



Avaliação da vulnerabilidade ambiental em unidades de conservação da Amazônia Legal Brasileira

Assessing environmental vulnerability in conservation units in the Brazilian Legal Amazon

Ermeson Freitas da Silva¹ ; Maria de Lourdes Ruivo² ; Aline Meiguins de Lima¹ ; João Marcio Palheta da Silva¹ ; Rafael Ribeiro Meireles²

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

²Museo Paraense Emílio Goeldi, Belém, PA, Brasil.

E-mail: ruivo@museu-goeldi.br (MLR); alinemeiguins@gmail.com (AML); jmpalheta@ufpa.br (JMPS); rafarm1997@gmail.com (RRM).

*Email para correspondência: ermesonfreitasdasilva@gmail.com

Recebido (Received): 21/10/2023

Aceito (Accepted): 16/11/2024

Resumo: Este estudo analisa a vulnerabilidade ambiental das Unidades de Conservação (UCs) na Amazônia Legal Brasileira no período de 2012 a 2021, com foco nos impactos crescentes decorrentes de atividades humanas, como desmatamento, queimadas, exploração madeireira e agricultura. Embora o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) tenha sido implementado, ele não tem sido suficiente para evitar tais impactos, tornando necessária uma avaliação detalhada das áreas protegidas. A metodologia adotada baseou-se na seleção de indicadores e na modelagem de índices ambientais, considerando fatores econômicos, sociais, culturais e políticos, que permitem uma avaliação precisa da vulnerabilidade das UCs. Foram utilizados indicadores de exposição, sensibilidade, impacto potencial e capacidade adaptativa para elaborar um índice final de vulnerabilidade, identificando as principais ameaças às UCs, como a expansão de pastagens e queimadas. Os procedimentos metodológicos incluíram a seleção de indicadores relevantes, coleta de dados de diversas fontes (como INPE, MapBiomas e MODIS), normalização e ponderação dos dados, cálculo dos índices e análise espacial dos resultados. A análise revelou uma heterogeneidade significativa entre as UCs da Amazônia Legal, com as regiões de menor capacidade adaptativa concentradas principalmente nos estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso e Rondônia. Os resultados ressaltam a urgência de intervenções direcionadas e o uso do índice de vulnerabilidade como uma ferramenta prática para o direcionamento estratégico de recursos e a implementação de políticas de conservação mais eficazes, contribuindo para o manejo sustentável da Amazônia Legal.

Palavras-chave: Índice de vulnerabilidade; Unidades de conservação; Amazônia.

Abstract: *This study analyzes the environmental vulnerability of Conservation Units (CUs) in the Brazilian Legal Amazon from 2012 to 2021, focusing on the increasing impacts resulting from human activities, such as deforestation, wildfires, logging, and agriculture. Although the National System of Conservation Units (SNUC) has been implemented, it has not been sufficient to prevent these impacts, necessitating a detailed assessment of protected areas. The methodology adopted was based on the selection of indicators and modeling of environmental indices, considering economic, social, cultural, and political factors, enabling a precise evaluation of the vulnerability of CUs. Indicators of exposure, sensitivity, potential impact, and adaptive capacity were used to develop a final vulnerability index, identifying the main threats to CUs, such as the expansion of pastures and wildfires. The methodological procedures included selecting relevant indicators, collecting data from various sources (such as INPE, MapBiomas, and MODIS), normalizing and weighting the data, calculating the indices, and spatial analysis of the results. The analysis revealed significant heterogeneity among the CUs in the Legal Amazon, with regions of lower adaptive capacity concentrated mainly in the states of Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso, and Rondônia. The findings highlight the urgency of targeted interventions and the use of the vulnerability index as a practical tool for the strategic allocation of resources and the implementation of more effective conservation policies, contributing to the sustainable management of the Legal Amazon.*

Keywords: *Vulnerability index; Conservation units; Amazon.*

1. Introdução

Nos anos 2000, após a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente realizada no Rio de Janeiro em 1992, que discutiu as concepções de desenvolvimento sustentável, foi criado um dos principais dispositivos legais da política brasileira para a conservação de áreas naturais: a Lei Federal nº 9.985/2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Esse sistema regulamenta a criação, implantação e gestão das unidades de conservação, divididas em Proteção Integral e Uso Sustentável (BRASIL, 2000). Apesar da implementação do SNUC, essas áreas têm sofrido impactos ambientais decorrentes das pressões de atividades antrópicas, como a degradação florestal, queimadas, exploração madeireira e atividades agropecuárias. Esses fatores têm comprometido o estado de conservação de unidades de conservação e, conseqüentemente, aumentado sua vulnerabilidade à ameaças.

Nesse contexto, surgem questionamentos acerca das medidas prioritárias para aprimorar a gestão de territórios protegidos, bem como do impacto do contexto local na preservação e conservação dos recursos naturais e culturais. Além disso, emerge a necessidade de quantificar e comunicar de forma concisa as informações aos gestores e à sociedade em geral. Torna-se fundamental identificar estratégias eficientes para otimizar a proteção dessas áreas e promover a conscientização sobre sua importância para a sustentabilidade ambiental e cultural. A identificação de indicadores e a modelagem de índices ambientais são importantes instrumentos de avaliação das áreas protegidas, considerando a complexa distribuição espacial dessas áreas, influenciada por aspectos econômicos, sociais, culturais e políticos (MASULLO *et al.* 2019).

No contexto da relação sociedade-ambiente, surge a necessidade de avaliar esses aspectos em conjunto, formulando um grau de vulnerabilidade ambiental de um sistema, definido como o grau de suscetibilidade aos danos ou a incapacidade de lidar com efeitos adversos diante das mudanças. Esse conceito, inicialmente discutido no terceiro e quarto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (McCARTHY *et al.* 2001; PATWARDHAN *et al.* 2007), pode ser aplicado às Unidades de Conservação (UCs), que configuram um sistema composto pelo ambiente natural e pelas populações associadas por meio de atividades econômicas ou de subsistência. Além disso, atividades indiretas ou externas às UCs podem interferir em sua função protetora do ambiente.

Estudos têm avaliado a vulnerabilidade de áreas protegidas às mudanças climáticas; no entanto, não se determina o grau de vulnerabilidade associado a outros fatores de risco ambiental, principalmente relacionados às atividades humanas. Rorato *et al.* (2022) desenvolveram um estudo sobre a vulnerabilidade de Terras Indígenas (TIs) às ameaças ambientais não relacionadas às mudanças climáticas, identificando as TIs mais vulneráveis e avaliando o impacto potencial (associado à exposição e sensibilidade) e a capacidade adaptativa dessas áreas diante das mudanças ou ameaças.

Lapola *et al.* (2020) avaliaram a vulnerabilidade de áreas protegidas (TIs e UCs) às mudanças climáticas. Das 993 áreas protegidas (APs) analisadas, apenas 17 (1,7%) foram classificadas como altamente vulneráveis às mudanças climáticas, cobrindo 20.611 km² e localizadas na Mata Atlântica, no Cerrado e na Amazônia. Quinze das 17 APs altamente vulneráveis (88%) visavam ao uso sustentável dos recursos naturais, abrangendo populações tradicionais, e todas eram terras indígenas.

A Amazônia Legal é uma região geopolítica de grande importância para o Brasil, abrangendo nove estados e cobrindo cerca de 59% do território nacional. Criada na década de 1950 para promover o desenvolvimento socioeconômico e a preservação ambiental, essa região vai além da floresta amazônica, englobando áreas de Cerrado e Pantanal. Rica em biodiversidade, recursos hídricos e cultura, a Amazônia Legal é habitada por comunidades tradicionais e indígenas, cuja subsistência depende dos recursos naturais. Sua relevância transcende fronteiras, sendo crucial para a sustentabilidade ambiental e climática global.

No contexto das Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal, a região é alvo de intensas pressões antrópicas que promovem a vulnerabilidade ambiental. A avaliação da vulnerabilidade ambiental das UCs da Amazônia Legal considera fatores como exposição e sensibilidade a ameaças significativas, além da capacidade adaptativa das UCs frente aos impactos ambientais, conforme a metodologia proposta pelo IPCC. Esse modelo permite quantificar os níveis de ameaça e avaliar a capacidade de adaptação das áreas protegidas para responder a esses riscos.

A análise da vulnerabilidade ambiental é fundamental para compreender como as Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal respondem às mudanças ambientais em um contexto de desmatamento, mudanças climáticas e expansão agrícola. Este estudo avalia a vulnerabilidade ambiental das UCs da região por meio da modelagem de um índice de vulnerabilidade, permitindo mensurar os níveis de ameaça associados à exposição, sensibilidade às atividades antrópicas e capacidade adaptativa frente aos impactos ambientais, no período de 2012 a 2021. A abordagem baseia-se no conceito de vulnerabilidade definido pelo IPCC (McCARTHY *et al.* 2001; PATWARDHAN *et al.* 2007), utilizando indicadores para

representar as dimensões de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa das UCs diante das principais ameaças.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo está situada na Amazônia Legal Brasileira (ALB), uma região geopolítica definida pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Na **Figura 1**, a ALB abrange cerca de 5 milhões de km² e aproximadamente 58,9% do território nacional, e compreende os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia, Mato Grosso e parte de Tocantins, Goiás e Maranhão (BRASIL, 2012). Essa região concentra a maior parte das áreas protegidas do país, com 355 Unidades de Conservação (UCs), além de englobar diversas formações vegetais. O bioma amazônico, que representa cerca de 65% da área total, é predominante, seguido por áreas de Cerrado, vegetação de transição e campinaranas (MAY; MILLIKAN; GEBERA, 2016).

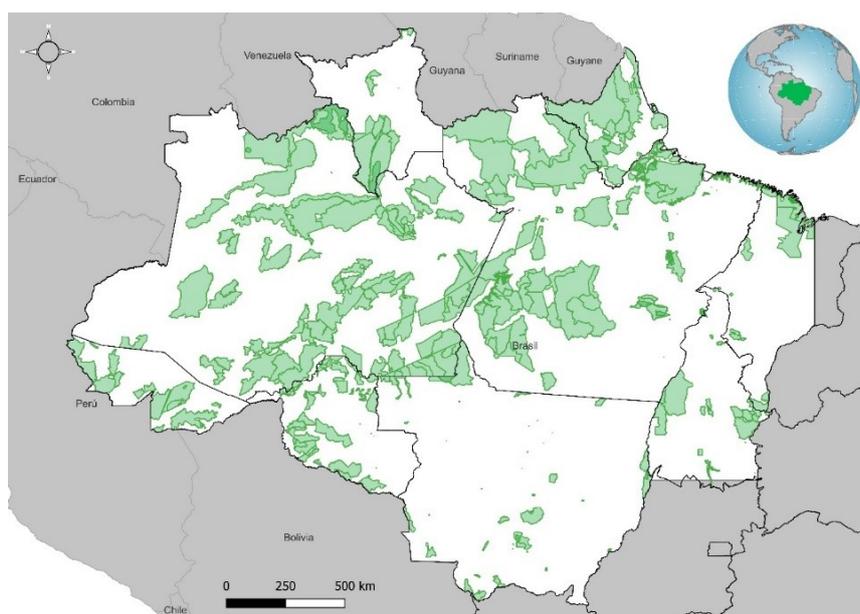


Figura 1: Localização das Unidades de Conservação na Amazônia Legal Brasileira. Fonte: Elaborado pelos autores a partir de IBGE, 2010 e BRASIL, 2023.

Foram selecionadas apenas as Unidades de Conservação (UCs) contidas integralmente na Amazônia Legal e as que ultrapassavam seu limite foram recortadas. Para análise, selecionou-se UCs com área superior a 50 km², totalizando 270 UCs. A partir da escala dos dados utilizados, seria difícil inferir a vulnerabilidade e a capacidade de adaptação de UCs com áreas menores, apesar de UCs menores tenderem a ser mais vulneráveis. Essa seleção excluiu 24% das UCs, 85 unidades. No entanto, elas representam menos de 0,1% da área total das UCs da Amazônia Legal (BRASIL, 2023; LAPOLA *et al.* 2020). A proposta deste estudo é avaliar os impactos ambientais históricos e atuais do grau de vulnerabilidade das UCs amazônicas, portanto, definiu-se o período de análise de dez anos completos de 2012 até 2021.

2.2. Definição de ameaças

Dentre os principais fatores que ameaçam as Unidades de Conservação, destacam-se os impactos decorrentes da redução da cobertura vegetal, tais como o desmatamento, a degradação florestal e as queimadas, além da facilidade de acesso promovida por meio de estradas e atividades econômicas como a exploração madeireira, a mineração, a agricultura e a pecuária (RORATO *et al.* 2022).

De maneira geral, existe um consenso sobre a eficácia das Unidades de Conservação (UCs) na prevenção do desmatamento, porém o estudo de Vedovato *et al.* (2016), destaca a vulnerabilidade dessas áreas à exploração madeireira, tanto legal quanto ilegal. Argumenta-se que a proximidade de estradas, atividades agrícolas e desmatamento podem contribuir para um aumento na degradação florestal por meio do fogo, resultando em novos níveis e padrões de fragmentação da floresta (CABRAL *et al.* 2018).

O desafio das avaliações de vulnerabilidade é operacionalizar o arcabouço teórico (TATE, 2013). A seleção do que deve ser incluído depende do sistema em risco, do contexto e da intenção da avaliação. Três abordagens são geralmente utilizadas em avaliações de vulnerabilidade: abordagem participativa, baseada em modelos de simulação e a baseada em indicadores (NGUYEN *et al.* 2016). A última, aplicada neste estudo, é a mais utilizada. Considera um conjunto de indicadores para explicar os três componentes de vulnerabilidade: exposição (EX), sensibilidade (SE) e capacidade adaptativa (CA) (RORATO *et al.* 2022).

Considerou-se três dimensões relacionadas às ameaças ambientais para os componentes de exposição e sensibilidade: cobertura florestal, atividade econômica e acesso. Para a capacidade adaptativa foram avaliadas as dimensões recursos naturais, humanos e econômicos, como é demonstrado na **Tabela 1**.

Tabela 1: Componentes de vulnerabilidade, suas dimensões, indicadores, pesos e fonte de dados. Fonte: Dados da pesquisa. Adaptado de Rorato *et al.* (2022).

Componente	Dimensão	Indicador	Quantificação	Peso	Período	Fonte de dados
EX	Cobertura florestal	Desmatamento	Área desmatada acumulada em ZA (%)	166	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Prodes (INPE)
	Cobertura florestal	Degradação florestal	Área florestal degradada acumulada em ZA (%)	154	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Degrad/Deter (INPE)
	Cobertura florestal	Incêndio	Área queimada acumulada em ZA (%)	98	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Produto de área queimada (MODIS)
	Atividade econômica	Agricultura	Área de lavoura em ZA (%)	118	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Mapbiomas (2022)
	Atividade econômica	Gado	Área de pastagem em ZA (%)	156	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Mapbiomas (2022)
	Atividade econômica	Mineração	Nº ocorrências de mineração em ZA	171	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	ANM (2022)
	Acesso	Estradas	Densidade de estradas em ZA (km/km ²)	137	2016 e 2021	DNIT (2022)
SE	Cobertura florestal	Desmatamento	Área desmatada acumulada em UC (%)	166	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Prodes (INPE)
	Cobertura florestal	Degradação florestal	Área florestal degradada acumulada em UC (%)	154	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Degrad/Deter (INPE)
	Cobertura florestal	Incêndio	Área queimada acumulada em UC (%)	98	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Produto de área queimada (MODIS)
	Atividade econômica	Agricultura	Área de lavoura em UC (%)	118	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Mapbiomas (2022)
	Atividade econômica	Gado	Área de pastagem em UC (%)	156	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	Mapbiomas (2022)
	Atividade econômica	Mineração	Nº ocorrências de mineração em UC	171	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	ANM (2022)
	Acesso	Estradas	Densidade de estradas em UC (km/km ²)	137	2016 e 2021	DNIT (2022)
CA	Recursos naturais	Integridade da cobertura florestal	Índice de maior mancha florestal UC+ZA (%)	189	2012-2021	Mapbiomas (2021)
	Recursos Naturais	Integridade da cobertura florestal	Porcentagem da área central da paisagem UC+ZA (%)	183	2012-2021	Mapbiomas (2022)
	Recursos Naturais	Integridade da superfície de água	Extensão da superfície de água UC+ZA (%)	154	2020	Mapbiomas (2022)
	Recursos Humanos	Arranjo institucional	Participação em Projetos/Programas	149	2012-2021	MMA/CNUC (2022)
	Recursos econômicos	Rendas externas	Total de investimentos (R\$)	123	2012–2016, 2017–2021, 2012–2021	MMA/ARPA (2022)
	Recursos Humanos	Aspecto legal	Categoria da UC	90	2021	MMA/CNUC (2022)
	Recursos Humanos	Arranjo institucional	Efetividade da gestão da UC (FAUC) (%)	112	2012-2021	MMA/ARPA (2022)

A diversidade dos indicadores revela a complexidade de fatores que afetam a vulnerabilidade ambiental e a resiliência das Unidades de Conservação (UCs) e Zonas Adjacentes (ZA) na Amazônia Legal. Por isso a ponderação foi aplicada conforme os pesos e critérios adotados por Rorato *et al.* (2022) para TIs, considerando que apresentam graus de ameaças e características ambientais semelhantes comparadas às UCs.

2.3. Vulnerabilidade e seus componentes

Neste estudo, é utilizada a definição de vulnerabilidade proposta no terceiro e quarto relatório de avaliação do IPCC o qual trabalha a definição dos componentes-chaves: exposição (EX), sensibilidade (SE) e capacidade adaptativa (CA). A vulnerabilidade de um sistema seja humano-ambiente, ambiental ou humano está relacionada às ameaças ou mudanças às quais ele é exposto, e o impacto potencial dessas ameaças ou mudanças refletem a sua sensibilidade (RORATO *et al.* 2022).

A **Figura 2** ilustra os componentes formadores da vulnerabilidade. A Exposição (EX) e a Sensibilidade (SE) determinam o Impacto Potencial (IP), e este pode ser minimizado pela Capacidade Adaptativa (CA) do sistema avaliado. A integração do impacto potencial e das capacidades adaptativas definem a Vulnerabilidade (V) do sistema, ou seja, um sistema caracteriza-se como vulnerável se for exposto aos impactos das ameaças, se for sensível a esses impactos e se tiver baixa capacidade de lidar com eles (NGUYEN *et al.* 2016).

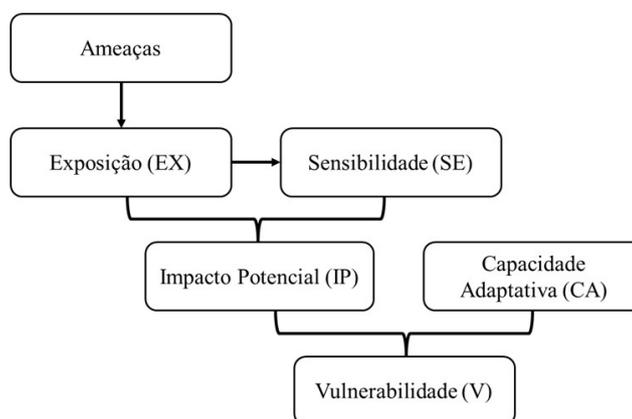


Figura 2: Estrutura conceitual de vulnerabilidade. Fonte: Elaborado pelos autores. Adaptado de Nguyen *et al.* (2016) e Rorato *et al.* (2022).

Neste contexto, a vulnerabilidade é entendida como uma função direta da exposição e sensibilidade, moderada pela capacidade adaptativa. Esse modelo é importante para quantificar o risco e desenvolver estratégias de mitigação, uma vez que proporciona uma visão integrada das ameaças e da capacidade de resposta do sistema analisado.

2.4. Indicadores do componente Exposição (EX)

A definição de exposição conforme discutido por Lindoso (2017), refere-se à fonte de perturbação, que é um elemento externo ao sistema em análise. Geralmente, a exposição é caracterizada de acordo com sua natureza, duração, magnitude e frequência do estímulo. A exposição também é descrita como a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ambientais, serviços e recursos, infraestrutura ou bens econômicos, sociais ou culturais em áreas ou ambientes que podem ser impactados negativamente (NGUYEN *et al.* 2016).

A exposição abrange os indicadores a partir de ameaças externas calculadas dentro da zona de amortecimento (ZA) de 10 km a partir dos limites das UCs. A escolha da distância de 10 km tem como base o consenso de estudos anteriores (SOARES-FILHO *et al.* 2010; CABRAL *et al.* 2018) que adotaram a mesma medida para identificar ameaças em áreas protegidas, além disso, a mesma medida é adotada pela legislação (BRASIL, 2002).

Para o cálculo do índice de exposição das Unidades de Conservação (UCs) considerou-se as seguintes ameaças: o desmatamento, a degradação florestal, o fogo, a agricultura, a pecuária, o acesso rodoviário e a mineração. Para cada indicador, foram utilizados dados específicos para determinar o percentual acumulado

de área afetada em relação à área total da zona de amortecimento (ZA) de cada UC para período total de 2012 até 2021.

O indicador de exposição das UCs ao desmatamento e a degradação florestal foram calculados como o percentual acumulado de áreas desmatadas e degradadas em relação à área da ZA em cada período, a partir dos dados do Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia (PRODES) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e para o indicador degradação florestal as fontes dos dados foram no sistema DEGRAG (até 2016) e DETER (2017 até 2021), áreas sobrepostas foram descontadas (INPE, 2021).

Da mesma forma, o indicador incêndio foi calculado como a porcentagem acumulada de área queimada em relação à área da ZA para cada período, usando dados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) *Global Burned Area Product (Collection 6)* (GIGLIO *et al.* 2018). Este produto resulta da detecção diária de áreas ardidas com uma resolução espacial de 500 m. Sobreposições foram descontadas.

Os indicadores de exposição das UCs à agricultura e pecuária foram estimados pelo percentual de áreas de pastagens e lavouras em relação à área da ZA ao final do período de 2021. Para tanto, utilizou-se os mapas anuais de uso e cobertura da terra (LULC) da Amazônia brasileira desenvolvidos a partir da série temporal do Projeto Mapbiomas com resolução espacial de 30 metros (MAPBIOMAS, 2022).

O indicador de exposição das UCs ao acesso rodoviário foi expresso pela densidade de estradas da BF no período de 2021. A densidade de estradas foi calculada dividindo-se a soma dos comprimentos das estradas da ZA pela área da ZA (km/km²). Os dados foram extraídos das bases do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Finalmente, o indicador de exposição à mineração foi expresso como o número de ocorrências de atividades minerárias na ZA entre os anos de 2012 e 2021, com dados compilados pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

2.5. Indicadores do componente Sensibilidade (SE)

Da mesma forma que o componente exposição, a sensibilidade engloba as mesmas ameaças e os mesmo cálculos, porém os sete indicadores são calculados dentro dos limites das Unidades de Conservação.

A sensibilidade refere-se às características intrínsecas do sistema que determinam sua propensão a ser afetado por um estímulo ou impacto específico. Em outras palavras, trata-se da capacidade do sistema de ser alterado, danificado ou sofrer perdas quando exposto a ameaças ou distúrbios. Essa característica é fundamental para entender o quanto um sistema é vulnerável diante de pressões externas, uma vez que a sensibilidade indica o grau em que um sistema pode ser negativamente impactado. Segundo Lindoso (2017), a sensibilidade é uma variável essencial na avaliação de vulnerabilidade ambiental, pois, ao lado da exposição, ajuda a definir a extensão e a profundidade dos danos potenciais que ameaças podem causar.

2.6. Indicadores do componente Capacidade Adaptativa (CA)

A capacidade adaptativa dos sistemas socioecológicos envolve fatores internos e externos e se refere à habilidade de gerenciar, se adaptar e se recuperar de perturbações ambientais, incluindo a mudança climática. Isso implica ajustar processos, estruturas e práticas para reduzir impactos. Alguns estudos a relacionam com direitos e acesso a opções (LINDOSO, 2017).

A capacidade adaptativa das Unidades de Conservação refere-se também às respostas a impactos e às adaptações às mudanças. Os indicadores incluem integridade da cobertura florestal calculada pela métrica de paisagem Índice de Maior Mancha (LPI) e Porcentagem da Área Central da Paisagem (CPLAND), a extensão da superfície de água, os programas de apoio à gestão de UCs como o ARPA e GEE, a efetividade da gestão calculado pela Ferramenta de Avaliação de Unidades de Conservação (FAUC) do programa de ARPA, o total de investimentos associados ao ARPA e a categoria da UC classificada.

McGarigal *et al.* (2012) propuseram métricas de paisagem, como o Índice de Patch Maior (LPI) e a Porcentagem da Área Central da Paisagem (CPLAND), para avaliar a estrutura e capacidade adaptativa das paisagens. O LPI mede o tamanho do maior fragmento, indicando áreas contíguas, enquanto o CPLAND avalia a proporção da área central, destacando a conectividade dos fragmentos centrais. Essas métricas auxiliam na compreensão da configuração da paisagem, crucial para a sustentação da biodiversidade, e na identificação de áreas prioritárias para conservação e manejo sustentável (ALVES *et al.* 2021).

A FAUC é uma ferramenta para avaliar a efetividade da gestão de UCs, orientando os esforços dos gestores com base em seis elementos de avaliação: planejamento, insumos, processos, produtos, resultados e reflexão/melhoria. Neste estudo, a FAUC inclui 16 indicadores que servem como marcos de referência para o progresso de cada UC e avalia os resultados do programa (BRASIL, 2023).

O estudo MapBiomas Água de 2021 (MAPBIOMAS, 2021) fornece uma visão abrangente da distribuição dos corpos d'água no Brasil, incluindo rios, lagos, lagoas e reservatórios. Esses dados são cruciais para analisar a capacidade adaptativa das áreas protegidas, já que a presença e extensão da superfície de água desempenham um papel fundamental na resiliência dos ecossistemas aquáticos.

A presença de superfícies aquáticas amplas beneficia a mitigação de impactos, como as mudanças climáticas, e apoia a biodiversidade, o fornecimento de água potável e atividades socioeconômicas sustentáveis em UCs. Avaliar a extensão da superfície de água como um indicador de capacidade adaptativa nas UCs permite analisar sua capacidade de resposta a ameaças ambientais.

Em relação ao indicador de categoria das UCs, atribuiu-se os pesos conforme a classificação dada pelo SNUC de acordo com os níveis de restrição de uso e interferência. Os valores atribuídos a cada classificação foram: Estação Ecológica (ESEC) = 3; Reserva Biológica (REBIO) = 2; Parque (PE/PARNA) = 4; Refúgio de Vida Silvestre (REVIS) = 5; Monumento Natural (MN) = 5; Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) = 7; Reserva Extrativista (RESEX) = 7; Floresta (FLONA/FLOTA) = 7; Área de Proteção Ambiental (APA) = 8; Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) = 7. Valores maiores indicam maior nível de interferência e menor restrição. Estes valores foram normalizados utilizando o método máximo-mínimo inverso, pois quanto maior o nível de interferência menor será a capacidade de adaptação do ambiente.

2.7. Índice de Vulnerabilidade Ambiental

A normalização dos indicadores foi aplicada junto a uma abordagem aditiva para fornecer uma transformação linear que preserva a classificação e correlação dos dados originais e permitiu que indicadores com diferentes unidades e escalas sejam somados (RECKIEN, 2018). Para superar incompatibilidades, os indicadores foram redimensionados para valores entre 0 e 1 usando o método máximo-mínimo (NGUYEN *et al.* 2016; TATE, 2013).

A partir da combinação linear ponderada, os indicadores foram combinados em um valor final para cada componente de vulnerabilidade (EX, SE e AC) por UCs, conforme as Equações 1, 2 e 3. A abordagem aditiva consiste na soma de indicadores que contribuem fortemente para a vulnerabilidade ambiental de um determinado sistema (RECKIEN, 2018).

$$EX = \sum_{i=m}^n (Vex_i \times Pex_i) \quad \text{Eq. 1}$$

$$SE = \sum_{i=m}^n (Vse_i \times Pse_i) \quad \text{Eq. 2}$$

$$CA = \sum_{i=m}^n (Vca_i \times Pca_i) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

Vex_i = o valor calculado para o indicador EX;

Pex_i = o peso atribuído para o indicador EX;

Vse_i = o valor calculado para o indicador SE;

Pse_i = o peso atribuído para o indicador SE;

Vca_i = o valor calculado para o indicador CA;

Pca_i = o peso atribuído para o indicador CA.

Em seguida os componentes são combinados no índice de vulnerabilidade (V) por UCs. A vulnerabilidade resulta da interação entre a exposição e a sensibilidade do sistema frente a diversas ameaças, ou seja, o impacto potencial, enquanto a capacidade adaptativa indica a habilidade do sistema em minimizar

o impacto dessas ameaças. As equações (4) e (5) expressam o cálculo da do impacto potencial e da vulnerabilidade, respectivamente.

$$IP = EX + SE \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

IP = índice de impacto potencial;

EX = índice de exposição;

SE = índice de sensibilidade.

$$V = \frac{IP + (1 - CA)}{3} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

V = índice de vulnerabilidade;

IP = índice de impacto potencial;

CA = índice de capacidade adaptativa.

3. Resultados e discussões

3.1. Exposição

Os resultados revelaram índices de exposição (EX) predominantemente baixos para a maioria das Unidades de Conservação (UCs), variando de 0 a 0,202. Aquelas situadas ao longo da margem direita do rio Amazonas e dentro do Arco do Desmatamento exibiram valores mais elevados, situados predominantemente na faixa de 0,051 a 0,202. Em comparação, as localizadas a esquerda da margem do rio Amazonas obtiveram valores mais baixos (< 0,051).

A representação da distribuição espacial da exposição das Unidades de Conservação (UCs) na Amazônia Legal, é categorizada por diferentes frequências de exposição a ameaças ambientais. Na **Figura 3** observa-se que a maioria das UCs apresenta baixa exposição. Por outro lado, outras áreas indicam UCs com maior frequência de exposição, localizadas em regiões onde há uma concentração de atividades humanas, como desmatamento, exploração de recursos naturais e construção de infraestrutura. A presença dessas áreas de alta exposição em pontos específicos da Amazônia Legal apresenta uma pressão ambiental desigual. Essa diferenciação espacial permite priorizar áreas que necessitam de maior monitoramento e proteção para garantir a integridade ambiental da região.

Os valores encontrados corroboram com os aspectos legais das UCs no que diz respeito as suas restrições às atividades antrópicas e demonstra que elas cumprem bem seu papel de conservação ambiental (**Figura 3**).

Apenas 11,5% das Unidades de Conservação (UCs) têm um valor acima de 0,100. A APA do Tapajós, no sudoeste do Pará, é a mais exposta com o valor máximo de 0,202. Cerca de 70% das UCs têm um valor abaixo de 0,051. A APA do Tapajós tem muitas áreas de mineração ao longo dos rios Tapajós e Jamanxim, justificando seu indicador de mineração máximo de 1.

As UCs do norte do Estado de Rondônia também se destacam pela exposição a mineração. As análises de Rudke *et al.* (2020), descrevem a pressão que a mineração causa em UCs de Rondônia mesmo em categorias restritivas à esta atividade. Por meio de um Índice de Pressão Mineral (IPM), seu estudo destaca que as áreas de uso sustentável são as mais suscetíveis a esta pressão e as degradações ambientais principalmente nas zonas de amortecimento, pois estão associadas a atividades indiretas como a construção de novas estradas para escoamento de produtos e o processo de urbanização.

O estudo de Sonter *et al.* (2017), analisou imagens de satélite e mudanças na paisagem em 50 minas ativas na Amazônia no período de 2005 a 2015, onde o desmatamento total induzido pela mineração foi de 11.670 km². Cerca de 90% ocorreram fora do local de extração, em outros termos, a devastação fora das minas (buffer de 70 km) foi 12 vezes maior do que dentro. Isto está associado ao estabelecimento das infraestruturas de mineração e a ocorrência de desmatamento secundários relativos à sua expansão.

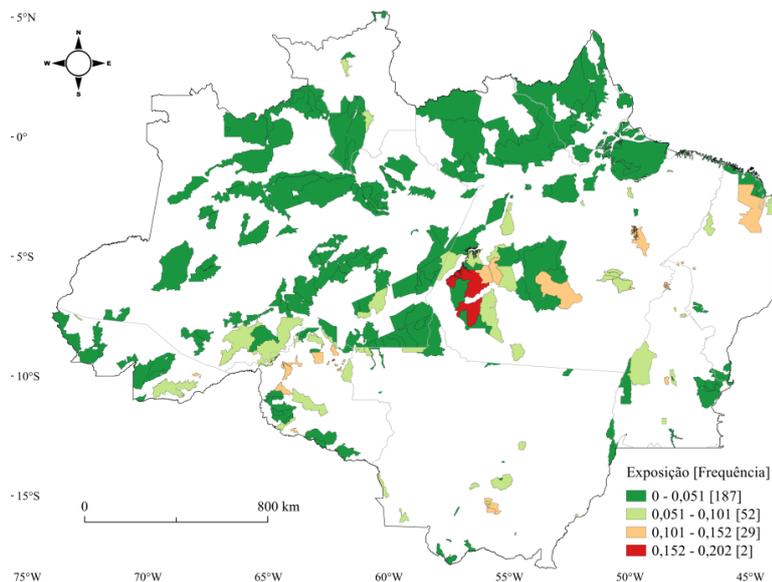


Figura 3: Índice de Exposição das Unidades de Conservação da Amazônia Legal no período de 2012 a 2021. Fonte: Autores.

3.2. Sensibilidade

Os resultados obtidos para o Índice de Sensibilidade (SE) variou de 0 a 0,274. A UC mais sensível foi a FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum localizada no estado de Rondônia (**Figura 4**). Os resultados de Rudke et. al (2020) também destacam esta UC como uma das mais pressionadas por processos minerários com 99% de sua área com interesse potencial e passível de exploração minerária.

Das 15 UCs com maiores índices de SE, apenas duas são de Proteção Integral o PES da Serra dos Martírios/Andorinhas e a REBIO Nascentes Serra do Cachimbo. Isso indica que as categorias de Proteção integral apresentam um efeito inibidor às ameaças ambientais e ao impacto potencial delas.

Observa-se que a maioria das UCs se encontra na faixa de menor sensibilidade, sugerindo que estas áreas possuem características intrínsecas que as tornam menos suscetíveis a modificações ou danos frente às ameaças ambientais. As áreas concentradas em regiões específicas, indicam UCs com níveis de sensibilidade mais altos. Isso pode estar relacionado a fatores ecológicos, como a presença de ecossistemas mais frágeis, diversidade biológica sensível ou maior dependência de recursos que são facilmente impactados por atividades antrópicas. Essas UCs mais sensíveis necessitam de maior atenção na formulação de políticas de conservação, pois possuem menor capacidade de resistir a perturbações ambientais.

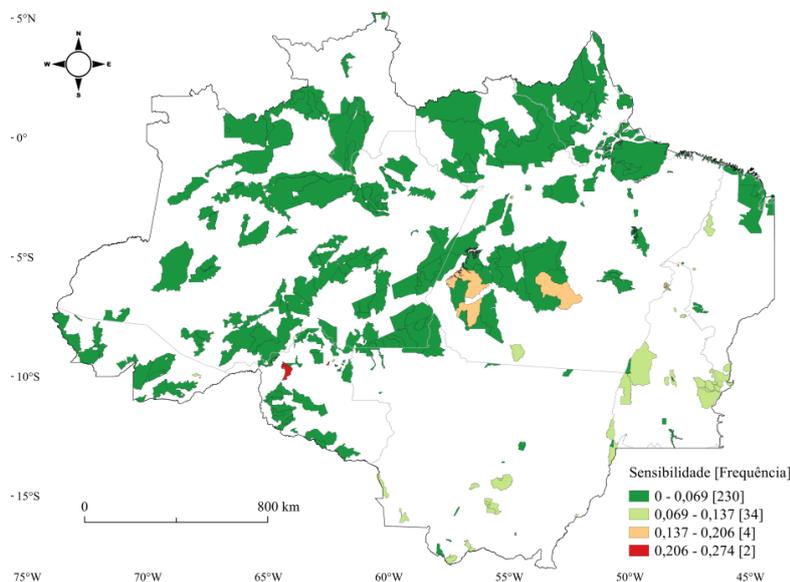


Figura 4: Índice de Sensibilidade das Unidades de Conservação da Amazônia Legal no período de 2012 a 2021. Fonte: Autores.

As UCs que apresentaram os maiores valores de sensibilidade (SE) estão distribuídas no arco do desmatamento (**Figura 4**), com destaque para a FLOTA Rendimento Sustentado Mutum (0,274) e a RESEX Jaci-Paraná (0,241) localizadas ao norte do Estado de Rondônia, e a APA do Tapajós (0,179) localizada no sudoeste do Estado do Pará. Em geral, o índice de sensibilidade foi superior ao de exposição, devido às categorias menos restritivas das Unidades de Conservação (UCs) em destaque.

Estes resultados diferem dos encontrados por Rorato *et al.* (2022) em Terras Indígenas (TIs), indicando que as ameaças ambientais também são maiores dentro dos limites das UCs comparada as ameaças externas, ou seja, a exposição. Além disso, as ameaças se concentram também nas zonas de amortecimento das UCs, assim como ocorre nas TIs, evidenciando que as restrições ambientais estabelecidas pelos órgãos e legislações ambientais têm um efeito positivo na conservação interna.

3.3. Impacto potencial

A **Figura 5** ilustra a distribuição do impacto potencial nas Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal, com base na combinação dos componentes de exposição e sensibilidade. O impacto potencial é representado por uma escala. Observa-se que a maioria das UCs está classificada nas faixas de menor impacto potencial, indicando que a combinação de exposição e sensibilidade em grande parte dessas áreas ainda permite uma certa resiliência frente a ameaças ambientais. Essas regiões, possivelmente próximas a áreas de atividades humanas intensas, como agricultura, mineração e infraestrutura, enfrentam uma pressão ambiental considerável, o que eleva o risco de degradação. A identificação dessas áreas de alto impacto potencial é crucial para orientar políticas de conservação e estratégias de mitigação, pois indica as UCs que mais necessitam de intervenções para preservar a integridade ambiental e funcional desses ecossistemas.

A partir da combinação dos Índices de EX e SE, estimou-se o Índice de Impacto Potencial (IP), variando de 0 a 0,412. Destacam-se a APA do Tapajós, no Estado do Pará, e a FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum e a RESEX Jaci-Paraná, no Estado de Rondônia, com os valores mais expressivos de 0,412, 0,382 e 0,353, respectivamente (**Figura 5**). Essas UCs são as mais suscetíveis e sensíveis às ameaças ambientais em comparação com as demais.

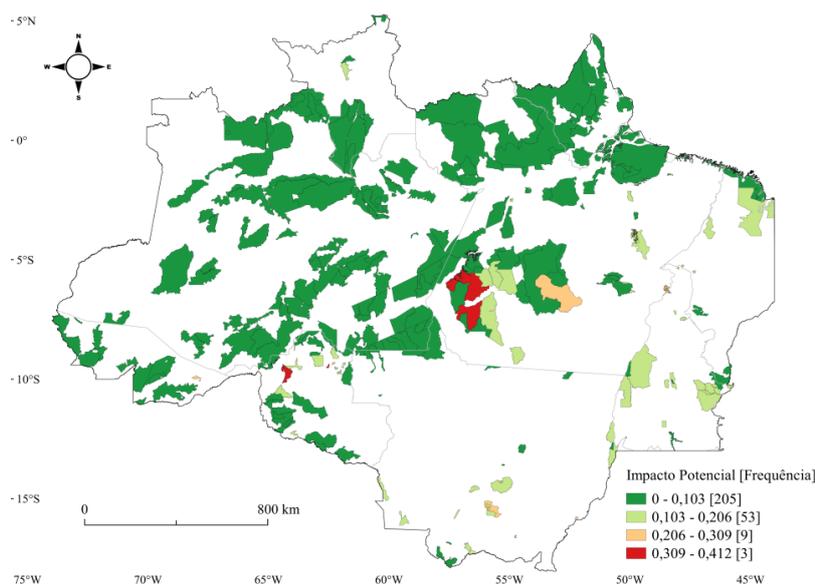


Figura 5: Índice de Impacto Potencial das Unidades de Conservação da Amazônia Legal no período de 2012 a 2021. Fonte: Autores.

3.4. Capacidade adaptativa

A capacidade adaptativa nas Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal, é um fator crítico que determina a habilidade das UCs de responder a pressões ambientais e de se recuperar de impactos adversos, considerando fatores institucionais, socioeconômicos e de infraestrutura que contribuem para a resiliência. As áreas predominantemente localizadas nas margens leste e sudeste da Amazônia Legal, apresentam baixa capacidade adaptativa e, portanto, estão mais vulneráveis a ameaças ambientais. Essas regiões, carentes de

infraestrutura, apoio institucional e ou recursos financeiros, enfrentam dificuldades em implementar medidas eficazes de conservação e mitigação. Em contraste, as áreas com alta capacidade adaptativa, tendem a estar mais protegidas e equipadas para enfrentar distúrbios, mostrando uma maior resiliência ecológica e operacional.

O índice de Capacidade Adaptativa variou de 0,033 a 0,74 com a APA Jalapão apresentando o valor mínimo e o PARNA Montanhas do Tumucumaque, o valor máximo. Aproximadamente 36% das UCs tiveram valores maiores que 0,5 (98 UCs).

Esta disparidade indica que as UCs não são uniformes em termos de sua resiliência e habilidade para responder a fatores de risco, refletindo possíveis diferenças nas políticas de gestão, infraestrutura, recursos disponíveis e grau de pressão antrópica (**Figura 6**).

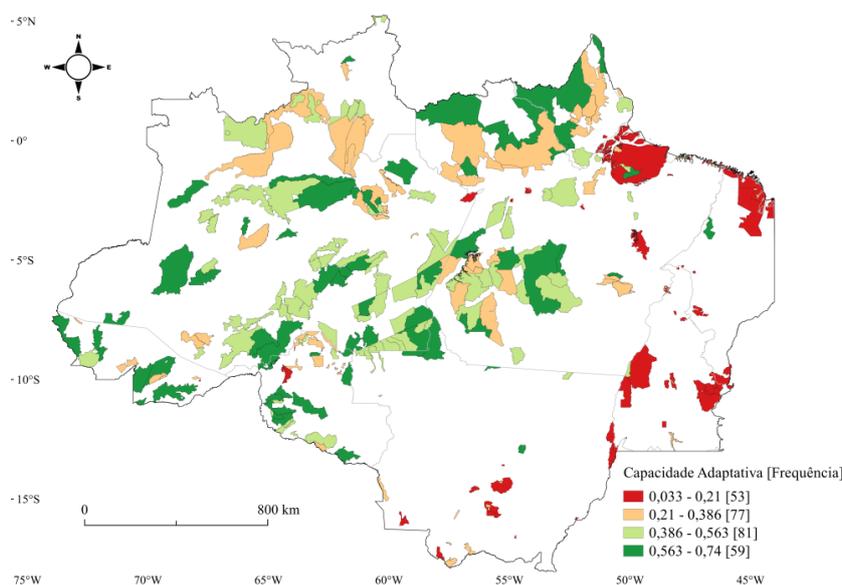


Figura 6: Índice de Capacidade Adaptativa das Unidades de Conservação da Amazônia Legal no período de 2012 a 2021. Fonte: Autores.

A distribuição geográfica das UCs com menor capacidade adaptativa revela um padrão concentrado em alguns estados da Amazônia Legal. A análise aponta que as UCs com menor capacidade adaptativa têm uma maior incidência nos Estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso e Rondônia.

O índice de núcleo, enquanto indicador de capacidade adaptativa de maior média, destaca a vital importância da preservação e conectividade das áreas centrais da paisagem na sustentação dos processos ecossistêmicos e da biodiversidade.

3.5. Vulnerabilidade ambiental

O Índice de Vulnerabilidade apresentou uma variação considerável entre UCs, indo de 0,088 a 0,408. O fato de que a Reserva Extrativista (RESEX) Jaci-Paraná se posicionou como a UC mais vulnerável, enquanto o Parque Nacional (PARNA) Montanhas do Tumucumaque foi identificado como o menos vulnerável, reflete diferenças significativas nas condições ambientais dessas áreas. A boa capacidade adaptativa do PARNA Montanhas do Tumucumaque pode ser atribuída, em parte, a uma menor pressão humana e à presença de um terreno acidentado e de difícil acesso. Essa configuração da paisagem favorece a resistência do ecossistema às ameaças externas.

A distribuição geográfica das UCs mais vulneráveis nos Estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso, Rondônia e Acre sugere padrões regionais de fragilidade ambiental (**Figura 7**). Esses resultados destacam a necessidade de abordagens diferenciadas de manejo e conservação. Enquanto o PARNA Montanhas do Tumucumaque serve como um exemplo de sucesso na proteção contra ameaças, a vulnerabilidade acentuada da RESEX Jaci-Paraná ressalta a urgência de intervenções para minimizar os impactos ambientais e sociais nessas regiões.

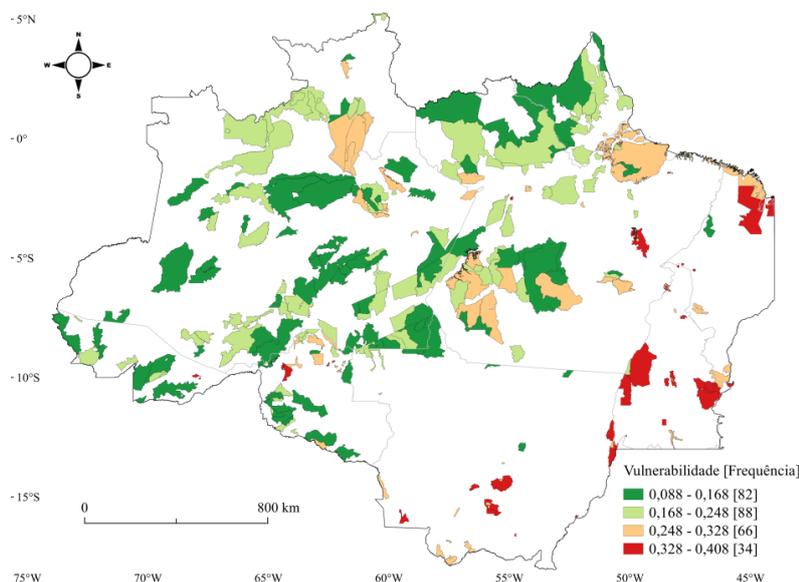


Figura 7: Índice de Vulnerabilidade das Unidades de Conservação da Amazônia Legal no período de 2012 a 2022. Fonte: Autores.

A distribuição da vulnerabilidade ambiental nas Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal, representada em uma escala indica diferentes frequências de vulnerabilidade. As áreas (valores de 0,088 a 0,168) mostram as UCs com menor vulnerabilidade, enquanto outras áreas (valores de 0,328 a 0,408) representam as UCs com maior vulnerabilidade. A vulnerabilidade, como definida aqui, é o resultado da combinação dos fatores de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa das UCs frente a ameaças ambientais, incluindo atividades antrópicas e mudanças ecológicas. Observa-se que as áreas predominantemente situadas nas regiões leste e sudeste da Amazônia Legal, possuem alta vulnerabilidade. Em contraste, as UCs com menor vulnerabilidade, estão em melhor posição para enfrentar perturbações devido a uma combinação mais favorável de baixa exposição e sensibilidade, além de uma capacidade adaptativa mais robusta.

Adicionalmente, destaca-se que a APA do Tapajós apresenta o menor nível de restrição em comparação com as outras categorias de unidades de conservação, o que a torna mais suscetível às ameaças antrópicas. De fato, essa categoria de UC é representada por oito das 15 UCs mais vulneráveis (**Tabela 2**).

Na **Figura 8**, listou-se as 15 UCs mais vulneráveis em relação a cada componente. Dentre elas, os maiores valores para os indicadores de exposição (**Figura 8 – A**) correspondem a pastagem (0,502), queimadas (0,178) e desmatamento (0,166). De acordo com os resultados obtidos por Rorato *et al.* (2022), o componente de sensibilidade apresenta uma maior variação na contribuição dos indicadores para o valor total do componente em comparação ao componente de exposição. Os indicadores de sensibilidade (**Figura 8 – B**) em destaque são pastagem (0,687), queimadas (0,512) e desmatamento (0,460).

A **Figura 8** analisa a vulnerabilidade das Unidades de Conservação (UCs) na Amazônia Legal em três dimensões: Exposição, Sensibilidade e Capacidade Adaptativa. Na Exposição (**Figura 8 – A**), atividades como queimadas e desmatamento destacam UCs como a RESEX Jaci-Paraná e a APA Baixada Maranhense, que enfrentam altos níveis de impacto, ameaçando sua integridade ecológica.

Na Sensibilidade (**Figura 8 – B**), UCs como a APA Chapada dos Guimarães e a RESEX Mata Grande apresentam alta vulnerabilidade interna, evidenciando a necessidade de fortalecer a gestão para enfrentar pressões externas. Já na Capacidade Adaptativa (**Figura 8 – C**), UCs como a FLONA de Rendimento Sustentado Mutum mostram maior resiliência devido a investimentos elevados e boa gestão. Em contraste, a RESEX Jaci-Paraná, com baixos investimentos e participação em projetos, permanece entre as UCs mais vulneráveis, exigindo intervenções urgentes.

Tabela 2: Índices de Exposição, Sensibilidade, Impacto Potencial, Capacidade Adaptativa e Vulnerabilidade.
Fonte: Autores (2023).

Ordem	Exposição UC	Sensibilidade UC		Impacto Potencial UC		Capacidade Adaptativa UC		Vulnerabilidade UC		
		Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	
1	APA do Tapajós	0,202	FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum	0,274	FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum	0,412	APA Jalapão	0,033	RESEX Jaci-Paraná	0,408
2	RESEX Angelim	0,168	RESEX Jaci-Paraná	0,242	APA do Tapajós	0,382	APA de São Geraldo do Araguaia	0,036	RESEX Extremo Norte do Tocantins	0,405
3	RESEX Rio preto-jacundá	0,143	APA do Tapajós	0,180	RESEX Jaci-Paraná	0,353	RESEX Extremo Norte do Tocantins	0,050	APA de São Geraldo do Araguaia	0,404
4	FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum	0,138	PE da Serra dos Martírios/Andorinhas	0,155	PE da Serra dos Martírios/Andorinhas	0,285	APA do Rio Curiaú	0,053	FLOTA de Rendimento Sustentado Mutum	0,397
5	APA de São Geraldo do Araguaia	0,131	RESEX Extremo Norte do Tocantins	0,147	RESEX Extremo Norte do Tocantins	0,266	APA Lago de Santa Isabel	0,064	APA Lago de Santa Isabel	0,380
6	RESEX Castanheira	0,131	APA Triunfo do Xingu	0,141	APA Triunfo do Xingu	0,251	RESEX Mata Grande	0,073	RESEX Mata Grande	0,376
7	PE da Serra dos martírios/andorinhas	0,130	APA Serra da Tabatinga	0,133	APA de São Geraldo do Araguaia	0,248	RESEX Marinha de Soure	0,074	APA Da Chapada Dos Guimarães	0,368
8	RDS Pucuruí - Ararão	0,129	APA Igarapé são Francisco	0,122	RESEX Angelim	0,247	APA Serra da Tabatinga	0,075	APA Serra da Tabatinga	0,365
9	RESEX Aquariquara	0,129	APA de São Geraldo do Araguaia	0,117	APA Igarapé São Francisco	0,232	APA Ilha do Bananal/Cantão	0,079	APA Municipal do Aricá-Açu	0,362
10	APA Lago de Santa Isabel	0,123	PE Águas do Cuiabá	0,115	PE Serra Azul	0,221	APA Meandros do Araguaia	0,082	PE Serra Santa Bárbara	0,362
11	APA da Baixada Maranhense	0,122	PE Serra Azul	0,113	APA Lago do Amapá	0,220	APA de Alter do Chão	0,085	APA da Baixada Maranhense	0,362
12	APA Lago do Amapá	0,121	PE Encontro das Águas	0,109	APA da Chapada dos Guimarães	0,216	PE do Jalapão	0,086	APA Lago de Palmas	0,361
13	RESEX Extremo Norte do Tocantins	0,119	PARNA do Araguaia	0,103	APA Lago de Santa Isabel	0,205	APA Foz do Rio Santa Tereza	0,092	PE Serra Azul	0,361
14	APA da Chapada dos Guimarães	0,119	RESEX Mata Grande	0,102	RESEX Mata Grande	0,200	RESEX do Ciriáco	0,092	APA Jalapão	0,359
15	PE de Guajará-Mirim	0,119	APA Lago do Amapá	0,099	RESEX Rio Preto-Jacundá	0,197	PE do Guirá	0,094	APA Ilha do Bananal/Cantão	0,358

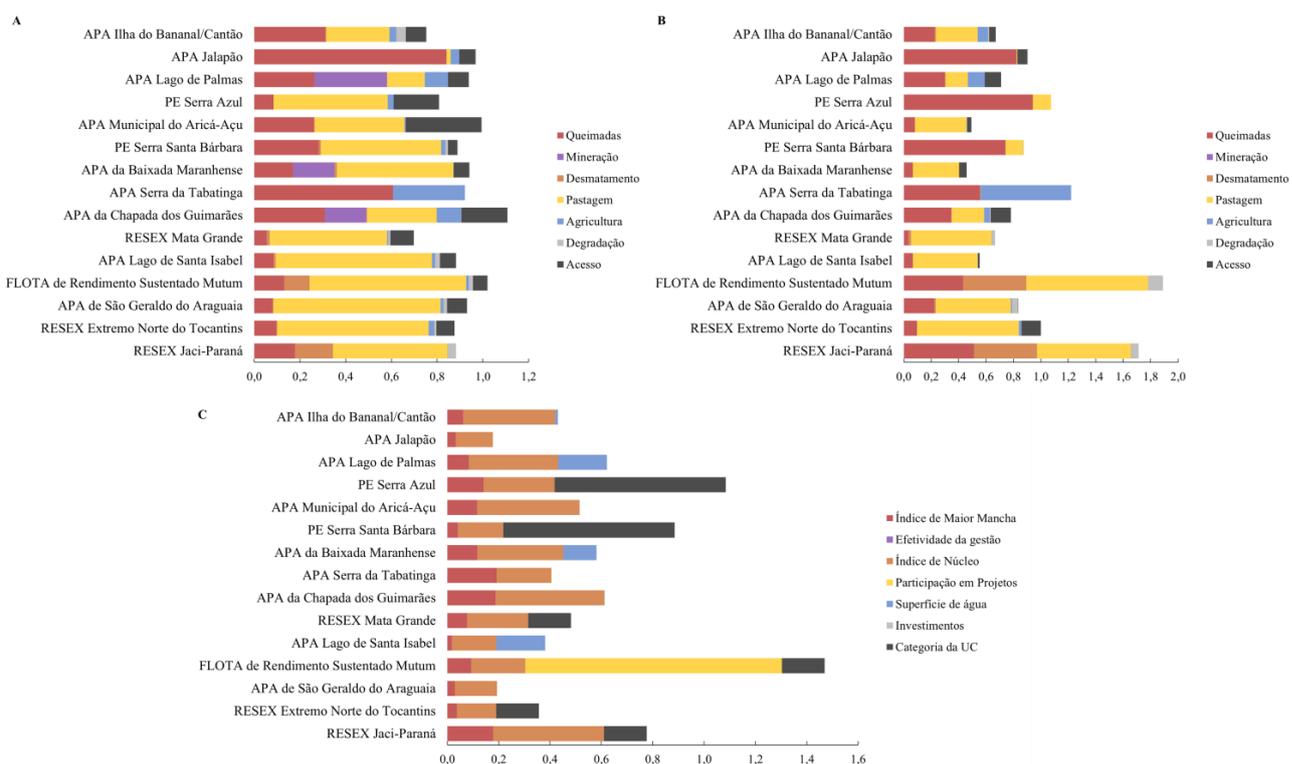


Figura 8: Valores dos indicadores de EX (A), SE (B) e CA (C) para as 15 Unidades de Conservação mais vulneráveis, em ordem crescente na vertical. Fonte: Autores.

Entre as 15 UCs mais vulneráveis, o índice de capacidade adaptativa da RESEX Jaci-Paraná, RESEX Extremo Norte do Tocantins e APA de São Geraldo do Araguaia apresentou valores zerados para indicadores como gestão e investimentos. A FLONA Mutum, embora a quarta mais vulnerável, destacou-se por indicadores positivos, como Índice de Núcleo (0,210) e Participação em Projetos (1,0), sendo a única entre as mais vulneráveis a participar do Projeto ARPA, que reforça sua efetividade.

O índice de núcleo teve a maior média (0,270) entre as UCs mais vulneráveis, indicando áreas centrais bem conectadas, essenciais para a manutenção da biodiversidade. Além disso, indicadores de desmatamento (0,460) e pastagem (0,888 para a FLONA Mutum e 0,687 para a RESEX Jaci-Paraná) refletem maior pressão antrópica em UCs do Estado de Rondônia, reforçando a necessidade de monitoramento e medidas de conservação.

Estes resultados corroboram os achados de Araújo *et al.* (2017, p. 92) e Vedovato *et al.* (2016), que indicam que, no período de 2012 a 2015, cerca de 87% do desmatamento na Amazônia Legal ocorreu nos Estados do Pará e Rondônia. Essas áreas de desmatamento estão frequentemente próximas a infraestruturas, como estradas e usinas.

Os indicadores de queimadas e pastagens apresentaram os valores médios mais altos nos componentes de exposição e sensibilidade, evidenciando os efeitos significativos dessas ameaças em UCs. A maior suscetibilidade a incêndios florestais está associada à fragmentação da paisagem, especialmente em áreas desmatadas, onde bordas expostas retêm menos umidade, possuem maior temperatura e estão mais sujeitas a ventos e massas de ar seco. Nessas condições, o acúmulo de biomassa morta aumenta a disponibilidade de combustível, intensificando o risco de incêndios.

A fragmentação florestal na Amazônia é desigual, com áreas críticas em Roraima, em UCs, Terras Indígenas e no arco do desmatamento. Esse fenômeno reflete o avanço da mineração ilegal, que contribui para o desmatamento e a perda de umidade da floresta, apesar da resistência de comunidades indígenas e do governo (CABRAL *et al.* 2018).

4. Conclusão

O estudo conclui que o índice de vulnerabilidade, junto aos índices de exposição, sensibilidade, impacto potencial e capacidade adaptativa, são ferramentas eficazes para avaliar as pressões ambientais nas Unidades de Conservação (UCs) da Amazônia Legal. Essas métricas permitem identificar ameaças antropogênicas e orientar políticas de proteção e alocação de recursos. As UCs com menor capacidade adaptativa, especialmente nos estados do Pará, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso e Rondônia, estão mais vulneráveis a impactos como desmatamento e mineração, demandando intervenções específicas.

O estudo mapeia UCs expostas a queimadas e expansão de pastagens, destacando a importância de monitoramento contínuo. A análise do índice de núcleo indica que UCs com maior resiliência possuem áreas centrais preservadas, essencial para a biodiversidade. Exemplo de sucesso é a FLONA de Rendimento Sustentado Mutum, que, com investimentos do Projeto ARPA, reforça a importância de políticas de incentivo para fortalecer UCs vulneráveis.

A metodologia, inspirada no modelo de vulnerabilidade do IPCC, adapta-se a diferentes contextos, tornando-se útil para comparações entre biomas. UCs como RESEX Jaci-Paraná e APA do Tapajós, identificadas com alta vulnerabilidade, requerem ações prioritárias. A flexibilidade dos índices permite adaptações às particularidades de cada UC, enquanto o monitoramento contínuo garante que estratégias de conservação acompanhem as pressões emergentes. O estudo propõe uma abordagem integrada com governos, ONGs e comunidades locais, enfatizando o papel dessas comunidades no sucesso das políticas de conservação da Amazônia.

Referências

ALVES, M. T. R. *et al.* Effects of settlement designs on deforestation and fragmentation in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 109, p. 105710, out. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.985**, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Seção 1, p. 45-48.

BRASIL. **Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 2002**. Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 7 jun. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Cadastro nacional de unidades de conservação**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 12 jan. 2023. Disponível em: <https://cnuc.mma.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.651**, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 25 mai. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em 05 nov. 2021.

CABRAL, A. I. R. *et al.* Deforestation pattern dynamics in protected areas of the Brazilian Legal Amazon using remote sensing data. **Applied Geography**, v. 100, p. 101–115, nov. 2018.

GIGLIO, L. *et al.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72–85, nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Censo demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em 20 set. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE. **Programa de monitoramento da Amazônia e demais biomas (PRODES)**. Desmatamento, 2021 – Amazônia Legal – Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LAPOLA, D. M. *et al.* A climate-change vulnerability and adaptation assessment for Brazil's protected areas. **Conservation Biology**, v. 34, n. 2, p. 427–437, abr. 2020.

LINDOSO, D. P. Vulnerabilidade e resiliência: potenciais, convergências e limitações na pesquisa interdisciplinar1. **Ambiente & Sociedade**, v. 20, n. 4, p. 127–144, out. 2017.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias** – mapeamento da superfície de água no Brasil (Coleção 2), 2021. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/MapBiomias_A%CC%81gua_2023_final.pdf. Acessado em 25 mar. 2023.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias** – série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil (Coleção 7), 2022. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>. Acesso em: 10 nov. 2022.

MASULLO, Yata Anderson Gonzaga; GURGEL, Hellen; LAQUES, Anne-Elizabeth. Avaliação da efetividade de áreas protegidas: conceitos, métodos e desafios. **GEOgraphia**, Niterói, v. 21, n.46, maio/ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2019.v21i46.a14396>. Disponível em: <http://periodicos.uff.br/geographia/article/view/14396/0>. Acesso em: 12 fev. 2023.

MAY, P.H; MILLIKAN, B.; GEBERA, M.F. **The context of REDD+ in Brazil**: drivers, agents, and institutions. 3rd edition. Bogor, Indonésia: CIFOR, 2016.

MCCARTHY, James J. *et al.* (ed.). **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

McGARIGAL, Kevin. **FRAGSTATS help**. Amherst, MA, USA, University of Massachusetts. v. 182, 2015.

NGUYEN, T. T. X. *et al.* Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. **Ocean & Coastal Management**, v. 123, p. 18–43, Abr. 2016.

PATWARDHAN, A. *et al.* Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. **Climate Change**, p. 779-810, 2007.

RECKIEN, D. What is in an index? Construction method, data metric, and weighting scheme determine the outcome of composite social vulnerability indices in New York City. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 5, p. 1439–1451, Jun. 2018.

RORATO, A. C. *et al.* Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon Indigenous Lands. **Environmental Science & Policy**, v. 129, p. 19–36, Mar. 2022.

RUDKE, A. P. *et al.* Impact of mining activities on areas of environmental protection in the southwest of the Amazon: A GIS- and remote sensing-based assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 263, e 110392, 2020.

SOARES-FILHO, Britaldo *et al.* Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 24, p. 10821-10826, 2010.

SONTER, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Communications** 2017 8:1, v. 8, n. 1, p. 1–7, Out. 2017.

TATE, E. Uncertainty analysis for a social vulnerability index. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 103, n. 3, p. 526–543, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/00045608.2012.700616>.

VEDOVATO, L. B. *et al.* The extent of 2014 forest fragmentation in the Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 8, p. 2485–2490, Dez. 2016.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual (CC BY-NC-SA)*.