PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL DE CONSERVAÇÃO EM FRAGMENTOS FLORESTAIS URBANOS

Vitor Mateus Moreira Gonçalves [1], André Luiz Alencar de Mendonça [2]

[1]Universidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, Manaus – AM, vitormateus@ufam.edu.br; [2] Universidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, Manaus – AM, andremendonca@ufam.edu.br

RESUMO

Os fragmentos florestais urbanos desempenham um papel crucial ao fornecer serviços ecossistêmicos e benefícios socioculturais, sendo fundamental avaliar seu estado de conservação para embasar ações de gestão ambiental. Este estudo propõe uma metodologia para avaliar a conservação de fragmentos urbanos utilizando análise multicritério espacial. O processo foi dividido em três fases: (1) definição e hierarquização das variáveis; (2) modelagem espacial dessas variáveis; e (3) aplicação do método e interpretação dos resultados. Foram definidos 14 critérios importantes para a conservação, sendo "tamanho de área e conectividade" os mais influentes nos resultados. A análise revelou variações entre e dentro dos fragmentos estudados, destacando a pertinência do método para avaliar o estado de conservação. A metodologia pode ser aplicada em políticas de gestão e restauração de fragmentos florestais urbanos, oferecendo subsídios para a tomada de decisão.

Palavras-chave — análise espacial multicritério, conservação, florestas urbanas.

ABSTRACT

Urban forest fragments play a crucial role in providing ecosystem services and sociocultural benefits, making it essential to assess their conservation status to inform environmental management actions. This study proposes a methodology to evaluate the conservation of urban fragments using spatial multicriteria analysis. The process was divided into three phases: (1) definition and prioritization of variables; (2) spatial modeling of these variables; and (3) application of the method and interpretation of results. Fourteen key criteria for conservation were defined, with "area size and connectivity" being the most influential in the results. The analysis revealed variations between and within the studied fragments, highlighting the method's relevance for assessing conservation status. The methodology can be applied to policies for the management and restoration of urban forest fragments, offering support for decision-making.

Key words — *spatial multicriteria analysis, conservation, urban forests.*

1. INTRODUÇÃO

As tomadas de decisão que envolvem o meio ambiente são complexas por natureza e envolvem conhecimentos multidisciplinares. Para avaliar questões ambientais, em geral utilizam-se testes experimentais, analistas experientes, modelos computacionais e ferramentas de automação e controle de critérios. No entanto, a aplicação dessas ferramentas enfrenta desafios devido à presença de riscos emergentes: ausência de informações disponíveis publicamente, evidências conflitantes sobre áreas afins e diferentes bagagens de conhecimento podem resultar em cursos de ação concorrentes. Portanto, integrar informações heterogêneas e incertas requer uma estrutura organizacional e julgamento especializado [1].

A análise de decisão multicritério (MCDA) se destaca como uma metodologia capaz de sintetizar essas informações heterogêneas. MCDA engloba diversos métodos que integram dados quantitativos, qualitativos e as preferências das partes interessadas, mesmo quando essas informações são limitadas ou divergentes [2]. O objetivo da MCDA é fornecer uma abordagem sistemática para avaliar e comparar alternativas, levando em consideração múltiplos critérios, o que resulta em decisões mais informadas e alinhadas com os interesses envolvidos [3].

No contexto ambiental e florestal, a MCDA é comumente associada aos sistemas de informação geográfica (SIG), visto que análises espaciais são, por natureza, multicritério [4]. A Análise Multicritério Espacial (AMCE) converte e integra dados geográficos e preferências dos especialistas para gerar "mapas de decisão" [5]. Essa abordagem avalia alternativas de decisão geograficamente definidas, baseadas em critérios e valores de julgamento, tornando os resultados dependentes tanto dos modelos espaciais quanto dos julgamentos [6].

Em ecossistemas fragmentados, os remanescentes florestais têm um papel essencial na provisão de serviços ecossistêmicos e benefícios socioculturais. A avaliação fidedigna do estado de conservação destes habitats é fundamental para garantir a sustentabilidade ambiental. Ao quantificar seu estado e ameaças, podem-se fundamentar ações de gestão, proteção ambiental e justiça social [7]. Contudo, é necessário definir métodos adequados, principalmente em áreas urbanas que enfrentam mudanças climáticas e particularidades distintas [8].

Este estudo, portanto, propõe uma metodologia para avaliar o estado de conservação de fragmentos florestais urbanos, considerando as especificidades da obtenção de dados, a multidisciplinaridade dos critérios e as particularidades dessas áreas que diferem das zonas rurais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste estudo em fragmentos florestais urbanos, foram seguidas três fases principais: (1) definição e hierarquização das variáveis, (2) modelagem espacial dessas variáveis e (3) aplicação do método e interpretação dos resultados.

2.1 Definição e hierarquização

Uma abordagem híbrida foi adotada para definir e hierarquizar critérios considerados importantes, integrando métodos qualitativos e quantitativos. Métodos qualitativos, como entrevistas e revisões bibliográficas, auxiliam na estruturação dos problemas e compreensão das partes interessadas [9], enquanto métodos quantitativos, como a Análise Multicritério de Decisão (MCDA), avaliam alternativas com base em dados numéricos [10]. Esta abordagem oferece uma visão mais abrangente e informada para a tomada de decisões [11]. Para evitar enviesamento, usou-se o método AHP para a alocação de pesos [12], o mesmo foi aplicado na plataforma online de Goepel [13], com o auxilio da opinião de especialistas qualificados [14], ao final, normalizou-se o peso de cada critério em relação ao total, de forma que a soma de todos os pesos seja 100% (ou 1).

2.2 Modelagem espacial

Esta fase envolveu o uso de técnicas de geoprocessamento para espacializar e padronizar as variáveis obtidas [15], [16]. As análises espaciais incluíram a conversão dos dados para o formato raster e a aplicação de normalização para padronizar as escalas, eliminando as influências de dimensão e formato entre diferentes critérios. Para o processamento, utilizou-se o QGIS versão 3.26.1, reconhecido por ser uma plataforma livre e consolidada, onde os dados foram reprojetados para o mesmo sistema de coordenadas e padronizados conforme a resolução disponível.

Para lidar com dados de diferentes resoluções, aplicou-se a interpolação pelo método de distância inversa ponderada (IDW), que atribui maior peso aos pontos próximos ao local alvo, determinando os valores desconhecidos com base em uma combinação linear ponderada de pontos de amostra. A normalização, essencial para padronizar dados de diferentes escalas, foi realizada por meio da Lógica Fuzzy, que cria uma superfície de decisão classificando as áreas em cinco classes de intensidade (1 a 5), com base em uma relação teórica entre cada critério e o objetivo da análise. Neste caso, as classes definidas para cada critério segue o ordenamento crescente variando de uma classe que teoricamente gera valores de conservação mais baixos para uma classe que gera valores de conservação mais altos.

A álgebra de mapas permitiu combinar os critérios normalizados com seus respectivos pesos, utilizando a "calculadora raster" do QGIS para reorganizar os dados e gerar um mapa de adequabilidade. Esse mapa final possui valores de célula variando de 1 a 5, onde quanto menos conservado mais próximo de 1 e quanto mais conservado mais próximo de 5 [17].

2.3 Aplicação do método

O estudo de caso foi realizado na área urbana e periurbana de Manaus-AM, caracterizada pelo clima tropical chuvoso (Af e Am), temperatura média de 26,9 °C e pluviosidade anual de 3001 mm [18]. A escolha da métrica para classificar e normalizar os critérios foi baseada na facilidade de estratificação e na adaptabilidade dos dados. Isso foi particularmente importante para métricas de paisagem, como forma e conectividade, que possuem múltiplas formas de representação. A alocação de pesos foi feita pelo método AHP e processada com a ajuda de especialistas da área florestal. O QGIS foi usado para a modelagem espacial. Os critérios selecionados refletem a importância para a conservação de fragmentos urbanos na paisagem, assim como a disponibilidade de dados sobre eles.

3. RESULTADOS

Os 14 critérios selecionados (Figura 1) foram submetidos à análise de 11 especialistas de diferentes áreas, incluindo ecologia florestal, tecnologia de produtos florestais, conservação da biodiversidade e manejo de áreas protegidas. As respostas dos especialistas, coletadas por meio da plataforma online de Goepel [13] utilizando o método AHP, determinaram os pesos dos critérios (Figura 1), com destaque para "Tamanho de Área" e "Conectividade", que receberam os maiores pesos.

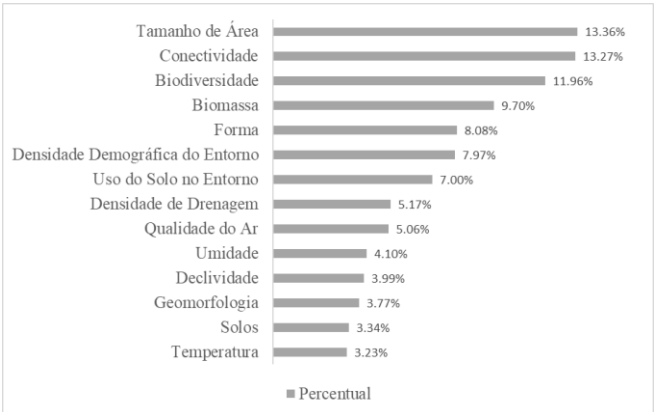


Figura 1. Hierarquização dos critérios.

Após a aplicação do método na área de interesse do estudo de caso, a modelagem espacial resultou em um índice de conservação nos fragmentos florestais variando de 2,07 a 4,37, onde o valor máximo teórico seria 5. Os fragmentos mais conservados, indicados em tons de verde (Figura 2), coincidiram com áreas de maior tamanho, confirmando a relevância do critério de maior peso na análise. Esse resultado está alinhado com a teoria da biogeografia de ilhas [19], que correlaciona o tamanho da área com a sobrevivência das espécies, teoria bem aceita e fundamentada em diversos estudos cientificos [20], [21], [22].

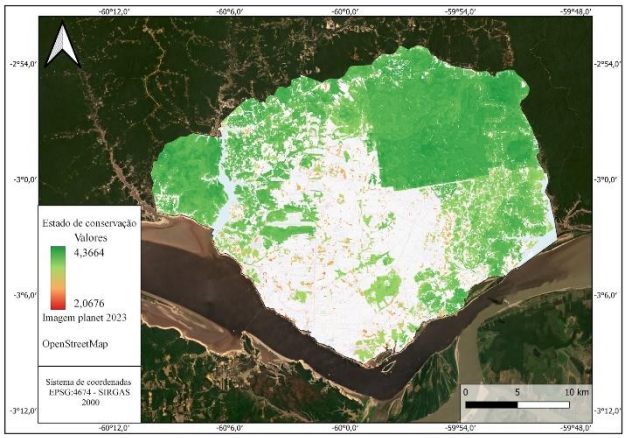


Figura 2. Valores de conservação para os fragmentos da cidade de Manaus - AM.

Além disso, o método proposto, ao incorporar critérios adicionais, permitiu capturar variações internas de conservação dentro de cada fragmento. A Figura 3 ilustra a área da Universidade Federal do Amazonas, destacando a capacidade do método em direcionar uma gestão mais eficiente dos fragmentos urbanos, incluindo usos e restauração. Vale ressaltar que fragmentos mal classificados, com baixos índices de conservação, ainda desempenham um papel crucial na conectividade da paisagem, especialmente os fragmentos menores, que atuam como conectores essenciais entre áreas maiores [23].

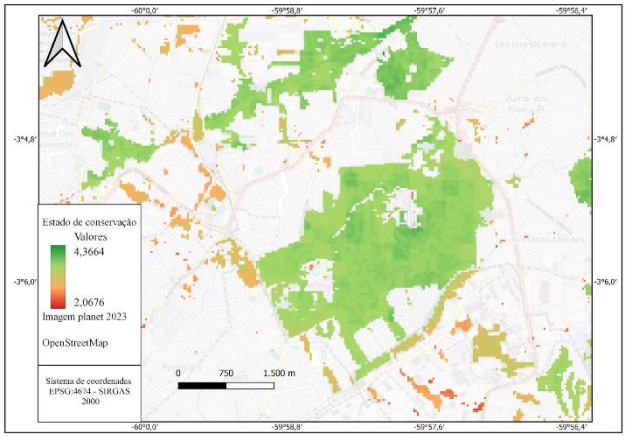


Figura 3. Variação do estado de conservação dentro dos fragmentos florestais.

4. DISCUSSÃO

A análise final dos fragmentos florestais urbanos deve considerar o contexto da urbanização e a evolução do conceito de conservação nesses espaços. A prioridade é o fornecimento de serviços ecossistêmicos diretamente relacionados à qualidade de vida urbana, como regulação do microclima, conservação do solo e benefícios estéticos e culturais [24], [25]. Isso marca uma mudança de foco, priorizando os benefícios diretos desses fragmentos à população urbana, ao invés de parâmetros tradicionais de ecologia, que são mais relevantes em áreas não urbanizadas [26].

A qualidade e resolução dos dados geoespaciais impactam significativamente os resultados da análise, afetando a identificação de padrões espaciais e a correlação entre critérios [27], [28], de modo que dados de alta qualidade a nível de detalhamento com alta resolução fornecem informações mais precisas, permitindo uma avaliação mais acurada das variáveis envolvidas. Nesse sentido, escalas inadequadas podem subestimar pequenos fragmentos florestais, o que compromete a análise, dado o valor ecológico dessas áreas menores [29].

No que diz respeito à definição dos pesos dos critérios, a inclusão de mais variáveis diminui a influência do peso de cada critério individual no resultado final, tornando a normalização dos dados a etapa mais crítica para garantir a precisão da análise. A avaliação dos especialistas também revelou a importância de selecionar profissionais adequados e garantir consistência nas respostas, minimizando erros na aplicação do método [12]. Caso inconsistências persistam, a exclusão de respostas incoerentes pode ser uma solução.

5. CONCLUSÕES

O uso do método proposto é a oportunidade de gestores urbanos de priorizar ações de gestão, educação ambiental e conservação de paisagens urbanas. A integração de variáveis sociais, físicas, ecológicas, climáticas e de paisagem permite classificar áreas de interesse à conservação com precisão. Fatores como densidade populacional e uso do solo no entorno destacaram-se como principais pressões sociais, enquanto drenagem, declividade e geomorfologia influenciaram a conservação física. Biodiversidade e biomassa emergiram como indicadores ecológicos críticos. Condições climáticas também foram relevantes, e forma, área e conectividade dos fragmentos foram essenciais para a integridade da paisagem urbana. O método não apenas identifica áreas prioritárias para conservação, mas também oferece subsídios para políticas públicas ambientais. A correta interpretação dos resultados e a atenção à resolução dos dados são fundamentais para uma gestão eficaz.

6. REFERÊNCIAS

[1] HWANG, C.-L.; MASUD, Abu Syed Md. **Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey**. Springer Science & Business Media, 2012.

[2] BELTON, Valerie; STEWART, Theodor. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Springer Science & Business Media, 2002.

[3] CEGAN, Jeffrey C. et al. Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. **Environment Systems and Decisions**, v. 37, p. 123-133, 2017.

[4] CHAKHAR, Salem; MOUSSEAU, Vincent. An algebra for multicriteria spatial modeling. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 31, n. 5, p. 572-596, 2007.

[5] DA SILVA, Lívia Maria Leite et al. Multiattribute spatial decision-making for qualitative information processing as applied to the renewable energy generating sites prospection. **IEEE Access**, v. 8, p. 137745-137757, 2020.

[6] MALCZEWSKI, Jacek; RINNER, Claus. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. New York: Springer, 2015.

[7] BALMFORD, Andrew et al. Bringing ecosystem services into the real world: an operational framework for assessing the economic consequences of losing wild nature. **Environmental and Resource Economics**, v. 48, p. 161-175, 2011.

[8] GHANBARI, Mahshid et al. The role of climate change and urban development on compound dry-hot extremes across US cities. **Nature communications**, v. 14, n. 1, p. 3509, 2023.

[9] KHADKA, Chiranjeewee et al. Problem structuring in participatory forest planning. **Forest policy and economics**, v. 26, p. 1-11, 2013.

[10] MYLLYVIITA, Tanja et al. Decision support in assessing the sustainable use of forests and other natural resources-a comparative review. **The Open Forest Science Journal**, v. 4, n. 1, 2011.

[11] UHDE, Britta et al. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: a critical review. **Environmental management**, v. 56, p. 373-388, 2015.

[12] SAATY, Thomas L. The analytical hierarchy process, planning, priority. **Resource allocation. RWS publications, USA**, 1980.

[13] GOEPEL, Klaus D. Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). **International journal of the analytic hierarchy process**, v. 10, n. 3, 2018.

[14] DENZIN, Norman K. et al. (Ed.). **The Sage handbook of qualitative research**. Sage publications, 2023.

[15] FEIZIZADEH, Bakhtiar et al. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. **Computers & geosciences**, v. 73, p. 208-221, 2014.

[16] MALCZEWSKI, Jacek. **GIS and multicriteria decision analysis**. John Wiley & Sons, 1999.

[17] SOUZA, Celso Coelho de et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil-Uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, v. 17, p. 409-417, 2007.

[18] ROQUE, Wallace Vargas. Mapeamento geoambiental da área urbana de Manaus-AM. 2009.

[19] MACARTHUR, Robert H.; WILSON, Edward O. **The theory of island biogeography**. Princeton university press, 2001.

[20] LAURANCE, William F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011.

[21] NICHOL, Janet E.; ABBAS, Sawaid; FISCHER, Gunter A. Spatial patterns of degraded tropical forest and biodiversity restoration over 70-years of succession. **Global ecology and conservation**, v. 11, p. 134-145, 2017.

[22] ROCHA-SANTOS, Larissa et al. The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. **Biological Conservation**, v. 196, p. 1-9, 2016.

[23] DE MATOS, Tatiana Possati Vieira et al. Protected areas and forest fragmentation: sustainability index for prioritizing fragments for landscape restoration. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v. 5, n. 1, p. 19-31, 2021.

[24] ESCOBEDO, Francisco J.; KROEGER, Timm; WAGNER, John E. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. **Environmental pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2078-2087, 2011.

[25] FAHRIG, Lenore. Ecological responses to habitat fragmentation per se. **Annual review of ecology, evolution, and systematics**, v. 48, p. 1-23, 2017.

[26] RÖTZER, Thomas et al. Urban Forest and Urban Microclimate. **Forests**, v. 14, n. 12, p. 2391, 2023.

[27] MACEDO, Diego R. et al. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1267-1279, 2018.

[28] LI, Deren; ZHANG, Jingxiong; WU, Huayi. Spatial data quality and beyond. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 26, n. 12, p. 2277-2290, 2012.

[29] SOLAR, Ricardo Ribeiro de Castro et al. How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes?. **Ecology Letters**, v. 18, n. 10, p. 1108-1118, 2015.