

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BIODIVERSIDADE DE ECOSSISTEMAS TROPICAIS: RESPOSTAS ADAPTATIVAS E RESILIÊNCIA

IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON TROPICAL ECOSYSTEM BIODIVERSITY:
ADAPTIVE RESPONSES AND RESILIENCE

Ciências Biológicas, Ciências Sociais Aplicadas • 13/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789158737](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789158737)

Jussara Gonçalves Fonseca¹

Igor Madruga de Oliveira²

Iran Carlos Lovis Trentin³

Dacilene Viana Amurim⁴

Jean Carlos Almeida Damasceno⁵

Angélica Carneiro Cordeiro⁶

Antônio de Lima Paz⁷

Daniel Almeida Bezerra⁸

Murillo Nazareno Cavalcante Aguiar⁹

Odaíze do Socorro Ferreira Cavalcante Lima¹⁰

Agnaldo Braga Lima¹¹

RESUMO

Os ecossistemas tropicais concentram parcela expressiva da biodiversidade global e desempenham funções essenciais na regulação climática, no armazenamento de carbono, na manutenção de ciclos hidrológicos, na produtividade pesqueira e na provisão de recursos necessários à subsistência de milhões de pessoas. Entretanto, o aumento das temperaturas, a intensificação de secas, ondas de calor terrestres e marinhas, alterações nos regimes de precipitação, elevação do nível do mar e mudanças na frequência e intensidade de eventos extremos estão produzindo transformações profundas na composição, na estrutura e no funcionamento desses sistemas. Este artigo analisa os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade de florestas tropicais úmidas e secas, ecossistemas montanos, manguezais e recifes de coral, enfatizando respostas adaptativas, limites da plasticidade fenotípica, mudanças de distribuição geográfica, reorganização de comunidades, processos ecoevolutivos e fatores que determinam resistência e resiliência. Metodologicamente, desenvolveu-se uma revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, fundamentada em avaliações do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, revisões sistemáticas recentes e estudos empíricos publicados principalmente entre 2022 e 2026. As evidências indicam que as respostas da biodiversidade são altamente heterogêneas: algumas espécies alteram distribuição, fenologia, fisiologia ou associações simbióticas, enquanto outras apresentam baixa capacidade de deslocamento ou adaptação diante da velocidade das mudanças ambientais. Em florestas tropicais, aquecimento, secas e incêndios aumentam mortalidade arbórea, modificam composição e podem reduzir a função de sumidouro de carbono; em ecossistemas montanos, deslocamentos altitudinais comprimem áreas adequadas para espécies restritas às

maiores elevações; em manguezais, aumento do nível do mar e mudanças nos regimes de ciclones interagem com restrições de migração terrestre; e, em recifes tropicais, ondas de calor marinhas e acidificação ameaçam a integridade estrutural e funcional mesmo na presença de respostas adaptativas. Conclui-se que a resiliência não deve ser tratada como propriedade ilimitada, mas como capacidade condicionada por diversidade genética, conectividade, integridade do habitat, disponibilidade de refúgios, intensidade das perturbações e redução de pressões não climáticas. Conservação, restauração e manejo adaptativo podem ampliar a persistência, porém não substituem reduções profundas e rápidas das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; biodiversidade tropical; resiliência ecológica; adaptação; ecossistemas tropicais; conservação.

ABSTRACT

Tropical ecosystems support a major share of global biodiversity and provide essential functions related to climate regulation, carbon storage, hydrological cycles, fisheries productivity and the livelihoods of millions of people. Rising temperatures, intensifying droughts, terrestrial and marine heatwaves, altered precipitation regimes, sea-level rise and changing extreme-event patterns are, however, profoundly affecting the composition, structure and functioning of these systems. This article analyzes climate-change impacts on biodiversity in tropical rainforests and dry forests, montane ecosystems, mangroves and coral reefs, emphasizing adaptive responses, limits to phenotypic plasticity, geographic range shifts, community reorganization, eco-evolutionary processes and the factors controlling resistance and resilience. Methodologically, a qualitative systematized review with narrative synthesis was conducted using assessments from the Intergovernmental Panel on

Climate Change, recent systematic reviews and empirical studies published mainly between 2022 and 2026. Evidence indicates highly heterogeneous biodiversity responses: some species shift their ranges, phenology, physiology or symbiotic associations, whereas others show limited capacity to move or adapt at the pace imposed by environmental change. In tropical forests, warming, drought and fire increase tree mortality, alter species composition and may weaken carbon-sink functions; in tropical mountains, upslope shifts compress available habitat for high-elevation specialists; in mangroves, sea-level rise and altered cyclone regimes interact with constraints on landward migration; and in tropical coral reefs, marine heatwaves and ocean acidification threaten structural and functional integrity despite adaptive responses. Ecological resilience should therefore not be treated as unlimited, but as a capacity conditioned by genetic diversity, connectivity, habitat integrity, refugia availability, disturbance intensity and the reduction of non-climatic pressures. Conservation, restoration and adaptive management may increase persistence, but they cannot substitute for rapid and deep greenhouse-gas emission reductions.

Keywords: Climate change; tropical biodiversity; ecological resilience; adaptation; tropical ecosystems; conservation.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas tropicais ocupam posição singular no sistema terrestre porque concentram diversidade biológica extraordinária e, simultaneamente, desempenham funções ambientais que ultrapassam amplamente seus limites geográficos. Florestas tropicais participam intensamente da circulação de água e energia, influenciam precipitação regional, armazenam grandes estoques de carbono e sustentam comunidades ecológicas de elevada

complexidade; recifes de coral fornecem habitat estrutural para uma fração expressiva da biodiversidade marinha tropical, protegem costas e sustentam atividades pesqueiras e econômicas; manguezais conectam sistemas terrestres, fluviais e marinhos, funcionam como berçários para diferentes espécies, acumulam carbono em sedimentos e atenuam impactos costeiros. Essa importância ecológica torna particularmente preocupante o fato de que os trópicos estão submetidos simultaneamente a mudanças climáticas rápidas e a pressões não climáticas como desmatamento, fragmentação, incêndios de origem antrópica, poluição, sobre-exploração, expansão de infraestrutura e transformação de habitats. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas considera as florestas tropicais entre os principais reservatórios de biodiversidade e biomassa terrestre e destaca que o aquecimento, as secas, as ondas de calor e os incêndios já estão alterando estrutura, composição e capacidade de regeneração desses ecossistemas, enquanto fatores não climáticos ampliam significativamente sua vulnerabilidade (Ometto *et al.*, 2022).

A relação entre clima e biodiversidade tropical apresenta características que dificultam interpretações simplistas. Em ambientes onde a sazonalidade térmica histórica é relativamente limitada, muitas espécies podem estar adaptadas a faixas térmicas estreitas e experimentar condições novas mesmo diante de incrementos de temperatura aparentemente modestos. Ao mesmo tempo, a elevada heterogeneidade microclimática de florestas, montanhas e sistemas costeiros pode produzir refúgios temporários, permitindo que determinadas populações persistam em ambientes menos expostos que aqueles indicados por médias climáticas regionais. A capacidade de responder às mudanças depende, portanto, não apenas da magnitude do aquecimento, mas também

da fisiologia, da história de vida, do potencial de dispersão, das interações com outras espécies, da disponibilidade de habitat e da velocidade com que novas condições se deslocam no espaço. Revisão recente sobre redistribuição de espécies demonstra que mudanças de distribuição constituem uma resposta amplamente documentada ao aquecimento, mas apenas parte das observações segue exatamente a direção prevista pela mudança das isotermas, evidenciando que precipitação, estrutura do habitat, competição, dispersão e outros fatores podem alterar ou retardar as respostas esperadas (Lawlor *et al.*, 2024).

A possibilidade de deslocamento é particularmente importante nos trópicos montanos. Quando o aumento da temperatura desloca condições climáticas adequadas para altitudes maiores, espécies de baixas e médias elevações podem expandir ou mover seus limites, enquanto organismos já restritos a topos de montanha enfrentam progressiva redução da área disponível. O IPCC registra deslocamentos altitudinais já observados na América Central e do Sul e atribui elevada confiança ao processo, destacando contrações de distribuição para espécies de maior altitude e combinações de expansão e contração nas faixas inferiores (IPCC, 2022). A literatura sobre aves tropicais, anfíbios e outros grupos também evidencia que extirpações de topo podem ocorrer quando a velocidade do deslocamento climático supera a capacidade de acompanhar as condições adequadas ou quando fragmentação e diferenças microclimáticas impedem a migração. Esse fenômeno demonstra um dos limites fundamentais da adaptação espacial: mover-se somente é possível quando existem áreas climaticamente apropriadas, rotas de dispersão e tempo suficiente para colonização e estabelecimento.

Em florestas tropicais úmidas, o aumento das temperaturas interage fortemente com disponibilidade de água. Secas prolongadas elevam o déficit de pressão de vapor, reduzem disponibilidade hídrica no solo, aumentam risco de falhas hidráulicas e podem favorecer mortalidade de árvores, especialmente em regiões nas quais eventos extremos se tornam mais frequentes. O IPCC considera que mudanças climáticas já estão alterando composição e estrutura das comunidades arbóreas e reduzindo a capacidade de regeneração em determinadas regiões tropicais. Na Amazônia, por exemplo, a vulnerabilidade não é espacialmente uniforme. Chen *et al.* (2024), combinando sensoriamento remoto e dados de demografia arbórea, demonstraram que diferentes ecótopos florestais respondem de modo contrastante às secas, com padrões de resiliência ou vulnerabilidade associados à profundidade do lençol freático, à fertilidade e às características do solo. Em setores do sul amazônico, florestas sobre lençol mais profundo apresentaram maior vulnerabilidade e mortalidade, enquanto áreas com acesso mais favorável à água exibiram respostas mais resilientes. Esses resultados reforçam que “a floresta amazônica” não deve ser tratada como sistema homogêneo e que avaliações de risco precisam incorporar diferenças edáficas e hidrológicas que modulam a sensibilidade ao clima (Chen *et al.*, 2024).

Os efeitos climáticos sobre florestas tropicais também não ocorrem isoladamente. O desmatamento e a fragmentação modificam temperatura e umidade, aumentam bordas, favorecem entrada de fogo e reduzem conectividade, eliminando parte da capacidade que espécies teriam de deslocar-se ou manter populações geneticamente diversas. No Congo, Beekmann, Gallois e Rondinini (2024) realizaram revisão sistemática de 104 publicações e encontraram evidências de maior vulnerabilidade à extinção,

alterações de distribuição, mudanças corporais e respostas fisiológicas e fenológicas, embora grandes lacunas permaneçam para vários grupos e processos. A síntese destaca de maneira particularmente importante que efeitos climáticos combinados a mudanças de uso do solo tornam as projeções mais preocupantes e reduzem a capacidade adaptativa do sistema. Em outras palavras, a conservação do habitat existente não representa apenas uma ação contra uma ameaça separada do clima; ela preserva a própria infraestrutura ecológica necessária para que espécies respondam ao aquecimento, mantenham fluxo gênico e encontrem refúgios climáticos (Beekmann; Gallois; Rondinini, 2024).

As florestas tropicais secas e outros ecossistemas sazonais apresentam outro conjunto de vulnerabilidades. Muitas espécies já vivem sob períodos pronunciados de déficit hídrico e podem possuir adaptações fisiológicas à seca, o que não significa que tolerarão indefinidamente aumentos de aridez. Em regiões como a Caatinga, projeções indicam mudanças relevantes na composição de comunidades vegetais, com espécies de distribuição restrita especialmente vulneráveis. A literatura recente enfatiza que ecossistemas tropicais secos podem sofrer simplificação florística e substituição de espécies lenhosas especializadas por táxons mais generalistas quando condições climáticas ultrapassam tolerâncias atuais. Além disso, incêndios e mudanças no regime de fogo podem exercer papel cada vez mais importante na determinação da cobertura arbórea em ecossistemas sazonais, especialmente quando atividades humanas aumentam fontes de ignição e conectividade de combustíveis. Análises pantropicais mostram que fogo, precipitação e fatores antropogênicos interagem na organização da cobertura de árvores, demonstrando que o efeito do

clima sobre a biodiversidade precisa ser compreendido juntamente com a transformação das paisagens (van Tiel *et al.*, 2024).

Os ecossistemas costeiros tropicais enfrentam desafios igualmente complexos. Manguezais podem responder ao aumento do nível do mar por acumulação vertical de sedimentos e migração para o interior, mas essa resposta depende de taxas de elevação, disponibilidade sedimentar, topografia e ausência de barreiras urbanas ou agrícolas. Quando estradas, diques, edificações ou usos consolidados impedem o deslocamento terrestre, ocorre compressão costeira e redução potencial da área disponível. O IPCC reconhece que manguezais apresentam vulnerabilidade crescente sob cenários de rápida elevação do nível do mar e que sua persistência depende também das escolhas de ocupação costeira (IPCC, 2022). Revisões recentes reforçam que conservar resiliência de zonas úmidas costeiras exige atuação em múltiplas escalas, combinando redução de pressões locais, conectividade regional e mitigação climática global (He *et al.*, 2025). Além disso, projeções espacialmente explícitas publicadas em 2025 sugerem que alterações nos regimes de ciclones tropicais e na elevação relativa do nível do mar podem expor parcelas substanciais de manguezais a riscos elevados neste século, afetando simultaneamente biodiversidade e serviços ecossistêmicos (Hülsen *et al.*, 2025).

Os recifes de coral constituem talvez o exemplo mais claro de um ecossistema tropical aproximando-se de limites de adaptação. Ondas de calor marinhas aumentaram em frequência, duração e intensidade, provocando eventos de branqueamento e mortalidade em larga escala. O branqueamento ocorre quando o estresse térmico desestabiliza a relação entre corais construtores de recife e seus simbiontes fotossintéticos, reduzindo a disponibilidade

energética e aumentando o risco de mortalidade se o estresse persistir. A acidificação oceânica acrescenta pressão ao alterar a química do carbonato e dificultar processos de calcificação, enquanto poluição, pesca excessiva e doenças podem reduzir ainda mais a capacidade de recuperação. O IPCC classifica os recifes tropicais entre os ecossistemas mais vulneráveis às mudanças climáticas e considera que ondas de calor marinhas podem provocar mudanças de estado e perda de integridade estrutural em níveis relativamente baixos de aquecimento adicional (IPCC, 2022). A revisão sistemática de Klein, Roch e Duarte (2024) mostra, porém, que projeções do futuro dos recifes apresentam elevada incerteza metodológica e que modelos diferem quanto à representação de adaptação, dispersão, dinâmica populacional e respostas ecoevolutivas. Essa incerteza não implica segurança; significa que trajetórias específicas permanecem difíceis de prever dentro de um quadro de risco amplamente elevado (Klein; Roch; Duarte, 2024).

A discussão sobre adaptação biológica exige, portanto, uma distinção clara entre diferentes mecanismos. A **aclimação** corresponde a ajustes fisiológicos ou comportamentais realizados pelo organismo durante sua vida; a **plasticidade fenotípica** permite que o mesmo genótipo produza diferentes fenótipos em condições distintas; a **adaptação evolutiva** envolve alterações genéticas entre gerações por seleção; a **redistribuição** permite que organismos acompanhem geograficamente condições mais favoráveis; e modificações de interações simbióticas podem alterar tolerância sem mudança imediata no genoma do hospedeiro. Todos esses processos podem contribuir para persistência, mas não possuem capacidade ilimitada. A velocidade das mudanças climáticas pode superar o ritmo de adaptação evolutiva, especialmente em organismos de geração longa, enquanto fragmentação pode

impedir deslocamento. Em corais, por exemplo, a evolução assistida tem sido estudada como forma de acelerar aumento da tolerância térmica, porém síntese publicada em 2026 conclui que os ganhos experimentais atuais provavelmente não são suficientes para acompanhar a velocidade projetada do aquecimento sem reduções concomitantes das emissões e outras intervenções (Humanes *et al.*, 2026).

A resiliência ecológica deve ser compreendida nesse contexto como capacidade de absorver perturbações, manter funções ou reorganizar-se sem perder completamente características essenciais, e não como propriedade que garantiria retorno automático a um estado anterior. Sistemas podem ser resistentes e sofrer pouca alteração diante de determinado evento; podem apresentar recuperação após a perturbação; ou podem reorganizar-se em novo estado, mantendo apenas parte das funções anteriores. Em ecossistemas submetidos a pressões crescentes, a frequência dos eventos pode tornar-se mais importante que um episódio isolado, pois o intervalo entre distúrbios pode ser menor que o tempo necessário à recuperação. Recifes expostos repetidamente a ondas de calor, florestas atingidas por secas e incêndios sucessivos ou manguezais submetidos a ciclones mais intensos podem perder gradualmente capacidade regenerativa mesmo quando sobreviveram a eventos anteriores. Portanto, observar recuperação histórica não garante persistência sob regimes futuros de perturbação.

Essa concepção torna a biodiversidade não apenas objeto ameaçado, mas componente da própria resiliência. Diversidade genética pode ampliar a probabilidade de existirem indivíduos com tolerâncias distintas; diversidade funcional pode distribuir processos

ecológicos entre várias espécies; conectividade permite recolonização e fluxo gênico; e heterogeneidade ambiental aumenta a disponibilidade de microrefúgios. Contudo, relações entre diversidade e resiliência são contextuais e não autorizam afirmar que ecossistemas megadiversos seriam automaticamente protegidos do clima. Em alguns casos, grande número de espécies especializadas e de distribuição restrita pode aumentar a quantidade de táxons vulneráveis. O ponto central é que a conservação da diversidade mantém opções biológicas de resposta que são perdidas quando populações, habitats e interações desaparecem.

A presente revisão parte, assim, da seguinte questão norteadora: **como as mudanças climáticas estão afetando a biodiversidade e o funcionamento dos principais ecossistemas tropicais e em que medida respostas fisiológicas, comportamentais, distributivas e evolutivas podem sustentar sua resiliência diante da intensificação do aquecimento e dos eventos extremos?** O objetivo geral é analisar criticamente as evidências contemporâneas sobre impactos climáticos, mecanismos de adaptação e limites de resiliência em ecossistemas tropicais terrestres e costeiro-marinheiros. Especificamente, pretende-se examinar respostas em florestas úmidas e secas, sistemas montanos, manguezais e recifes; discutir redistribuição, plasticidade e adaptação evolutiva; avaliar o papel de conectividade e integridade do habitat; analisar interações entre clima e pressões locais; e discutir estratégias de conservação e manejo capazes de ampliar persistência sem substituir a necessidade de mitigação climática.

2. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido como **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa**, uma opção metodológica adotada em razão da elevada diversidade dos organismos, ecossistemas, escalas e indicadores utilizados para medir os efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade tropical. A literatura inclui dados de mortalidade arbórea, alterações na produtividade, redistribuição altitudinal e latitudinal, mudanças fenológicas, tolerância térmica, branqueamento, cobertura coralínea, diversidade taxonômica, alterações funcionais, dinâmica de carbono, sedimentação de manguezais, respostas genéticas e modelagem de adequabilidade climática. Como esses desfechos não podem ser combinados coerentemente em um único estimador quantitativo, a revisão buscou integrar criticamente resultados provenientes de avaliações globais, revisões sistemáticas, artigos de síntese e estudos empíricos de elevada relevância, preservando as diferenças metodológicas entre eles.

A estratégia bibliográfica foi atualizada até agosto de 2026 e utilizou combinações de termos relacionados a “climate change”, “tropical biodiversity”, “tropical forests”, “Amazon”, “Congo Basin”, “tropical dry forest”, “coral reefs”, “mangroves”, “species range shifts”, “thermal tolerance”, “phenotypic plasticity”, “adaptive capacity”, “ecological resilience”, “evolutionary adaptation”, “marine heatwaves”, “drought” e “climate refugia”. Foram priorizadas revisões sistemáticas e estudos publicados entre 2022 e 2026, preservando-se trabalhos anteriores quando necessários para a compreensão de mecanismos evolutivos ou quando utilizados nas avaliações do IPCC. A análise documental tomou como referência os capítulos temáticos e regionais do Sexto Relatório de Avaliação do Grupo de Trabalho II do IPCC, especialmente as sínteses sobre florestas tropicais, oceanos, hotspots de biodiversidade e América Central e do Sul.

Foram incluídos estudos que apresentassem evidências observacionais ou projeções explicitamente relacionadas ao impacto do clima sobre espécies, comunidades ou processos ecológicos em ambientes tropicais; trabalhos que analisassem mecanismos adaptativos ou fatores de resiliência; e revisões sobre conservação ou manejo diretamente ligadas à persistência sob mudança climática. Foram excluídos do núcleo analítico estudos exclusivamente sobre emissões, clima físico ou serviços ecossistêmicos quando não discutiam consequências para a biodiversidade. Estudos sobre ecossistemas temperados foram utilizados apenas quando ofereciam princípios gerais necessários à interpretação de redistribuição ou adaptação, sendo evitada sua generalização direta para os trópicos.

A síntese foi estruturada em cinco dimensões analíticas. A primeira corresponde às **pressões climáticas**, incluindo aquecimento médio, extremos térmicos, alteração da precipitação, secas, fogo, ondas de calor marinhas, acidificação e elevação do nível do mar. A segunda envolve **respostas biológicas**, como aclimatação, plasticidade, mudanças de fenologia, redistribuição e evolução. A terceira aborda **reorganização ecológica**, isto é, mudanças de composição, interações e funções. A quarta reúne os **determinantes da resiliência**, como conectividade, diversidade genética, refúgios, integridade de habitat e redundância funcional. A quinta dimensão analisa **respostas de conservação**, incluindo proteção, restauração, manejo adaptativo, redução de estressores locais e intervenções assistidas.

Um cuidado metodológico importante foi diferenciar observações de projeções. Estudos de distribuição potencial indicam áreas climaticamente adequadas sob determinados cenários e

pressupostos, mas não demonstram que as espécies efetivamente conseguirão migrar, colonizar e estabelecer populações. Da mesma maneira, modelos ecoevolutivos podem explorar a influência potencial da adaptação, mas dependem de parâmetros genéticos e ecológicos ainda desconhecidos para grande número de espécies. A revisão de Klein, Roch e Duarte (2024) sobre recifes de coral demonstra precisamente como diferentes modelos podem gerar trajetórias diversas a partir de pressupostos distintos sobre tolerância, adaptação e dispersão, razão pela qual as incertezas foram explicitadas e não tratadas como falhas que permitiriam ignorar os riscos.

A análise também procurou distinguir **resistência, recuperação e resiliência**. A primeira refere-se à capacidade de sofrer menor alteração durante a perturbação; a recuperação indica retorno parcial ou total após o evento; e a resiliência, utilizada em sentido mais abrangente, envolve persistência de estrutura, funções ou identidade ecológica diante de mudanças. Essa diferenciação é necessária porque determinada floresta pode apresentar recuperação fotossintética após seca e, ainda assim, sofrer mortalidade seletiva que altera sua composição; da mesma forma, a cobertura coralínea pode aumentar temporariamente sem recuperação integral da diversidade, da complexidade estrutural ou das funções anteriores.

Não foi construído um fluxograma PRISMA fictício. Embora tenham sido empregados critérios explícitos e a base principal de evidências seja composta por revisões sistemáticas e avaliações auditáveis, não foi realizada especificamente para este manuscrito uma exportação integral de registros, deduplicação, dupla triagem e registro individual de exclusões. Por esse motivo, não se apresentam

números inventados de artigos identificados, excluídos ou incluídos. A denominação **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa** reflete com maior precisão o procedimento adotado e preserva a integridade metodológica solicitada.

3. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E REORGANIZAÇÃO DA BIODIVERSIDADE TROPICAL

As respostas ecológicas às mudanças climáticas podem ocorrer em diferentes níveis de organização, desde alterações moleculares e fisiológicas até transformações de comunidades e biomas. Em espécies individuais, mudanças de temperatura ou precipitação alteram balanço energético, metabolismo, disponibilidade de água, reprodução e sobrevivência. Essas alterações propagam-se para níveis superiores porque espécies interagem por predação, competição, mutualismo, polinização, dispersão de sementes, parasitismo e decomposição. Quando dois organismos interdependentes respondem de maneira diferente ao clima, podem surgir desencontros fenológicos ou espaciais capazes de reduzir o sucesso de ambos. Dessa forma, biodiversidade não é simplesmente um inventário de espécies expostas individualmente ao aquecimento, mas uma rede cujos componentes possuem diferentes sensibilidades e velocidades de resposta.

A redistribuição geográfica representa uma das respostas mais documentadas. A revisão de Lawlor *et al.* (2024) demonstra que deslocamentos de distribuição em direção a regiões mais frias ou maiores altitudes são comuns, embora haja grande variabilidade. Segundo a base global analisada pelos autores, a maioria relativa dos deslocamentos documentados segue direções coerentes com o clima, mas parcela substancial apresenta ausência de deslocamento

ou movimento divergente. Entre as explicações estão disponibilidade de habitat, precipitação, microclima, interações bióticas, barreiras geográficas e defasagens demográficas. A implicação para os trópicos é particularmente importante: modelos baseados apenas em temperatura tendem a superestimar a capacidade de espécies acompanharem o clima quando paisagens estão fragmentadas ou quando novos ambientes não oferecem solo, recursos ou parceiros ecológicos necessários (Lawlor *et al.*, 2024).

Em montanhas tropicais, a disponibilidade espacial diminui à medida que se sobe, o que transforma deslocamentos altitudinais em potencial processo de compressão. Organismos de baixa altitude podem encontrar grandes áreas acima, dependendo da topografia, enquanto especialistas dos topos possuem poucas ou nenhuma alternativa. O IPCC registra evidências de deslocamento ascendente de espécies na América Latina e reconhece o risco de contrações progressivas para táxons de altitude elevada. A vulnerabilidade é intensificada quando áreas protegidas foram estabelecidas em faixas fixas e deixam de conter as condições climáticas futuras das espécies que deveriam conservar. Essa mudança exige uma conservação mais dinâmica, capaz de priorizar gradientes altitudinais e corredores que conectem diferentes zonas climáticas, em vez de proteger somente fragmentos estáticos.

A fenologia constitui outro nível de resposta. Mudanças de temperatura e chuva podem antecipar ou atrasar floração, frutificação, reprodução, migração e emergência de insetos. Em ecossistemas tropicais, nos quais ciclos de chuva frequentemente desempenham papel comparável ou maior que a temperatura para sincronizar eventos biológicos, alterações no início ou duração das estações úmidas e secas podem modificar recursos disponíveis para

animais. A revisão da biodiversidade do Congo identifica justamente fenologia e mudanças de disponibilidade de frutos entre áreas ainda insuficientemente investigadas, apesar da possibilidade de efeitos em cascata sobre primatas, aves, mamíferos e dispersores (Beekmann; Gallois; Rondinini, 2024). A lacuna é relevante porque projeções concentradas em distribuição geográfica podem deixar de capturar alterações ecológicas importantes que ocorrem antes de qualquer extinção local.

As mudanças climáticas também podem reorganizar a composição de comunidades sem necessariamente produzir perda imediata do número total de espécies. Espécies termófilas, tolerantes à seca ou generalistas podem aumentar enquanto espécies sensíveis diminuem, resultando em substituição funcional. Em escala de floresta, isso pode significar maior predominância de árvores de crescimento lento ou rápido, espécies com diferentes densidades de madeira, capacidades hidráulicas e estratégias reprodutivas. Essas mudanças são importantes porque o funcionamento de um ecossistema depende não apenas de quantas espécies permanecem, mas das características das espécies que passam a dominar. O IPCC aponta que o clima já está alterando a composição de comunidades arbóreas tropicais e que determinadas regiões podem caminhar para formações mais secas e de menor biomassa quando aquecimento, secas, fogo e desmatamento interagem (Ometto *et al.*, 2022).

A pesquisa global sobre árvores reforça essa diferenciação entre biomas. Van Tiel *et al.* (2024), ao analisar ocupação de mais de dez mil espécies arbóreas e simular efeitos de perda florestal e mudança climática, encontraram respostas regionais distintas e maior perda projetada de espécies em determinados biomas, incluindo florestas

tropicais secas. Os resultados demonstram que conservação e restauração precisam respeitar a singularidade composicional regional, evitando propostas de regeneração que utilizem conjuntos genéricos de espécies. Restaurar apenas cobertura arbórea pode aumentar biomassa sem recuperar diversidade funcional e taxonômica compatível com o ecossistema nativo, especialmente se a seleção de espécies não considerar tolerâncias futuras e história biogeográfica (van Tiel *et al.*, 2024).

4. FLORESTAS TROPICAIS: SECAS, INCÊNDIOS, MORTALIDADE E CAPACIDADE ADAPTATIVA

As florestas tropicais úmidas possuem ampla capacidade de reciclar água e armazenar carbono, mas essa capacidade depende da integridade da cobertura, da disponibilidade hídrica e do funcionamento fisiológico das árvores. Temperaturas mais altas aumentam a demanda atmosférica por água e podem intensificar estresse mesmo quando a precipitação não diminui drasticamente. Quando secas prolongadas reduzem a água no solo, árvores precisam restringir a abertura estomática para evitar perda excessiva, diminuindo simultaneamente a absorção de carbono. Se o estresse ultrapassa determinados limites, falhas hidráulicas e esgotamento de reservas podem aumentar mortalidade. Esses processos são influenciados pela profundidade radicular, pela arquitetura hidráulica e pelas características do solo, o que ajuda a explicar a heterogeneidade encontrada entre regiões.

A Amazônia oferece um exemplo particularmente bem documentado. Chen *et al.* (2024) demonstraram que diferentes combinações de lençol freático, textura e fertilidade do solo ajudam a prever por que algumas áreas mostram maior “verdeamento”

durante secas moderadas, enquanto outras apresentam redução fotossintética e mortalidade. A presença de água acessível em profundidade pode amortecer estresse em determinadas regiões, mas essa proteção não é universal e pode ser insuficiente sob secas extremas ou prolongadas. A principal implicação é que resiliência observada durante um evento não deve ser projetada indefinidamente para condições mais severas. A resposta depende do regime de perturbação e do estoque de recursos que permite recuperação (Chen *et al.*, 2024).

O fogo amplia significativamente esse risco. Florestas tropicais úmidas não são adaptadas a incêndios frequentes no mesmo grau que muitos ecossistemas savânicos, e queimadas podem abrir o dossel, aumentar entrada de radiação, secar combustíveis e favorecer novos incêndios. Surge, assim, um mecanismo de retroalimentação entre degradação, fogo e clima. O aquecimento e secas aumentam a inflamabilidade; o fogo reduz cobertura e umidade; áreas degradadas tornam-se mais vulneráveis ao próximo evento. O IPCC considera a redução do desmatamento e da degradação essencial à resiliência climática porque perturbações locais amplificam os efeitos do clima. A preservação de florestas intactas oferece maior estabilidade microclimática, conectividade e disponibilidade de refúgios do que paisagens altamente fragmentadas (Ometto *et al.*, 2022).

A possibilidade de transições de estado em partes da Amazônia é motivo de preocupação, mas deve ser comunicada com precisão. O conceito de “tipping point” descreve a possibilidade de mudanças não lineares em que interações entre desmatamento, redução de precipitação, fogo e aquecimento levem determinadas regiões a uma vegetação mais aberta e de menor biomassa. O IPCC atribui

níveis distintos de confiança a diferentes projeções e reconhece elevada incerteza sobre limiares exatos, ao mesmo tempo em que considera plausível a transformação ecológica em regiões especialmente pressionadas. Portanto, não é cientificamente adequado apresentar um único percentual de desmatamento ou temperatura como ponto universal e inevitável, mas é igualmente incorreto tratar a incerteza como ausência de risco. O manejo prudente deve reduzir os fatores que aumentam a probabilidade de transição antes que o limite seja conhecido com precisão.

O Congo apresenta um contraste importante porque sua dinâmica de carbono e seu regime climático diferem da Amazônia. A revisão de Beekmann, Gallois e Rondinini (2024) mostra que o conhecimento sobre biodiversidade e clima na região ainda é muito menos desenvolvido, apesar da importância global do sistema. Essa desigualdade científica gera uma forma adicional de vulnerabilidade: decisões precisam ser tomadas diante de grande incerteza e de monitoramento insuficiente. O fato de haver menos evidências de colapso não significa necessariamente menor risco, podendo refletir menor disponibilidade de séries temporais e dados de campo. Os autores defendem maior atenção a dinâmica populacional, genética, fenologia e mudanças na disponibilidade de recursos, áreas fundamentais para compreender a resiliência real das comunidades (Beekmann; Gallois; Rondinini, 2024).

As interações com microrganismos são outra dimensão frequentemente negligenciada. O microbioma florestal participa de decomposição, ciclagem de nutrientes, relações simbióticas e saúde vegetal. Baldrian, López-Mondéjar e Kohout (2023) destacam que secas podem alterar comunidades microbianas, favorecer patógenos e interferir na capacidade de solos e florestas

armazenarem carbono. Embora parte da evidência seja mais robusta em florestas temperadas, o papel das interações planta-fungo e planta-bactéria também é relevante nos trópicos. A adaptação de árvores ao clima pode depender, portanto, não somente do genótipo do hospedeiro, mas de associações ecológicas que também respondem ao aquecimento e à umidade.

As florestas tropicais secas enfrentam desafio distinto porque o déficit hídrico faz parte de sua ecologia, mas mudanças na aridez podem ultrapassar o envelope histórico. Em sistemas como a Caatinga, plantas possuem estratégias de tolerância à seca, deciduidade e armazenamento, porém muitas espécies de distribuição restrita podem ter pouca margem climática adicional. Modelagens recentes sugerem perda potencial de adequabilidade para grande número de espécies e reorganização das comunidades, com risco de homogeneização funcional. Isso evidencia a diferença entre **ser adaptado à seca** e **ser adaptável a um regime climático novo**. Um organismo especializado em determinado padrão sazonal pode ser vulnerável quando duração, intensidade ou imprevisibilidade da seca se alteram além da variabilidade histórica.

5. ECOSSISTEMAS COSTEIROS TROPICAIS: MANGUEZAIS, ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR E RESILIÊNCIA

Manguezais ocupam uma faixa ambiental extremamente dinâmica, submetida a marés, salinidade, sedimentação, tempestades e variações de água doce. Essa exposição histórica a perturbações confere adaptações especiais, mas não garante resiliência a qualquer mudança. A elevação acelerada do nível do mar pode ultrapassar a capacidade de acumulação vertical de sedimentos em determinados locais, enquanto ciclones mais intensos podem

provocar mortalidade, erosão e mudanças estruturais. Ao mesmo tempo, a migração terrestre pode permitir persistência se existirem áreas adequadas e se a ocupação humana não bloquear o deslocamento.

A revisão de He *et al.* (2025) argumenta que a resiliência de zonas úmidas costeiras depende da combinação de ações locais, regionais e globais. Reduzir poluição, restaurar fluxos sedimentares e permitir espaço para migração pode aumentar a capacidade local de resposta, mas não controla a velocidade da elevação do nível do mar associada ao aquecimento global. A conclusão é particularmente importante porque demonstra os limites da adaptação baseada em ecossistemas: ações de conservação aumentam probabilidade de persistência, mas perdem eficácia progressivamente se o forçamento climático continuar crescendo (He *et al.*, 2025).

Hülsen *et al.* (2025) modelaram riscos combinados associados a ciclones e elevação relativa do nível do mar e identificaram exposição relevante de áreas de manguezal e de seus serviços. Embora os percentuais variem entre cenários e dependam das hipóteses do modelo, o resultado central é robusto conceitualmente: mudanças no regime de distúrbio podem alterar não apenas a frequência com que manguezais são atingidos, mas também o tempo de recuperação disponível entre eventos. Se a regeneração de uma floresta de mangue exige anos ou décadas e os eventos severos se tornam mais frequentes, a condição anterior pode não ser recuperada antes da próxima perturbação. A resiliência, portanto, depende tanto da intensidade quanto da periodicidade do estresse (Hülsen *et al.*, 2025).

A biodiversidade dos manguezais é frequentemente subestimada quando o sistema é analisado somente por sua cobertura arbórea ou capacidade de armazenar carbono. Lovelock *et al.* (2025) enfatizam que a biodiversidade sustenta funções e serviços e inclui não apenas árvores, mas peixes, crustáceos, aves, invertebrados, microrganismos e interações ecológicas. Uma área restaurada com poucas espécies arbóreas pode recuperar parte da cobertura e do carbono sem restabelecer integralmente a complexidade funcional do sistema. Essa distinção é essencial para políticas de restauração climática, que não devem utilizar apenas hectares reflorestados ou carbono acumulado como indicadores de sucesso (Lovelock *et al.*, 2025).

O monitoramento remoto ampliou significativamente a capacidade de acompanhar mudanças de cobertura e estrutura em manguezais, especialmente em regiões de difícil acesso. Sunkur *et al.* (2024) demonstram a crescente aplicação de sensoriamento remoto à avaliação de vulnerabilidade e resiliência, permitindo identificar perdas, expansão e fragmentação em escalas regionais. Contudo, imagens não substituem integralmente dados de campo, pois composição de espécies, regeneração, saúde fisiológica e diversidade faunística podem mudar antes de alterações perceptíveis na cobertura. A combinação de observação orbital, levantamentos locais e participação comunitária oferece, portanto, estratégia mais adequada para manejo adaptativo.

6. RECIFES DE CORAL: AQUECIMENTO OCEÂNICO, ADAPTAÇÃO E LIMITES DE RESILIÊNCIA

Os recifes de coral apresentam elevada sensibilidade às mudanças térmicas porque a relação entre os corais construtores de recife e

seus simbiossintéticos funciona dentro de uma faixa ambiental relativamente estreita. Durante ondas de calor marinhas, a ruptura dessa associação leva ao branqueamento, e episódios prolongados ou repetidos podem causar mortalidade. Em escalas locais, recuperação pode ocorrer por crescimento de colônias sobreviventes e recrutamento de novos indivíduos, mas o aumento da frequência das ondas de calor reduz o intervalo disponível entre eventos. O IPCC destaca que muitos sistemas recifais estão em alto risco ainda em cenários de menor aquecimento e que a perda de complexidade estrutural pode ocorrer antes da extinção completa das espécies, reduzindo abrigo, produção pesqueira e proteção costeira (IPCC, 2022).

Uma questão importante é até que ponto processos adaptativos podem alterar essas projeções. Corais exibem variação genética em tolerância térmica, podem modificar comunidades simbióticas e apresentar aclimatação a determinadas condições. Modelos ecoevolutivos incorporam cada vez mais essas possibilidades, e a revisão de Klein, Roch e Duarte (2024) mostra que estudos que incluem adaptação e dispersão podem produzir trajetórias diferentes de modelos baseados apenas em limiares térmicos fixos. Entretanto, os autores também demonstram que dados sobre parâmetros genéticos, adaptação e dinâmica populacional são insuficientes para grande parte das espécies e localidades. Isso significa que há razão científica para incluir capacidade adaptativa nas projeções, mas não para assumir que ela será suficiente (Klein; Roch; Duarte, 2024).

A evolução assistida procura aumentar deliberadamente essa capacidade por seleção de genótipos tolerantes, condicionamento, manipulação simbiótica ou outros métodos. Humanes *et al.* (2026)

revisam avanços e propõem um roteiro para acelerar pesquisas, mas concluem que os ganhos de tolerância obtidos experimentalmente ainda tendem a ficar atrás da velocidade projetada de aquecimento em muitos cenários. Esse resultado ilustra um princípio aplicável a outros sistemas: intervenção biotecnológica pode ampliar margem de resposta, porém não elimina o problema da taxa de mudança ambiental. Quanto mais rápido o clima se desloca, maior o esforço necessário para manter populações dentro de suas tolerâncias (Humanes *et al.*, 2026).

Duarte *et al.* (2025) defendem uma estratégia de conservação em camadas, combinando redução de estressores locais, proteção espacial, recuperação de processos ecológicos, restauração, aumento de resistência térmica e mitigação global. A proposta é importante porque supera a falsa escolha entre “proteger localmente” e “reduzir emissões”. Controle de poluição e pesca pode aumentar a condição dos recifes e sua recuperação, mas não impede ondas de calor marinhas; redução de emissões diminui o forçamento climático, mas sistemas já degradados também precisam de manejo local. A resiliência emerge justamente da combinação dessas ações, ainda que nenhuma delas garanta preservação integral em cenários de aquecimento elevado (Duarte *et al.*, 2025).

A redistribuição de corais para latitudes mais elevadas constitui uma possível resposta, mas não equivale à simples migração do ecossistema completo. Novas áreas podem permitir estabelecimento de determinadas espécies, enquanto outras interações, substratos e condições químicas diferem dos recifes tropicais originais. Como resultado, podem surgir ecossistemas novos, com composição e serviços distintos. O fato de algumas

espécies sobreviverem em novas regiões não significa que a complexidade funcional perdida nos trópicos seja automaticamente recriada. Esse ponto demonstra a diferença entre persistência de linhagens e resiliência do ecossistema.

7. RESPOSTAS ADAPTATIVAS: PLASTICIDADE, EVOLUÇÃO, DISPERSÃO E REFÚGIOS

A plasticidade fenotípica constitui uma das primeiras linhas de resposta ao clima porque permite ajustes dentro da própria vida do organismo. Plantas podem alterar abertura estomática, área foliar ou alocação de biomassa; animais podem modificar horários de atividade, uso de microhabitat ou comportamento de termorregulação; corais podem alterar associações simbióticas. Essas respostas podem reduzir impactos imediatos e comprar tempo para mudanças populacionais ou evolutivas. Entretanto, a plasticidade possui custos e limites. Ajustes que aumentam tolerância a calor podem reduzir crescimento ou reprodução, e uma resposta adequada a um nível de estresse pode tornar-se insuficiente quando o ambiente continua mudando.

A evolução adaptativa requer diversidade genética e reprodução ao longo de gerações. Espécies com populações grandes, elevada diversidade e ciclos curtos podem responder mais rapidamente, enquanto organismos longevos e fragmentados enfrentam maiores dificuldades. Além disso, a seleção atua apenas sobre variação existente ou novas mutações e pode ser limitada por correlações entre características. Não existe garantia de que uma população possua, na frequência necessária, genótipos capazes de tolerar condições futuras. Em conservação, preservar diversidade genética e conectividade é, portanto, uma forma de manter potencial evolutivo.

A dispersão pode ser igualmente importante, permitindo que espécies acompanhem seu envelope climático. Entretanto, paisagens tropicais transformadas por agricultura, cidades, barragens e estradas impõem barreiras. A revisão de Lawlor *et al.* (2024) demonstra que habitat disponível e conectividade condicionam fortemente os deslocamentos observados, e áreas protegidas conectadas podem facilitar expansão de distribuição. Corredores ecológicos devem, portanto, ser avaliados não somente em função da conectividade atual, mas também de gradientes climáticos futuros.

Microrefúgios oferecem outra estratégia natural. Dosséis fechados, vales úmidos, encostas sombreadas, profundidade de solo e heterogeneidade topográfica podem produzir temperaturas e umidades diferentes das médias regionais. Preservar esses locais pode aumentar persistência de populações enquanto o clima circundante se torna inadequado. Contudo, refúgios não são permanentes se o aquecimento continuar indefinidamente, e populações pequenas isoladas podem sofrer erosão genética. Devem ser tratados como elementos de uma rede de conservação, não como solução autossuficiente.

8. RESILIÊNCIA ECOLÓGICA, PRESSÕES MÚLTIPLAS E ESTRATÉGIAS DE CONSERVAÇÃO

Uma das principais convergências da literatura é que a resiliência climática dos ecossistemas tropicais depende fortemente da redução de pressões não climáticas. Uma floresta intacta tende a manter microclima, conectividade e ciclos hídricos melhores que um fragmento degradado; um recife com menor poluição e pesca excessiva dispõe de maior capacidade de recuperação; um

manguezal com espaço para migração responde melhor à elevação do nível do mar do que aquele confinado por urbanização. Essa relação torna conservação e mitigação climática complementares. Reduzir emissões limita a intensidade do forçamento, enquanto conservar habitat aumenta a capacidade biológica de responder ao forçamento que já ocorre.

Áreas protegidas continuam essenciais, mas precisam ser planejadas em sistemas conectados e climaticamente informados. A proteção de um local cuja condição climática mudará profundamente pode continuar relevante para habitat ou serviços, mas não garante permanência de todas as espécies atuais. Redes que abrangem gradientes altitudinais, latitudinais e hidrológicos oferecem maior flexibilidade para redistribuição. No ambiente marinho, proteger conjuntos de recifes conectados pode favorecer dispersão de larvas e fluxo gênico; em montanhas, corredores altitudinais podem facilitar deslocamento; em florestas, reconectar fragmentos reduz isolamento.

A restauração deve igualmente incorporar o clima futuro. Utilizar apenas espécies historicamente dominantes sem considerar tolerância a secas, fogo ou temperaturas futuras pode produzir sistemas pouco persistentes. Entretanto, a introdução indiscriminada de espécies consideradas “resistentes” pode descaracterizar ecossistemas e produzir riscos de invasão. A restauração climática exige equilíbrio entre diversidade nativa, variabilidade genética, projeções ambientais e aprendizagem adaptativa.

O manejo adaptativo torna-se essencial porque incerteza é inevitável. O IPCC defende monitoramento e revisão contínua de

estratégias de conservação diante de mudanças ecológicas. Isso implica estabelecer indicadores, testar intervenções, acompanhar resultados e modificar ações quando as condições se alteram. Em vez de pressupor que um plano criado hoje permanecerá adequado por décadas, a gestão reconhece que o sistema e o conhecimento científico continuarão mudando (IPCC, 2022).

Também é necessário reconhecer limites. O próprio IPCC afirma que adaptação de conservação pode reduzir danos, mas não eliminar todos os riscos para a biodiversidade, especialmente em ecossistemas que se aproximam de limiares críticos. Recifes de coral são o exemplo mais claro, mas determinados segmentos de florestas, manguezais e ecossistemas montanos também podem perder condições necessárias à persistência. Essa conclusão impede que soluções locais sejam utilizadas como argumento para adiar a mitigação global.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese das evidências permite identificar como resultado central que os impactos climáticos sobre a biodiversidade tropical já não podem ser tratados apenas como projeções futuras. Mudanças de distribuição, alterações de composição, mortalidade relacionada a secas, branqueamento de corais e transformações costeiras estão documentadas em diferentes regiões. O grau de atribuição varia entre fenômenos e locais, mas o conjunto das evidências indica influência crescente do aquecimento antropogênico sobre estrutura e funcionamento dos ecossistemas. O IPCC classifica com alta ou muito alta confiança vários desses processos, incluindo alteração de florestas tropicais por aquecimento e extremos, deslocamentos de

distribuição e mortalidade associada a ondas de calor marinhas (IPCC, 2022).

Um segundo resultado é que as respostas adaptativas apresentam capacidade real, porém heterogênea. Plasticidade, redistribuição e evolução não são hipóteses abstratas; há evidências de que organismos ajustam fisiologia, comportamento, fenologia e distribuição. Entretanto, a literatura recente rejeita a visão de que espécies acompanharão passivamente o clima. Os deslocamentos são frequentemente menores ou diferentes daqueles esperados, e barreiras ecológicas e humanas limitam movimentos. Adaptação evolutiva pode ocorrer, mas sua velocidade e amplitude variam. A análise dos recifes evidencia de modo particularmente forte que reconhecer potencial adaptativo não equivale a assumir sucesso diante de aquecimento continuado (Lawlor *et al.*, 2024; Humanes *et al.*, 2026).

O terceiro resultado consiste na importância das condições locais para determinar vulnerabilidade. Chen *et al.* (2024) mostram que solos e lençol freático modulam respostas amazônicas à seca; manguezais dependem da disponibilidade de sedimentos e espaço para migração; corais variam em tolerância e exposição; espécies montanas respondem conforme topografia e conectividade. Consequentemente, análises climáticas em resolução grosseira podem ocultar diferenças críticas. A conservação precisa integrar macroclima e microclima, além de características fisiográficas e biológicas.

O quarto resultado é que perdas de biodiversidade podem ocorrer por reorganização antes de extinção. A substituição de espécies sensíveis por generalistas, mudanças de dominância e desencontros

entre interações podem reduzir funções mesmo quando riqueza total parece relativamente estável. Essa constatação exige ampliar indicadores de monitoramento, incorporando composição, abundância, diversidade funcional e interações, e não apenas presença ou ausência.

O quinto resultado é que a fragmentação reduz fortemente as opções adaptativas. Deslocamento exige conectividade; evolução requer populações suficientemente grandes; recolonização depende de fontes próximas; e microrefúgios precisam permanecer inseridos em paisagens funcionais. A interação entre clima e uso do solo aparece repetidamente nas revisões da Amazônia, do Congo e da biodiversidade florestal global. A manutenção de grandes áreas intactas e a reconexão de fragmentos são, portanto, componentes de adaptação climática, não apenas de conservação tradicional (Beekmann; Gallois; Rondinini, 2024; van Tiel *et al.*, 2024).

O sexto resultado é a existência de fortes desigualdades de conhecimento. Longas séries temporais e pesquisas mecanísticas concentram-se em determinados locais, enquanto partes da África, Ásia e América tropical permanecem submonitoradas. Essa lacuna produz incerteza justamente em áreas de elevada diversidade. O IPCC reconhece viés geográfico na evidência de impactos, especialmente em sistemas marinhos tropicais, e a revisão do Congo confirma o problema em ambientes terrestres. Ampliar monitoramento local e a participação de instituições dos países tropicais é, portanto, prioridade científica e de conservação.

O sétimo resultado refere-se à importância dos eventos extremos. Médias de temperatura são fundamentais, mas ondas de calor, secas e ciclones podem provocar mortalidade aguda e ultrapassar

rapidamente limites fisiológicos. Organismos podem tolerar aumento gradual da média e ainda sofrer colapso durante um evento extremo. O aumento da frequência reduz o tempo de recuperação e pode transformar perturbações historicamente episódicas em novos regimes ambientais.

O oitavo resultado é que resiliência depende da escala temporal considerada. Um ecossistema pode recuperar biomassa rapidamente e perder composição original; pode retornar após uma seca e acumular mortalidade após eventos sucessivos; ou pode manter espécies e perder serviços. Avaliações precisam declarar qual componente está sendo chamado de “resiliente”, evitando utilizar o termo de forma genérica.

O nono resultado indica que restauração e intervenções assistidas podem ampliar capacidade adaptativa, mas não substituem mitigação. A revisão dos corais exemplifica esse limite, assim como o IPCC alerta que conservação e restauração são insuficientes diante de níveis crescentes de aquecimento. As estratégias devem ser complementares e implementadas simultaneamente.

O décimo resultado consiste em reconhecer que a trajetória futura será determinada por processos ecológicos e decisões humanas. A intensidade do aquecimento depende das emissões; fragmentação, pesca, poluição e ocupação costeira são influenciadas por políticas; conectividade pode ser restaurada; pressões locais podem ser reduzidas. Biodiversidade não responde, portanto, a um destino climático completamente externo à sociedade, mas a um conjunto de condições parcialmente moldado por escolhas de desenvolvimento.

10. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A principal limitação desta revisão decorre da própria amplitude do termo “ecossistemas tropicais”. Florestas amazônicas, florestas secas, recifes, manguezais e montanhas possuem mecanismos ecológicos muito distintos, de modo que a comparação é útil para identificar princípios gerais, mas não substitui revisões especializadas. A segunda limitação está relacionada às diferenças entre dados observacionais e projeções. Modelos de distribuição, vegetação ou recifes dependem de cenários e parâmetros que podem produzir resultados diferentes, razão pela qual projeções foram interpretadas como riscos condicionais e não como previsões determinísticas.

Outra limitação consiste no viés geográfico e taxonômico da literatura. Vertebrados, árvores e corais recebem atenção maior que microrganismos, invertebrados e diversos grupos vegetais, enquanto regiões com infraestrutura de pesquisa consolidada concentram monitoramento de longo prazo. A revisão do Congo e os capítulos do IPCC demonstram que essa deficiência é particularmente importante nos trópicos.

A terminologia relacionada à adaptação também pode produzir ambiguidades. Plasticidade, aclimatação, adaptação evolutiva e resiliência são por vezes utilizadas de maneiras distintas entre estudos. Este artigo procurou diferenciá-las conceitualmente, mas a comparação entre pesquisas permanece limitada quando os autores adotam definições diferentes.

Por fim, não foi executado um protocolo PRISMA integral com exportação e deduplicação de todas as bases especificamente para este manuscrito. Por essa razão, não foram apresentados números

fictícios de registros ou exclusões. A revisão utiliza evidências sistematicamente selecionadas e prioriza sínteses auditáveis, mas é descrita, de forma deliberadamente precisa, como **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa**.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise integrada das evidências demonstra que as mudanças climáticas já constituem força relevante de reorganização da biodiversidade tropical e que seus efeitos se manifestam em níveis que vão da fisiologia individual à estrutura de ecossistemas inteiros. O aumento das temperaturas, as alterações nos regimes de precipitação, as secas prolongadas, a intensificação de ondas de calor terrestres e marinhas e a elevação do nível do mar não produzem uma resposta única, mas desencadeiam combinações de mortalidade, deslocamento geográfico, mudanças fenológicas, reorganização de comunidades e alterações funcionais. Em florestas tropicais, essa heterogeneidade aparece nas respostas contrastantes à seca e na diferente vulnerabilidade de espécies e regiões; em montanhas, manifesta-se por deslocamentos altitudinais que favorecem determinadas espécies e comprimem o espaço disponível para especialistas de topo; em manguezais, a capacidade de acompanhar a elevação do nível do mar depende de sedimentação e espaço para migração; e nos recifes de coral, tolerância térmica e adaptação variam entre espécies e populações, mas não eliminam o risco associado a ondas de calor mais frequentes. O principal significado ecológico dessa diversidade de respostas é que o futuro dos ecossistemas tropicais não será determinado apenas pela sobrevivência ou extinção de espécies isoladas. A composição das comunidades e a forma como as espécies interagem podem mudar muito antes de ocorrer uma

perda extrema de riqueza, produzindo ecossistemas diferentes em estrutura, produtividade e prestação de serviços. A conservação precisa, portanto, deslocar parte de sua atenção de inventários estáticos para processos de reorganização, monitorando abundância, interações, funções, diversidade genética e mudança espacial das populações.

As evidências também mostram que respostas adaptativas existem e precisam ser incorporadas às projeções, mas não justificam uma visão excessivamente otimista sobre a capacidade espontânea da natureza de acompanhar o aquecimento. Aclimatação, plasticidade fenotípica, mudanças comportamentais, dispersão e evolução podem reduzir vulnerabilidade em determinadas populações, porém cada mecanismo apresenta limites próprios. A plasticidade pode envolver compromissos energéticos e perder eficácia quando condições ultrapassam a faixa em que foi evolutivamente moldada; deslocamentos geográficos são impossíveis quando habitats adequados deixam de existir ou permanecem separados por paisagens fragmentadas; e a adaptação genética exige diversidade, tamanho populacional e número suficiente de gerações para que a seleção produza mudanças relevantes. O caso dos recifes de coral demonstra de maneira particularmente clara essa tensão, pois modelos que incorporam adaptação e dispersão geram cenários menos uniformemente negativos do que projeções baseadas em limiares térmicos fixos, mas as intervenções de evolução assistida avaliadas até o momento ainda não oferecem base para concluir que acompanharão indefinidamente a velocidade do aquecimento. A interpretação mais consistente é que a capacidade adaptativa representa uma margem de manobra biologicamente valiosa que deve ser preservada e ampliada, não uma garantia de persistência. A gestão deve favorecer condições que mantenham essa margem,

especialmente diversidade genética, conectividade, populações suficientemente grandes e redução de estressores adicionais.

A integridade das paisagens aparece, nesse contexto, como um dos fatores mais decisivos da resiliência tropical. Mudança climática e perda de habitat não atuam como ameaças independentes que poderiam ser tratadas em políticas separadas, pois a degradação modifica diretamente a capacidade de resposta ao clima. Florestas fragmentadas perdem estabilidade microclimática e ficam mais expostas ao fogo, populações pequenas possuem menor diversidade genética e maior risco demográfico, barreiras humanas dificultam deslocamentos e áreas costeiras ocupadas impedem migração de manguezais. A revisão do Congo e as evidências da Amazônia reforçam que as projeções se tornam mais severas quando mudanças de uso do solo são combinadas ao aquecimento. Dessa forma, reduzir desmatamento, recuperar conectividade e proteger grandes áreas intactas devem ser entendidos como medidas de adaptação climática da biodiversidade, e não somente como políticas clássicas de conservação. Essa mudança de interpretação possui consequências práticas para o desenho de unidades de conservação, que precisam considerar gradientes altitudinais, rotas potenciais de deslocamento e refúgios climáticos. Áreas protegidas permanecem fundamentais, mas sua eficácia futura dependerá de estarem conectadas a uma matriz territorial que permita movimento e fluxo gênico. Uma rede de conservação climaticamente inteligente precisa preservar simultaneamente locais atuais de alta diversidade, áreas que podem funcionar como refúgios e trajetórias por onde organismos possam acompanhar mudanças ambientais.

Os resultados referentes às florestas tropicais demonstram igualmente que resiliência não pode ser inferida a partir de uma única resposta de curto prazo. Uma floresta que permanece verde durante determinada seca pode estar utilizando acesso profundo à água e, ainda assim, tornar-se vulnerável diante de um evento mais prolongado; uma área que recupera produtividade pode ter perdido árvores grandes ou espécies sensíveis, alterando sua composição e estoque de carbono; e uma floresta que historicamente resistiu a fogo raro pode entrar em ciclo de degradação quando incêndios se tornam repetitivos. Esse entendimento é especialmente importante para o debate sobre pontos críticos na Amazônia. A ciência ainda não define com precisão um limiar único e universal a partir do qual ocorrerá uma transformação abrupta, mas a combinação entre desmatamento, aumento da estação seca, aquecimento, fogo e degradação aumenta claramente o risco de mudanças estruturais em determinadas regiões. A incerteza sobre o ponto exato deveria reforçar a prudência, e não justificar inação. Em sistemas complexos, esperar a identificação perfeita de um limite antes de reduzir as pressões pode ser incompatível com a própria natureza dos processos não lineares. A estratégia mais racional consiste em reduzir os fatores que aproximam o sistema desses limites, especialmente desmatamento e fogo, ao mesmo tempo em que se amplia monitoramento hidrológico, fisiológico e demográfico para identificar sinais de perda de resiliência antes que transformações extensas se consolidem.

Nos ecossistemas costeiros, a mesma lógica exige integrar espaço físico e mudança climática. Manguezais possuem capacidade natural de responder à dinâmica costeira por sedimentação, regeneração e migração, mas essa capacidade depende de condições que o planejamento humano frequentemente restringe.

Urbanização, estradas, diques e outras formas de ocupação podem bloquear a expansão para o interior, produzindo compressão diante da elevação do mar. Portanto, conservar manguezais no século XXI envolve não apenas impedir corte de árvores existentes, mas proteger espaço de acomodação futura, recuperar fluxos sedimentares e manter conectividade com sistemas fluviais e costeiros. Além disso, a avaliação de sucesso deve ir além da área de cobertura arbórea e incorporar biodiversidade, estrutura e funcionamento, pois ecossistemas aparentemente restaurados podem recuperar biomassa sem recuperar toda a complexidade de interações e serviços. A intensificação potencial de ciclones e outros eventos extremos acrescenta a necessidade de planejar a recuperação entre perturbações, considerando que o tempo disponível pode diminuir. O conceito de resiliência costeira torna-se, portanto, profundamente espacial e temporal: não basta sobreviver ao próximo evento, sendo necessário manter condições de regeneração ao longo de um regime de distúrbio que pode mudar de forma persistente.

Os recifes tropicais representam o limite mais severo para uma narrativa de adaptação baseada apenas em manejo local. Reduzir poluição, pesca excessiva e danos físicos melhora a condição dos recifes e pode favorecer recuperação após eventos de branqueamento, enquanto redes de áreas protegidas e restauração podem manter populações e funções. Entretanto, ondas de calor marinhas são produzidas por um forçamento global que não pode ser controlado por ações de manejo no local. A literatura revisada indica que adaptação, dispersão e intervenções assistidas podem aumentar tolerância ou alterar trajetórias, mas não oferecem uma substituição para a mitigação climática. A estratégia mais defensável é a utilização simultânea de várias camadas de ação: redução rápida

das emissões, diminuição de estressores locais, proteção de diversidade genética, conectividade entre recifes, recuperação de processos ecológicos e pesquisa de intervenções capazes de aumentar tolerância sem gerar riscos ecológicos desproporcionais. Essa combinação reconhece tanto a urgência quanto a incerteza. Também exige abandonar expectativas irreais de restaurar exatamente a composição histórica em todos os lugares, pois parte dos sistemas poderá reorganizar-se sob novas condições. O objetivo da conservação pode precisar combinar preservação do que ainda pode persistir, manutenção de funções essenciais e gestão de novos ecossistemas sem naturalizar perdas evitáveis.

Outro ponto central é que a qualidade da evidência permanece desigual entre regiões, organismos e processos. A biodiversidade tropical é extraordinariamente rica, mas grande parte dela é pouco descrita e monitorada, e alguns dos ecossistemas mais relevantes encontram-se em países com menor infraestrutura científica. A revisão da Bacia do Congo mostra como uma região de importância planetária ainda possui lacunas substanciais sobre dinâmica populacional, genética e fenologia, enquanto o IPCC destaca menor disponibilidade de séries temporais tropicais em comparação com sistemas temperados. Essa desigualdade limita previsões e pode favorecer políticas baseadas em extrapolações inadequadas. Fortalecer a resiliência exige, portanto, fortalecer também a capacidade científica local, incluindo redes de monitoramento de longo prazo, coleções biológicas, sensoriamento remoto integrado a dados de campo, ciência comunitária e participação de povos indígenas e comunidades locais. Conhecimentos ecológicos locais podem identificar mudanças de distribuição, sazonalidade e abundância que não aparecem rapidamente em bases globais. Integrar diferentes sistemas de conhecimento, com critérios

metodológicos transparentes e reconhecimento de direitos, pode ampliar a capacidade de detectar mudanças precocemente e construir estratégias adaptadas aos territórios.

A conservação e a restauração precisam também ser redesenhadas para um ambiente em mudança. Restaurar um ecossistema segundo uma fotografia histórica fixa pode tornar-se insuficiente quando as condições climáticas que produziram aquela composição estão se deslocando. Isso não significa abandonar a referência ecológica ou substituir ecossistemas nativos por combinações arbitrárias de espécies consideradas resistentes, mas incorporar cenários futuros ao planejamento, priorizando diversidade genética, heterogeneidade estrutural, conectividade e funções essenciais. Em determinados casos, procedências genéticas de populações mais tolerantes poderão ser consideradas experimentalmente; em outros, a principal ação será proteger populações locais e seus refúgios. O manejo adaptativo oferece uma estrutura mais adequada que planos rígidos, porque permite testar intervenções, monitorar respostas e revisar decisões. A capacidade de aprender durante a implementação será especialmente importante quando as projeções permanecerem incertas. Essa flexibilidade, porém, precisa estar ancorada em objetivos claros, evitando que a expressão “adaptação” seja utilizada para legitimar qualquer transformação do ecossistema.

Por fim, a principal conclusão desta revisão é que a resiliência da biodiversidade tropical não pode ser separada da trajetória global de aquecimento. Ecossistemas podem ser tornados mais resistentes e adaptáveis por meio da conservação, restauração, conectividade e manejo, mas essas medidas operam dentro de limites biofísicos. À medida que temperaturas e extremos aumentam, a quantidade de

sistemas capazes de permanecer dentro de suas faixas funcionais diminui e o custo de intervenção cresce, enquanto alguns danos tornam-se irreversíveis. O IPCC é explícito ao afirmar que adaptação de conservação não consegue eliminar todos os riscos e que ecossistemas como recifes de coral, manguezais e determinadas florestas enfrentam limites crescentes sob níveis maiores de aquecimento. Portanto, políticas de biodiversidade e políticas climáticas precisam deixar de funcionar como agendas paralelas. Reduzir emissões preserva o espaço climático dentro do qual a conservação pode funcionar; conservar biodiversidade mantém estoques de carbono, regulação hidrológica e outras funções que ajudam a moderar o próprio clima. Essa relação de dependência mútua deve orientar decisões contemporâneas: proteger a biodiversidade tropical significa simultaneamente reduzir pressões locais, restaurar processos ecológicos e limitar o aquecimento global com a maior rapidez possível. A capacidade adaptativa desses ecossistemas é real, mas não ilimitada; preservá-la exige agir antes que a velocidade da mudança ambiental transforme resiliência em reorganização irreversível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDRIAN, Petr; LÓPEZ-MONDÉJAR, Rubén; KOHOUT, Petr. Forest microbiome and global change. *Nature Reviews Microbiology*, v. 21, p. 487-501, 2023. DOI: 10.1038/s41579-023-00876-4.

BEEKMANN, Milena; GALLOIS, Sandrine; RONDININI, Carlo. Uncertain future for Congo Basin biodiversity: a systematic review of climate change impacts. *Biological Conservation*, v. 297, art. 110730, 2024. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110730.

CHEN, Shuli et al. Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. *Nature*, v. 631, p. 111-117, 2024. DOI: 10.1038/s41586-024-07568-w.

DUARTE, Carlos M. et al. Layering solutions to conserve tropical coral reefs in crisis. *Nature Reviews Biodiversity*, v. 1, p. 788-805, 2025. DOI: 10.1038/s44358-025-00106-0.

HE, Qiang et al. Coastal wetland resilience through local, regional and global conservation. *Nature Reviews Biodiversity*, v. 1, p. 50-67, 2025. DOI: 10.1038/s44358-024-00004-x.

HÜLSEN, Sarah et al. Mangroves and their services are at risk from tropical cyclones and sea level rise under climate change. *Communications Earth & Environment*, v. 6, art. 262, 2025.

HUMANES, Adriana et al. Accelerating coral assisted evolution to keep pace with climate change. *Nature Reviews Biodiversity*, 2026. DOI: 10.1038/s44358-026-00147-z.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Central and South America. In: PÖRTNER, Hans-Otto et al. (ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Oceans and coastal ecosystems and their services. In: PÖRTNER, Hans-Otto et al. (ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KLEIN, Shannon G.; ROCH, Cassandra; DUARTE, Carlos M. Systematic review of the uncertainty of coral reef futures under climate change.

Nature Communications, v. 15, art. 2224, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-46255-2.

LAWLOR, Jake A. et al. Mechanisms, detection and impacts of species redistributions under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 5, p. 351-368, 2024. DOI: 10.1038/s43017-024-00527-z.

LOVELOCK, Catherine E. et al. Mangrove biodiversity and ecosystem services. *Nature Reviews Biodiversity*, v. 1, p. 772-787, 2025. DOI: 10.1038/s44358-025-00103-3.

OMETTO, Jean P. et al. Cross-Chapter Paper 7: Tropical Forests. In: PÖRTNER, Hans-Otto et al. (ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 2369-2410. DOI: 10.1017/9781009325844.024.

SUNKUR, Reshma et al. Mangrove mapping and monitoring using remote sensing techniques towards climate change resilience. *Scientific Reports*, v. 14, art. 6949, 2024.

VAN TIEL, Nina et al. Regional uniqueness of tree species composition and response to forest loss and climate change. *Nature Communications*, v. 15, art. 4375, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-48276-3.

¹ Doutoranda e Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Mestre Profissional em Agricultura de Precisão pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Especialista em Cultura da Soja e

Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI), Especialista em Agricultura de Precisão, em Fertilidade e Manejo de Solos e em Fitotecnia pela Faculdade Iguaçu, em Educação do Campo e Agroecologia pelo Instituto Federal Farroupilha (IFFAR), em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UniRedentor e MBA em Planejamento e Gestão Estratégica pelo Instituto Brasileiro de Pós-Graduação e Extensão (IBPEX). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Pós-Doutor em Demografia pela Universidad Nacional de Córdoba (UNC - Argentina), Doutor em Agroecologia pela Universidad de Antioquia (UdeA) e Docente da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS) e do PPGDAS/Unifap. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Graduada em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Mestre em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT) pelo Instituto Federal do Maranhão (IFMA), Especialista em Gestão do Trabalho Pedagógico e em Geografia Ambiental pela Faculdade Iguaçu, e em Docência do Ensino em Geografia e em Docência Jurídica pela Faculdade UniBF, e Graduado em Direito pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), em Geografia pelo Centro Universitário ETEP e em Educação Física pelo Centro Universitário Cidade Verde. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1034591609565143>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Especialista em Desenvolvimento Sustentável na Amazônia pela Faculdade Salesiana Dom Bosco e em Coordenação Pedagógica pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), e Licenciada e Bacharela em Ciências Biológicas pelo Centro Universitário Nilton Lins. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7575-425X>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5902393801516240>.

⁷ Mestre em Ensino de Biologia pela Uniff (Flórida - EUA) e Licenciado em Biologia pela Faculdade de Educação da Serra (FASE). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Doutor em Administração pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Graduado em Administração pela Universidade Vale do Rio Verde (UninCor). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁹ Mestrando em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e Graduado em Gestão Pública, História e Pedagogia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹⁰ Mestra em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Neuropsicopedagoga Clínica e Institucional e Graduada em Pedagogia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

¹¹ Doutor e Mestre em Ciências e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Pará (UFPA) e Graduado em Matemática e em Pedagogia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)