

Proposta Metodológica para Análise Multicritério Espacial de Conservação em Fragmentos Florestais Urbanos

Vitor Mateus Moreira Gonçalves^a, André Luiz Alencar de Mendonça^a

Received: 14/12/2024

Reviewed: 16/12/2024

Accepted: 16/12/2024

Published: 17/12/2024

Citação: Gonçalves, V. M. M., Mendonça, A. L. A. D. (2024). Proposta Metodológica para Análise Multicritério Espacial de Conservação em Fragmentos Florestais Urbanos. *Sustentabilidade International Scientific Journal*, v. 1, n.3. <https://doi.org.10.70336/sust.2024.v1.17157>

DO NOT FILL

ISSN ONLINE: 2966-280X

^a Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, 69080-900, Brasil; andremendonca@ufam.edu.br

*Autor correspondente: vitormateus@ufam.edu.br

Resumo: Os fragmentos florestais urbanos têm um papel essencial nas benesses que impactam a sociedade, desde os serviços ecossistêmicos a fatores socioculturais. Avaliar esses ambientes é crucial para a sustentabilidade e combate às alterações climáticas, uma vez que ao quantificar variáveis de valoração, podemos embasar mecanismos de gestão e proteção ambiental, no entanto, para tal, procedimentos metodológicos precisam ser definidos. O presente estudo visa propor uma metodologia para analisar o contexto de fragmentos florestais urbanos utilizando-se de análise espacial multicritério. Para tal, foram definidas três fases principais: a primeira fase envolveu a definição e hierarquização de variáveis importantes para uma materialização do estado de conservação dos fragmentos em uma paisagem urbana, a partir de dados secundários; a segunda, a modelagem espacial dessas variáveis, considerando-se o uso de ferramenta SIG e banco de dados geográfico; e a terceira, a aplicação do método propriamente dito e a interpretação dos resultados, tendo como estudo de caso o município de Manaus - AM.. Sendo assim, foram definidos 14 catorze critérios, discutidos a partir da disponibilidade de dados e importância para a conservação. Após a aplicação da modelagem espacial, foi demonstrada a variação entre e dentro dos fragmentos da área de estudo, além de ser observado que os critérios “tamanho de área e conectividade” possuíram maior influência nos resultados. Isso posto, o método se demonstrou pertinente para a avaliação do estado do conjunto de fragmentos florestais urbanos, podendo ser usado para direcionar ações de restauro e gestão dessas áreas em grandes cidades.

Palavras-chave: Análise Espacial Multicritério, Cidades sustentáveis, Florestas Urbanas

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 alguns gargalos: ausência de informações disponíveis publicamente, evidências conflitantes sobre áreas afins e diferentes bagagens de conhecimento dos aplicadores. Portanto, integrar informações heterogêneas e incertas requer uma estrutura organizacional e julgamento especializado (Hwang et al., 2012).

Nesse sentido, a análise de decisão multicritério (ADMC) se apresenta como uma metodologia capaz de sintetizar considerações heterogêneas durante o processo de tomada de decisão. O termo ADMC engloba diversas estruturas e métodos analíticos que visam integrar informações quantitativas e qualitativas, bem como contribuições e preferências das partes interessadas, mesmo quando estas são limitadas ou divergentes (Belton e Stewart, 2002). O objetivo central da ADMC é fornecer uma abordagem abrangente e sistemática para avaliar e comparar alternativas de projeto, levando em consideração múltiplos critérios e perspectivas, resultando em uma decisão mais informada e alinhada com os interesses das partes envolvidas (Cegan et al., 2017).

A análise multicritério no ambiente florestal e ambiental comumente está associada a sistemas de informação geográfica (SIG). Dados e análises espaciais são inerentemente de natureza multicritério (Chakhar e Mousseau, 2007). A denominação de Análise Multicritério Espacial (AMCE) é descrita como um processo que converte e integra informações geográficas (dados de entrada) e preferências de tomadores de decisão para gerar “mapas de decisão” (dados de saída) (da Silva, 2020). Um aspecto crucial da AMCE reside na avaliação de alternativas de decisão, as quais são geograficamente definidas com base em valores de critérios (ou atributos) e nas preferências dos tomadores de decisão. Essa abordagem implica que os resultados das análises dependem não apenas dos modelos espaciais das alternativas, mas também dos valores dos julgamentos incorporados nos processos decisórios (Malczewski e Rinner, 2015).

No contexto de ecossistemas fragmentados, os remanescentes florestais assumem um papel de destaque na provisão de benefícios essenciais que reverberam na sociedade, englobando desde a

oferta de serviços ecossistêmicos até a influência em fatores socioculturais. Dessa forma, a avaliação precisa do estado de conservação destes habitats torna-se imprescindível para assegurar a perpetuação da sustentabilidade ambiental. Ao quantificar seu estado atual e possíveis ameaças, podem-se embasar mecanismos de gestão, proteção ambiental e justiça social (Balmford et al., 2011; Grimm et al., 2008). No entanto, faz-se necessário definir procedimentos metodológicos a serem adotados para alcançar tal meta, especialmente em áreas urbanas que possuem inúmeras particularidades e enfrentam cenário de mudanças climáticas cada vez mais severas (Ghanbari et al., 2023).

Portanto, o presente estudo visa propor uma metodologia para analisar o conjunto de fragmentos florestais urbanos considerando, majoritariamente, o valor associado à conservação destes espaços e as nuances da obtenção de dados para tal finalidade. Para tal foi realizado estudo de caso na cidade de Manaus - AM, capital do estado do Amazonas, norte do Brasil.

2. Material e Métodos

Para a realização do estudo no contexto de fragmentos florestais urbanos, inicialmente foi realizada levantamento de literatura para a definição de critérios e variáveis envolvidos no processo, com posterior hierarquização das variáveis tidas como importantes; Na sequência, foi executado o processo de modelagem espacial dessas variáveis, utilizando-se de ferramentas SIG; Ao final, foi proposta a aplicação do método propriamente dito e os resultados interpretados e discutidos para com relação a área urbana de Manaus, capital do estado do Amazonas e com histórico de ausência de planejamento urbano.

2.1 Definição e Hierarquização

Para esta etapa, considerou-se pertinente a adoção de uma abordagem híbrida para definir e hierarquizar critérios considerados de importância. Esse tipo de abordagem tem sido desenvolvida para integrar métodos quantitativos e qualitativos em tomadas de decisões (Myllyviita et al., 2011). Enquanto os métodos qualitativos, como revisões, entrevistas e votações, têm se mostrado úteis na estruturação de problemas, na formulação de objetivos preliminares e na melhoria do entendimento das partes interessadas (Khadka et al., 2013), os métodos quantitativos, como ADMC, são valiosos para avaliar alternativas de decisão usando informações numéricas (Myllyviita et al., 2011). Esse enfoque integrado permite uma tomada de decisão mais abrangente e informada, aproveitando as vantagens de ambas as abordagens (Udhe et al., 2015).

A definição proposta neste estudo parte da escolha de critérios, a partir da importância dos mesmos para a conservação de fragmentos florestais urbanos na paisagem e disponibilidade de dados secundários. Estudos como de Viana e Pinheiro (1998), apontam a necessidade da mensuração de variáveis ecológicas da paisagem como tamanho de área, forma, grau de isolamento, tipo de vizinhança, biomassa e biodiversidade (Laurence et al., 2011; Uriarte et al., 2010; Pires et al., 2006; Chave et al., 2014; Haddad et al., 2015). Outros demonstram a importância de variáveis físicas, pertinentes em relação aos aspectos circundantes como geomorfologia, topografia, densidade de drenagem, densidade demográfica e uso do solo do entorno (Cardoso et al., 2006; Moraes e Jordão, 2002; Bergamo e Almeida, 2006; Moore, 1988).

Nessa primeira parte, ações que visem não enviesar o resultado pela opinião particular do elaborador são importantes, ou seja métodos que consultem opiniões relevantes como a de especialistas (Denzin et al, 2023), envolvendo a coleta e análise de informações e perspectivas fornecidas por indivíduos qualificados e experientes em seus respectivos campos de conhecimento relacionados às florestas. Essa técnica consiste em uma abordagem amplamente utilizada para a obtenção de informações e tomada de decisões em diversos campos, incluindo a análise de fragmentação florestal.

Para facilitar a posterior aplicação do método de hierarquização e evitar dubiedade na interpretação das opiniões decidiu-se pela coleta de dados efetuada diretamente dentro da ferramenta de análise. Neste trabalho foi utilizada a plataforma online desenvolvida por Goepel (2018) onde é possível aplicar o método AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvido por Saaty (1980).

Assim, foi sistematizada a definição dos critérios (Quadro 1), resumindo-se os motivos da escolha dos mesmos. A escolha da métrica ou unidade para classificar e normalizar os critérios (Quadro 2) foi embasada na facilidade de estratificação e adaptabilidade da métrica aos dados, isso principalmente para os critérios referentes às métricas de paisagem como, forma e conectividade que possuem mais de uma métrica para serem representados. A partir da definição dos critérios,

foram definidas fontes e forma de obtenção, além dos procedimentos técnicos para adequação à análise (Quadro 3).

Quadro 1. Critérios e respectivos motivos para escolha:

Critério	Motivo da escolha
Densidade Demográfica do Entorno	É uma medida expressa pela relação entre a população e a superfície do território em habitantes por unidade de área. Quando analisada para o entorno de uma área natural, pode-se dizer que tem influência na intensidade do impacto e da pressão exercida pelas atividades humanas sobre um ecossistema (Moraes e Jordão, 2002)
Uso do Solo no Entorno	Conforme apontado por Ficher e Lindenmayer (2006), o determinante preponderante na expressão dos efeitos de borda é a intensidade de contraste com a tipologia circundante; quanto mais destacada a matriz na qual o fragmento se encontra inserido, mais pronunciados são os efeitos de borda
Densidade de Drenagem	Esse índice representa um indicador do nível de desenvolvimento do sistema de drenagem, fornecendo uma avaliação da eficácia na remoção de água da bacia. Tal eficiência é expressa pela relação entre a soma dos comprimentos de todos os canais da rede independentemente de serem perenes, intermitentes ou temporários e a área total da bacia (Horton, 1932; Cardoso et al., 2006)
Declividade	As características do relevo condicionam os fluxos de materiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes) e energia na paisagem. Essas características controlam a variabilidade espacial da umidade do terreno, das características dos solos, do processo erosivo e da degradação do solo e da água (Moore, 1988)
Geomorfologia	Os dados geomorfológicos são essenciais para análises integradas do meio. Eles permitem identificar as unidades geomorfológicas, descrevendo tipos e formas de relevo, padrões de drenagem, altimetria, declividade, processos de erosão e acumulação, além das fragilidades e potencialidades de uma área específica (Bergamo e Almeida, 2006)
Solos	A classe de solo é crucial para a análise de fragilidade ambiental pois influencia a suscetibilidade à erosão, a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de nutrientes, o suporte às raízes e a interação com o ambiente urbano. Conhecer o tipo de solo e sua composição ajuda a avaliar a vulnerabilidade das áreas e a planejar estratégias de conservação e manejo eficazes (Crepani, 2001; Simonetti et al., 2019)
Biodiversidade	Alta biodiversidade contribui para a estabilidade e resiliência do ecossistema, promovendo interações complexas que sustentam a saúde da floresta, melhorando a resistência a pragas e doenças, facilitando a polinização e a dispersão de sementes e contribuindo para a ciclagem de nutrientes (Haddad et al., 2015)
Biomassa	A mensuração da biomassa florestal fornece informações cruciais sobre a saúde, produtividade e capacidade de sequestro de carbono da floresta, sendo uma ferramenta essencial para a gestão ambiental e a tomada de decisões relacionadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais (Houghton e Lawrence, 1999; Chave et al., 2014)
Qualidade do Ar	Evidencia a eficiência do fragmento em filtrar impurezas atmosféricas, absorvendo partículas poluidoras suspensas (Escobedo et al., 2011)
Temperatura	Influência, causando estresse térmico em plantas e animais, alterando microclimas e afetando ciclos de vida e composição de espécies. Altas temperaturas podem acelerar a degradação dos fragmentos florestais, aumentando a vulnerabilidade a incêndios, pragas e doenças (Long e Frank, 2019)
Umidade	Impacta na saúde das plantas, a biodiversidade e o ciclo hidrológico. Níveis adequados de umidade ajudam a mitigar estresses climáticos, controlam incêndios e mantêm um microclima estável, essencial para a flora e fauna (Magnago et al., 2017)
Forma	A forma de um fragmento está diretamente relacionada com o tamanho e disposição de sua borda, fator esse que está entre os mais importantes impulsionadores da mudança ecológica nos fragmentos (Laurence et al., 2011) por interferirem no aumento do estresse de dessecação, cisalhamento e turbulência do vento,

	ocasionando mudança na germinação, mortalidade, hidrografia e composição de espécies do fragmento (Uriarte et al., 2010)
Tamanho de Área	A correlação entre a extensão dos fragmentos e suas características ecológicas, como a diversidade de espécies, é fundamentada principalmente na biogeografia de ilhas (MacArthur e Wilson, 2001). Laurence et al. (2011) corroboram que fragmentos menores frequentemente não mantêm populações viáveis e tendem a perder espécies mais rapidamente
Conectividade	A condição de isolamento pode resultar na diminuição ou até mesmo na eliminação da colonização por espécies presentes em áreas adjacentes, assim como no restringimento do fluxo gênico e na limitação do acesso das espécies aos recursos localizados fora do habitat fragmentado (Pires et al., 2006; Viana e Pinheiro, 1998)

Fonte: Os autores, 2024.

Quadro 2. Normalização dos critérios:

Critério	Unidade	Fonte de classificação	Valor baixo (1)	Valor levemente baixo (02)	Valor moderado (3)	Valor alto (04)	Valor muito alto (05)
Declividade	%	EMBRAPA	>45	20-45	08-20	03-08	0-03
Área	Hectares	Pirovani et al., (2014) e Viana e Pinheiro (1998)	<10	10-20	20-30	30-40	>40
Biodiversidade (Integridade da biodiversidade)	%	Newbold et al., (2016)	0-25	25 - 50	50 - 65	65 - 80	>80
Biomassa	Mg.ha ⁻¹	O autor	<50	50-150	150-250	250-350	>350
Densidade demográfica do entorno	Percentil	O autor	>80	60-80	40-60	20-40	<20
Classe de uso do solo do Entorno	Classe ¹	O autor	5	4	3	2	1
Temperatura	Percentil	O autor	>80	<20	20-40	60-80	40-60
Umidade	Percentil	O autor	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Forma	Dimensão fractal	McGarigal (1995)	1,80 – 2,00	1,60 – 1,80	1,60 – 1,40	1,40 – 1,20	>1,20
Qualidade do ar (média anual)	MP2.5 (µg/m3)	CETESB (2024)	>125	75 - 125	50 - 75	25 - 50	0 - 25

¹ Adaptado do plano diretor da cidade de Manaus onde a intensidade poluidora do uso segue a ordem numeral crescente, desde a classe 5 sendo a menos restritiva quanto ao uso, permitindo atividades bastante poluidoras até a classe 1 sendo a mais restritiva.

Conectividade (Proximidade fragstrats)	Percentil	O autor	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Densidade de drenagem	de km/km ²	Carvalho (2006)	< 0,5	0,5 - 1,5	1,5 - 2,5	2,5- 3,5	≥ 3,5
Geomorfologia	Índice de fragilidade ambiental	de Adaptado de Crepani et al., (2001)	5	4	3	2	1
Solos	Índice de fragilidade ambiental	de Adaptado de Crepani et al., (2001)	5	4	3	2	1

Fonte: Os autores, 2024.

Quadro 3. Fonte de obtenção e procedimentos realizados nos dados:

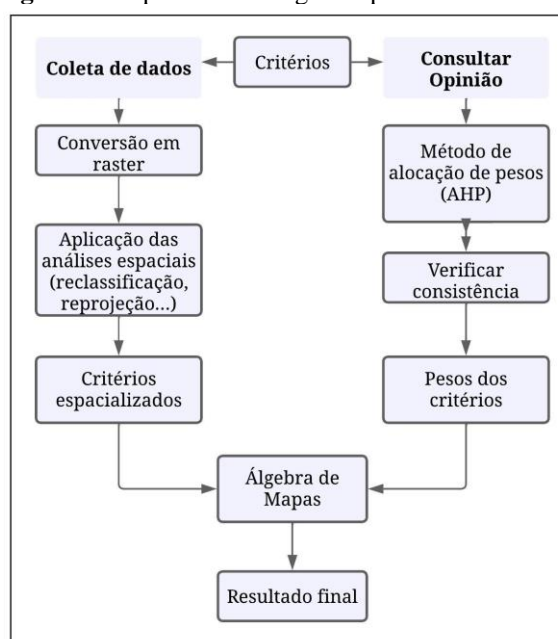
Dado	Fonte de obtenção	Formato inicial	Procedimentos de processamento
Declividade	DEM ALOS PALSAR	Raster	Recorte, cálculo de declividade, normalização
Área	Imagem planet 2023	Raster	Classificação de imagem, cálculo de área, normalização
Biodiversidade	Newbold et al., (2016)	Raster	Recorte, normalização
Biomassa	Ometto et al., (2023)	Raster	Recorte, normalização
Densidade demográfica do entorno	Censo IBGE 2022	Vetor	Rasterização, normalização
Classe de uso do solo do Entorno	Adaptado do Plano diretor cidade de Manaus	PDF	Rasterização, normalização
Temperatura	EducAIR	Tabela	Rasterização, normalização
Umidade	INMET	Tabela	Rasterização, normalização

Forma	Imagem planet 2023	Raster	Classificação de imagem, cálculo da forma, normalização
Qualidade do ar (média anual)	EducAIR	Tabela	Rasterização, normalização
Conectividade	Imagem planet 2023	Raster	Classificação de imagem, cálculo da conectividade, normalização
Densidade de drenagem	DEM ALOS PALSAR	Raster	Recorte, cálculo de drenagem, cálculo da área, cálculo da densidade de drenagem, normalização
Geomorfologia	DEM ALOS PALSAR	Raster	Recorte, cálculo de dissecações e declividade, cálculo do índice de fragilidade, normalização
Solos	Soil Grids	Raster	Recorte, normalização

Fonte: Os autores 2024.

2.2 Modelagem Espacial

Esta fase consiste na espacialização e padronização das variáveis obtidas previamente, envolve o uso de técnicas de geoprocessamento para obter e processar os dados dos critérios da etapa anterior, por meio de técnicas inerentes ao SIG (Feizizadeh et al., 2014). Nesse viés, após a obtenção das informações de cada critério, devem ser efetuadas as análises espaciais como conversão e normalização a fim de padronizar a escala dos dados e converter diferentes níveis de um atributo, eliminando a influência da dimensão e formato de diferentes critérios. Doravante, uma álgebra de mapas deve ser aplicada, técnica comum em processamento de matrizes geoespaciais que envolve a modificação dos valores de pixels com base em critérios e valores predefinidos. Com ela reorganiza-se os dados cruzando os mapas e seus respectivos pesos entre si, tornando-os mais adequados para análise e interpretação de modo que demonstrem o valor total dos fragmentos. A figura 1 sumariza o procedimento metodológico desta pesquisa ao representar as etapas da modelagem espacial multicritério aplicada.

Figura 1. Etapas da modelagem espacial multicritério².

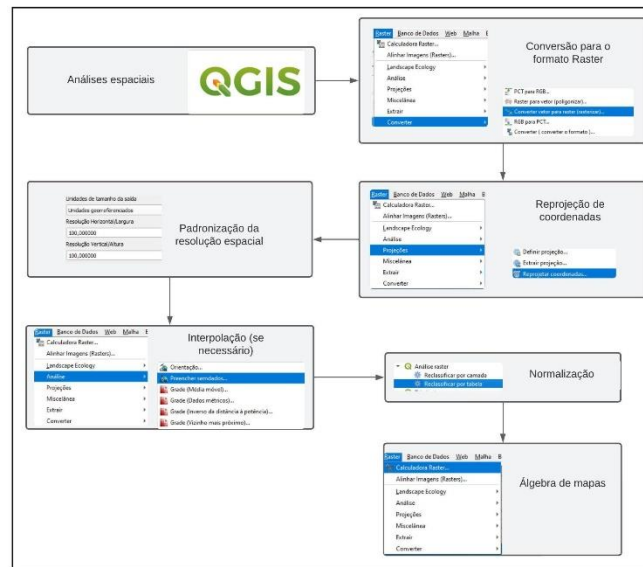
Fonte: Os autores.

A análise baseada em dados espaciais reduz custos associados à coleta de campo e proporciona a capacidade de abranger áreas extensas de forma sistemática (Shimabukuro e Formaggio, 2009). Esta análise procura complementar ou até mesmo solucionar a problemática do custo associado a coletas de dados frequentes. Assim, pode viabilizar a obtenção de informações frequentes ao longo do tempo, permitindo a identificação de padrões e mudanças dinâmicas em ambientes complexos. Dessa forma, enfatiza-se a importância desse viés como uma abordagem eficiente e econômica para a obtenção de informações detalhadas e abrangentes, com ampla aplicabilidade em diversos domínios de pesquisa e tomada de decisões (Souza et al., 2007).

Os procedimentos relacionados aos dados e análises espaciais foram realizados por meio do QGIS versão 3.26.1 (figura 2), reconhecido por ser uma plataforma espacial livre e consolidada. Dentro dele, os dados levantados foram todos convertidos para o formato matricial (raster), reprojatados para o mesmo sistema de coordenadas, e, a depender da resolução dos dados de entrada disponíveis, padronizados. Ressalta-se que essa definição interfere diretamente na acurácia e nível de detalhamento da análise. Para padronizar dados obtidos em resolução espacial maior, ou seja, com tamanho menor do pixel, foi utilizada a técnica de interpolação pelo Método de distância inversa ponderada (IDW) (Shepard, 1968), método usa um conjunto de combinação linear ponderada de pontos de amostra para determinar os valores das células de valor desconhecido. Maior peso é atribuído aos pontos que estão mais próximos do local alvo (Chin et al., 2023).

² Figura 1 em alta resolução no link (<https://bit.ly/4eEqqYj>)

Figura 2. Procedimentos espaciais realizados no software Qgis³.



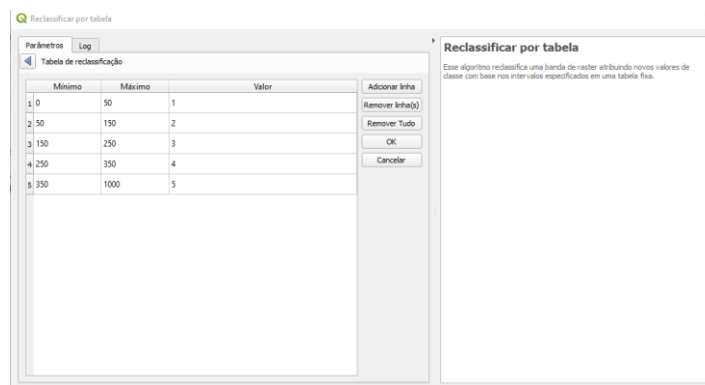
Fonte: Os autores.

Os critérios definidos foram objeto da análise dos especialistas. Os especialistas selecionados constituem grupo de 11 profissionais variando nas especialidades Ecologia florestal, Tecnologia de produtos florestais, Contenção de queimadas, Tecnologia da madeira, Conservação da vida silvestre, Ecologia da conservação da biodiversidade, Manejo de áreas protegidas e Fauna e Ciências florestais em geral. Os entrevistados responderam a análise dentro da ferramenta online de Goepel (2018) nos moldes do método AHP, e a entrevista foi acompanhada pelo pesquisador, onde também foram retirados insights e justificativas para a análise de cada profissional.

Dentro dos procedimentos da modelagem espacial a normalização permite que dados de diferentes escalas possam ser numericamente utilizados. O uso do princípio da Lógica Fuzzy (Zadeh, 1965) permite a obtenção de uma superfície de decisão, que classifica em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade (de Paula e Souza, 2007). Neste estudo foram utilizadas por padrão cinco classes de intensidade numa escala ordinal entre 1 e 5, conforme recomendado por (Macedo et al., 2018) para facilitação da estratificação e interpretação dos dados. As definições foram realizadas a partir das justificativas dadas pelos especialistas e pela revisão de literatura, onde foram estabelecidas a relação entre cada critério e o objetivo da análise. Para o trabalho em pauta, buscou-se a revisão de trabalhos para entender a possível relação entre níveis de intensidade ou ocorrência ou gradação de um fenômeno e seu efeito na conservação da área na paisagem. Todas as classes definidas para cada critério seguem ordenamento crescente variando de uma classe que teoricamente gera valores de conservação mais baixos para uma classe que gera valores de conservação mais altos. O procedimento para realizar essa normalização é feito pela ferramenta de reclassificação por tabela (Figura 3).

³ Figura 2 em alta resolução no link (<https://bit.ly/3ZcDpoU>)

Figura 3. Exemplo de reclassificação por tabela⁴.



Fonte: Os autores.

A álgebra de mapas nesse contexto consiste na multiplicação dos arquivos matriciais normalizados e seus respectivos pesos entre si utilizando a “calculadora raster” do QGIS. O resultado é um mapa de adequabilidade, com valores de célula variando entre o índice de menor valor (1) a maior valor (5), com a correspondência direta de menores valores serem correspondentes a um menor valor associado para fins de estado de conservação da área, e maiores valores serem correspondentes a um maior valor associado para fins de estado de conservação da área.

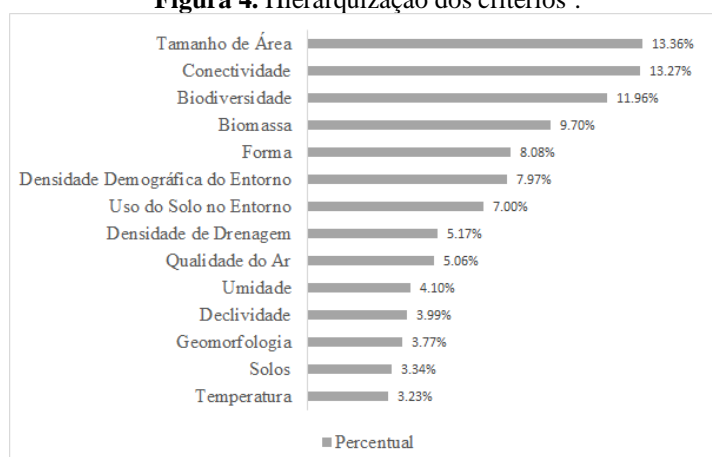
3. Resultados e Discussão

Para ilustrar a aplicação do método proposto, foi realizada a execução de um estudo de caso, a partir da área urbana e periurbana do município de Manaus - AM. Manaus é a capital mais populosa da Amazônia Brasileira. De acordo com a classificação de Köppen, o clima corresponde ao Af, tropical chuvoso sempre úmido e ao Am, tropical chuvoso quente e úmido (Medeiros, 2019). A temperatura média do município está em torno de 26,9 °C, a pluviosidade média anual em torno de 3001 mm, podendo ter altitudes variando entre 40 a 160 m, sendo que próximo aos rios, verificam-se altitudes de até 25 m (Roque, 2009). A sua área periurbana é rodeada de florestas e rios, limitando-se ao sul com o Rio negro, à Leste com o igarapé do Puraquequara e a Oeste com o igarapé do Tarumã. Ao norte, limita-se com o Distrito Agropecuário da SUFRAMA, área estratégica para o setor primário e com uma área protegida inserida em seu perímetro - a Reserva Florestal Adolpho Ducke que possui 10.000 hectares (100 km²) e aproximadamente 10 km de cada lado.

Os procedimentos de alocação de pesos descritos anteriormente foram seguidos usando o método de hierarquização AHP que consiste em comparações de pares de critérios para determinar importâncias relativas, adaptando-se bem a cenários com múltiplos intervenientes. Ishizaka e Lusti (2006) destacam a aplicação dessa álgebra matricial para lidar com entradas incompletas ou inconsistentes, produzindo pesos, pontuações gerais e medidas de consistência, essa metodologia foi efetuada dentro da plataforma de Goepel (2018) auxiliado pela opinião de especialistas da área florestal, e para o processamento da modelagem espacial o Software QGIS versão 3.26.1 foi utilizado.

Ao final, os pesos atribuídos aos critérios foram mapeados e estão apresentados na Figura 4. Os especialistas embasaram suas escolhas majoritariamente pela dependência ou independência de cada critério em relação aos outros e pela importância para manutenção dos fragmentos. Em suma, a resiliência, influência nos demais atributos e a capacidade de agir como ponte essencial para evitar o isolamento completo dos fragmentos, proporcionando variabilidade genética e trocas necessárias à sua manutenção, garantiram os critérios "Tamanho de Área" e "Conectividade" como os mais relevantes respectivamente.

⁴ Figura 3 em alta resolução no link (<https://bit.ly/4fDmaTy>)

Figura 4. Hierarquização dos critérios⁵.

Fonte: Os autores.

A análise dos critérios reflete a necessidade de uma abordagem integrada e adaptável ao contexto urbano de cada cidade, uma vez que, embora os critérios apresentados tendem a ser universais, sua aplicação pode variar significativamente dependendo das especificidades locais. Por exemplo, cidades com maior densidade demográfica no entorno dos fragmentos podem apresentar pressões mais intensas sobre os mesmos, influenciando diretamente os resultados da avaliação e a priorização de estratégias de manejo. Essa adaptação é crucial para garantir que as soluções sejam eficazes e contextualmente relevantes, reforçando a importância de estudos comparativos em diferentes realidades urbanas.

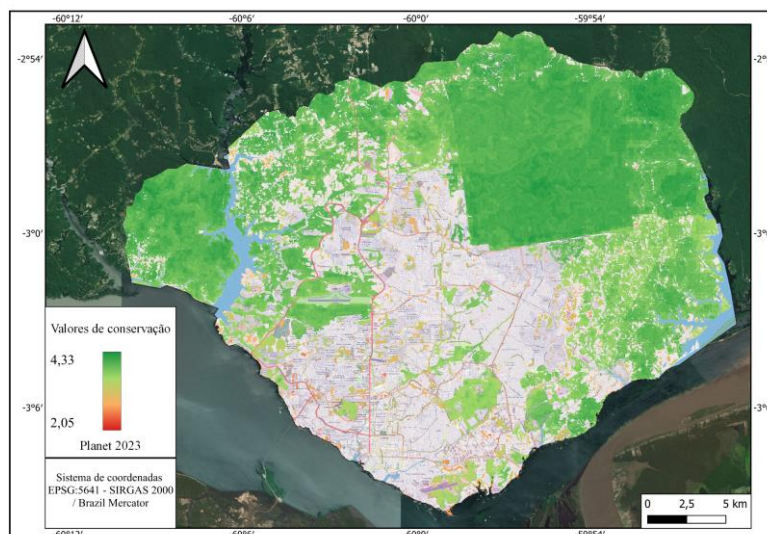
Outro aspecto importante está relacionado à percepção dos chamados "desserviços ambientais". Embora as árvores e os fragmentos florestais urbanos ofereçam uma ampla gama de benefícios, como regulação do microclima, melhoria da qualidade do ar e suporte à biodiversidade (Fahrig, 2017; Kabisch et al., 2015; Escobedo et al., 2011), eles também podem ser percebidos como problemáticos por alguns grupos (Mendes e Oliveira, 2019). Exemplos incluem custos de manutenção, interferências em infraestruturas urbanas e riscos associados a quedas em eventos extremos. Reconhecer e avaliar essas percepções é fundamental para um processo de tomada de decisão equilibrado, que considere tanto os serviços ecossistêmicos quanto às possíveis limitações e desafios relacionados à conservação em áreas urbanas.

A escolha dos critérios também possui uma conexão direta com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Critérios como "Tamanho de Área" e "Conectividade" dialogam com o ODS 15 (Vida Terrestre), ao promoverem a conservação da biodiversidade e a funcionalidade ecológica dos fragmentos. "Biodiversidade" e "Biomassa", por sua vez, estão alinhados ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), evidenciando a relevância do sequestro de carbono e da mitigação de impactos climáticos. Por fim, o "Uso do Solo no Entorno" e a "Densidade Demográfica do Entorno" contribuem para reflexões relacionadas ao ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), apontando a necessidade de integrar a conservação ambiental ao planejamento urbano sustentável.

Após a realização desta fase, a modelagem espacial foi efetuada com o intuito de demonstrar a aplicação do método na área de estudo, com isso resultou-se em um valor de conservação que variou de 2,05 a 4,33 nos fragmentos urbanos e periurbanos da cidade de Manaus-AM, em um índice onde o valor máximo possível, ou seja, o fragmento com o melhor estado de conservação de acordo com as métricas definidas é igual a 5, os mais conservados são os em tons de verde no mapa e os piores em tons de vermelho (Figura 5). Observou-se que as áreas de maior tamanho foram predominantemente classificadas como as mais conservadas, confirmando a relação do critério de maior peso com o resultado final. Tal resultado é compreensível em um estudo sobre fragmentação florestal e seu estado de conservação, e está alinhado com a teoria da biogeografia de ilhas, proposta por MacArthur e Wilson (2001), que postula que o tamanho da área influencia a chance de sobrevivência das espécies. Fragmentos maiores apresentam uma maior área central, oferecem mais recursos naturais e abrigam maior biodiversidade do que fragmentos menores, na maioria dos casos. Esta teoria é amplamente aceita na literatura científica e é corroborada por diversos estudos, incluindo Laurence et al. (2011), Nichol, Abbas e Fischer (2017) e Rocha-Santos et al. (2016).

⁵ Figura 4 em alta resolução no link (<https://bit.ly/3Za4IjB>)

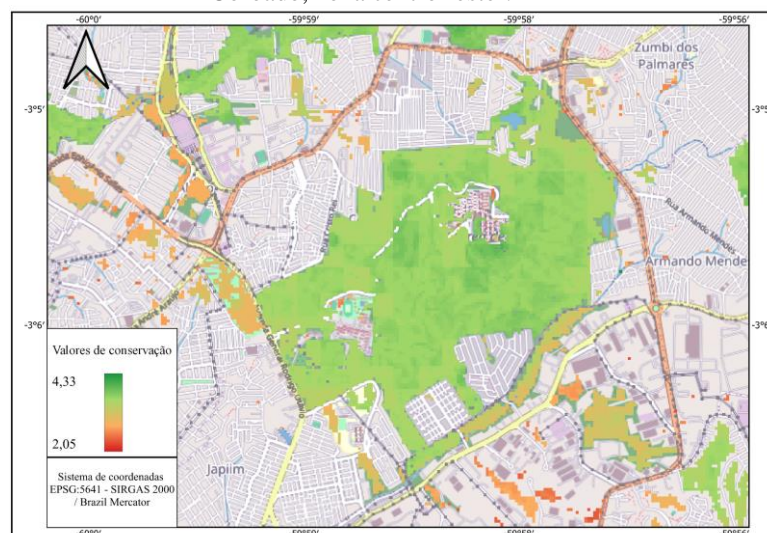
Figura 5. Valores de conservação, a partir da metodologia proposta, para os fragmentos da cidade de Manaus – AM⁶.



Fonte: Os autores.

No método proposto, devido a inclusão de critérios que vão além das análises de paisagem de fragmentação florestal corriqueiras, é possível observar que a metodologia consegue capturar as variações de conservação dentro de cada fragmento. A Figura 6 mostra ampliação para a área da Universidade Federal do Amazonas, bairro do Coroado, zona centro-leste. Por se tratar do contexto urbano, este tipo de análises possibilita a estratificação desses fragmentos e direciona uma gestão mais eficiente, norteando os possíveis usos e restauros. Não obstante, outro ponto importante diz respeito à interpretação desse índice de conservação. Em casos onde os fragmentos possam estar mal ranqueados, isto é, em baixo estado de conservação, não significa que os mesmos não sejam importantes para a paisagem, ao contrário, fragmentos pequenos possuem extrema importância para a manutenção do equilíbrio do ecossistema, funcionando como conectores dos demais fragmentos incluindo os maiores (de Matos et al., 2021).

Figura 6. Variação dos valores de conservação dentro dos fragmentos florestais do bairro do Coroado, zona centro-leste⁷.



Fonte: Os autores.

⁶ Figura 5 em alta resolução no link (<https://bit.ly/3Za4NDV>)

⁷ Figura 6 em alta resolução no link (<https://bit.ly/3CwkdcB>)

Isso posto, no resultado da análise dos fragmentos florestais urbanos deve-se levar em consideração o contexto da urbanização e a evolução do conceito de conservação nesse ambiente. A conservação deve ser compreendida principalmente em função da importância dessas áreas para o fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais para a população urbana, tais como a regulação do microclima, a conservação do solo, o valor estético, cultural, saúde e bem estar (Escobedo et al., 2011; Kabisch et al., 2015; Fahrig, 2017). A ênfase nesses aspectos reflete uma mudança de foco, direcionando a conservação menos para os parâmetros tradicionais de biodiversidade e funções ecológicas indiretas, que são mais adequadamente abordados em áreas não urbanizadas. Fragmentos florestais fora das cidades estão geralmente mais adaptados e desempenham melhor as funções de conservação da biodiversidade e manutenção das funções ecológicas pois a urbanização em si gera uma gama de efeitos maléficis aos fragmentos nela contidos (Rötzer et al., 2023). Dessa forma, nos ambientes urbanos, a prioridade deve ser maximizar os benefícios diretos que esses fragmentos proporcionam à qualidade de vida dos habitantes, integrando as funções ecológicas ao planejamento urbano e promovendo uma coexistência harmoniosa entre o desenvolvimento urbano e a preservação dos espaços naturais remanescentes. Uma abordagem diferenciada na conservação urbana reconhece as limitações e as especificidades dos fragmentos florestais urbanos, ajustando as estratégias de manejo para atender às necessidades e às dinâmicas das áreas urbanizadas.

Ressalta-se que a qualidade dos dados geoespaciais referentes a cada critério, as diferentes resoluções dos dados, influenciam significativamente no resultado final da análise (Macedo et al., 2018). Diferentes resoluções podem afetar a identificação de padrões espaciais e a correlação entre critérios, sendo essencial escolher a resolução adequada para capturar a variabilidade espacial e garantir a eficácia da análise multicritério espacial (Li et al., 2012), de modo que dados de alta qualidade a nível de detalhamento com alta resolução fornecem informações mais acuradas, permitindo uma avaliação mais fidedigna das variáveis envolvidas. Isso posto, a escala dos dados interfere no que se entende por fragmentos florestais em sua essência. Para compreender o conceito de fragmentos florestais, é essencial definir o que se entende por florestas a nível nacional e internacional, para áreas urbanas, a FAO define florestas urbanas como todas as florestas, grupos de árvores e árvores individuais em áreas urbanas e periurbanas, incluindo florestas, árvores de rua, parques, jardins e árvores em locais abandonados (Salbitano, 2016). Nesse ínterim, a depender da escala dos dados, a análise pode não compreender fragmentos pequenos e subestimar os resultados. O que pode se tornar um problema, visto que, ao excluir áreas menores que 0,5 hectares, subestima-se a efetiva cobertura arbórea, incluindo pequenos fragmentos e árvores isoladas que possuem elevado valor ecológico e de conservação (Chazdon et al., 2016).

No quesito da definição das grandezas e níveis de importância, os pesos definidos pelos especialistas diminuem a influência no resultado final da análise à medida que se aumenta o número dos critérios, sendo dessa forma a fase de classificação, ou seja, a estratificação dos dados dentro de cada critério a etapa crucial para um bom resultado. No referente à avaliação dos especialistas durante a aplicação do método ficou notório que cautela na escolha dos mesmos é de suma importância, pois, a depender da área de atuação e bagagem do mesmo a compreensão a respeito do método e seus multicritérios ficam comprometidas, para isso atentar-se ao nível de inconsistência das respostas faz-se primordial (Saaty, 1980), doravante a persistência do erro continue, a eliminação dessas respostas incoerentes é uma alternativa a ser feita a posteriori.

4. Conclusão

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, tamanho de 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 e condizente com os objetivos ODS, juntamente com o melhor aproveitamento dos benefícios das florestas urbanas e periurbanas.

Contribuições do autor: Concepção, Vitor Gonçalves e André Mendonça; Análise formal Vitor Gonçalves e André Mendonça; Pesquisa, Vitor Gonçalves e André Mendonça; Supervisão, Vitor Gonçalves e André Mendonça; Redação do manuscrito, Vitor Gonçalves e André Mendonça;

Revisão, Vitor Gonçalves e André Mendonça. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Agradecimentos: Os autores agradecem a FAPEAM - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas pelo apoio financeiro a nível de bolsa de mestrado.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses. Os financiadores não tiveram nenhum papel na concepção do estudo; na coleta, análise ou interpretação de dados; na redação do manuscrito, ou na decisão de publicar os resultados.

Referências

- Balmford, A., Fisher, B., Green, R. E., Naidoo, R., Strassburg, B., Kerry Turner, R., & Rodrigues, A. S. (2011). Bringing ecosystem services into the real world: an operational framework for assessing the economic consequences of losing wild nature. *Environmental and Resource Economics*, 48, 161-175.
- Belton, V., & Stewart, T. (2012). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer Science & Business Media.
- Bergamo, E. P., & Almeida, J. A. P. (2006). A importância da geomorfologia para o planejamento ambiental: um estudo do município de Fartura/SP. *VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia-GO*.
- Cardoso, C. A., Dias, H. C. T., Soares, C. P. B., & Martins, S. V. (2006). Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. *Revista árvore*, 30, 241-248.
- Carvalho, D. D., & Silva, L. D. (2006). Hidrologia—Capítulo 3. Bacia Hidrográfica.
- Cegan, J. C., Fillion, A. M., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environment Systems and Decisions*, 37, 123-133.
- Chakhar, S., & Mousseau, V. (2007). An algebra for multicriteria spatial modeling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(5), 572-596.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., ... & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45(5), 538-550.
- Chin, R. J., Lai, S. H., Loh, W. S., Ling, L., & Soo, E. Z. X. (2023). Assessment of inverse distance weighting and local polynomial interpolation for annual rainfall: A case study in Peninsular Malaysia. *Engineering Proceedings*, 38(1), 61.
- Crepani, E., Medeiros, J. D., Hernandez Filho, P., Florenzano, T. G., Duarte, V., & Barbosa, C. C. F. (2001). *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial* (p. 124). São José dos Campos: Inpe.
- Da Silva, L. M. L., Ekel, P., Vieira, D., & Soares, G. L. (2020). Multiattribute spatial decision-making for qualitative information processing as applied to the renewable energy generating sites prospection. *IEEE Access*, 8, 137745-137757.
- De Matos, T. P. V., De Matos, V. P. V., De Mello, K., & Valente, R. A. (2021). Protected areas and forest fragmentation: sustainability index for prioritizing fragments for landscape restoration. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(1), 19-31.
- De Paula, E. M. S., & Souza, M. J. N. (2007). Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13, 2979-2984.
- Denzin, N. K., Lincoln, Y. S., Giardina, M. D., & Cannella, G. S. (Eds.). (2023). *The Sage handbook of qualitative research*. Sage publications.
- dos Santos, R. F. (2004). *Planejamento ambiental: teoria e prática*. Oficina de textos.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental pollution*, 159(8-9), 2078-2087.
- Fahrig, L. (2017). Ecological responses to habitat fragmentation per se. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 48(1), 1-23.
- Feizizadeh, B., Roodposhti, M. S., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & geosciences*, 73, 208-221.
- Fischer, J., & Lindenmayer, D. B. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global ecology and biogeography*, 16(3), 265-280.
- Ghanbari, M., Arabi, M., Georgescu, M., & Broadbent, A. M. (2023). The role of climate change and urban development on compound dry-hot extremes across US cities. *Nature communications*, 14(1), 3509.
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). *International journal of the analytic hierarchy process*, 10(3).
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, 319(5864), 756-760.
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., ... & Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science advances*, 1(2), e1500052.

- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
- Houghton, R. A., Hackler, J. L., & Lawrence, K. T. (1999). The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, 285(5427), 574-578.
- Hwang, C. L., & Masud, A. S. M. (2012). *Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey* (Vol. 164). Springer Science & Business Media.
- Ishizaka, A., & Lusti, M. (2006). How to derive priorities in AHP: a comparative study. *Central European Journal of Operations Research*, 14, 387-400.
- Kabisch, N. (2015). Ecosystem service implementation and governance challenges in urban green space planning—The case of Berlin, Germany. *Land use policy*, 42, 557-567.
- Khadka, C., Hujala, T., Wolfslehner, B., & Vacik, H. (2013). Problem structuring in participatory forest planning. *Forest policy and economics*, 26, 1-11.
- Laurance, W. F., Camargo, J. L., Luizão, R. C., Laurance, S. G., Pimm, S. L., Bruna, E. M., ... & Lovejoy, T. E. (2011). The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. *Biological conservation*, 144(1), 56-67.
- Li, D., Zhang, J., & Wu, H. (2012). Spatial data quality and beyond. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(12), 2277-2290.
- Long, L. C., D'Amico, V., & Frank, S. D. (2019). Urban forest fragments buffer trees from warming and pests. *Science of the Total Environment*, 658, 1523-1530.
- MacArthur, R. H., & Wilson, E. O. (2001). *The theory of island biogeography* (Vol. 1). Princeton university press.
- Macedo, D. R., Hughes, R. M., Kaufmann, P. R., & Callisto, M. (2018). Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. *Science of the Total Environment*, 635, 1267-1279.
- Magnago, L. F. S., Magrath, A., Barlow, J., Schaefer, C. E. G. R., Laurance, W. F., Martins, S. V., & Edwards, D. P. (2017). Do fragment size and edge effects predict carbon stocks in trees and lianas in tropical forests?. *Functional ecology*, 31(2), 542-552.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1, pp. 55-77). New York: Springer.
- McGarigal, K. (1995). *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure* (Vol. 351). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Medeiros, R. M. (2019). Método da classificação climática de Köppen e Thornthwaite aplicado ao município de Bom Jesus-PI, Brasil. *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*.
- Mendes, F. H., de Stefano Piedade, S. M., Mendes, L. G., Lopes, A. M. S., & da Silva Filho, D. F. (2019). Probabilidade de ocorrência de altas temperaturas do ar e chuvas intensas em Piracicaba/SP. *Geografia em Atos (Online)*, 1(9), 51-65.
- Moore, I. D., Burch, G. J., & Mackenzie, D. H. (1988). Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, 31(4), 1098-1107.
- Moraes, D. S. D. L., & Jordão, B. Q. (2002). Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista de saúde pública*, 36, 370-374.
- Myllyviita, T., Hujala, T., Kangas, A., & Leskinen, P. (2011). Decision support in assessing the sustainable use of forests and other natural resources—a comparative review. *The Open Forest Science Journal*, 4(1).
- Newbold, T., Hudson, L. N., Arnell, A. P., Contu, S., De Palma, A., Ferrier, S., ... & Purvis, A. (2016). Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science*, 353(6296), 288-291.
- Nichol, J. E., Abbas, S., & Fischer, G. A. (2017). Spatial patterns of degraded tropical forest and biodiversity restoration over 70-years of succession. *Global ecology and conservation*, 11, 134-145.
- Ometto, J. P., Gorgens, E. B., de Souza Pereira, F. R., Sato, L., de Assis, M. L. R., Cantinho, R., ... & Keller, M. (2023). A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. *Scientific Data*, 10(1), 668.
- Pires, A. S., Fernandez, F. A., & Barros, C. S. (2006). Vivendo em um mundo em pedaços: efeitos da fragmentação florestal sobre comunidades e populações animais. *Biologia da Conservação: Essências. São Carlos, São Paulo, Brazil*, 231-260.
- Pirovani, D. B., Silva, A. G. D., Santos, A. R. D., Cecílio, R. A., Gleriani, J. M., & Martins, S. V. (2014). Análise espacial de fragmentos florestais na Bacia do Rio Itapemirim, ES. *Revista Árvore*, 38, 271-281.
- Rocha-Santos, L., Pessoa, M. S., Cassano, C. R., Talora, D. C., Orihuela, R. L., Mariano-Neto, E., ... & Cazetta, E. (2016). The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. *Biological Conservation*, 196, 1-9.
- Roque, W. V. (2009). Mapeamento geoambiental da área urbana de Manaus-AM.
- Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., & Pauleit, S. (2023). Urban Forest and Urban Microclimate. *Forests*, 14(12), 2391.
- Saaty, T. L. (1980). The analytical hierarchy process, planning, priority. *Resource allocation. RWS publications, USA*.
- Salbitano, F. (2016). *Guidelines on urban and peri-urban forestry* (pp. 0-158). Fao.
- Shepard, D. (1968, January). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference* (pp. 517-524).
- Shimabukuro, Y. E., Maeda, E. E., & Formaggio, A. R. (2009). Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. *Ceres*, 56(4).

- Simonetti, V. C., Sabonaro, D. Z., Lourenço, R. W., Rosa, A. H., & da Cunha, D. C. (2019). Análise da variabilidade espacial horizontal e vertical dos atributos do solo e sua relevância para o Parque Natural Chico Mendes, SP. *Revista Brasileira de Geografia Física*, *12*(7), 2537-2550.
- Souza, C. C. D., Moreira, A. D. A., Schimith, R. S., Brandão, P. C., & Silva, E. (2007). Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil-Uma revisão bibliográfica. *Ciência Florestal*, *17*(4), 409-417.
- Uriarte, M., Bruna, E. M., Rubim, P., ANClaes, M. A. R. I. N. A., & Jonckheere, I. (2010). Effects of forest fragmentation on the seedling recruitment of a tropical herb: assessing seed vs. safe-site limitation. *Ecology*, *91*(5), 1317-1328.
- Viana, V. M., & Pinheiro, L. A. F. V. (1998). Conservação da biodiversidade em fragmentos florestais. *Série técnica IPEF*, *12*(32), 25-42.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*.

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)