

Localização de armazéns agrícolas baseada em análise multicritério espacial

Location of agricultural warehouses based on spatial multicriteria analysis

Matheus Melo de Souza¹ , Andréa Leda Ramos de Oliveira¹ , Marlon Fernandes de Souza¹ 

¹Laboratório de Logística e Comercialização Agroindustrial (LOGICOM), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas (SP), Brasil. E-mails: matheus.souza@feagri.unicamp.br; aleda@unicamp.br; marlon.souza@feagri.unicamp.br

Como citar: Souza, M. M., Oliveira, A. L. R., & Souza, M. F. (2024). Localização de armazéns agrícolas baseada em análise multicritério espacial. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 62(1), e268622. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.268622>

Resumo: O agronegócio brasileiro avança em busca de tecnologias e novas áreas agricultáveis. Muitas vezes, a expansão das áreas agrícolas ocorre sem planejamento integrado com os atores do sistema logístico, especialmente em regiões de fronteira agrícola, como a região do MATOPIBA. O planejamento da localização de novos armazéns graneleiros contribui para a melhoria do processo de tomada de decisão para investimentos. Além disso, possibilita um processo virtuoso que permite a incorporação de aspectos para fomentar a intermodalidade e a preservação ambiental. Assim, o objetivo deste artigo é avaliar se uma combinação de critérios locais que considerem aspectos ambientais e de intermodalidade pode identificar regiões mais adequadas para a instalação de armazéns graneleiros do tipo subterminal. A metodologia utilizada agrega a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e técnicas de geoprocessamento. A aplicação dos métodos permitiu classificar as regiões candidatas para a instalação de armazéns. Os resultados indicaram três grandes áreas adequadas para a armazenagem de grãos, que juntas representam 12% da área de estudo. A conclusão da pesquisa foi que, além de aspectos econômicos, a inclusão de fatores ambientais e de infraestrutura logística na análise espacial da localização promove uma rede de armazenagem mais sustentável, com armazéns bem posicionados e com menor competição.

Palavras-chave: grãos, logística, análise multicritério, sistema de informações geográficas.

Abstract: Brazilian agribusiness is continuously seeking new technologies and arable areas for expansion. Often, the expansion often occurs without proper planning and integration with logistic system actors, especially in agricultural frontier regions like the MATOPIBA region. To improve investment decision-making, it is essential to plan the location of new bulk warehouses. This planning can facilitate a virtuous process that incorporates intermodality and environmental preservation aspects. The objective of this article is to evaluate whether a combination of locational criteria that consider environmental and intermodality aspects can identify the most suitable regions for the installation of subterminal warehouses. The methodology combines Analytic Hierarchy Process (AHP) and geoprocessing techniques. The application of the method allowed ranking the candidate regions for the installation of warehouses. The results indicated three large areas suitable for the grain storage that together represent 12% of the study area. The conclusion of the research was that, in addition to economic aspects, the inclusion of environmental and logistics factors in the spatial location analysis promotes a more sustainable storage network, with well-positioned warehouses and less competition.

Keywords: grains, logistic, multi-criteria analysis, geographic information system.

1. Introdução

A soja é um dos principais produtos agrícolas cultivados e comercializados no mundo, com uma área de 135 milhões de hectares e 392 milhões de toneladas produzidas na safra de 2021/2022 (United States Department of Agriculture, 2022). O Brasil passou de produtor coadjuvante na década de 1970 para o maior produtor e exportador mundial de soja em 2022,



sendo responsável por 38% da produção e 52% das exportações (Toloi et al., 2022; United States Department of Agriculture, 2022). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021) projeta um crescimento para soja de 1,1% a.a. até 2030, podendo atingir ao final dessa década 411 milhões de toneladas, mais que o dobro da produção combinada das demais oleaginosas (colza, girassol e amendoim), prevista para 179 milhões de toneladas.

No Brasil, a expansão da fronteira agrícola ocorre em diferentes regiões, principalmente no Centro-Norte do país, com destaque para a região conhecida como MATOPIBA, acrônimo formado pelas iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Batista et al., 2023). Ao agregar a disponibilidade de áreas agricultáveis com a proximidade aos mercados consumidores e às rotas intermodais de transporte, a região do MATOPIBA desponta com grande vantagem logística no agronegócio brasileiro (Oliveira et al., 2021a). A Ferrovia Norte-Sul (FNS) tem movimentado volumes significativos (Empresa de Planejamento e Logística, 2023), aumentando a área de influência terrestre do porto de Itaquí e diminuindo a pressão nos portos do Sul e Sudeste (Souza et al., 2023). Outro aspecto de destaque sobre o MATOPIBA diz respeito à sua localização, por estar situado majoritariamente no bioma Cerrado, mas em área de transição entre os biomas Caatinga, Cerrado e Amazônia (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015).

O gerenciamento dos custos logísticos define a competitividade e sobrevivência no mercado em diferentes negócios (Martins et al., 2005). No agronegócio, esse gerenciamento se faz ainda mais importante, considerando que os custos logísticos podem representar de 20 a 60% do preço final de produtos agrícolas (Shepherd, 2013). Entre as soluções propostas para mitigar os problemas da logística do transporte de grãos brasileiros, destaca-se o uso da intermodalidade, da estocagem e de portos secos. Os sistemas ferroviário e hidroviário são os mais adequados para o transporte de produtos de baixo valor agregado, em grande volume e que exigem longas distâncias, como é o caso da maioria dos produtos agrícolas (Filassi & Oliveira, 2022; Russo et al., 2022; Souza et al., 2020b; Souza et al., 2020a). A estocagem de parte da safra para transporte em momento mais oportuno é uma estratégia que sozinha já pode justificar o investimento em armazenagem (Filassi & Oliveira, 2022; Martins et al., 2005), o que é evidenciado por Filippi et al. (2023), ao mostrarem a correlação de condomínios de armazenagem com a redução de custo de transporte.

Reis et al. (2016) identificaram a comercialização na entressafra como a melhor estratégia de comercialização do milho para os produtores do Mato Grosso do Sul. Além disso, os autores destacaram a importância da logística na tomada de decisão. Nesse sentido, a localização afeta diretamente a quantidade de produto que pode ser recebida em uma unidade armazenadora, resultando em maior ou menor taxa de ocupação, sendo que o aumento dessa taxa reduz exponencialmente o custo de armazenamento da unidade (Valente et al., 2011; Lucas & Chhaged, 2004). A análise de localização busca escolher localizações adequadas no espaço geográfico, considerando o ponto discreto e seu entorno para garantir investimento mínimo e baixo custo operacional (Oliveira et al., 2022). Embora a maioria dos modelos enfatize fatores econômicos tangíveis e quantificáveis, modelos de localização na agricultura caracterizam-se por objetivos múltiplos e, muitas vezes, conflitantes (Lucas & Chhaged, 2004).

Partindo do pressuposto de que, dados os critérios locacionais, é possível estabelecer áreas mais apropriadas para a instalação de novos armazéns que suportem a melhoria do processo logístico de escoamento de grãos, este estudo tem como objetivo avaliar se uma combinação de critérios locacionais que considerem aspectos ambientais e de intermodalidade pode identificar regiões mais adequadas para a instalação de armazéns graneleiros do tipo

subterminal. Segundo Weber (2001), estes armazéns localizam-se em pontos estratégicos do sistema logístico, normalmente em pontos de transbordo, o que racionaliza os fluxos de mercadorias para minimizar os custos com movimentação.

Para tanto, foi proposta a combinação de uma análise multicritério com técnicas de geoprocessamento realizada em uma metodologia de quatro etapas. A Análise Hierárquica de Processos (AHP) aplicada em Sistema de Informação Geográfica (SIG) já foi utilizada para a solução de outros problemas de localização (Souza et al., 2020a; Eroglu, 2021; Oliveira et al., 2022). Assim, a principal contribuição deste artigo é a inclusão de aspectos ambientais e de infraestrutura na análise espacial de sistemas logísticos, resultando em uma localização estratégica dos armazéns, com maior eficiência e menor impacto ambiental, o que se mostra particularmente relevante pelo fato de o estudo ter sido conduzido em uma área de fronteira agrícola que demanda maiores investimentos para atingir a consolidação (Batista et al., 2023).

2. Fundamentação Teórica

A AHP, proposta por Saaty na década de 1970 (Saaty, 1990; Saaty & Vargas, 2001), pode dar suporte ao endereçamento de componentes espaciais em um SIG, permitindo a definição de localizações geográficas apropriadas (Akmal et al., 2022; Patra et al., 2018; Ennaji et al., 2018). A junção de AHP com SIG possibilita a operação de grandes volumes de dados distribuídos espacialmente (Abdelouhed et al., 2022; Oliveira et al., 2022), simplificando o processo de tomada de decisão (Akmal et al., 2022) e gerando uma ferramenta de apoio ao planejamento (Akinci et al., 2013). A versatilidade das aplicações de AHP e SIG é comprovada por pesquisas em diferentes áreas, como localização de portos secos (Souza et al., 2020a), aptidão de terras agrícolas (Akinci et al., 2013), localização de usinas de produção de energia eólica (Eroglu, 2021), espalhamento de cidades (Akmal et al., 2022), localização de instalações agrícolas (García et al., 2014), localização de usinas de açúcar e álcool flexíveis em relação à biomassa utilizada (Oliveira et al., 2022), identificação de zonas potenciais de águas subterrâneas (Patra et al., 2018) e disponibilidade de terras para agricultura sustentável (Ennaji et al., 2018). Logo, a análise multicritério espacial mostra-se como uma importante ferramenta de auxílio a problemas diversos de tomada de decisão locacional.

Os SIGs são projetados para armazenar, recuperar, manipular, analisar e mapear dados geográficos. O elemento central de um SIG é o uso de um sistema de referência de localização para que os dados de um local específico possam ser analisados em relação a outros locais (Church, 2002). Câmara et al. (2003) propuseram uma fundamentação teórica para a Ciência da Geoinformação, apresentando conceitos de espaço desenvolvidos ao longo do século XX pela Geografia, as possibilidades de aplicação em SIG e as limitações da época.

Desde a década de 1970, os SIGs têm evoluído de maneira muito rápida para uma tecnologia madura com diversas linhas de pesquisa e aplicações práticas, envolvendo muitos campos acadêmicos, incluindo Geografia, Engenharia Civil, Ciência da Computação, Planejamento de Uso do Solo, Ciências Agrárias e Ciências Ambientais. De natureza transdisciplinar, estes sistemas agregam conceitos e modelos de diversos campos. Os SIGs podem suportar uma ampla gama de consultas espaciais que podem ser usadas para apoiar estudos de localização, que envolvam a utilização de análise multicritério (Akmal et al., 2022; Souza et al., 2020a) ou não (Silva & Santos Neto, 2020). Church (2002) afirmou que os SIGs desempenhariam um papel significativo no futuro desenvolvimento e aplicação de modelos de localização, o que hoje é confirmado na prática.

A AHP é uma teoria de medição baseada em comparação de pares. Nestas comparações são utilizados valores de julgamento para representar uma escala. A AHP é um método que sintetiza conhecimento, experiência e ponto de vista do especialista. O problema deve ser estruturado em níveis hierárquicos de modo que possibilite uma melhor avaliação e compreensão (Saaty, 1990; Toloi et al., 2022). Esse arranjo orienta os especialistas sobre as comparações par a par, ou paritárias, que devem ser feitas para que se obtenham as prioridades de um subatributo em relação a outro. Saaty & Vargas (2001) apontam que, por meio das comparações por pares, as prioridades avaliadas pela AHP capturam medidas subjetivas e objetivas que demonstram a intensidade de domínio de uma alternativa sobre outra. As comparações par a par são convertidas em valores numéricos em uma série de matrizes quadradas, usando uma escala fundamental de valores que representam a intensidade dos julgamentos comparativos (Tabela 1).

Tabela 1. Escala fundamental para julgamentos comparativos pareados.

Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Os dois atributos contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância fraca	A experiência e o julgamento favorecem levemente um atributo em relação a outro.
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem um atributo em relação a outro.
7	Importância muito forte	Um atributo é fortemente favorecido em relação a outro, com predomínio de importância demonstrado na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um atributo em relação a outro com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Condições intermediárias entre duas definições.

Fonte: Saaty & Vargas (2001).

A inconsistência é um fator inerente ao ser humano e, por isso, deve existir uma tolerância em determinados parâmetros para a sua aceitação (Saaty & Vargas, 2001). Os autores propuseram o Índice de Consistência (IC) com a Equação 1 para estabelecer limites aceitáveis.

$$IC = |(\lambda_{\max} - n)| / (n - 1) \quad (1)$$

em que (n) representa a ordem da matriz, e λ_{\max} (Equação 2), o estimador de autovalor máximo de julgamentos paritários.

$$\lambda_{\max} = T \cdot w \quad (2)$$

em que (T) é o somatório das colunas das matrizes e (w) é o autovetor normalizado para $\sum v_i = 1$.

Saaty e Vargas (2001) afirmam ainda que a gravidade da ocorrência de inconsistência é reduzida com o aumento da ordem da matriz de julgamentos. Logo, com o objetivo de permitir a avaliação da inconsistência em função da ordem máxima da matriz de julgamento, os autores propõem o cálculo da Razão de Consistência (RC), conforme a Equação 3.

$$RC = IC / IR \quad (3)$$

em que IR é um índice randômico de consistência obtido para uma matriz recíproca, com elementos não negativos gerados de forma randômica.

Quanto à integração de funcionalidades de SIG e métodos de Análise Multicritério, Mendas & Delali (2012) apontam que um modelo único facilita a agregação de dados de naturezas distintas e correlacionados espacialmente. Além disso, a exibição gráfica destes modelos proporciona ao tomador de decisão informações de melhor qualidade e fácil entendimento. Com o emprego do SIG, os dados podem estar disponíveis em um formato que será facilmente interpretado, podendo ser utilizado para diferentes tipos de processamento digital, além de exibir os dados interativamente e com facilidade de atualização.

De todos os métodos de análise que agregam AHP e SIG, Malczewski (2006) cita a soma ponderada como uma das técnicas mais utilizadas. Neste modelo, por meio do SIG, os subcritérios são combinados pela atribuição, a cada um deles, de um peso de importância relativa calculado previamente na AHP, seguida pela soma dos resultados para gerar um mapa de prioridade (Equação 4).

$$P = \sum(w_i * x_i) * \prod c_j \tag{4}$$

em que: P = a prioridade; w_i = peso do critério i ; x_i = valor do critério i ; c_j = valor da restrição j , que pode ser 1 ou 0, isto é, áreas aptas ou áreas inaptas.

3. Metodologia

Este estudo foi conduzido em uma área de 731.732,71 km² (Figura 1), englobando os estados do Maranhão (MA), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Bahia (BA), conhecida pelo acrônimo MATOPIBA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015). O MATOPIBA produziu 16,5 milhões de toneladas em 2021, em uma área de 4,7 milhões de hectares, representando 12,2% do volume produzido de soja e 12,1% da área cultivada no Brasil (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021). A área plantada nesta região deve crescer 14,8% nos próximos dez anos e a produção deve alcançar 32,6 milhões de toneladas em 2029/2030 (Brasil, 2020).

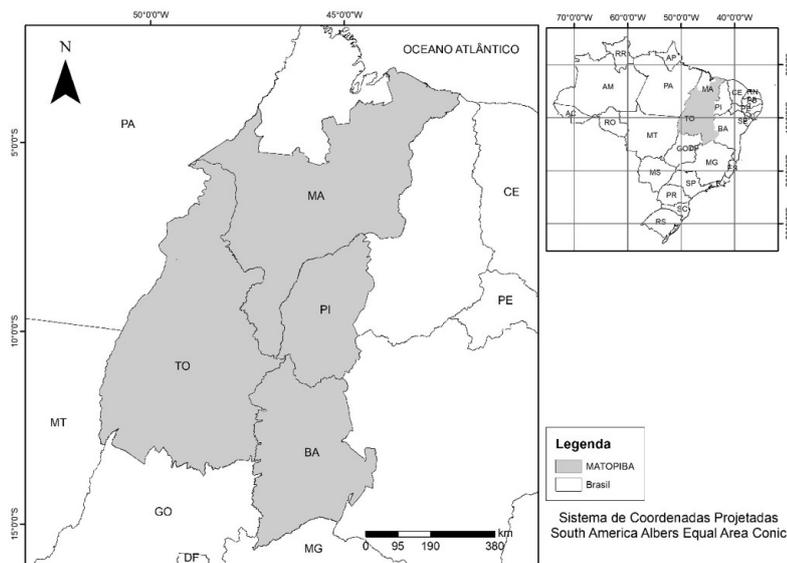


Figura 1. Localização da área de estudo.

O método multicritério utilizado contou com um processo em quatro etapas (Figura 2) para identificar as áreas adequadas para a instalação de armazéns graneleiros. As duas primeiras etapas compreendem a AHP, e as duas últimas etapas correspondem ao geoprocessamento em SIG.

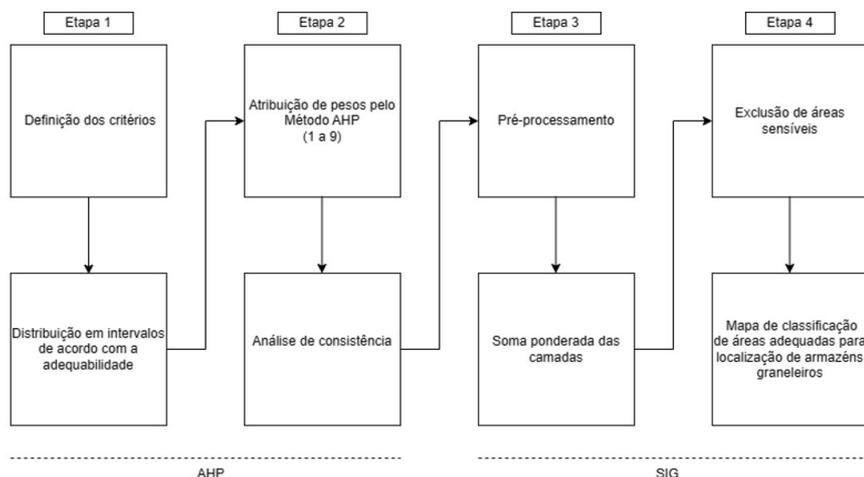


Figura 2. Fluxograma do modelo conceitual para análise de áreas adequadas para a construção de armazéns.

Fonte: adaptada de Çetinkaya et al. (2021).

A primeira etapa consistiu em definir as principais variáveis utilizadas e categorizá-las. Os critérios foram selecionados com base em Noori et al. (2022), Çetinkaya et al. (2021), Abdelouhed et al. (2022) e Raad et al. (2022). Foram definidos três critérios (A, B e C) divididos em subcritérios (Tabela 2).

Tabela 2. Critérios e subcritérios adotados na tomada de decisão para a instalação de armazéns graneleiros.

Subcritérios	Critérios		
	Infraestrutura	Agroambiental	Socioeconômico
Proximidade de rodovias (km) (A1)	Produção agrícola (t) (B1)	Índice de atração agropecuária de maquinários (C1)	
Proximidade de ferrovias (km) (A2)	Exclusão de áreas indígenas (km ²) (B2)	Índice de atração agropecuária de insumos (C2)	
Proximidade de hidrovias (km) (A3)	Exclusão de áreas quilombolas (km ²) (B3)	PIB do agronegócio (R\$) (C3)	
Proximidade de portos e terminais (km) (A4)	Exclusão de unidades de conservação (km ²) (B4)		
Distância de armazéns (km) (A5)			

O critério infraestrutura (A) considerou a proximidade de rodovias (A₁), proximidade de ferrovias (A₂), proximidade de hidrovias (A₃), proximidade de portos e terminais (A₄) e proximidade de armazéns (A₅) (Brasil, 2022a; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015). A subdivisão foi orientada de forma a promover a intermodalidade. No critério de proximidade de rodovias

(A1), adotou-se o maior peso para regiões em até 6 km de uma rodovia federal ou estadual; em contrapartida, locais situados a mais de 45 km receberam o peso menor (Tabela 3). O subcritério de distância dos armazéns (A_5) foi classificado de maneira inversa para evitar a sobreposição de áreas de captação de grãos com unidades armazenadoras já estabelecidas.

O critério agroambiental (B) considerou a produção agrícola municipal (B_1) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021), exclusão de áreas indígenas (B_2) (Fundação Nacional do Índio, 2022), exclusão de áreas quilombolas (B_3) (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 2022) e exclusão de unidades de conservação (B_4) (Brasil, 2022b). A produção agrícola (B_1) teve a sua adequabilidade estratificada em diferentes faixas de produção (Tabela 3).

O critério socioeconômico (C) considerou o índice de atração agropecuária para aquisição de maquinários (C_1), insumos (C_2) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018) e PIB do agronegócio (C_3) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2015).

Os subcritérios foram estratificados em classes de acordo com o método de Quebra Natural (Jenks, 1967). A Tabela 3 apresenta os subcritérios de adequação das áreas para instalação dos armazéns graneleiros, reclassificados em “Excelente”, “Boa”, “Moderada”, “Ruim” e “Imprópria”. A Quebra Natural de Jenks é largamente utilizada em análises de atributos espaciais (Jenks, 1967; Ward et al., 2021) e adequada para o problema em questão, em razão da grande quantidade de dados e da opção em adotar poucas classes (Ward et al., 2021; Costa et al., 2020).

Tabela 3. Critérios e subcritérios adotados na tomada de decisão para a instalação de armazéns graneleiros com suas respectivas classes de adequação à instalação de armazéns.

Subcritérios	Excelente	Boa	Moderada	Ruim	Imprópria
A1	< 6	6-15	15-25	25-45	> 45
A2	< 35	35-75	75-100	100-200	> 200
A3	< 20	20-45	45-75	75-120	> 120
A4	< 50	50-100	100-150	150-200	> 200
A5	> 100	75-100	50-75	20-50	< 20
B1	779-1.619	317-779	114-317	30-114	< 30
C1	1.967-4.476	946-1.967	271-946	72-271	< 72
C2	1.296-3.073	479-1.296	236-479	61-236	< 61
C3	303-647	204-303	112-204	47-112	< 47

A partir da AHP, na etapa dois, foram atribuídos pesos para os critérios e avaliada a consistência do método. A proximidade da infraestrutura de transporte foi priorizada, de acordo com o nível de importância de cada subcritério. A Tabela 4 apresenta os pesos atribuídos aos subcritérios, baseada nas comparações pareadas. A consistência da AHP foi avaliada pelos parâmetros Razão de Consistência (0,031) e Índice de Consistência (0,046). A Razão de Consistência ficou abaixo do valor limite de 0,10 utilizado em diferentes aplicações da AHP (Souza et al., 2020a; Oliveira et al., 2022).

Tabela 4. Pesos atribuídos pelo método AHP e limites superiores e inferiores.

Variáveis	Peso (%)	+/-
A1	11,20	3,70
A2	13,80	3,80
A3	15,00	4,30
A4	39,50	19,40
A5	15,00	4,30
B1	5,70	1,40
C1	3,80	1,30
C2	3,80	1,30
C3	3,80	1,30

Na etapa três, foram realizados o pré-processamento dos dados, a normalização e a soma ponderada das camadas. Os arquivos de entrada foram reprojeto para um sistema de projeção cônica (*South America Albers Equal Area Conic*) para não haver distorção dos cálculos de áreas subsequentes (Câmara et al., 2001). A distância euclidiana foi aplicada às camadas vetoriais, seguida pela conversão para formato matricial (*raster*). A resolução espacial adotada foi de 150 metros. As camadas foram reclassificadas e normalizadas em uma escala de 0 a 1. A soma ponderada foi realizada por meio de uma álgebra de mapas (Equação 5) na calculadora *raster* do software Esri ArcGIS 10.8.

$$\Sigma = 0,112A_1 + 0,138A_2 + 0,150A_3 + 0,395A_4 + 0,150A_5 + 0,057B_1 + 0,038C_1 + 0,038C_2 + 0,038C_3 \quad (5)$$

A etapa quatro excluiu as áreas inadequadas e identificou as melhores regiões. As áreas indígenas, quilombolas e unidades de conservação foram consideradas inadequadas para a instalação de armazéns graneleiros. Por fim, foram delimitadas regiões contínuas apontadas como excelentes a partir do mapa de classificação das áreas.

4. Resultados e Discussão

A partir dos critérios adotados, foram identificadas três grandes áreas contínuas classificadas como excelentes (Figura 3) nos estados de Tocantins (R1), Bahia (R2) e Maranhão e Piauí (R3). As três áreas somadas correspondem a aproximadamente 12% da área de estudo, sendo que as regiões R1 e R3 concentram 87% das áreas classificadas como excelentes.

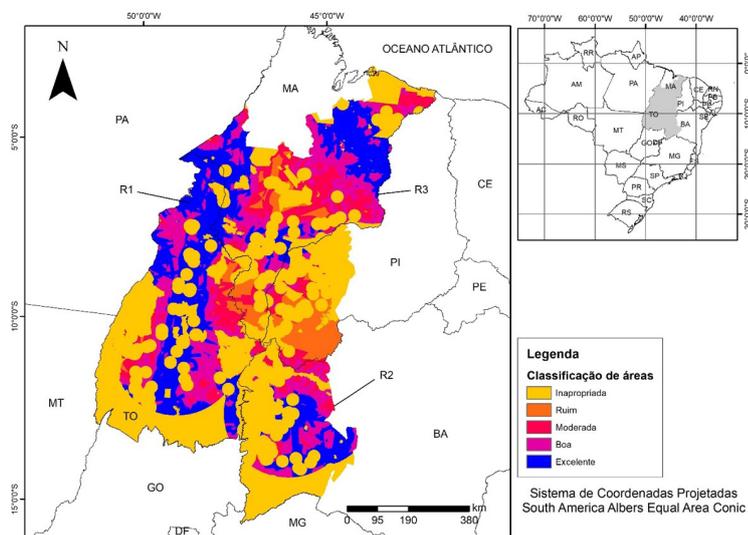


Figura 3. Adequação de áreas para a instalação de armazéns graneleiros.

As áreas classificadas como excelentes estão localizadas próximas a regiões com alta densidade de vias de transporte e distantes de outros armazéns graneleiros já existentes. Esta relação também foi encontrada por García et al. (2014), que consideraram a proximidade de rotas rodoviárias, ferroviárias e hidroviárias mais importantes do que a distância entre armazéns e centros de consumo. Estas áreas possuem melhores condições de infraestrutura e, potencialmente, promovem redução de custos de transporte e menores tempos de operação. Em contrapartida, Tolo et al. (2022) identificaram que as variáveis que mais influenciaram a

tomada de decisão para plantio da soja estavam relacionadas ao clima, solo e financiamento, e bem menos a fatores logísticos.

O trabalho de Demirel et al. (2010) ajuda a complementar essa análise. Os autores apontam que a operação de mercadorias em armazéns aumenta a demanda por um sistema de transporte adequado, o que inclui a presença de redes rodoviárias, portos exportadores, estações ferroviárias e aeroportos. Já Brigatte & Teixeira (2011) comprovaram que, no período de 1974 a 2005, investimentos em energia elétrica, pesquisa agrícola e armazenagem aumentaram o PIB agropecuário no longo prazo. Por sua vez, Figueiredo (2016) afirma que o crescimento da pesquisa privada por grandes empresas multinacionais em áreas produtivas resulta em uma concentração regional da produção de soja em áreas que recebem as maiores contribuições tecnológicas.

A área denominada R1 está localizada no estado do Tocantins (TO) e possui oito microrregiões, com uma área de 280 mil quilômetros quadrados (Figura 4). Em 2021, o estado produziu 3,7 milhões de toneladas de soja (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021). A FNS corta toda a extensão do estado, fortalecendo a intermodalidade logística da região e levando a produção até o porto de Itaqui, no Maranhão (Russo et al., 2022; Oliveira et al., 2021b). Estas opções intermodais disponíveis para a R1 contribuem para maior eficiência logística e redução dos custos de transporte. Na região R1 também estão presentes importantes unidades de conservação, como as Áreas de Proteção Ambiental (APA) Serra do Lajeado e Lago de Palmas e a Estação Ecológica (ESEC) Serra Geral do Tocantins, com uma área total de 8.915 quilômetros quadrados destinada à preservação do ecossistema e biodiversidade do Cerrado brasileiro (Brasil, 2022b).

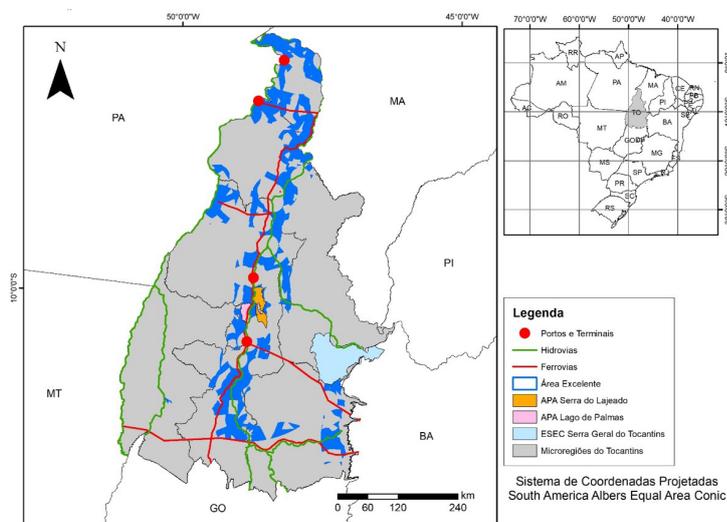


Figura 4. Identificação de áreas adequadas para a instalação de armazéns graneleiros com as microrregiões do estado do Tocantins.

A área R2 abrange o estado da Bahia (BA), é composta por quatro microrregiões e sua área corresponde a 132 mil quilômetros quadrados (Figura 5). O estado da Bahia é o maior produtor de soja do MATOPIBA, responsável por 6,8 milhões de toneladas em 2021 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021). A produção se concentra na região oeste do estado e já possui grande concentração de armazéns graneleiros; logo, a partir dos critérios estabelecidos, as indicações de localização para novas instalações se concentraram em áreas localizadas mais a leste do estado. A área R2 concentra projetos de infraestrutura com previsão para execução nos próximos anos, como a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), que receberá parte da produção agrícola e transportará para os portos no litoral, como os portos de Ilhéus e Aratu, na Bahia (Brasil, 2022a).

A Bahia também conta com trechos fluviais navegáveis, como parte do Rio Francisco, Rio Preto e Rio Grande, com possibilidade de crescimento para o transporte nos próximos anos.

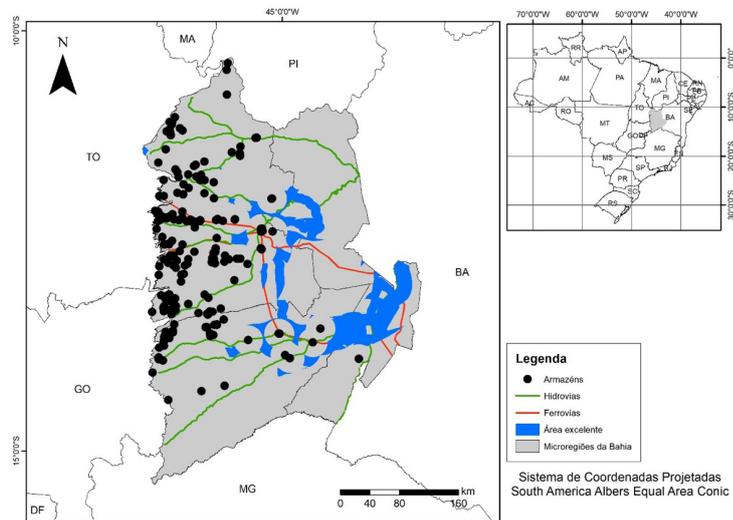


Figura 5. Identificação de áreas adequadas para a instalação de armazéns graneleiros com as microrregiões do estado da Bahia.

A área R3 representa o estado do Maranhão (MA) e Piauí (PI), que é composta por 19 microrregiões (15 no estado do Maranhão e 4 no estado do Piauí), com uma área total de 321,8 mil quilômetros quadrados (Figura 6). Em 2021, a produção de soja totalizou 6,0 milhões de toneladas de soja (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021). O estado do Maranhão possui duas grandes ferrovias operando em seu território, a FNS e a Estrada de Ferro Carajás (EFC), que movimentam *commodities* como grãos e minério de ferro (Brasil, 2022a). O Maranhão detém um dos principais portos responsáveis pela movimentação de grãos na região Nordeste, o porto de Itaqui, que apresenta papel de destaque na logística da região e contribui para a minimização do custo de escoamento dos grãos (Souza et al., 2023).

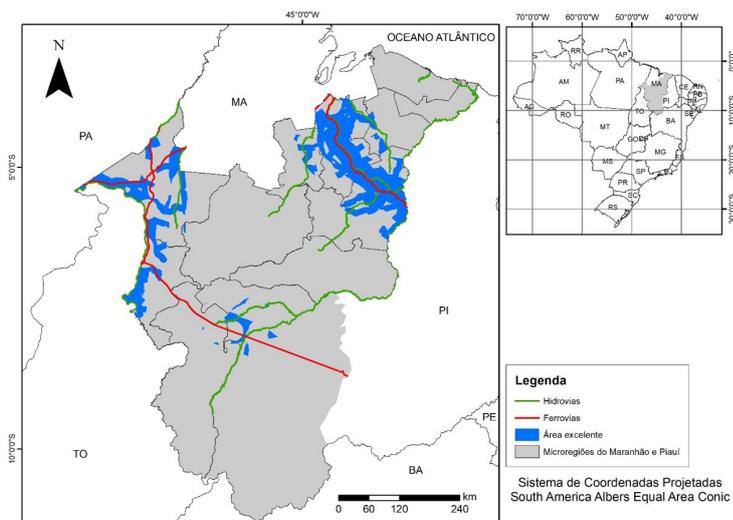


Figura 6. Identificação de áreas adequadas para a instalação de armazéns graneleiros com as microrregiões do estado do Maranhão e Piauí.

As regiões consideradas excelentes consideram as áreas próximas aos empreendimentos viários EFC e FNS, bem como a proximidade com o porto de Itaqui no Maranhão. O estado do Piauí apresentou a menor concentração de áreas excelentes, sendo a única correspondente a uma região de fronteira com o estado do Maranhão, onde se encontram trechos hidroviários e ferroviários.

Vale destacar na análise de localização de empreendimentos no MATOPIBA que se faz necessário considerar regiões sensíveis, a saber: unidades de conservação, áreas indígenas e quilombolas. Uma das principais regiões produtoras se localiza nas fronteiras entre os quatro estados, na qual se localiza o Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba (PARNA Nascentes do Rio Parnaíba) (Brasil, 2022b). Esta área possui 7,2 mil quilômetros quadrados e já sofre os efeitos da produção extensiva e intensiva da soja (Figura 7). Os critérios priorizados excluem as áreas sensíveis a partir das possibilidades de localização. Porém, a proximidade em regiões de fronteira traz à tona preocupações acerca da preservação ambiental.

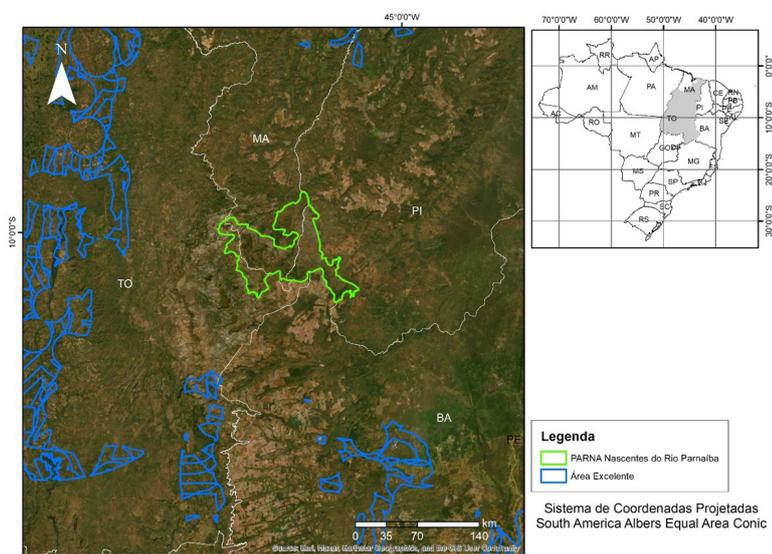


Figura 7, Adequação de áreas para a instalação de armazéns graneleiros nas proximidades de unidade de conservação

Ao considerar o planejamento futuro da expansão agropecuária e o protagonismo do MATOPIBA, a integração lavoura-pecuária-floresta baseada em um planejamento agrícola eficiente, visando aumentar a produtividade das lavouras de forma a incentivar a manutenção de áreas de vegetação remanescentes, representa uma alternativa que pode contribuir para a promoção do agronegócio na região associado à conservação ambiental (Polizel et al., 2021). Na região do MATOPIBA, ainda existem muitas áreas ocupadas por gado de baixa produtividade e que poderiam ser destinadas ao cultivo de soja sem a necessidade de mais desmatamento (Strassburg et al., 2017).

Essa intensificação começa com a renovação das pastagens, o que contribui para o aumento na capacidade de suporte do solo e na mitigação das mudanças climáticas (Silva et al., 2018). Além disso, investimentos em modais de transporte mais eficientes e menos poluentes, como o ferroviário e o hidroviário, devem ser priorizados na agenda governamental (Oliveira et al., 2021a; Oliveira et al., 2021b; Souza et al., 2020b).

A concentração das maiores regiões produtoras no MATOPIBA requer apoio de políticas públicas e maiores incentivos para o aumento dos índices de produtividade e redução das assimetrias de desenvolvimento nos municípios (Batista et al., 2023). As regiões centro-leste

do Maranhão e norte do Tocantins estão localizadas na região de transição Amazônia-Cerrado, enquanto a microrregião de Bom Jesus da Lapa, na Bahia, está localizada na região de transição Cerrado-Caatinga. Para Silva et al. (2018), uma área de transição entre diferentes biomas apresenta uma grande diversidade de ecossistemas e condições climáticas, bem como áreas com menor fertilidade natural, tornando-as particularmente vulneráveis às mudanças climáticas. Desta forma, a migração e a intensificação da produção de soja para estas regiões devem ser evitadas.

5. Conclusões

Este estudo mostra a eficiência da combinação de critérios de localização ambientais e de intermodalidade para a identificação de regiões mais adequadas para a instalação de unidades armazenadoras. Com base na metodologia proposta, foram identificadas três grandes áreas contínuas para a instalação das novas unidades armazenadoras que foram classificadas como excelentes. As áreas mais adequadas estão localizadas em regiões com alta densidade de vias de transporte e distantes de armazéns graneleiros já existentes. Ficou evidente que a infraestrutura logística atual e potencial é determinante para o estabelecimento de novos projetos de expansão da rede de armazenagem.

Os resultados evidenciam que é possível estabelecer um processo de expansão agrícola e de infraestrutura logística de forma sustentável, desde que adotados os parâmetros corretos de sustentabilidade. A contribuição teórica se deu pelo fato de que, a partir da combinação de AHP e técnicas de geoprocessamento, foi possível considerar critérios de infraestrutura, ambientais e socioeconômicos que promoveram a racionalização e o direcionamento dos investimentos, excluindo as áreas de conservação, áreas indígenas e quilombolas.

Outra contribuição teórica da pesquisa foi a de considerar aspectos que podem ser conflitantes e, muitas vezes, são negligenciados no planejamento da localização da infraestrutura logística, como critérios de preservação ambiental e de promoção da intermodalidade.

Quanto à contribuição prática, o método permite hierarquizar as regiões candidatas para a instalação de armazéns considerando, além dos aspectos econômicos da implantação, fatores logísticos e ambientais, servindo de subsídio para os gestores públicos e privados tomarem a decisão para a expansão da rede armazenadora em regiões de fronteira agrícola.

O protagonismo do MATOPIBA fundamentado em um planejamento agrícola eficiente que não promova o desmatamento pode ser apoiado pelo estabelecimento de um sistema logístico intermodal, contribuindo para as bases de um desenvolvimento sustentável. Logo, este tipo de pesquisa tem o potencial de desencadear um processo virtuoso, uma vez que a racionalização da aplicação de investimentos minimiza impactos ambientais e promove o uso de modais de transporte mais eficientes e menos poluentes. Isto porque o estabelecimento de sistemas intermodais, apoiado por uma rede de armazenagem bem distribuída e localizada, é capaz de iniciar esta circularidade de eventos.

Ao possibilitar a agregação de um conjunto de variáveis distintas, a utilização da AHP associada ao SIG permite analisar atributos econômicos e ambientais espacialmente, com grande volume de dados e com maior precisão. Entretanto, uma limitação que pode estar associada à AHP é a presença de certo grau de empirismo e subjetividade exigido do pesquisador na análise. A imprecisão e a incompletude dos dados georreferenciados são outras limitações identificadas neste estudo, que podem ser atribuídas à coleta dos dados pelas fontes adotadas.

Como sugestões de trabalhos futuros, a inclusão de outras variáveis, como a malha rodoviária municipal e o valor do preço da terra, pode contribuir para aprimorar a determinação da

localização de instalações. Para reduzir a subjetividade do modelo, a combinação de outros métodos multicritérios, exatos ou heurísticos, pode fornecer novos elementos quanto às estratégias acerca da armazenagem agrícola.

Referências

- Abdelouhed, F., Ahmed, A., Abdellah, A., Yassine, B., & Mohammed, I. (2022). GIS and remote sensing coupled with analytical hierarchy process (AHP) for the selection of appropriate sites for landfills: a case study in the province of Ouarzazate, Morocco. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 69(1), 1-23.
- Akıncı, H., Özalp, A. Y., & Turgut, B. (2013). Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 71-82.
- Akmal, F., Khan, S. U., Luqman, M., & Ahmad, S. R. (2022). Urban sprawl susceptibility analysis of Sialkot city by using multicriteria evaluation and analytical hierarchy process. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(2), 04022013.
- Batista, M. L. B., Alves, J. S., Alves, C. L. B., & André, D. M. (2023). Análise fatorial e espacial da modernização agrícola no MATOPIBA. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 61(3), e261413.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. (2020). *Projeções do agronegócio – Brasil 2019/20 a 2029/30*. Brasília: MAPA. Recuperado em 11 de maio de 2022, de https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/ao-completar-160-anos-ministerio-da-agricultura-preve-crescimento-de-27-na-producao-de-graos-do-pais-na-proxima-decada/ProjecoesdaAgronegocio2019_20202029_2030.pdf
- Brasil. Ministério da Infraestrutura – MINFRA. (2022a). Recuperado em 11 de maio de 2022, de <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit>
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente – MMA. (2022b). Recuperado em 8 de maio de 2022, de <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>
- Brigatte, H., & Teixeira, E. C. (2011). Determinantes de longo prazo do produto e da Produtividade Total dos Fatores da agropecuária brasileira no período 1974-2005. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 49(4), 815-836.
- Câmara, G., Davis, C., Monteiro, A. M. V., & D'Alge, J. C. (2001). *Introdução à ciência da geoinformação* (345 p.). São José dos Campos: INPE.
- Câmara, G., Monteiro, A. M. V., & Medeiros, J. S. (2003). Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. *Geografia*, 28(1), 83-96.
- Çetinkaya, C., Özceylan, E., & Keser, İ. (2021). A GIS-based AHP approach for emergency warehouse site selection: a case close to Turkey-Syria border. *Journal of Engineering Research*, 10(3A), 1-21.
- Church, R. L. (2002). Geographical information systems and location science. *Computers & Operations Research*, 29(6), 541-562.
- Costa, F. R., Ribeiro, C. A. A. S., Marcatti, G. E., Lorenzon, A. S., Teixeira, T. R., Domingues, G. F., Castro, N. L. M., Santos, A. R., Soares, V. P., Menezes, S. D. M. C., Mota, P. H. S., Telles, L. A. A., & Carvalho, J. M. (2020). GIS applied to location of bioenergy plants in tropical agricultural areas. *Renewable Energy*, 153, 911-918.
- Demirel, T., Demirel, N. C., & Kahraman, C. (2010). Multi criteria warehouse location selection using Choquet integral. *Expert Systems with Applications*, 37(5), 3943-3952.

- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (2015). *Mapa MATOPIBA*. Recuperado em 11 de maio de 2022, de <http://mapas.cnpm.embrapa.br/matopiba2015/>
- Empresa de Planejamento e Logística – EPL. (2023). *Movimentação ferroviária*. Recuperado em 13 de fevereiro de 2023, de <https://ontl.epl.gov.br/paineis-analiticos/paineis-do-setor-ferroviario/movimentacao-ferroviaria/>
- Ennaji, W., Barakat, A., El Baghdadi, M., Oumenskou, H., Aadraoui, M., Karroum, L. A., & Hilali, A. (2018). GIS-based multi-criteria land suitability analysis for sustainable agriculture in the northeast area of Tadla plain (Morocco). *Journal of Earth System Science*, 127, 1-14.
- Eroglu, H. (2021). Multi-criteria decision analysis for wind power plant location selection based on fuzzy AHP and geographic information systems. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 18278-18310.
- Figueiredo, P. N. (2016). New challenges for public research organisations in agricultural innovation in developing economies: evidence from Embrapa in Brazil's soybean industry. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 62, 21-32.
- Filassi, M., & Oliveira, A. L. R. (2022). Competitiveness drivers for soybean exportation and the fundamental role of the supply chain. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60(3), e235296.
- Filippi, A. C. G., Cunha, C. A., Guarnieri, P., & Wander, A. E. (2023). Determinant factors of the Rural Warehouse Condominium collective action model. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 61(1), e256385.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. (2021). *OECD-FAO agricultural outlook 2021-2030*. Paris: FAO. Recuperado em 3 de maio de 2022, de https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en
- Fundação Nacional do Índio – FUNAI. (2022). Recuperado em 9 de maio de 2022, de <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>
- García, J. L., Alvarado, A., Blanco, J., Jiménez, E., Maldonado, A. A., & Cortés, G. (2014). Multi-attribute evaluation and selection of sites for agricultural product warehouses based on an analytic hierarchy process. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 60-69.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2018). Recuperado em 16 de março de 2023, de <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/redes-e-fluxos-geograficos/15798-regioes-de-influencia-das-cidades.html?=&t=acesso-ao-produto>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2021). *PAM - Produção Agrícola Municipal*. Recuperado em 24 de fevereiro de 2023, de <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=downloads>
- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA. (2022). Recuperado em 9 de maio de 2022, de https://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py
- Jenks, G. F. (1967). The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, 7, 186-190.
- Lucas, M. T., & Chhajed, D. (2004). Applications of location analysis in agriculture: a survey. *The Journal of the Operational Research Society*, 55(6), 561-578.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703-726.

- Martins, R. S., Rebechi, D., Prati, C. A., & Conte, H. (2005). Decisões estratégicas na logística do agronegócio: compensação de custos transporte-armazenagem para a soja no estado do Paraná. *Revista de Administração Contemporânea*, 9(1), 53-78.
- Mendas, A., & Delali, A. (2012). Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, 117-126.
- Noori, A., Bonakdari, H., Hassaninia, M., Morovati, K., Khorshidi, I., Noori, A., & Gharabaghi, B. (2022). A reliable GIS-based FAHP-FTOPSIS model to prioritize urban water supply management scenarios: a case study in semi-arid climate. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103846.
- Oliveira, A. L. R. D., Filassi, M., Lopes, B. F. R., & Marsola, K. B. (2021a). Logistical transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of the origin-destination matrix. *Ciência Rural*, 51(2), e20190786.
- Oliveira, C. A. D., Oliveira, A. L. R. D., & Souza, M. F. D. (2022). Determining regions for installing flex-biomass sugar-ethanol plants: a multicriteria approach for location. *Gestão & Produção*, 29, e1322.
- Oliveira, V. H. P., Tobias, M. S. G., Rocha, M. P. C., Farias, V. J. C., & Souza, M. M. (2021b). Optimizaion method for the analysis of intermodal alternatives to transport soybean production in the states of Pará and Tocantins, Brazil. *International Journal of Developmental Research*, 11(11), 51912-51918.
- Patra, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: a case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2485-2502.
- Polizel, S. P., Vieira, R. M. D. S. P., Pompeu, J., Ferreira, Y. C., Sousa-Neto, E. R., Barbosa, A. A., & Ometto, J. P. H. B. (2021). Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado-MATOPIBA region (Brazil). *Land Use Policy*, 109, 105713.
- Raad, N. G., Rajendran, S., & Salimi, S. (2022). A novel three-stage fuzzy GIS-MCDA approach to the dry port site selection problem: a case study of Shahid Rajaei Port in Iran. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108112.
- Reis, J. G. M. D., Vendrametto, O., Naas, I. D. A., Costabile, L. T., & Machado, S. T. (2016). Avaliação das estratégias de comercialização do milho em MS Aplicando o Analytic Hierarchy Process (AHP). *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 54(1), 131-146.
- Russo, T. O., Rocha, M. P. C., Tobias, M. S. G., Souza, M. M., & Silva, N. M. S. (2022). Analysis model of the corridor of the Arco Norte of the Amazon for the soybean of Mato Grosso. *International Journal for Innovation Education and Research*, 10(3), 84-104.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001) *Models, methods, concepts applications of the analytic hierarchy process*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- Shepherd, B. (2013). *Aid for trade and value chains in transport and logistics*. Paris: OECD. Recuperado em 11 de maio de 2022, de https://www.oecd.org/dac/aft/AidforTrade_SectorStudy_Transport.pdf

- Silva, J. V. L., & Santos Neto, N. F. (2020). Location of ecopoints through integration p-medians model with geographical information system. *Gestão & Produção*, 27(4), e4011.
- Silva, M. A., Lima, M., Silva Junior, C. A., Costa, G. M., & Peres, C. A. (2018). Achieving low carbon cattle ranching in the Amazon: "Pasture sudden death" as a window of opportunity. *Land Degradation & Development*, 29, 3535-3543.
- Souza, M. F., Pinto, P. H. G., Teixeira, R. B. A., Nascimento, C. O. L., & Nóbrega, R. A. A. (2020a). Dry port location optimization to foster sustainable regional development. *Sustentabilidade em Debate*, 11(2), 208-237.
- Souza, M. F., Tisler, T. R., Castro, G. S. A., & Oliveira, A. L. R. (2023). Port regionalization for agricultural commodities: mapping exporting port hinterlands. *Journal of Transport Geography*, 106, 103506.
- Souza, M. M., Rocha, M. P. C., Farias, V., & Tavares, H. (2020b). Optimization of soybean outflow routes from Mato Grosso, Brazil. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8(8), 176-191.
- Strassburg, B. B. N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A. E., Oliveira Filho, F. J. B., Scaramuzza, C. A. M., Scarano, F. R., Soares-Filho, B., & Balmford, A. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0099.
- Toloi, R. C., Reis, J. G. M. D., Toloi, M. N. V., Vendrametto, O., & Cabral, J. A. S. P. (2022). Applying analytic hierarchy process (AHP) to identify decision-making in soybean supply chains: a case of Mato Grosso production. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60(2), e229595.
- United States Department of Agriculture – USDA. (2022). *Oilseeds: world markets and trade*. Recuperado em 3 de maio de 2022, de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>
- Valente, D. S., Queiroz, D. M. D., Corrêa, P. C., Silva, L. C. D., & Vale, S. M. (2011). A decision support system for cost determination in grain storage facility operations. *Engenharia Agrícola*, 31, 735-744.
- Ward, M., Poleacovschi, C., & Perez, M. (2021). Using AHP and spatial analysis to determine water surface storage suitability in Cambodia. *Water*, 13(3), 367.
- Weber, E. A. (2001). *Armazenagem agrícola* (2. ed.). Guaíba: Agropecuária.

Recebido: Outubro 13, 2022

Aceito: Março 16, 2023

JEL Classification: Q13, Q15