



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Variação Temporal da Seca na Região Produtora de Soja de Matopiba, Brasil

Bergson Cavalcanti de Moraes¹, Giordani Rafael Sodré¹, Everaldo Barreiro de Souza²
Hugo Alves Pinheiro³

¹Universidade Federal do Pará/ Faculdade de Meteorologia/ Programa de Pós-graduação em Risco e Desastres Naturais. Belém, e-mails: bergson@ufpa.br ORCID: 0000-0003-0052-1570, giordani@ufpa.br ORCID:0000-0002-8918-973X

²Universidade Federal do Pará/ Faculdade de Meteorologia / Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. Belém, e-mail: everaldo@ufpa.br. ORCID: 0000-0001-6045-0984 ³ Universidade Federal Rural da Amazônia/ Instituto Socioambiental e dos Recursos Hídricos/ Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Belém, e-mail: hugo.pinheiro@ufra.edu.br. ORCID: 0000-0003-3058-9568

Artigo recebido em 23/01/2023 e aceito em 06/06/2024

RESUMO

O Brasil é atualmente um dos maiores produtores mundiais de soja, com uma produção de 123.829,5 milhões de toneladas em uma área plantada de 40.921,9 milhões de ha, gerando assim uma produtividade de 3.026 kg ha⁻¹. A maior parte dessa produção vem lavouras localizadas nas regiões sul e centro-oeste do Brasil. Contudo, a partir dos anos 80, lavouras de soja foram introduzidas na região de Matopiba, acrônimo das iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, localizada na interseção territorial desses estados. Nessa região, a área de plantio de soja aumentou de 57.494 ha em 1985 para 5.019.536 ha no final de 2021, representando um aumento de 1.024% nas últimas décadas. Assim, a demanda hídrica da cultura nessa região deverá acompanhar o significativo incremento da área plantada e as respectivas expectativas de incremento na produtividade de grãos. Paralelamente, as mudanças climáticas têm alterado o padrão de precipitação e temperatura do ar em todo o mundo, levando a eventos de seca mais intensos os quais prejudicam a produtividade das culturas. Portanto, é plausível estabelecer a hipótese de que os padrões climáticos na região de Matopiba, particularmente a variação temporal da seca, também tenham sido alterados ao longo dos anos. Assim, o presente trabalho tem como objetivos realizar uma caracterização agroclimática e do avanço temporal da seca na região produtora de soja de Matopiba nas últimas cinco décadas. Foi observado que a seca tem se intensificado de forma gradual na região de Matopiba nas últimas décadas, cenário que pode estar diretamente relacionado com a mudança dos padrões climatológicos de temperatura do ar na região, com eventos de seca atingindo a categoria extrema na última década de estudo, conforme o Índice de Severidade de Palmer.

Palavras-Chave: Desastres naturais, mudança do clima, déficit hídrico

Temporal Variation of Drought in the Matopiba Soybean Producing Region, Brazil

ABSTRACT

Brazil is currently one of the largest soybean producers worldwide, with a production of 123,829.5 million tons in a planted area of 40,921.9 million ha, corresponding to a productivity of 3,026 kg ha⁻¹. Most of this production comes from crops located in the southern and central-western regions of Brazil. However, starting in the 1980s, soybean crops were introduced in the Matopiba region, an acronym for the initials of the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia, located at the territorial intersection of these states. In this region, the soybean planting area increased from 57,494 ha in 1985 to 5,019,536 ha at the end of 2021, representing an increase of 1,024% in recent decades. Thus, the water demand of the crop in this region should follow the significant increase in the planted area and the respective expectations of increase in grain yield. At the same time, climate change has altered the pattern of precipitation and air temperature around the world, leading to more intense drought events which impair crop yield. Therefore, it is possible to establish the hypothesis that the climatic patterns in the Matopiba region, particularly the temporal variation of the drought, have also been altered over the years. It was observed that the drought has gradually intensified in the Matopiba region in recent decades, a scenario that may be directly related to the change in climatological patterns of air temperature in the region, with drought events reaching the extreme category in the last decade of study, according to the Palmer Severity Index.

Keywords: Natural disaster, climate change, water deficit

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de soja (*Glycine max* L. Merrill), com uma produção de 154.566,3 milhões de toneladas de grãos produzidos em uma área total de 44.062,6 milhões de hectares, o que corresponde a uma produtividade de 3.508 kg grãos ha⁻¹, a maior parte dessa produção provém das lavouras localizadas nos estados de Mato Grosso e Goiás (CONAB, 2024). Entretanto, ao longo das últimas cinco décadas, a área plantada de soja no Brasil cresceu 623% e, conseqüentemente, a produção de grãos de soja no período de 1974 a 2020 aumentou em mais de 1.400%, com valores superando a 121,8 milhões de toneladas (Gazzoni e Dall'agnol, 2018). É importante ressaltar que mais de 70% dessa produção tem sido destinada à exportação (Menezes, 2021).

No processo de expansão das lavouras de soja para outras áreas diferentes daquelas que tradicionalmente cultivam esse grão, é importante citar a região de Matopiba, acrônimo das iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, localizada na interseção territorial desses estados. Nesta região, as primeiras lavouras de soja foram introduzidas na década de 70 (Pereira, 2019), passando por um rápido processo de expansão da área plantada. Para ilustrar, segundo os dados do Projeto de Mapeamento do Uso e Cobertura da Terra no Brasil, MapBiomas, a área plantada de soja em Matopiba era de apenas de 57.494 ha em 1985, tendo aumentado para 449.055 ha no final de 1994. Em 2021, a área plantada de soja em Matopiba já correspondia a um total de 5.019.536 ha.

Embora a expansão das áreas de cultivo contribua significativamente para o aumento da produção de grãos, é bem estabelecido que o emprego de novas tecnologias de cultivo deve contribuir para um aumento significativo na produtividade da soja (t ha⁻¹). Dentre essas tecnologias, destaca-se a utilização de sistemas de irrigação que devem operar para atender as necessidades hídricas da cultura nos seus diversos estádios de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

Por outro lado, a utilização de sistemas de irrigação nas lavouras de soja nem sempre é viável, quer seja pelo alto custo de instalação e manutenção dos equipamentos quanto pela ausência de uma fonte de água próxima à lavoura para abastecer o sistema. Nesses casos, a reposição hídrica do solo e a subsequente manutenção do

status hídrico das plantas passa a depender das taxas de precipitação local.

Na região de Matopiba, cujo clima é classificado como Aw segundo Köppen, as taxas de precipitação média anual são menores durante a estação seca, entre maio e setembro (~800 mm), e maiores na estação chuvosa, entre outubro e abril (~2000 mm) (Alvares et al., 2013). Contudo, numa escala menor, há variabilidade na distribuição das chuvas e nas taxas de precipitação dentre os diferentes municípios que compõem a região do Matopiba, sendo essa variabilidade um importante fator que determina a época do plantio, o crescimento vegetativo e desenvolvimento reprodutivo (floração e enchimento de grãos), conseqüentemente afetando a produção de grãos (CONAB, 2024).

Diversos estudos tem evidenciado uma diminuição da disponibilidade hídrica dos solos como consequência do aumento da temperatura ar em escala global e das alterações nos padrões de distribuição e volume de chuvas inerentes a cada região (Boulton et al., 2022; UNDRR, 2021; THE WORLD BANK, 2021; CRED & UNDRR, 2020; Stocker et al., 2019). Então, períodos de seca mais prolongados e severos poderão afetar o crescimento e produção das culturas agrícolas, o que inclui as lavouras de soja em Matopiba (CONAB, 2024).

Segundo a Estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Desastres (UNDRR), os impactos da seca estão se intensificando à medida que as temperaturas do ar tendem a aumentar em 2 °C. Quando não manejada adequadamente, a seca é um dos causadores da desertificação e degradação dos solos, da crescente fragilidade e instabilidade dos ecossistemas, especialmente nas comunidades rurais (UNDRR, 2021).

Segundo a Organização Meteorológica Mundial, o ano de 2021 foi classificado entre o quinto e o sétimo ano mais quente já registrado, com a temperatura do ar média anual global de 1,11 ± 0,13 °C acima do período pré-industrial de 1850-1900 (WMO, 2021). Um dos efeitos desse cenário foi a ocorrência de uma seca significativa que afetou grande parte da América do Sul subtropical pelo segundo ano consecutivo. Nesse caso, a precipitação registrada foi bem abaixo da média em grande parte do Brasil, Paraguai, Uruguai e norte da Argentina, impactando de forma direta diversas atividades socioeconômicas, com destaque para as atividades agrícolas, geração de energia, transporte fluvial, dentre outros (WMO, 2021).

Segundo Santana e Santos (2020), os registros de eventos de seca têm se intensificado nas últimas décadas, o que pode ser parcialmente justificado pelo avanço dos instrumentos de medição e de maior preocupação na observação climática e respectivos estudos. Outro ponto que merece atenção é o impacto das ações antrópicas no meio ambiente regional, com desdobramentos globais (IPCC, 2022).

Existem diferentes tipos de secas e elas estão interligadas em termos de processos biofísicos (Douville et al., 2021). As secas do tipo secas meteorológicas são caracterizadas com períodos de redução nos volumes de precipitação, que podem persistir e se propagam por semanas e meses, causando déficits na umidade do solo, no fluxo e armazenamento de água, levando a uma redução dos níveis de reservatórios e rios, e impactando de forma direta o abastecimento de água, formando assim a seca hidrológica.

O processo seguinte é o incremento da demanda evaporativa atmosférica, que afeta negativamente o status hídrico das plantas, constituindo assim a seca ecológica, que, por seu turno, gera a seca agrícola que ameaça a produção de alimentos através de danos às colheitas e reduções de rendimento agrícola, com desdobramentos negativos na economia local (Moraes et al., 2023). Nesse contexto, tem sido observado que as tendências crescentes de secas agrícolas e ecológicas são mais evidentes do que as tendências crescentes de seca meteorológica em várias regiões do mundo, devido ao aumento da demanda evaporativa local (Douville et al., 2021; Seneviratne et al., 2021).

A Organização das Nações Unidas – ONU, através do Painel Intergovernamental de Mudanças (IPCC, 2022) em seu sexto relatório, que abordou os estudos de impacto, adaptação e vulnerabilidade relacionados com as mudanças climáticas, concluiu

com alta confiança que o aumento da frequência e a severidade dos problemas agrícolas e das secas ecológicas está relacionado ao aquecimento antropogênico, nas escalas locais e globais.

Do exposto, é plausível estabelecer a hipótese de que os padrões climáticos na região de Matopiba, particularmente a variação temporal da seca, também tenham sido alterados ao longo dos anos. Considerando-se que secas mais severas podem impactar negativamente a produtividade da soja, então o presente trabalho tem como objetivo realizar uma caracterização agroclimática e do avanço temporal da seca na região produtora de soja de Matopiba nas últimas cinco décadas.

Os resultados aqui apresentados são cruciais para auxiliar nas tomadas de decisões concernentes ao planejamento e operação de sistemas de irrigação nas lavouras de soja, bem como poderão ajudar na elaboração de políticas públicas que visem atenuar o problema da seca principalmente para os produtores que não dispõem de irrigação em suas lavouras.

Material e métodos

Área de estudo

A região de Matopiba é uma área territorial com 73,1 milhões de hectares, formada pela interseção entre os estados do Maranhão (32,77%), Tocantins (37,95%), Piauí (11,21%) e a Bahia (18,06%), somando 31 microrregiões e 337 municípios (Figura 1), que se espalham pelos biomas de Cerrado com 90,94% (de toda a área), Amazônia, com 7,27%, e Caatinga, com 1,64% (Bauainain et al., 2018). Outra característica importante de Matopiba é uma área de elevado avanço no cultivo de grãos, que se intensificou de forma abrupta a partir da década de 1980, com a soja sendo o principal produto agrícola da região (MAPA, 2015).

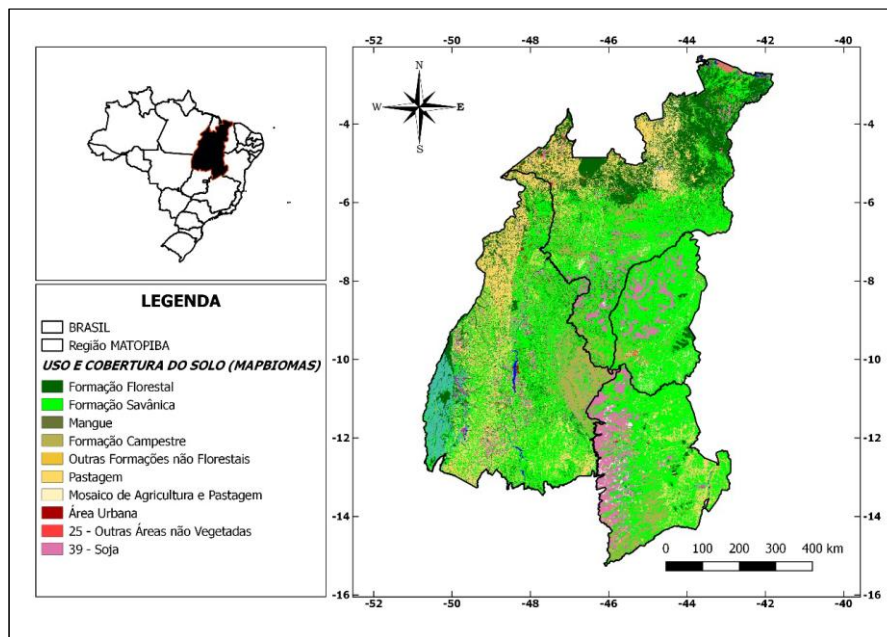


Figura 1. Localização geográfica da região de Matopiba, respectivos estados de formação territorial e os maiores produtores municipais de soja por estado.

Dados Ambientais

Meteorológicos

Foi utilizada a base de dados do TerraClimate (Abatzoglou, 2018), compreendidos entre o período mensal dos anos de 1971 a 2021. Esses dados são caracterizados como sendo um conjunto de dados do clima e do balanço hídrico climático na escala espacial global, com frequência temporal mensal, com resolução espacial de 4 x 4 km. Os dados integram informações de alta resolução espacial do conjunto de dados WorldClim, com a base de dados do Climatic Research Unit (CRU Ts4.0), além das informações da Reanálise Japonesa de 55 anos (JRA55). Os dados do Terra Climate são submetidos a frequentes atualizações e recentemente adicionados ao Google Earth Engine e ao servidor Thredds, são de domínio público e estão disponíveis em formato netCDF em <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>.

Uso e cobertura do solo

Foram utilizados os dados disponíveis na plataforma do MapBiomas, que emprega processamento em nuvem e classificadores automatizados, desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine, para

gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil, utilizando os mapas de Biomas Brasileiros do IBGE de 2004, originalmente na escala 1:5.000.000. Esse mapa foi refinado com base no mapa de fitofisionomias do RADAM na escala 1:1.000.000 e com base nos limites estaduais do IBGE de 2013 na escala 1:250.000.

Os dados de mapeamentos anuais, disponibilizados na plataforma, tem início em 1985 e se estendem até o ano de 2021, e foram gerados com base em imagens Landsat com resolução espacial 30 m e uma generalização espacial que descarta áreas isoladas com menos de 0,5 ha.

Outra característica importante consiste na utilização de todas as imagens disponíveis de cada ano, assim como de índices espectrais, índices de textura e informações de relevo, como forma de aprendizagem de máquina, possibilitando que o classificador diferencie todas as classes mapeadas, objetivando assim a geração de mapas consistentes para a caracterização da dinâmica das mudanças de uso e cobertura vegetal do solo.

Os dados do MapBiomas são públicos, abertos e gratuitos sob licença Creative Commons CC-CY-AS e estão disponíveis em

MapBiomas.org
<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>.

Indicador Hídrico

Índice de Severidade de Palmer - PDSI

O Índice de Severidade de Palmer (Palmer, 1965) é um indicador de seca meteorológica que possui como base a equação do balanço hídrico, levando em consideração a evapotranspiração, o escoamento superficial e as condições de água no solo (Heim, 2002). Esse índice varia de -5 a +5 (Tabela 1) e com isso são estabelecidas as diversas classes do índice conforme a intensidade do PDSI. O uso desse índice para monitorar secas é um excelente recurso por ser o único a considerar variáveis do solo (Blain e Brunini, 2005).

Tabela 1. Valores e indicadores do Índice de Severidade de Palmer (PDSI)

Valor PDSI	Indicador hídrico
	Umidade
5	excepcional
4	Umidade extrema
3	Umidade severa
	Umidade
2	moderada
1	Umidade leve
0	Neutralidade
-1	Seca leve
-2	Seca moderada
-3	Seca severa
-4	Seca extrema
-5	Seca excepcional

Uma das principais etapas da metodologia do PDSI é o cálculo da precipitação “Climatologicamente Apropriada às Condições Existentes” (P), a qual pode ser entendida como o valor de precipitação mensal necessário para que uma determinada área permaneça sob condições climáticas normais, conforme Palmer (1965).

Para o cálculo da anomalia hídrica mensal (d), a precipitação pluvial observada no mês (Pi) é comparada a P do mesmo período, conforme a Equação 1:

$$d = P_i - P \quad (1)$$

Resultados

Aspectos agroeconômicos

O avanço espacial e temporal da área plantada de soja em Matopiba, entre o ano de 1985 a 2021 é apresentada na Figura 2. Inicialmente a região possuía apenas 57.494 ha de área plantada de soja, no início do ano de 1985, até o ano 2000 essa área foi ampliada em 961.858 ha. A partir da década de 2000 houve uma intensa expansão dos campos de soja, sendo que entre os anos de 2001 e 2011, houve um incremento de 1.823.947 ha e entre os anos de 2011 e 2021 o incremento foi ainda maior, atingindo um total de 2.176.236 ha, 43,9% de toda a área plantada surgiu após 2011 indicando uma intensificação na produção e sua importância para a economia local.

Até o ano de 2021 a área total cultivada de Matopiba era de 5.019.536 ha o que representa um aumento percentual de 1024% em relação a área inicial de cultivo de soja.

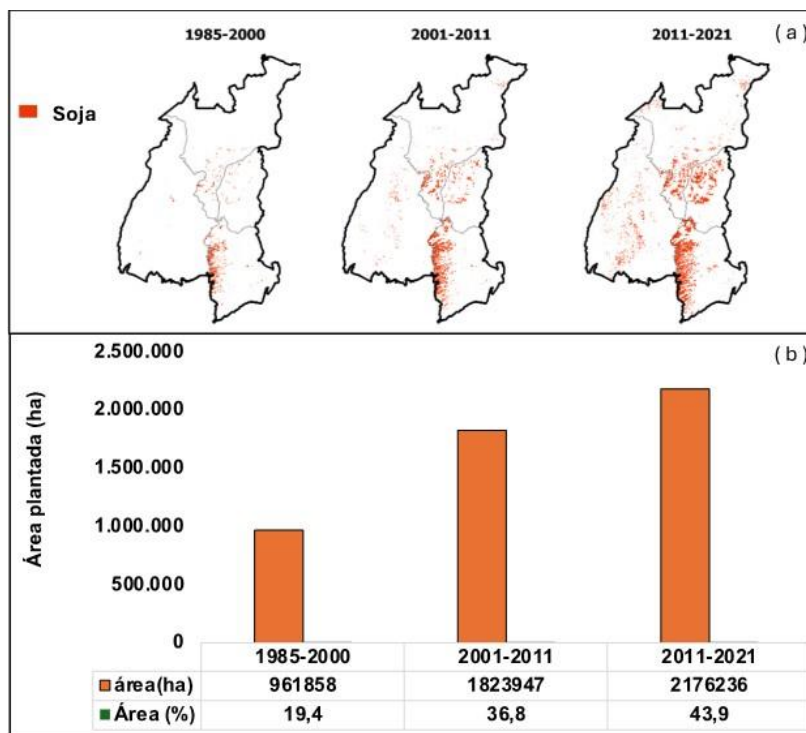


Figura 2. Variação espacial e temporal da área plantada de soja na região de MATOPIBA. (a) ano de 1985 a 2021, (b) variação absoluta e percentual de expansão.

O estado da Bahia foi o que apresentou o maior percentual de área plantada em Matopiba, no ano 2021, com uma área de 1.699.965 ha, o que representa 36% da área plantada total da região. Os estados do Tocantins, Maranhão e Piauí apresentaram áreas de plantio de 1.171.308 ha (25%), 1.023.541 (22%) e 832.063 ha (18%), respectivamente.

A quantidade total produzida de soja na região de Matopiba, no ano de 2021, foi de 16.461.463 toneladas, o que agrega um valor total de produção de R\$ 42.166.166,00 na região. E nesse cenário, o estado da Bahia é o responsável por 41,54% desse valor produzido em Matopiba, o que coloca mais uma vez o estado na frente dos demais estados, que apresentaram valores de

produção inferiores, com Tocantins apresentando R\$ 9.650.713,00 (22,88%), Maranhão com R\$ 7.867.928,00 (18,65%), Piauí com R\$ 7.131.695,00 (16,91%) (IBGE-PAM, 2021). A Figura 3 apresenta os cinco maiores municípios produtores de soja em Matopiba em 2021.

Regionalmente, o estado da Bahia também concentra os municípios de maior produção de soja, com Formosa do Rio Preto-BA apresentando os maiores valores em 2021, com uma quantidade de soja produzida de 1.619.930 toneladas. Os municípios menos expressivos estão localizados no estado do Tocantins, com municípios que correspondem a menos de 10% da produção de Formosa do Rio Preto-BA.

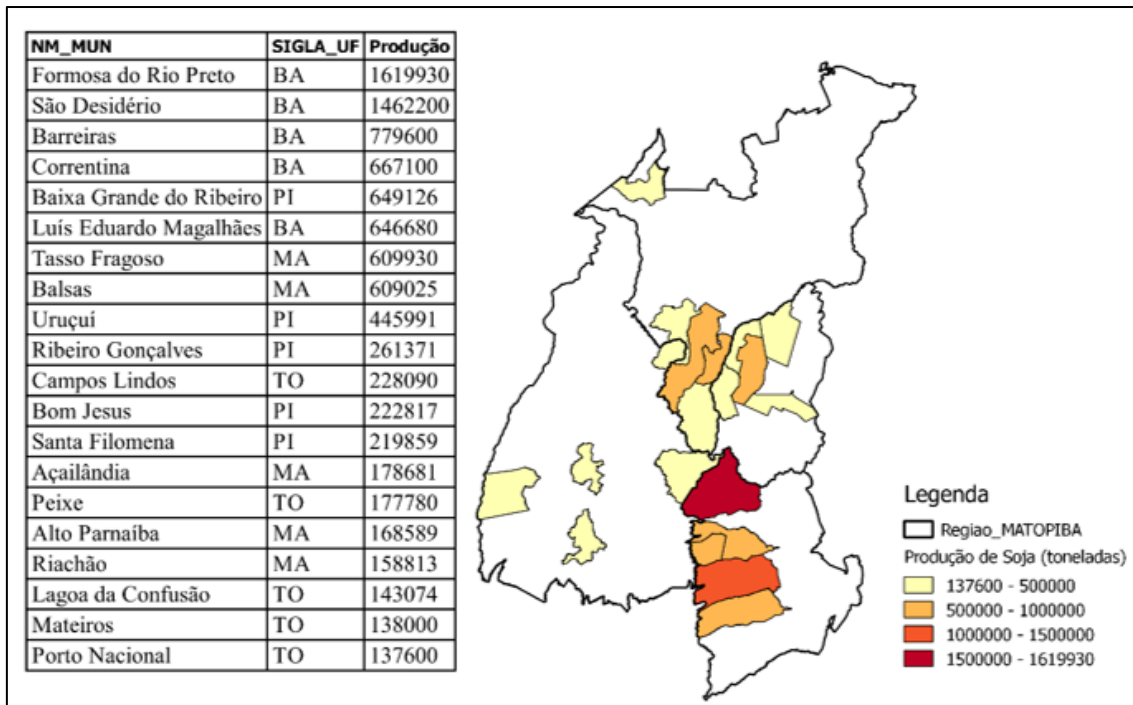


Figura 3. Ranking municipal de produção de soja em toneladas na região de Matopiba em 2021.

Variabilidade da Precipitação

A precipitação anual na região de Matopiba apresenta uma elevada variação espacial, com valores máximos alcançando os 2.000 mm ao norte da região, no estado do Maranhão, nos municípios de Chapadinha, Vargem Grande e Itapecuru Mirim. Os menores volumes anuais de precipitação foram observados a leste da região dos estados do Piauí e Bahia, com valores que oscilam em torno de 770 mm anuais município de Avelino Lopes, Morro Cabeça no Tempo e Curimatã, no Piauí e nos municípios de Bom Jesus da Lapa, Paratinga e Sítio do Mato, na Bahia (Figura 4 a).

O trimestre mais chuvoso na região de Matopiba está compreendido entre os meses de janeiro a março (1º tri) com valores totais que chegam a 500 mm em grande parte da região, excetuando o extremo sudeste, nos estados do Piauí e Bahia, que oscilam em torno de 350 mm. (Figura 4 b).

O trimestre seguinte, nos meses de abril, maio e junho (2º tri) o volume de total de precipitação sofre uma moderada diminuição (Figura 4 c), sendo intensificado no trimestre seguinte, entre os meses de julho, agosto e setembro, com volumes que não superam os 20 mm, podem chegar a 8 mm totais nesse trimestre (Figura 4 d).

O 4º trimestre, que se estende de outubro a dezembro, é caracterizado com o retorno gradual das precipitações no extremo oeste da região, no estado do Tocantins, que supera os 600 mm de precipitação, enquanto os baixos volumes ainda podem ser observados no extremo norte da região, ao norte do estado do Maranhão, nos municípios de Barreirinhas, Humberto de Campos e Paulino Neves, com valores que não superam os totais de 70 mm no trimestre (Figura 4 e).

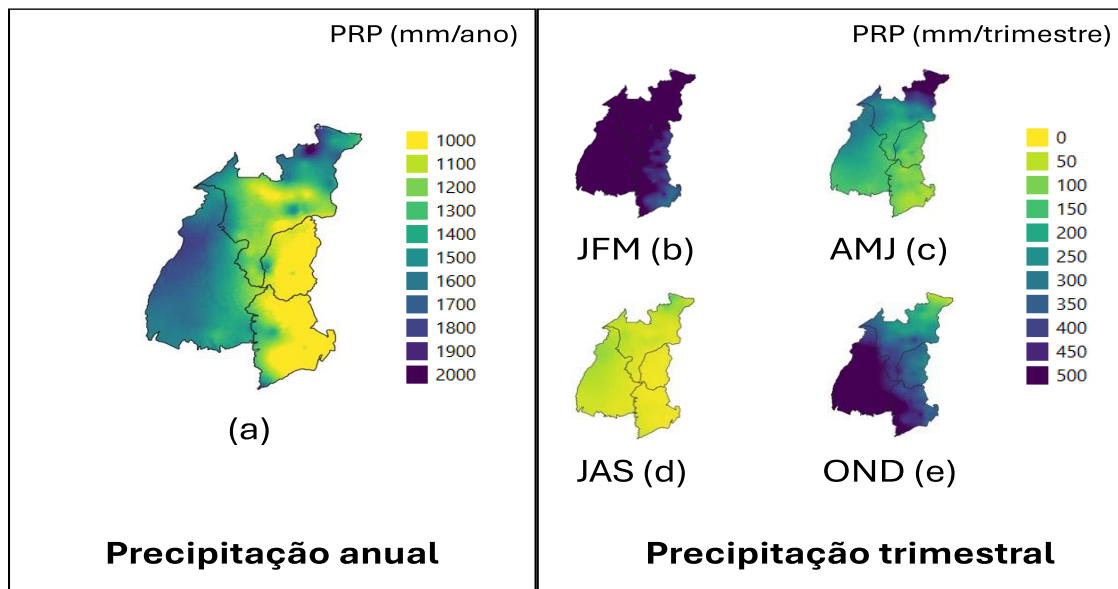


Figura 4. Variação espacial da precipitação na região de Matopiba. (a) precipitação anual, (b) precipitação no 1º trimestre, (c) precipitação no 2º trimestre, (d) precipitação no 3º trimestre e (e) precipitação no 4º trimestre.

Portanto, é notável que os meses de julho, agosto e setembro constituem o período mais crítico da região, no que se refere a disponibilidade hídrica. Esses baixos valores de precipitação podem ser intensificados e estendidos para os meses anteriores e posteriores, em anos de anomalias de temperatura da superfície dos Oceanos atlântico (Dipolo) e Pacífico (eventos de El Niño ou La Niña).

Variação Espacial e Temporal Seca

A seca tem se intensificado de forma gradual na região de Matopiba nas últimas décadas, cenário que pode estar diretamente relacionado com a mudança dos padrões climatológicos de temperatura do ar na região (Figura 5). Durante a década compreendida entre os anos de 1970 e 1979 (Figura 5 a), a região apresentada uma condição média de umidade leve, com exceção da banda do extremo sudoeste do estado do Piauí, que apresentou condições de umidade moderada e do sul da Bahia, com condições de normalidade.

Na década seguinte (Figura 5 b) surgiram áreas de “seca leve” em grande parte da região, sendo essas áreas ampliadas e intensificadas, passando para a categoria de “secas moderadas” na década dos anos de 1990 (Figura 5 c), mantendo praticamente esse cenário no período decadal seguinte (Figura 5 d), com exceção do surgimento de áreas de condições de neutralidade no Tocantins e sudoeste do Piauí e Bahia.

O cenário mais crítico pode ser observado na última década de estudo (Figura 5 e), estabelecida entre os anos de 2010 e 2019, período

em que as “secas severas” surgiram nos estados da Bahia, Piauí e Norte do Maranhão, com eventos extremos de seca na região que chegaram na categoria de “seca extrema” (Figura 5 f).

Essas condições inicialmente impactam de forma direta a agricultura de sequeiro, que depende de forma exclusiva da água verde, ou seja, a água da chuva, para o manejo agrícola, enquanto na agricultura irrigada são empregadas técnicas de manejo de irrigação com o uso da água azul, ou seja, as águas extraídas dos rios. Porém, em períodos de anos de clima anômalos, conforme descrito anteriormente, a persistência e aumento temporal (dias e meses) da seca podem também afetar os níveis do lençol freático e dessa forma a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada também.

O déficit hídrico impacta de forma direta o cultivo da soja, desde o plantio até a produção e colheita de grãos. No plantio, o déficit hídrico afeta negativamente a germinação das sementes, levando a falhas na formação do stand de plantas em campo e a formação de plântulas menos vigorosas (Igíehon et al., 2021). O déficit hídrico altera o metabolismo primário da planta, particularmente diminuindo a taxa de assimilação líquida de CO₂ (Cui et al., 2021; Zhara et al., 2023). Então, menores taxas de fotossíntese líquida resultam em menor produção de carboidratos primários, tais como amido e sacarose, cruciais para a respiração celular e síntese de ATP.

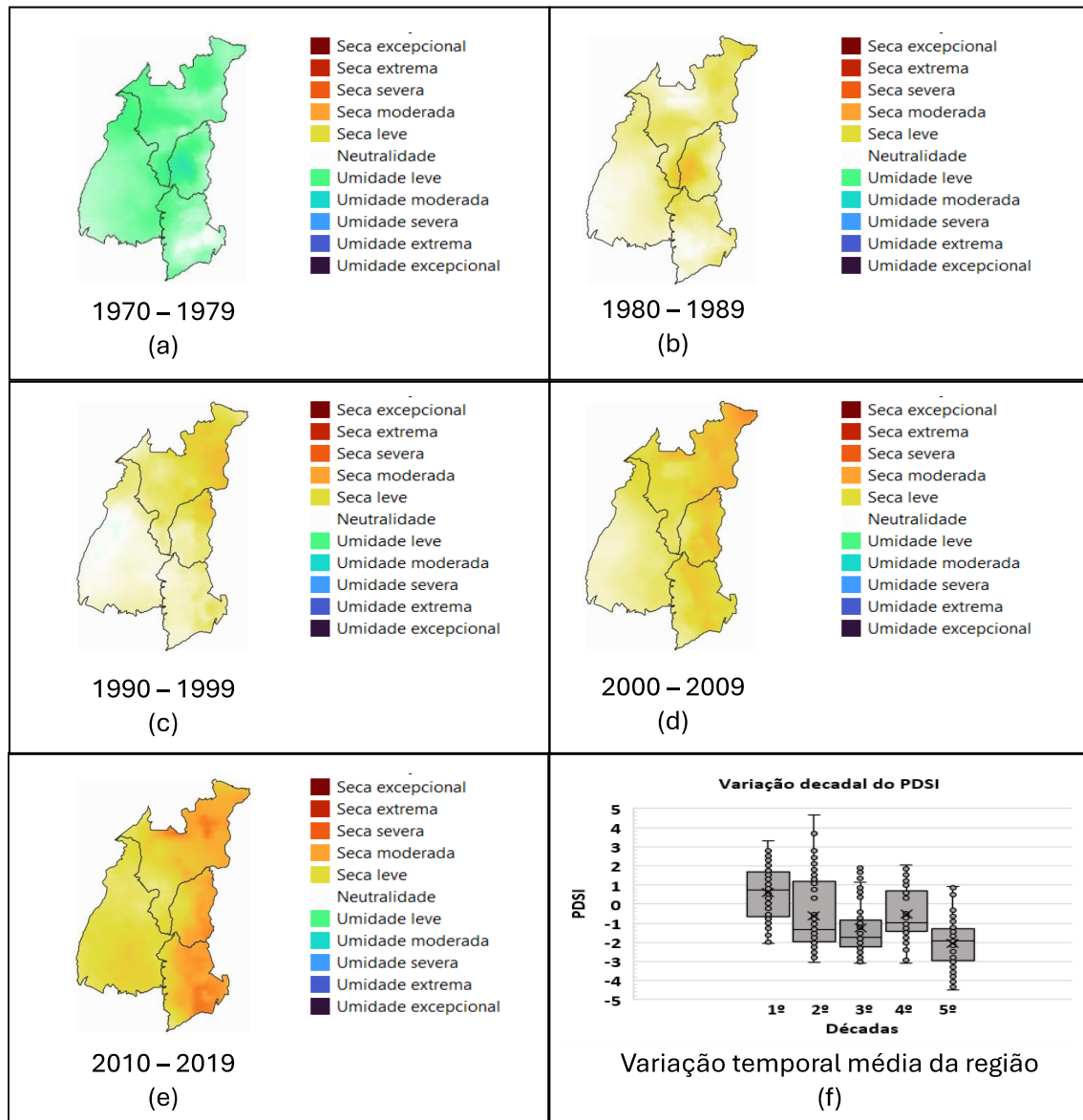


Figura 5. Variação espacial e temporal do Índice de Severidade de Palmer na região de Matopiba.

Sob déficit hídrico, a redução na assimilação líquida de CO_2 pode ser explicada tanto por fatores de ordem estomática quanto por fatores de ordem não-estomática. Dessa forma, nos primeiros dias de desenvolvimento da seca, a planta rapidamente fecha seus estômatos como mecanismo fisiológico para atenuar a perda de água por transpiração, contribuindo para a manutenção da turgescência da planta, sendo uma resposta comum em várias espécies, inclusive em soja (Basal et al., 2020; Basal & Szabó, 2020; Poudel et al. 2023). Por sua vez, o fechamento estomático aumenta a resistência da folha ao influxo de CO_2 , diminuindo a concentração desse gás nos cloroplastos e consequentemente levando a uma menor atividade carboxilase da Rubisco

(Zhara et al., 2023). Dessa forma, a produção de triose-P para síntese de amido e sacarose diminui significativamente e, nas plantas C3, como a soja, um aumento na fotorrespiração passa a ser mais significativo (Zhara et al., 2023).

Sob seca mais severa, efeitos bioquímicos relacionados à fotossíntese se somam aos efeitos estomáticos, tais como aumento na degradação de clorofilas, danos foto-oxidativos aos fotossistemas, diminuição da atividade da Rubisco e diminuição na síntese de carboidratos (amido e sacarose), aumento na produção espécies reativas de oxigênio e indução de estresse oxidativo, dentre outros (Basal et al, 2020; Imran et al., 2021).

Quando os eventos de déficit hídrico ocorrem na fase reprodutiva da cultura da soja, a

assimilação líquida de CO₂ pelas folhas é negativamente afetada pelas mesmas razões estomáticas e não estomáticas discutidas anteriormente. Considerando-se que as flores e os grãos em enchimento são órgãos drenos que dependem do suprimento de carboidratos (sacarose principalmente) produzidos pelas folhas, então uma menor taxa de assimilação líquida de CO₂ nas folhas afetará a taxa de floração e a produção de grãos, que reduzem em quantidade (número de grãos por planta) e em peso (Basal & Szabó, 2020; Felisberto et al., 2023; Neumaier et al., 2020; Poudel et al., 2023). Além disso, os teores de carboidratos, proteínas e gorduras dos grãos produzidos pelas plantas sob déficit hídrico é inferior a dos grãos produzidos por plantas não estressadas, (Xiong et al., 2021).

A Organização das Nações Unidas – ONU, através do Painel Intergovernamental de Mudanças (IPCC, 2022) em seu sexto relatório apontou que a elevação da temperatura do ar, nas escalas locais e global tem sido a principal causa dos períodos de secas, em diversas partes do mundo. Neste trabalho, foram demonstradas alterações nos padrões climatológicos da região de Matopiba entre os períodos climatológicos normais de 1991

a 2020 e 1981 a 2010. Regionalmente, nos municípios de Balsas-MA, Porto Nacional- TO, Bom Jesus-PI e Formosa do Rio Preto- BA, localizados centralmente na região de estudo (Figura 6), foi observado um aumento de até 0,8°C no mês de outubro, na temperatura máxima do ar, variável meteorológica que, de uma forma geral ocorre com alta frequência próxima das 14 horas local.

Em outubro, a temperatura mínima do ar aumentou em até 0,6 °C, cenário este que favorece o incremento de perdas hídricas através dos processos de evapotranspiração da superfície do solo e dos vegetais, ocasionando assim uma maior demanda de água, principalmente para as práticas de manejo agrícola.

A precipitação não apresentou significativas alterações em seus padrões climatológicos, porém em anos de anomalias climáticas (1982 a 1983, 1990 a 1993, 1997 a 1998, 2006 a 2007, 2015 a 2016), com interações moderadas a forte do Fenômeno El Niño, esses valores reduzidos de 10 a 25 mm podem facilmente ser elevados, intensificado ainda mais a escassez hídrica na região.

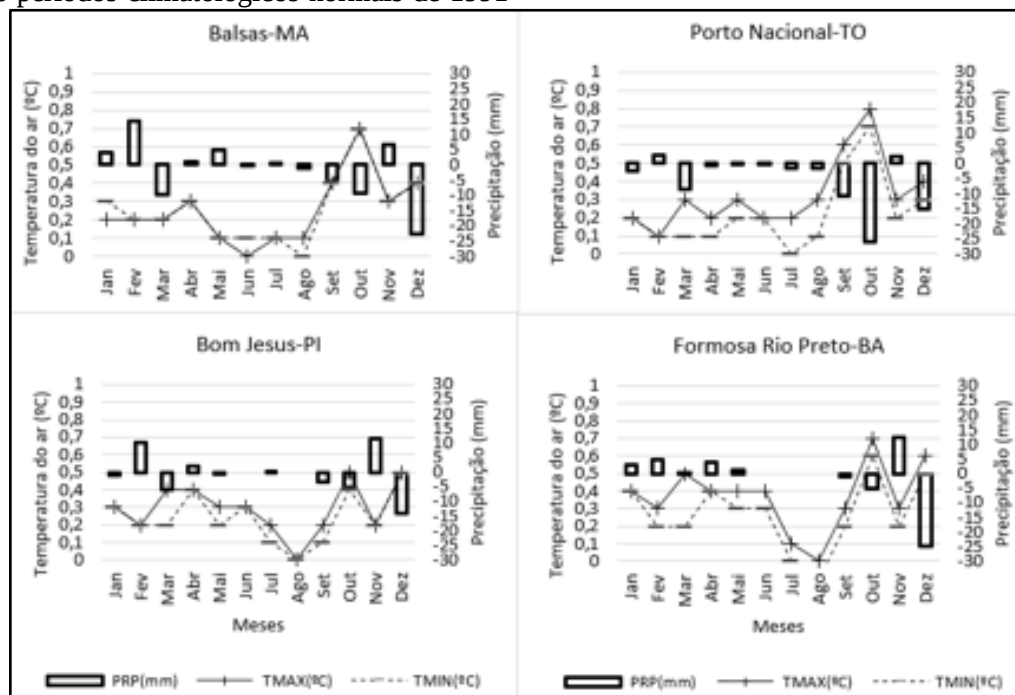


Figura 6. Mudança nos padrões climatológicos mensais de precipitação (barras vazadas), temperaturas máximas (linha contínua com +) e mínimas do ar (linha tracejada com -).

As simulações do clima para as próximas décadas, realizados pelos modelos numéricos de mudança do clima, do Painel de Mudanças Climáticas – IPCC (IPCC, 2022), sugerem alterações nos padrões do clima futuro, com aumento ainda mais intenso das temperaturas do ar

e redução das precipitações em diversas partes do globo, incluindo a Amazônia e o Nordeste brasileiro.

Do exposto, os efeitos negativos das alterações persistentes do clima, tais como o aumento da temperatura do ar local e os distúrbios

relacionados às taxas de precipitação, precisam ser monitorados constantemente com emprego de estações meteorológicas e sensores instalados localmente, coletando informações sobre o clima em fluxo contínuo, de modo que as avaliações desses dados possam ser realizadas para períodos quinzenais, mensais e sazonais, de acordo com o que se pretende avaliar. Além disso, acompanhar a evolução do aquecimento da superfície do oceano Atlântico e as possíveis perdas hídricas que avançam ao longo das décadas é igualmente importante, assim como o monitoramento do teor de água do solo por parâmetros como o teor de umidade do solo (em %) ou potencial hídrico do solo (MPa), o que permitirá compreender as alterações no balanço hídrico do solo frente as variações temporais do clima, particularmente nas estações mais secas do ano. Esses acompanhamentos agrometeorológicos e da água do solo devem receber especial atenção nos anos de El Niño. Por fim, este trabalho demonstra a importância da compreensão das variações temporais da seca como uma ferramenta estratégica para auxiliar na elaboração ou adequação das técnicas de manejo agrícola, particularmente do manejo da irrigação, a fim de evitar perdas e danos

na produção das lavouras, neste caso a soja na região produtora de Matopiba.

Conclusões

Fica evidente o estabelecimento de uma mudança do clima regional na região de Matopiba, com efeitos diretos nas atividades que são impactadas pela escassez de água. Vale ressaltar que os impactos do El Niño e La Niña (e Atlântico) podem intensificar ainda mais essa condição de seca já estabelecida localmente, podendo impactar também a agricultura industrial, os processos de captação de água e as respectivas técnicas de manejo de irrigação.

Soluções como o monitoramento dinâmico dos volumes das precipitações, das evapotranspirações e dos respectivos déficits hídricos atmosféricos e do solo, constitui uma ferramenta importante para as ações estratégicas prévias de mitigação dos efeitos da variabilidade das secas nas regiões produtoras de soja em Matopiba. Essa solução pode ser estabelecida com o uso de estações meteorológicas em superfície e técnicas agrometeorológicas específicas, além de informações do sensoriamento remoto e previsões do clima para os próximos meses e períodos sazonais.

Referências

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G. (2013). Köppen climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Basal, O., Szabó, A. (2020). Ameliorating drought stress effects on soybean physiology and yield by hydrogen peroxide. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 85, 211–218. <https://hrcak.srce.hr/243606>
- Basal, O., Szabó, A., Veres, S. (2020). Physiology of soybean as affected by PEG-induced drought stress. *Current Plant Biology*, 22, 100135. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100135>
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., Boers, N. (2022). Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*, 12, 271–278. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Buainain, A. M., Garcia, J. R., & Vieira Filho, J. E. R. (2018). A economia agropecuária do Matopiba: Agricultural economy of Matopiba. *Estudos Sociedade e Agricultura*, 26(2), 376–401. Disponível: <https://doi.org/10.36920/esa-v26n2-6>
- Blain, G. C., Brunini, O. (2005). Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 64(4), 695–705. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000400020>
- CONAB. Companhia Nacional De Abastecimento (Brasil) . Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 11 Safra 2023/24 - Sétimo levantamento. Brasília DF, 2024, p 1-117. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/52602_58aa98c3e7ae17c10f23d015f244b202. Acesso: 04 jun. 2024
- CRED & UNDRR. (2020). The Human Cost of Disasters: an overview of the last. Disponível em <<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Human%20Cost%20of%20Disasters%202000-2019%20Report%20-%20UN%20Office%20for%20Disaster%20Risk%20Reduction.pdf>> Acesso: 11 mai. 2023.
- Cui, Y., Ning, S., Jin, J., Jiang, S., Zhou, Y., Wu, C. (2021). Quantitative lasting effects of

- drought stress at a growth stage on soybean evapotranspiration and aboveground BIOMASS. *Water*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.3390/w13010018>
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam, Mba, W. P., Rosenfeld, D., Tierney, J., and Zolina, O.: Water Cycle Changes, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>, 2021.
- Felisberto, G., Schwerz, F., Umburanas, R. C., Dourado-Neto, D., Reichardt, K. (2023). Physiological and yield responses of soybean under water deficit. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 26, 27–37. <https://doi.org/10.1007/s12892-022-00157-1>
- Gazzoni, D. L., Dall'agnol, A. (2018). A saga da soja: de 1050 aC a 2050 dC. Brasília: Embrapa, 2018. 199p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/220999/1/ID-38839-Livro-Saga-da-Soja-versao-web.pdf>. Acesso: 04 jun. 2024.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. Disponível: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
- Igiehon, N. O., Babalola, O. O., Cheseto, X., Torto, B. (2021). Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on yield, size distribution and fatty acid of soybean seeds grown under drought stress. *Microbiological Research*, 242, 126640. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126640>
- Imran, M., Latif Khan, A., Shahzad, R., Aaqil Khan, M., Bilal, S., Khan, A., Kang, S.-M., Lee, I.-J., Wilkins, O. (2021) Exogenous melatonin induces drought stress tolerance by promoting plant growth and antioxidant defence system of soybean plants. *AoB Plants*, 13 (4), plab026. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab026>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Pereira, L. I. (2019). Matopiba: dos ajustes espaciais do agronegócio ao território de esperança do campesinato. *Revista Nera*, (47), 09–21. <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i47.6284>
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 244, de 12 de novembro de 2015.
- Menezes, Willian G. M. D. Seletividade e desigualdades socioespaciais: o uso do território do território brasileiro pela soja. 2021. 440 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia pela Universidade Federal da Bahia, Salvador. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/34015>. Acesso: 04 jun. 2024.
- Moraes, B. C., Sodré, G. R., Lima, A. M., Junior, J. de A. S., & Ribeiro, J. B. M. (2023). Risco agroclimático: Impacto da variabilidade dos episódios de seca sobre a produção do a  i (euterpe oleracea mart.) na Amazônia oriental. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 16(4), 1685–1696. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.4.p1685-1696>
- Neumaier, N., Farias, J. R. B., Nepomuceno, A. L., Mertz-Henning, L. M., Foloni, J. S. S., Moraes, L. A. C., Gonçalves, S. L. Ecofisiologia da Soja. In: Balbinot Junior, A. A., Seixas, C. D. S., Krzyzanowski, F. C., Neumaier, N., de Campos Leite, R. M. V. B. (Eds.) Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, p.33–54. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223209/1/SP-17-2020-online-1.pdf>
- Palmer, W.C. Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, DC (1965)
- Poudel, S., Vennam, R. R., Shrestha, A., Reddy, K. R., Wijewardane, N. K., Reddy, K. N., Bheemanahalli, R. (2023). Resilience of soybean cultivars to drought stress during flowering and early seed-setting stages. *Scientific Reports*, 13, 1277. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28354-0>
- Santana, A. S.; Santos, G. R. Impactos da seca de 2012-2017 na Região Semiárida do Nordeste: notas sobre a abordagem de dados quantitativos e conclusões qualitativas. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental (IPEA)*, v. 22, p. 119-129, 2020. Disponível em: <https://dox.doi.org/10.38116/brua22art9>. Acesso: 16 mar. 2023.

- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., and Zhou, B.: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>, 2021.
- Stocker, B. D., Zscheischler, J., Keenan, T. F., Prentice, I. C., Seneviratne, S. I., Peñuelas, J. (2019). Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 12, 264–270. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0318-6>
- THE WORLD BANK. (2021). Groundswell Part 2: Acting on Internal Climate Migration. Disponível em <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36248/Groundswell%20Part%20II.pdf?sequence=8&isAllowed=y> Acesso: 11 mai. 2023
- UNDRR. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2021). GAR Special Report on Drought. Disponível em <https://www.undrr.org/media/49386/download> Acesso: 11 mai. 2023.
- WMO. World Meteorological Organization. State of the Global Climate 2021. Geneva 2 – Switzerland. 2021. No. 1290. 55 p. Disponível em https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178. Acesso: 13 mar. 2023.
- Xiong, R., Liu, S., Considine, M. J., Siddique, K. H., Lam, H. M., Chen, Y. (2021). Root system architecture, physiological and transcriptional traits of soybean (*Glycine max* L.) in response to water deficit: A review. *Physiologia Plantarum*, 172, 405–418. <https://doi.org/10.1111/ppl.13201>
- Zahra, N., Hafeez, M. B., Kausar, A., Al Zeidi, M., Asekova, S., Siddique, K. H., Farooq, M. (2023). Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(5), 593–612. <https://doi.org/10.1111/jac.12652>