



Correlação entre as transformações da cobertura e uso da terra com variáveis climáticas e ambientais na região do Matopiba, Brasil

Space-temporal dynamics of changes in the landscape of the Matopiba region, Brazil

Temístocles Pacheco Lima¹  , Luciano Cavalcante de Jesus França^{*2}  , Fabrina Teixeira Ferraz³  , João Batista Lopes da Silva⁴  , Manuel Eduardo Ferreira⁵  , Anderson Rodrigo da Silva¹  , Daniel de Paiva Silva¹  

¹Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado, Instituto Federal Goiano, Urutaí, Goiás, Brasil.

Recebido (Received): 10/09/2022

Aceito (Accepted): 02/10/2023

²Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, MG, Brasil.

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

⁴Programa de Pós-Graduação em Ciências e Sustentabilidade, Universidade Federal do Sul da Bahia, Teixeira de Freitas, BA, Brasil.

⁵Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

E-mail: temistoclespacheco@hotmail.com (TPL); fabrina.ferraz@hotmail.com (FTF);

silvajbl@yahoo.com.br (JBLS); mferreira.geo@gmail.com (MEF); anderson.silva@ifgoiano.edu.br

(ARS); daniel.paivasilva@gmail.com (DPS).

*E-mail para correspondência: luciano.franca@ufu.br

Resumo: O Brasil é um líder mundial no agronegócio, principalmente na produção de soja e carne bovina, cuja contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) é significativa. Entretanto, é também responsável por importantes alterações na paisagem, especialmente no Cerrado, que é um *hotspot* para conservação mundial. Neste estudo analisamos as transformações na cobertura da terra na fronteira agrícola Matopiba e a correlação entre variáveis climáticas e ambientais de 2008 a 2018. Para isso, utilizamos dados de cobertura do solo da plataforma MapBiomas e variáveis ambientais e climáticas do *Earth Engine Data Catalog*. Realizamos uma análise descritiva e um teste de correlação cruzada para as variáveis selecionadas. Com base nos resultados, o Cerrado foi reduzido em torno de 5,1% (~3.692.677 ha) e aumento nas classes de Pastagem (2,1% ou 1.538.358 ha) e Agricultura (3,1% ou 2.254.264 ha). A diminuição do Índice de Vegetação (NDVI) propicia o aumento da Temperatura do Solo (LST) e, consequentemente, reduz a Umidade do Solo (US), principalmente nas zonas agrícolas e pecuárias. O NDVI alto, como em áreas de vegetação densa, favorece a proteção da umidade do solo. Evidenciamos que a agropecuária no Matopiba está em pleno crescimento em detrimento da vegetação do Cerrado e que há uma forte relação entre as variáveis ambientais e climáticas. Este estudo pode ser base para auxiliar em tomadas de decisões, estratégias e políticas públicas voltadas à conservação do Cerrado e desenvolvimento econômico e sustentável do agronegócio do Matopiba.

Palavras-chave: Cerrado; Índice de vegetação; MODIS; Manejo de paisagens.

Abstract: Brazil is a world leader in agribusiness, mainly in the production of soy and beef, whose contribution to the Gross Domestic Product (GDP) is significant. However, it is also responsible for important landscape changes, especially in the Cerrado, which is a global conservation hotspot. In this study, we analyze changes in land cover on the Matopiba agricultural frontier and the correlation between climate and environmental variables from 2008 to 2018. For this, we use land cover data from the MapBiomas platform and environmental and climate variables from the Earth Engine Data Catalog. We performed a descriptive analysis and a cross-correlation test for the selected variables. Based on the results, the Cerrado was reduced by around 5.1% (~3,692,677 ha) and increased in the Pasture (2.1% or 1,538,358 ha) and Agriculture (3.1% or 2,254,264 ha). The decrease in the Vegetation Index (NDVI) leads to an increase in Soil Temperature (LST) and, consequently, reduces Soil Moisture (US), mainly in agricultural and livestock areas. The high NDVI, as in areas of dense vegetation, favors the protection of soil moisture. We showed that agriculture and livestock in Matopiba is in full growth to the detriment of Cerrado vegetation and that there is a strong relationship between environmental and climate variables. This study can be a basis to assist in decision-making, strategies and public policies aimed at conservation of the Cerrado and economic and sustainable development of agribusiness in Matopiba.

Keywords: Cerrado; Vegetation Index; MODIS; Landscape Management.

1. Introduction

A expansão do agronegócio brasileiro fez surgir uma nova fronteira agrícola no Cerrado, o Matopiba, que inclui territórios dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Institucionalizado pelo Decreto N° 8.447 de 6 de maio de 2015 (BRASIL, 2015), o Matopiba possui área aproximada de 73 milhões de hectares e é considerado estratégico para futuros investimentos no Brasil (REIS *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2019). O relevo plano, os solos profundos e bem drenados, as terras a preços atrativos e o clima são aspectos que favorecem a produção de grãos e carne na região (ARAÚJO *et al.*, 2019). Não à toa, entre os anos de 2000 e 2016, a área dedicada apenas à produção agrícola no Matopiba cresceu 40,9% (MATRICARDI *et al.*, 2019), com perspectivas promissoras de incremento tanto na extensão das áreas plantadas quanto na produção de grãos para a próxima década (MAPA, 2019).

Cerca de 91% do Matopiba faz parte do Cerrado (REIS *et al.*, 2020). O cerrado é o segundo maior bioma do Brasil (cerca de 2.000.000 km²) (IBGE, 2019) e sua vegetação natural já foi reduzida em mais de 50% das últimas décadas, principalmente para a expansão do agronegócio (BEUCHLE *et al.*, 2015; MMA, 2015; LAPOLA *et al.*, 2019). Atualmente, o Cerrado é considerado o celeiro do Brasil, com grande produção de soja, milho, cana de açúcar e carne bovina (STRASSBURG *et al.*, 2017; SANO *et al.*, 2019). Do ponto de vista ecológico, o Cerrado é um *hotspot* para conservação da biodiversidade mundial e conta com mais de 4.800 espécies de plantas endêmicas (MYERS *et al.*, 2000). Também é estratégico para a conservação dos recursos hídricos (LATRUBESSE *et al.*, 2019), pois abrange três das maiores bacias hidrográficas da América do Sul, contribuindo com 43% das águas superficiais do Brasil fora da Amazônia (MYERS *et al.*, 2000).

Sendo assim, é evidente o conflito de interesses sobre o Cerrado. De um lado, a contínua pressão do desmatamento para mais produção agrícola e desenvolvimento econômico; do outro, a pressão conservacionista, para preservar o que resta do bioma. Isto porque os impactos negativos da exploração dos recursos naturais e desmatamento são reconhecidos na comunidade científica. Por exemplo, o isolamento genético de espécies (SAEKI *et al.*, 2018, KOBAYASHI; SOTA, 2019), a redução dos estoques de carbono e biomassa florestal (ISLAM *et al.*, 2017; ROLO *et al.*, 2018), a piora da qualidade da água de bacias hidrográficas (BROGNA *et al.*, 2018; MELLO *et al.*, 2018), a perda da proteção dos solos (LAM *et al.*, 2018), entre outros exemplos.

As pesquisas científicas sobre as questões ambientais, nesse sentido, são fundamentais e podem ajudar no desenvolvimento sustentável e na elaboração de políticas públicas voltadas à conservação. Nisso incluem-se investigações sobre as alterações na cobertura do solo, no tempo e no espaço (SPERA *et al.*, 2016; KASTENS *et al.*, 2017; MATRICARDI *et al.*, 2019; ZALLES *et al.*, 2019) associadas a variáveis ambientais para estimativas de mudanças na paisagem e seus efeitos. É o caso, por exemplo, de estudos de temperatura de superfície terrestre e umidade do solo, que elucidam questões voltadas ao manejo de culturas e anomalias climáticas (ZHOU; WANG, 2011; FATHIZAD *et al.*, 2017; SALVADOR; BRITO, 2017; HECK *et al.*, 2019; NEGA *et al.*, 2019).

Tendo em vista a expansão do agronegócio e a situação dos recursos naturais no Cerrado, neste estudo consideramos investigar o padrão espaço-temporal da cobertura do solo na fronteira agrícola MATOPIBA e a sua relação com variáveis ambientais e climáticas, extraídas de dados de sensoriamento remoto, ao longo do tempo. Consideramos a hipótese de que uma grande parcela da perda de vegetação nativa ocorrida na região do MATOPIBA nos últimos anos é explicada pela atividade agropecuária. Também, admitimos *a priori* que a retirada da vegetação e a umidade do solo podem ser correlacionadas com a temperatura de superfície na área de estudo.

2. Material e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

A unidade de análise é a região do MATOPIBA, que contempla parte dos estados do Maranhão, Piauí, Bahia e todo o estado do Tocantins, (**Figura 1**). O MATOPIBA está situado entre o semiárido e a Amazônia brasileiros, inclui 377 municípios e 10 mesorregiões, e tem cerca de 73 milhões de hectares, dos quais aproximadamente 91% fazem parte do Cerrado (SALVADOR; BRITO, 2017; REIS *et al.*, 2020). Os latossolos são a classe de solos predominante (SANTOS *et al.*, 2018). Segundo a classificação climática de

Köppen, é uma região tropical de inverno seco (Aw), distinguindo-se uma estação chuvosa (de outubro a abril) e uma seca (de maio a setembro), ambas bem definidas (ALVARES *et al.*, 2013).

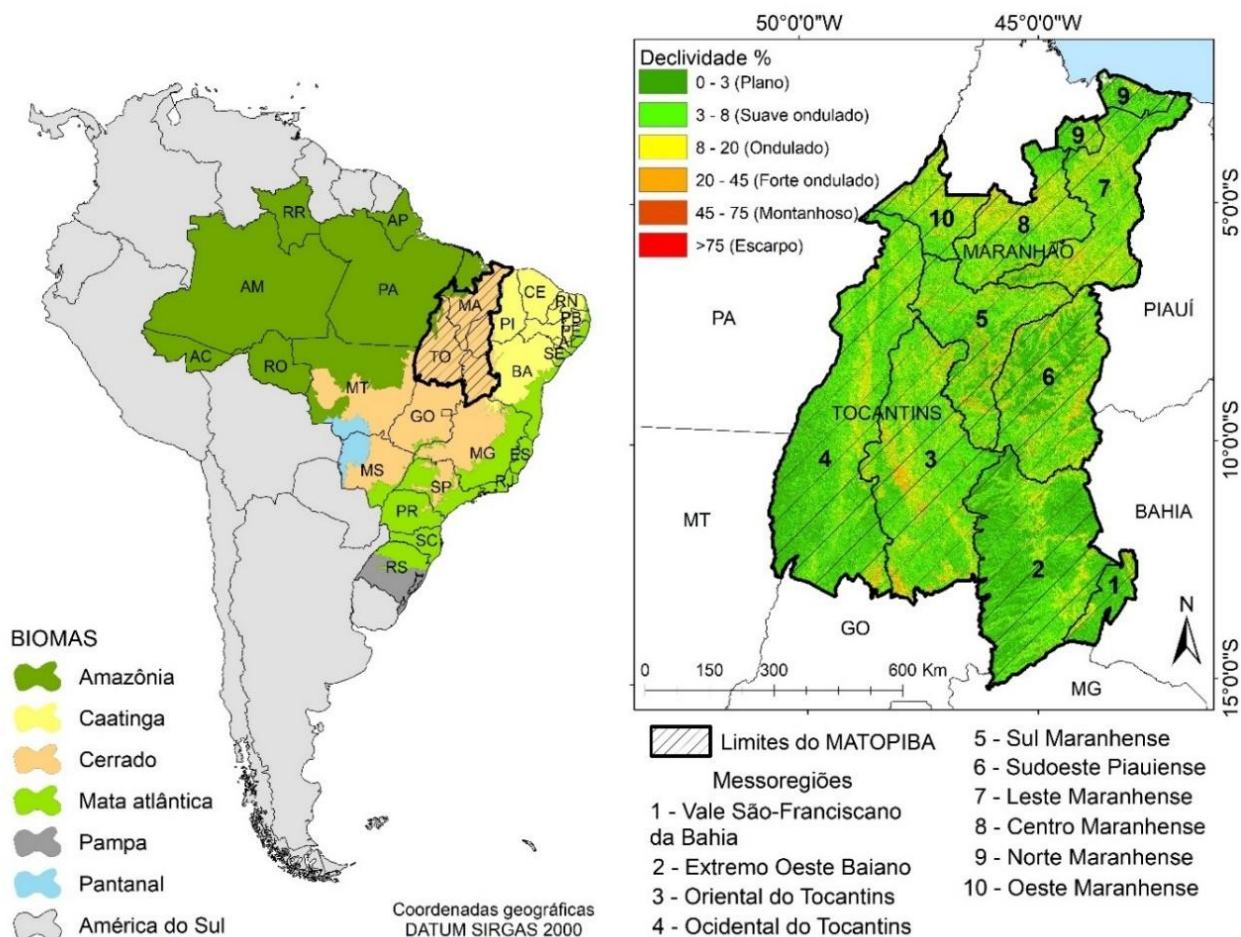


Figura 1: Fronteira agrícola MATOPIBA e suas mesorregiões, no norte e nordeste do Brasil. Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

2.2. Planos remotos de informações ambientais e climáticos

Todos os procedimentos metodológicos que utilizamos neste trabalho estão apresentados na **Figura 2** e trabalhamos todas as etapas de processamento no ambiente do software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2015). Os dados que utilizados são de fontes gratuitas de acesso aberto. No desenvolvimento deste estudo adotamos uma série temporal anual entre anos de 2008 e 2018. Com base na disponibilidade das imagens e devido à grande extensão territorial da área de estudo, utilizamos as imagens do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Resolution Imaging*), da plataforma Terra (CHOA & RAMOELC, 2019; MONDALA *et al.* 2020).

Devido à grande extensão territorial da área de estudo, utilizamos as imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Resolution Imaging* - MODIS, da plataforma Terra. Adquirimos as imagens MODIS a partir do *Earth Engine Data Catalog*. Utilizamos as variáveis Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), Temperatura de Superfície do Solo (LST) e Umidade Superficial do Solo (US). Obtivemos o NDVI através do produto MOD13A2, com resolução temporal de 16 dias e espacial de 1000 m. Para a LST, adquirimos a temperatura diurna, em graus Celsius, através do produto MOD11A2, com resolução temporal de 8 dias e espacial de 1000 m. Por fim, adquirimos a US do conjunto dados TerraClimate (ABATZOGLOU *et al.*, 2018), com resolução temporal mensal e espacial de 4000 m (Figura 2A).

Para o NDVI e a LST usamos duas datas: 09 de junho para os anos de 2008 e de 2016 e 10 de junho para os demais anos, para termos imagens de qualidade e certa uniformidade no período de amostragem. Para a US utilizamos apenas uma data para todos os anos: 01 de junho. Consideramos a disponibilidade das imagens e a ausência de falhas ou fendas como critérios para a escolha desses períodos.

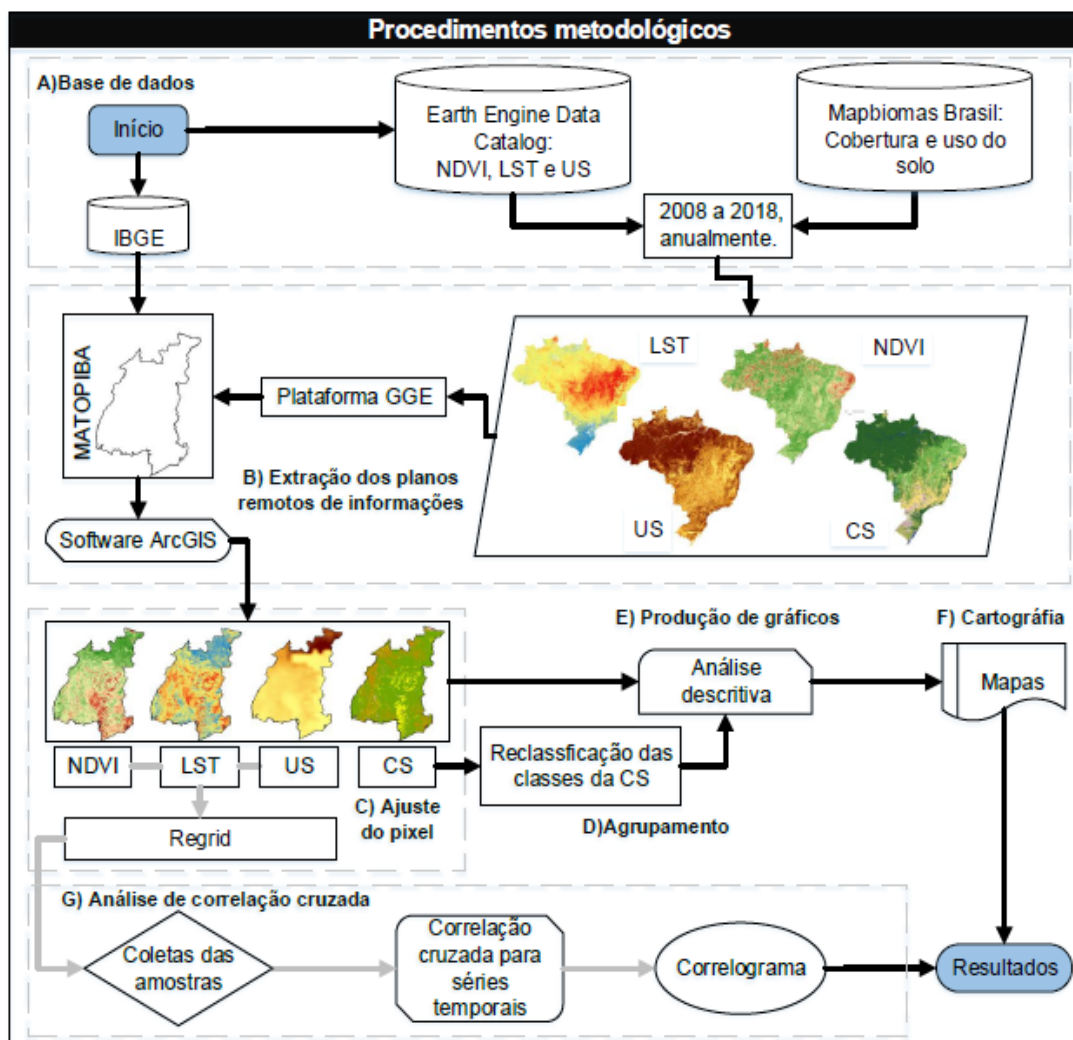


Figura 2: Fluxograma do método adotado neste estudo na fronteira agrícola MATOPIBA. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

Aplicamos o *shapefile* do MATOPIBA como critério de delimitação de área (Figura 2B) no download dos produtos. Alteramos o sistema de coordenadas das imagens para SIRGAS 2000 UTM. Por fim, redimensionamos as imagens de todos os produtos para 1000 m de resolução espacial (Figura 2C).

2.3. Cobertura do solo

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MAPBIOMAS), coleção 4.1 (Figura 2A), com 30 m de resolução espacial (MAPBIOMAS, 2020) foi o dado utilizado para representar a cobertura do solo. O mapeamento do MAPBIOMAS identifica várias feições de uso do solo. Como essa especificidade não era de grande interesse para a nossa metodologia, agrupamos as classes com fisionomias semelhantes para otimizar nossa análise (Figura 2D e Tabela 1).

Tabela 1. Reclassificação da cobertura do solo.

Classes originais MAPBIOMAS	Nova classificação
Formação Florestal, Formação Savânica, Mangue, Floresta plantada, Área úmida Natural Não Florestal, Formação Campestre, Apicum e Outra Form. Natural Não Florestal	Floresta / Formação Natural Não Florestal
Pastagem, Mosaico de Agricultura e Pastagem	Pastagem
Cultura Semi-Perene, Cultura Anual e Perene	Agricultura
Mineração, Infraestrutura Urbana, Aquicultura, Praia e Duna	Outras

Fonte: Os autores, 2022.

Após a reclassificação das classes de cobertura do solo, realizamos uma análise descritiva (Figura 2E), gerando gráficos para cada estado e para o MATOPIBA. Posteriormente, confeccionamos mapas com os planos remotos de informações e cobertura do solo para os anos de 2008 e 2018 (Figura 2F).

2.4. Análise dos dados e mapas

Criamos uma malha amostral aleatória com 1500 pontos para a coleta das variáveis NDVI, LST e US, ano a ano (Figura 2G). Posteriormente, exportamos e organizamos os dados para a análise estatística. A malha amostral utilizada foi definida considerando obtenção de uma visão geral representativa das condições das variáveis estudadas, neste caso valor estabelecido em virtude da área de estudo ou unidade de análise muito grande e recursos e infraestrutura computacional limitadas.

Aplicamos um teste de correlação cruzada (coeficiente de Pearson) ao nível de 95% de significância estatística (Figura 2G), considerando as médias anuais das variáveis, para verificarmos a associação ao longo do tempo entre as variáveis. Utilizamos o *software* R (R Core Development Team, 2020) nesta etapa. Na investigação da interferência do tempo entre as variáveis, verificamos, através da correlação cruzada, se o NDVI afeta a LST nos anos seguintes (adiantamento do tempo/lag +ano) e se a LST influencia o NDVI nos anos anteriores (defasagem do tempo/lag -ano) para 7 anos. Executamos da mesma forma para as demais combinações: NDVI vs US e LST vs US. O resultado foi um correlograma com nível de correlação que varia de -1 a 1. Utilizamos a proposta de Santos & Toledo Filho (2014) para classificarmos a correlação (**Tabela 2**).

Tabela 2. Coeficiente de correlação adaptado de Santos e Toledo Filho (2014).

Cross-correlation (+ ou -)	Descrição
0,00	Nula
0,10–0,19	Muita fraca
0,20–0,39	Fraca
0,40–0,69	Moderada
0,70–0,89	Forte
0,90–1,00	Muito forte
1,00	Perfeita

Fonte: Os autores, 2022.

3. Resultados

As proporções das áreas naturais, pastagens, agricultura e outros usos do solo mudaram entre 2008 e 2018. Constatamos a predominância da classe Floresta/Formação Natural Não Florestal em toda a extensão do MATOPIBA. A classe Agricultura aumentou entre 2008 e 2018, principalmente nas mesorregiões Extremo Oeste Baiano, Sudoeste Piauiense e no Sul Maranhense. A classe Pastagem teve predominância espaço-temporal nas mesorregiões Ocidental do Tocantins, Vale São-Franciscano da Bahia e Oeste Maranhense (**Figura 3**).

Verificamos redução gradual da classe de Floresta/Formação Natural Não Florestal em todos os estados em cerca de: 1.217.745 ha (5.1%) no Maranhão, 1.075.424 ha (3.9%) no Tocantins, 775.358 ha (5.9%) na Bahia e 624.150 ha (7.6%) no Piauí (Figura 4). Em contrapartida, as classes Pastagem e Agricultura cresceram ao longo dos anos, sendo, respectivamente: 3.4% e 1.8% no Maranhão, 1.6% e 2.2% no Tocantins, 1.8% e 4.8% na Bahia e 0.5% e 7.2% no Piauí (**Figura 4**).

A partir de 2010, a classe Agricultura ultrapassou a Pastagem na Bahia e manteve-se crescente até o último ano de avaliação, com 4,8% de aumento total (**Figura 4-A**). No Piauí, o destaque vai para a Agricultura, que cresceu 7,2% em 10 anos (**Figura 4-B**). No Maranhão e no Tocantins (**Figura 4 C e D**) a classe de Pastagem superou as de Agricultura.

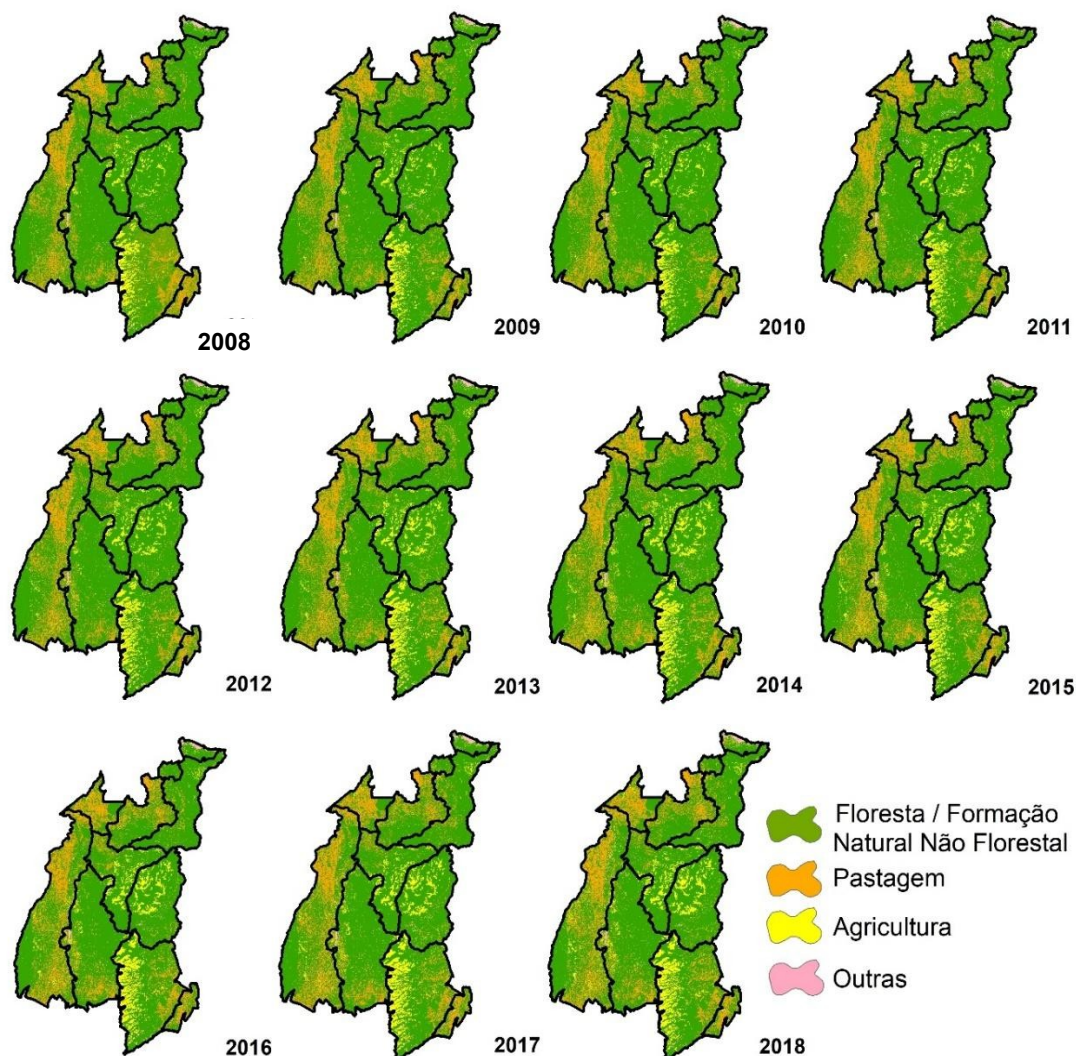


Figura 3. Mapas de uso do solo da fronteira agrícola MATOPIBA entre 2008 e 2018. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

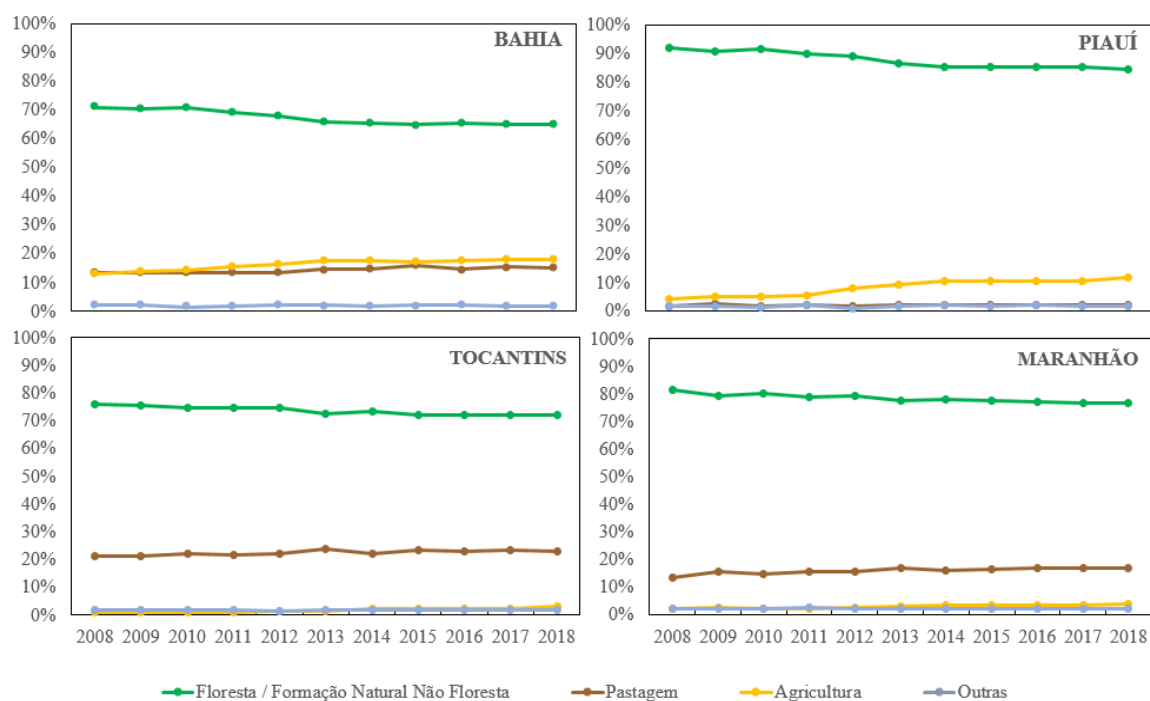


Figura 4 – Porcentagem das classes de uso do solo nos estados do MATOPIBA, entre 2008 e 2018 para (A) Bahia; (B) Piauí; (C) Tocantins e; (D) Maranhão. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

Verificamos um decréscimo das áreas de Cerrado em todo o MATOPIBA de aproximadamente 5,1% (~3.692.677 ha). Também, as classes de Pastagem e Agricultura apresentaram crescimento de 2,1% (1.538.358 ha) e 3,1% (2.254.264 ha) (**Figura 5**).

Depois da vegetação natural, as áreas de pastagens têm a maior representatividade no MATOPIBA. Na sequência, as zonas com atividades agrícolas, cuja área passou de ~2.939.061 ha em 2008 para ~5.193.325 ha em 2018, representando proporcionalmente a maior taxa de expansão em áreas (**Figura 5**). A classe Outras manteve variação de apenas 0,1%.

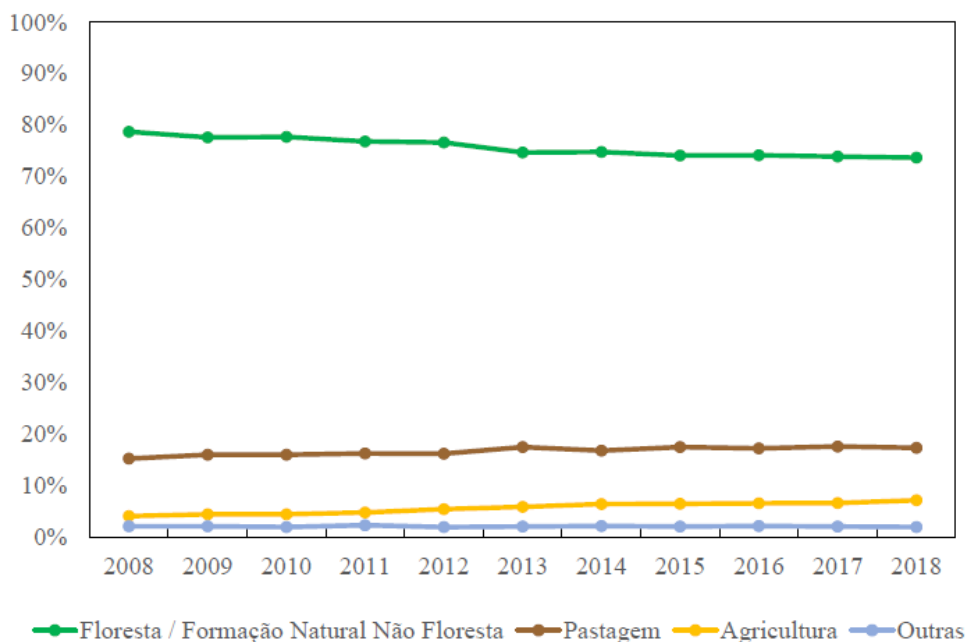


Figura 5: Variação temporal do percentual de cada classe de uso do solo entre 2008 e 2018 para o MATOPIBA. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

O NDVI para o MATOPIBA evidenciou a presença de vegetação densa ou vigorosa ao longo dos anos, com pouca variação, com valor máximo indo de 9152 no ano de 2008 para 9121 em 2018. Ainda, o NDVI sugere a presença de extensas áreas antropizadas com pouca vegetação nas mesorregiões do Oriental do Tocantins, Sudoeste Piauiense, Extremo Oeste Baiano e Vale São-Franciscano da Bahia (**Figura 6 - NDVI**).

Observamos alterações na amplitude das variáveis ambientais e climáticas. O limite inferior da LST aumentou, indo de 10,5°C em 2008 para 22,6°C em 2018. As maiores taxas de LST são observadas para o Sudoeste Piauiense, Ocidental e Oriental do Tocantins, Extremo Oeste Baiano e Vale São-Franciscano da Bahia (**Figura 6 - LST**). Adicionalmente, o limite inferior da US diminuiu, passando de 177 mm em 2008 para 60 mm em 2018 (**Figura 6 - US**). As mesorregiões Oeste, Leste, Centro e Norte Maranhense apresentaram maior US (**Figura - US**).

Ao calcularmos as autocorrelações para as variáveis, obtivemos um correlograma cruzado para as séries temporais anuais (2008 a 2018) (**Figura 7**). Verificamos associação estatisticamente significativa ($p < 0.05$) entre os três pares de variáveis (NDVI, LST e US) no tempo zero, comparando os pares do mesmo ano. Isso significa que a alteração de uma variável afetou a outra, como a redução do NDVI que proporcionou o aumento da LST. Contudo, não observamos influência do tempo sobre as correlações, por não afetarem a variável resposta anos antes (-lag) e depois (lag). Os pares 'NDVI vs LST', 'LST vs US' apresentaram correlação negativa de grau forte (-0,71 e -0,78). O par NDVI e US apresentou correlação positiva de grau muito forte (0,9).

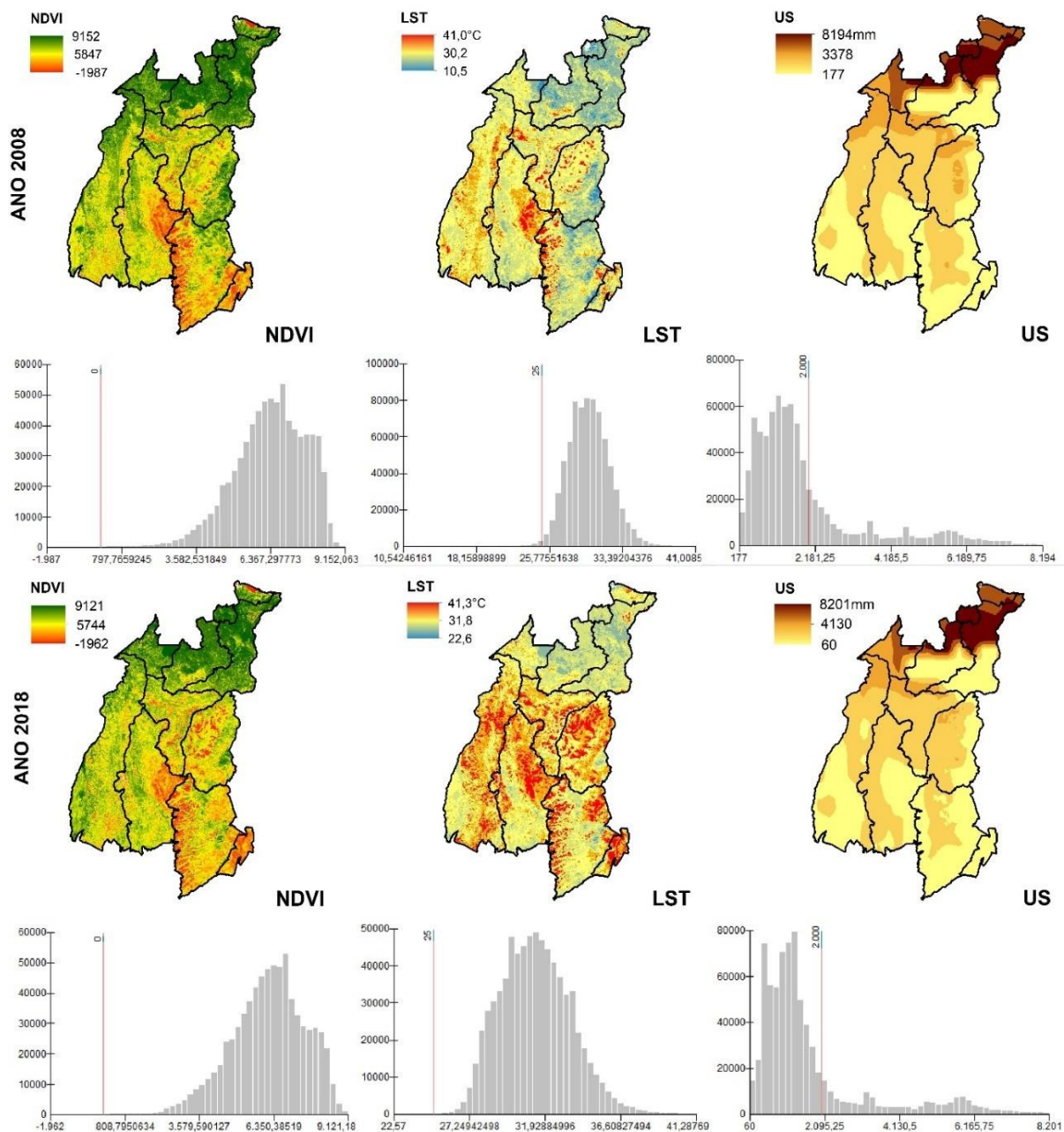


Figura 6 – Mapas das variáveis ambientais e climáticas na fronteira agrícola MATOPIBA em 2008 e 2018. Os histogramas mostram a frequência das variáveis; o eixo y representa o número de pixel e o x simula o valor da variável. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

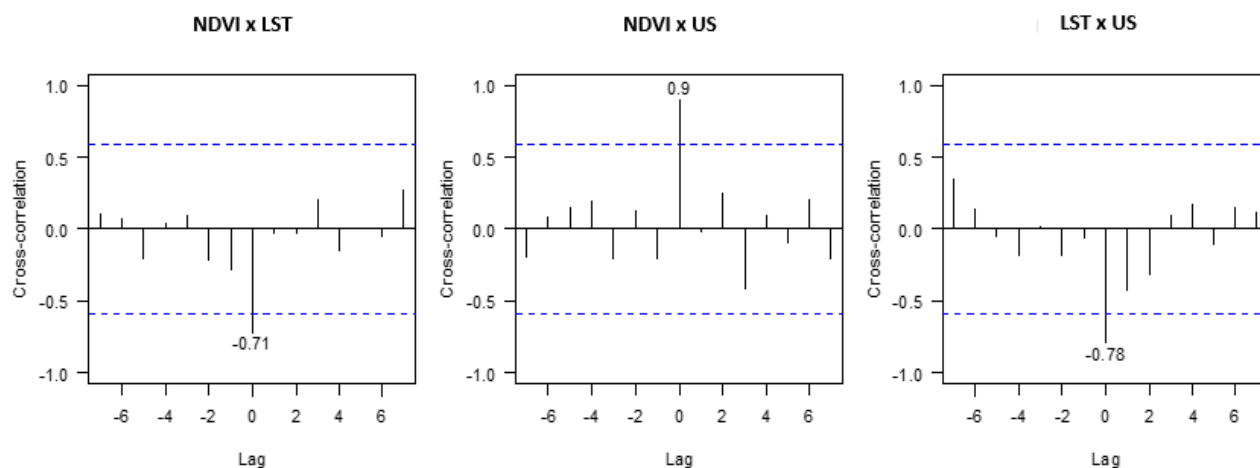


Figura 7 – Correlograma para séries temporais (2008 - 2018) de NDVI, LST e US. Lags positivos (eixo x) indicam adiantamento da primeira série e negativos atraso da última série. As linhas tracejadas representam os limites do intervalo de 95% de confiança para a correlação. **Fonte:** Elaboração dos autores, 2022.

4. Discussão

Neste estudo observamos diminuição das áreas de Cerrado e aumento das áreas agrícolas e de pastagens em todo o Matopiba, principalmente nos estados da Bahia e do Piauí. Constatamos, então, que a conversão de terras naturais em usos agropecuários é uma realidade na região. Pinto Vieira et al., (2021), destacam que a expansão das atividades agrícolas no Brasil resultou na perda de aproximadamente 50% da vegetação nativa do bioma Cerrado, principalmente ao norte do bioma, na região conhecida como Matopiba. Além de contribuir para acelerar as mudanças climáticas, a remoção da vegetação nativa está associada ao aumento da degradação do solo.

O aumento das áreas destinadas à agropecuária no Matopiba é corroborado pelos números de produção. Entre 1990 e 2015, a produção de soja na região aumentou 4028% (Araújo *et al.* 2019). No estado da Bahia, que apresentou grande destaque na expansão da agricultura, a produção de soja mais que dobrou apenas entre 2013 e 2018. Em relação à pastagem, o Maranhão e o Tocantins contabilizaram 5.292.174 e 8.140.548 cabeças de gado em 2013, passando para 5.497.791 e 8.352.513 em 2018, respectivamente. O Piauí e a Bahia somaram um total de 2.228.167 cabeças em 2018 (IBGE, 2020; EMBRAPA TERRITORIAL, 2020).

A predominância das atividades agrícolas em municípios do Extremo Oeste Baiano, Sul Maranhense e Sudoeste Piauiense pode ser explicada pelos primeiros investimentos na região no final do século XX (GARCIA; FILHO, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2019). Desde então a vegetação natural do MATOPIBA foi intensamente explorada para fins agropecuários. As áreas com atividade pecuária estão mais concentradas nos estados do Maranhão e Tocantins. Esse padrão está associado à dinâmica inicial de ocupação cuja principal prática era o sistema pecuário extensivo, prevalecendo a criação extensiva em pastagens naturais (BUAINAIN *et al.*, 2017).

O crescimento da agropecuária no Matopiba foi potencializado através de investimentos em infraestrutura e tecnologia dos setores privado e público. Por exemplo, pesquisas da Embrapa, armazéns de grãos e frigoríficos, obras das ferrovias Transnordestina e Figueirópolis, infraestrutura aeroportuária, integração da BR-135 e 242, portos de Juazeiro e Aratu na Bahia (CRUZ *et al.*, 2019; BUAINAIN *et al.*, 2017). Também, o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba, criado em 2015 para promover políticas públicas direcionadas ao desenvolvimento econômico sustentável frente a agricultura e pecuária (BRASIL, 2015). Ainda, em 2016 o Governo Federal destinou ao plano agrícola pecuário R\$ 202 bilhões para financiamento (MAPA, 2016).

O NDVI está relacionado às mudanças na cobertura do solo no Matopiba, especificamente com a redução da classe de Floresta/Formação Não Florestal, verificada no mapeamento do uso da terra. Esta relação visual ocorre por se tratar do período seco na região, facilitando a distinção da Floresta/Formação Não Florestal. Contudo, o NDVI dos dados MODIS tem maior capacidade de discriminação nas classes de cobertura do solo em comparação aos outros índices de vegetação (HECK *et al.*, 2019; SILVA JUNIOR *et al.*, 2019).

O aumento da temperatura do solo pode acelerar a decomposição e a mineralização da matéria orgânica, o que afeta a retenção de carbono (TAKOUTSING *et al.*, 2016). A matéria orgânica proporciona vantagens físicas e químicas no solo, o que pode influenciar a produtividade na agricultura e pecuária. Nesse sentido, a intensificação das práticas de manejo, como formação de palhadas e plantio direto, rotação de culturas e sistemas integrados devem ser incentivadas em áreas de fronteiras agrícolas.

A umidade do solo é afetada principalmente pela precipitação, densidade da vegetação e evapotranspiração (FENG *et al.*, 2017; YE *et al.*, 2019). A ausência de cobertura do solo nas áreas produtivas intensifica a taxa de evaporação (SAHAAR; NIEMANN *et al.*, 2020), o que reduz o armazenamento hídrico no solo. A combinação da variabilidade das chuvas alto potencial evaporativo, mudanças na cobertura do solo, aumento da temperatura e baixa umidade do solo podem potencializar o índice de risco de seca (BENTO *et al.*, 2020; HU *et al.*, 2020; SILVA JUNIOR *et al.*, 2019; ZERI *et al.*, 2018), condições essas que ocorrem na fronteira agrícola no Cerrado.

Constatamos forte correlação entre os pares de variáveis ambientais e climáticas, porém sem influência estatisticamente significativa do tempo. Ou seja, não encontrou o tempo em que a redução do NDVI afeta a alteração das outras variáveis, provavelmente, por trabalharmos com intervalo anual. Talvez, por estações do ano, observar se o momento da resposta ou outro comportamento entre as relações das variáveis devido às mudanças na cobertura do solo (CHI *et al.*, 2020).

A correlação negativa entre NDVI e LST, e LST e US, aponta que a redução do índice de vegetação favorece o aumento da temperatura do solo e, conseqüentemente, reduz a umidade do solo, com ênfase nas zonas agrícolas e pecuárias. O NDVI alto propicia a proteção da umidade do solo, tendo uma correlação positiva, destacando as áreas de vegetação densa. Constatamos forte relação entre as variáveis analisadas e

ressaltamos que isso, somado com às mudanças na paisagem sem planejamento podem intensificar a degradação ambiental no Matopiba.

Entre 2008 e 2018 houve ações impactantes ambientalmente, explicitadas pelas alterações das variáveis ambientais e climáticas na região do Matopiba atrelados ao avanço da fronteira agropecuária. Diante desse cenário e pensando em buscar um equilíbrio entre a produção e a preservação/conservação do Cerrado para o futuro, torna-se necessário a intensificação em pesquisas para otimizar o uso do solo, a produção em sistemas integrados, o fortalecimento e a melhoria dos sistemas de monitoramento do uso e cobertura do solo, e a criação e manutenção de unidades de conservação.

5. Conclusão

Entre os anos analisados, o Cerrado do Matopiba foi substituído em sua maioria por pastos e plantios agrícolas, com claras perspectivas de contínua modificação, corroborando nossa hipótese de partida, de que uma grande parcela da perda de vegetação nativa ocorrido no Cerrado da referida região de estudo é explicada pela atividade agropecuária.

O estado da Bahia lidera a produção agrícola e as taxas de conversão do Cerrado, seguido pelo Piauí. O Maranhão e o Tocantins têm as maiores áreas de pastagem, mas também estão expandindo suas áreas agrícolas. Existe correlação entre as variáveis ambientais e climáticas analisadas na fronteira agrícola Matopiba, tendo um decréscimo na umidade do solo em função da redução do índice de vegetação e da umidade do solo. Além disso, a redução do índice de vegetação propicia o aumento da temperatura do solo e, conseqüentemente, reduz a umidade do solo.

É importante notar que, atualmente a base de dados MapBiomas possui a coleção mais recente. Desde a coleção 5.0, lançada em agosto de 2020, a classe "Floresta Plantada/Silvicultura" é considerada uma subclasse da classe "Agropecuária". A nova coleção (7.1) aponta que de 2008 a 2018 houve um incremento aproximado de 134 mil ha da classe "Floresta Plantada/Silvicultura", ou cerca de 0,2% do território do Matopiba. Com essa mudança estrutural na base oficial de dados utilizadas, reforçamos aqui que há necessidade de estudos futuros para melhor entendimento na interpretação da dinâmica espaço-temporal da região.

Notas

Parte deste artigo faz parte da dissertação de mestrado do primeiro autor.

Referências

ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S.Z.; PARKS, S.A.; HEGEWISCH, K.C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data** 5: 1-12. 2018.

ALVARES, C.A.; STAPE, L.J.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.D.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22: 711-728. 2013.

ARAÚJO, M.L.S.; SANO, E.E.; BOLFE, É.L.; SANTOS, J.R.N.; DOS SANTOS, J.S.; SILVA, F.B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990-2015). **Land Use Policy** 80: 57-67. 2019.

BENTO, V. A.; GOUVEIA, C.M.; DACAMARA, C.C.; LIBONATI, R.; TRIGO, I. F. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. **Global and Planetary Change** 190: 1-11. 2020.

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** 58: 116-127, 2015.

BRASIL. Decreto no 8.447, de 6 de maio de 2015. Dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba e a criação de seu comitê gestor. **Diário Oficial**, Brasília, n. 85, p. 2 em 7 maio 2015. Seção 1. Disponível em: <<https://goo.gl/dw49K6>>. Acesso: 3 abr. 2018.

BROGNA, D.; DUFRÊNE, M.; MICHEZ, A.; LATLI, A.; JACOBS, S.; VINCKE, C.; DENDONCKER N. Forest cover correlates with good biological water quality. Insights from a regional study (Wallonia, Belgium). **Journal of Environmental Management** 211: 9-21. 2018.

BUAINAIN, A.M.; GARCIA, J.R.; FILHO, J.E.R.V. **Dinâmica da economia e da agropecuária no MATOPIBA**. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2283zzzzkkkk.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2020. 2017.

CHI, Y.; SUN, J.; SUN, Y.; LIU, S.; FU, Z. Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China. **Global Ecology and Conservation**, e01092, 2020.

CRUZ, L.N.; HERREROS, M.M.A.G.; VILARINHO, C.C.; DEMETRIO NETO, E.M.; MARTINS, G.C. Desenvolvimento socioeconômico na região de Matopiba, Brasil. **Brazilian Journal of Development** 5: 12538-12556. 2019.

REIS, L.C.; SILVA, C.M.S.; BEZERRA, B.G.; MUTTI, P.R.; SPYRIDES, M.H.C.; SILVA, P.E. Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics** 177: 4457-4478. 2020.

EMBRAPA TERRITORIAL. **GeoMatopiba: Inteligência Territorial Estratégica para o Matopiba**. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/geomatopiba/sistemas>>. Acesso em: 4 fev. 2020.

FATHIZAD, H.; TAZEH, M.; KALANTARI, S.; SHOJAEI, S. The investigation of spatiotemporal variations of land surface temperature based on land use changes using NDVI in southwest of Iran. **Journal of African Earth Sciences** 134: 249-256. 2017.

FENG, X.; LI, J.; CHENG, W.; FU, B.; WANG, Y.; LÜ, Y. Evaluation of AMSR-E retrieval by detecting soil moisture decrease following massive dryland re-vegetation in the Loess Plateau, China. **Remote Sensing of Environment** 196: 253-264. 2017.

GARCIA, J.R.; FILHO, J.E.R.V. O papel da dimensão ambiental na ocupação do MATOPIBA. **Franco-Brasileira de Geografia** 35: 1-25. 2018.

HECK, E.; DE BEURS, K.M.; OWSLEY, B.C.; HENEUBRY, G.M. Evaluation of the MODIS collections 5 and 6 for change analysis of vegetation and land surface temperature dynamics in North and South America. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 156: 121-134. 2019.

HU, T.; RENZULLO, L.J.; VAN DIJK, A.I.J.M.; HE, J.; TIAN, S.; XU, Z.; ZHOU, J.; LIU, T.; LIU, Q. Monitoring agricultural drought in Australia using MTSAT-2 land surface temperature retrievals. **Remote Sensing of Environment** 236: 1-13. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2020. **Levantamento Sistemático Produção Agrícola 2013 e 2018**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acesso em: 04 fev. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2019. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101676>>. Acesso em: 21 out. 2020.

ISLAM, M.; DEB, G.P.; RAHMAN, M. Forest fragmentation reduced carbon storage in a moist tropical forest in Bangladesh: Implications for policy development. **Land Use Policy** 65: 15-25. 2017.

KASTENS, J.H.; BROWN, J.C.; COUTINHO, A.C.; BISHOP, C.R.; ESQUERDO, J.C.D.M. Soy moratorium impacts on soybean and deforestation dynamics in Mato Grosso, Brazil. **PLoS ONE** 12: 1-21. 2017.

- KOBAYASHI, T.; SOTA, T. Contrasting effects of habitat discontinuity on three closely related fungivorous beetle species with diverging host-use patterns and dispersal ability. **Ecology and Evolution** 9: 2475-2486. 2019.
- LAM, N.S.N.; CHENG, W.; ZOU, L.; CAI, H. Effects of landscape fragmentation on land loss. **Remote Sensing of Environment**, 209: 253-262. 2018.
- LAPOLA, D.M.; MARTINELLI, L.A.; PERES, C.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERREIRA, M.E.; NOBRE, C.A.; AGUIAR, A.P.D.; BUSTAMANTE, M.M.C.; CARDOSO, M.F.; COSTA, M.H.; JOLY, C.A.; LEITE, C.C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Publishing Group** 4: 27-35. 2014.
- LATRUBESSE, E.M.; ARIMA, E.; FERREIRA, M.E.; NOGUEIRA, S.H.; WITTMANN, F.; DIAS, M.S.; DAGOSTA, F.C.P.; BAYER, M. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. **Conservation Science and Practice** 1: 1-8. 2019.
- MAPBIOMAS. 2020. **Collection 4.1 of annual series of land cover and land use in Brazil, 1985-2018**. Disponível em: <<https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>>. Acesso em: 20 set. 2018.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Mapeamento do uso e cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado 2013**. 2015. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/cerrado/projeto-terraclass.html>>. Acesso em: 11 maio 2019.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano agrícola e pecuário, 2016/2017**. 2016. Brasília, DF: Disponível em: <<http://antigo.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/plano-agricola-e-pecuario/plano-agricola-e-pecuario-antigo>>. Acesso em: 10 maio 2020.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2019. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2018/19 a 2028/29, Projeções de Longo Prazo. Brasília: MAPA/ACE, 2019**. 126 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2018-2019-2028-2029/view>>. Acesso em: 10 maio 2020.
- MATRICARDI, E.A.T.; MENDES, T.J.; PEREIRA, E.M.; VASCONCELOS, P.G.D.A.; ÂNGELO, H.; COSTA, O.B. Dinâmica no uso e cobertura da terra na região do MATOPIBA entre 2000 e 2016. **Nativa** 7: 547-555. 2019.
- MELLO, K.; VALENTE, R.A.; RANDHIR, T.O.; VETTORAZZI, C.A. Impacts of tropical forest cover on water quality in agricultural watersheds in southeastern Brazil. **Ecological Indicators** 93: 1293-1301. 2018.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; DA FONSECA, G.A.B.; KENT, J. Biodiversity Hotspots for conservation priorities. **Nature** 403: 853-858. 2000.
- NEGA, W.; HAILU, B.T.; FETENE, A. An assessment of the vegetation cover change impact on rainfall and land surface temperature using remote sensing in a subtropical climate, Ethiopia. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 16: 1-11. 2019.
- PINTO VIEIRA, R. M. S.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; POLIZEL, S. P.; OMETTO, J. P. H. B.; SANTOS, F. C.; FERREIRA, Y. C.; TOLEDO, P. M. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of the Total Environment**, 782, p.1-12, 2021.
- ROLO, V.; OLIVIER, P.I.; PFEIFER, M.; VAN AARDE, R.J. Functional diversity mediates contrasting direct and indirect effects of fragmentation on below- and above-ground carbon stocks of coastal dune forests. **Forest Ecology and Management** 407: 174-183. 2018.
- SAEKI, I.; HIRAO, A.S.; KENTA, T.; NAGAMITSU, T.; HIURA, T. Landscape genetics of a threatened maple, *Acer miyabei*: Implications for restoring riparian forest connectivity. **Biological Conservation** 220: 299-307. 2018.

- 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** 133: 253-261. 2017.
- SANO, E.E.; RODRIGUES, A.A.; MARTINS, E.S.; BETTIOL, G.M.; BUSTAMANTE, M.M.C.; BEZERRA, A.S.; COUTO, A.F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E.L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management** 232: 818-828. 2019.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F.; **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5nd ed., Brasília: Embrapa, 590 p. Ebook. 2018.
- SAHAAR, S.A.; NIEMANN, J.D. Impact of regional characteristics on the estimation of root-zone soil moisture from the evaporative index or evaporative fraction. **Agricultural Water Management** 238: 1-17. 2020.
- SILVA JUNIOR, C.A.; COSTA, G.M.; ROSSI, F.S.; VALE, J.C.E.; LIMA, R.B.; LIMA, M.; OLIVEIRA-JUNIOR, J.F.; TEODORO, P.E.; SANTOS, R.C. Remote sensing for updating the boundaries between the brazilian Cerrado-Amazonia biomes. **Environmental Science and Policy** 101: 383-392. 2019.
- SPERA, S.A.; GALFORD, G.L.; COE, M.T.; MACEDO, M.N.; MUSTARD, J.F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology** 22: 3405-3413. 2016.
- STRASSBURG, B.B.N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A.E.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B.; DE SCARAMUZZA, C.A.M.; SCARANO, F.R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado *hotspot*. **Nature Ecology and Evolution** 1: 1-3. 2017.
- TAKOUTSING, B.; WEBER, J.; AYNEKULU, E.; ANTONIO, J.; MARTÍN, R.; SHEPHERD, K.; SILA, A.; TCHOUNDJEU, Z.; DIBY, L. Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon. **Geoderma** 276: 64-73. 2016.
- YE, L.; FANG, L.; SHI, Z.; DENG, L.; TAN, W. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by 'Grain for Green' program on the Loess Plateau, China. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 269: 204-214. 2019.
- ZALLES, V.; HANSEN, M.C.; POTAPOV, P.V.; STEHMAN, S.V.; TYUKAVINA, A.; PICKENS, A.; SONG, X.P.; ADUSEI, B.; OKPA, C.; AGUILAR, R.; JOHN, N.; CHAVEZ, S. Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 116: 428-435. 2019.
- ZERI, M.; CUNHA-ZERI, G.; GOIS, G.; LYRA, G.B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Exposure assessment of rainfall to interannual variability using the wavelet transform. **International Journal of Climatology** 39: 568-578. 2018.
- ZHOU, X.; WANG, Y. C. Dynamics of Land Surface Temperature in Response to Land-Use/Cover Change. **Geographical Research** 49: 23-36. 2011.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição- NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).