

**EXPANSÃO ESPACIAL DA SOJA IRRIGADA NO MATOPIBA, BRASIL: 2006 E 2019****SPATIAL EXPANSION OF IRRIGATED SOYBEAN IN MATOPIBA, BRAZIL: 2006 AND 2019****EXPANSIÓN ESPACIAL DE LA SOJA IRRIGADA EN MATOPIBA, BRASIL: 2006 Y 2019**Angel dos Santos Fachinelli Ferrarini¹João Pedro Ferreira Nogueira²**RESUMO**

O Matopiba consolidou-se como principal fronteira agrícola brasileira, mas são escassos os estudos sobre o papel da irrigação na dinâmica espacial da soja. A literatura de economia regional destaca que processos de concentração e difusão produtiva são centrais para compreender essa dinâmica. Diante dessa lacuna, perguntou-se: (i) em que medida a irrigação influenciou a concentração ou dispersão da soja? (ii) como esses padrões evoluíram entre 2006 e 2019? O objetivo é analisar os padrões espaciais da soja irrigada no Matopiba nesses anos. O Índice de Moran Global e Local com agrupamento hierárquico de Ward foram utilizados na análise. Os resultados mostram autocorrelação espacial positiva em ambos os anos, porém menos intensa em 2019, sugerindo início de desconcentração. Persistem clusters alto-alto em Luís Eduardo Magalhães, Correntina e Barreiras, enquanto Riachão das Neves ganha destaque. Conclui-se que, apesar da permanência de núcleos tradicionais, observa-se difusão da irrigação, revelando mudanças estruturais regionais.

Palavras-chave: Matopiba; agricultura irrigada; soja irrigada; autocorrelação espacial.

ABSTRACT

Matopiba has consolidated as Brazil's main agricultural frontier, but studies on the role of irrigation in the spatial dynamics of soybeans are scarce. The regional economics literature highlights that processes of productive concentration and diffusion are central to understanding this dynamics. Given this gap, two questions were asked: (i) to what extent did irrigation influence the concentration or dispersion of soybeans? (ii) how did these patterns evolve between 2006 and 2019? The objective is to analyze the spatial patterns of irrigated soybeans in Matopiba during those years. The Global and Local Moran Index with Ward's hierarchical clustering were used in the analysis. Results show positive spatial autocorrelation in both years,

¹Doutora em Economia Aplicada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Professora Adjunta II do departamento de Economia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Sorocaba. São Paulo. Brasil. E-mail: angel.ferrarini@ufscar.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6736-0364>.

²Graduado em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestrando em Economia Aplicada na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP). Piracicaba. São Paulo. Brasil. E-mail: joaopedrofnogueira@usp.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2122-6082>.

though less intense in 2019, suggesting the beginning of deconcentration. High-high clusters persist in Luís Eduardo Magalhães, Correntina, and Barreiras, while Riachão das Neves gains prominence. It is concluded that, despite the persistence of traditional nuclei, irrigation diffusion is observed, revealing regional structural changes.

Keywords: Matopiba region; irrigated agriculture; irrigated soybean; spatial autocorrelation.

RESUMEN

El Matopiba se consolidó como la principal frontera agrícola brasileña, pero son escasos los estudios sobre el papel del riego en la dinámica espacial de la soja. La literatura de economía regional destaca que los procesos de concentración y difusión productiva son centrales para comprender esta dinámica. Ante esta laguna, se preguntó: (i) ¿en qué medida el riego influyó en la concentración o dispersión de la soja? (ii) ¿cómo evolucionaron estos patrones entre 2006 y 2019? El objetivo es analizar los patrones espaciales de la soja regada en el Matopiba en esos años. Se utilizaron el Índice de Moran Global y Local con el agrupamiento jerárquico de Ward. Los resultados muestran autocorrelación espacial positiva en ambos años, aunque menos intensa en 2019, sugiriendo un inicio de desconcentración. Persisten clústeres alto-alto en Luís Eduardo Magalhães, Correntina y Barreiras, mientras que Riachão das Neves gana protagonismo. Se concluye que, a pesar de la permanencia de núcleos tradicionales, se observa difusión del riego, revelando cambios estructurales regionales.

Palavras chave: Região Matopiba; agricultura irrigada; soja irrigada; autocorrelação especial.

Como citar este artigo: FERRARINI, Angel dos Santos Fachinelli; NOGUEIRA, João Pedro Ferreira. Expansão espacial da soja irrigada no Matopiba, Brasil: 2006 e 2019.

DRd – Desenvolvimento Regional em debate, v. 16, p. 84-108, 01 jun. 2026. Doi:

<https://doi.org/10.24302/drd.v16.6154>.

Artigo recebido em: 25/11/2025

Artigo aprovado em: 29/05/2026

Artigo publicado em: 01/06/2026

1 INTRODUÇÃO

A literatura de economia agrícola destaca a expansão das fronteiras produtivas e a difusão tecnológica como fatores centrais para explicar transformações estruturais e mudanças na distribuição espacial da produção (Johnston; Mellor, 1961; Ellis, 1993). Entretanto, estas expansões podem gerar e/ou reforçar desigualdades produtivas regionais em função da concentração de mão-de-obra, escolaridade, inovação e outros fatores estruturais (Amorim; Bacha, 2022).

A partir da década de 1980, houve uma profunda mudança no sistema de produção agrícola com a substituição, em larga escala, do padrão de agricultura de reduzida intensidade e baixa produtividade por uma agricultura mais mecanizada (Buainain; Garcia; Vieira, 2018). Estes avanços proporcionaram a adaptação de novos cultivares em regiões até então

consideradas impróprias para o cultivo, como era o caso do Centro-Oeste e do cerrado nordestino (Vieira Filho; Gasques, 2016).

Mais recentemente, o Matopiba³, fronteira agrícola formada por 337 municípios nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, consolidou-se como uma das regiões mais dinâmicas para expansão e intensificação da produção agropecuária, impulsionada por avanços tecnológicos (Esquerdo et al. 2015), embora marcada pela heterogeneidade e dualismos estruturais regionais (Ribeiro et al., 2020), a expansão da sojicultura na região não reduziu de forma expressiva as desigualdades municipais e intermunicipais (Santos, 2020). Em 2019, o Matopiba atingiu R\$ 8,5 milhões em Valor Adicionado Bruto (VAB) da Agropecuária e produtividade média de 524 kg/ha de soja (IBGE, 2025). A região com predominância da cultura da soja ocupou 2,6 milhões de hectares (cerca de 56% da área plantada na safra 2019/2020) seguida por milho (27%), algodão herbáceo, arroz e feijão (IBGE, 2022).

Frente a essa relevância econômica, estudos anteriores como Maranhão et al. (2019), Araújo et al. (2019), Santos (2020), Oliveira, Dörner e Schneider (2020), Batista et al. (2023), Silva, Souza e Oliveira (2024) e Araújo et al. (2024) se dedicaram a jogar luz sobre a dinâmica espacial da sojicultura no Matopiba. Entretanto, em nenhuma dessas iniciativas, o papel da irrigação foi levado em conta de forma pormenorizada, o que constitui uma lacuna científica.

Levando em conta que segundo o Atlas da Irrigação, os estados do Matopiba apresentam potencial adicional para expandir a irrigação em 428.694 hectares, o que poderia elevar em até 55% a área irrigada registrada em 2019 (ANA, 2021), torna-se relevante investigar como os padrões espaciais de produção agrícola se reorganizaram ao longo do tempo, distinguindo áreas irrigadas e de sequeiro. Nesse sentido, a análise das aglomerações agrícolas regionais, notadamente na soja, oferece uma oportunidade relevante de compreender o avanço da produção de soja, por meio da irrigação, nos anos de 2006 e 2019.

Diante disso, surge a seguinte questão: em que medida a expansão da irrigação resultou em maior concentração ou dispersão espacial da sojicultura na região, e como esses padrões evoluíram entre 2006 e 2019? O objetivo geral deste trabalho é analisar os padrões espaciais da agricultura irrigada da soja no Matopiba em 2006 e 2019, com foco na identificação de *clusters* espaciais e na avaliação de sua concentração ou desconcentração ao longo do tempo. Como objetivos específicos, busca-se: (i) analisar a evolução espacial das áreas irrigadas e de sequeiro da soja; e (ii) classificar os municípios em grupos homogêneos por meio do método de agrupamento hierárquico de Ward, avaliando a coesão dos *clusters* pela métrica de Silhouette e (iii) apresentar uma breve discussão sobre planejamento territorial para a agricultura irrigada e expansão do Matopiba.

Embora o Brasil disponha de levantamentos consolidados sobre irrigação (Ferrarini; Ferreira Filho, 2020), as informações desagregadas por cultura ainda são limitadas, o que restringe análises espaciais mais abrangentes sobre sua evolução. No caso da soja, essa lacuna é particularmente evidente, pois as bases oficiais não reportam diretamente a área irrigada por cultura no nível municipal. Assim, esse estudo além de preencher uma lacuna científica, também contribui ao avançar na integração e harmonizar diferentes fontes de dados para a soja

³ A criação oficial da região ocorreu por meio do decreto nº 8.444, de 6 de maio de 2015, que dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (Brasil, 2015) e posteriormente revogado no decreto nº 10.473, de 24 de agosto de 2020 (Brasil, 2020). E, em 2023, o decreto nº 11.767, de 1º de novembro de 2023 instituiu novamente o Matopiba e o comitê gestor (Brasil, 2023a).

irrigada em 2006 e 2019, como uma *proxy* da irrigação regional, permitindo examinar os padrões espaciais de expansão dessa cultura no Matopiba e suas implicações para o uso da água e o desenvolvimento regional.

O artigo está organizado em cinco seções: além desta introdução, a segunda seção apresenta a revisão de literatura, com destaque ao histórico do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH); a terceira seção descreve a base de dados e as metodologias aplicadas; a quarta seção discute os resultados à luz dos pressupostos do Plano Nacional de Irrigação (PNI) e do PNRH; e a quinta seção apresenta as considerações finais.

2 IRRIGAÇÃO, GOVERNANÇA HÍDRICA E EXPANSÃO AGRÍCOLA NO MATOPIBA

Considerando a importância da irrigação para a expansão produtiva, as políticas públicas brasileiras avançaram na criação de instrumentos de gestão hídrica e incentivos regionais. A Política Nacional de Irrigação (PNI⁴), reformulada em 2013, visa ampliar a área irrigada com eficiência hídrica e integrar políticas de desenvolvimento regional (Brasil, 2013). Já a Política Nacional de Recursos Hídricos (PRH, Lei 9.433/1997) e o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH, versão 2022) estabelecem, respectivamente, princípios legais e diretrizes estratégicas para a gestão sustentável das águas, incluindo enfrentamento às mudanças climáticas (Brasil, 1997; 2022). Embora esse arcabouço institucional represente um avanço normativo relevante, a literatura aponta uma desconexão recorrente entre os instrumentos legais de gestão hídrica e sua implementação territorial. Em particular, estudos indicam que a efetividade dessas políticas depende de capacidades institucionais locais, coordenação intersetorial e mecanismos de monitoramento, que são frequentemente heterogêneos entre regiões (OCDE, 2015; Musarra; Lima, 2021).

Além do arcabouço institucional citado, a literatura científica sobre dinâmica agrícola e uso da água no Matopiba evidencia uma série de transformações que contextualizam este estudo. Especificamente, os trabalhos mostram que a região se consolidou como uma nova fronteira do agronegócio brasileiro, caracterizada pela rápida conversão do Cerrado e pelo aumento da demanda hídrica para a produção de grãos. Estudos como os de Miranda et al. (2014), e Chamon et al. (2022) mostram que a expansão da soja tem sido acompanhada por intensificação do uso da água, aumento da pressão sobre aquíferos e crescente risco de estresse hídrico em bacias estratégicas. Nesse contexto, a irrigação surge como fator-chave tanto para ampliar a produtividade agrícola quanto para tencionar a disponibilidade hídrica, especialmente em regiões com marcada sazonalidade climática.

Na literatura de economia regional e geografia econômica, há amplo consenso de que a irrigação é um dos principais vetores de intensificação produtiva e reorganização do espaço agrícola. De acordo com Molle e Berkoff (2007) e Perry et al. (2009), os sistemas irrigados tendem a aumentar a produtividade total dos fatores, reduzir a variabilidade climática e favorecer a expansão de culturas de maior valor agregado, alterando a dinâmica de uso da terra. Em regiões de fronteira agrícola, como o Matopiba, a irrigação desempenha papel ainda mais

⁴ Lei nº 6.662, de 25 de junho de 1979, revogada pela lei nº 12.787 de 11 de janeiro de 2013 (Brasil, 2013)

estruturante, pois redefine a capacidade produtiva dos municípios, modifica padrões de especialização e pode incentivar processos de concentração territorial.

No campo da governança hídrica, também não há consenso quanto à capacidade dos instrumentos participativos de mitigar conflitos. Enquanto parte da literatura defende os Comitês de Bacias Hidrográficas como mecanismos eficazes de coordenação e gestão descentralizada, outros estudos apontam limitações relacionadas à assimetria de poder entre usuários da água e à baixa capacidade de implementação de decisões em nível local. Trabalhos como de Rodrigues, Domingues e Christofidis (2017), Multsch et al. (2020) e Nicollier, Bernardes e Kiperstok (2022), Silva e Vianna (2022), Aguiar Junior e Pasqualetto (2022) indicam que a competição entre agricultura irrigada, abastecimento humano, comunidades tradicionais e conservação ambiental exigem instrumentos de gestão mais integrados, capazes de harmonizar as demandas crescentes do setor produtivo com a segurança hídrica. Essa literatura reforça a necessidade de análises baseadas em evidências, dado que a distribuição da irrigação e sua relação com a disponibilidade hídrica apresentam forte heterogeneidade territorial.

Ainda é importante ressaltar que a expansão agrícola em fronteiras apresenta dinâmica própria regional, geralmente marcada pela combinação entre disponibilidade de recursos naturais, incentivos econômicos e integração às cadeias globais de *commodities*. Segundo Padis (1981), Sicsú e Lima (2000) e Boechat, Pitta e Toledo (2019), as fronteiras agrícolas não se formam apenas por avanços da produção, mas por reconfigurações institucionais, investimentos em infraestrutura, mudanças no preço internacional das *commodities* e processos de territorialização do capital agrícola. A expansão da soja no Matopiba se insere nesse arcabouço, articulando disponibilidade hídrica, incorporação de novas áreas e aumento da demanda por irrigação.

Além da literatura mencionada, estudos recentes têm se dedicado à análise espacial da sojicultura no Matopiba. Há concordância entre Araújo et al. (2019), Maranhão et al. (2019) e Silva, Souza e Oliveira (2024) de que a produção de soja apresenta autocorrelação espacial positiva e se organiza em *clusters* regionais, principalmente no oeste da Bahia, na divisa Maranhão-Piauí e ao longo da rodovia BR-153 no Tocantins (Oliveira; Dörner; Schneider, 2020). Também é consensual que a expansão da soja está associada à modernização agrícola desigual (Batista et al., 2023) e à manutenção da concentração fundiária (Santos, 2020).

A primeira divergência diz respeito à trajetória temporal da concentração. Araújo et al. (2019) detectaram redução da autocorrelação espacial da produtividade ao longo do tempo, interpretada como início de desconcentração. Já Batista et al. (2023) argumenta que as assimetrias municipais na modernização se mantêm ou se aprofundam, sugerindo persistência da concentração. A segunda divergência envolve o papel das mudanças climáticas. Enquanto Chamon et al. (2022) e Rodrigues et al. (2025) projetam aumento do estresse hídrico e risco à sustentabilidade da irrigação, Araújo et al. (2024) mostram que, apesar de alterações climáticas significativas (aumento de temperatura e redução de precipitação), a produção de soja continuou crescendo, possivelmente por avanços tecnológicos e irrigação. Essa aparente contradição sugere que a irrigação pode estar atuando como fator de resiliência.

Santos (2020) demonstra que a expansão da sojicultura está associada ao crescimento econômico, porém sem redução das desigualdades de renda e com manutenção da concentração fundiária, além de evidenciar correlação com efeitos climáticos adversos. De forma

complementar, Silva, Souza e Oliveira (2024) identificam forte associação espacial entre áreas plantadas, estrutura fundiária e capacidade de armazenagem, indicando que os principais municípios produtores também concentram maiores níveis de desigualdade. Batista et al. (2023) destacam a heterogeneidade da modernização agrícola, com concentração espacial de fatores ligados à capitalização e ao uso de tecnologia nos estados do Tocantins e do Maranhão, além de assimetrias municipais relevantes.

Em conjunto, esses estudos evidenciam que a dinâmica da sojicultura no Matopiba envolve processos simultâneos de concentração espacial, especialização produtiva, modernização desigual e pressões socioambientais. Entretanto, ainda são limitadas as análises que investigam, de forma específica, o papel da irrigação como fator de intensificação produtiva e sua influência sobre os padrões espaciais da produção, lacuna que o presente estudo busca explorar. Especificamente, até onde se sabe, não foram identificados estudos que tenham aplicado índices de autocorrelação espacial (Moran Global e Local) para comparar diretamente os padrões da soja irrigada versus sequeiro, nem que tenham testado se a expansão da irrigação está associada à desconcentração ou à concentração territorial no Matopiba.

Em termos metodológicos, esses estudos mobilizam técnicas tradicionais de análise espacial, como o coeficiente de Gini, as estatísticas I de Moran e LISA, índices de correlação de Pearson e Spearman, análise fatorial, cálculo de taxas de crescimento e modelos espaciais, como o SAC (*Spatial Autoregressive Combined*). No entanto, nenhum desses trabalhos emprega métodos de agrupamento hierárquico, como o método de Ward, combinado à métrica de validação de Silhouette. Tais abordagens permitem refinar a identificação de padrões espaciais ao considerar a estrutura de similaridade entre observações, contribuindo para uma delimitação mais robusta dos agrupamentos. Nesse sentido, o presente estudo também avança do ponto de vista metodológico ao incorporar essas técnicas à análise da dinâmica espacial da sojicultura.

3 METODOLOGIA E BASE DE DADOS

A literatura clássica de análise espacial demonstra que padrões territoriais dificilmente ocorrem de forma aleatória. Anselin (1995) argumenta que unidades geográficas vizinhas tendem a compartilhar características socioeconômicas, biofísicas e institucionais, produzindo estruturas espaciais que refletem processos subjacentes comuns. Nesse contexto, a identificação de *clusters* de irrigação representa não apenas uma regularidade empírica, mas também um sinal de que o território é influenciado por fatores como disponibilidade hídrica, políticas de incentivo, infraestrutura agrícola, aptidão produtiva e dinâmica dos mercados regionais.

Com base nesses fundamentos, este estudo utiliza informações municipais sobre área irrigada e área de sequeiro da soja para os anos de 2006 e 2019, a fim de avaliar a evolução espacial da produção irrigada no Brasil. Os dados de 2006 foram obtidos na Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil (Brasil, 2011), enquanto as informações referentes a 2019 derivam do Atlas da Irrigação (ANA, 2021). A área plantada de soja, para ambos os anos, foi extraída da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2025), garantindo comparabilidade temporal e consistência metodológica.

Como o Atlas da Irrigação discrimina áreas irrigadas apenas para arroz, café e cana-de-açúcar, que juntas representam 66% do total irrigado no país em 2019, foi necessário estimar a

participação das demais culturas, entre elas a soja, que aparecem de forma agregada. Para tanto, adotou-se metodologia adaptada de Brasil (2011), aplicando-se a proporcionalidade da área plantada municipal de cada cultura sobre o total plantado (Eq. 1) e redistribuindo proporcionalmente as áreas irrigadas agregadas (Eq. 2). Esse procedimento garantiu consistência entre áreas irrigadas e plantadas ($\text{irrigada/plantada} \leq 1$) e permitiu analisar as alterações no período.

$$Ap_{c,m} = \frac{A_{c,m}}{A_m} \quad (\text{Eq. 1})$$

$Ap_{c,m}$ é a parcela de área plantada por cultura (c) no município (m), $A_{c,m}$ é a área plantada (hectares) na cultura e no município e A_m é a área plantada total (hectares) no município.

$$Ai_{c,m19} = Ap_{c,m} \times Ai_m \quad (\text{Eq. 2})$$

$Ai_{c,m}$ é a área irrigada (i) na cultura (c) no município (m) em 2019; $Ap_{c,m}$ é a parcela de área plantada por cultura no município; Ai_m é a área total irrigada do município. Adicionalmente é necessário garantir a proporcionalidade entre as áreas plantadas nas demais culturas em que a soma das áreas não ultrapasse 100% do total plantado e irrigado. As estimativas abrangeram todos os municípios dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, dos quais foram selecionados aqueles pertencentes ao Matopiba. A base geográfica utilizada corresponde à malha municipal do IBGE, contendo os limites oficiais (latitude e longitude).

Ressalta-se que a área irrigada com soja em 2019 foi estimada indiretamente, pois o Atlas da Irrigação (ANA, 2021) não discrimina essa cultura, sendo uma *proxy*. O procedimento de proporcionalidade pela área plantada (Eq. 2) assume distribuição homogênea da irrigação entre culturas dentro de cada município condicionado às áreas plantadas, o que pode introduzir erros de alocação. Para mitigar essa limitação, compararam-se os padrões espaciais de 2019 com os de 2006⁵, focando em mudanças estruturais (persistência de clusters, surgimento de novos polos) em vez de valores absolutos tanto nas áreas de sequeiro quanto irrigadas.

Para atender aos objetivos do estudo, foram calculadas as estatísticas de autocorrelação espacial I de Moran Global (Eq.3) e Local (LISA) (Eq.4) para a área irrigada e de sequeiro da soja nos municípios do Matopiba. O I de Moran Global proposto por Moran (1948), é definido como:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que n é o número total de observações (municípios do Matopiba), x_i valor da variável no município i (área irrigada, por exemplo), \bar{x} é a média da variável, w_{ij} é o elemento de pesos, $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$ é a soma total dos pesos espaciais e o numerador é a covariância espacial ponderada, quanto mais o índice se aproximar de +1, seu extremo positivo, maior será a concentração das observações da amostra. De forma simétrica, quanto mais o índice se

⁵ As limitações da base de dados de soja e demais culturas para 2006 são reportadas no relatório da Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil (Brasil, 2011).

aproximar de -1, menor será a concentração das observações, ou seja, maior será a dispersão da amostra. Já o *I* de Moran Local, como destaca Anselin (1995), consiste numa extensão do *I* de Moran Global, que foca em analisar a autocorrelação espacial para cada observação individual, em termos matemáticos, pode ser expressa como:

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^j w_{ij} z_j \quad (\text{Eq. 4})$$

O cômputo de I_i só abrange os vizinhos das observações de i , definidos conforme a matriz de pesos espaciais w_{ij} que representa o elemento i, j da matriz de pesos. A matriz de pesos espaciais foi construída utilizando o método *K-Nearest Neighbors (KNN)*, com definição adaptativa do número de vizinhos. Foram testados valores de *KNN* no intervalo de 6 a 15^6 , com *fallback* baseado em distância, selecionando-se aquele que garantisse a conectividade total da rede espacial. O cálculo foi realizado no Python com a biblioteca *esda* do PySAL (Rey; Anselin, 2009), incluindo simulações de Monte Carlo para verificar significância estatística ao nível de 5%, considerando apenas valores positivos para evitar inflação artificial da autocorrelação.

Cada observação pode ser classificada em um agrupamento espacial da seguinte forma: *High-High (HH)*: área com valor alto cercada por áreas altas; (ii) *Low-Low (LL)*: área com valor baixo cercada por áreas baixas; (iii) *High-Low (HL)*: área com valor alto cercado por baixos; (iv) *Low-High (LH)*: área com valor baixo cercado por altos (Almeida, 2012).

Municípios com área irrigada igual a zero foram mantidos na análise, mas excluídos do cálculo do Índice de Moran Local para evitar viés na autocorrelação. Esses municípios receberam o rótulo 'Zero' e foram reinseridos nas etapas posteriores (agrupamento hierárquico e visualização). Para o agrupamento de Ward, os dados foram padronizados (*z-score*), e uma variável binária “tem irrigação” (0 ou 1) foi adicionada para diferenciar estruturalmente municípios irrigados e não irrigados.

Para lidar com a influência de valores nulos e identificar padrões espaciais latentes, aplicou-se o Método de Agrupamento Hierárquico de Ward (1963), que minimiza a variância intra-grupo. Ward propôs maximizar a função objetivo, que ele chamou de *ESS (Error Sum of Squares)* para um conjunto de n observações $\{x_i\}$ de modo que:

$$ESS = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

De maneira simplificada, pode ser expresso como:

$$\Delta ESS_{(A,B)} = \frac{n_a n_b}{n_a + n_b} \|\bar{x}_a - \bar{x}_b\|^2 \quad (\text{Eq. 6})$$

Ou seja, o aumento da soma dos quadrados intragrupo é proporcional ao quadrado da distância entre os municípios dos grupos ponderada pelo tamanho dos grupos. Trata-se de uma abordagem aglomerativa para minimizar a perda de homogeneidade interna dos dados. O procedimento foi realizado por meio da biblioteca *scikit-learn* (Pedregosa et al., 2011) que é

⁶ O intervalo foi definido buscando equilibrar densidade de conexões e preservação da estrutura local.

utilizada para esse método. Para avaliar a qualidade e a robustez dos agrupamentos gerados, utilizou-se a métrica de Silhouette, proposta por Rousseeuw (1987). Essa métrica permite mensurar o quão bem cada unidade foi classificada dentro de seu respectivo grupo em relação aos demais grupos. Para uma dada observação i , define-se o coeficiente de silhueta $s(i)$ como:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde $a(i)$ é a distância média entre a observação i e todas as demais observações do mesmo grupo, e $b(i)$ é a menor distância média entre i e todas as observações dos demais grupos, ou seja, a distância ao grupo mais próximo do qual i não faz parte. Os valores do coeficiente de Silhouette variam entre -1 e +1, sendo que valores próximos de +1 indicam uma boa adequação da observação ao seu grupo, valores próximos de 0 indicam sobreposição entre grupos, e valores negativos sugerem possível alocação inadequada da observação.

Para a implementação da análise utilizou-se um conjunto de bibliotecas amplamente utilizadas na ciência de dados geoespaciais no Python⁷ como o matplotlib (Hunter, 2007), geopandas (Jordahl, 2014) e o contextily para gerar os mapas e figuras apresentados na seção de resultados. Para fins de contextualização espacial, os mapas foram sobrepostos a um mapa base fornecido gratuitamente pela plataforma CartoDB, com projeção compatível com o sistema de coordenadas geográficas dos dados (EPSG:4326).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente os resultados são apresentados para os indicadores de autocorrelação espacial e agrupamento de dados referentes ao cultivo de soja, separados por tipo de manejo (irrigado e de sequeiro) para os anos de 2006 e 2019 (Tabela 1). Posteriormente, os dados são apresentados nas subseções para a irrigação e na sequência para as áreas de sequeiro. Por último, uma discussão sobre o avanço da irrigação na região é realizada. Os resultados para o I de Moran Global, em 2006, evidenciaram uma autocorrelação espacial forte para todas as variáveis, com o índice de Moran mais alto para Irrigação (0.458). Em 2019, o Índice de Moran global diminuiu, indicando uma redução da concentração espacial nas áreas irrigadas e de sequeiro, com maior heterogeneidade no espaço.

Os valores de Silhouette Score permanecem altos tanto em 2006 quanto em 2019 (> 0.8), o que mostra que os agrupamentos detectados com base nos indicadores espaciais foram bem definidos, ou seja, a matriz de peso para valores positivos e o agrupamento realizado por meio da estrutura hierárquica de Ward estão adequados. Os resultados (Tabela 1) mostram que a redução no z-score médio de Irrigação (de 0.668 para 0.470) e de sequeiro (de 0.636 para 0.443) sugere menor intensidade dos *clusters* locais ao longo do tempo.

⁷ A programação completa pode ser solicitada aos autores por e-mail com as justificativas.

Tabela 1 – Resultados Moran Global e Lisa para Irrigação, Sequeiro e Rendimento nos anos de 2006 e 2019 na soja do Matopiba

Soja	Variável	Moran Index	Matriz KNN	Silhouette Score	p-valor	Média Local Moran	z-score Média
2006	Irrigação	0.458	6	0.971	0.000	0.448	0.668
	Sequeiro	0.364	8	0.895	0.000	0.360	0.636
2019	Irrigação	0.377	6	0.947	0.000	0.374	0.470
	Sequeiro	0.254	6	0.888	0.000	0.2521	0.443

Fonte: Elaboração própria.

Entre 2006 e 2019, os dados indicam uma diminuição da autocorrelação espacial das áreas de soja irrigada e de sequeiro, o que pode refletir uma maior disseminação geográfica dessas práticas agrícolas. Embora os agrupamentos espaciais ainda sejam estatisticamente significativos (p -valor = 0.000), a intensidade e a concentração espacial desses padrões enfraqueceram com o tempo. Esses resultados podem ser corroborados ao se analisar as mudanças no quantitativo de estabelecimentos e hectares dos irrigantes em 2006 e em 2019.

4.1 IRRIGAÇÃO

A análise por *cluster* das áreas irrigadas com soja em 2006, realizada pelo método hierárquico de Ward, permitiu identificar os grupos de municípios com perfis semelhantes em termos de área irrigada (Tabela 2 e Figura 1). Foram formados cinco *clusters*, no ano de 2006 o *cluster* 1 agregou 4 municípios com maiores áreas irrigadas, apresentando média de 8.541 hectares e total de 34.166 hectares sendo composta pelos municípios de Barreiras, Formosa do Rio Preto, São Desidério e Luís Eduardo Magalhães. Todos os municípios deste grupo foram classificados como HH pelo Moran Local, indicando altas áreas irrigadas espacialmente agrupadas.

Tabela 2 – Distribuição da clusterização (Ward) das áreas irrigadas em 2006

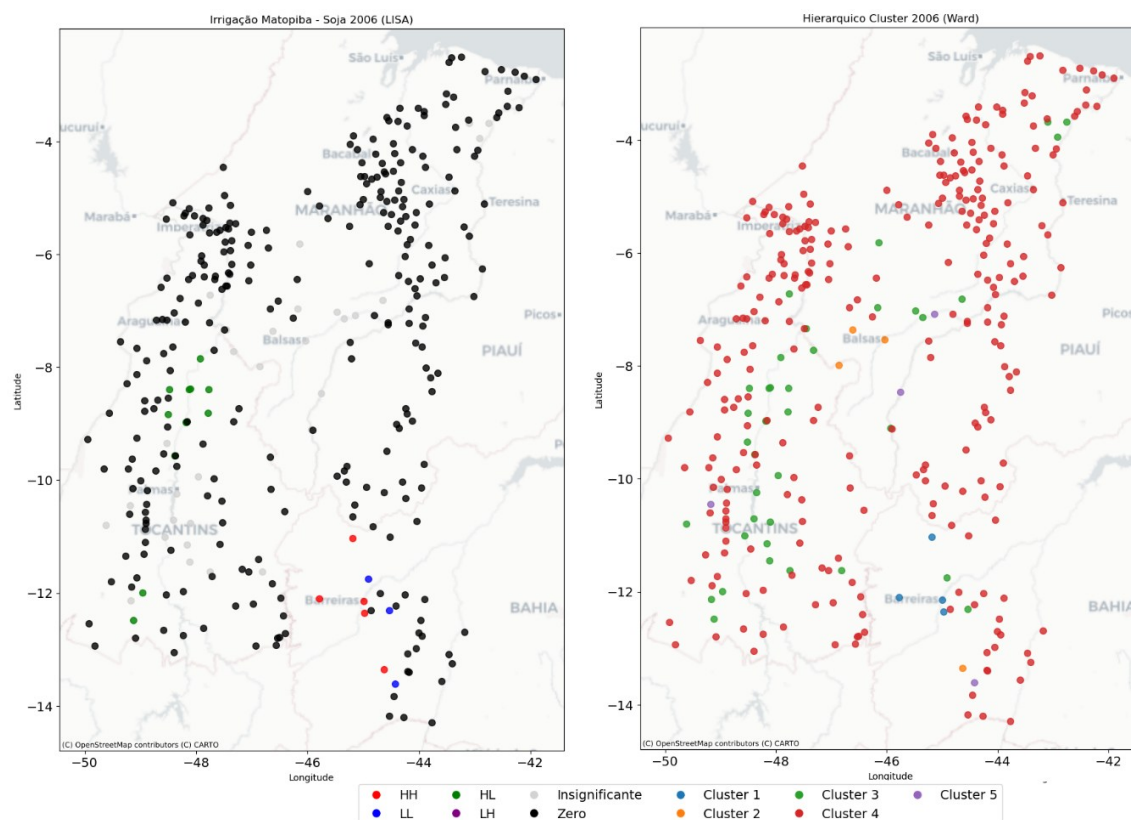
Cluster	Número de Municípios	Média	Desvio-padrão	Distribuição
1	4	8.541	973	HH: 4
2	4	2.383	470	Insignificante:3, HH: 1
3	38	100	146	Insignificante: 25, HL:11, LL:2
4	287	0	0	Zero: 287
5	4	1.046	120	Insignificante: 3, LL: 1

Fonte: Elaboração própria.

O *cluster* 2, também com 4 quatro municípios, apresentou média intermediária de 2.383 ha e presença de um município HH sendo o município de Correntina. O *cluster* 3, com 38 municípios, representa áreas irrigadas em menor escala (média de 100 ha), com maioria classificada como insignificante no LISA. O *cluster* 4, com 287 municípios, concentra

exclusivamente os casos com área irrigada igual a zero. Por fim, o *cluster* 5 reúne 4 municípios com pequenas áreas irrigadas (média de 1.046 ha), em geral sem autocorrelação significativa. Esses resultados evidenciam que, em 2006, a irrigação com soja era fortemente concentrada em poucos polos produtivos, cercados por municípios com baixa ou nenhuma presença de irrigação ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Resultados combinado LISA cluster e clusterização hierárquica nas áreas irrigadas de soja para 2006



Fonte: Elaboração própria

A maior parte dos municípios integrava *clusters* com baixa ou nenhuma irrigação, revelando que, em 2006, a adoção da irrigação era restrita e espacialmente concentrada em poucos polos. O padrão HL identificou 11 municípios como Pedro Afonso, Guarai, Santa Maria do Tocantins, Sucupira, Palmeirante, Tupirama, Alvorada, Itacajá, Brasilândia do Tocantins, Itapiratins e Tupiratins, caracterizados por apresentarem baixa irrigação, embora circundados por áreas de maior intensidade, indicando zonas de transição no avanço da irrigação. Este resultado era um possível indicativo de regiões com potencial para a adoção de políticas regionais à época.

Em 2019, seis municípios foram classificados como HH sendo: Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves, Correntina, São Desidério, Barreiras e Formosa do Rio Preto, indicando áreas com alta irrigação cercadas por municípios igualmente intensivos. Entre eles, três (Luís Eduardo Magalhães, Riachão das Neves e Correntina) situavam-se no 1º quadrante do agrupamento hierárquico, dois (São Desidério e Barreiras) no 2º quadrante e um (Formosa do Rio Preto) no 3º quadrante, refletindo diferentes níveis de intensidade e proximidade espacial. O *cluster* 2, composto por apenas dois municípios, apresentou a maior média de área

irrigada (29.371 ha), e ambos também foram classificados como HH pelo Moran Local, reforçando a existência de polos de irrigação altamente concentrados na região (Tabela 3).

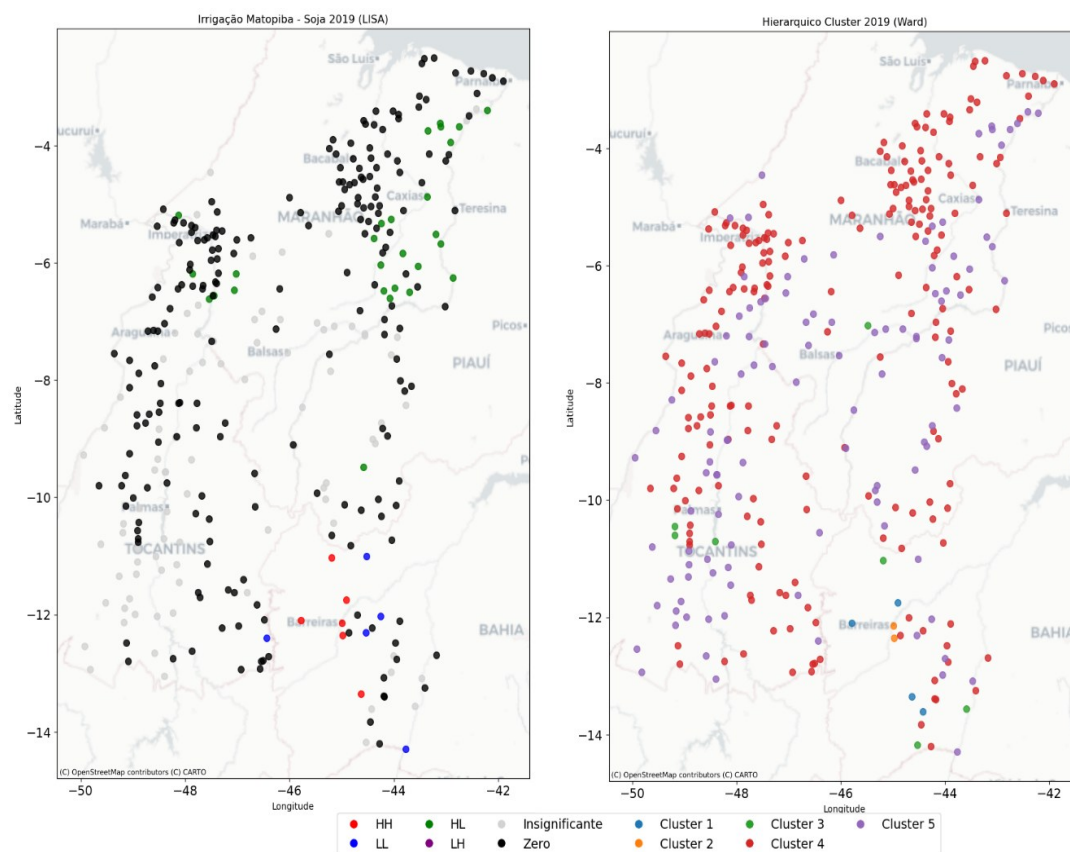
Tabela 3 – Distribuição da clusterização das áreas irrigadas em 2019

Cluster	Número de Municípios	Média	Desvio-padrão	Distribuição
1	4	12.480	2.797	Insignificante:1; HH: 3
2	2	29.371	3.487	HH:2
3	7	2.894	1.437	Insignificante:6; HH:1
4	212	0	0	Zero
5	112	170	286	Insignificante:80; HL: 27 e LL:5

Fonte: Elaboração própria.

Um ponto importante entre os anos de 2006 e 2019 é o município de Riachão das Neves que não foi classificado como HH em 2006, mas foi classificado em 2019. Este município foi classificado em 2006 como LL apresentando uma área irrigada de 687 ha, enquanto que em 2019 a área irrigada neste município foi estimada como 11.313 ha. Os resultados para 2019 são ilustrados espacialmente na Figura 2.

Figura 2 – Resultados combinado LISA *cluster* e clusterização hierárquica nas áreas irrigadas de soja para 2019



Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, os dados de 2019 mostram que, embora a irrigação permaneça concentrada em poucos polos, houve uma ligeira expansão geográfica da prática, evidenciada pelo aumento do número de municípios nos *clusters* com áreas irrigadas, inclusive com padrões HL e LL, o que pode indicar uma desconcentração regional da atividade. A tabela 4 mostra a comparação dos municípios classificados como HH em 2006 e 2019. Os dados revelam crescimentos expressivos e heterogêneos tanto da área irrigada quanto da área plantada⁸ de soja entre os dois períodos.

O município de Riachão das Neves se destaca pela variação mais significativa, passando de uma área irrigada de 687 ha (classificado como LL em 2006) para 11.313 ha em 2019, um aumento de mais de 1.500%. Esta expansão foi acompanhada por um crescimento de 80,7% na área plantada, sugerindo que o avanço da irrigação esteve alinhado à intensificação produtiva. Já Correntina e Luís Eduardo Magalhães também apresentam aumentos significativos da irrigação, de 395% e 99%, respectivamente. Ambos mantiveram o padrão HH ao longo dos anos, indicando consolidação da atividade irrigada nesses municípios.

Tabela 4 – Dados comparativos para os municípios identificados como HH em 2006 e 2019

Município	HH 2006	HH 2019	Área irrigada 2006	Área irrigada 2019	Área Plantada 2006	Área plantada 2019
Luís Eduardo Magalhães	Sim	Sim	7.369	14.698	128.470	177.610
Barreiras	Sim	Sim	9.484	26.905	147.400	185.500
São Desidério	Sim	Sim	8.130	31.838	270.870	384.150
Correntina	Sim	Sim	1.832	9.070	103.043	176.100
Formosa do Rio Preto	Sim	Sim	9.180	3.674	99.160	403.108
Riachão das Neves	Não	Sim	687	11.313	68.900	124.500

Fonte: Elaboração própria.

Contudo, o município de Formosa do Rio Preto chama atenção por um padrão inverso, apesar de ter mantido a classificação HH, a área irrigada diminuiu 60% (de 9.180 ha para 3.674 ha), enquanto a área plantada quadruplicou (de 99 mil ha para mais de 403 mil ha). Isso pode indicar uma expansão territorial da soja em sequeiro, com possível redução relativa da importância da irrigação nesse município. Barreiras e São Desidério mantiveram a expansão da irrigação com avanço de 183% em Barreiras e de 291% em São Desidério. A área plantada também cresceu 26% e 42%, respectivamente. Isso sugere uma intensificação do uso da irrigação na soja nestes municípios. Apesar do avanço da irrigação nestes municípios classificados como HH, o percentual de áreas irrigadas nas áreas plantadas é reduzido (Tabela 5).

⁸ Aqui adotou-se a área plantada como forma de visualizar comparativamente as informações nos dois anos de análise.

Tabela 5 – Mudanças relativas das áreas irrigadas nos municípios identificados como HH em 2006 e 2019

Município	% Irrigada 2006	% Irrigada 2019	Δ (%)
Luís Eduardo Magalhães	5.7%	8.3%	+2.6 p.p.
Barreiras	6.4%	14.5%	+8.1 p.p.
São Desidério	3.0%	8.3%	+5.3 p.p.
Correntina	1.8%	5.2%	+3.4 p.p.
Formosa do Rio Preto	9.3%	0.9%	-8.4 p.p.
Riachão das Neves	1.0%	9.1%	+8.1 p.p.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: p.p. = pontos percentuais.

As mudanças relativas apresentadas na Tabela 5 reforçam o avanço da irrigação, com destaque para Riachão das Neves, que saltou de 1% para 9,1%, e para Barreiras, que passou de 6,4% para 14,5% da área irrigada. Em contrapartida, a tabela também evidencia a redução das áreas irrigadas em Formosa do Rio Preto, o que pode indicar alterações nas práticas produtivas ou problemas estruturais na irrigação local, entre 2006 e 2019. A seguir os dados são apresentados para as áreas em sequeiro.

4.2 SEQUEIRO

Em 2006, a análise da distribuição espacial das áreas de soja em sequeiro no Matopiba, utilizando a clusterização hierárquica e o Índice de Moran Local (LISA), revelou padrões distintos de concentração produtiva entre os municípios (Tabela 6). O *cluster* 1 reuniu municípios com forte autocorrelação espacial positiva (HH), como Barreiras, Luís Eduardo Magalhães, Correntina, Formosa do Rio Preto e Riachão das Neves. Também incluía os municípios de Balsas, Tasso Fragoso e Uruçuí, que apresentavam grandes áreas plantadas, mas cuja autocorrelação não foi estatisticamente significativa no LISA. Nesse caso, apesar da grande extensão cultivada, esses municípios não formavam padrões espaciais consistentes com os seus vizinhos.

O município com maior área de sequeiro foi São Desidério, isolado no *cluster* 4 e classificado como HH, evidenciando elevada concentração produtiva não compartilhada com os vizinhos. Já os *clusters* 2 e 3 reuniram municípios com áreas menores ou intermediárias, apresentando padrões espaciais menos concentrados, enquanto o *cluster* 5 agrupou municípios sem registro de área de sequeiro em 2006.

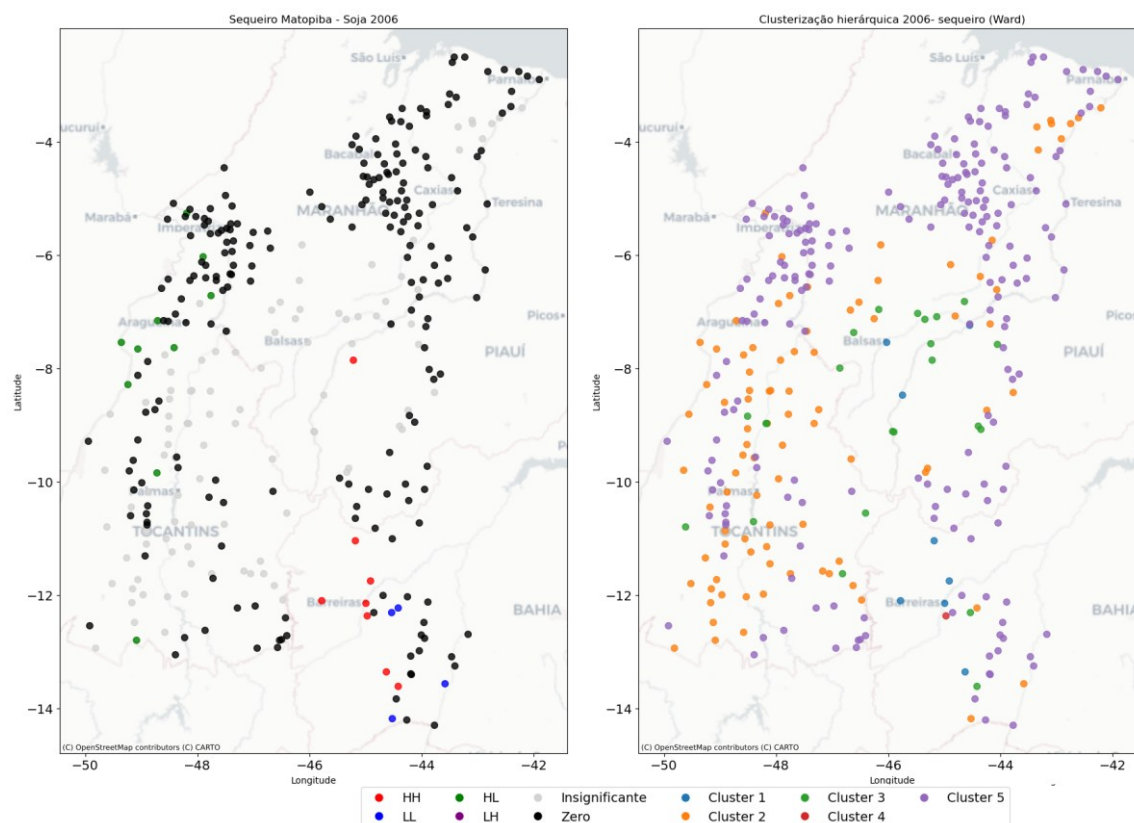
Tabela 6 – Distribuição da clusterização das áreas de sequeiro em 2006

Cluster	Número de Municípios	Média	Desvio-padrão	Distribuição
1	8	97.883	23.374	HH: 5; insignificante:3
2	91	2.428	2.185	HL:12; LL: 3; insignificante:76
3	23	21.675	11.729	HH: 2; LL:1; insignificante:20
4	1	262.739	-	HH: 1
5	214	0	0	Zero

Fonte: Elaboração própria.

Um ponto relevante nestes resultados é que mais da metade dos municípios da amostra (214) não apresentaram registros de cultivo de soja em sequeiro em 2006, indicando ausência ou reduzida expansão da atividade em amplas áreas do Matopiba à época. Em 2019, este número se reduziu para 155 (Tabela 7) evidenciando a expansão da soja na região. O mapa LISA para 2006 (Figura 3) revela poucos municípios com autocorrelação espacial significativa para soja em sequeiro, os pontos LL e HL são dispersos e em número reduzido, com baixa difusão sem padrões espaciais claros em grande parte da área.

Figura 3 – Resultados combinado LISA cluster e clusterização hierárquica nas áreas de sequeiro de soja para 2006



Fonte: Elaboração própria.

A configuração espacial observada revela que, em 2006, a concentração da soja de sequeiro, especialmente no oeste da Bahia, refletia um estágio anterior à institucionalização do Matopiba como política federal. A formalização da região como nova fronteira agrícola ocorreu apenas com o Decreto nº 8.447, de 6 de maio de 2015, marcando o reconhecimento oficial do Matopiba. Até então, a expansão da agricultura, notadamente da soja, era impulsionada principalmente pela iniciativa dos próprios produtores rurais.

Alguns municípios já se destacavam na produção de soja em sequeiro em 2006, como é o caso de São Desidério, mantiveram esse protagonismo em 2019 acompanhado por um aumento da área média de sequeiro e por uma mudança no agrupamento espacial. Nesse período observa-se também a inclusão do município de Formosa do Rio Preto, embora, nesse caso, o resultado não tenha sido estatisticamente significativo.

Para 2019, destaca-se ainda o *cluster* 1, formado por 20 municípios com média superior a 53 mil hectares de soja, incluindo dois municípios identificados como HH: Riachão das Neves e Ribeiro Gonçalves. Entretanto, a maioria desses municípios não apresentou autocorrelação estatisticamente significativa no teste LISA, sendo 18 classificados como insignificantes.

Tabela 7 – Distribuição da clusterização das áreas de sequeiro em 2019

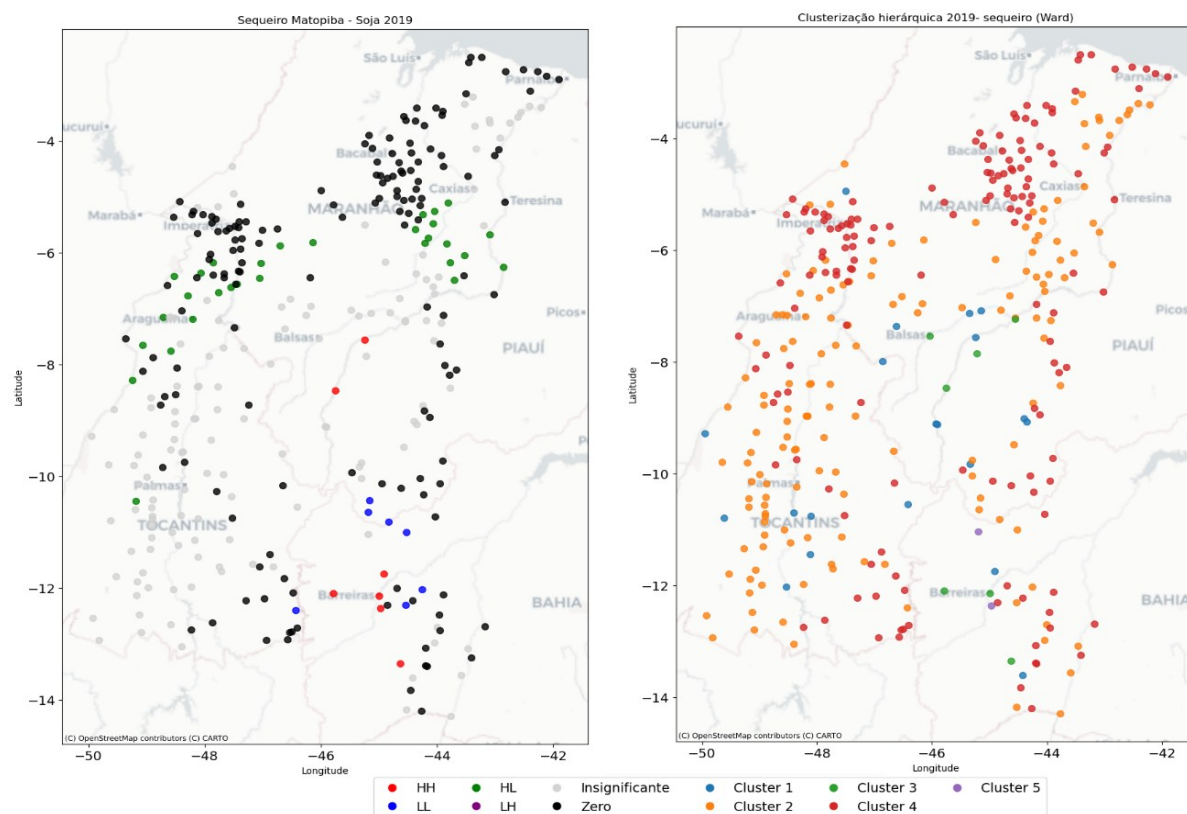
Cluster	Número de Municípios	Média	Desvio-padrão	Distribuição
1	20	53.232	20.839	Insignificante:18, HH: 2
2	153	6.180	6.761	Insignificante: 116, HL: 30, LL: 7
3	7	178.954	20.493	HH: 4, Insignificante: 3
4	155	0	0	Zero: 155
5	2	375.873	33.319	Insignificante: 1, HH: 1

Fonte: Elaboração própria.

Outro ponto relevante é a expansão do *cluster* 2, que em 2019 passou a agrupar 153 municípios, com média de 6.180 ha, sendo o grupo mais numeroso com ampla presença de municípios classificados como HL (30) e LL (7), além de 116 insignificantes. Isso sugere uma maior difusão territorial da produção de sequeiro, ainda que com menor intensidade produtiva em muitos municípios.

Além disso, o *cluster* 3 de 2019, com sete municípios e média de quase 179 mil hectares, inclui outros polos produtivos expressivos, sendo que quatro deles foram classificados como HH, sendo: Tasso Fragoso, Correntina, Luís Eduardo Magalhães e Barreiras. Esses dados indicam a formação de novos centros de elevada concentração de soja de sequeiro, apontando para um aumento na especialização e no uso extensivo de terras nessa modalidade. A figura 4 ilustra a localização espacial do LISA e do cluster hierárquico para 2019.

Figura 4 – Resultados combinado LISA cluster e clusterização hierárquica nas áreas de sequeiro de soja para 2019



Fonte: Elaboração própria.

A comparação entre o *cluster* 1 de 2006, com 8 municípios predominantemente HH, e o *cluster* 1 de 2019, com 20 municípios, revela uma reconfiguração dos polos de maior área de soja em sequeiro no Matopiba. Observa-se que, embora o número de municípios no *cluster* tenha aumentado, a média de área por município diminuiu, indicando uma diluição da concentração e a entrada de novos municípios com áreas elevadas, mas ainda inferiores às dos polos tradicionais. Queda na quantidade de municípios HH no *cluster* 1 (de 5 para 2), com predominância de municípios estatisticamente insignificantes (18) em termos de autocorrelação espacial reforça a ideia de uma dispersão da atividade com menor coesão espacial entre os maiores produtores.

4.3 DISCUSSÃO IRRIGAÇÃO, EXPANSÃO TERRITORIAL E PLANEJAMENTO HÍDRICO NO MATOPIBA

Entender o que representa o Matopiba é essencial para compreender sua dinâmica socioeconômica. Embora o processo de povoamento da região remonte ao século XVII, foi a partir da segunda metade da década de 1980 que ocorreram mudanças significativas em sua ocupação (Buainain; Garcia; Vieira Filho 2018). Estas mudanças foram marcadas principalmente pela expansão das atividades agropecuárias impulsionada por empresas da região Sul e Sudeste do país, que migraram para explorar as terras por meio do agronegócio (Haesbaert, 1998). Como reflexo desse processo, o PIB no Matopiba atingiu 116,41 bilhões de

reais em 2019, correspondendo a 1,57% do PIB nacional e um PIB per capita de R\$18,5 mil, que apesar de ter avançado, quando comparado ao início dos anos 2000, apresenta uma distribuição não igualitária.

Em resposta à crescente importância estratégica da região, o governo federal lançou, em 2015 o Plano de Desenvolvimento Agropecuário do Matopiba (PDA-Matopiba), delimitando o território com base em critérios físico-bióticos, agrários e socioeconômicos. Após ser revogado em 2020, o plano foi recriado em 2023 sob o Decreto nº 11.767, mantendo a mesma delimitação territorial e incorporando, de forma explícita, o componente agroindustrial. As novas diretrizes destacam a necessidade de promover o desenvolvimento produtivo com base em princípios de sustentabilidade agroambiental (Brasil, 2023a).

Essa preocupação é justificada por projeções recentes, que estimam que a produção de grãos na região possa atingir 48 milhões de toneladas até a safra 2032/33 (Brasil, 2023b). Os dados da área plantada de soja nos estados do Matopiba foram de 1.817.113 ha em 2006 para 4.234.765ha em 2019, e a produção passou de 4.209.519 toneladas (ton) de grãos de soja para 13.120.907 ton no mesmo período (IBGE, 2025). Segundo Bolfe et al. (2016) a expansão da produção de grãos na região ocorreu por causa do maior uso das terras e à mecanização que favoreceu a intensificação da produção, com destaques para os municípios de Formosa do Rio Preto e São Desidério (Bahia) e Balsas (Maranhão). Ainda segundo os autores, os dados de aptidão agrícola indicam potencial para o desenvolvimento da agricultura intensiva de 26 Mha ou 35% da região, resultado que vai ao encontro dos resultados de clusters realizados neste presente estudo.

Ao longo do tempo, a expansão do uso da água, incluindo atividades industriais, consumo humano, agricultura, intensificaram a percepção da escassez hídrica e a necessidade de melhorar a gestão dos múltiplos usos. Essa escassez tornou-se uma realidade presente na vida cotidiana da sociedade, e as civilizações foram construídas e sustentadas com base não apenas na dependência das chuvas, mas também no uso contínuo das águas superficiais, como rios, lagos e reservatórios, especialmente para viabilizar a agricultura irrigada (Santos; Santana, 2025).

No contexto da expansão da atividade agrícola e possível pressão sobre os recursos hídricos com o avanço da irrigação, os resultados empíricos deste estudo evidenciam a concentração territorial da agricultura irrigada em poucos polos dentro do Matopiba em conformidade com as discussões de Buainain e Garcia (2015). Destacam-se, em especial, os municípios baianos de Luís Eduardo Magalhães, São Desidério e Barreiras, todos localizados no Oeste da Bahia e inseridos na bacia do rio Grande⁹. Esses municípios confirmam a presença de um padrão regional de concentração na produção de grãos, neste caso, a soja.

De acordo com a Política Nacional de Irrigação (Lei 12.787/2013), a expansão da agricultura irrigada deve priorizar áreas com maior viabilidade técnica e disponibilidade hídrica. Segundo dados do Atlas da Irrigação (ANA, 2021), os mesmos municípios mencionados apresentariam ainda potencial para ampliar a área irrigada em até 13.654 ha (Luís Eduardo Magalhães), 26.105 ha (São Desidério) e 12.635 ha (Barreiras), independentemente da cultura. A permanência de *clusters* HH na agricultura irrigada ao longo do tempo reflete não apenas a permanência de vantagens agroambientais, mas também a consolidação de

⁹ A bacia do Rio Grande faz limite com a dos altos formadores do Parnaíba, ao norte e, a oeste, com a bacia do Tocantins, nasce no município de São Desidério, na Bahia (CBH do Rio Grande, 2025).

investimentos estruturantes, em desacordo com a meta de desconcentração territorial da irrigação. Ao mesmo tempo, a ligeira ampliação de municípios classificados como HL ou LL entre 2006 e 2019 pode indicar uma incipiente difusão da prática irrigada para áreas antes marginalizadas, o que dialoga com as propostas do PNRH 2022–2040, que defende a intensificação controlada da irrigação, desde que acompanhada de gestão integrada da água e dos planos de bacia hidrográfica.

Além disso, a forte heterogeneidade regional identificada na clusterização das áreas de sequeiro e irrigadas pode indicar desigualdades estruturais em infraestrutura hídrica e tecnológica. Esses achados sustentam a recomendação do PNRH de fomentar a governança interinstitucional, com ênfase na articulação entre entes federativos e sociedade civil para mitigar os conflitos pelo uso da água. Em consonância com Musarra e Lima (2021), bem como, Aguiar Junior e Pasqualetto (2022), os resultados também reforçam a urgência de ampliar a transparência e participação social na definição de prioridades territoriais de irrigação. A concentração espacial da irrigação pode reforçar desequilíbrios econômicos e sociais caso não haja mecanismos de inclusão produtiva e conservação hídrica. Apesar das diretrizes da PNI incentivarem a expansão em bases sustentáveis e descentralizadas, os resultados revelam que, entre 2006 e 2019, a irrigação permaneceu concentrada nos mesmos polos consolidados, com pequena difusão para áreas periféricas. Isso sugere que as metas de desconcentração ainda não se materializaram plenamente no território do Matopiba.

Outro ponto de atenção são as variações espaço-temporais na eficiência do uso da água em função de fatores climáticos e uso da terra, com destaque para o papel da soja como principal vetor da intensificação produtiva na região (Santiago; Barbosa; Correia Filho, 2021), impactando a eficiência hídrica regional e como consequência da expansão de soja, há impactos nas variáveis socioeconômicas da região (Nunes; Campelo Filho; Benini, 2023). Nesse ponto, os resultados, ao identificar os padrões espaciais da expansão da soja irrigada e suas assimetrias territoriais ao longo do tempo, convergem ao demonstrar que a região Oeste da Bahia e parte do sul do Piauí concentram os maiores avanços na modernização agrícola, mas apontam, sob diferentes perspectivas, os desafios de sustentabilidade hídrica frente aos eventos extremos.

A incorporação de áreas fronteiriças à produção agrícola depende do grau de ocupação já existente, da tecnologia acessível no momento e da expectativa de retorno econômico relativo. Por sua vez, a rentabilidade de uma determinada produção está fortemente vinculada ao comportamento recente dos preços, às projeções de mercado e à forma como sua cadeia de produção e comercialização está estruturada e da rentabilidade relativa entre as diferentes culturas (Freitas, 2021). Nesse contexto, vale destacar que, no Brasil, a prática da rotação de culturas, especialmente entre soja, milho, feijão ou outras, pode dificultar a identificação precisa das áreas efetivamente irrigadas. Essa dinâmica influencia tanto a escolha da cultura quanto o período de irrigação, representando um fator limitante relevante para a análise da expansão da irrigação na região.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou os padrões espaciais da agricultura irrigada da soja na região do Matopiba em 2006 e 2019, com foco na identificação de *clusters* espaciais e na avaliação da concentração ou dispersão territorial da agricultura irrigada. A pesquisa questionou se a

expansão da irrigação na soja na região do Matopiba contribuiu para sua desconcentração geográfica ou para a intensificação de polos produtivos já consolidados.

Os resultados empíricos revelaram que, apesar da expansão da agricultura irrigada ao longo do período, esta permaneceu fortemente concentrada em poucos municípios, notadamente no Oeste da Bahia, regiões tradicionais na produção de grãos. Os resultados de autocorrelação espacial apontaram uma redução na intensidade dos clusters ao longo do tempo, indicando uma leve tendência à desconcentração. Contudo, os municípios classificados como alto-alto (HH), como Luís Eduardo Magalhães, Correntina, São Desidério e Barreiras, mantiveram-se como polos dominantes de irrigação, reforçando a identificação da concentração nessas regiões tanto em 2006 quanto em 2019. O município de Riachão das Neves destacou-se pelo crescimento expressivo da área irrigada, evidenciando o potencial de novos polos de expansão.

Os resultados dos agrupamentos hierárquicos, validados por altos valores do Silhouette Score, confirmaram a coerência interna das classificações espaciais. A inclusão de municípios em clusters do tipo alto-baixo (HL) e baixo-baixo (LL) em 2019 mostram um possível processo de difusão territorial da irrigação, alinhado às diretrizes do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022–2040). Ao mesmo tempo, a concentração da atividade em regiões com infraestrutura hídrica consolidada, como a bacia do Rio Grande, ressalta a importância de políticas públicas orientadas à ampliação da infraestrutura e da assistência técnica em áreas com potencial, mas ainda pouco exploradas.

Reconhecendo as limitações na estimativa indireta da área irrigada para a soja em 2019, os resultados gerais do estudo alinham-se com a literatura ao confirmar a autocorrelação espacial positiva, a redução da concentração ao longo do tempo e a persistência de polos tradicionais (oeste baiano), além de revelarem novos achados, como a emergência de Riachão das Neves e a queda atípica em Formosa do Rio Preto. Esses elementos sugerem que, a despeito das incertezas metodológicas, os padrões espaciais identificados são consistentes e avançam na compreensão do papel da irrigação na reorganização territorial do Matopiba.

Os achados deste estudo reforçam a necessidade de políticas integradas e regionais que combinem o incentivo à irrigação com a gestão eficiente dos recursos hídricos e a promoção da equidade territorial. Para isso, a importância da consistência metodológica nas estimativas de áreas irrigadas é essencial. Estudos futuros poderiam avançar na análise ao incorporar variáveis climáticas e institucionais, além de avaliar o papel de investimentos públicos e privados na estruturação dos polos irrigados. Aprofundar a interface entre irrigação, sustentabilidade ambiental e inclusão produtiva é um passo necessário para orientar a expansão da agricultura irrigada em direção a um desenvolvimento territorial mais equilibrado na região do Matopiba.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO – ANA. Atlas da irrigação. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>. Acesso em: 3 out. 2025.

AGUIAR JUNIOR, I. J. A.; PASQUALETTO, A. Comitês de bacias hidrográficas como instrumento de gestão de riscos territoriais. **DRd-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 12, p. 435-485, 2022. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v12.3704>

ALMEIDA, E. **Econometria espacial**. Campinas, SP: Alínea, 2012.

AMORIM, D. I. M.; BACHA, C. J. C. Mudanças no meio rural brasileiro na segunda década do século XXI. **Economia e Sociedade**, v. 31, p. 823-845, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1590/1982-3533.2022v31n3art11>

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338>.

ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L.; SANTOS, J. R. N.; SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land use policy**, v. 80, p. 57-67, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>

ARAÚJO, M. L. S.; RUFINO, L. A. A.; SILVA, F. B.; BRITO, H. C.; SANTOS, J. R. N. The relationship between climate, agriculture and land cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/su16072670>

BATISTA, M. L. B.; ALVES, J. S.; ALVES, C. L. B.; ANDRÉ, D. M. Análise fatorial e espacial da modernização agrícola no MATOPIBA. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, p. e261413, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.261413>

BOECHAT, C. A.; PITTA, F. T.; TOLEDO, C.A. Pioneiros” do Matopiba: a corrida por terras e a corrida por teses sobre a fronteira agrícola. **Revista Nera**, n. 47, p. 87-122, 2019. Doi: <https://doi.org/10.47946/rnera.v0i47.6267>

BOLFE, É. L.; VICTÓRIA, D. D. C.; CONTINI, E.; BAYMA-SILVA, G.; SPINELLI-ARAÚJO, L.; GOMES, D. Matopiba em crescimento agrícola: Aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 38-62, 2016. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1202>. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**: Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001/1990. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil**. Brasília: MMA, 2011.

BRASIL. **Lei nº 12.787, de 11 de janeiro de 2013**: Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação; altera o art. 25 da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002; revoga as Leis n.º 6.662, de 25 de junho de 1979, 8.657, de 21 de maio de 1993, e os Decretos-Lei n.º 2.032, de 9 de junho de 1983, e 2.369, de 11 de novembro de 1987; e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, 2013. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2013/lei-12787-11-janeiro-2013-775063-publicacaooriginal-138731-pl.html>. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. **Decreto-Lei 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. Brasília: Presidência da República, 2015. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/decreto/d8447.htm. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 10.473, de 24 de agosto de 2020**: Declara a revogação, para fins do disposto no art. 16 da Lei Complementar nº 95, de 26 de fevereiro de 1998, de decretos normativos. Brasília: Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10473.htm#art1. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040** [PDF]. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/pnrh_2022_para_baixar_e_imprimir.pdf. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 11.767, de 1 de novembro de 2023**: Dispõe sobre o Plano de Desenvolvimento Agropecuário e Agroindustrial do Matopiba e institui o seu Comitê Gestor. Brasília: Presidência da República, 2023a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11767.htm. Acesso em: 3 out. 2025.

BRASIL. **Projeções do agronegócio 2022/2023 a 2032/2033**. Brasília: MAPA, 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-graos-brasileira-devera-chegar-a-390-milhoes-de-toneladas-nos-proximos-dez-anos/ProjeesdoAgronegocio20232033.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Polos de irrigação no Nordeste do Brasil. *Confins: Revista Franco-Brasileira de Geografia*, n. 23, 2015. Doi: <https://doi.org/10.4000/confins.10031>

BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. A economia agropecuária do Matopiba. *Estudos Sociedade e Agricultura*, v. 26, n. 2, p. 376-401, 2018. Doi: <https://doi.org/10.36920/esa-v26n2-6>

CARTO. CartoDB Positron [Mapa base]. Disponível em: <https://carto.com/>. Acesso em: 3 out. 2025.

CHAMON, C. C.; SERRA, J. P.; CAMELIER, P.; ZANATA, A. M.; FICHBERG, I.; MARINHO, M. M. F. Building knowledge to save species: 20 years of ichthyological studies in the Tocantins-Araguaia River basin. *Biota Neotropica*, v. 22, n. 2, e20211296, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2021-1296>

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO. CBH do Rio Grande – Bahia. 2025. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-grande-bahia/>. Acesso em: 3 out. 2025.

ELLIS, F. **Peasant economics: Farm households in agrarian development**. Cambridge University Press, 1993.

ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; SANCHES, L. B.; RIBEIRO, B. M. O.; ZAKHAROV, N. Z.; TERRA, T. N.; MANABE, V. D. Dinâmica da agricultura anual na região do Matopiba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2015. **Anais [...]**. p. 4583-4589. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0898.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

FERRARINI, A. S. F.; FERRERIA FILHO, J. B. S. Demanda por uso de água (Consumo) na agricultura irrigada nos estados do Nordeste para 2025. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 51, p. 67-84-84, 2020. Doi: <https://doi.org/10.61673/ren.2020.1050>

FREITAS, R. E. Expansão de área agrícola: Mato Grosso e Matopiba. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 34-34, 2021. Disponível em: <https://rpa.sede.embrapa.br/RPA/article/view/1710>. Acesso em: 3 out. 2025.

HAESBAERT, R. A noção de rede-regional: Reflexões a partir da migração “gaúcha” no Brasil. **Revista Território**, v. 3, n. 4, 1998.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007. Disponível em: <https://www.computer.org/csdl/magazine/cs/2007/03/c3090/13rRUwbJD0A>. Acesso em: 3 out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção agrícola municipal**: Tabela 5457. IBGE, 2025. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 3 out. 2025.

JOHNSTON, B. F.; MELLOR, J. W. The role of agriculture in economic development. **The American Economic Review**, v. 51, n. 4, p. 566-593, 1961. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1812786>. Acesso em: 3 out. 2025.

JORDAHL, K. **GeoPandas**: Python tools for geographic data. v. 3. GitHub, 2014. Disponível em: <https://github.com/geopandas/geopandas>. Acesso em: 3 out. 2025.

MARANHÃO, R. L. A.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; HERMUCHE, P. M.; GOMES, R. A. T.; PIMENTEL, C. M. M.; GUIMARÃES, R. F. The spatiotemporal dynamics of soybean and cattle production in Brazil. **Sustainability**, v. 11, n. 7, p. 2150, 2019. Doi: <https://doi.org/10.3390/su11072150>

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. Proposta de delimitação territorial do Matopiba. Campinas: Embrapa, **Nota técnica**, n.1, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1037313>. Acesso em: 6 nov. 2025.

MOLLE, F.; BERKOFF, J. (Ed.). **Irrigation water pricing**: The gap between theory and practice. Cabi, 2007.

MORAN, P. A. The interpretation of statistical maps. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 10, n. 2, p. 243-251, 1948. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2983777>. Acesso em: 3 out. 2025.

- MULTSCH, S.; KROL, M. S.; PAHLOW, M.; ASSUNÇÃO, A. L.; BARRETTO, A. G.; JONG VAN LIER, Q.; BREUER, L. Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, n. 1, p. 307-324, 2020. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-24-307-2020>
- MUSARRA, R. M. L. M.; LIMA, R. M. Novos desafios à Política Nacional de Recursos Hídricos e ao Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Infraestrutura**, v. 10, n. 19, p. 97-116, 2021. Doi: <https://doi.org/10.64568/rbinf.v10i19.1047>
- NICOLLIER, V.; BERNARDES, M. E. C.; KIPERSTOK, A. What governance failures reveal about water resources management in a municipality of Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 4, 2144, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su14042144>
- NUNES, A. P.; CAMPELO FILHO, E. G.; BENINI, E. G. A produção de soja e sua influência nas variáveis socioeconômicas da região do Matopiba. **Gestão & Regionalidade**, v. 39, n. 116, e20237693, 2023. Doi: <https://doi.org/10.13037/gr.vol39.e20237693>
- OLIVEIRA, T. J. A.; DÖRNER, S. H.; SCHNEIDER, M. B. Desenvolvimento econômico no Matopiba: os arranjos produtivos locais da soja. **Revista Economia Ensaios**, v. 35, n. 2, 2020. Doi: <https://doi.org/10.14393/REE-v35n2a2020-57246>
- ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO – OCDE. Governança dos recursos hídricos no Brasil. **OCDE Publishing**, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238169-pt>
- PADIS, P. C. A fronteira agrícola. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 1, p. 44-67, 1981. Doi: <https://doi.org/10.1590/0101-31571981-1051>
- PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, É. Scikit-learn: Machine learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825-2830, 2011. Doi: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1953048.2078195>
- PERRY, C., STEDUTO, P., ALLEN, R. G., BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural water management**, v. 96, n. 11, p. 1517-1524, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.005>
- REY, S. J.; ANSELIN, L. PySAL: A Python library of spatial analytical methods. In: FISCHER, M.; GETIS, A. (Eds.). **Handbook of applied spatial analysis: Software tools, methods and applications**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, p. 175-193. 2009. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03647-7_11
- RIBEIRO, L. C. S.; LÔBO, A. S.; SILVA, L. D.; ANDRADE, N. F. S. Padrões de crescimento econômico dos municípios do MATOPIBA. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 58, n. 3, e212613, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2020.212613>

- RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, F. D.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. In: **Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. 1ed. Fortaleza: INOVAGRI, v. 1, p. 21-108, 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1081898>. Acesso em: 3 out. 2025.
- RODRIGUES, D. T.; BATISTA, F. F.; ANDRADE, L. D. M. B.; SILVA, H. J. F.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; RIBEIRO, M. S. M.; SILVA, C. M. S. Analysis of Consecutive Dry Days in the MATOPIBA Region During the Rainy and Dry Seasons. **Atmosphere**, v. 16, n. 11, p. 1284, 2025. Doi: <https://doi.org/10.3390/atmos16111284>
- ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53-65, 1987. Doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- SANTIAGO, D. B.; BARBOSA, H. A.; CORREIA FILHO, W. L. F. Changes in water use efficiency related to climatic factors and land use and occupation in the MATOPIBA region. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e3010917891, 2021. Doi: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.17891>
- SANTOS, G. R.; SANTANA, A. S. Água e irrigação no Brasil e na região nordeste: Estrutura e importância para a agricultura familiar. In: **Agricultura e diversidades: Trajetórias, desafios regionais e políticas públicas no Brasil**. Repositório IPEA, 2025. Cap. 2. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/0d61cf54-31a7-441c-9d34-04ac2e540090/content>. Acesso em: 3 out. 2025.
- SANTOS, J. F. S. Produção de soja, desigualdades no campo e mudanças climáticas na região do Matopiba. **DRD-Desenvolvimento Regional em debate**, v. 10, p. 535-561, 2020. Doi: <https://doi.org/10.24302/drd.v10i0.2703>
- SICSÚ, A. B.; LIMA, J. P. R. Fronteiras agrícolas no Brasil: a lógica de sua ocupação recente. **Nova Economia**, v. 10, n. 1, p. 109-138, 2000. Disponível em: <https://revistas.face.ufmg.br/index.php/novaeconomia/article/view/2145/1123>. Acesso em: 3 out. 2025.
- SILVA, P. R.; VIANNA, J. N. S. A região de MATOPIBA (Brasil) e o nexus água-energia-alimentos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 59, p. 338-353, 2022. Doi: <https://doi.org/10.5380/dma.v59i0.78325>
- SILVA, E. E. S.; SOUZA, M. M.; OLIVEIRA, A. L. R. Expansão da soja no Arco Norte: uma análise de correlação de indicadores socioeconômicos e produtivos. **Revista Cerrados**, v. 22, n. 02, p. 331-353, 2024. Doi: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202430>
- VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade. **Brasília: Ipea**, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/book/bcac7cee-5b49-4373-96a7-91c69eb62804>. Acesso em: 3 out. 2025.
- WARD JR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963. Doi: <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>