LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Análise GIS-MCDM na definição de vulnerabilidade a queimadas e avaliação de centralidade para a localização de ponto de apoio

Pedro Henrique Carvalho da Silva
Universidade Federal do Piauí
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella - Ininga, Teresina - PI
phcarvalho@ufpi.edu.br
Maria Beatriz Sousa de Oliveira
Universidade Federal do Piauí
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella - Ininga, Teresina - PI
maria_beatriz@ufpi.edu.br
Maria Eduarda Magalhães Rocha
Universidade Federal do Piauí
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella - Ininga, Teresina - PI
mariaeduardarocharr@ufpi.edu.br
Guilherme Gustavo do Nascimento Neves
Universidade Federal do Piauí
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella - Ininga, Teresina - PI
guineves@ufpi.edu.br
Amanda Gadelha Ferreira Rosa
Universidade Federal do Piauí
Campus Universitário Ministro Petrônio Portella - Ininga, Teresina - PI
amanda.rosa@ufpi.edu.br

RESUMO

O fogo desempenha um papel importante na evolução da humanidade, mas também pode causar danos ambientais e econômicos. Este artigo aplica a análise multicritério em conjunto com um sistema de informação geográfica para avaliar a vulnerabilidade das mesorregiões piauienses a ocorrência de queimadas. A metodologia desenvolvida se fundamenta no uso do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para criação de um ranking das regiões e, uma vez identificada a região mais propícia a ocorrência do evento, determina-se o município mais vantajoso do ponto de vista das centralidades intermediárias, sendo escolhido aquele que possui melhor comunicação com os demais. Como resultado, o método AHP retornou a mesorregião sudeste do estado do Piauí como a mais vulnerável, e considerando-se essa área, identificou-se a cidade de Oeiras como a mais indicada para o estabelecimento de ponto de apoio.
PALAVRAS CHAVE. Queimadas. Análise de Vulnerabilidade. GIS-MCDM.
Tópicos: ADM – Apoio à Decisão Multicritério; AG&MA – PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

Fire plays an important role in the evolution of humanity, but it can also cause environmental and economic damage. This article applies multicriteria analysis in conjunction with a geographic information system to assess the vulnerability of the mesoregions of Piauí to the occurrence of wildfires. The developed methodology is based on the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to create a ranking of the regions. Once the region most prone to the occurrence of the event is identified, the most advantageous municipality from the perspective of intermediate centralities is determined, with the one that has the best communication with the others being chosen. As a result, the AHP method identified the southeastern mesoregion of the state of Piauí as the most vulnerable, and considering this area, the city of Oeiras was identified as the most suitable for the establishment of a support point
KEYWORDS. Fires. VulnerabilityAnalysis. GIS-MCDM.
Paper topics: AMD; AG&MA – PO

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

1. Introdução

O fogo vem acompanhando a história da humanidade desde seus primórdios, tendo papel de importância, auxiliando principalmente em atividades de manejo do solo e pastoris [Coutinho 1980]. Contudo, o fogo também pode causar danos ambientais [Diakakis et al 2017], econômicos, materiais, perdas humanas e humanitárias [Filipe e Serralha 2015].

Nesse sentido, o presente artigo apresenta uma aplicação de sistemas de informação geográfica e método multicritério, ou simplesmente GIS-MCDM, na avaliação de vulnerabilidade à queimadas nas mesorregiões piauienses, para posterior identificação de local para instalação de apoio ao combate a incêndios, de forma que se tenha uma área de cobertura e acessibilidade regional satisfatória, por meio da análise das centralidades intermediárias dos municípios.

A análise multicritério (MCDM) é uma forma de pesquisar e avaliar diferentes cenários que contenham diversas hipóteses de combinação de critérios. Tal análise é empregada para auxiliar de forma direta as tomadas de decisão [Malczewski 1999]. Para a utilização de MCDM, os sistemas de informação geográficas (GIS) fornecem dados que podem ser manipulados e analisados a fim dar suporte para a tomada de decisão [Malczewski 2004]. Dentre os métodos MCDM, pode-se citar *Analytic Hierarchy Process* (AHP) [Valente e Vettorazzi 2006], utilizado no estudo para estabelecer um ranking da vulnerabilidade das mesorregiões piauienses aos eventos de queimadas.

Este artigo está dividido em 4 seções. A Seção 2 apresenta a metodologia desenvolvida. Na Seção 3, tem-se os resultados acerca da solução obtida. A Seção 4 evidencia as conclusões e levanta possíveis trabalhos futuros.

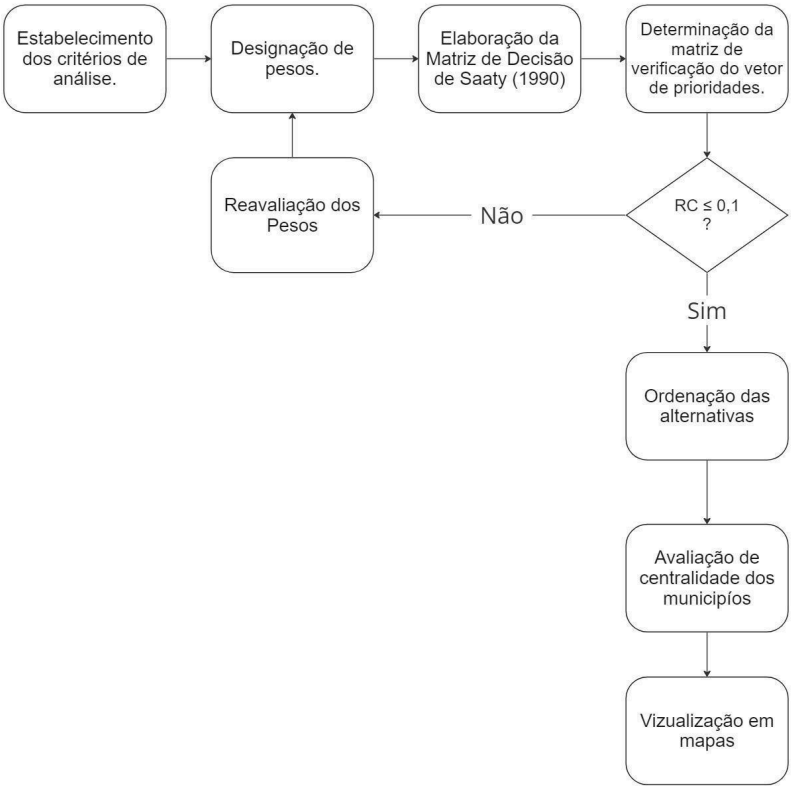
2. Metodologia

O presente estudo tem como base o uso de sistema de informação geográfica (GIS) em conjunto com método de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O uso conjunto das abordagens permite que dados espaciais sejam tratados e visualizados no processo decisório, servindo de apoio às ações, considerando-se os possíveis espaços de consequências [Saeed 2014]. Para tanto, utilizou-se o software *Priority Estimation Tool* (PriEsT), uma ferramenta de análise de decisão baseada no método AHP [Siraj et al. 2015].

O método AHP foi selecionado por sua capacidade de combinar dados numéricos e descritivos, e por ser amplamente reconhecido e utilizado no apoio à tomada de decisão, proporcionando uma estrutura clara, de modo a garantir a transparência e conformidade das escolhas [Nunes 2018]. A Figura 1 exibe as etapas necessárias para a aplicação do método AHP, no qual a Razão de Consistência (RC) é empregada para avaliar o grau de consistência das comparações entre os pares de critérios.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

Figura 1 - Framework do processo elaborado



Fonte**:** Adaptado de Souza Filho et al. [2022]

Conforme a Figura 1, o presente estudo se baseia na adaptação do trabalho de Souza Filho [2022] para a ordenação das mesorregiões quanto ao risco de queimadas, por meio do uso do AHP. As etapas de avaliação de centralidade dos municípios da mesorregião mais vulnerável e a visualização em mapas foram incorporadas com o objetivo de enriquecer a análise e fortalecer os resultados. O cálculo da centralidade foi realizado para identificar os municípios que desempenham um papel mais significativo na comunicação entre os demais [Brandes 2008]. Os mapas foram criados utilizando o software QGIS, versão 3.36.

2.1 Aplicação do método

O AHP é uma ferramenta de apoio à decisão que trata a subjetividade nos processos decisórios por meio de hierarquias de múltiplos critérios e subcritérios, os resultados são apresentados como prioridades, facilitando a comparação das alternativas e a qualidade dos resultados depende da coerência na atribuição dos julgamentos proporcionais dos critérios [Saaty 1987].

Definidos os critérios, realiza a comparação paritária entre eles, utilizando pesos. Para essa análise, foi empregada a escala fundamental de Saaty. A quantificação dos julgamentos baseou-se em valores variando de 1 a 9, conforme apresentado no Quadro 1.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

Quadro 1 - Escala fundamental de Saaty

Escala absoluta	Classificação	Explicação
1	Igual	Ambos os elementos contribuem da mesma forma para o objetivo.
3	Moderada	O elemento comparado tem uma importância um pouco maior que o outro.
5	Essencial	A experiência e o julgamento dão uma vantagem significativa a esse elemento em comparação com o outro.
7	Muito Essencial	O elemento comparado é muito mais poderoso que o outro, e essa importância é evidente na prática.
9	Extrema	O elemento comparado possui o mais elevado nível de evidência em seu favor.
2,4,6,8	Valores intermediários entre dois julgamentos são utilizados quando o avaliador encontra dificuldade em escolher entre dois níveis de importância adjacentes.	

Fonte: Saaty [1990]

Com base na escala de Saaty [1987], foi construída a matriz de comparação recíproca, como mostrado na Figura 2, onde os critérios A e B são comparados. O valor atribuído à comparação entre A e B é representado por x. Na matriz, a diagonal principal têm seus valores iguais a um, e isso denota que os critérios são indiferentes a eles mesmos. Além disso, observa-se que o critério A é preferível em relação ao critério B.

Quadro 2 - Matriz de comparação de critérios

Critério	A	B
A	1	x
B	1/x	1

Fonte: Souza Filho et al. [2022]

A matriz de comparação assegura que o julgamento permaneça consistente e equilibrado, refletindo as preferências relativas entre os critérios. E a partir dela, calcula-se o "autovetor de prioridades". As conclusões das análises são expostas, conforme a Equação 1:

$$s = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & s_{1n} \\ s_{21} & 1 & s_{2n} \\ s_{n1} & s_{n2} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A Equação 1, é normalizada dividindo-se cada elemento da matriz pela soma dos elementos de sua respectiva coluna, conforme a Equação 2:

$$S_{normalizada}(i,j) = s_{ij} / \sum_{i=1}^{n} s_{ij} \quad (2)$$

Após a normalização, o vetor de prioridades (w_i) é obtido calculando a média dos valores em cada linha da matriz normalizada, conforme a Equação 3:

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

$$w_i = (1/n) \cdot \sum_{j=1}^{n} S_{normalizada}(i,j) \quad (3)$$

O vetor de prioridade global (w_j) das alternativas é obtido combinando o vetor de prioridades (w_i) com as prioridades locais das alternativas, conforme a Equação 4:

$$w_j = \sum_{i=1}^{n} w_i s_{ij} \quad (4)$$

Para garantir a coerência das comparações realizadas na matriz de comparação paritária, se realiza a análise de consistência dos julgamentos, seguindo o método de Saaty [1987].

1. Multiplicar a matriz de comparação original *s* pelo vetor de prioridades *w*, obtendo-se a matriz ponderada (Equação 5):

$$s \times w = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & s_{2n} \\ s_{n1} & s_{n2} & s_{3n} \end{bmatrix} \begin{matrix} w_1 \\ w_2 \\ w_n \end{matrix} = \begin{matrix} \lambda_1 w_1 \\ \lambda_2 w_2 \\ \lambda_n w_n \end{matrix} \quad (5)$$

2. O maior autovalor (λ_{max}) é calculado dividindo-se os elementos do vetor resultante pela respectiva componente do vetor de prioridades *(w_i)* (Equação 6):

$$\lambda_{max} = \left(\sum_{j=1}^{n} s_{ij} w_j \right) / w_i \quad (6)$$

3. A Razão de Consistência (*RC*) é obtida por meio da Equação 7:

$$RC = IC/RA \leq 0,1 \quad (7)$$

Onde,

- *IC* é o índice de consistência, calculado conforme Equação 8:

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (8)$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

- *IA* é o índice aleatório. Os valores de IA, fornecidos por Saaty, variam de acordo com o número de critérios considerados e estão detalhados no Quadro 3.

Quadro 3 - Índice aleatório de Saaty

Dimensão da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistência aleatória	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

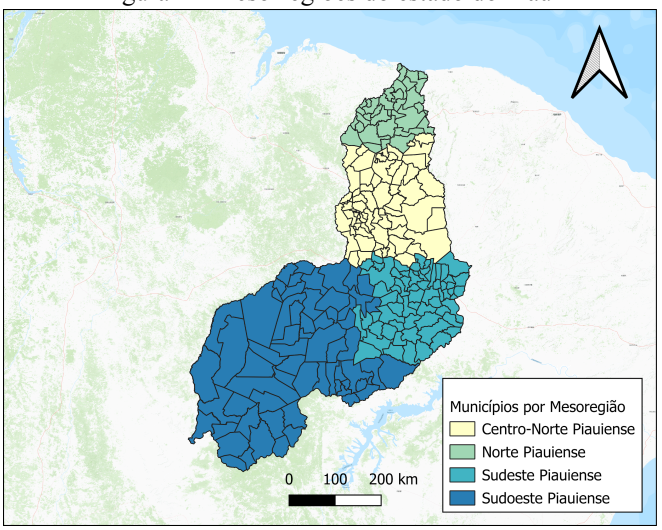
Fonte: Saaty [1987]

Se RC ≤ 0.10, os julgamentos são considerados consistentemente aceitáveis, caso contrário, pode ser necessário revisar os julgamentos, pois indica inconsistência.

3. Resultados

O estudo foi desenvolvido para análises de vulnerabilidade às queimadas no estado do Piauí. O estado, situado na região Nordeste do Brasil, conta com uma população de aproximadamente 3,2 milhões de pessoas e possui uma extensão territorial de 251.755,481 Km^2. Em 2023, o Piauí esteve entre os 5 estados com maior ocorrência de queimadas, totalizando 12.957 ocorrências, ficando atrás do Pará, Mato Grosso, Maranhão e Amazonas, com o município de Uruçuí com um maior número de registros [Lima 2024]. O número alto dos focos de queimadas pode estar relacionado à expansão da agricultura na região e às mudanças climáticas, causando a antecipação de um clima mais seco [Fellet 2021]. Para a análise foram consideradas as mesorregiões piauienses (Figura 2).

Figura 2 - Mesorregiões do estado do Piauí



Fonte: Adaptado de IBGE [2022a]

Dentre os diferentes fatores que influenciam a ocorrência e propagação de incêndios, a literatura destaca: o tipo de cobertura vegetal, as características do material combustível, as variáveis meteorológicas, a topografia e as atividades humanas que geram ignição [Batista et al. 2014]. Para o presente estudo foram estabelecidos e considerados os seguintes critérios: área plantada [IBGE 2022b], biomas [IBGE 2022c], topografia [OpenTopography 2023]

Para a aplicação do método AHP, foram designados pesos aos critérios de forma que se obteve a matriz de decisão, Quadro 4.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

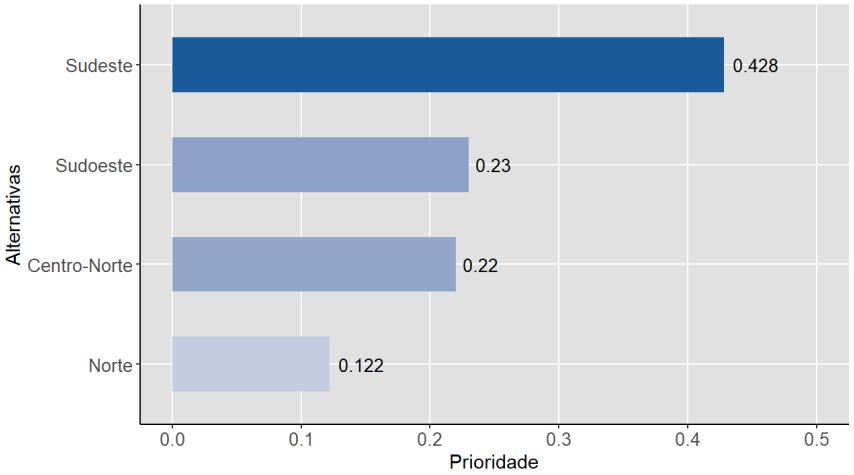
Quadro 4 - Matriz de comparação

	Área plantada	Biomas	Topografia
Área plantada	1,000	7,000	4,000
Biomas	0,143	1,000	0,250
Topografia	0,250	4,000	1,000

Fonte: Os autores (2024)

A partir da matriz de comparação (Quadro 4), o AHP pode ser executado conforme a metodologia descrita na Figura 1. Como resultados foram obtidas as classificações das mesorregiões (Figura 3), com obtenção de RC igual a 0.075, inferior ao limiar de 0.1, e, portanto, aceitável.

Figura 3 - Classificação de vulnerabilidade ao risco de queimadas



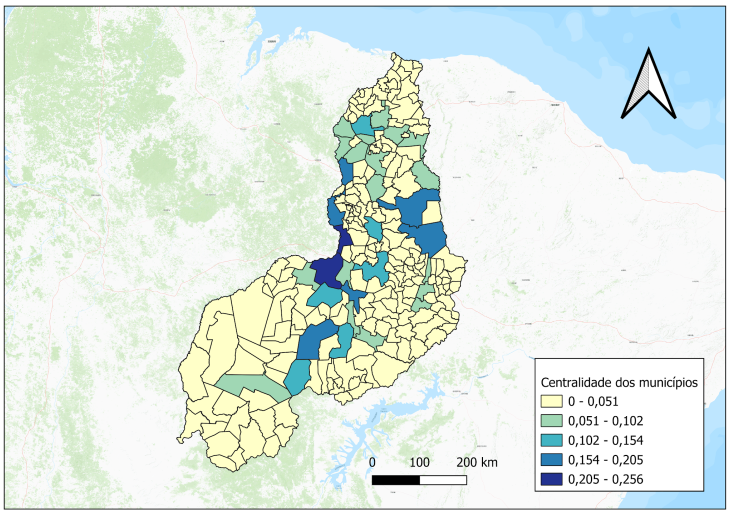
Fonte: Os autores [2024]

Conforme a Figura 3, a mesorregião com maior vulnerabilidade às ocorrências de queimadas é a sudeste.

Identificada a região com maior vulnerabilidade, estabeleceu-se a cidade para a colocação de ponto de apoio à queimada por meio da análise da centralidade intermediária dos municípios, a ideia é permitir que o pessoal de apoio bem como recursos necessários sejam capazes de ser alocados de maneira mais eficiente e rápida. Dito isso, a análise de centralidade dos municípios não foi realizada de maneira isolada para a região sudeste. Do ponto de vista da logística, a integralização das regiões é mais interessante, pois permite uma resposta mais rápida e eficaz às queimadas levando em conta todas as mesorregiões. Nesse sentido, optou-se pela escolha do município com maior centralidade, considerando-se a malha municipal de todo o estado do Piauí (Figura 4).

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

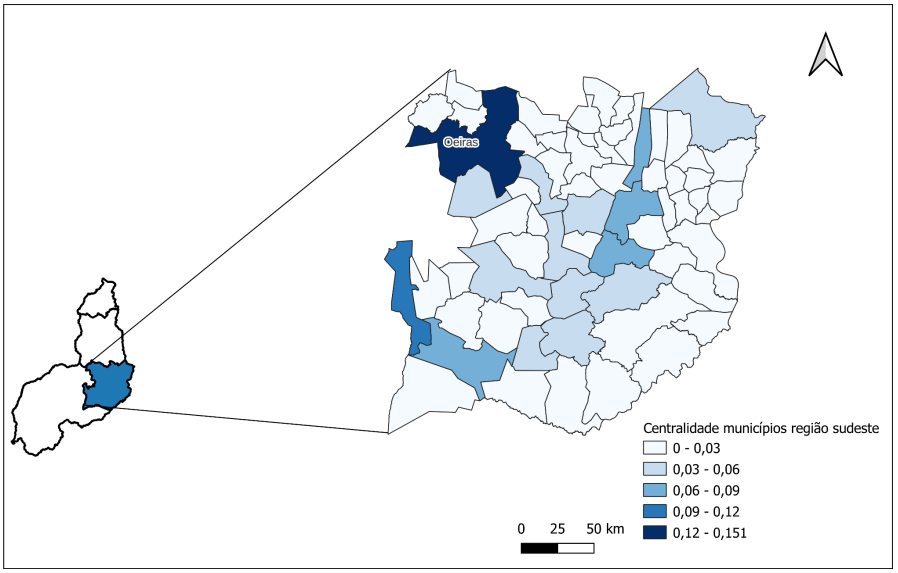
Figura 4 - Mapa de centralidade municipal



Fonte: Os autores [2024]

A Figura 5, mostra com maior clareza as centralidades intermediárias dos municípios da região sudeste, a partir da qual se observa que a cidade de Oeiras seria a melhor opção para a colocação de ponto de apoio.

Figura 5 - Centralidades intermediárias dos municípios da região sudeste



Fonte: Os autores [2024]

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

4. Conclusão e Discussão

A partir do estudo desenvolvido chegou-se a dois resultados distintos. O primeiro, aponta a região piauiense de maior vulnerabilidade aos incêndios e queimadas. O segundo, direciona para a melhor localização de implantação de centro de apoio ao evento analisado. Ambos os resultados se mostram satisfatórios tendo em vista que os dados históricos de queimadas no estado do Piauí [INPE 2022] apontam maior ocorrência de queimadas na região identificada como mais vulnerável pelo AHP. Para além disso, o município para ponto de apoio consegue ter uma conectividade espacial mais interessante ao estabelecer um caminho viável mais curto não apenas entre os municípios da região apontada como mais vulnerável, como também em relação aos demais municípios do Piauí.

Os resultados obtidos neste estudo apresentam implicações significativas para o planejamento e a gestão de recursos destinados à prevenção e combate a incêndios e queimadas. O reconhecimento da região piauiense como mais vulnerável destaca a necessidade de medidas preventivas e estratégicas de manejo mais eficientes nessa área específica. Da mesma maneira, a definição da cidade de Oeiras pode promover uma resposta rápida e eficaz a eventos relacionados a incêndios florestais.

O estudo desenvolveu-se sob limitações de dados, tendo em vista que a disponibilidade de informações climáticas de umidade, temperatura, precipitação, e temporalidade se limitavam a um conjunto menor de municípios. Embora esses dados ausentes pudessem dar maior precisão ao estudo, os resultados preliminares não foram comprometidos.

Contudo, sugere-se para análises futuras a reavaliação dos resultados com uma base de dados mais completa e em conjunto com órgãos competentes a fim de enriquecer a gama de critérios analisados e trazer insights significativos para ações de combate e controle de queimadas no estado do Piauí, visando a expansão da análise para toda a extensão do estado. Nesse sentido, torna-se igualmente importante a compreensão do dinamismo logístico da implantação de múltiplos pontos de apoio por meio da análise das malhas viárias, o que poderia fornecer maior consistência no fluxo de insumos e pessoal. Adicionalmente, tem-se que a metodologia proposta, se ajustada, pode ser replicada para outras regiões/ estados brasileiros.

Referências

Batista, A. C., Tetto, A. F., Deppe, F., Grodzki, L., e Grassi, J. T. (2014). Análise dos impactos das mudanças climáticas sobre o risco de incêndios florestais no estado do Paraná. *Scientia Forestalis*, 42(104):481-491.

Brandes, U. (2008). Sobre variantes da centralidade de intermediação de caminho mais curto e sua computação genérica. *Redes Sociais*, 30(2):136-145.

Coutinho, L.M. (1980). As Queimadas e seu Papel Ecológico. *Revista Brasil Florestal*, 10:7-23.

Diakakis, M., Nikolopoulos, E., Mavroulis, S., Vassilakis, E., e Korakaki, E. (2017). Observational evidence on the effects of mega-fires on the frequency of hydrogeomorphic hazards. The case of the Peloponnese fires of 2007 in Greece. *Science of the Total Environment*, 592:262–276.

Filipe, M., & Serralha, M. (2015). Os impactos e consequências dos incêndios florestais. https://dica.madeira.gov.pt/index.php/outrostemas/florestas/1154-os-impactos-e-consequenciasdos-incendios-florestais. Acessado: 2024-05-07.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br

IBGE. (2022a). Web page. https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html . Acessado: 2024-05-01.

IBGE. (2022b). Web page. https://sidra.ibge.gov.br/geratabela?format=xlsx&name=tabela1613.xlsx&terr=N&rank=-&query=t/1613/n1/all/n3/22/n8/2201,2202,2203,2204/v/all/p/last%2010/c82/all/d/v1000215%202,v1000216%202,v1002313%202/l/v,p%2Bc82,t . Acessado: 2024-05-01.

IBGE. (2022c). Web page. https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fgeoftp.ibge.gov.br%2Finformacoes_ambientais%2Festudos_ambientais%2Fbiomas%2Fdocumentos%2FLista_Municipio_Bioma_250mil.xls&wdOrigin=BROWSELINK . Acessado: 2024-05-01.

INPE (2020). Web page. https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/. Acessado em: 2024-05-01.

Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley, New York.

Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*, 62:3-65.

Nunes, G. S. (2018). Aplicação do Método AHP para Auxílio à Tomada de Decisão de Localidade para Instalação de Operação de Apoio Logístico Offshore. Dissertação de Doutorado, PUC-Rio.

OpenTopography (2023). Web page. https://plugins.qgis.org/plugins/OpenTopography-DEM-Downloader/#plugin-versions. Acessado em: 2024-05-01.

Saaty, R. W. (1987). The Analytic Hierarchy Process - What It Is and How It Is Used. *Mathematical Modelling,* 9(3-5), 161-176.

Saeed, M. O., Aziz, H. A., e Azizli, K. A. (2014). The art of integrated GIS/AHP for siting landfill: A review. *Applied Mechanics and Materials*, 567:144-149.

Siraj, S., Mikhailov, L., e Keane, J. A. (2015). PriEsT: An interactive decision support tool for estimating priorities from pairwise comparison judgments. International *Transactions in Operational Research*, 22(2):217–235.

Souza Filho, A. M. D., Rovere, E. L. L., e Schneider, M. R. (2022). Processo analítico hierárquico para priorizar a avaliação de riscos ecológicos em áreas contaminadas por petróleo e derivados. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27:939-946.

Valente, R., & Vettorazzi, C. (2005). Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. *Scientia Forestalis,* 69:51–61.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193466
https://proceedings.science/p/193466?lang=pt-br