EFEITO DE BORDA EM FLORESTAS AMAZÔNICAS: UMA REVISÃO DO POTENCIAL BIOINDICADOR DAS FORMIGAS (HYMENOPTERA: FORMICIDAE)

Vinicius J.G.R. Almeida [1,4]; João M. A. Araujo [2,4]; Pedro de Menezes Nunes [3,4]; Clarissa M. Knoechelmann[4,5], Felipe F.S. Siqueira [4,5*]

[1] Mestrando em Biodiversidade e Evolução, Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Evolução-PPGBE, Belém, Pará

[2] Mestrando em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal (PPGBV), Recife, Pernambuco.

[3] Graduado em Ciências Biológicas, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Faculdade de Ciências Biológicas (FACBIO), Marabá, Pará.

[4] ECoA (Grupo: Ecologia e Conservação da Amazônia - CNPq), Laboratório de Botânica e Ecologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Marabá, Pará.

[5] Professor do Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (Unifesspa), Instituto de Estudos em Saúde e Biológicas (IESB), Faculdade de Ciências Biológicas (FACBIO), Marabá, Pará

*Email: felipe.uast@gmail.com

RESUMO

A fragmentação de hábitats na Amazônia constitui uma das principais ameaças à biodiversidade, promovendo alterações estruturais e funcionais que comprometem a estabilidade dos ecossistemas. Esse processo intensifica o efeito de borda, resultando em mudanças microclimáticas, redução de hábitat, isolamento de populações e favorecimento de espécies generalistas. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo sintetizar e analisar o conhecimento científico sobre os efeitos de borda em Florestas Amazônicas, com ênfase nos processos ecológicos associados à fragmentação, nas alterações ao longo do gradiente borda–interior e nas respostas das comunidades de formigas. A revisão foi conduzida com base na análise de literatura científica, permitindo identificar padrões recorrentes, abordagens metodológicas predominantes e lacunas de conhecimento. Os resultados indicam que as formigas apresentam alta sensibilidade às variações ambientais, reforçando seu potencial como bioindicadoras de perturbações antrópicas. Contudo, evidenciam-se limitações relacionadas à predominância de estudos locais e de curto prazo, o que restringe a compreensão dos efeitos cumulativos e das respostas em múltiplas escalas. Assim, destaca-se a necessidade de abordagens integrativas que incorporem diferentes dimensões espaciais, temporais e funcionais para o avanço do monitoramento ecológico em paisagens amazônicas fragmentadas.

Palavras-chave: Floresta tropical úmida; Fragmentação Ambiental; Perda de habitat; Perturbações Antrópicas.

ABSTRACT

Habitat fragmentation in the Amazon represents one of the primary threats to biodiversity, driving structural and functional alterations that compromise ecosystem stability. This process intensifies the edge effect, resulting in microclimatic shifts, habitat reduction, population isolation, and the proliferation of generalist species. Consequently, this study

aimed to synthesize and critically analyze the scientific knowledge regarding edge effects in Amazonian forests, with an emphasis on ecological processes associated with fragmentation, alterations along the edge–interior gradient, and the responses of ant communities. The review was conducted based on an analysis of scientific literature, allowing for the identification of recurrent patterns, predominant methodological approaches, and knowledge gaps. The results indicate that ants exhibit high sensitivity to environmental variations, reinforcing their potential as bioindicators of human disturbances. However, limitations regarding the predominance of local and short-term studies are evident, which constrains the understanding of cumulative effects and multi-scale responses. Thus, there is a clear need for integrative approaches that incorporate different spatial, temporal, and functional dimensions to advance ecological monitoring in fragmented Amazonian landscapes.

Keywords: Tropical rainforest; Environmental fragmentation; Habitat loss; Anthropogenic disturbances.

INTRODUÇÃO

As atividades humanas têm promovido alterações na paisagem natural, resultando em fragmentação de habitats e na formação de extensas áreas de borda entre remanescentes florestais e a matriz antrópica, bem como um impacto de menor intensidade por evento, porém contínuo ou repetido ao longo do tempo (e.g. pastoreio, exclusão seletiva, ruído, poluição, tráfego) (FAHRIG, 2003). Esse processo modifica condições abióticas, como temperatura, luz e umidade e altera diretamente a estrutura da vegetação, com proliferação de espécies pioneiras e redução de espécies mais sensíveis ao distúrbio (LAURANCE, 2007). Em consequência, a composição, a riqueza e o funcionamento das comunidades biológicas são modificados, afetando a manutenção da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em escala local e de paisagem (LAURANCE, 2007). Em alguns contextos, como áreas submetidas à fragmentação florestal, expansão urbana, atividades agropecuárias ou queimadas, as alterações microclimáticas e estruturais favorecem espécies generalistas e exóticas nas bordas dos fragmentos. Em contrapartida, espécies mais especializadas, dependentes de condições ambientais estáveis e maior complexidade do habitat, tendem a desaparecer de fragmentos pequenos ou muito degradados (SILVA, 2010).

Um modo amplamente utilizado para detectar e monitorar padrões de mudança na biota é empregar espécies, ou grupos de espécies, que atuem como bioindicadores de degradação ambiental. Espécies bioindicadoras respondem de forma sensível e mensurável a alterações nas condições físicas e biológicas do habitat, permitindo inferir a qualidade ambiental ao longo do tempo e entre diferentes áreas de uma paisagem (SILVA, 2013). Nesse contexto, diversos grupos de insetos vêm sendo utilizados devido à sua elevada diversidade, rápida resposta a distúrbios e facilidade de amostragem em diferentes escalas espaciais (SILVA,

2013). Para definir um bioindicador é importante a utilização de fatores que sejam relevantes para determinar quais organismos serão utilizados; para isso, busca-se analisar riqueza, ausência, presença e abundância dessas espécies em um fragmento (MAJER, 1983). Onde podem ser positivamente influenciadas pela quantidade e diversidade de recursos em escala local (RIBAS *et al*., 2003; WILKER *et al*., 2020), pela área dos fragmentos (CÂMARA *et al*., 2017) e pela quantidade de hábitat disponível na paisagem (SOLAR *et al*., 2016; AHUATZIN *et al*., 2019).

Entre os grupos de insetos que respondem as alterações ambientais estão as formigas (Hymenoptera: Formicidae), organismos amplamente distribuídos, abundantes e com papel funcional chave em diversos processos ecológicos, como decomposição, ciclagem de nutrientes, predação, dispersão de sementes e mediação de interações planta-animal (GOMES *et al*., 2010). As comunidades de formigas podem apresentar mudanças na riqueza, no recrutamento e na composição de espécies ao longo do gradiente borda–interior, bem como na estrutura de seus grupos funcionais, o que torna o grupo um importante indicador dos efeitos da fragmentação e da qualidade da vegetação em ambientes tropicais (SILVA, 2013).

Compreender como o efeito de borda atua sobre a comunidade de formigas é fundamental para interpretar as consequências da fragmentação florestal e para subsidiar ações de conservação e manejo em paisagens antrópicas. A análise da resposta das formigas às variações ambientais entre borda e interior de fragmentos florestais permite identificar quais atributos do habitat (e.g. estrutura da vegetação, cobertura de serapilheira, microclima, tipo de matriz) influenciam nessas comunidades e em que escala espacial tais respostas se manifestam (VIEIRA, 2009). Além disso, o estudo dessas respostas contribui para avaliar o potencial uso das formigas como bioindicadoras da integridade ambiental e da efetividade de medidas de restauração (LAURANCE, 1997).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo sintetizar e analisar o conhecimento científico sobre os efeitos de borda em Florestas Amazônicas, com ênfase nos processos ecológicos associados à fragmentação de hábitats, nas alterações abióticas e bióticas ao longo do gradiente borda–interior e nas respostas das comunidades de formigas. Adicionalmente, buscou-se identificar padrões recorrentes, abordagens metodológicas predominantes e lacunas de conhecimento na literatura, a fim de avaliar o potencial das formigas como bioindicadoras de perturbações antrópicas em diferentes escalas espaciais e temporais.

METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão de literatura de caráter quali-quantitativo, com base na análise de publicações científicas disponíveis em bases de dados reconhecidas, a saber: Google Scholar (scholar.google.com.br), Periódicos CAPES (www.periodicos.capes.gov.br) e SciELO (www.scielo.org). O

delineamento metodológico seguiu os pressupostos da Análise de Conteúdo proposta por Bardin (2016), estruturando-se nas seguintes etapas: (i) busca sistemática por estudos relevantes; (ii) aplicação de critérios de inclusão e exclusão para seleção dos materiais; e (iii) análise aprofundada e categorização do conteúdo selecionado. Foram considerados diferentes tipos de documentos científicos, incluindo artigos de periódicos, livros, teses e dissertações, desde que publicados e indexados nas bases consultadas. As buscas foram realizadas utilizando combinações dos seguintes descritores: "Amazônia", "Floresta tropical úmida", "Formicidae", "fragmentação ambiental", "efeito de borda" e "bioindicador", com foco em estudos relacionados à biodiversidade, estrutura de comunidades e respostas ecológicas em paisagens fragmentadas.

A partir do material selecionado, procedeu-se à sistematização das informações com o objetivo de identificar padrões recorrentes, abordagens metodológicas predominantes e lacunas de conhecimento na literatura. Como produto dessa etapa, foi elaborada uma tabela síntese (Tabela 1), que apresenta de forma integrada os principais temas abordados: fragmentação de hábitats, efeito de borda, alterações bióticas e abióticas e o uso de formigas como bioindicadoras, bem como as principais lacunas associadas a esses eixos temáticos. Essa sistematização fornece suporte para a interpretação dos resultados e subsidia a proposição de direções para pesquisas futuras sobre o papel da mirmecofauna como bioindicador em Florestas Amazônicas fragmentadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dinâmica socioeconômica e pressão antrópica sobre a paisagem amazônica

A Amazônia estende-se por nove países da América do Sul e cerca de 60% de sua área situa-se no norte do Brasil, onde cobre mais de quatro milhões de km² e abriga, possivelmente, a maior diversidade biológica do planeta (MARENGO e ESPINOZA, 2016). Devido à sua grande diversidade de ecossistemas, a Amazônia abriga cerca de 10% das espécies conhecidas do planeta (GARDA, 2010), incluindo aproximadamente 40 mil espécies vegetais, mais de 2.520 espécies de vertebrados terrestres (MITTERMEIER *et al*., 2003), cerca de 2.500 espécies de peixes de água doce, número que pode ser ainda maior, considerando as espécies não descritas (JUNK; SOARES; BAYLEY, 2007) e cerca de 2,5 milhões de artrópodes (ALBAGLI, 2010). Assim, a Amazônia configura-se como uma das regiões mais ricas em recursos biológicos e abióticos do globo, desempenhando papel essencial na manutenção do equilíbrio ecológico planetário.

As causas históricas e atuais do desmatamento na Amazônia são múltiplas e frequentemente inter-relacionadas, incluindo desde incentivos fiscais (MAHAR, 1988; SCHMINK; WOOD, 1992; MORAN, 1993) e políticas de colonização implementadas no passado (HECHT, 1985; HECHT; COCKBURN, 1990; SCHMINK; WOOD, 1992), que estimularam fluxos

migratórios para a região como válvula de escape para problemas sociais de outras partes do país (SKOLE *et al*., 1994), até conflitos fundiários recorrentes associados à ausência de regularização fundiária e à pressão por reforma agrária (FEARNSIDE, 1985, 2001; SOARES-FILHO *et al*., 2004). Mais recentemente, o contexto macroeconômico tem favorecido a expansão de atividades como a exploração madeireira (NEPSTAD *et al*., 2001), a pecuária (MERTENS *et al*., 2002; KAIMOWITZ *et al*., 2004), a mineração e o agronegócio, em especial o avanço da soja sobre áreas anteriormente ocupadas por pastagens (ALENCAR *et al*., 2022).

Fragmentação e o efeito de borda nos ambientes antropizados na paisagem amazônica antropizados

A fragmentação de hábitat consiste na redução de áreas contínuas, resultando na formação de um ou vários remanescentes menores e isolados (LOVEJOY *et al*., 1986; MURCIA, 1995; DESOUZA *et al*., 2001), cercados por uma matriz de hábitats antrópicos, como pastagens e monoculturas (TURNER, 1996; DIDHAM, 1997). A fragmentação pode ser entendida como modificação da estrutura da paisagem em que há perda de hábitat nativo, formação de fragmentos isolados e aumento das áreas de contato, as chamadas bordas, entre ambientes nativos e áreas antropizadas (METZGER, 2000). Nos fragmentos remanescentes, todas as alterações estruturais e funcionais da comunidade nas áreas próximas à borda são chamadas de efeitos de borda. A perda e a fragmentação de hábitats estão entre as principais ameaças à biodiversidade global (HADDAD *et al*., 2015; FAHRIG, 2019). Um dos principais fatores que impulsionam a fragmentação é a conversão de hábitats naturais em áreas urbanas, estradas, lavouras e pastagens, o que resulta tanto na redução generalizada de hábitat natural quanto na formação de fragmentos isolados imersos em uma matriz modificada pelo ser humano (HADDAD *et al*., 2015). Embora a maior parte desses processos ocorra na escala de paisagem (FAHRIG, 2013), seus efeitos sobre a biodiversidade podem se manifestar em múltiplas escalas espaciais, desde a escala local e de fragmentos até a escala de toda a paisagem (HAGEN *et al*., 2012; FAHRIG, 2013; HADDAD *et al*., 2015). As principais alterações abióticas ocorrem no microclima, como aumento da temperatura do ar e da intensidade dos ventos e diminuição da umidade do ar e do solo (SIQUEIRA *et al*., 2004).

Podem ocorrer também mudanças bióticas, que podem ser diretas ou indiretas. As alterações diretas relacionam-se à abundância, distribuição e composição das espécies, ao aumento das taxas de mortalidade e à abertura do dossel, causada diretamente pela variação das condições físicas nas imediações da borda (MURCIA, 1995). Já as alterações bióticas indiretas estão associadas a mudanças nas interações ecológicas entre as espécies, incluindo competição, herbivoria, polinização, predação e dispersão de sementes. Essas alterações variam conforme a profundidade da borda considerada (LAURANCE *et al*., 2007), formando gradientes nos quais os fatores bióticos e

abióticos afetam o fragmento de maneira desigual (YAHNER, 1988). Os distúrbios impostos às bordas podem alterar a distribuição natural de árvores, modificando a estrutura da floresta e a disponibilidade de recursos ao longo do gradiente borda–interior (SABINO, 2012). Essas mudanças estruturais podem, por sua vez, afetar a razão C:N da floresta, uma vez que a composição de espécies vegetais com diferentes conteúdos de carbono e nitrogênio se altera nas proximidades da borda (CÂMARA *et al*., 2017). Espécies de plantas generalistas, coletivamente conhecidas como pioneiras, caracterizam-se por apresentar altos teores de nitrogênio foliar (BARONE e COLEY, 1996) e tendem a proliferar sob condições de efeito de borda, onde há maior incidência de luz e a maior frequência de distúrbios que favorecem seu estabelecimento (GOLDEN e CRIST, 1999).

Um modo amplamente utilizado para detectar e monitorar padrões de mudança na biota é empregar espécies, ou grupos de espécies, que atuem como bioindicadores de degradação ambiental. Espécies bioindicadoras respondem de forma sensível e mensurável a alterações nas condições físicas e biológicas do habitat, permitindo inferir a qualidade ambiental ao longo do tempo e entre diferentes áreas de uma paisagem (SALLES, 2018). Nesse contexto, diversos grupos de insetos vêm sendo utilizados devido à sua elevada diversidade, rápida resposta a distúrbios e facilidade de amostragem em diferentes escalas espaciais (UNDERWOOD, 2006). Entre esses grupos destacam-se as formigas (Hymenoptera: Formicidae), que apresentam alta abundância, ampla distribuição e ocupam múltiplos níveis tróficos, participando de processos como predação, dispersão de sementes, herbivoria e decomposição.

Formigas como bioindicadoras em resposta a estrutura da paisagem

As formigas (família Formicidae) fazem parte da ordem Hymenoptera, a qual historicamente constitui um dos grupos mais diversos e bem adaptados entre os insetos (BORROR; DE LONG, 1988), classificação que se mantém consolidada em revisões taxonômicas e evolutivas modernas (TRIPLEHORN; JOHNSON, 2005). Dentre a extraordinária diversidade de insetos nas regiões tropicais, as formigas destacam-se apresentando grande riqueza em espécies e uma ampla variedade de funções ecológicas vitais nos ecossistemas, atuando tradicional e contemporaneamente como engenheiras e moldadoras ambientais (HÖLLDOBLER; WILSON, 1990; FOLGARAIT, 1998; GRIFFITHS et al., 2018). Elas ocupam múltiplos nichos tróficos, podendo ser detritívoras, predadoras e se alimentarem de produtos vegetais como néctar e sementes, ou cultivarem fungos mutualísticos dentro da tribo Attini (HÖLLDOBLER; WILSON, 1990; CALHEIROS et al., 2019). Entre as linhagens cultivadoras de fungos, investigações clássicas já apontavam espécies capazes de causar severas desfolhas à vegetação (SCHULTZ; MCGLYNN, 2000), característica corroborada por monitoramentos recentes que enfatizam o expressivo impacto socioeconômico e

o manejo integrado de táxons dos gêneros Atta e Acromyrmex em agroecossistemas neotropicais (ZANETTI et al., 2014; LEMES et al., 2021).

Ao longo do tempo, tornou-se evidente o aumento da atenção voltada às questões ambientais, bem como a busca por novas estratégias para mitigar os impactos causados ao meio ambiente. Nesse contexto, a utilização de indicadores biológicos tem se destacado como um método capaz de auxiliar projetos de monitoramento e conservação ambiental (NASCIMENTO, 2018). O uso de bioindicadores para avaliar mudanças ecológicas, contudo, é mais eficaz quando é precedido por um estudo prévio das características do ambiente (ANDERSEN, 1997). Para definir um bioindicador é importante a utilização de fatores que sejam relevantes para determinar quais organismos serão utilizados; para isso, busca-se analisar riqueza, ausência, presença e abundância dessas espécies em um fragmento (MAJER, 1983). Elas são positivamente influenciadas pela quantidade e diversidade de recursos em escala local (RIBAS *et al*., 2003; OLIVEIRA e SCHMIDT, 2019; WILKER *et al*., 2024), pela área dos fragmentos (CUISSI *et al*., 2015; CÂMARA *et al*., 2017) e pela quantidade de hábitat disponível na paisagem (SOLAR *et al*., 2016; AHUATZIN *et al*., 2019).

Um dos grupos mais utilizados como bioindicadores são as formigas, pertencentes à família Formicidae, ordem Hymenoptera, que compreende cerca de 13.000 espécies, distribuídas em 16 subfamílias e 330 gêneros (BACCARO *et al*., 2015). Esses insetos podem representar de 10 a 25% da biomassa animal em florestas tropicais, campos e savanas (HÖLLDOBLER; WILSON, 1990). São extremamente abundantes na maioria dos ecossistemas terrestres, não estando presente apenas na região do continente Antártico e algumas ilhas do oceano Pacífico (HÖLLDOBLER; WILSON, 1990), ocorrendo no solo, na serapilheira e em todos os estratos da vegetação

Assim, as formigas são boas bioindicadoras (PHILPOTT *et al*., 2010; RIBAS et al., 2012) e constituem um excelente organismo modelo para estudar os efeitos da fragmentação e da perda de hábitat, pois são altamente diversas e abundantes, além de desempenharem várias funções ecológicas por meio de seus comportamentos de forrageamento (HÖLLDOBLER e WILSON, 1990; LASMAR *et al*., 2021). A riqueza e abundância de suas comunidades podem diferir de forma significativa entre a matriz e o fragmento de hábitat (DAUBER e WOLTERS, 2004), e mesmo entre os fragmentos em razão de diferenças no tamanho, grau de isolamento, disponibilidade de recursos, complexidade estrutural da vegetação e intensidade das perturbações ambientais, fatores que influenciam diretamente a composição e distribuição das espécies de formigas. Para testar a qualidade desses fragmentos e comunidades é comum o uso de espécies, animais e vegetais, como bioindicadores, cuja principal função é indicar como um ecossistema tem sido afetado.

Em função de sua atividade constante em busca de alimento, locais de reprodução e sítios adequados para a construção de ninhos, as formigas apresentam ampla ocorrência espacial, o que favorece sua detecção em diferentes ambientes e facilita o monitoramento ecológico (BARBIERI, 2009). Essa elevada presença aumenta a confiabilidade das respostas do grupo às variáveis ambientais analisadas, tornando-o particularmente adequado para estudos comparativos. As formigas também se mostram eficientes na indicação da diversidade ambiental, uma vez que a riqueza e a composição de suas comunidades tendem a variar de forma consistente em resposta a mudanças observadas em outros componentes bióticos, especialmente na vegetação (MAJER *et al*., 1984; ABENSPERG-TRAUN *et al*., 1996). Além disso, a mirmecofauna apresenta elevada diversidade taxonômica e alta sensibilidade a alterações e perturbações ambientais, aliadas à disponibilidade de métodos de amostragem relativamente simples e a um arcabouço taxonômico consolidado para identificação das espécies (ALONSO; AGOSTI, 2000; PASSERA; ARON, 2005; FREITAS *et al*., 2006). De forma integrada, essas características reforçam o potencial das formigas como modelo biológico para o teste de hipóteses ecológicas e para o desenvolvimento de estudos voltados à compreensão dos fatores ambientais que estruturam a diversidade e a dinâmica de comunidades terrestres (FEITOSA; RIBEIRO, 2005; ALONSO; AGOSTI, 2000).

Tabela 1. Panorama da literatura sobre fragmentação, efeito de borda e mirmecofauna na Amazônia: principais achados e lacunas de pesquisa.

Tema	Síntese	Lacunas
Importância ecológica da Amazônia	Região com alta biodiversidade, diversidade taxonômica e papel central na regulação ecológica global.	Integração limitada entre biodiversidade e respostas funcionais a distúrbios como fragmentação.
Vetores de desmatamento	Expansão agropecuária, exploração madeireira, mineração, políticas públicas históricas e conflitos fundiários são motores da perda de hábitat.	Falta de estudos que conectem diretamente vetores socioeconômicos com respostas ecológicas em múltiplas escalas.
Fragmentação de hábitats	Redução de áreas contínuas e formação de fragmentos isolados em matriz antrópica. Processo dominante na alteração da paisagem.	Baixa padronização metodológica para avaliar efeitos comparáveis entre diferentes paisagens amazônicas.
Efeito de borda	Alterações microclimáticas (↑ temperatura, ↓ umidade) e aumento da exposição dos fragmentos.	Limitação na quantificação da profundidade do efeito de borda

	Formação de gradientes borda–interior.	em diferentes contextos ecológicos.
Alterações bióticas diretas	Mudanças na riqueza, abundância e composição de espécies; aumento de mortalidade e abertura do dossel.	Escassez de estudos de longo prazo que avaliem estabilidade dessas mudanças.
Alterações bióticas indiretas	Modificação de interações ecológicas (e.g. predação, herbivoria, polinização, dispersão).	Baixa compreensão das redes ecológicas completas sob efeito de borda.
Mudanças na vegetação	Aumento de espécies pioneiras, alteração estrutural da Floresta e mudanças na disponibilidade de recursos.	Baixa integração entre mudanças florísticas e respostas da fauna edáfica (e.g. formigas).
Gradientes ecológicos	Respostas variam ao longo do gradiente borda–interior, com efeitos diferenciados conforme a distância da borda.	Falta de consenso sobre métricas padronizadas para medir esses gradientes.
Formigas: diversidade e função ecológica	Alta abundância, diversidade funcional e atuação em múltiplos níveis tróficos (e.g. predação, dispersão, decomposição).	Subutilização de abordagens funcionais em comparação com abordagens taxonômicas.
Formigas como bioindicadoras	Alta sensibilidade a distúrbios, facilidade de amostragem e forte relação com variáveis ambientais.	Necessidade de protocolos padronizados para uso comparativo entre estudos.
Fatores que estruturam a mirmecofauna	Influência da disponibilidade de recursos, área do fragmento e quantidade de hábitat na paisagem.	Baixa integração entre escalas local e de paisagem nos modelos explicativos.
Resposta das formigas à fragmentação	Diferenças claras entre matriz e fragmentos; mudanças na composição e dominância de espécies.	Escassez de estudos que integrem matriz, borda e interior de forma simultânea.
Monitoramento ecológico	Uso crescente de bioindicadores como ferramenta de conservação e avaliação ambiental.	Carência de séries temporais longas e validação de indicadores em diferentes contextos amazônicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efeito de borda, intensificado pela fragmentação de hábitats, constitui um dos principais vetores de alteração ecológica nas Florestas Amazônicas, promovendo mudanças microclimáticas, estruturais e funcionais que reconfiguram a biodiversidade ao longo do gradiente borda–interior. A síntese da literatura evidencia que as formigas respondem de maneira consistente a essas alterações, reforçando seu potencial como bioindicadoras da qualidade ambiental.

Entretanto, persistem lacunas importantes, especialmente quanto à integração de múltiplas escalas espaciais e temporais, à consideração dos efeitos cumulativos das perturbações e ao uso limitado de abordagens baseadas na diversidade funcional. De modo geral, os estudos ainda se concentram em respostas locais e de curto prazo, o que restringe a compreensão da dinâmica ecológica em paisagens fragmentadas.

Embora haja consenso quanto à influência de variáveis abióticas (e.g. temperatura, umidade e luminosidade) e bióticas (e.g. estrutura da serapilheira, composição vegetal e disponibilidade de recursos) sobre a mirmecofauna, ainda são incipientes os estudos que integram essas dimensões de forma simultânea e comparativa. Essa limitação também se reflete na predominância de abordagens baseadas apenas em métricas taxonômicas, em detrimento de análises funcionais mais robustas.

Diante desse cenário, esta revisão evidencia que o potencial bioindicador das formigas pode ser ampliado por meio da integração entre diferentes eixos analíticos, incluindo: (i) a incorporação da diversidade funcional e de traços ecológicos; (ii) a consideração da qualidade, heterogeneidade e permeabilidade da matriz da paisagem; e (iii) o histórico de perturbação dos fragmentos. Estas abordagens permitem uma interpretação mais precisa dos gradientes de degradação ambiental e das dinâmicas ecológicas associadas ao efeito de borda.

Por fim, ao sintetizar os principais temas e lacunas da literatura, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre os efeitos da fragmentação em Florestas Amazônicas e reforça o papel das formigas como ferramentas estratégicas para o monitoramento ecológico. Ao mesmo tempo, aponta direções prioritárias para pesquisas futuras, especialmente no desenvolvimento de abordagens integrativas e multiescalares que permitam compreender, de forma mais abrangente, a complexidade dos sistemas ecológicos amazônicos sob crescente pressão antrópica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENSPERG-TRAUN, M. et al. The effect of habitat fragmentation and livestock grazing on animal communities in remnants of gimlet (*Eucalyptus salubris*) woodland in the Western Australian wheatbelt. II. Lizards. **Biological Conservation**, v. 77, n. 2-3, p. 191-201, 1996.

AB'SABER, Aziz N. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira**. Estudos avançados**, v. 16, p. 7-30. 2002.

AHUATZIN, D. A. *et al*. Forest cover and landscape heterogeneity shape ant–plant mutualisms in tropical fragmented landscapes. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 34, n. 11, p. 2479–2493, 2019.

ALBAGLI, S. Amazônia: fronteira geopolítica da biodiversidade. **Parcerias**

Estratégicas, Brasília, v. 6, n. 12, p. 5–19, 2001.

ALENCAR, A. *et al*. Amazônia em chamas: o novo e alarmante patamar do desmatamento na Amazônia. Brasília: **Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM)**, 2022.

ALONSO, L. E.; AGOSTI, D. Biodiversity studies, monitoring, and ants: an overview. In: AGOSTI, D.; MAJER, J. D.; ALONSO, L. E.; SCHULTZ, T. R. (ed.). *Ants: standard methods for measuring and monitoring biodiversity*. Washington: **Smithsonian Institution Press**, 2000. p. 1–8.

ANDERSEN, A. N. Global ecology of rainforest ants: functional groups in relation to environmental stress and disturbance. In: AGOSTI, D. *et al*. (ed.). Ants: standard methods for measuring and monitoring biodiversity. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 2000. p. 25-34.

ANDERSEN, A. N. The use of ant communities to evaluate changes in Australian terrestrial ecosystems: a review and a recipe. **Proceedings of the Ecological Society of Australia**, Canberra, v. 16, p. 347-357, 1990.

ANDERSEN, A. N.; MAJER, J. D. Ants show the way Down Under: invertebrates as bioindicators in land management. **Frontiers in Ecology and the Environment**, Silver Spring, v. 2, p. 291-298, 2004.

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al*. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, p. 913-931, 2014.

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al*. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. Geophysical Research Letters, v. 34, L07701, 2007.

BACCARO, F. B. et al. Guia para os gêneros de formigas do Brasil. Manaus: Editora Inpa, 2015. Disponível no repositório oficial do PPBio INPA.

BARBIERI, R. F. Monitoramento da qualidade ambiental de áreas citrícolas utilizando formigas (Hymenoptera: Formicidae) como bioindicadores. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2009.

BARDIN, Laurence. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2016.

BARLOW, J.; PERES, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 1787-1794, 2008.

BFG – THE BRAZIL FLORA GROUP. Flora do Brasil 2020. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2021. 28 p.

BIHN, J. H. *et al*. Do secondary forests act as refuges for old growth forest animals? Recovery of ant diversity in the Atlantic Forest of Brazil. **Biological Conservation**, v. 141, n. 3, p. 733-743, 2008.

BORROR, D. J.; DE LONG, D. M. Introduction to the Study of Insects. 6. ed. New York: Saunders College Publishing, 1988.

CALHEIROS, Ana C. *et al*. Foraging Ecology of the Leaf-Cutter Ant,

Acromyrmex subterraneus (Hymenoptera: Formicidae), in a Neotropical Cerrado Savanna. **Environmental Entomology**, v. 48, n. 6, p. 1434–1443, 2019.

CÂMARA, T.; ALMEIDA, W. R.; TABARELLI, M.; ANDERSEN, A. N.; LEAL, I. R. Habitat fragmentation, EFN-bearing trees and ant communities: ecological cascades in Atlantic Forest of northeastern Brazil. **Austral Ecology**, Hoboken, v. 42, n. 1, p. 31–39, 2017

CARVALHO, Karine S.; VASCONCELOS, Heraldo L. Forest fragmentation in central Amazonia and its effects on litter dwelling ants. **Biological Conservation**, v. 91, n. 2-3, p. 151-157, 1999.

COLEY, P. D.; BARONE, J. A. Herbivory and plant defenses in tropical forests. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 27, p. 305-335, 1996.

CTFB. Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil. Disponível em: http://fauna.jbrj.gov.br/fauna/faunadobrasil/2. Acesso em: 27 ago. 2025.

DAUBER, J.; WOLTERS, V. Edge effects on ant community structure and species richness in an agricultural landscape. **Journal of Insect Conservation**, v. 8, n. 1, p. 33-41, 2004.

DIAZ, M. C. V *et al*. O prejuízo oculto do fogo: custos econômicos das queimadas e incêndios florestais na Amazônia. Relatório técnico. Belém: IPAM; Brasília, DF: IPEA; WHRC, 2002.

DIDHAM, R. K.; LAWTON, J. H. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate and vegetation structure in tropical forest fragments. **Biotropica**, v. 31, n. 1, p. 17-30, 1999.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 34, p. 487–515, 2003.

FAHRIG, L**.** Habitat fragmentation: a long and tangled tale. **Global Ecology and Biogeography**, Hoboken, v. 28, n. 1, p. 33–41, 2019.

FAHRIG, L**.** Rethinking patch size and isolation effects: the habitat amount hypothesis. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 40, n. 9, p. 1649–1663, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Land-tenure issues as factors in environmental destruction in Brazilian Amazonia: the case of southern Pará. **World Development**, Oxford, v. 29, n. 8, p. 1361–1372, 2001.

FEITOSA, R. S. M.; RIBEIRO, A. S. Mirmecofauna (Hymenoptera: Formicidae) de serapilheira de uma área de Floresta Atlântica no Parque Estadual da Cantareira - São Paulo, Brasil. **Biotemas**, v. 18, n. 2, p. 51-71, 2005.

FOLGARAIT, P. J. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. **Sociobiology**, v. 31, n. 2, p. 123-144, 1998.

FREITAS, A. V. L.; LEAL, I. R.; UEHARA-PRADO, M.; IANNUZZI, L. Insetos como indicadores de conservação da paisagem. *In*: ROCHA, C. F. D. et al. (*eds.*). **Biologia da Conservação**: Essências. Rio de Janeiro: Editora da UERJ, 2006. p. 357-384.

GARDA, Adrian A.; SILVA, José Maria Cardoso da; BAIÃO, Paula C. Biodiversity conservation and

sustainable development in the Amazon. **Systematics and Biodiversity**, v. 8, n. 2, p. 169–175, 2010.

GATTI, L. V. *et al*. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, v. 506, p. 76-80, 2014.

GOLDEN, D. M.; CRIST, T. O. Experimental effects of habitat fragmentation on a guild of arboreal insects in a forest canopy. **Oecologia**, v. 118, n. 4, p. 436-444, 1999.

GOMES, J. P.; IANNUZZI, L.; LEAL, I. R. Response of the ant community to attributes of fragments and vegetation in a northeastern Atlantic Rain Forest area, Brazil. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 39, n. 6, p. 898–905, 2010.

GRIFFITHS, Hannah M. *et al*. Ants are the major agents of resource removal from tropical rainforests. **Journal of Animal Ecology**, v. 87, n. 2, p. 293-305, 2018.

HADDAD, N. M**.** et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, Washington, v. 1, n. 2, e1500052, 2015.

HAGEN, M. et al. Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world. **Advances in Ecological Research**, London, v. 46, p. 89–210, 2012.

HECHT, S. B. Environment, development and politics: capital accumulation and the livestock sector in eastern Amazonia. **World Development**, Oxford, v. 13, n. 6, p. 663–684, 1985.

HECHT, S. B.; COCKBURN, A. The fate of the forest: developers, destroyers, and defenders of the Amazon. New York: **HarperCollins**, 1990.

HÖLLDOBLER, B.; WILSON, E. O. The Ants. Cambridge: Harvard University Press, 1990.

ICMBIO. Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção. Brasília, DF: ICMBio/MMA, 2018. v. 1, 492 p.

JUNK, Wolfgang J.; SOARES, Maria Gercilia Mota; BAYLEY, Peter B. Freshwater fishes of the Amazon River basin: their biodiversity, fisheries, and habitats. **Aquatic Ecosystem Health & Management**, v. 10, n. 2, p. 153–173, 2007.

KAIMOWITZ, D. *et al*. Hamburger connection fuels Amazon destruction. Bogor: **Center for International Forestry Research (CIFOR)**, 2004.

LACH, L.; PARR, C. L.; ABBOTT, K. L. (ed.). Ant ecology. Oxford: **Oxford University Press**, 2010.

LASMAR, C. J. et al. Forest cover and geographic distance shape ant community composition in Amazonian land-use systems. **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 1, p. 456-468, 2021.

LAURANCE, W. *et al*. Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis. **PLOS ONE**, v. 2, e1017, 2007.

LAURANCE, W. F. *et al*. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. **Conservation Biology**, 2002.

LAURANCE, W. F. Reflections on the tropical deforestation crisis. **Biological**

Conservation, Barking, v. 91, n. 2–3, p. 109–117, 1999.

LAURANCE, W. F.; BIERREGAARD, R. O. (ed.). Tropical forest remnants: ecology, management and conservation of fragmented communities. Chicago: **University of Chicago Press**, 1997.

LEAL, I. R. *et al*. Ants of the Caatinga: diversity, biogeography, and functional responses to anthropogenic disturbance and climate change. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America. Cham: Springer, 2017. p. 65-95.

LEMES, P. G. et al. Leaf-cutting ants in commercial forest plantations of Brazil: biological aspects and control methods. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 23, n. 2, p. 95-103, 2021.

LOVEJOY, T. E. *et al*. Edge and other effects of isolation on Amazon forest fragments. In: SOULÉ, M. E. (ed.). **Conservation biology**: the science of scarcity and diversity. 1986.

MAJER, J. D. Ant recolonization of rehabilitated bauxite mines at Trombetas, Pará, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 12, p. 257-273, 1996.

MAJER, J. D.; DAY, J. E.; KABAY, E. D.; PERRIMAN, W. S. Recolonization by ants in bauxite mines rehabilitated by a number of different methods. **Journal of Applied Ecology**, v. 21, n. 2, p. 355-375, 1984.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 1033-1050, 2016.

MERTENS, B. *et al*. Crossing spatial analyses and livestock economics to understand deforestation processes in the Brazilian Amazon: the case of São Félix do Xingu in South Pará. **Agricultural Economics**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 269–294, 2002.

METZGER, J. P**.** Tree functional group richness and landscape structure in a Brazilian tropical fragmented landscape. **Ecological Applications**, Washington, v. 10, n. 4, p. 1147–1161, 2000.

MITTERMEIER, R. A. *et al*. Wilderness and biodiversity conservation. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 100, n. 18, p. 10309–10313, 2003.

MURCIA, C. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 10, p. 58-62, 1995.

NEPSTAD, D. C. *et al*. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 154, n. 3, p. 395–407, 2001.

PASSERA, L.; ARON, S. Ants: their social organization and evolution. Oxford: **Oxford University Press**, 2005

PESSOA-JUNIOR, Erasmo Sérgio Ferreira *et al*. Terra preta de índio na região amazônica. **Scientia Amazonia**, Manaus, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2012.

PHILPOTT, S. M. A canopy dominant ant affects twig-nesting ant assembly in

coffee agroecosystems. **Oikos**, v. 119, n. 12, p. 1954-1960, 2010.

PINHEIRO, L. V. da S.; MIRANDA, P. N.; PINTO, R. S. Efeito de borda sobre interações formiga-planta mediadas por nectários extraflorais (NEFs) em fragmento florestal localizado no Sudoeste da Amazônia brasileira. **Entomology Beginners**, v. 4, e063, 2023.

RIBAS, C. R. et al. Ants as Indicators in Brazil: A Review with Suggestions to Improve the Use of Ants in Environmental Monitoring Programs. **Psyche: A Journal of Entomology**, v. 2012, p. 1-23, 2012

RIBAS, C. R. *et al*. Tree heterogeneity, resource availability, and larger-scale processes regulating arboreal ant species richness. **Austral Ecology**, v. 28, p. 305-314, 2003.

RIBEIRO-NETO, José Domingos *et al.* Chronic anthropogenic disturbance causes homogenization of plant and ant communities in the Brazilian Caatinga. **Biodiversity and conservation**, v. 25, p. 943-956, 2016.

SALLES, L. F. P.; CHRISTIANINI, A. V.; OLIVEIRA, P. S. Dirt roads and fire breaks produce no edge effects on litter-dwelling arthropods in a tropical dry-forest: a case study. **Journal of Insect Conservation**, v. 22, p. 647–657, 2018.

SCHAEFER, Carlos Ernesto GR *et al*. III-Solos Da Região Amazônica. *In:*Curi N, Ker JC, Novais RF, Vidal-Torrado P, Schaefer CEGR, editores. **Pedologia** - Solos dos Biomas Brasileiros. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2017.

SCHMINK, M.; WOOD, C. H. Contested frontiers in Amazonia. New York: **Columbia University Press**, 1992.

SCHNEIDER-MAUNOURY, L. *et al*. Abundance signals of amphibians and reptiles indicate strong edge effects in **Neotropical fragmented forest landscapes. Biological Conservation**, v. 200, p. 207-215, 2016.

SCHULTZ, T. R.; MCGLYNN, T. P. The interactions of ants with other organisms. In: AGOSTI, D. et al. (eds.). Ants: Standard methods for measuring and monitoring biodiversity. Washington: **Smithsonian Institution Press**, 2000. p. 35-44 SciELO.

SILVA, R. R.; BRANDÃO, C. R. F. Morphological patterns and community organization in leaf-litter ant assemblages. **Ecological Monographs**, Durham, v. 80, n. 1, p. 107–124, 2010.

SILVA, T. B. Resposta da comunidade de formigas ao efeito de borda em paisagens de Cerrado. 2013. 47 f. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura e Bacharelado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2013.

SILVESTRE, R. Estrutura de comunidades de formigas do cerrado. 2000. Tese (Doutorado em Entomologia) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2000.

SILVESTRE, R.; BRANDÃO, C. R. F.; SILVA, R. R. Grupos funcionales de hormigas: el caso de los grêmios del cerrado. In: FERNÁNDEZ, F. (ed.). Introducción a las hormigas de la región

neotropical. Bogotá: **Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**, 2003. p. 113-148.

SIQUEIRA, L. P**.** et al. Using the variogram to quantify edge effects in a forest fragment disturbed by cattle grazing. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 19, n. 8, p. 863–871, 2004.

SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKI, W. H.; SALAS, W. A.; NOBRE, A. D. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. **BioScience**, Washington, v. 44, n. 5, p. 314–322, 1994.

SOARES-FILHO, B. S. *et al*. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, London, v. 440, p. 520–523, 2006.

TABARELLI, M.; GASCON, C. Lessons from fragmentation research: improving management and policy guidelines for biodiversity conservation. **Conservation Biology**, v. 19, p. 734-739, 2005.

TRIPLEHORN, C. A.; JOHNSON, N. F. Estudo dos Insetos de Borror e DeLong. 7. ed. São Paulo: **Cengage Learning**, 2005.

UNDERWOOD, E. C.; FISHER, B. L. The use of ants in monitoring impacts of anthropogenic change in California shrublands. **Biological Conservation**, v. 131, n. 1, p. 142-158, 2006.

UNDERWOOD, E. C.; FISHER, B. L**.** The role of ants in conservation monitoring: if, when, and how. **Biological Conservation**, v. 132, n. 2, p. 166-182, 2006.

VAN DER WERF, G. R. *et al*. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 11, p. 3423-3441, 2006.

VIEIRA, D. L. M.; HOLL, K. D.; PENEIREIRO, F. M. Agro-successional restoration as a strategy to facilitate tropical forest recovery. **Restoration Ecology**, Malden, v. 17, n. 4, p. 451–459, 2009.

WILKER, I.; QUEIROZ, A. C. M.; RIBAS, C. R.; MORINI, M. S. C.; LASMAR, C. J.; SCHMIDT, F. A. *et al*. A systematic review of the land use change effects on ant diversity in Neotropics. **Biological Conservation**, v. 299, 110778, 2024.

ZANETTI, Ronald *et al*. An Overview of Integrated Management of Leaf-Cutting Ants (Hymenoptera: Formicidae) in Brazilian Forest Plantations. **Forests**, v. 5, n. 3, p. 439-454, 2014.