos decorrentes da mudança do uso do solo (associado aos desmatamentos e/ou ao manejo) e das restrições relacionadas com a disponibilidade de água (irrigação).

A definição e a caracterização espaço-temporal da seca ainda são elementos considerados de debate na literatura. Apesar de muitos estudos, a temática de secas é complexa e constitui uma das principais ameaças globais, gerando impactos ambientais, socioeconômicos e climáticos. Dentre as perspectivas de abordagem das secas, o entendimento das tipologias é crucial para compreender a influência do clima e a interação desta com o sistema terrestre, uma vez que este conhecimento pode nortear indicadores e, conseqüentemente, projeções para uma gestão agrícola eficaz.

Neste contexto, esta pesquisa tem por objetivo central avaliar os padrões de secas, de 1980 a 2010, em áreas com significativas mudanças dos usos e coberturas da terra, a fim de compreender e caracterizar desastres deflagrados por riscos naturais e antropogênicos, uma

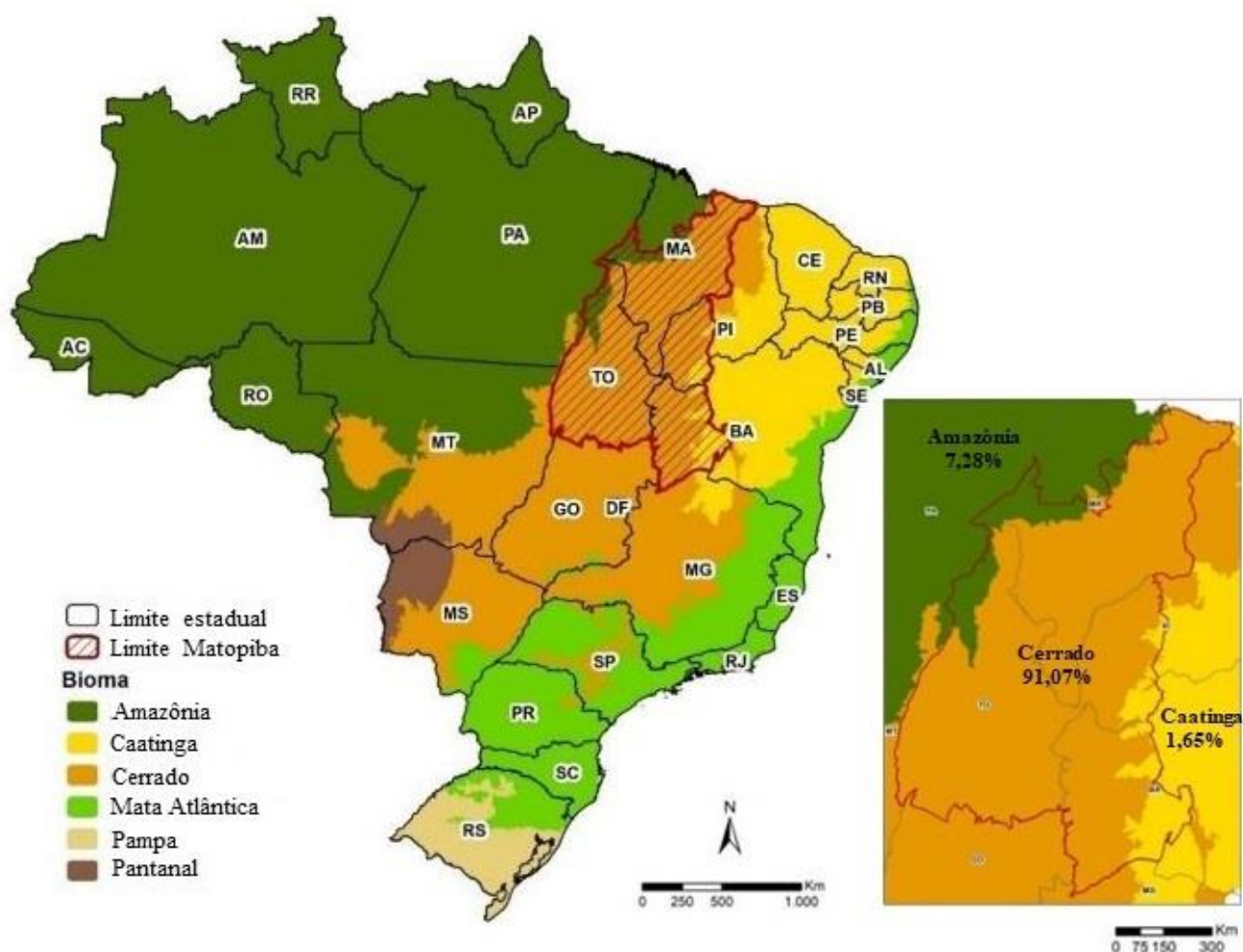
vez que a interação entre o clima e as atividades antrópicas apresentam padrões espaço-temporais de suma importância à dinâmica da região do Matopiba. Os objetivos específicos do estudo são: 1) avaliar a ocorrência de eventos extremos de secas na região do Matopiba, por estado, a partir de índices de secas (SPI-12 e SPEI-12); 2) caracterizar a dinâmica de usos e coberturas do solo, por estado; e 3) analisar as tendências das variáveis climatológicas por transição de uso do solo e por estado federativo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da região do Matopiba

A área conhecida como Matopiba (Figura 1) compreende porções de quatro estados brasileiros: do leste de Tocantins (37,95%), sudoeste do Piauí (11,21%), sul do Maranhão (32,77%) e do oeste da Bahia (18,06%) (Tabela 1). O Matopiba é formado por três biomas brasileiros, sendo: em sua maioria, áreas de Cerrado (com 66.543.540 ha) que correspondem a 91% da sua área de abrangência; pelo bioma Amazônia (5.319.628 ha) e agrega em cerca de 7,3%; e pelo bioma Caatinga (com 1.203.107 ha) e representa aproximadamente 1,7% de sua extensão (EMBRAPA, 2014). A fitofisionomia dominante é o cerrado arborizado, o qual inclui os cerrados ralo, típico e denso (RIBEIRO & WALTER, 1998).

Figura 1 - Localização da área de estudo e distribuição espacial dos biomas no Matopiba



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 1 - Caracterização do Matopiba a nível estadual

Estado	Microrregiões	Municípios	Área (ha)	Percentual de Área no Matopiba (%)
Bahia	4	30	13.214.498,49	18,06
Maranhão	15	135	23.982.345,86	32,77
Piauí	4	33	8.204.588,15	11,21
Tocantins	8	139	27.772.052,07	37,95

Fonte: elaborada pela autora.

A figura 2 indica áreas sob grave degradação no Matopiba, que são áreas prioritárias para o combate à desertificação reconhecidas pelo governo brasileiro (MMA, 2020). A área de Gilbués (1), por exemplo, é conhecida como um dos principais núcleos de desertificação piauiense e, assim como aos demais hotspots de desertificação (2 e 3), a caracterização está associada a fatores como a mineração, a desflorestação e as características ambientais naturais (topografia, clima e solo), resultados obtidos por Santos et al. (2022). Ainda sobre os autores, a susceptibilidade à desertificação é normalmente desencadeada pela substituição de vegetação natural para pastagens e pode ser ainda mais exacerbada pelas alterações climáticas.

Figura 2 - Hotspots de desertificação do Matopiba: (1) Gilbués; (2) Área subúmida seca no Maranhão; e (3) Área semiárida seca no Maranhão



Fonte: adaptado de Santos et al. (2022).

O Matopiba está integrado na bacia do rio Tocantins em 43% da área; na bacia do Atlântico Norte/Nordeste em 40%; e na bacia do rio São Francisco com 17% da área de estudo (MAGALHÃES & MIRANDA, 2014). Segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos, as regiões hidrográficas que ocorrem no Matopiba são: Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São Francisco e Tocantins-Araguaia. Do ponto de vista hidrológico, a região do rio São Francisco é de extrema relevância para a região e o Nordeste do Brasil como um todo, devido ao elevado volume de água transportada para o semiárido; enquanto a região hidrográfica do Parnaíba apresenta o maior potencial hídrico da região. Os principais rios que cortam o Matopiba são: Tocantins, Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Itapecuru, Mearim, Gurupi e Pindaré.

O regime pluviométrico do Cerrado é caracterizado por volumes máximos durante o período de verão e mínimos durante o inverno. Essa variação de precipitação faz com que o bioma tenha duas estações bem definidas: uma seca, que se inicia em maio e se estende até setembro, e outra chuvosa, que compreende o período de outubro a abril (COUTINHO, 1990). Ainda segundo o autor, além das características climáticas, o relevo da região favorece a propagação do fogo, uma vez que é bastante plano ou suavemente ondulado, onde aproximadamente 50% do bioma é representado por altitudes que variam de 300 a 600 metros.

Considerando a ampla diversidade biológica, bem como os inúmeros serviços ambientais essenciais à regulação do ciclo do carbono e do ciclo hidrológico (LAHSEN et al., 2016), é de suma importância o entendimento não apenas da mudança dos usos da terra e a ocorrência de eventos extremos de secas, como também das práticas que tendem a ampliar os impactos e atingir áreas até então intocadas.

2.2 Caracterização do avanço agrícola no Matopiba

A delimitação do território Matopiba foi oficializada pelo Decreto Nº 8.447, de 6 de maio de 2015, que dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário (PDA) do Matopiba, dando também origem a Agência de Desenvolvimento Regional do Matopiba pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Segundo o Grupo de Inteligência Estratégica (GITE) da Embrapa, instituição responsável pela frente de gestão do PDA, existe na região cerca de 324 mil estabelecimentos agrícolas (33.929.100 ha), 46 unidades de conservação (8.334.679 ha), 35 terras indígenas (4.157.189 ha) e 781 assentamentos de

reforma agrária (3.033.085 ha); fatores estes que impulsionaram a delimitação da região (EMBRAPA, 2014).

Em termos gerais, muitas iniciativas e projetos de pesquisas caminham paralelamente (GeoWeb Matopiba e painéis interativos da EMBRAPA); todos com o objetivo de fortalecer o desenvolvimento tecnológico e a inovação. Apesar disso, outros temas relevantes, como as análises de risco climático, a caracterização da região sob o ponto de vista socioeconômico, entre outras estratégias, tem sido discutidos frequentemente pelos órgãos responsáveis e o meio científico.

O Brasil, país cujo desenvolvimento é amplamente baseado no uso de recursos naturais, experimentou um período de crescimento econômico substancial na década de 2000, o que promoveu o desenvolvimento e, conseqüentemente, remodelou a estrutura social (LAVINAS, 2017). Com isso, impulsionou-se as mudanças no uso e cobertura da terra no Cerrado, fato este atrelado ao boom nos preços das commodities agrícolas (HARGRAVE e KIS-KATOS, 2013; YAO, HERTEL e TAHERIPOUR, 2018). Esses processos contribuíram para a redução de mais da metade de sua vegetação natural (MIRANDA et al., 2014; BEUCHLE et al., 2015) e, apesar do bioma apresentar uma grande riqueza de espécies, diversidade de habitats e diferentes fitofisionomias, caracterizando-o como a savana mais rica do mundo (MMA, 2012; RATTER et al., 1997), estima-se que seu desmatamento é maior quando comparado ao da Amazônia (SPERA et al., 2016; CARVALHO et al., 2019).

No que se refere a instrumentos legislativos, o rápido e intenso processo de conversão da vegetação natural em áreas produtivas de commodities se deve a Moratória da Soja, um acordo firmado entre os principais compradores mundiais para não incentivar o desflorestamento da Amazônia, o que acabou impulsionando o cultivo da cultura no Cerrado (GIBBS et al., 2015). No Matopiba este cenário não foi diferente: como consequência da expansão da agricultura, a região vem passando por transformações tanto em aspectos sociais (Tabela 2) quanto econômicos. Os ganhos alcançados ao longo dos anos trouxeram um crescimento desigual para a região, uma vez que a produção de commodities é considerada capital-intensiva e voltada ao mercado externo, o que acarreta o ativo uso de máquinas, insumos e uma variedade de tecnologias, com menor uso do fator trabalho e, conseqüentemente, diminuindo então a apropriação da renda pelos trabalhadores (PEREIRA et. al, 2018).

Tabela 2 - Crescimento populacional nos estados, de 1990 a 2020 (estimativa).

Estado	População						
	1990		2000		2010		2020*
	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Total
Bahia	7.007.729	4.847.428	8.761.604	4.305.306	10.102.476	3.914.430	14930634
Maranhão	1.972.008	2.957.021	3.357.898	2.285.062	4.147.149	2.427.640	7114598
Piauí	1.366.218	1.214.997	1.787.192	1.054.010	2.050.959	1.067.401	3281480
Tocantins	530.795	389.321	858.915	296.998	1.090.106	293.339	1590248
Total	10.876.750	9.408.767	14.765.609	7.941.376	17.390.690	7.702.810	26.916.960

Legenda: *estimativa para 2020, sem possibilidade de classificação entre os montantes de populações urbana e rural.

Fonte: elaborada pela autora.

Com base nos dados acima, é possível notar um crescimento médio populacional de 5% com o passar das décadas nos estados que compõem o Matopiba. Entre os anos de 2000 e 2010, o crescimento populacional do conjunto dos estados foi de 17,7%, enquanto a população do Matopiba em si cresceu em 20,6% (EMBRAPA, 2014b). Segundo os dados do Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a região do Matopiba reúne aproximadamente 6 milhões de habitantes (hab), isto é, uma densidade populacional média de 8,07 hab/km².

A maior parte da população desta região se concentra na área urbana (65%), enquanto 35% residem em áreas rurais. A difusão do agronegócio no Cerrado nordestino tem provocado intensos descompasso, tais como a acentuação de conflitos sociais na área rural ligados a concentração e mercantilização da terra e a exclusão do agricultor familiar (SILVA et al., 2015). Segundo Pereira et. al (2018), é inegável que a região do Matopiba está em forte crescimento, o que, por um lado, traz certo dinamismo para a região; mas, por outro, são atividades que não proporcionam equidade na distribuição de renda e a preservação dos recursos naturais. Assim, sob a perspectiva social, o Matopiba convive paralelamente com a prosperidade do agronegócio e o problema de miséria e pobreza crônica da população local, principalmente por se tratar de áreas de desenvolvimento atrasado frente às demais regiões mais dinâmicas do Brasil.

Sendo uma das maiores produtoras de commodities do Brasil, o Matopiba tem a soja, o milho e o algodão como culturas coadjuvantes (IBGE, 2019). Para as demais culturas, tais

como feijão, sorgo, trigo e arroz, os dados não são muito expressivos e normalmente são culturas tradicionalmente plantadas em regime de sequeiro e irrigadas por pivôs centrais em variadas épocas do ano (Tabela 3).

Tabela 3 - Produção agrícola nos estados do Matopiba.

Variável	Ano	Cultura						
		Algodão herbáceo (em caroço)	Arroz (em casca)	Feijão (em grão)	Milho (em grão)	Soja (em grão)	Sorgo (em grão)	Trigo (em grão)
Área plantada ou destinada à colheita (ha)	1990	16.445	808.194	136.817	519.736	406.985	200	0
	2000	41.574	611.083	134.390	488.027	904.995	1.490	0
	2010	269972	533.882	174.456	639.387	2.208.373	39460	0
	2019*	367.124	208.975	175.529	1.147.454	4.158.576	118.154	3.000
Quantidade produzida (ton.)	1990	8.920	566.553	53.434	189.796	260.624	300	0
	2000	124.262	1.143.260	98.392	1.319.112	2.208.221	2.625	0
	2010	1.048.078	970.803	151.896	2.460.640	6.293.431	75.822	0
	2019*	1.650.388	779.101	159.478	5.731.351	12.850.677	229.779	14.600

Fonte: Produção Agrícola Municipal, 2019.

De acordo com a Pesquisa Agrícola Municipal – PAM (IBGE, 2019), o cenário agrícola dos estados do Matopiba responde por aproximadamente 15% da produção de grãos do país. A região apresentou um crescimento exponencial na produção de soja no período de 1990–2015, aumentando de 260 mil toneladas para 10,8 milhões de toneladas, isto é, um aumento de 4.028% ao longo desses 25 anos. O município de maior destaque é São Desidério-BA, que foi o protagonista na produção de soja entre os anos de 1990 e 2015, com um aumento de 28% (passou de 1.999 ton em 1990 para 1.134.000 ton em 2015).

A dinâmica agrícola na região se estabelece com dois ciclos produtivos ao longo do ano, um de safra (que corresponde ao período chuvoso) e outro de safrinha (ou segunda safra, comumente praticado no inverno). Se associado a irrigação, é possível que exista até quatro ciclos produtivos dentro de um ano safra, o que não gera dependência com o período chuvoso, mas, por outro lado, com o recurso hídrico (irrigação), embora a combinação de precipitação, topografia e solos na região favorece o surgimento de agricultura de sequeiro de larga escala. Considerando não só a dinâmica e a diversidade agrícola, como também as variações de clima, solo e relevo, é notável que o setor necessita de meios eficientes para monitorar suas peculiaridades.

Diante da expressividade do agronegócio na região, alguns aspectos econômicos se tornam ainda mais relevantes. Em termos de contribuição setorial, o setor de serviços representa a maior contribuição para o PIB da região (38,9%), seguido da agropecuária com 20,1%, da administração pública com 26% e da indústria com 15% (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017). Segundo Ribeiro et al. (2020), entre 2010 e 2015, o Matopiba apresentou uma taxa de crescimento do PIB real de 5,1% a.a., valor bem superior à taxa de crescimento brasileira (1,5% a.a.).

2.3 Índices de secas

As secas representam uma grande ameaça para a segurança alimentar, a manutenção das populações rurais em terras vulneráveis e o equilíbrio ecossistêmico, causando perdas na agricultura e em outros setores produtivos. Dada a intensificação e recorrência dos eventos de seca e seus impactos, torna-se necessário aprofundar os conhecimentos visando prognosticar as secas, de modo que possa subsidiar mecanismos de preparação, mitigação e respostas às secas.

O cenário de mudanças na frequência e intensidade das secas tem acarretado uma crescente preocupação também em relação aos perigos combinados (ameaças) com as secas, tais como extremos de calor e os incêndios florestais. Independente do grau dos impactos, é importante ressaltar que a compreensão não deve partir de um evento isolado, mas incluir a análise temporal que parte da interação entre os componentes atmosféricos e terrestres. Por definição, o próprio conceito de secas abrange aspectos de recorrência e escala global, sobretudo com características espaciais e temporais que variam significativamente de uma região para outra (LOON, 2015).

Independente da origem (processos naturais internos, forças externas ou a recorrência de ações antrópicas), é de suma importância o entendimento sobre o que caracteriza os eventos extremos e os desastres, ou seja, a distinção para melhor compreensão e gestão. Para tanto, entende-se por eventos extremos a variabilidade de tempo ou clima acima ou abaixo das extremidades médias observadas; enquanto os desastres são definidos como graves alterações na sociedade, associados à ocorrência de eventos físicos perigosos, a condições de vulnerabilidade, a respostas de emergência imediata e ao cenário de impactos e perdas (IPCC, 2012).

De acordo com Paredes, Barbosa e Guevara (2015), para o entendimento das reais implicações sociais de uma seca, a definição das tipologias se faz necessária. A meteorológica

é quando a precipitação recebida está muito abaixo da quantidade normal esperada; enquanto a hidrológica corrobora o fluxo hídrico (rio) quando este não pode atender as utilizações estabelecidas sob um determinado sistema de gestão da água. A seca agrícola está associada a insuficiência de umidade no solo para o desenvolvimento de uma cultura em qualquer estágio de crescimento; e 4) socioeconômica, quando a diminuição da disponibilidade de água pode ocasionar danos à população.

Ainda no que se refere às secas, vale ressaltar que os estudos podem ser balizados por indicadores, que são variáveis ou parâmetros usados para descrever as condições de seca (como a precipitação, temperatura, vazão, nível de reservatórios e umidade do solo, por exemplo), de modo a integrar os índices, que são representações numéricas da severidade, calculado a partir de inputs climáticos, hidrometeorológicos e outros. Dessa forma, os índices foram desenvolvidos para mensurar o status da seca para um período, de modo a simplificar, quantificar, analisar e comunicar, permitindo a compreensão do fenômeno em estudo a partir da padronização em escalas temporal e espacial.

Para tanto, no presente estudo considerou-se para a avaliação o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI), ambos na escala de 12 meses, tomando como base a região do Matopiba a nível de estado. Embora estes índices possam ser utilizados para considerações hidrológicas, quando aplicados em escalas temporais maiores, como 12 meses, tendem a caracterizar com mais suavidade as condições meteorológicas em maior espaço de tempo, demonstrando picos não evidentes em outras escalas, podendo ser considerado uma boa escala para analisar os dados para essa região, principalmente por estar aderente às características climáticas e corroborar ferramental de planejamento.

2.3.1 Índice de Precipitação Padronizado – SPI

A seca pode ser avaliada por índices de seca como o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), calculado a partir de dados de precipitação. O SPI (MCKEE, 1993) é um índice utilizado para a avaliação de secas em diferentes escalas, em que valores negativos representam condições de déficit hídrico, nas quais a precipitação é inferior à média climatológica. Por outro lado, valores positivos representam condições de excesso hídrico, indicando precipitação superior à média histórica. Assim, o SPI refere-se a uma estatística que compara a distribuição da precipitação acumulada durante um período de meses com aquela acumulada por longo prazo.

No presente estudo, o índice foi calculado a partir da precipitação acumulada mensal fornecida pelo *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (FUNK et al., 2015), versão 2.0, cuja resolução espacial é de 0.5°. O SPI na escala de 12 meses foi utilizado para a caracterização das secas na área de estudo considerando o período de 1981 a 2020.

2.3.2 Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado – SPEI

O SPEI (VICENTE-SERRANO et al., 2010) é um indicador muito relevante para o estudo de secas agrícolas. Mesmo considerando um cálculo similar ao do SPI, este índice incorpora o efeito da evapotranspiração, ou seja, utiliza como valor de entrada o balanço hídrico (precipitação - evapotranspiração). Na prática, a inclusão da temperatura (incluída no cálculo da evapotranspiração) sendo analisada juntamente com dados de precipitação, permite que o SPEI indique o impacto da temperatura na situação de seca.

No presente estudo, similar ao SPI, foi considerado o SPEI na escala de 12 meses. O SPEI é disponibilizado gratuitamente pela plataforma do *Global Drought Monitor*. O *dataset* apresenta resolução de tempo mensal, enquanto a resolução espacial é de 0.5°.

2.3.3 Índice de Saúde da Vegetação (VHI)

O Índice de Saúde da Vegetação (VHI) é uma metodologia comumente aplicada em estudos de detecção e avaliação de severidade e duração das secas (CUNHA et al., 2019; CUNHA et al., 2015; NEMANI et al., 1989). A partir deste índice é possível detalhar espacialmente o comportamento da vegetação à disponibilidade de umidade e a resistência do dossel, indicando o estresse da vegetação e/ou estresse hídrico do solo, dado que é uma combinação da condição da vegetação e da condição térmica da superfície terrestre (NDVI-LST).

No presente estudo, foram utilizadas as séries temporais mensais, com resolução de 4 km, para o período de 1982 a 2020. Os mapas VHI da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) estão disponíveis no *National Environmental Satellite, Data and Information Service* - NESDIS (<http://www.star.nesdis.noaa.gov>).

2.4 Mudanças do uso e cobertura da terra no Matopiba

As mudanças nos usos e cobertura da terra apresentam relação com as demandas por alimentos, expansão urbana e uso dos recursos hídricos, ainda que a mesma cobertura possa estar associada a usos distintos (COMBER, 2008). Para melhor avaliar a relação das mudanças de uso do solo, utilizou-se o Gráfico de *Sankey*, que possibilita uma representação

clara sobre as transições por estado e no tempo. Para tanto, neste estudo estão sendo considerados 4 anos de análise, com intervalos comuns de 10 anos: 1990, 2000, 2010 e 2020.

A base da coleção 6.0 do MapBiomas foi usada como dado de uso e cobertura do solo (MapBiomas, 2020). O MapBiomas é um projeto anual de mapeamento automático de uso e cobertura da terra, produto amplamente utilizado em vários estudos sobre dinâmicas (SILVA-JUNIOR et al., 2020; NALI et al., 2020; COSTA et al., 2021). Para melhor caracterizar os usos do solo, os dados de transições de 1990, 2000, 2010 e 2020 foram reclassificados de acordo com a Tabela 4, de forma a distinguir as áreas de potencial produtivo (Agro-produtivas) das áreas de vegetação natural (Vegetação) e outros usos (Outros).

Tabela 4 - Uso e cobertura da terra reclassificado.

Classe primária (MapBiomas)	Classe final
Formação Natural Florestal	Vegetação
Formação Natural Não Florestal	
Pastagem	Agro-produtiva
Agricultura	
Floresta Plantada	
Mosaico de Agricultura e Pastagem	
Praia, Duna e Areal	Outros
Área Urbanizada	
Mineração	
Outras Áreas Não Vegetadas	
Rio, Lago e Oceano	
Aquicultura	
Não observado	

Fonte: elaborada pela autora.

A partir da reclassificação das classes, obteve-se informações que possibilitaram caracterizar a dinâmica de uso do solo nos seguintes intervalos: a) 1990 a 2000, período em que as mudanças de uso da terra foram intensificadas devido a produção de grãos, cuja consequência foi o desmatamento de extensas áreas (AGUIAR, 2008; BEUCHLE et al.,

2015); b) 2000 a 2010, período em que foram instituídos importantes instrumentos de proteção ambiental, tais como o Código Florestal no Brasil (2008) e o Pacto de Moratória da Soja (2006), o que permite acompanhar as trajetórias antropogênicas e as respostas de governança que podem impactar o uso do solo na região; e c) 2010 a 2020, período em que a oficialização da delimitação do território Matopiba já estava vigente (2015), tornando a região visada, cuja finalidade era promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico sustentável baseado nas atividades agrícolas e pecuárias.

2.5 Análise de tendências das variáveis climáticas no Matopiba

A análise de tendências baseou-se na aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK), metodologia esta que permite o entendimento do sinergismo entre as mudanças hidroclimáticas e a dinâmica de uso e cobertura da terra (SNEYERS, 1975). Do ponto de vista teórico, os resultados possibilitam uma melhor caracterização (em evolução) dessas variáveis, podendo estabelecer base na construção de modelos preditivos do comportamento no futuro, bem como pode orientar as práticas de gestão de recursos hídricos considerando o cenário de secas. Devido à sua importância, muitos estudos têm se dedicado a investigar as tendências das variáveis hidroclimáticas em diversas áreas, tal como proposto por Akinyemi (2021) e por Erasmi et al. (2014).

O desenvolvimento de estratégias que conciliam atividades antropogênicas com a preservação da natureza tem se tornado cada vez mais necessário, principalmente em regiões que enfrentam uma rápida conversão da vegetação nativa em agricultura e que estão mais suscetíveis a riscos e a dependência hídrica para a manutenção das atividades propostas (RESENDE et al., 2020). Dessa forma, tem-se a necessidade de avaliar a provisão de serviços ecossistêmicos relacionados à água sob diferentes cenários de uso do solo na região do Matopiba.

Para uma análise abrangente sobre os padrões climáticos na região, além do SPI e SPEI, o estudo considera também as variáveis temperatura, tanto mínima quanto máxima, e o Índice de Saúde da Vegetação (VHI). Para todas as variáveis, o teste foi aplicado em três conjuntos de transições de uso do solo, a partir dos dados do MapBiomass (1985-2020): a) ***Vegetação para Agro-produtivas***, que corresponde às áreas vegetadas (florestais ou não florestais) convertidas em áreas agro-produtivas; b) ***Vegetação para Outros***, que caracteriza as áreas de outros usos originadas de áreas vegetadas (florestais ou não florestais); e c) ***Outros para Agro-produtivas***, que são áreas já consolidadas que apresentaram potencial de conversão

para uso agro-produtivo.

A Temperatura Máxima (Tmax) e a Temperatura Mínima (Tmin) são derivadas do banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2016), com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, no período de 1980 a 2016. O banco de dados considera 3.625 pluviômetros e 735 estações meteorológicas distribuídas por todo o território brasileiro, utilizados para interpolar espacialmente a data climática pelo método angular de ponderação por distância (Xavier et al. 2016). Apesar dessa série não contemplar os anos que fecham a última década (apenas 1981 a 2017), foi escolhida por ser uma base única de dados validada para temperatura disponível no Brasil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ocorrência de eventos extremos

O diagnóstico das secas pode ser feito com base em uma série histórica de dados meteorológicos, por meio de índices que quantificam a expressividade ou ausência de chuvas. A partir de equações empíricas, esses índices caracterizam os eventos extremos de secas e de chuvas, de forma a contribuir para uma análise efetiva sob qualquer escala. Avaliando-se os dados obtidos a partir do SPI e SPEI sobre a região do Matopiba, observa-se uma boa concordância temporal entre os eventos extremos identificados considerando ambos os índices, resultados estes aderentes ao propósito dessas metodologias.

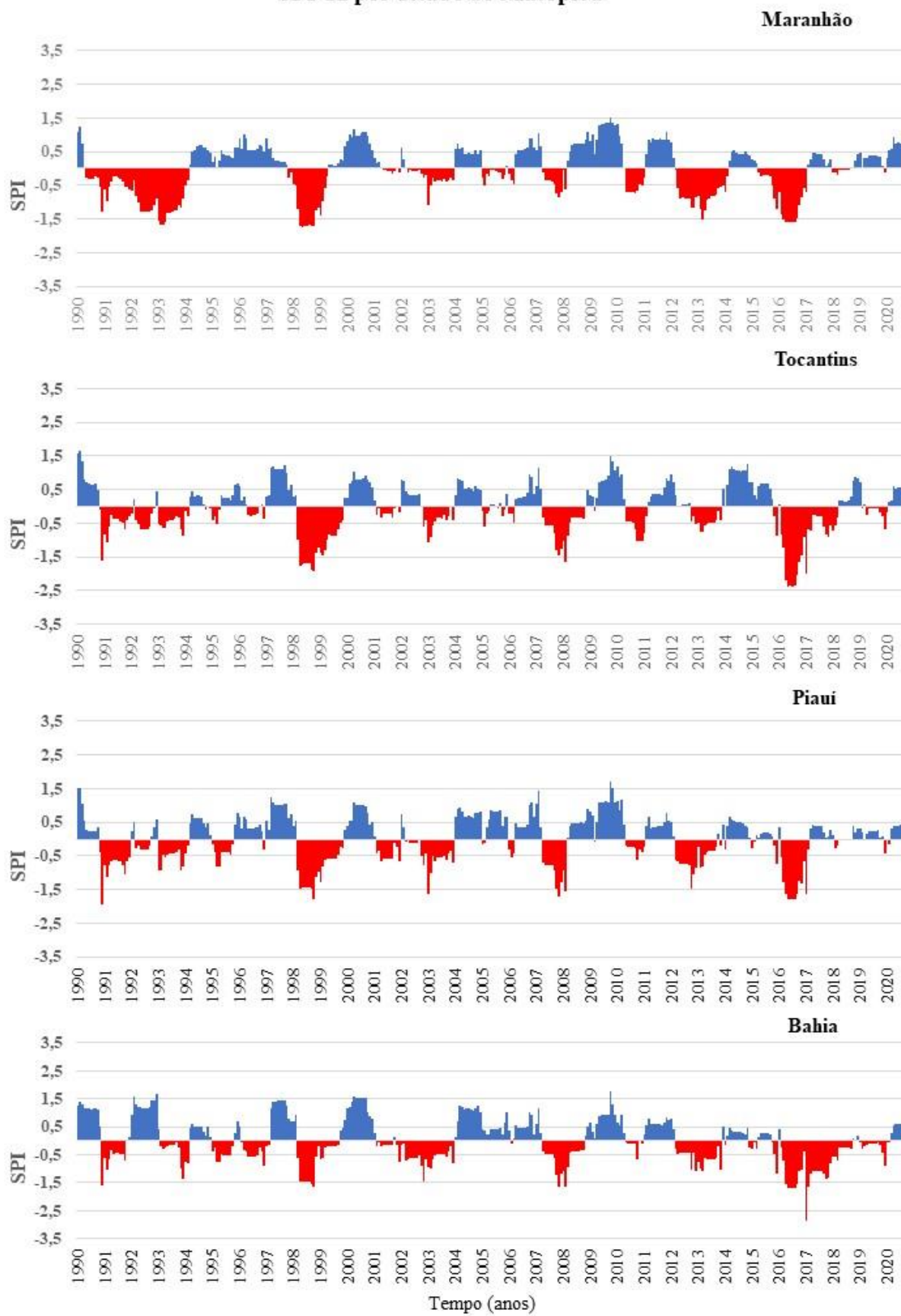
Na Figura 3 apresenta-se a evolução temporal dos índices SPI e SPEI na escala de 12 meses para cada um dos estados incluídos no Matopiba. Vale ressaltar que o SPI indica os eventos de secas com base apenas nos dados dos desvios de precipitação; enquanto o SPEI, por sua vez, indica os eventos de secas potencializados pelo efeito da temperatura. De modo geral, ambos os índices apresentam os mesmos eventos de secas de maior intensidade nos diferentes estados. No entanto, os eventos de secas são mais intensos (valores mais negativos) a partir dos dados de SPEI.

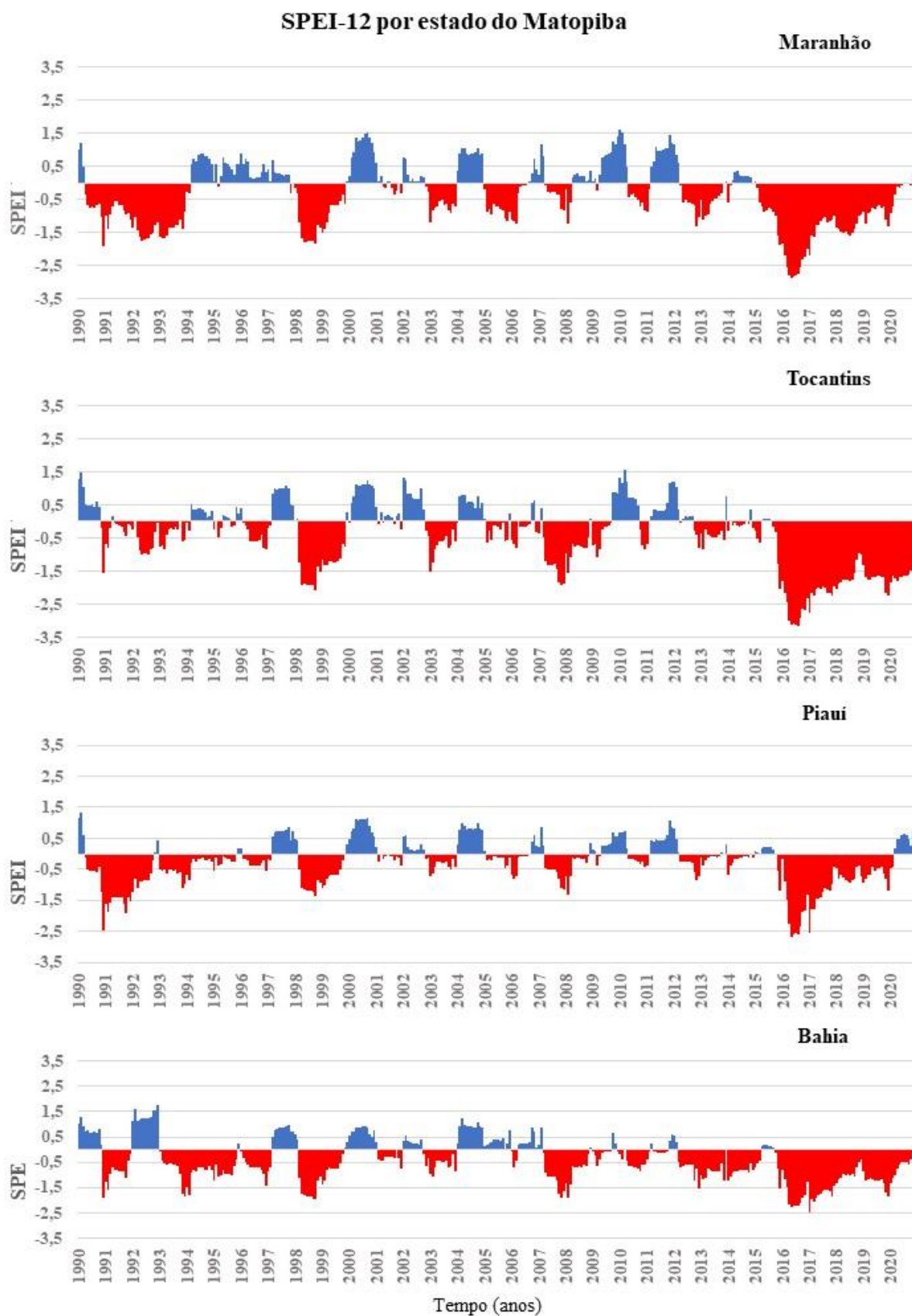
De acordo com ambos os índices, os períodos 1991-94, 1998-99, 2007-09 e 2015-20 apresentaram os mínimos valores para a região. Por outro lado, os anos de 1990, 1997, 2000, 2005, 2010, 2012, 2015 e 2019 apresentaram os máximos valores, caracterizando eventos de chuvas mais extremas. Constata-se, em adição, que no período avaliado os eventos secos foram mais intensos e frequentes que os chuvosos, principalmente a partir dos dados de SPEI.

Apesar da relação entre os resultados obtidos pelos índices ser alta, é possível evidenciar que o SPEI se mostra mais proeminente na análise de secas na região, uma vez que considera também a demanda evaporativa da atmosfera. Por se tratar de uma região predominantemente agrícola e de vegetação savânica, a restrição hídrica é fator importante para a sazonalidade característica da área. Dessa forma, esse índice permite a observação das altas condições impostas não somente pela restrição pluviométrica, como também combina o efeito das altas temperaturas, sendo elemento crucial na representação de eventos extremos em cenários de mudanças no clima.

Figura 3 - Evolução temporal dos índices SPI e SPEI, respectivamente, na escala de 12 meses por estado do Matopiba

SPI-12 por estado do Matopiba





Fonte: elaborada pela autora.

Analisando os eventos de secas da região, é possível observar que a seca de 1991-94 foi a segunda mais severa do período ($-1.3 \geq \text{SPE} \leq -1.6$), ficando atrás apenas da que ocorreu de 2016-20, que pode ser classificada como uma seca excepcional ($\text{SPEI} < -2.0$). Na sequência, teve-se a seca de 1998-00 que também foi severa, embora sua duração tenha sido menor se comparada com a de 1991. Além destas, a seca de 2007-10 é classificada como moderada, enquanto a de 2012 como extrema.

Ressalta-se que outros eventos de secas foram observados nas últimas três décadas e, embora essas possam ser consideradas como condição anormal de secas à secas moderadas, seus impactos podem ter sido notórios na produção agrícola, pela quebra de safra e/ou falhas no desenvolvimento vegetativo. De acordo com os dados da Pesquisa Agrícola Municipal (PAM-IBGE), considerando toda área do Matopiba, as safras dos anos de 2013 e 2016 apresentaram queda na razão entre a área plantada e área colhida (0,98), em razão das condições de déficit hídrico na região.

No que se refere aos eventos de secas, os resultados mostram evidências de que estas se tornaram mais severas e duradouras na última década. Especificamente durante o período de 2007 a 2020, mais de 25% da região do Matopiba foi impactada por secas severas e excepcionais em quatro anos (2007, 2012, 2015 e 2017). As mudanças no uso da terra para a expansão do agronegócio, bem como as mudanças climáticas na zona de transição entre o leste Amazônico e o Cerrado adjacente podem ter agravado essas condições, conforme também destacado por MARENGO et al. (2022). Os resultados obtidos fornecem evidências da crescente pressão climática na área do Matopiba, o que se traduz como risco para a segurança alimentar, o ecossistema e a economia, e gera a necessidade de conciliar a expansão agrícola com a proteção dos biomas.

Vários fatores de grande escala associados às mudanças ambientais e antropogênicas interagem de forma não linear com a região do Matopiba. Destaca-se que a distribuição de chuvas sofre influência das diferentes configurações de padrões dos oceanos Pacífico e Atlântico (como a ocorrência de El Niño e o aquecimento anômalo das temperaturas da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical); assim, vários estudos mostram que parte destes eventos de secas estão relacionados com as anomalias de TSM (MARENGO et al., 2022; MARENGO et al., 2016; NOBRE et al., 2016; ZAIATZ et al., 2018; SALES et al., 2020).

Vale ressaltar que outros estudos também apresentaram resultados muito similares. Marengo et al. (2020) destacaram a ocorrência de eventos secas nos mesmos anos

identificados no presente estudo. Embora a caracterização dessas secas esteja aderente aos resultados demonstrados, neste estudo evidenciou-se que os anos de 1992, 1994, 1998, 2005, 2007, 2010, 2012, 2015 e 2017 corroboraram maiores áreas afetadas, bem como o fato de que a seca severa a excepcional aumentou esses impactos. Alguns dos anos destacados, por exemplo, são reconhecidos como caracterizados por fortes El Niño (1997-98 e 2015-16) ou anos de anomalias positivas de temperatura no Atlântico Norte Tropical (TNA) (2005 e 2010). Por outro lado, observa-se que a área impactada pela seca foi pelo menos tão grande quanto em outros anos (tal como em 2007, 2012 e 2017), o que sugere que os impactos podem ser superados pela condição de seca já estabelecida e agravada na região nos últimos anos, e não necessariamente associada aos eventos oceânicos citados.

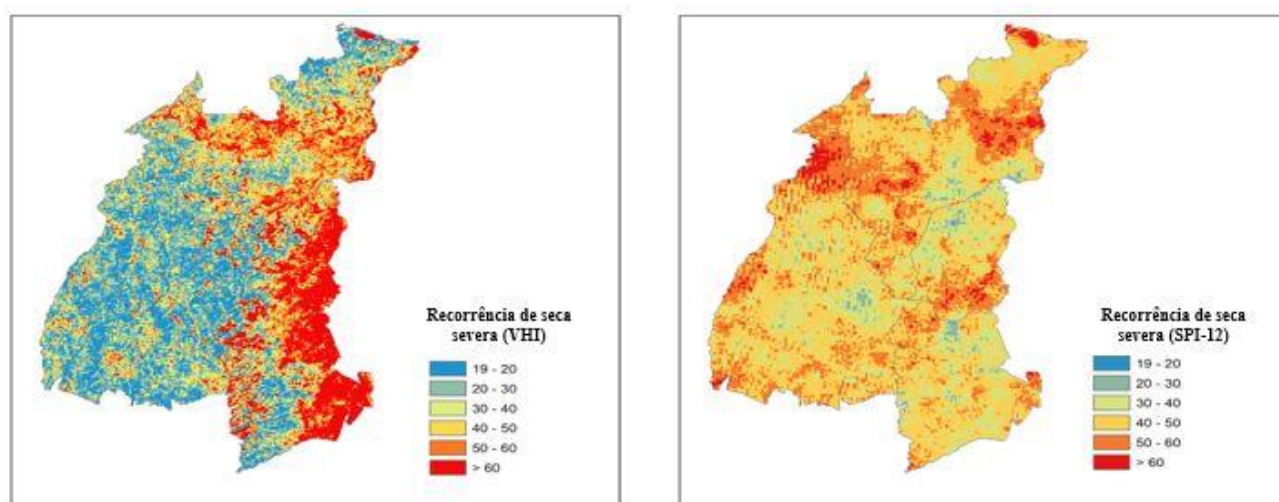
Jimenez et al. (2021) também destacaram que os maiores déficits de chuva na região do Matopiba também são observados, particularmente, no período em que ocorreram eventos de El Niño e TNA quente. Forte variabilidade interanual de precipitação é identificada sobre essa região, com predominância de anomalias negativas desde 2010, o que acarretou perdas na agricultura, pecuária, abastecimento de água e economias locais, e impulsionou o governo federal a autorizar a liberação de recursos para distritos mais afetados, a fim de mitigar os impactos negativos (MARENGO et al., 2018). De acordo com o antigo Ministério da Integração (www.mi.gov.br), entre os anos de 2012 e 2016 aproximadamente 33,4 milhões de pessoas foram afetadas pela seca, com prejuízos estimados em R\$ 104 bilhões, o que evidencia os grandes impactos associados a ocorrências de secas.

Conforme destacado, a oscilação do fenômeno EN e a variabilidade da temperatura em função de TNA desempenha um papel fundamental na alternância entre anos úmidos e secos, bem como na espacialização destes eventos na região (KAYANO & ANDREOLI, 2007; SOUZA et al., 2005; MARENGO et al., 2017; TIMMERMAN et al., 2018). A Figura 4 mostra a distribuição espacial da recorrência de secas a partir dos dados de VHI e de SPI-12 entre os anos de 1982 e 2020.

A partir da Figura 4, é possível observar que a recorrência de condição severa de seca ($VHI < 20$ e $SPI-12 < -1.3$) é alta na maior parte do território do Matopiba. A partir dos dados de VHI, a maior recorrência de seca severa se dá nas áreas próximas do semiárido, do sudeste do Matopiba, principalmente na região baiana e na porção central do Maranhão. Já em relação ao SPI-12, os dados de recorrência de secas estão mais dispersos espacialmente, ou seja, dispostos em diversas áreas do território. As condições energéticas do ambiente afetam todos os processos bioquímicos e biofísicos que condicionam o metabolismo vegetal, tais

como absorção hídrica, respiração, fotossíntese e perda de água. A diferença apontada na Figura 4 em relação ao padrão espacial da ocorrência de seca obtida pelo VHI e pelo SPI pode ser em razão do VHI ser um indicador de resposta ao déficit hídrico, cuja dinâmica está associada à distribuição dos diferentes tipos de vegetação. Dessa maneira, o mapa de recorrência de seca considerando o VHI pode indicar áreas com vegetação menos resiliente à baixa disponibilidade hídrica.

Figura 4 - Recorrência de seca severa a partir dos dados de VHI e SPI-12 de 1982 a 2020



Fonte: elaborada pela autora.

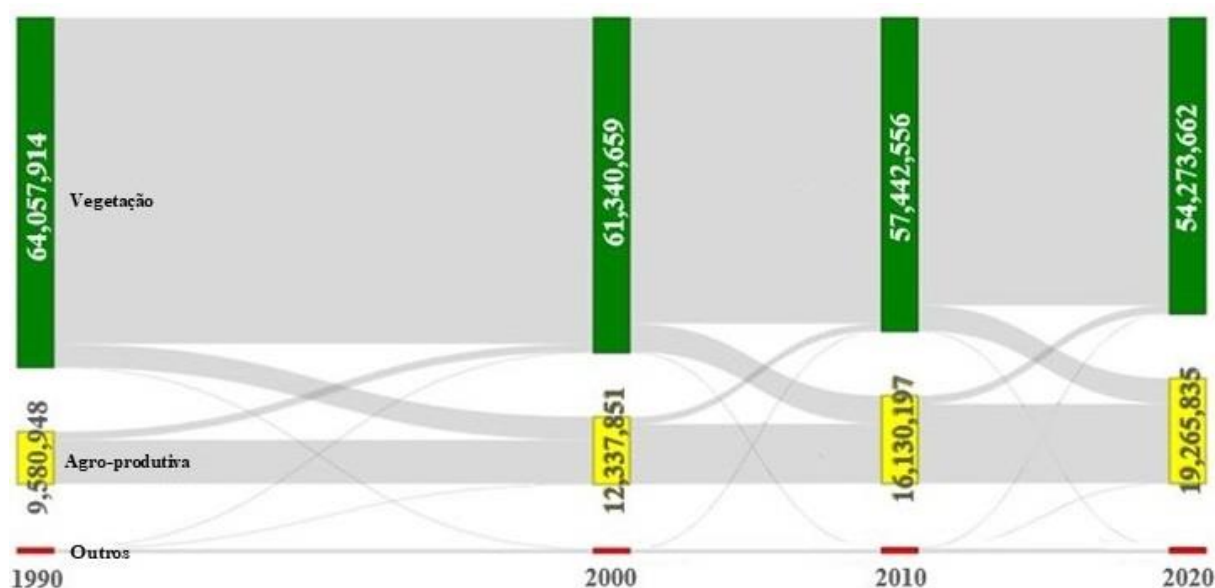
De modo geral, os resultados de recorrência de secas fortalecem a interpretação de riscos associados às secas na produção da região, os quais, como ditos, estão associados aos eventos oceânicos.

3.2 Dinâmica de uso e cobertura da terra

A Figura 5 apresenta as transições de uso do solo para a região do Matopiba. É notório que as áreas de vegetação foram reduzidas nas últimas 3 décadas (15,2%), enquanto as áreas agro produtivas expandiram em 101,1%, fato este impulsionado pelo interesse na nova fronteira agrícola. Os principais fatores que impulsionaram a região são: a disponibilidade de áreas extensas de perfil plano que facilitam a mecanização intensiva; a presença de solos com propriedades físicas favoráveis para mecanização (notadamente textura e baixa compactação); a possibilidade de introdução de mais cultivos de sequeiros em função do regime de chuvas; e o baixo custo de aquisição de terras, se comparado a outras regiões produtoras de grãos no Cerrado (BOLFE et al., 2016).

A cada década, o avanço nas mudanças de uso e cobertura da terra demonstram o grande progresso da agricultura no Matopiba. De 1990 a 2000, o crescimento de áreas produtivas foi de aproximadamente 2,7 milhões de ha (28,8%); em 2000-2010 de 3,7 milhões de ha (30,7%); e em 2010-2020 de 3,1 milhões de ha (19,4%). Por outro lado, as áreas de vegetação natural representaram valores próximos dos citados em termos de áreas, embora a variação em proporção seja de redução de 4,2% de 1990 a 2000; 6,3% de 2000 a 2010; e 5,5% de 2010 a 2020. Isso quer dizer que grande parte das áreas de vegetação foram convertidas em produtivas ao longo da série analisada, totalizando aproximadamente 4,3 milhões de ha. As áreas de outros usos variaram de forma menos expressiva ao longo das décadas, sendo 39 mil ha na primeira década analisada (1990-2000); 106 mil ha no segundo período (2000-2010) e 31 mil ha na última década (2010-2020). Conforme proposto, essa classe inclui recursos hídricos e formações não vegetadas.

Figura 5 - Transições do uso do solo por décadas (1990-2000-2010-2020) na região do Matopiba



Fonte: elaborada pela autora.

Para analisar as LULC, é indispensável um olhar sobre as iniciativas que podem estar alavancando estes cenários. A primeira década avaliada (1990-2000) é marcada pelo grande avanço nos desmatamentos, em função da expansão de áreas destinadas à produção de grãos. A zona de transição entre os biomas Amazônia Oriental e o Cerrado compreende a maior área de contato entre fisionomias florestais e savânicas nos trópicos, sendo o Cerrado reconhecido

como a savana mais biodiversa do mundo (TORELLO et al., 2013). Além das características da paisagem do Cerrado, tanto em termos biofísicos (geomorfologia, solos, clima e vegetação) como da própria ocupação agrícola (baixo custo de terras, facilidade para mecanização e adaptação a sistemas de produção de sequeiro), a região do Matopiba se tornou estratégica pela facilidade de escoamento da produção de grãos para exportação no litoral norte do Brasil, conexão proposta entre a Estrada de Ferro Carajás e o porto de Itaqui em São Luís-MA (BOLFE et al., 2020).

De 2000 a 2010, outros estudos também indicam a intensificação agrícola na região do Matopiba, visto que, entre 2000 e 2014, 30% da expansão da soja no Cerrado ocorreu com a remoção das áreas de vegetação natural (Soterroni et al., 2019). Neste período, grande parte do bioma foi convertido em algum tipo de uso antrópico e, especialmente no Matopiba, onde são encontrados os maiores fragmentos de vegetação natural do Cerrado (TORELLO et al., 2013). Chrysoulakis et al. (2019), através de uma análise feita considerando o período entre 2000 e 2015, citaram tendências positivas para o aumento do albedo (razão entre a radiação solar refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela) no Brasil, principalmente no Cerrado e região Amazônica, onde as taxas de desmatamento foram altas devido à expansão do agronegócio.

Muitas são as discussões sobre a necessidade de conservação da biodiversidade do Cerrado, visto a fragilidade em termos de regulamentações, embora tenham sido implementados dois grandes marcos entre 2000 e 2010, o Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012) e o Pacto da Moratória da Soja. De um lado, teve-se o Código Florestal Brasileiro (lei que regulamenta o uso e a proteção de florestas e demais tipos de vegetação nativa dos imóveis rurais privados), exigindo a conservação de apenas 20% da propriedade com vegetação nativa (ou 30% se localizada na Amazônia Legal) e considerando como uso consolidado todo desmatamento ocorrido até 22 de julho de 2008. O Pacto da Moratória da Soja, por sua vez, é uma iniciativa que tem como objetivo assegurar que a soja produzida no bioma Amazônico e comercializada pelos seus signatários não esteja associada a desmatamentos ocorridos fora do período que define o uso consolidado, ou seja, após 2008.

Ambas as iniciativas, de forma indireta, enfraquecem o estabelecimento de ações que promovam especificamente a recuperação de áreas degradadas e/ou convertidas na década antecedente na região do Matopiba, embora sejam importantes regulamentações do ponto de vista ambiental. Primeiramente, é fato que a obrigação de recuperação recai sobre a área e não necessariamente sobre o agente. Ou seja, independente se o desmatamento foi praticado pelo

proprietário, arrendatário ou até mesmo o possuidor anterior, se a área continua desmatada, então o atual proprietário assume a responsabilidade pela recuperação - podendo posteriormente cobrar do agente do desmate, em ação própria, os custos da recuperação. O segundo destaque é para as Reservas Legais que, ao invés de ser recuperada, podem ser compensadas em outra propriedade com excedente de vegetação nativa em relação à sua própria RL. Além destes pontos, existem exceções previstas no art. 8º do Novo Código Florestal que permitem a supressão de vegetação em APP em casos de utilidade pública, interesse social ou até baixo impacto ambiental. Contudo, dificilmente tais casos estão associados as atividades agrícolas, de forma que é improvável a utilização dessas exceções, embora a fiscalização se faça necessária.

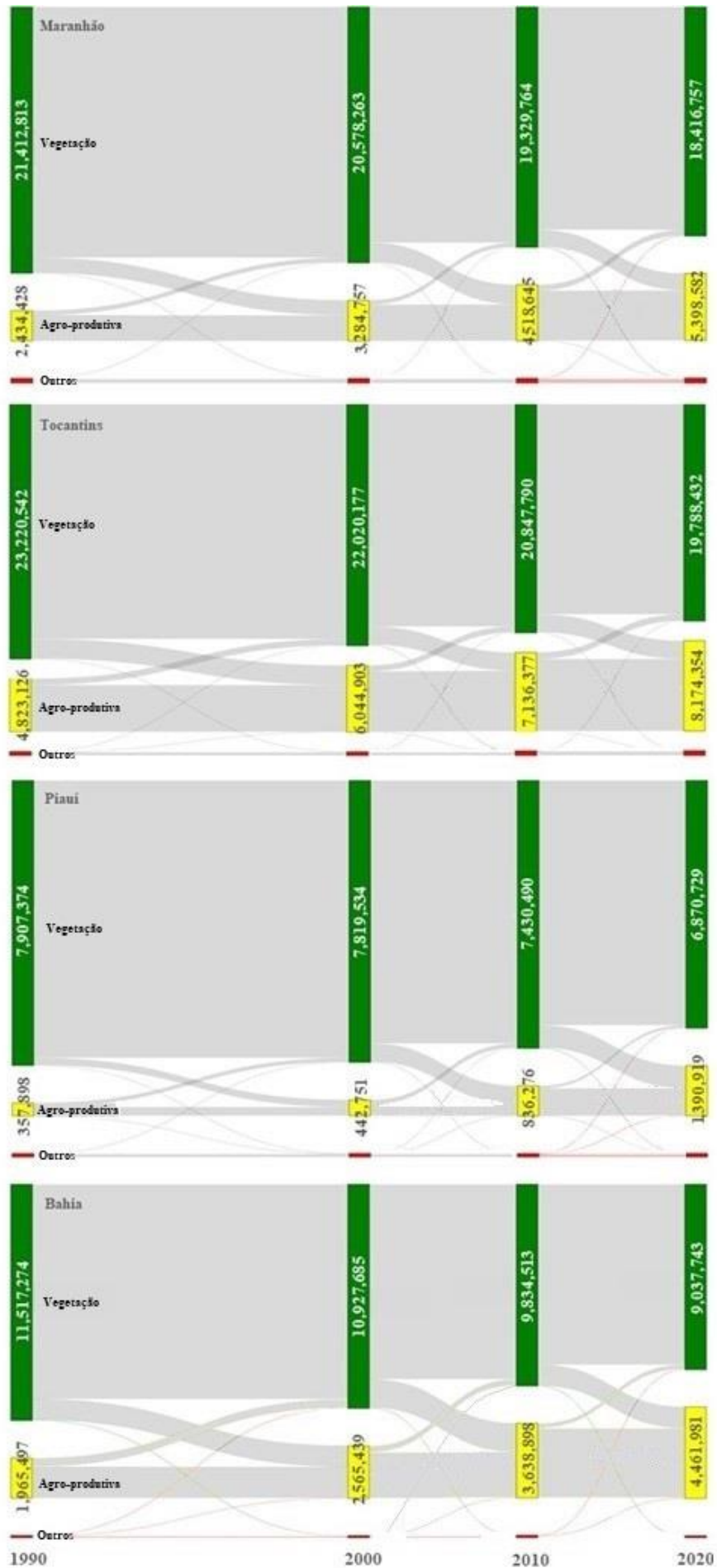
Por fim, o Novo Código Florestal traz instrumentos com o poder de impulsionar a recuperação ambiental: o Cadastro Ambiental Rural (CAR), que tem como objetivo unificar as informações ambientais das propriedades e posses rurais, construindo uma base-controle, que facilite o monitoramento, o planejamento ambiental e econômico sobre uso da terra; os Programas de Regularização Ambiental (PRAs) estaduais, que vão orientar o processo de regularização e o Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas ou Alteradas (PRADA); e os Termos de Compromisso (TCs) que vão abranger os compromissos de cada produtor rural. Apesar da legislação ser federal, é de responsabilidade dos estados validar os cadastros do CAR e regulamentar e implementar o PRA. Entretanto, mesmo passados mais de 10 anos da promulgação, a maioria dos estados tem a implementação atrasada, o que dificulta o processo de regularização, cria insegurança para toda a cadeia produtiva, gera confusão, pode motivar discussões jurídicas que tendem a atrasar, ainda mais, o processo de sua implementação, além de incentivar o gargalo e a não efetividade das demais regulamentações.

Já em relação à última década (2010-2020), os incentivos ao desenvolvimento agrônômico na região se tornaram ainda maiores, uma vez que a oficialização do Matopiba como nova fronteira agrícola se deu neste período. Conforme sabido, a iniciativa tem como objetivo promover e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico e, ainda que proposto como desenvolvimento sustentável, muitos são os desafios para que as atividades agro produtivas considerem ações de cunho conservacionista. Os avanços produtivos foram nítidos, principalmente na produção de soja: em 2013, aproximadamente 6,8 milhões de toneladas foram produzidas, enquanto em 2018 a estimativa foi de 14 milhões de toneladas de soja, segundo a Produção Agrícola Municipal (PAM), totalizando um crescimento de 105,9%. Já os avanços de LULC também foram evidentes e outros estudos

também afirmam que a nova fronteira agrícola é caracterizada por rápidas mudanças no uso da terra, com grandes áreas de vegetação nativa - ou seja, de Cerrado - convertidas diretamente em agricultura intensiva e mecanizada de grande escala (Gibbs et al., 2015).

As transições de uso e cobertura do solo por estado do Matopiba estão apresentadas na Figura 6. É possível observar que o padrão de redução de área vegetada e aumento de área agro produtiva se mantém independentemente do estado. Isso quer dizer que, embora tenhamos contribuições diferentes por estado, o uso agrícola se manifestou de forma muito orgânica na região como um todo. Vale ressaltar que o gráfico de *Sankey* mostrou-se muito eficiente na demonstração dos fluxos de transição de LULC.

Figura 6 - Transições do uso do solo por décadas (1990-2000-2010-2020) na região do Matopiba



Fonte: elaborada pela autora.

Na região do Maranhão, o uso agro produtivo representou um aumento de 850 mil ha (34,9%), 1,2 milhões de ha (37,6%) e 879 mil ha (19,5%) nas transições analisadas (1990-2000, 2000-2010 e 2010-2020, respectivamente). De 1990 a 2020, a área agrícola expandiu em 121,7%, valor esse associado a aproximadamente 2,9 milhões de ha de vegetação desmatada, às quais até então eram intocadas, embora pudessem ter algum nível de degradação. Costa et al. (2020) mostraram que o município de Balsas-MA apresentou tendência de aumento na temperatura entre os anos de 1976 e 2018, com um aumento de aproximadamente 5°. Além disso, destacaram que entre os anos de 1988 e 1998 observou-se uma diminuição de aproximadamente 50% na vegetação natural do município e aumento nas áreas agrícolas. Tais evidências corroboram a ampliação do cenário de impactos associados à ocorrência dos desmatamentos e incêndios, o que caracteriza os desastres antropogênicos.

No estado do Tocantins, os avanços da ocupação do agronegócio também se mostraram evidentes. O estado contribuiu com uma expansão de 3,3 milhões de ha de 1990 a 2020, o que representa um crescimento de 69,5%; contribuindo para que o estado apresente na última década a maior área agrícola se comparado aos demais estados (8,1 milhões de ha). É possível observar que o progresso em termos de área foi de 1.221.778 (25,3%), 1.091.474 (18%) e 1.037.977 (14,5%) ha abertos, sendo eles, respectivamente, na primeira, segunda e terceira décadas analisadas. Por outro lado, foram desmatados 3.432.020 ha de vegetação nativa, o que corrobora a forte correlação entre desmatamentos e a expansão agrícola.

Já em relação ao estado do Piauí, apesar de ele deter a menor área produtiva ao longo de todas as décadas analisadas, o padrão de redução de área vegetada e conversão destas em áreas produtivas se mantiveram muito similares ao identificado nos demais estados. O uso agrícola foi inserido em uma área de 1.033.020 ha, o que corresponde a 288,6% de aumento, crescimento exponencial para essa região em específico. A vegetação, por sua vez, foi reduzida em 1.036.646 ha (13,1%), fato nitidamente associado à expansão agrícola. Neste estado, as áreas de outros usos também variaram com pouca expressividade (3.625 ha) durante todo o range temporal analisado.

No que diz respeito ao estado da Bahia, a conversão da vegetação para áreas agro produtivas foi de forma progressiva, com crescimento de 30,5% de 1990-2000; 41,8% de 2000-2010; e 22,6% de 2010-2020. A área vegetada foi reduzida em 21,5% ao longo das décadas analisadas, o que corresponde a uma redução de 247.953 ha. Vale ressaltar que o

estado baiano representa a terceira maior contribuição para o Matopiba em termos de área agrícola, além de ser o estado que avançou fortemente no uso da irrigação, principalmente por pivôs centrais. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), o oeste da Bahia e a Chapada Diamantina se destacam como o polo dessa tecnologia no país, de forma que os equipamentos de irrigação ocupam 147.087 mil ha, cerca de 2,5% da área total destinada à agricultura na região.

A dinâmica de uso e cobertura da terra da região indica que o estoque de áreas antropizadas com boa aptidão produtiva está diminuindo, enquanto a expansão de novas áreas agrícolas dependerá de áreas com cobertura natural (BOLFE et al., 2016). Segundo a CONAB (2019), atualmente a região é responsável pela produção de aproximadamente 24 milhões de toneladas de grãos (soja e milho, por exemplo), enquanto um aumento de 54% na produção de grãos está projetado para ocorrer nos próximos dez anos (MAPA, 2019). Dessa forma, para um planejamento territorial adequado, devem ser incentivadas ações para elevar a produtividade das áreas já consolidadas, bem como a recuperação de áreas degradadas, visando ao desenvolvimento mais sustentável da região.

A temática se torna ainda mais necessária pela descontinuidade nas ações do governo federal para a região depois da oficialização da delimitação, o que por si só caracteriza as dificuldades de alinhar políticas estaduais com outras regiões (Regiões Nordeste e Norte e Amazonia Legal), dado que o Matopiba não abrange a totalidade dos respectivos estados. Sendo assim, discussões sobre agricultura sustentável da região Matopiba envolvem tanto defensores da conservação (e os serviços ecossistêmicos associados) quanto defensores da agricultura (e as receitas vinculadas). Temas como a conservação dos recursos hídricos devem ser tratados com grande relevância para ambos os interessados, para definição de estratégias associadas com as mudanças climáticas globais e a intensificação do uso agrícola. Todas essas discussões devem ser conduzidas à luz da heterogeneidade da paisagem do Cerrado, retratadas nesta pesquisa como áreas vulneráveis às secas e ao êxodo rural no médio e longo prazo.

3.3 Análise de tendências climáticas

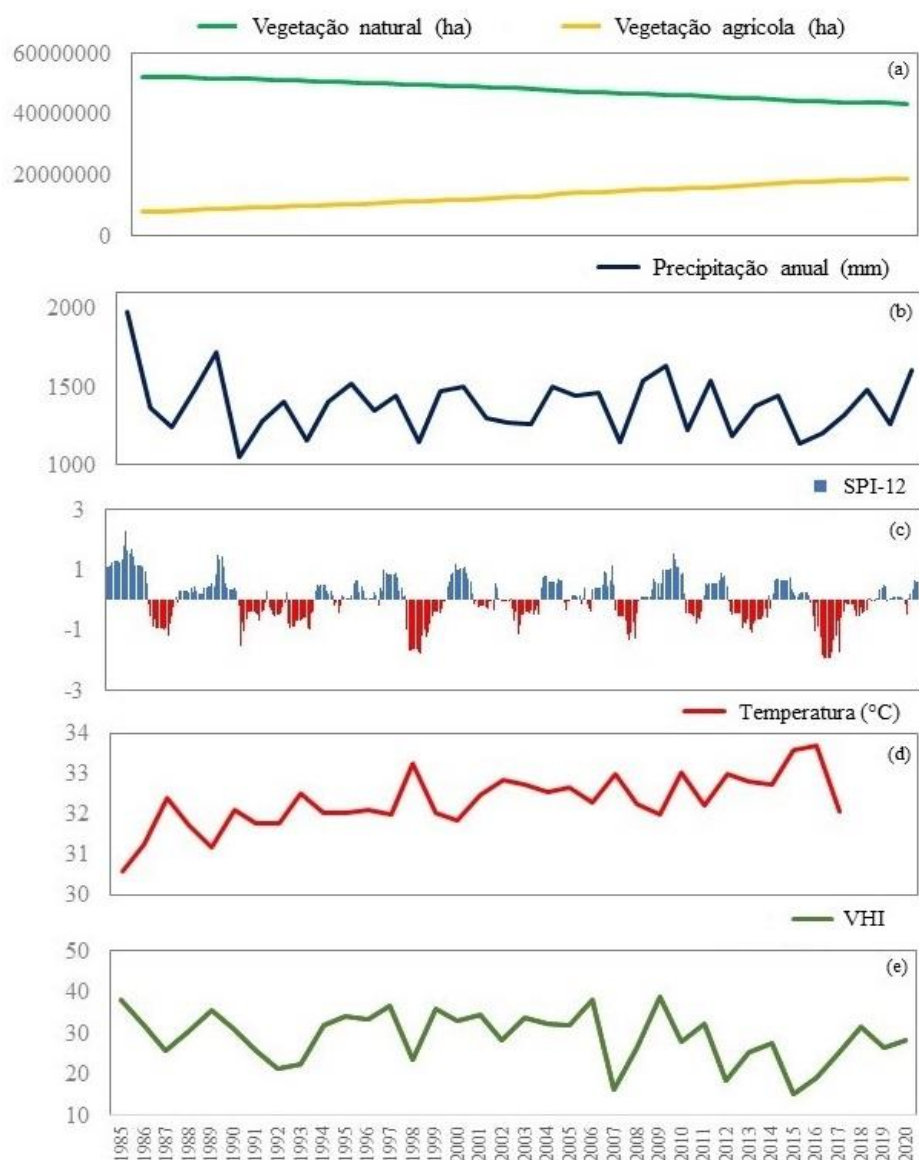
A evolução temporal das áreas de vegetação natural e áreas de atividades agropecuárias, bem como as séries temporais de diferentes variáveis são apresentadas na Figura 6. Conforme já destacado pelo gráfico de *Sankey*, as áreas de vegetação natural reduziram, enquanto as áreas de atividades agro-produtivas cresceram em toda a região nas últimas décadas. Diversos estudos realizados para diferentes ecossistemas apontam que a

conversão da vegetação natural em agricultura ou pastagens afeta os processos de superfície (balanços de energia, de água e de carbono), provocando alterações climáticas nas regiões locais e adjacentes (PIELKE et al., 2011; MAHMOOD et al., 2013; CUNHA et al., 2015; MARENGO et al., 2018). Por outro lado, as mudanças climáticas também afetam a distribuição da vegetação, uma vez que estas influenciam os padrões de temperatura e a distribuição de chuvas.

O principal objetivo do presente estudo não foi avaliar os impactos das mudanças dos usos e cobertura da terra no clima, mas sim os padrões de eventos extremos de secas em áreas significativamente antropizadas. De acordo com a Figura 7, é possível verificar pouca alteração nos acumulados anuais de chuvas na região do Matopiba nas últimas décadas; no entanto, por outro lado, observa-se um aumento significativo da temperatura. Além disso, é possível verificar que o estresse da vegetação vem aumentando nas últimas décadas, como indicado pelos valores mais baixos de VHI. Uma vez que no cálculo do VHI são utilizadas informações sobre o NDVI e a temperatura de superfície, a redução observada no VHI pode ser resultado da combinação de ambos, ou apenas forçado por uma delas. No caso da área do Matopiba, a mudança da cobertura vegetal pode ser uma causa; no entanto, o aumento constante de temperatura na região também pode estar contribuindo para esse padrão observado.

A flutuação temporal e a variação espacial são características inerentes ao clima e ao tempo. A combinação desses aspectos deve ser discutida com detalhamento, por possibilitar simular situações futuras de clima e, para isso, se faz necessário entender os conceitos de variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática. Analisando as variáveis na região do Matopiba como um todo, observam-se tendências positivas para áreas agro produtivas (1) e negativas para áreas de vegetação natural (1). No que se refere à precipitação total anual, a tendência é de redução de 0,044; enquanto o SPI-12 responde com tendência negativa de 0,003, ambos corroborando o cenário de secas. A temperatura máxima anual também se mostra aderente à condição de estresse térmico, dado que a tendência obtida é positiva de 0,379, enquanto o VHI apresentou tendência de -0,163.

Figura 7 - Evolução temporal e espacial de variáveis climáticas e mudança do uso do solo



Legenda: a) área de vegetação natural (verde) e vegetação agrícola (amarelo), b) total anual de precipitação, c) SPI-12, d) temperatura Máxima Anual; e) VHI mínimo anual.

Fonte: elaborada pela autora.

A identificação da variabilidade temporal e espacial de variáveis meteorológicas, bem como de eventos extremos, como a duração dos períodos de seca, a duração dos períodos de calor e a intensidade pluviométrica, é fundamental para estudos agrometeorológicos, uma vez que podem impactar negativamente os rendimentos produtivos em condições críticas. Mais do que inferir apenas sobre os riscos climáticos, esses resultados permitem caracterizar os riscos ambientais, sociais e econômicos, dado a sua relação com as mudanças climáticas e as expectativas produtivas propostas para o Matopiba (SAATH & FACHINELLO, 2018; Dos REIS et al., 2020; PIRES et al., 2016). A permanência dessas tendências pode levar a

impactos e, portanto, os resultados são cruciais para a elaboração de estratégias e o planejamento nacional.

Os resultados da análise de tendências climáticas para as diferentes transições utilizando o método de Mann-Kendall (MK) podem ser vistos na Tabela 5. A fim de facilitar a discussão dos resultados, as transições estão numeradas da seguinte forma: (1) para Vegetação para Agricultura; (2) para Vegetação para Outros usos; e (3) para Outros usos para agricultura.

Tabela 5 - Resultados da análise de tendência climáticas nas diferentes transições de uso do solo utilizando o método de Mann-Kendall (MK)

STATE	ID	LULC	SPEI		SPI		VHI		TMAX		TMIN	
			tau	p	tau	p	tau	p	tau	p	tau	p
MA	1	VEG-AGR	-0,208	<0,0001	-0,010	0,758	-0,243	<0,0001	0,433	<0,0001	0,439	<0,0001
	2	VEG-OUT	-0,161	<0,0001	-0,043	0,188	-0,158	<0,0001	0,393	<0,0001	0,453	<0,0001
	3	OUT-AGR	-0,117	<0,0001	-0,03	0,359	-0,09	0,005	0,366	<0,0001	0,475	<0,0001
TO	1	VEG-AGR	-0,224	<0,0001	0,038	0,247	-0,231	<0,0001	0,377	<0,0001	0,374	<0,0001
	2	VEG-OUT	-0,386	<0,0001	-0,083	0,012	-0,286	<0,0001	0,317	<0,0001	0,257	<0,0001
	3	OUT-AGR	-0,417	<0,0001	-0,103	0,002	0,024	0,461	0,322	<0,0001	0,383	<0,0001
PI	1	VEG-AGR	-0,211	<0,0001	0,009	0,791	-0,312	<0,0001	0,365	<0,0001	0,311	<0,0001
	2	VEG-OUT	-0,193	<0,0001	0,061	0,063	-0,29	<0,0001	0,332	<0,0001	0,233	<0,0001
	3	OUT-AGR	-0,227	<0,0001	-0,035	0,281	-0,191	<0,0001	0,365	<0,0001	0,26	<0,0001
BA	1	VEG-AGR	-0,456	<0,0001	-0,165	<0,0001	-0,058	0,071	0,244	<0,0001	0,244	<0,0001
	2	VEG-OUT	-0,42	<0,0001	-0,061	0,063	-0,081	0,012	0,233	<0,0001	0,137	<0,0001
	3	OUT-AGR	-0,491	<0,0001	-0,198	<0,0001	-0,21	<0,0001	0,282	<0,0001	0,32	<0,0001

Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados evidenciam as tendências positivas (de aumento) e negativas (de redução) das diferentes variáveis no tempo (SPEI, SPI, TMAX, TMIN e VHI). Embora essa tendência seja apresentada na coluna “tau”, é muito importante analisar o valor de “p-value” para validar a significância deste resultado. Isso significa que, por exemplo, se $p\text{-value} < \alpha$ (0,05) para tendências de redução ou aumento, então a anomalia tem significância estatística. Dessa forma, na tabela estão expressas nas cores vermelho as tendências de aumento com significância, em verde de redução com significância e em cinza aquelas sem significância, ou

seja, resultado que pode ser aleatório.

De acordo com as variáveis analisadas tem-se que, para o SPEI, todas as transições de uso do solo evidenciaram tendências de redução, indicando a intensificação dos eventos extremos de secas, potencializados pelo aquecimento, para os estados integrantes do Matopiba no geral. Já para o SPI, apesar das tendências também serem de valores negativos, indicando desvios abaixo do normal de chuvas, alguns resultados não apresentaram significância estatística, tais como para o Maranhão e Piauí para todas as transições de usos do solo (1, 2 e 3); Tocantins para 1 e Bahia para 2.

No que se refere ao VHI, os resultados evidenciam tendências de redução significativas, exceto para o Tocantins (3) e Bahia (1), que podem ser atribuídas à aleatoriedade. Este índice representa os riscos associados ao estresse da vegetação e, considerando que as culturas agrícolas na região são em sua maioria de ciclo curto e temporárias (4 a 8 meses), os efeitos das anomalias negativas corroboram impactos agrícolas definitivos, ainda que a escolha dos materiais genéticos e as práticas de manejo possam mitigar esses riscos.

Já em relação às temperaturas, ambas apresentam tendências positivas para todas as transições de uso e cobertura da terra. Isso quer dizer que, com significância estatística, observa-se um padrão de aumento de temperatura na região nas últimas décadas.

Conforme já evidenciado por Marengo et al. (2016), Li et al. (2013) e IPCC (2014) em estudos sobre as mudanças climáticas, nas últimas décadas houve aumento da frequência, intensidade e duração de eventos climáticos extremos, como chuvas fortes, ondas de calor e registros de altas temperaturas. Esse cenário está aderente aos resultados de tendências encontrados, embora não tenha ficado claro o efeito por transição de uso do solo (1, 2 e 3) que pudesse explicar os riscos da conversão por áreas específicas nos estados do Matopiba, o que pode ser resultado da baixa resolução espacial das variáveis utilizadas quando comparada às dos polígonos de áreas antropizadas. Para uma análise mais acurada seria relevante utilizar dados oriundos de estações meteorológicas instaladas nessas áreas; no entanto, a baixa densidade de estações e a insuficiente qualidade temporal dos dados inviabilizam tal análise. Logo, as tendências encontradas no presente estudo apresentam o mesmo padrão, independente se a área agrícola é originada da vegetação natural ou outros usos, devido a baixa granularidade dos dados.

É notável que a região experimentou nas últimas quatro décadas uma ampla e significativa tendência de aquecimento geral, mas principalmente durante a estação de

transição seca para úmida, a qual ocorre entre os meses de julho e outubro. Além disso, os resultados evidenciam um aumento na temperatura, a diminuição na precipitação, aumento do déficit hídrico potencializado pela temperatura, a frequência de dias quentes e redução de evapotranspiração, fato impulsionado pelas ações antrópicas que ocorrem na região (NÓBREGA et al., 2017; SALVADOR & BRITO, 2017), o que também corrobora o risco de incêndios na transição da estação seca para úmida. Neste contexto, Cunha et al. (2019) observaram um aumento nas secas severas nas regiões centro-norte do Brasil, que inclui o Matopiba, e principalmente entre 2014/2015, obteve-se 37,4% de seca e 26% de seca moderada.

As mesmas tendências negativas para as variáveis analisadas têm sido documentadas em diversos estudos. Através de modelagens, impactos sobre as culturas agrícolas mais importantes para o Brasil também foram analisados: soja, milho e trigo avaliados por Siqueira (2001); café por Marengo (2001) e Pinto et al. (2002); e soja, milho, feijão, arroz e café por Nobre et al. (2005) e Assad et al. (2001). Embora esses estudos sejam mais antigos, estes autores já destacaram perdas econômicas provocadas pelo aumento de 1 °C na temperatura do ar. Estudos mais recentes também comprovam riscos produtivos no Matopiba em função dos impactos associados às tendências climáticas e o uso intensivo, tal como proposto por Santos et al. (2021), Dionizio & Costa (2019), Lima et al. (2017) e Donagemma et al. (2016), que proporcionaram uma abordagem quantitativa e integrativa a respeito das mudanças físicas do solo e a relação destas com o desenvolvimento agrícola.

A degradação do solo e as mudanças climáticas são as principais ameaças sociais das próximas décadas (OLSSON et al., 2019). Globalmente, a estimativa é de que 52% da terra disponível para expansão agrícola está experimentando uma degradação acelerada devido a fatores como a perda de nutrientes, compactação do solo, erosão, salinização e poluição química. Estima-se, ainda, que 75% da superfície terrestre está sob algum grau de degradação da terra, o qual deverá aumentar para 90% até 2050 (PEREIRA & BOGUNOVIC, 2019), o que coloca em evidência a redução na produtividade e fertilidade do solo (Sharma et al., 2011) e as ameaças à segurança hídrica e alimentar (ALMAGRO et al., 2017).

Os impactos das mudanças climáticas estão influenciando negativamente os sistemas produtivos (agricultura, silvicultura e aquicultura), consolidando mais os esforços para atender às necessidades humanas. O aquecimento global vem sendo impulsionado por atividades antropogênicas e desacelerou as taxas de incremento da produtividade agrícola nos últimos 50 anos. Estudos mostraram que, em determinados locais, os rendimentos das culturas

estão sendo comprometidos pela presença do ozônio superficial. Em outros locais, as emissões de metano impactaram negativamente o rendimento das culturas, ao passo que aumentaram as temperaturas e as concentrações de ozônio na superfície (IPCC, 2022).

Embora os resultados não tenham sido determinísticos por LULC, os impactos dessas tendências podem ser maiores e facilmente percebidos nas áreas agro produtivas. Isso porque a atividade agrícola tem uma particularidade importante se comparada a outros setores/negócios: ela depende fortemente de recursos naturais e de processos biológicos. Estes fatores tornam o alvo vulnerável (lavouras/produção), o que justifica a necessidade de gestão de riscos. O risco, por sua vez, pode ser definido como a probabilidade de perigo ou insucesso, em função de um acontecimento incerto e eventual, cuja ocorrência não depende exclusivamente dos interesses envolvidos.

Ainda que o risco seja constante e não possa ser excluído, ele deve ser mitigado e considerado como parte do negócio. Considerando que a visão para a região Matopiba é aumentar a produção, segurança em operações financeiras agrícolas e coordenar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento econômico sustentável, é indispensável o estudo de qualquer cenário de risco que possa impactar diretamente em perdas relevantes na produção, não garantia de entrega dos produtos e o êxodo rural. Além destes, outros impactos podem ser desencadeados, tais como a falta de nutrientes, ocorrência de queimadas antropogênicas ou naturais, ocorrência de geadas, pragas (besouros, formigas, gafanhotos etc), a presença de matocompetição (plantas daninhas) e degradação dos solos e ecossistemas. Do ponto de vista econômico, volatilidade de preços e renda dos produtores, queda das exportações e insegurança alimentar podem ser resultados das perdas relevantes de produção.

Por outro lado, muitos são os fatores que mitigam o risco: calendário agrícola (adequação às condições climáticas e alerta de Risco Zarc), irrigação artificial (pivôs centrais, gotejamentos etc.), manejo do solo (adubação, aplicação de herbicida, correções de solo), melhoramento genético, manejo integrado de pragas e o monitoramento para geração de alertas estratégicos. Sentelhas et al. (2015) destacaram que otimizar o uso de insumos e adotar métodos sustentáveis para o cultivo adaptado às mudanças climáticas será um dos principais desafios da produção agrícola. E, apesar do benefício potencial da irrigação para a produção agrícola do país, estratégias para promover o aumento da produção agrícola irrigada devem considerar restrições relacionadas principalmente com a disponibilidade de água, dado que os impactos dependem das vulnerabilidades, capacidades de adaptação e resiliência locais.

Embora as diversas formas de manejo possam ser implementadas e adaptadas, tal

como os sistemas de plantio direto que são amplamente utilizados como estratégia para aliviar os impactos negativos da agricultura na saúde do solo, alguns estudos têm mostrado que a expansão na região do Matopiba pode promover impactos irreparáveis. O aumento da perda de solo (GOMES et al., 2019), a diminuição da condutividade hidráulica saturada e o teor de água do solo, afetando a dinâmica da água do solo (DIONIZIO & COSTA, 2019), e a redução dos níveis de carbono (CAMPOS et al., 2020; GMACH et al., 2018) são exemplos de respostas do uso intensivo dessas áreas. A degradação física do solo pode afetar além da disponibilidade de água e nutrientes, como também a dinâmica da matéria orgânica do solo, as trocas gasosas (por exemplo, O₂, CO₂ e N₂O) e a atividade microbiana (RABOT et al., 2018), que estão intrinsecamente relacionados com o bom desenvolvimento e produtividade das lavouras.

As fases fenológicas das culturas agrícolas compreendem os fenômenos biológicos periódicos (brotação, floração e maturação, por exemplo) relacionados com o clima e alterações sazonais a que se encontram submetidas as plantas. Seus conhecimentos permitem prever a resposta da cultura ao clima e região específicos, principalmente porque estas requerem condições ótimas de desenvolvimento. Segundo Formaggio e Sanches (2017), cada cultura tem suas próprias características fenológicas, dinâmicas de desenvolvimento e arquitetura, o que pode tornar algumas mais vulneráveis que as outras (ROSENZWEIG et al., 2001, TUBIELLO et al., 2007, DE BOECK et al., 2011). Para tantas variáveis altamente mutáveis no tempo e espaço, estudos de tendências nas variáveis climáticas possibilitam analisar o comportamento destes alvos, porém não dispensam a caracterização agrícola para orientar o planejamento estratégico para a região.

Sabe-se que o agronegócio funciona com base no crédito e que este é o principal insumo do produtor (Confederação Nacional da Agricultura - CNA). Os recursos financeiros permitem adubar a lavoura, manejá-la, proteger das pragas e mitigar os riscos climáticos, além de custear despesas das atividades de comercialização e industrialização da produção. É fato que o subsídio agrícola deve ser tratado como assunto de relevância para o Matopiba, visto que muitos são os desafios nacionais com o acesso, falta de informação, necessidade de baixas taxas de juros e margens e a alta dependência de fatores incontrolláveis, o que apresenta forte relação com os riscos climáticos citados nesta pesquisa.

Além da importância do crédito no agronegócio, temos o Mercado de Carbono recentemente regulamentado pelo Decreto nº 11.075 de 19 de maio de 2022, o qual representa iniciativa promissora de governança do clima e promete impulsionar tanto a descarbonização

quanto a recuperação de áreas degradadas através de Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas. Além de instituir o Sistema Nacional de Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SINARE), o decreto regulamenta a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída em 2009 pela Lei 12.187, e a coloca sob competência dos Ministérios do Meio Ambiente e da Economia.

Paralelo a isso, o setor agrícola já vinha preconizando a adoção de boas práticas agrícolas através do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), uma política do governo federal que teve a primeira fase vigorada entre 2010 e 2020. A partir de 2021 temos uma nova etapa, chamada de ABC+, que vai vigorar até 2030 e prevê oito ações com o objetivo de reduzir a emissão de 1,1 bilhão de toneladas de carbono. Com o foco na agricultura sustentável, além de práticas para retenção de água no solo e incorporação de matéria orgânica, o plano inclui técnicas capazes de ampliar carbono nos sistemas de produção que, portanto, podem ser monetizadas adequadamente por meio do Mercado de Carbono. Além do potencial cumprimento das metas obrigatórias de redução de emissões, é fato que esta iniciativa torna o Brasil um protagonista no cenário internacional, que se mostra muito otimista.

Sendo assim, a combinação de tendências e o uso intensivo das áreas pode colocar em risco a estabilidade dos biomas e, conseqüentemente, a produção agrícola no Matopiba, área responsável por quase 12% da produção brasileira de soja em 2018 (PAM). Uma possível explicação para as tendências detectadas nas variáveis climáticas deste levantamento está relacionada às características espaço-geográficas da região. Adicionalmente, deve-se reconhecer que as mudanças na concepção da vida urbana para a vida rural, bem como no uso e cobertura do solo, proporcionaram um desenvolvimento socioeconômico e permitiu os avanços tecnológicos. Porém, essa gama de elementos também impulsionou riscos ambientais, e em especial ao Matopiba, pelo risco produtivo associada à região hoje tida como estratégica no agronegócio.

4 CONCLUSÕES

Os eventos extremos de secas se tornaram mais severos e duradouros nas últimas décadas, embora sejam perceptíveis desde 1990 (e até antes da escala temporal analisada). As mudanças no uso da terra para a expansão do agronegócio, bem como as variações climáticas na zona de transição entre o leste Amazônico e o Cerrado adjacente podem ter agravado essas condições. Os resultados obtidos fornecem evidências da crescente pressão climática na área do Matopiba, o que se traduz como risco para a segurança alimentar, o ecossistema e a economia, e gera a necessidade de conciliar a expansão agrícola com a proteção dos biomas.

As transições de uso e cobertura do solo são inquestionáveis na região, o que caracteriza o grande risco sobre áreas de vegetação natural, as quais poderiam ser mantidas intactas se incentivado o uso agrícola em terras já consolidadas. Nas últimas três décadas, as áreas agro produtivas cresceram na mesma proporção em que os desmatamentos ocorreram, ou seja, é notório que a redução de 15,2% da área preservada foi convertida em terras produtivas, isto em função dos interesses na expansão (101,1%) e exploração da fronteira agrícola. Sendo assim, junto ao controle do desmatamento e a adoção de boas práticas agrícolas, áreas nativas desmatadas precisam ser recuperadas, especialmente aquelas que possuem a obrigação legal de recuperação (como as APPs e RLs) ou que sejam áreas ecologicamente sensíveis.

As tendências positivas para ocorrência de secas, estresse da vegetação, aumento de temperaturas máximas e mínimas e a redução de precipitação corroboram cenário de riscos para a região. Ainda que a ação possa ser lenta e silenciosa, impactos generalizados podem ser considerados como desastres naturais impulsionados pela ação antropogênica, o que requer abordagem interdisciplinar, holística e multidimensional das políticas públicas e hídricas. O histórico associado aos diversos estudos fornece subsídios que contribuem para uma apreciação qualificada quanto à caracterização e superação dos atuais desafios do Matopiba.

A preocupação por uma expansão sustentável da agricultura na região é de suma relevância, principalmente porque a produção no Matopiba tende a crescer ainda mais. Segundo projeções do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a região produzirá 32,7 milhões de toneladas de grãos até a safra de 2029/30, o que corresponde a uma área plantada de 8,9 milhões de hectares. Já as projeções para o Brasil são de 318,3 milhões de toneladas de grãos produzidos em 76,4 milhões de hectares, de forma que o Matopiba representará 10,3% da quantidade de grãos a serem produzidos e 11,6% da área a ser ocupada

no país.

Conclusivamente, muitas são as adversidades relacionadas às mudanças climáticas e o uso intensivo de áreas agro produtivas, as quais dão origem a novos tipos de riscos. Segundo o IPCC (2022), as atividades antrópicas e do meio ambiente em escala global, à luz de comprovações científicas, caracterizam a necessidade de mais esforços para atender às necessidades humanas, visto que os incrementos da produtividade agrícola reduziram em função de déficits hídricos, do aumento de temperaturas e da recorrência de secas. Impactos exacerbados e deflagrados pela falta de gestão estratégica podem comprometer a segurança alimentar, o desenvolvimento agrícola e até mesmo corroborar o êxodo rural.

O presente trabalho abre caminhos para novas pesquisas que possam melhor explicar a relação entre as tendências climáticas e as transições de uso do solo no Matopiba, de modo a entender quais são as áreas com aptidão agrícola e menor suscetibilidade a impactos das mudanças climáticas. As informações aqui apresentadas podem subsidiar gestores e tomadores de decisão a entender, de forma quantitativa, quanto destas áreas implicam em desmatamentos, reforçando a necessidade de uma política e governança no processo de mudança de uso e cobertura da terra. Estes estudos futuros podem, ainda, demonstrar que não é possível expandir a agricultura na região do Matopiba, uma vez que o agravamento de regimes de secas inviabiliza o uso do solo para a agricultura na região - ou seja, o desmatamento em si não compensa a médio e longo prazo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, T. J. A. **O processo de ocupação e uso do cerrado piauiense**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ECOECO, 6., 2008, Brasília, DF. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2008. Disponível em: http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/vi_en/artigos/mesa4/O_processo_de_ocupa_o_e_uso_do_cerrado_piauiense_-_pdf. Acesso em: 01 jan. 2022.
- AKINYEMI, F. O. **Vegetation Trends, Drought Severity and Land Use-Land Cover Change during the Growing Season in Semi-Arid Contexts**. Remote Sens. 2021, 13, 836. <https://doi.org/10.3390/rs13050836>.
- ALDERSLEY, A.; MURRAY, S. J.; CORNELL, S. E. **Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire**. Sci. Total Environ. 2011, 409, 3472–3481.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. (2017). **Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil**. Sci. Rep. 7 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08298-y>.
- ANDELA, N.; MORTON, D. C.; GIGLIO, L.; CHEN, Y.; VANDERWERF, G. R.; KASIBHATLA, P. S.; BACHELET, D. **A human-driven decline in global burned area**. Science 2017, 356, 1356–1362.
- ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. de; LIMA, A. de; SHIMABUKURO, Y. E. **Deteção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira**. Acta Amaz. [online]. 2005, vol.35, n.4, pp.445-456. ISSN 0044-5967.
- CUNHA, A. P. M. A.; M. ZERI, K.; Deusdará Leal, L. Costa, L.A. Cuartas, J.A. Marengo, J. Tomasella, R.M. Vieira, A.A. Barbosa, C. Cunningham, J.V. Cal Garcia, E. Broedel, R. Alvalá, G. Ribeiro-Neto, **Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019**. Atmosphere. 2019, 642, <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; POULTER, B.; BARLOW, J. B.; ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; SAATCHI, S.; PHILLIPS, O. L.; GLOOR, E. **Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests**. Biological Reviews. 2014, 89, 913–931, doi:10.1111/brev.12088.
- ARRUDA, F. V. de; SOUSA, D. G. de; TERESA, F. B.; PRADO, V. H. M. do; CUNHA, H. F. da; IZZO, T. J. (2018). **Trends and gaps of the scientific literature about the effects of fire on Brazilian Cerrado**. Biota Neotropica, 18 (1). doi:10.1590/1676-0611.
- ASSAD, E. D.; PINTO H. S.; ZULLO JR., J.; ÁVILA, A. M. H. de (2004). **Impacto das Mudanças Climáticas no Zoneamento Agroclimático do Café no Brasil**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v. 39, n. 11, 2004.

BEDIA, J.; HERRERA, S.; GUTIÉRREZ, J.M.; BENALI, A.; BRANDS, S.; MOTA, B.; MORENO, J.M. **Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change.** Agric. For. Meteorol. 2015, 214, 369–379.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. **Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach.** Applied Geography, v. 58, p. 116-127, Mar. 2015.

BICKEL, U.; DROS, J. M. **The impacts of soybean cultivation on Brazilian ecosystems: Three case studies.** Report commissioned by the WWF Forest Conversion Initiative, 2003, Washington, United States of America, p.33.

BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C.; CONTINI, E.; SILVA, G. B. S.; SPINELLI-ARAUJO, L.; GOMES, D. **Matopiba em crescimento agrícola aspectos territoriais e socioeconômicos.** Revista de Política Agrícola, v. 12, p. 39-62, out./dez. 2016.

BOLFE, E. L.; SANO, E. E.; CAMPOS, S. K. **Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções.** Brasília, DF: Embrapa, 2020.

CAMPOS, R.; PIRES, G. F.; COSTA, M. H. (2020). **Soil carbon sequestration in rainfed and irrigated production systems in a new brazilian agricultural frontier.** Agric. 10 <https://doi.org/10.3390/agriculture10050156>.

CARVALHO, W. D. et al. **Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed.** ELSEVIER: Perspectives in Ecology and Conservation. Volume 17, Issue 3, July–September 2019, Pages 122-130.

CASSMAN, K. G.; WOOD, S.; CHOO, P. S.; COOPER, H. D.; DEVENDRA, C.; DIXON, J.; GASKELL, J.; KHAN, S.; LAL, R.; LIPPER, L.; PRETTY, J.; PRIMAVERA, J.; RAMANKUTTY, N.; VIGLIZZO, E.; KADUNGURE, S.; KANBAR, N.; KHAN, Z.; LEAKEY, R.; PORTER, S.; THARME, R. (2005) Cultivated Systems. **Ecosystems and human well-being: current state and trends**, Island Press, Washington DC, 745-794 p.

CERASOLI, S.; CAMPAGNOLO, M.; FARIA, J.; NOGUEIRA, C.; & CALDEIRA, M. da C. (2018). **On estimating the gross primary productivity of Mediterranean grasslands under different fertilization regimes using vegetation indices and hyperspectral reflectance.** Biogeosciences, 15(17), 5455–5471. doi:10.5194/bg-15-5455.

CHRYSOULAKIS, N.; MITRAKA, Z., GORELICK, N. (2019). **Exploiting satellite observations for global surface albedo trends monitoring.** Theor. Appl. Climatol. 137 (1–2), 1171–1179. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2663-6>.

COCHRANE M. A.; LAURANCE W. F. F. (2002). **Fire as a large-scale edge effect in Amazonian forests.** J Trop Ecol 18:311–325. doi:10.1017/S0266467402002237.

COMBER, A. J. **Land use or land cover?** J. Land Use Sci. (2008) 199–201. <https://doi.org/10.1080/17474230802465140>.

COSTA, L. C.; CUNHA, A. P. M. A.; ANDERSON, L. O.; CUNNINGHAM, C. New approach for drought assessment: **A case study in the northern region of Minas Gerais.** *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 53, 2021, 102019, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.102019>.

COUTINHO, L. M. **Fire in the ecology of the Brazilian Cerrado.** In: GOLDAMMER, J. G. *Fire in the tropical biota*. New York: Springer-Verlag, 1990, p.82-105.

CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; KUBOTA, P. Y.; VIEIRA, R. M. S. P. (2014): **Impacts of land use and land cover changes on the climate over Northeast Brazil.** *Atmospheric Science Letters*. V. 16, 219-227.

CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C.; NOBRE, C. A.; CARVALHO, M. A. **Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian Semiarid Region.** *Agric. For. Meteorol.* 2015, 214, 494–505. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.010>.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. **Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019.** *Atmosphere* 2019, 10, 642. <https://doi.org/10.3390/atmos10110642>

DE BOECK, H. J.; DREESEN, F. E.; JANSSENS, I. A.; NIJS, I. (2011). **Whole-system responses of experimental plant communities to climate extremes imposed in different seasons.** *New Phytologist*, 189(3), 806–817.

DIONIZIO, E.; & COSTA, M. (2019). **Influence of Land Use and Land Cover on Hydraulic and Physical Soil Properties at the Cerrado Agricultural Frontier.** *Agriculture*, 9(1), 24. doi:10.3390/agriculture9010024.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. (2016). **Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil.** *Pesqui. Agropecuária Bras.* 51, 1003–1020. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900001>.

DOS REIS, L. C.; SILVA, C. M. S. E.; BEZERRA, B. G.; MUTTI, P. R.; SPYRIDES, M. H. C.; DA SILVA, P. E. (2020). Analysis of Climate **Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil.** *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-020-02474-4.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Espaço temático: Matopiba.** Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139202/1/NT1-DelimitacaoMatopiba.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **MATOPIBA: Quadro Socioeconômico.** Campinas: EMBRAPA, 2014b. Disponível em: https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT8_Quadro_SocioEconomico_Matopiba.pdf. Acesso em: 28 mar. 2020.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M.P.; MATSCHULLAT, J. **Vegetation Greenness in Northeastern Brazil and Its Relation to ENSO Warm Events.** Remote Sens. 2014, 6, 3041-3058. <https://doi.org/10.3390/rs6043041>.

FALEIRO, F. G.; SOUZA, E. S. **Pesquisa, desenvolvimento e inovação para o Cerrado. Planaltina-DF**, p.138. 2007.

FIRMS. **Active Fire Data.** Disponível em: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/#firms-shapefile. Acesso em: 28 mar. 2020.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. Sensoriamento Remoto em agricultura. São Paulo: Oficina de textos, 2017.

FUNK, C. et al. **The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes.** Sci. Data 2, 150066 (2015).

GIBBS, H. K. et al. **Brazil's Soy Moratorium.** Science, v. 347, n. 6220, p.377-378, 22 jan. 2015. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.aaa0181>.

GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; JUSTICE, C. O. **The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products.** Remote Sens. Environ. 2016, 178, 31–41.

GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; NOBREGA, J. C. A.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRANETO, M. (2018). **Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado. Brazil.** Geoderma Reg. 14, e00178 <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>.

GOMES, L.; SIMOES, S.; DALLA NORA, E.; SOUSA-NETO, E.; FORTI, M.; OMETTO, J. (2019). **Agricultural Expansion in the Brazilian Cerrado: Increased Soil and Nutrient Losses and Decreased Agricultural Productivity.** Land 8, 12. <https://doi.org/10.3390/land8010012>.

GRECCHI, R. C.; BERTANI, G.; TRABAQUINI, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R. **Análise espaço-temporal da conversão do Cerrado em áreas agrícolas na região de Sapezal, Mato Grosso, entre os anos de 1981 e 2011.** Revista Brasileira de Cartografia, [S. l.], v. 68, n. 1, 2016.

HARGRAVE, J., & KIS-KATOS, K. (2013). **Economic Causes of Deforestation in the Brazilian Amazon: A Panel Data Analysis for the 2000s.** *Environmental and Resource Economics*, 54(4), 471–494. <https://doi.org/10.1007/s10640-012-9610-2>.

IMMITZER, M.; VUOLO, F.; ATZBERGER, C. **First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe.** *Remote Sens.* 2016, 8, 166.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2015. **Projeto TerraClass Cerrado: Mapeamento do uso e cobertura da terra no Cerrado.** Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/>. Acesso em: 28 mar. 2020.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **DETER – Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real.** (2019) Available at: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **PRODES - Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Brasileira por Satélite.** (2019) Available at: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa Queimadas** (2019) Available at: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Monitoramento de focos ativos por estado** (2019) Available at: http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/.

IPCC, 2014. **Intergovernmental Painel on climate change: Climate Change 2014.** New York: PRESS, C.U., 169.

IPCC, 2012 – FIELD, C. B. V.; BARROS, T. F.; STOCKER, D.; QIN, D. J.; DOKKEN, K. L.; EBI, M. D.; MASTRANDREA, K. J.; MACH, G. K.; PLATTNER, S. K.; ALLEN, M.; TIGNOR, AND MIDGLEY, P. M. (Eds.) Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, 582 pp.

IPCC (2022). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.**

JIMENEZ, J. C. et al. **The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region.** *Int. J. Climatol.* 41(7), 3761–3780 (2021).

JOHNSON, G. E.; ACHUTUNI, V. R.; THIRUVENGADACHARI, S.; KOGAN, F. N. **The role of NOAA satellite data in drought early warning and monitoring:** Selected case studies. In *Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies*, D.A.; Springer: Boston, MA, USA, 1993; pp. 31–47.

KAYANO, M. T.; & ANDREOLI, R. V. (2007). **Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation**. *International Journal of Climatology*, 27, 531–540.

LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C. & DALLA-NORA, E. L. **Undervaluing and overexploiting the brazilian cerrado at our peril**. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, Saint Louis 58(6), 4–15 (2016).

LAVINAS, L. (2017). **How Social Developmentalism Reframed Social Policy in Brazil**. *New Political Economy*, 22 (6), 628–644. <https://doi.org/10.1080/13563467.2017.1297392>.

LI, D.; LI, H.; QIAO, Y.; WANG, Y.; CAI, Z.; DONG, B., et al. (2013). **Effects of elevated CO₂ on the growth, seed yield, and water use efficiency of soybean** (*Glycine max* (L.) Merr.) under drought stress. *Agricultural Water Management*, 129, 105–112.

LIBONATI, R.; DACAMARA, C. C.; SETZER, A. W. **Spatial and temporal patterns of burned area over Brazilian Cerrado from 2005 to 2015 using remote sensing**. *Anais. In: Geosciences Union General Assembly, Anais...*, Viena: EGU, 2016. p.25–29.

LIMA, R. P., SILVA, A. P., GIAROLA, N. F. B., SILVA, A. R., ROLIM, M. M. (2017). **Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic**. *Biosyst. Eng.* 162, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.07.002>.

LOON, A. F. V. **Hydrological drought explained**. *WIREs Water* 2015, 2:359–392. doi: 10.1002/wat2.1085.

LUCIANO, A. C. S.; PICOLI, M. C. A.; ROCHA, J. V. et al. **Semiautomatic classification of sugarcane areas from random forest algorithm and oli/landsat-8 images**. *Simpósio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. Puerto Iguazú: SELPER, 13 (2016).

MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. de. (2014). **MATOPIBA**: Quadro Natural. Nota técnica 5. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE). Disponível em: https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf. Acesso em: 12 jan. 2021.

MAHMOOD, R.; PIELKE, R. A.; HUBBARD, K. G.; NIYOGI, D.; DIRMAYER, P.; MCALPINE, C.; CARLETON, A.; HALE, R.; GAMEDA, S.; BELTRAN-PRZEKURAT, A.; BAKER, B.; MCNIDER, R.; LEGATES, D. R.; SHEPHERD, M.; DU, J.; BLANKEN, P.; FRAUENFELD, O. W.; NAIR, U. S.; FALL, S. (2013). **Land cover changes and their biogeophysical effects on climate**. *International Journal of Climatology* 34: 929–953.

MARENGO, J. A.; & BERNASCONI, M. (2015). **Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil**: present state and future projections. *Climatic Change*, 129(1–2), 103–115. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. (2016). **Drought in Northeast Brazil - past, present, and future.** Theoretical and Applied Climatology, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARENGO, J. A. **Impactos das Condições Climáticas e da Variabilidade e Mudanças do Clima sobre a Produção e os Preços Agrícolas:** Ondas de Frio e seu Impacto sobre a Cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: Lima, M. A. de, Cabral, O. M. R., Miguez, J. D. G. (Eds.). *Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira*. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, pp. 97-123. 2001.

MARENGO, J. A.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C. et al. (2022). **Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone.** Sci Rep 12, 457 . <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>.

MARENGO, J. A.; et al. (2011). **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro.** Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas (pp. 383–422). Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALÁ, R. C. S.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. L. (2018). **Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, 90, 1973–1985.

MARENGO, J. A.; & BERNASCONI, M. (2015). **Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections.** Climatic Change, 129, 103–115. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.

MARENGO, J. A.; & ESPINOZA, J. C. (2016). **Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia:** causes, trends and impacts. International Journal of Climatology, 36(3), 1033–1050.

MARENGO, J.; TORRES, R. R.; & ALVES, L. M. (2017). **Drought in Northeast Brazil — past, present, and future.** Theoretical and Applied Climatology, 129 (3–4), 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.

MARENGO J. A.; SOUZA, C. M. Jr.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K. et al (2018). **Changes in climate and land use over the Amazon region:** current and future variability and trends. Front Earth Sci 6:228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>.

MATHERON, G. **Le krigeage universel.** In Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique; Ecole des Mines de Paris: Paris, France, 1969; Volume 1, p. 83.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; & KLEIST, J. (1993). **The relationship of drought frequency and duration of time scales.** Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, pp.179-186.

MIRANDA, H. S.; & SATO, M. N. (2005). **Efeitos do fogo na vegetação lenhosa do Cerrado**. In: Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação (A. Scariot; J. C. Sousa-Silva; J. M. Felfili, orgs.). Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

MIRANDA, E. E. ; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA. EMBRAPA: Campinas, SP. 2014.

MISTRY, J. **Fire in the cerradão (savannas) of Brazil**: an ecological review. The Progress in Physical Geography, v. 22, n. 4, p. 425- 448, 1998.

MMA, 2012. **Florestas tropicais, mitigação e adaptação às mudanças climáticas**. Disponível em: <http://redd.mma.gov.br/images/publicacoes/reddnotainformativa-01-florestasmitigacaoadaptacao.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

MYERS, N. et al. **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. Nature, v. 403, n. 6772, p.853-858, fev. 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/35002501>.

MARIANO, D. (2019). **Drought impacts assessment in Brazil** - a remote sensing approach. Dissertations & Theses in Natural.

MARIANO, D. A. (2015). **Detecção e Avaliação de Seca Agrônômica através da análise de séries temporais de dados MODIS e PERSIANN**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. National Institute for Space Research, Brazil. Retrieved from <http://mtcm21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21b/2015/02.12.20.29/doc/publicacao.pdf>.

MAPBIOMAS, **Projeto MapBiomass** – Coleção v. 6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, Mapbiomas v.6.0, 2020.

MATAVELI, G. A. V. **Padrões espaciais e temporais no regime do fogo e tendências nas emissões associadas às queimadas no bioma Cerrado**. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. 151 f.

NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. **Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation**. Agric. For. Meteorol. 1989, 44, 245–260. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90020-8).

NASCIMENTO, D. T. F.; MOREIRA, A., F.; FERREIRA, L. G. **Análise dos padrões de distribuição espacial e temporal dos focos de calor no bioma Cerrado**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 63, n. 4, p.461-475, 01 ago. 2012. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia.

NOBRE, C. A. et al. **Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm**. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113(39), 10759–10768 (2016).

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D.; OYAMA, M. D. **Mudança Ambiental no Brasil – O impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura.** In: Scientific American Brasil. Nº 12. Set-2005.

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G. et al. (2020). **Correction:** Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. PLOS ONE 15(7): e0236236. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236236>.

OLSSON, L.; H. BARBOSA, S.; BHADWAL, A.; COWIE, K.; DELUSCA, D.; FLORES-RENTERIA, K.; HERMANS, E.; JOBBAGY, W.; KURZ, D.; LI, D. J.; SONWA, L.; STRINGER (2019). **Land degradation.** In: Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.

PIVELLO, V. R. **The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present.** Fire Ecology, v. 7, n. 1, p.24-39, abr. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.4996/fireecology.0701024>.

PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I. (2019). Land degradation neutrality. How to reverse land degradation with conservation agriculture practices? Proceedings of the 12th International Scientific/Professional Conference Agriculture in Nature and Environment Protection, Osijek, Croatia, 27–29 May.

PEREIRA, G.; SIQUEIRA, R.; RIO, N. E.; LONGO, K. L.; FREITAS, S. R.; CARDOZO, F. S.; KAISER, J. W.; WOOSTER, M. J. **Assessment of fire emission inventories during the southamerican biomass burning analysis (sambba) experiment.** Atmospheric chemistry and physics, v. 16, n. 11, p. 6961–6975, 2016.

PETERS, A. J.; WALTER-SHEA, L. J.; VIÑA, A.; HAYES, M.; SVOBODA, M. D. **Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index.** Photogramm. Eng. Remote. Sens. 2002, 68, 71–75.

PIELKE R. A.; PITMAN, A.; NIYOGI, D.; MAHMOOD, R.; MCALPINE, C.; HOSSAIN, F.; KLEIN, K.; NAIR, U.; BETTS, R.; FALL, S.; REICHSTEIN, M.; KABAT, P.; NOBLET N. (2011). **Land use/land cover changes and climate:** modeling analysis and observational evidence. WIREs Climate Change 2: 828–850.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO Jr.; BRUNINI, O. (2002). **O Aquecimento Global e a Agricultura.** Revista Eletrônica do Jornalismo Científico, Comciência – SBPC, v. 35, p. 1- 6, 2002.

PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J. C.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S. et al. (2016). **Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems:** implications for land use in Northern Brazil. Agricultural and Forest Meteorology, 228 (229), 286–298.

PONZONI, F. J. **Avaliação da área queimada e da regeneração da vegetação afetada pelo fogo no Parque Nacional de Brasília através de dados do TM/Landsat.** (Relatório técnico científico) 32 p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, SP, Brasil, 1986.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação.** 2009. 127p. Editora Parêntese.

QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; FERNÁNDEZ-MANSO, O.; & SHIMABUKURO, Y. E. (2006). **Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a uni-temporal perspective.** *International Journal of Remote Sensing*, 27(4), 645–662.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.J. (2018). **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** *Geoderma* 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.

RAMOS NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. **Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies.** *Environmental Management*, v. 26, n. 6, p.675-684, dez. 2000. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s002670010124>.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F. & BRIDGEWATER, S. **The brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity.** *Botanical Briefing* 80, 223–230 (1997).

RATTIS, L.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N. et al. **Climatic limit for agriculture in Brazil.** *Nat. Clim. Chang.* (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01214-3>.

NALI, R. C.; BECKER, C. G.; ZAMUDIO, K. R.; PRADO, C. P. A. **Topography, more than land cover, explains genetic diversity in a Neotropical savanna tree frog,** *Divers. Distrib.* (2020), <https://doi.org/10.1111/ddi.13154> ddi.13154.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado.** Cerrado: ambiente e flora. Brasília - Embrapa Cerrados (1998).

RIBEIRO, L. C. S.; LÔBO, A. S.; SILVA, L. D.; & ANDRADE, N. F. S. (2020). **Padrões de crescimento econômico dos municípios do MATOPIBA.** *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 58(3), e212613. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.212613>.

ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; YANG, X. B.; EPSTEIN, P. R.; & CHIVIAN, E. (2001). **Climate change and extreme weather events;** implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change & Human Health*, 2(2), 90–104.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. **Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation:** Technique and Validation Over South America. *Weather Forecast.* 2010, 25, 885–894.

SAFRIEL, Z.; ADEEL, U. **Dryland systems**, in: N. Hassan, R. Scholes, R. Ash (Eds.), *Ecosyst. Hum. Well-Being, Curr. State Trends*, Island Press, Washington, 2005, pp. 625–658.

SALES, L. P.; GALETTI, M.; & PIRES, M. **Climate and land-use change will lead to a faunal “savannization” on tropical rainforests**. *Glob. Change Biol.* 26 (12), 7036–7044 (2020).

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*, Wien 133 (1-2).

SANTOS, F. C., DA SILVA PINTO VIEIRA, R. M., BARBOSA, A. A. et al. **Application of remote sensing to analyze the loss of natural vegetation in the Jalapão Mosaic (Brazil) before and after the creation of protected area (1970–2018)**. *Environ Monit Assess* 194, 201 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09651-5>.

SANTOS, R. S.; WIESMEIER, M.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; LOCATELLI, J. L.; HOLZSCHUH, M.; & CERRI, C. E. P. (2021). **Consequences of land-use change in Brazil’s new agricultural frontier: A soil physical health assessment**. *Geoderma*, 400, 115149. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115149.

SAATH, K. C. O.; & FACHINELLO, A. L. (2018). **Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil**. *Revista de Economia e Sociologia Rural.*, 56, 2. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.

SCHIMIDT, I. B.; FONSECA, C. B.; FERREIRA, M. C.; SATO, M. N. **Implementação do Programa Piloto de Manejo Integrado do Fogo em três Unidades de Conservação do Cerrado**. *Biodiversidade Brasileira*, 6(2): 55-70, 2016.

SCHROEDER, W. et al. **The spatial distribution and interannual variability of fire in Amazonia**. Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series, v. 186, p. 43-60, 2009.

SCHWIEDER, M.; LEITÃO, P. J.; BUSTAMANTE, M. M. C., FERREIRA, L. G.; RABE, A.; HOSTERT, P. **Mapping Brazilian savanna vegetation gradients with Landsat time series**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.52, p.361-370, 2016.

SEILER, R. A.; KOGAN, F.; SULLIVAN, J. **AVHRR-Based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina**. *Adv. Space Res.* 1998, 21, 481–484.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R. (2015). **Clima e produtividade da soja: efeitos nas produtividades potencial, atingível e real**. In: Fundação MT (Org.). *Boletim de pesquisa* 2015/2016 (pp. 18–43). Rondonópolis: Fundação MT.

SENTELHAS, P. C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPF, A.; & NENDEL, C. (2015). **The soybean yield gap in Brazil** — magnitude, causes and possible solutions for a sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, 153, 1394–1411.

SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVERA-LOMBARDI, R. **Estimativa quinzenal de áreas queimadas**. In: RUDORFF, Bernard Friedrich Theodor; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; CEBALLOS, Juan Carlos (Ed.). *O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil*. São José dos Campos: A. Silva Ed, 2007. v. cap. 28, p. 403-417. ISBN 978- 85-60507-00-9. (INPE-15291-PRE/10106). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.14.11.50>.

SHARMA, A.; TIWARI, K. N.; BHADORIA, P. B. S. (2011). **Effect of land use land cover change on soil erosion potential in an agricultural watershed**. *Environ. Monit. Assess.* 173 (1–4), 789–801. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1423-6>.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. **The least squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SILVA, A. M. et al. **Nova dinâmica produtiva e velhas questões territoriais nos cerrados setentrionais do Brasil**. *Revista Espacios*, v. 36, n 15, 2015.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; HEINRICH, V. H. A.; FREIRE, A. T. G.; BROGGIO, I. S.; ROSAN, T. M.; DOBLAS, J.; ANDERSON, L. O.; ROUSSEAU, G. X.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA, C. A.; HOUSE, J. I.; ARAGÃO, L. E. O. C. **Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil**, *Sci. Data*. 7 (2020) 269, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>.

SILVEIRA, M. V. F.; PETRI, C. A.; BROGGIO, I. S.; CHAGAS, G. O.; MACUL, M. S.; LEITE, C. C. S. S.; FERRARI, E. M. M.; AMIM, C. G. V.; FREITAS, A. L. R.; MOTTA, A. Z. V.; CARVALHO, L. M. E.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. **Drivers of Fire Anomalies in the Brazilian Amazon: Lessons Learned from the 2019 Fire Crisis**. *Land* 2020, 9, 516. <https://doi.org/10.3390/land9120516>.

SIQUEIRA, O. J. **Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas**. In: Lima, M. A. de, Cabral, O. M. R., Miguez, J. D. G. (Eds.). *Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira*. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 2001.

SNEYERS, R. (1975) **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**: Note Technique n. 143. Genebra: Organisation Météorologique Mondiale. 192 p.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios florestais** – Controle, efeitos e uso do fogo. Curitiba: Ed. dos Autores, 2007. 264 p.

SOUZA, E. B., KAYANO, M. T., & AMBRIZZI, T. (2005). **Intraseasonal and submonthly variability over the Eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season.** *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 177–191.

SPERA, S. A. et al. **Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier.** *Global Change Biology*, v. 22, n. 10, p.3405–3413, 12 jul. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13298>.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. **Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region,** *Int. J. Climatol.* (2018), <https://doi.org/10.1002/joc.5225>.

THAPA, R. B.; WATANABE, M.; MOTOHKA, T.; & SHIMADA, M. (2015). **Potential of high-resolution ALOS–PALSAR mosaic texture for aboveground forest carbon tracking in tropical region.** *Remote Sensing of Environment*, 160, 122–133.

TORRELO-RAVENTOS, M. et al. **On the delineation of tropical vegetation types with an emphasis on forest/savanna transitions.** *Plant Ecol. Divers.* 6(1), 101–137 (2013).

TUCKER, C.J.; Choudhury, B.J. **Satellite remote sensing of drought conditions.** *Remote Sens. Environ.* 1987, 23, 243–251.

TIMMERMAN, A.; AN, S. I.; KUG, J. S.; JIN, F. F.; CAI, W.; CAPOTONDI, A. et al. (2018). **El Niño—Southern Oscillation complexity.** *Nat Springer, US*, 559, 535–545. <https://doi.org/10.1038/s41586-0180252-6>.

TUBIELLO, F. N.; SOUSSANA, J. F.; & HOWDEN, S. M. (2007). **Crop and pasture response to climate change.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19686–19690.

VIEIRA, R. M. DA S. P.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; POLIZEL, S. P.; OMETTO, J. P. H. B.; SANTOS, F. C.; TOLEDO, P. M. de. (2021). **Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis.** *Science of The Total Environment*, 782, 146900. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.1469.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. (2015). **Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast.** *Solid Earth* 6,347–360. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>.

VIEIRA, R. M. da S. P.; CUNHA, A. P. M. do A.; BARBOSA, A. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. DOS S.; SANTOS, F. C.; SANTANA, M. de O. (2018). **Análise das interações entre dados climáticos e o processo de desertificação no**

núcleo de desertificação de Cabrobó-PE, Brasil. Sustentabilidade Em Debate 9 (2), 72–87. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v9n2.2018.27559>.

VIEIRA, R. M. D.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; MARTINS, M. A.; RODRIGUEZ, D. A.; REZENDE, F. S.; SANTANA, M. D. (2021). **Desertification risk assessment in Northeast Brazil:** current trends and future scenarios. Land Degrad. Dev. 32 (1), 224–240. <https://doi.org/10.1002/ldr.3681>.

ZAIATZ, A. P. S. R. et al. **Agricultural land use and cover change in the Cerrado/Amazon ecotone:** A case study of the upper Teles Pires River basin. Acta Amazon. 48, 168–177 (2018). BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de transporte. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.