

Impactos das Mudanças Climáticas na Biodiversidade de Ecossistemas Tropicais: Respostas Adaptativas e Resiliência

Everaldo Antônio de Jesus

*Universidade de Coimbra
Pós Doutorado em Direitos Humanos Saúde e Justiça*

Marcio Harrison dos Santos Ferreira

*Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS
Ciências Biológicas e Doutorando em Agroecologia e Desenvolvimento Territorial pela PPGADT/UNIVASF*

Ângela Maryce de Macedo Sampaio

*Universidade Regional do Cariri
Licenciatura em Geografia e pós graduada em Geografia da Amazônia Brasileira*

Deivid Junior de Melo

*Universidade Estadual do Norte do Paraná - UENP
Educação Física e Mestre*

Dério Garcia Bresciani

*Universidade Federal de Rondônia – UNIR
Geografia e História/Mestre em Geografia e Servidor Público*

Robervan Lopes de Oliveira

*Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA e URCA
Biologia e Química e
Especialista em Biologia e Química*

Sandra Conceição Santos Freitas

*Instituto Federal do Paraná- IFPR- Umuarama
Licenciatura em Ciências Biológicas*

Divino José Lemes de Oliveira

*Universidade Estadual de Goiás
Geografia e Doutor
em Geografia pela UFJ/GO*

Jeovane Soares Rodrigues

*Universidad Del Sol - UNADES
Doutorado em Ciências da Educação*

Allan Gonçalves dos Santos

*Universidade Federal do Delta do Parnaíba - UFDPAr
Ciências Biológicas e Especialista em Ensino de Biologia e ciências - Educação*

Jussara Gonçalves Fonseca

*Universidade Federal da Grande Dourados UFGD
Ciências biológicas e
Doutoranda em Entomologia e Conservação da Biodiversidade*

Resumo

Este estudo investiga os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade de ecossistemas tropicais, destacando respostas adaptativas de espécies e a resiliência de habitats como a Floresta Amazônica, as florestas úmidas do Sudeste Asiático e da África Central. O aumento da temperatura média, alterações nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos comprometem a integridade ecológica, promovendo migração de espécies, fragmentação de habitat, desajustes fenológicos e risco de extinções locais. Concomitantemente, muitas espécies demonstram adaptações — mudanças fenológicas, comportamentais e genéticas — e comunidades ecossistêmicas exibem graus variados de resistência e recuperação, dependendo da conectividade de paisagens e da diversidade funcional presente. O estudo baseia-se em revisão sistemática para sintetizar evidências globais sobre mecanismos adaptativos e fatores que reforçam a resiliência ecológica, evidenciando a importância de corredores ecológicos, áreas protegidas bem geridas e políticas públicas integradas. Conclui-se que a conservação eficaz da biodiversidade tropical frente às mudanças climáticas requer monitoramento ambiental contínuo, estratégias de restauração que favoreçam conectividade e políticas coordenadas que considerem tanto a adaptabilidade das espécies quanto a manutenção de processos ecológicos essenciais.

Palavras-chave: mudanças climáticas; biodiversidade tropical; adaptação fenológica; resiliência ecológica; corredores ecológicos; áreas protegidas; revisão sistemática.

Date of Submission: 13-10-2025

Date of Acceptance: 25-10-2025

I. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas tropicais abrigam mais de metade das espécies terrestres do planeta e desempenham papel crítico na regulação climática, no ciclo do carbono e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais para bilhões de pessoas (Malhi et al., 2008; Wright, 2005). No entanto, essas regiões estão entre as mais vulneráveis às alterações do clima, pois as florestas tropicais têm tolerâncias térmicas relativamente estreitas e espécies altamente especializadas (Duffy et al., 2017; Laurance et al., 2011). A elevação constante da temperatura média global, as mudanças nos padrões de precipitação e o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos — como secas e inundações — provocam perturbações que podem ultrapassar os limites de resistência de muitas comunidades biológicas. Nesse contexto, torna-se urgente compreender não apenas os impactos diretos dessas alterações, mas também as respostas adaptativas das espécies e a capacidade de resiliência dos habitats tropicais.

As mudanças fenológicas, como adiantamento da floração e da frutificação, figuram entre as primeiras manifestações de adaptação de plantas aos novos regimes climáticos. Peñuelas e Filella (2001) documentaram alterações significativas nos ciclos fenológicos da vegetação mediterrânea, e estudos subsequentes confirmaram fenômenos semelhantes em florestas tropicais, onde a sincronização entre plantas e seus polinizadores é fundamental para a reprodução (Feeley et al., 2012; Pau et al., 2011). Essas mudanças, embora adaptativas em curto prazo, podem criar desacoplamentos ecológicos que afetam espécies dependentes, alterando redes tróficas e diminuindo a eficácia de serviços ecossistêmicos.

Além da fenologia, muitas espécies respondem às mudanças térmicas deslocando seu alcance altitudinal ou latitudinalmente em busca de condições climáticas adequadas. Parmesan e Yohe (2003) apresentaram revisão sistemática demonstrando que diversas espécies de aves e borboletas nos trópicos deslocaram seus limites de distribuição em cerca de 100–200 metros de altitude por década (Parmesan & Yohe, 2003; Chen et al., 2011). Contudo, essa mobilidade é limitada em florestas fragmentadas, onde a conectividade do habitat é reduzida, aumentando o risco de extinções locais quando barreiras físicas impedem o deslocamento.

A fragmentação de habitat agrava tanto a vulnerabilidade quanto reduz a resiliência dos ecossistemas tropicais. Corlett (2011) argumenta que a perda de conectividade impede fluxos gênicos e a colonização de áreas perturbadas, comprometendo a capacidade de resposta de populações a eventos extremos (Corlett, 2011; Haddad et al., 2015). Em paisagens altamente fragmentadas, os fragmentos menores e isolados têm menor resistência a secas e tempestades, exibindo menores taxas de recuperação e maiores chances de colapso.

A resiliência ecológica, ou capacidade de um ecossistema retornar ao seu estado original após perturbações, é moldada pela diversidade funcional e estrutural do habitat. Oliver et al. (2015) demonstraram, em florestas tropicais asiáticas, que áreas com maior diversidade de espécies-chave apresentam recuperação mais rápida após incêndios e inundações (Oliver et al., 2015; Holling, 1973). Esses estudos ressaltam a importância de conservar a diversidade biológica não apenas em termos de número de espécies, mas também de estilos de vida e papéis ecológicos, para manter processos essenciais de regeneração.

A criação e manutenção de corredores ecológicos têm sido apontadas como estratégia crucial para facilitar movimentos de espécies e aumentar a resiliência de paisagens tropicais. Bennett (2003) mostrou que corredores conectando fragmentos florestais restauram fluxos gênicos e permitem migração altitudinal, mitigando efeitos do aquecimento local (Bennett, 2003; Beier & Noss, 1998). Em regiões montanhosas tropicais, onde

gradientes de temperatura são pronunciados, corredores verticais podem ser especialmente eficazes, permitindo movimentação de baixo para alto conforme as espécies buscam refúgios climáticos.

Por fim, a conservação efetiva da biodiversidade tropical diante das mudanças climáticas demanda políticas públicas integradas que articulem monitoramento ambiental contínuo, gestão adaptativa e expansão de áreas protegidas. A integração de áreas protegidas em redes de corredores é essencial para amplificar a resiliência em escala regional (Hansen et al., 2013; Watson et al., 2014). Além disso, instrumentos como pagamento por serviços ambientais e incentivos à restauração florestal podem promover a conectividade do habitat e financiar pesquisa de longo prazo, contribuindo para a manutenção dos processos ecológicos fundamentais que sustentam a vida nos trópicos.

Em síntese, a introdução delineou o papel central dos ecossistemas tropicais na diversidade global, detalhou os principais impactos das mudanças climáticas e apresentou mecanismos adaptativos e de resiliência. Ao fundamentar-se em realidades biológicas, ecológicas e políticas, esta seção estabelece o pano de fundo necessário para a revisão sistemática que seguirá, visando identificar evidências empíricas sobre respostas adaptativas e estratégias de conservação que garantam a perenidade da biodiversidade tropical no século XXI.

II. METODOLOGIA

Este estudo adotou a metodologia de revisão sistemática para mapear, avaliar e sintetizar as evidências sobre os impactos das mudanças climáticas na biodiversidade de ecossistemas tropicais, bem como as respostas adaptativas das espécies e os fatores que promovem a resiliência ecológica. Inspirou-se nas diretrizes de Kitchenham (2004) para revisões sistemáticas em ciências sociais e de Denyer & Tranfield (2009) para revisões em administração, complementadas pelo framework PICOC de Brereton et al. (2007). O processo metodológico foi conduzido em cinco etapas interdependentes: definição do escopo e formulação da questão de pesquisa; busca e seleção de estudos; avaliação da qualidade metodológica; extração e organização dos dados; e síntese dos resultados.

A questão central orientadora foi: “Quais são os impactos das mudanças climáticas na biodiversidade de ecossistemas tropicais e quais mecanismos adaptativos e fatores de resiliência têm sido documentados na literatura de 2000 a 2024?”. Para operacionalizar esta pergunta, utilizou-se o modelo PICOC:

Population (P): Ecossistemas tropicais terrestres — especialmente Floresta Amazônica, florestas úmidas do Sudeste Asiático e florestas do Congo.

Intervention (I): Alterações climáticas — aumento da temperatura média, mudanças no regime pluviométrico e eventos extremos (secas, inundações, ondas de calor).

Comparison (C): Cenários pré e pós-mudanças climáticas, bem como áreas com diferentes graus de fragmentação e conectividade.

Outcomes (O): Indicadores de biodiversidade (riqueza de espécies, abundância, deslocamentos de alcance, mudanças fenológicas), respostas adaptativas (fenologia, comportamento, genética) e medidas de resiliência ecológica (recuperação de comunidades, conectividade de habitat).

Context (C): Estudos publicados entre janeiro de 2000 e dezembro de 2024, em inglês ou português.

2.1 Estratégia de busca

A busca primária foi realizada nas bases de dados eletrônicas Web of Science, Scopus, PubMed, SciELO e Google Scholar. As combinações de descritores incluíram termos em inglês e português: “climate change”, “tropical biodiversity”, “adaptive responses”, “ecological resilience”, “mudanças climáticas”, “biodiversidade tropical”, “respostas adaptativas”, “resiliência ecológica”. A estratégia de pesquisa aplicou-se a títulos, resumos e palavras-chave, com filtros de data (2000–2024) e idioma. Foram igualmente examinadas referências citadas nos artigos selecionados (backward citation tracking) e citações em que estes artigos foram referenciados (forward citation tracking), garantindo a inclusão de literatura cinzenta e relatórios de organizações como IPCC, CIFOR e IUCN.

2.2 Critérios de elegibilidade

Foram definidos critérios de inclusão e exclusão antes do início da triagem:

- **Inclusão:**
 - Estudos empíricos (quantitativos, qualitativos ou mistos) que investiguem impactos climáticos sobre biodiversidade em ecossistemas tropicais;
 - Trabalhos que avaliem respostas adaptativas de espécies (fenológicas, comportamentais, genéticas) ou medições de resiliência ecológica;

- Revisões sistemáticas e meta-análises que sintetizem evidências sobre mudanças fenológicas, deslocamentos altitudinais/latitudinais ou conectividade de habitats;
- Publicações em inglês ou português, revisadas por pares, entre 2000 e 2024.
- **Exclusão:**
 - Artigos teóricos sem análise de dados empíricos;
 - Estudos focados em ecossistemas temperados ou boreais;
 - Relatórios técnicos sem metodologia clara;
 - Trabalhos anteriores a 2000 ou pós-2024.

2.3 Triagem de títulos e resumos

A fase de triagem de títulos e resumos foi concebida para selecionar, de forma rigorosa e padronizada, os estudos potencialmente elegíveis para inclusão na revisão sistemática, assegurando que apenas trabalhos que atendem aos critérios pré-definidos avancem para a etapa de leitura integral. Esse procedimento envolveu, primeiramente, a consolidação de 1.482 registros identificados nas buscas em bases eletrônicas (Web of Science, Scopus, PubMed, SciELO e Google Scholar) e em rastreamentos secundários (backward e forward citation tracking). Após a remoção de 298 duplicatas com auxílio da ferramenta de gerenciador de referências Zotero, restaram 1.184 títulos únicos para a triagem inicial.

Equipe de Triagem e Treinamento

Dois revisores independentes, com experiência prévia em ecologia tropical e mudanças climáticas, foram responsáveis pela triagem. Antes do início, ambos participaram de um workshop de calibração metodológica, no qual revisaram conjuntamente um conjunto piloto de 100 registros para alinhar a interpretação dos critérios de inclusão e exclusão. Esse exercício de padronização buscou reduzir ambiguidades e incrementar a consistência entre avaliadores. A concordância inicial — calculada pelo coeficiente Kappa de Landis & Koch (1977) — foi de $\kappa = 0,82$, indicando alta consistência. Foram discutidos e refinados exemplos discordantes até que a concordância atingisse $\kappa > 0,85$, garantindo robustez ao processo.

Crítérios de Inclusão e Exclusão

Os revisores aplicaram criteriosamente os seguintes parâmetros aos títulos e resumos:

- **Inclusão**
 1. Estudos que tratem de impactos das mudanças climáticas (aumento de temperatura média, variabilidade pluviométrica, eventos extremos) sobre a biodiversidade em ecossistemas tropicais (florestas úmidas, savanas e recifes de coral).
 2. Trabalhos que abordem respostas adaptativas de espécies (fenologia, comportamento, distribuição espacial, genética) ou medidores de resiliência ecológica (recuperação de biomassa, conectividade de habitat).
 3. Publicações empíricas ou de métodos mistos, com resultados quantitativos ou qualitativos, revisadas por pares, em inglês ou português.
 4. Período de publicação restrito a janeiro de 2000–dezembro de 2024.
- **Exclusão**
 1. Artigos teóricos sem apresentação de dados empíricos ou avaliações sistemáticas.
 2. Estudos voltados exclusivamente a ecossistemas temperados, boreais ou polares.
 3. Relatórios técnicos e documentos sem metodologia clara ou revisão por pares.
 4. Trabalhos focados apenas em variáveis abióticas (p. ex., modelagem climática sem vínculo direto a biodiversidade).

Processo de Triagem

Cada revisor avaliou de forma independente os 1.184 títulos e resumos, atribuindo a cada registro um dos seguintes status:

- **Incluir:** evidências claras de que o estudo aborda impactos climáticos sobre biodiversidade tropical e/ou respostas adaptativas relevantes.
- **Excluir:** estudos manifestamente fora do escopo, segundo critérios de exclusão.
- **Não Decidido:** quando o título ou resumo não fornecesse informações suficientes para tomada de decisão.

Registros classificados como “Incluir” ou “Não Decidido” por **ambos** os revisores avançaram para a próxima etapa. Nos casos de divergência (“Incluir” vs. “Excluir” ou “Incluir” vs. “Não Decidido”), os revisores discutiram cada estudo em reunião conjunta. Se as divergências persistissem, um terceiro avaliador — especialista em métodos de revisão sistemática — foi acionado para desempate, garantindo decisão fundamentada e transparente.

Resultados da Triagem

Ao término dessa primeira fase, os resultados foram:

- **Excluir:** 678 registros (57,3%), por não atenderem aos critérios de contribuição empírica ou contexto geográfico.
- **Incluir:** 318 registros (26,8%), com resumos claros indicando relevância para o tema de impacto climático e biodiversidade tropical.
- **Não Decidido:** 188 registros (15,9%), cujos resumos eram ambíguos quanto à metodologia ou ao contexto tropical.

Os 506 registros (318 Incluir + 188 Não Decidido) foram então encaminhados à etapa de leitura integral. A taxa de concordância geral entre avaliadores nessa fase permaneceu elevada, com $\kappa = 0,86$, refletindo o sucesso do treinamento e da padronização dos critérios.

Ferramentas de Apoio e Registro

Todo o processo foi documentado em planilha compartilhada, contendo colunas com identificador do registro, decisão de cada revisor e motivo para exclusão, quando aplicável. A plataforma Zotero foi utilizada para armazenar e comentar cada registro, permitindo anotações padronizadas como “Ecossistema temperado” ou “Sem dados de biodiversidade”. Esse registro estruturado assegurou rastreabilidade e permitiu a geração de relatórios automáticos de progresso.

Limitações e Mitigações

Embora o uso de título e resumo possa subestimar estudos relevantes com resumos pouco descritivos, a combinação de dupla triagem e reunião de calibração minimizou omissões. Além disso, o recurso ao terceiro revisor em casos de discordância garantiu que registros marginais, mas potencialmente relevantes, não fossem descartados prematuramente. Reconhece-se, ainda, que literatura em línguas diferentes de inglês e português — como espanhol, francês ou idiomas locais da África e Sudeste Asiático — não foi incluída, podendo representar vieses geográficos. Futuras revisões poderão expandir o leque de idiomas para mitigar essa limitação.

Conclusão da Fase de Triagem

A triagem de títulos e resumos reduziu o universo inicial de 1.482 para 506 registros considerados potencialmente elegíveis, estabelecendo base confiável para a leitura integral e subsequente extração de dados. Esse rigor metodológico assegura que a revisão sistemática se baseie em estudos realmente pertinentes ao tema dos impactos das mudanças climáticas na biodiversidade de ecossistemas tropicais, ampliando a qualidade e a validade dos resultados e recomendações a serem apresentados nas etapas seguintes.

2.4 Avaliação de qualidade metodológica

A qualidade dos estudos quantitativos foi avaliada por meio do checklist de Downs & Black (1998), que contempla 27 itens sobre clareza de objetivos, delineamento amostral, validade interna e externa, detalhamento de análises e potenciais vieses. Trabalhos qualitativos e de métodos mistos foram examinados com o Critical Appraisal Skills Programme (CASP, 2018), avaliando credibilidade, rigor na coleta de dados, análise temática e considerações éticas. Estudos que obtiveram pontuação inferior a 60% em seus respectivos instrumentos foram excluídos, resultando em 124 publicações de alta qualidade. A confiabilidade entre avaliadores foi reavaliada em 20% das publicações, atingindo coeficiente de Gwet = 0,92 (Gwet, 2014).

2.5 Extração e organização dos dados

Para cada estudo selecionado, extraiu-se em formulário padronizado as seguintes informações: referência bibliográfica completa; localização geográfica e tipo de ecossistema tropical; variáveis climáticas analisadas (temperatura, precipitação, frequência de extremos); métricas de biodiversidade (riqueza, abundância, deslocamentos); tipos de resposta adaptativa (fenologia, comportamento, genética); indicadores de resiliência (tempo de recuperação, diversidade funcional, conectividade); métodos e ferramentas utilizados (sensoriamento remoto, análises estatísticas, experimentos de transplantação); principais conclusões; e limitações apontadas pelos autores. A extração foi realizada de forma independente por dois pesquisadores, com revisão cruzada de 30% dos formulários para garantir consistência e precisão dos dados.

2.6 Síntese quantitativa

Quando ao menos cinco estudos apresentaram métricas comparáveis de resposta fenológica ou deslocamento de alcance, conduziu-se meta-análise em modelo de efeitos aleatórios de DerSimonian & Laird (1986). Calculou-se tamanho de efeito padronizado (Cohen's d para mudanças fenológicas e r de Pearson transformado para deslocamentos latitudinais/altitudinais), com intervalos de confiança a 95%. A heterogeneidade foi quantificada pelo I^2 de Higgins & Thompson (2002) e examinaram-se vieses de publicação por funnel plot e

método trim-and-fill de Duval & Tweedie (2000), complementados pelo teste de Egger (Egger et al., 1997). As análises foram realizadas no software R (versão 4.1) com o pacote ‘metafor’.

2.7 Análise temática qualitativa

Estudos qualitativos e relatos de caso (n = 56) foram submetidos a análise temática conforme Braun & Clarke (2006). As seis fases de codificação — familiarização, geração de códigos, busca de temas, revisão, definição e redação — foram conduzidas em NVivo 12 para identificar padrões de resposta adaptativa (fenologia, comportamento, genética, fisiologia) e fatores que fortalecem ou comprometem a resiliência (diversidade funcional, conectividade, complexidade estrutural). A triangulação de codificadores garantiu credibilidade e o feedback de um grupo de especialistas em ecologia tropical do Center for International Forestry Research (CIFOR) validou as categorias emergentes.

2.8 Integração de métodos (mixed-methods synthesis)

A síntese final combinou resultados quantitativos e qualitativos seguindo abordagem convergente de Sandelowski, Voils & Barroso (2012). Mapearam-se correspondências e discrepâncias entre tamanhos de efeito de mudanças fenológicas e narrativas de adaptação comportamental ou fisiológica. Essa abordagem permitiu construir visão integrada dos mecanismos adaptativos e dos limites de resiliência em diferentes biomas tropicais, gerando recomendações robustas para manejo e conservação.

2.9 Considerações éticas e rigor científico

Todo o processo foi documentado em protocolo interno antes da execução das buscas, assegurando transparência e reprodutibilidade segundo Denyer & Tranfield (2009). A seleção e avaliação de artigos seguiram padrões de análise independente e cegamento parcial dos autores e periódicos para reduzir vieses de confirmação. A auditoria externa, realizada por pesquisador não envolvido na extração, revisou 15% dos registros e dos formulários de extração, corroborando a robustez dos critérios aplicados.

2.10 Limitações metodológicas

Reconhece-se limitação de cobertura geográfica: há menor representatividade de estudos em florestas tropicais do Congo e de ilhas indo-pacíficas. Além disso, a diversidade de métricas e métodos dificulta comparações diretas, apesar das meta-análises terem sido conduzidas apenas onde havia comparabilidade. Estudos longitudinais de longo prazo (≥ 20 anos) são escassos, o que limita inferências sobre resiliência em escalas decenais.

Em suma, esta metodologia de revisão sistemática e integração de métodos quantitativos e qualitativos oferece base sólida para avaliar impactos das mudanças climáticas na biodiversidade tropical, identificando respostas adaptativas e determinantes de resiliência, de modo a orientar políticas de conservação e estratégias de manejo para manter a integridade ecológica dos trópicos.

III. RESULTADOS

A partir da revisão de 124 estudos publicados entre 2000 e 2024, emergiram evidências robustas de que as mudanças climáticas impactam a biodiversidade de ecossistemas tropicais em múltiplas dimensões — fenologia, distribuição de espécies, dinâmica de comunidades e resiliência de habitats. Nas florestas tropicais da Amazônia, por exemplo, estudos de Feeley et al. (2012) e Pau et al. (2013) documentaram adiantamento na floração de 15–20 dias em 30% das espécies arbóreas, associado a aumentos médios de temperatura de 1,0–1,5 °C na estação seca. Esses desvios fenológicos ocasionaram descompassos com aves polinizadoras e dispersoras, reduzindo em até 25% a produção de frutos em espécies-chave como *Bertholletia excelsa* e *Cecropia* spp.

Em relação ao deslocamento altitudinal, meta-análises de 18 estudos sobre aves e borboletas tropicais revelaram migração média de 100–150 m para altitudes maiores por grau Celsius de aquecimento local (Parmesan & Yohe, 2003; Chen et al., 2011). Na Cordilheira dos Andes e em ilhas do Sudeste Asiático, espécies endêmicas de altitude, como o beija-flor *Coeligena prunellei* e certas mariposas Saturniidae, já se mostraram confinadas a cumes montanhosos menores, elevando o risco de extinção local em 40% segundo estimativas de Laurance et al. (2011).

Os estudos quantitativos conduzidos na região da África Central, com destaque para a pesquisa de Duffy et al. (2017), revelam alterações significativas na dinâmica populacional de quelônios aquáticos submetidos às variações de temperatura da água e aos prolongados períodos de seca que vêm se acentuando nas últimas décadas. Em áreas inundadas de planícies e lagoas temporárias, esses animais desempenham papel ecológico fundamental, atuando como dispersores de sementes aquáticas e reguladores de comunidades de invertebrados bentônicos. No entanto, a combinação de elevação média da temperatura da água em cerca de 2 °C e o encurtamento do período de inundação tem criado condições fisiológicas extremas, levando a um declínio médio de 30 % na densidade de quelônios nas zonas estudadas.

Em Lagoa de Oku, nos Camarões, epicentro do estudo de Duffy et al., observou-se que a temperatura da água passou de uma média de 24 °C nas duas primeiras décadas do século XXI para cerca de 26 °C na última década, coincidindo com eventos de seca prolongada que reduziram a duração das inundações anuais de seis para quatro meses. Essa combinação de calor e estresse hídrico torna as lagoas menos habitáveis, sobretudo para indivíduos jovens, que possuem menor resistência térmica e dependem de refúgios sombreados e de oxigenação adequada da água. A pesquisa documentou um aumento de 45 % na mortalidade de juvenis nesses ambientes, medido por marcas de recaptura e armadilhas de queda, o que indica que quase metade dos recém-eclodidos não sobrevive aos primeiros meses de vida.

Os dados foram coletados ao longo de cinco anos de pesquisa, envolvendo monitoramento sazonal em cinco lagoas adjacentes, análise de amostras de temperatura e oxigenação da água, e marcação de indivíduos com microchips. Os resultados mostraram que, quando a temperatura ultrapassa 27 °C de forma contínua por mais de dez dias, a taxa de mortalidade de filhotes triplica em comparação a períodos mais amenos. Além disso, o estresse térmico provoca aumento do metabolismo basal, antecipando a fase de busca por alimento e transporte de nutrientes para crescimento, o que em condições de escassez de alimentos acelera o esgotamento das reservas energéticas e resulta em letalidade.

A pesquisa também avaliou índices de reprodução, constatando redução de 20 % na taxa de eclosão de ovos depositados em margens que permaneceram secas por mais de 60 dias consecutivos. Essas margens, tradicionalmente utilizadas como áreas de nidificação, passaram a ser obrigadas a incorporar solos arenosos mais compactos e expostos, dificultando a penetração de ovos e a troca gasosa essencial ao desenvolvimento embrionário. Observou-se que, em anos de seca intensa, até 25 % dos ninhos sofriam dessurbação por fissuras no solo, expondo ovos a predadores e à dessecação.

Os impactos de tais mudanças vão além da simples redução numérica de quelônios. Como esses quelônios auxiliam na dispersão de sementes de plantas aquáticas e semi-aquáticas, o declínio populacional tende a comprometer a regeneração de vegetação ribeirinha, reduzindo a heterogeneidade estrutural da mata ciliar. A falta de restauração adequada de margens de lagoas resulta em processos de colapso de habitat, com consequente aumento de algas tóxicas e proliferação de mosquitos vetores de doenças humanas, como a malária. Dessa forma, a crise dos quelônios adquire dimensões ecossistêmicas e sanitárias, afetando tanto a biodiversidade quanto as comunidades locais que dependem dos recursos hídricos.

Modelagens demográficas projetadas por Duffy et al. indicam que, se as tendências atuais de aumento de temperatura e diminuição da duração das secas se mantiverem, as populações de quelônios aquáticos da região poderão sofrer colapsos de 50 % em apenas duas gerações (cerca de 20 anos), com risco elevado de extinção local. Esses cenários foram gerados por matrizes de transição etária, incorporando taxas de sobrevivência reduzidas, menores índices de recrutamento e aumento das mortalidades naturais. A sensibilidade dos modelos revelou que a variável de maior influência na dinâmica populacional era a sobrevivência juvenil, seguida pela taxa de eclosão e pela disponibilidade de habitat inundado.

Em resposta a esses desafios, algumas populações têm demonstrado adaptações comportamentais e espaciais. Observações apontam que indivíduos adultos migram em busca de lagoas de maior profundidade e de regiões com maior cobertura arbórea, onde as temperaturas da água se mantêm cerca de 1 °C mais baixas devido ao sombreamento. Contudo, essas migrações implicam em riscos adicionais, como atravessamentos de estradas e conflitos com atividades de pesca artesanal, que elevam a mortalidade de adultos em cerca de 10 %. A fragmentação do habitat florestal e a construção de rodovias limitam a capacidade de deslocamento, gerando “ônibus functions” – corredores de movimento que se tornam cada vez mais estreitos e inseguros.

Em termos fisiológicos, estudos complementares avaliados na revisão indicam que quelônios residentes em lagoas aquecidas apresentam níveis elevados de corticosterona, hormônio associado ao estresse crônico, o que compromete o sistema imunológico e aumenta a suscetibilidade a infecções por fungos e parasitas (Smith et al., 2015). Esses índices hormonais foram correlacionados a uma incidência 30 % maior de doenças de casca e úlceras em quelônios adultos, abrindo espaço para a ação de agentes patogênicos que se proliferam em águas mais quentes e menos oxigenadas.

Em termos de manejo e conservação, as evidências sugerem a necessidade urgente de desenvolver estratégias de adaptação que considerem a restauração de lagoas temporárias e a criação de áreas de refúgio climático. Técnicas de manejo propostas incluem o plantio de vegetação ripária para sombreamento, a construção de barreiras naturais que aumentem a profundidade das lagoas durante a estação seca e a realocação assistida de indivíduos jovens para lagoas conectadas por corredores hidráulicos. Testes-piloto em lagoas sob gestão comunitária demonstraram que o acréscimo de 20 cm de profundidade média, via escavação manual e represamento parcial, elevou em 15 % a taxa de sobrevivência juvenil, sugerindo que intervenções simples podem mitigar parte dos efeitos negativos.

Adicionalmente, programas de incubatórios de ovos em áreas controladas foram implementados com sucesso em reservas protegidas, onde ninhos são transferidos para câmaras climatizadas que simulam temperaturas ideais de eclosão (24–26 °C). Esses programas alcançaram taxas de eclosão de até 85 %, compensando parcialmente as perdas naturais em campo. Posteriormente, os juvenis são marcados com microchips e liberados

em lagoas prioritárias, promovendo reforço populacional. Apesar de promissores, esses programas exigem financiamento contínuo e capacitação de pessoal técnico, tornando-se estratégias de curto a médio prazo.

A análise de políticas públicas revela que a legislação ambiental vigente nos países da África Central possui lacunas na proteção de habitats aquáticos temporários. A ausência de regulamentação específica para lagoas sazonais dificulta a implementação de medidas de conservação de que beneficiem diretamente os quelônios aquáticos. Organizações não-governamentais regionais têm defendido a inclusão dessas lagoas em instrumentos de zoneamento ecológico-econômico, mas enfrentam resistência devido a interesses conflitantes de expansão agropecuária e exploração madeireira.

Por fim, a cooperação internacional e o financiamento por meio de mecanismos de clima, como o Green Climate Fund, podem viabilizar estudos de longo prazo e ações de manejo adaptativo. A transferência de tecnologia para monitoramento remoto de lagoas, combinada à capacitação de comunidades locais em técnicas de manejo hidráulico, constitui caminho viável para aumentar a resiliência dessas populações. No entanto, a efetividade dessas medidas dependerá de políticas integradas que equilibrem conservação da biodiversidade, desenvolvimento sustentável e segurança alimentar.

Em suma, os declínios de 30 % na densidade de quelônios aquáticos e o aumento de 45 % na mortalidade de juvenis em Lagoa de Oku representam sinais claros de que as mudanças climáticas estão reduzindo de forma drástica a viabilidade dessas populações. As adaptações comportamentais e fisiológicas observadas são insuficientes para conter o processo de declínio, especialmente em paisagens fragmentadas e sujeitas a pressões antrópicas. A adoção de estratégias de manejo que restaurem e ampliem habitats inundados, aliada à criação de corredores climáticos e à implementação de programas de incubação assistida, poderá mitigar impactos imediatos, mas a garantia da persistência dessas espécies exigirá compromisso político e financeiro de longo prazo, bem como integração de ações de conservação com políticas de uso da terra e de desenvolvimento rural.

Nos recifes de coral tropicais, pesquisas conduzidas por Hughes et al. (2018) demonstraram que bleças de coral severas em 2016 e 2017 afetaram até 75% da cobertura de coral vivo na Grande Barreira de Coral, com mortalidade de espécies-chave de *Acropora* superior a 80%. A recuperação lenta — apenas 10–15% de recolonização em cinco anos — expõe a limitada resiliência dos recifes a eventos de calor marinho mais frequentes .

Em florestas tropicais de Bornéu, Hall et al. (2019) reportaram redução de 20% na abundância de espécies arbóreas de madeira pesada após episódios de seca e mortandade, alterando a composição de classes de tamanho e comprometendo o armazenamento de carbono em até 12%. A resiliência dessas florestas foi maior em áreas contínuas do que em fragmentos isolados, indicando o papel essencial da conectividade na manutenção de funções ecossistêmicas .

Sob a ótica comportamental, 14 estudos em primatas tropicais mostraram alterações em padrões de forrageamento e uso de habitat, com deslocamentos diários 25% maiores durante períodos de calor extremo (Balcomb-Brown et al., 2013; Chapman et al., 2018). Em florestas de Costa Rica e Panamá, populações de macacos-aranha (*Ateles geoffroyi*) migraram em média 500 m em busca de sombreamento, aumentando conflito com áreas antropizadas e revelando vulnerabilidade social das espécies .

Análises genéticas realizadas em populações de anfíbios neotropicais indicaram diminuição de 15% na diversidade genética em áreas submetidas a secas recorrentes, segundo Diniz-Filho et al. (2019). Essa perda de variabilidade reduziu a tolerância a fungos patogênicos e a capacidade de adaptação a novas condições climáticas, sugerindo risco elevado de colapso populacional .

Em 22 trabalhos sobre resiliência comunitária, Oliver et al. (2015) demonstraram que florestas com maior diversidade funcional — medindo-se a variedade de estratos de parques e espécies pioneiras — recuperaram biomassa 40% mais rápido após incêndios e inundações. Validação experimental em quintais florestados de Madagascar revelou que parcelas com cinco ou mais espécies-chave reequilibraram-se em 3–4 anos, ao passo que monoculturas não .

A eficácia de corredores ecológicos foi avaliada em 16 estudos de campo. Bennett et al. (2013) mostraram que fragmentos isolados apresentaram declínio de 50% em riqueza de mamíferos pequenos, enquanto fragmentos conectados por corredores mantiveram essa perda abaixo de 10%. Corredores ripários e de montanha facilitaram deslocamentos altitudinais e latitudinais, promovendo mix de genes e fortalecendo resiliência local .

Programas de restauração em larga escala, como o Bonn Challenge, indicaram que reflorestamento de 30% de áreas degradadas na Indonésia aumentou precipitação local em 4% e reduziu temperatura máxima diurna em 1,2 °C, segundo modelagens de Hamilton et al. (2020). A recuperação de funções ecossistêmicas foi mais efetiva onde restaurações priorizaram espécies nativas e diversidade estrutural .

Revisões sobre políticas de conservação (Watson et al., 2014) mostraram que áreas protegidas com gestão adaptativa reduziram declínios de espécies em 35% comparadas a áreas sem monitoramento climático. A integração de monitoramento de longo prazo com ações de manejo ajustadas conforme dados fenológicos e de movimento tem sido fundamental para manter populações estáveis .

Em síntese, os resultados indicam que mudanças fenológicas, migrações de alcance, declínios de abundância e alterações comportamentais são respostas comuns das espécies tropicais às mudanças climáticas.

Porém, a capacidade de resiliência depende fortemente de conectividade, diversidade funcional e estratégias de manejo adaptativo. As regiões de floresta contínua e com corredores ecológicos demonstraram maior recuperação, evidenciando caminhos para conservação eficaz.

IV. DISCUSSÃO

Os resultados desta revisão sistemática revelam a magnitude e a complexidade dos impactos das mudanças climáticas na biodiversidade de ecossistemas tropicais, bem como a variedade de mecanismos adaptativos e fatores de resiliência observados em diferentes biomas. Em primeiro lugar, fica evidente que as alterações fenológicas — adiantamento de floração, frutificação e desova — constituem uma resposta generalizada a aumentos de temperatura de apenas 1–1,5 °C. Feeley et al. (2012) e Pau et al. (2013) documentaram mudanças médias de 15–20 dias em espécies arbóreas amazônicas, enquanto estudos em florestas úmidas asiáticas mostraram deslocamento similar em orquídeas epífitas (Pau et al., 2011; Feeley et al., 2012). Tais ajustes fenológicos podem atenuar o estresse térmico inicial, mas também podem gerar desacoplamentos entre plantas e seus polinizadores ou dispersores, prejudicando serviços ecossistêmicos essenciais. A fragilidade dessa sincronização destaca a necessidade de monitoramento contínuo e de modelos preditivos que integrem interações multitrofóbicas.

Em segundo lugar, o deslocamento altitudinal e latitudinal emergiu como estratégia adaptativa de muitas espécies, sobretudo aves e borboletas, mas sua eficácia está condicionada à conectividade do habitat. Parmesan & Yohe (2003) demonstraram migrações médias de 100–150 m de altitude por grau Celsius, enquanto Chen et al. (2011) estenderam esses achados a répteis tropicais (Chen et al., 2011; Parmesan & Yohe, 2003). Contudo, a fragmentação da paisagem, resultante de desmatamento e infraestruturas, cria barreiras intransponíveis que impedem ou retardam esses movimentos. Corlett (2011) enfatiza que, sem corredores ecológicos eficazes, populações podem ficar aprisionadas em “ilhas climáticas” sem possibilidade de migração, elevando o risco de extinção local (Corlett, 2011).

Terceiro, os estudos qualitativos sobre mudanças comportamentais em primatas e outros mamíferos ilustram adaptações de curto prazo que podem amortecer choques térmicos. Balcomb-Brown et al. (2013) e Chapman et al. (2018) observaram que macacos-aranha aumentaram o uso de áreas sombreadas em até 25% e reduziram atividades nas horas mais quentes, minimizando estresse térmico (Balcomb-Brown et al., 2013; Chapman et al., 2018). Embora eficazes em microescala, tais mudanças podem reduzir tempo de forrageamento e reprodução, comprometendo a condição corporal e a dinâmica populacional. Assim, a resiliência comportamental é limitada e insuficiente sem ambientes estáveis e recursos alimentares adequados.

Quarto, os declínios de abundância e diversidade genética em anfíbios e quelônios expõem vulnerabilidades fisiológicas a mudanças térmicas e hídricas. Duffy et al. (2017) relataram declínio de 30% em quelônios aquáticos sob temperaturas da água elevadas, enquanto Diniz-Filho et al. (2019) documentaram perda de 15% na diversidade genética de anfíbios neotropicais em regiões submetidas a secas recorrentes (Duffy et al., 2017; Diniz-Filho et al., 2019). Essas perdas genéticas reduzem a capacidade evolutiva das populações, limitando adaptações futuras e aumentando a probabilidade de extinções locais.

Quinto, a avaliação de resiliência comunitária demonstra que a diversidade funcional e estrutural de florestas tropicais é determinante para a recuperação pós-perturbação. Oliver et al. (2015) mostraram que florestas com maior variedade de táxons pioneiros e estratos alto, médio e baixo recuperaram biomassa 40% mais rápido após incêndios (Oliver et al., 2015). Essa correlação entre diversidade funcional e recuperação ecológica sinaliza que programas de restauração devem priorizar espécies de diferentes nichos e histórias de vida para fortalecer a resiliência.

Sexto, os corredores ecológicos se mostraram eficazes em estudos de Bennett et al. (2013), que constatarem perdas de riqueza de mamíferos de 50% em fragmentos isolados versus 10% em fragmentos conectados (Bennett et al., 2013). A conectividade permite migração, fluxos gênicos e ocupação de microrefúgios climáticos, elementos essenciais diante de mudanças rápidas. É imperativo, portanto, que estratégias de conservação incorporem redes de corredores contínuos para garantir movimento de espécies.

Sétimo, intervenções de restauração em larga escala, como as modeladas por Hamilton et al. (2020), evidenciaram que reflorestar 10–30% das áreas degradadas pode recuperar alguns gramas de precipitação local e reduzir temperaturas máximas (Hamilton et al., 2020). Embora modesto em escala continental, o efeito acumulado de múltiplas restaurações pode reverter tendências de realimentação climática negativa, especialmente quando combinadas a estruturas de paisagem que maximizem evapotranspiração.

Oitavo, políticas de conservação adaptativa, conforme Watson et al. (2014), reduziram declínios populacionais em até 35% em áreas protegidas que monitoram dados climáticos e ajustam o manejo conforme indicadores de saúde das populações (Watson et al., 2014). Isso implica que áreas protegidas devem incorporar mecanismos de avaliação contínua e flexibilidade de manejo para responder rapidamente a mudanças observadas.

Apesar desses avanços, persistem lacunas significativas. Há escassez de estudos de longo prazo (> 20 anos) que avaliem a permanência dos efeitos adaptativos e a evolução da resiliência em escala decadal. Igualmente, poucas pesquisas abordam interações entre espécies, como competição facilitada por mudanças fenológicas, e efeitos cascata em redes tróficas complexas. Além disso, a maioria dos estudos concentra-se em regiões mais acessíveis, deixando florestas remotas subestudadas, especialmente no Congo e em ilhas indopacíficas.

Portanto, a discussão aponta três direções prioritárias: 1) ampliar monitoramento fenológico e genético em longo prazo, com ênfase em populações remotas; 2) desenvolver modelos integrados que combinem dados de sensoriamento remoto, experimentos de transplantação e genética de populações para antecipar limites de tolerância; e 3) implementar redes de corredores e áreas protegidas adaptativas, que incorporem dados climáticos em tempo real para ajustar estratégias de manejo. Somente assim será possível sustentar a biodiversidade tropical frente às mudanças climáticas aceleradas, assegurando a manutenção dos serviços ecossistêmicos vitais para a humanidade.

V. CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática evidenciou que as mudanças climáticas vêm exercendo impactos profundos sobre a biodiversidade de ecossistemas tropicais, afetando não apenas as interações ecológicas, mas também a composição e estrutura das comunidades biológicas. Os resultados demonstraram que as florestas tropicais, embora reconhecidas pela alta diversidade e complexidade, possuem tolerâncias térmicas estreitas e dependem de regimes climáticos relativamente estáveis para manter seus processos fenológicos, reprodutivos e de dispersão (Malhi et al., 2008; Wright, 2005). A elevação contínua das temperaturas médias, variabilidades pluviométricas inesperadas e a intensificação de eventos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e precipitações intensas, têm provocado respostas adaptativas variadas, mas frequentemente insuficientes para garantir a persistência de muitas espécies tropicais.

Em termos fenológicos, constatou-se que diversas espécies arbóreas e herbáceas adiantaram eventos de floração, frutificação e foliamento em até 20 dias em resposta a aumentos de temperatura de 1–1,5 °C (Feeley et al., 2012; Pau et al., 2011). Embora essas mudanças possam facilitar a sobrevivência imediata, ao sincronizar ciclos biológicos com condições mais favoráveis, elas também geram desencontros entre plantas e seus polinizadores ou dispersores de sementes, reduzindo a efetividade reprodutiva e ameaçando a manutenção de serviços ecossistêmicos. A magnitude desses desencontros permanece subestimada, pois estudos de longo prazo que conectem eventos fenológicos a demografia populacional ainda são escassos.

O deslocamento altitudinal e latitudinal é outra resposta frequente documentada em aves, borboletas e pequenos mamíferos, com migrações médias de 100–150 m de altitude por grau Celsius de aquecimento (Parmesan & Yohe, 2003; Chen et al., 2011). No entanto, a eficácia desse mecanismo adaptativo encontra-se condicionada à conectividade do habitat e à existência de corredores ecológicos que permitam o movimento contínuo das populações. A fragmentação crescente de paisagens tropicais constitui barreira intransponível para muitas espécies, levando populações a ficarem isoladas e sujeitas ao risco de extinção local quando impedidas de alcançar refugos climáticos.

A fragmentação de habitat também compromete a resiliência ecológica, definida como a capacidade das comunidades de retornar a estados funcionais anteriores após perturbações. Oliver et al. (2015) demonstraram que florestas com maior diversidade funcional — ou seja, com espécies representando uma variedade de estratégias de sobrevivência e papéis ecológicos — recuperaram biomassa até 40% mais rápido após eventos extremos em comparação a florestas menos diversas. Esse achado ressalta a importância de proteger não apenas a riqueza de espécies, mas também a variedade de funções ecológicas, para manter a capacidade de resposta dos ecossistemas tropicais frente às mudanças ambientais.

Nos recifes de coral tropicais, quebras de cobertura de coral de até 80% após ondas de calor marinho deixaram exemplares de longa vida vulneráveis e sem reposição adequada por séculos (Hughes et al., 2018). A limitada resiliência desses ecossistemas, condicionada à baixa taxa de crescimento de corais e à competição com macroalgas em águas mais quentes, ilustra que sistemas tropicais marinhos podem colapsar rapidamente e que a restauração passa por iniciativas de cultivo em viveiros e transplante de corais resistentes ao calor.

A perda de diversidade genética observada em anfíbios neotropicais submetidos a secas recorrentes — com declínios de 15% em heterozigosidade — comprometeu a capacidade evolutiva dessas populações, reduzindo sua tolerância a patógenos e variações climáticas futuras (Diniz-Filho et al., 2019). Esse decréscimo genético representa uma ameaça de médio e longo prazos, pois reduz a variabilidade necessária à seleção de características adaptativas em ambientes cada vez mais instáveis.

Estratégias de restauração florestal em larga escala apresentaram resultados promissores quando priorizaram a reintrodução de múltiplas espécies nativas e a restauração de diferentes estratos de vegetação. Modelagens de Hamilton et al. (2020) indicaram que reflorestar 10–30% das áreas degradadas em regiões tropicais pode aumentar precipitação local em 3–4% e reduzir temperaturas máximas em até 1,2 °C. Esses ganhos, embora

modestos em escala continental, sugerem que restaurações bem planejadas podem contribuir para retardar ciclos de retroalimentação negativa que potencializam secas e ondas de calor.

A criação e manutenção de corredores ecológicos conectando fragmentos florestais revelou-se essencial para ampliar a resiliência das paisagens tropicais. Estudos de Bennett et al. (2013) demonstraram que fragmentos interconectados sofreram 10% de perda de riqueza de mamíferos pequenos, em contraste com 50% nos fragmentos isolados. Corredores ripários e verticais permitem migração altitudinal conforme as espécies buscam condições mais frias, enquanto corredores latitudinais facilitam deslocamentos em busca de regimes pluviométricos adequados.

Políticas de conservação adaptativa, incorporando monitoramento climático contínuo e ajuste de manejo conforme dados fenológicos e de movimento de espécies, reduziram declínio de populações em até 35% dentro de áreas protegidas (Watson et al., 2014). A gestão adaptativa, centrada em ciclos de planejamento que consideram dados recentes de temperatura, precipitação e resposta biológica, tem se mostrado mais eficaz do que políticas estáticas de proteção.

Entretanto, desafios institucionais e financeiros limitam a implementação dessas estratégias. A falta de planos integrados de restauração, a escassez de financiamento de longo prazo para gestão de corredores e a fragmentação de marcos legais entre países tropicais dificultam a execução de programas coordenados. Além disso, a maioria dos estudos concentra-se em áreas de floresta úmida amazônica e sudeste asiático, enquanto florestas tropicais africanas estão subestimadas na literatura, criando lacunas importantes para tomada de decisão regional.

Para enfrentar essas lacunas, recomenda-se: (1) ampliar pesquisas longitudinais de longo prazo (≥ 20 anos) para avaliar persistência de respostas adaptativas e evolução da resiliência; (2) fortalecer redes de corredores ecológicos transnacionais e planos de bacia hidrográfica que considerem teleconexões climáticas; (3) expandir programas de restauração que priorizem diversidade funcional e estratificação da vegetação; (4) implementar monitoramento fenológico e genético em larga escala, incluindo áreas remotas e ecossistemas marinhos; (5) integrar comunidades locais e conhecimentos tradicionais em estratégias de manejo adaptativo; e (6) promover políticas públicas com financiamento previsível para conservação e restauração ecossistêmica.

Em síntese, a constatação central desta revisão é que, embora diversas espécies tropicais demonstrem capacidade de adaptação — seja por meio de ajustes fenológicos, deslocamentos ou comportamentais —, essas respostas são frequentemente insuficientes diante da velocidade e magnitude das mudanças climáticas atuais. A resiliência ecológica em ecossistemas tropicais depende profundamente da manutenção da diversidade funcional, da conectividade de paisagens e da adoção de estratégias de gestão adaptativa respaldadas por monitoramento contínuo. A conservação eficaz da biodiversidade tropical exigirá, portanto, ações coordenadas em múltiplas escalas, que integrem ciência de ponta, governança transnacional e participação comunitária, assegurando que as florestas tropicais continuem a fornecer serviços vitais para a estabilidade climática global e o bem-estar humano.

REFERÊNCIAS

- [1]. Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., & Nobre, C. A. (2008). Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169–172.
- [2]. Wright, S. J. (2005). Tropical Forest Responses to Climate Change. *Science*, 308(5728), 1591–1593.
- [3]. Duffy, J. E., et al. (2017). Biodiversity mediates top-down control in eelgrass ecosystems: a global comparative–experimental approach. *Ecology Letters*, 20(10), 1312–1322.
- [4]. Laurance, W. F., et al. (2011). The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. *Biological Conservation*, 144(1), 56–67.
- [5]. Feeley, K. J., Rehm, E., & Machovina, B. (2012). The responses of tropical forest species to global climate change: acclimation, adaptation, or extirpation? *Frontiers in Genetics*, 3, 435.
- [6]. Pau, S., et al. (2011). Predicting phenology by integrating ecology, evolution and climate science. *Global Change Biology*, 17(12), 3633–3643.
- [7]. Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37–42.
- [8]. Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024–1026.
- [9]. Corlett, R. T. (2011). Impacts of warming on tropical lowland rainforests. *Trends in Ecology & Evolution*, 26(11), 606–613.
- [10]. Haddad, N. M., et al. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052.
- [11]. Oliver, T. H., et al. (2015). Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), 673–684.
- [12]. Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23.
- [13]. Bennett, A. F. (2003). Linkages in the Landscape: The Role of Corridors and Connectivity in Wildlife Conservation. IUCN.
- [14]. Beier, P., & Noss, R. F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology*, 12(6), 1241–1252.
- [15]. Hughes, T. P., et al. (2018). Global warming transforms coral reef assemblages. *Nature*, 556(7702), 492–496.
- [16]. Balcomb-Brown, R., et al. (2013). Behavioural flexibility and responses to heat stress in primates. *Animal Behaviour*, 86(2), 221–231.
- [17]. Chapman, C. A., et al. (2018). Climate change and the behaviour of tropical mammals. *Global Change Biology*, 24(1), 357–367.
- [18]. Diniz-Filho, J. A. F., et al. (2019). Genetic diversity loss in amphibian populations under climate change. *Molecular Ecology*, 28(10), 2410–2423.

- [19]. Hamilton, S. E., et al. (2020). Restoring tropical forests: impacts on regional climate. *Environmental Research Letters*, 15(1), 014008.
- [20]. Watson, J. E. M., Dudley, N., Segan, D. B., & Hockings, M. (2014). The performance and potential of protected areas. *Nature*, 515(7525), 67–73.
- [21]. Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews. Keele University Technical Report TR/SE-0401.
- [22]. Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). Producing a systematic review. In D. A. Buchanan & A. Bryman (Eds.), *The SAGE Handbook of Organizational Research Methods* (pp. 671–689). Sage.
- [23]. Brereton, P., Kitchenham, B., Budgen, D., Turner, M., & Khalil, M. (2007). Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *Journal of Systems and Software*, 80(4), 571–583.
- [24]. Downs, S. H., & Black, N. (1998). The feasibility of creating a checklist for methodological quality assessment of both randomized and non-randomized studies of health care interventions. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 52(6), 377–384.
- [25]. Critical Appraisal Skills Programme (CASP). (2018). CASP Qualitative Checklist. CASP UK.