



(Foto: Jordana Ferreira. Reprodução)

Anfíbios e répteis são a classe de vertebrados mais ameaçada pelos efeitos das mudanças climáticas

O futuro distópico já chegou para a herpetofauna amazônica... e agora?

Aceleração das mudanças climáticas pelas ações humanas afetam todas as formas de vida, mas alguns grupos são considerados mais vulneráveis, como os anfíbios e os répteis

* Fernanda P. Werneck

** Jordana G. Ferreira

*** Felipe Zanusso

Resumo

O ano de 2023 foi marcado pela ocorrência de eventos climáticos extremos que impactaram diversas regiões do Brasil e do mundo. Na Amazônia, a ocorrência da mais intensa seca histórica dos últimos 120 anos evidenciou que a maior floresta tropical do mundo e sua megabiodiversidade já sofrem os impactos das mudanças climáticas. Assim como para as populações humanas, a biodiversidade também é afetada de diferentes formas, sendo que alguns grupos são considerados mais vulneráveis aos impactos. Neste artigo, apresentamos como as pesquisas em Biologia das Mudanças Climáticas

buscam compreender os mecanismos envolvidos nas respostas e os impactos diretos e indiretos das mudanças climáticas nas diversas espécies e populações naturais. Apresentamos alguns resultados obtidos pela comunidade científica para a herpetofauna, que compreende os anfíbios e répteis, e são considerados um dos organismos mais suscetíveis aos impactos por serem animais que dependem das condições ambientais para regular suas temperaturas corporais. Em especial, destacamos como os estudos integrativos do Laboratório de Ecologia e Evolução de Vertebrados do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia têm contribuído para a compreensão das múltiplas dimensões do conhecimento quanto aos impactos das mudanças climáticas para a herpetofauna amazônica. Ao final, apresentamos algumas perspectivas futuras para esse campo de pesquisa e a necessidade urgente de adoção de medidas de conservação, mitigação e adaptação baseadas na biodiversidade e, em especial, na herpetofauna amazônica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Amazônia; Anfíbios; Répteis; Biodiversidade; Biologia.

Ano 2023: emergências climáticas e a crise da sociobiodiversidade na Amazônia

A Amazônia, berço e museu dos mais diversos níveis de diversidade biológica, há pouco considerada por muitos como uma das últimas regiões de florestas conservadas e contínuas e possivelmente fonte de resiliência futura de biodiversidade e serviços ecossistêmicos para todo o

planeta, gritou por socorro em 2023 (Figura 1). As temperaturas extremas e a seca histórica dos rios do ano, aliadas às queimadas florestais, produziram cenas distópicas dos impactos diretos das emergências climáticas para a biodiversidade e populações que vivem em seus territórios indígenas, ribeirinhos, rurais e urbanos. Se restava alguma dúvida, ilusão ou mesmo uma inocência otimista quanto à real extensão dos desafios e estresses ambientais que o aquecimento global e eventos climáticos extremos impulsionados

pela ação humana colocam sobre a sobrevivência de organismos da Amazônia, essa foi pulverizada com as imagens de animais mortos nas águas rasas escaldantes dos rios, pessoas e organismos sem fonte de água para beber e ar puro para respirar em inúmeras regiões da Amazônia brasileira. Mas como chegamos aqui e o que pesquisas de biologia sobre mudanças climáticas podem nos informar quanto aos impactos sobre espécies e populações naturais de diversos organismos? Há ainda algo que possamos fazer para mitigar os impactos negativos em prol da conservação da sociobiodiversidade amazônica?

Nos últimos 200 anos, a temperatura média do planeta aumentou 1°C e isso trouxe muitas mudanças na paisagem e desafios para a vida de muitas plantas e animais. Segundo o relatório divulgado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), é inequívoca a influência humana em esquentar rapidamente a atmosfera através da emissão de gases do efeito estufa, sendo irreversível se ações imediatas não forem implementadas para reverter o cenário [1].



(Foto: Jordana Ferreira. Reprodução)

Figura 1. Floresta amazônica, às margens do Rio Manicoré, Amazonas, Brasil.

Temperaturas mais quentes, eventos climáticos extremos mais frequentes e imprevisíveis (como calor e frio extremos, chuvas intensas, mudanças no nível dos oceanos e nos padrões de cheia, seca e vazante dos rios) colocam em risco os ecossistemas, as espécies da biodiversidade e a própria sobrevivência da humanidade. Ainda que exista atualmente um crescente consenso na comunidade científica que as mudanças climáticas são uma gravíssima emergência, tanto para a biodiversidade e ecossistemas naturais quanto para a sociedade humana [1,2], os seus impactos são sabidamente desiguais, tanto para as populações humanas (grupos mais vulneráveis como pessoas de baixa renda, mulheres, crianças, negros, indígenas, imigrantes, pessoas com deficiência serão mais impactados), quanto para as espécies da biota (algumas espécies, porções de suas distribuições e regiões geográficas podem ser mais vulneráveis ou possuir maiores ou diferentes potenciais adaptativos de lidar com os desafios). Portanto, entender quais são os mecanismos e processos que conferem vulnerabilidade ou resiliência às espécies é uma questão científica urgente e altamente necessária para a produção de estratégias de conservação aprimoradas e justas frente à complexidade de fatores envolvidos nas respostas da biodiversidade e meios de subsistência dos povos que dependem dessas espécies.

As estimativas recentes dos cientistas quanto ao número de espécies que a Amazônia abriga são impressionantes: cerca de 50.000 plantas

vasculares, pelo menos 2.406 peixes na Bacia Amazônica, 427 anfíbios, 371 répteis, 1.300 aves e 425 mamíferos, números ainda nitidamente subestimados [3]. Apesar da sua importância, a biodiversidade vem sofrendo graves ameaças. Diversos fatores, como a degradação e perda de *habitats* (ocasionados principalmente pelo desmatamento), têm colocado em risco as mais diversas espécies e todos os valores e benefícios que a natureza possui e pode proporcionar. E as mudanças climáticas atuam de maneira sinérgica a esses fatores: seus efeitos combinados ao da perda de *habitat* estão

“Temperaturas mais quentes, eventos climáticos extremos mais frequentes e imprevisíveis (como calor e frio extremos, chuvas intensas, mudanças no nível dos oceanos e nos padrões de cheia, seca e vazante dos rios) colocam em risco os ecossistemas, as espécies da biodiversidade e a própria sobrevivência da humanidade.”

entre os principais determinantes da atual crise mundial de perda da biodiversidade [2,4]. Em decorrência da crise da biodiversidade, as atuais taxas de extinção são muito elevadas: 25% das espécies são hoje consideradas ameaçadas e mais de 1 milhão estão sob risco iminente de extinção [2,5]. A crise é tão grande que se acredita que a biodiversidade esteja passando pelo sexto evento de extinção em massa, só que dessa vez causado por ação humana [4]. Nesse contexto, a América Latina e o Caribe são regiões que vêm experimentando declínios mais acentuados nas populações animais desde 1970.

Na Amazônia, a megadiversidade biológica originada e diversificada ao longo de milhões de anos de história de evolução da paisagem, flutuações climáticas e estabelecimento de gradientes ambientais e ecológicos se vê agora enfrentando uma dinâmica de alteração ambiental causada por ação humana muito mais intensa e rápida do que aquela em que evoluiu [6]. Assim, na Amazônia, os múltiplos impactos dessas mudanças são cada vez mais frequentes e facilmente observáveis. Por exemplo, a partir de registros do nível do rio Negro realizados em Manaus desde 1902, pesquisadores verificaram que, no início do século XX, cheias acima da cota de emergência (29 metros) e secas extremas ocorriam somente a cada 20 anos [7]. No entanto, mais recentemente, cheias intensificadas têm sido registradas a cada quatro anos e secas podem acontecer em intervalos tão curtos quanto dois anos. As maiores cheias do Rio

Negro em Manaus ocorreram a partir de 2008. Em 2021, por exemplo, o nível do Rio Negro em Manaus alcançou os 30,02 metros, sendo a maior cheia de sua história desde o início dos registros. Do mesmo modo, surpreendendo as expectativas, foi registrada seca histórica no ano de 2023, quando o rio Negro atingiu 12,70 metros em 26 de outubro de 2023, em meio a um cenário desolador de emergência climática na Amazônia, ocasionada por efeitos acumulados do fenômeno *El Niño* e das mudanças climáticas globais. Em outubro de 2023, a qualidade do ar de Manaus foi considerada umas das piores do mundo.

Os impactos atingiram também a biodiversidade da região. Como exemplo, centenas de mamíferos aquáticos (como botos e tucuxis) foram encontrados mortos em virtude do baixo nível dos rios e da temperatura da água, que alcançou 40 °C, como registrado no Lago Tefé, pelo Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá. Igualmente, foram observados diversos eventos de alta mortalidade de peixes, jacarés e inviabilidade de ovos de quelônios nas praias.

Esses impactos diretos são bastante chocantes, mas não são os únicos que podem afetar os organismos. Na verdade, diversos impactos indiretos, por exemplo, sobre o fenótipo (morfologia, comportamento, fisiologia) e condição genética dos organismos (por exemplo, diversidade genética total e adaptativa sob seleção ambiental) podem afetar suas dinâmicas populacionais e sobrevivência diferencial e assim ter repercussão sobre os riscos

de extinção de populações locais e sobrevivência das espécies.

Herpetofauna: anfíbios e répteis no centro do debate

As temperaturas ambientais são essenciais para diversos aspectos da vida animal, influenciando a alimentação, reprodução e sobrevivência dos organismos. Isso é verdade em especial para animais ectotérmicos que, apesar de conseguirem controlar comportamentalmente suas temperaturas corpóreas movendo-se entre sol e sombra, dependem diretamente das condições ambientais para manter suas temperaturas internas dentro dos limites considerados adequados para a sobrevivência. Justamente por essa forte dependência de condições ambientais locais, organismos ectotérmicos são bastante suscetíveis às alterações climáticas. Assim, pode-se dizer que apesar da aceleração das mudanças climáticas afetarem todas as formas de vida, alguns grupos são considerados mais vulneráveis, como os anfíbios e os répteis (coletivamente conhecidos como herpetofauna) [8].

A Amazônia abriga uma das maiores diversidades de espécies de anfíbios e répteis em comparação a outras localidades do mundo [9, 10] (Figura 2). Estudos recentes mostram ainda que existem muitas espécies de anfíbios e répteis a serem descobertas no bioma, e que o Brasil é o país com maior chance de descoberta de novas espécies desses grupos no mundo todo [11].

Levantamentos globais indicam que os anfíbios e os répteis estão entre as espécies e a América do Sul entre as regiões com maiores riscos estimados de extinção causada pelas mudanças climáticas [8]. No entanto, ainda existem relativamente poucos estudos que abordem a vulnerabilidade dessas espécies às alterações climáticas, menos ainda estudos integrativos sobre os diversos aspectos envolvidos nas respostas das espécies e suas chances de lidar com condições climáticas estressantes do Antropoceno. Felizmente, ao longo dos últimos anos, diversos cientistas e grupos de pesquisa têm atuado incessantemente para incrementar o conhecimento quanto aos possíveis impactos e possíveis respostas das mais diversas espécies de anfíbios e répteis às mudanças climáticas, tanto globalmente quanto no Brasil e na Amazônia em específico, dentre os quais está incluído o Laboratório de Ecologia e Evolução de Vertebrados do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (LEEVI).

Pesquisas integrativas e a biologia das mudanças climáticas

O campo da Biologia das Mudanças Climáticas busca compreender os mecanismos envolvidos nas respostas e os impactos diretos e indiretos das mudanças climáticas nas diversas espécies e populações naturais. Essa ciência também visa entender quais são os principais fatores biológicos e ambientais que conferem vulnerabilidade às espécies, seja aumentando



(Foto: Jordana Ferreira. Reprodução)

Figura 2. Répteis e anfíbios são grupos particularmente vulneráveis às mudanças climáticas. Como exemplo da diversidade de espécies amazônicas, temos: a) lagarto *Kentropyx pelviceps*, comumente conhecido como calango ou chicote-da-floresta; e b) sapo *Rhinella gr. margaritifera*, conhecido popularmente como sapo-folha.

seus riscos de extinção ou conferindo a elas potenciais adaptativos para escapar dos efeitos negativos das mudanças climáticas [12].

Compreender as respostas das espécies às mudanças climáticas e à perda de *habitats* é extremamente importante para a conservação da biodiversidade a longo prazo.

“Compreender as respostas das espécies às mudanças climáticas e à perda de *habitats* é extremamente importante para a conservação da biodiversidade a longo prazo.”

A complexidade de processos envolvidos demanda que as pesquisas integrem diferentes fontes de informações, métodos e abordagens para a melhor compreensão dos fenômenos [13]. Essas pesquisas são conhecidas como integrativas e podem, por exemplo, incorporar informações sobre fisiologia, genética, plasticidade e adaptações locais, para entender as possíveis respostas da biodiversidade às mudanças climáticas [14-16].

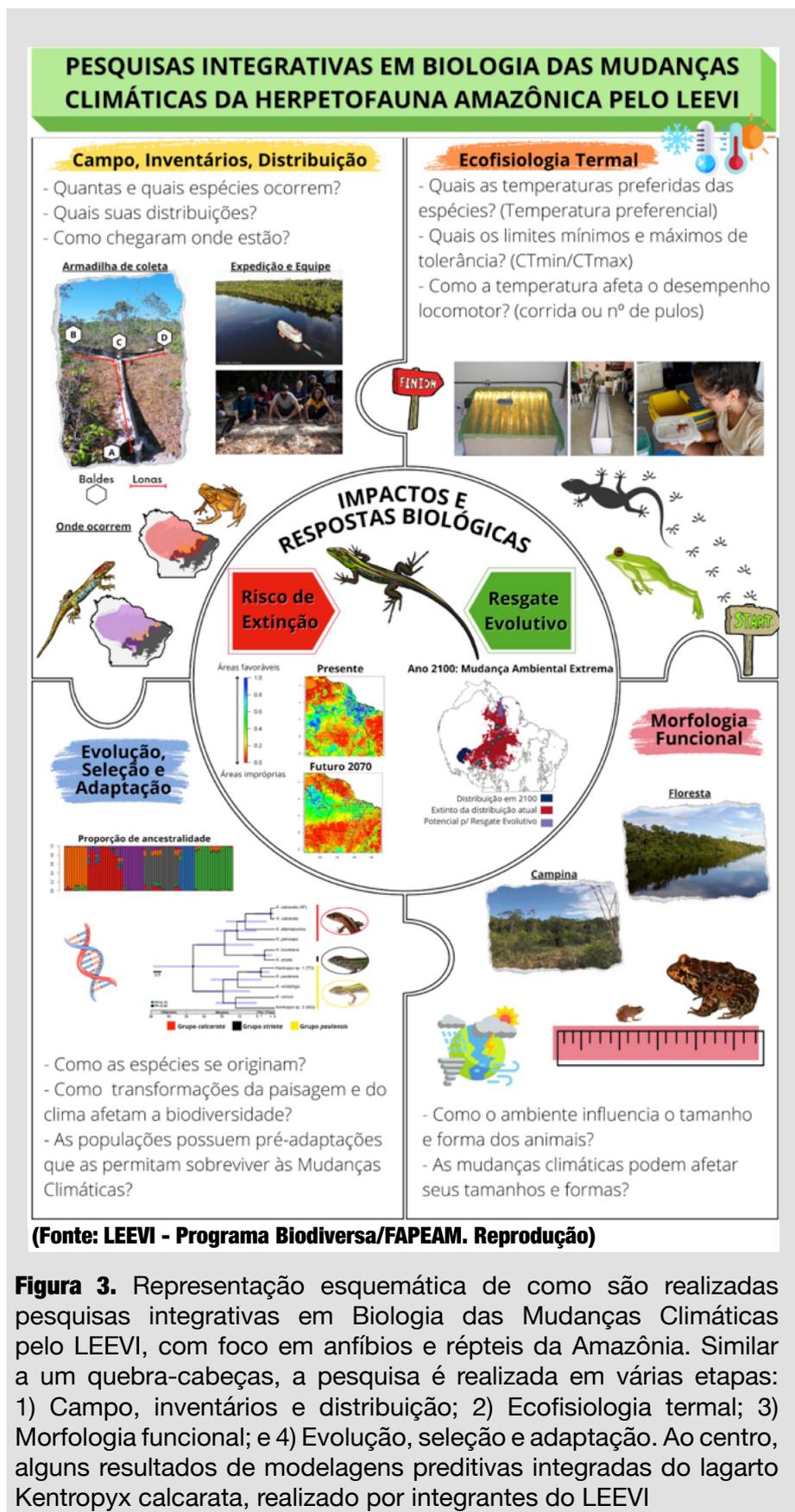
Por meio de pesquisas ecológicas e evolutivas integrativas, o LEEVI se dedica a estudar os impactos de mudanças climáticas e ambientais históricas e contemporâneas sobre espécies e comunidades biológicas da herpetofauna da Amazônia e zonas de transição, além de possíveis ações para mitigar os riscos de extinção de espécies e promover a conservação dessa enorme diversidade biológica (Figura 3).

As pesquisas utilizam diversas abordagens de coleta, análise e interpretação de dados biológicos e socioambientais. Na maioria das situações, as respostas dos organismos aos ambientes em mudanças são complexas, exigindo a formulação de boas e refinadas perguntas, identificação dos locais adequados para os estudos, coleta de dados em diferentes contextos (campo, laboratório, fisiologia, molecular etc.) e, principalmente, a integração entre abordagens complementares.

Essa integração entre diferentes campos dos saberes fornece estimativas biologicamente mais realistas sobre os padrões de diversificação, vulnerabilidade e sobre quais espécies e/ou regiões geográficas possuem maior potencial adaptativo de superar condições estressantes, fundamentais para prever modelos mais confiáveis quanto às respostas dos organismos às mudanças ambientais e elaborar recomendações para a conservação da sociobiodiversidade. Veja a seguir alguns exemplos de pesquisas desenvolvidas:

• **Ecológicas e evolutivas:**

são aquelas em que inventários da sociobiodiversidade indicam as espécies de anfíbios e répteis que ocorrem em uma determinada área (incluindo as remotas e/ou as de interesse de integração com comunidades humanas), assim como são coletadas amostras biológicas e dados sobre a ecologia das mesmas. Essas pesquisas contribuem para a caracterização dos níveis de diversidade biológica de uma região, seus usos e interações humanas, além da coleta e caracterização



para a compreensão das relações entre os organismos e o meio em que vivem. Por exemplo: por meio do uso de dados de fisiologia termal e hídrica das espécies (como as temperaturas preferenciais, limites críticos mínimos e máximos, desempenho locomotor em incrementos de temperaturas) para quantificar a sensibilidade funcional e assim estimar vulnerabilidade e riscos de extinção;

• **Coleções biológicas:** utilizam os acervos das coleções científicas como repositórios (ou bibliotecas) de testemunhos da biodiversidade amostrados em condições naturais em um determinado local e tempo. Esse material é depositado em acervos *ex-situ* de coleções científicas biológicas e museus de história natural, verdadeiros patrimônios da nossa biodiversidade. Por exemplo, pesquisas com base em exemplares de coleções científicas permitem identificar e descrever novas espécies, identificar infecções virais ou até mesmo observar o acúmulo de poluentes e os impactos das mudanças climáticas na morfologia (como o tamanho e forma do corpo e membros) dos organismos ao longo de séries históricas. Para saber mais sobre as coleções biológicas do INPA, visite o Portal de Coleções do INPA;

• **Genômica populacional e genética da conservação:** utilizam tecnologias de ponta para realizar sequenciamento genético do DNA dos

do conhecimento ecológico e evolutivos sobre as diversas espécies existentes;

• **Funcionais:** são aquelas baseadas em experimentação,

para obtenção de dados de atributos fisiológicos, fenotípicos e comportamentais, parâmetros que contribuem

organismos (pequenas porções ou mesmo o genoma completo) para investigar diversos aspectos quanto à influência do ambiente em gerar padrões de diversidade genética e em selecionar padrões de diversificação, especiação e adaptação das populações naturais e espécies. Por exemplo, é possível inferir métricas que representam importantes aspectos da saúde e sobrevivência dos organismos em condições naturais, como diversidade genética, nível de heterozigosidade, tamanhos populacionais, fluxo gênico e conectividade de populações e diversidade genômica sob seleção ambiental e climática;

• **Modelagens preditivas:** usam estatísticas obtidas pelas demais linhas de pesquisa (por exemplo: parâmetros ecológicos, fisiológicos, evolutivos) para prever resultados quanto às distribuições e respostas das espécies em cenários climáticos futuros. Existirão espécies 'ganhadoras' e 'perdedoras' na corrida contra as mudanças climáticas? A integração das diferentes fontes de informação busca responder essas perguntas: quais espécies serão mais ou menos impactadas, seus principais atributos biológicos, quais terão suas distribuições retraídas, expandidas e quais experimentarão maiores riscos de extinção local? Esses modelos preditivos podem apoiar a formulação de estratégias de conservação aperfeiçoadas para mitigar

impactos negativos na biodiversidade. Na maioria das vezes, o resultado que se deseja prever está no futuro e não pode ser afirmado com certeza. Assim, a modelagem preditiva pode ser aplicada para aumentar a confiança e acurácia em políticas públicas baseadas em dados científicos, mesmo para eventos ainda desconhecidos;

• **Educação ambiental e popularização científica:** as interconexões entre as crises da emergência climática e da perda de espécies ainda são pouco conhecidas pela população como um todo [17]. Assim, educação ambiental e divulgação científica junto à sociedade e aos tomadores de decisão são urgentes para popularizar o conhecimento gerado e aumentar a consciência pública quanto à importância de ações para mitigar essas crises para a biodiversidade e as gerações futuras. Além disso, as visões das comunidades e atores locais, protagonistas e detentores do conhecimento e da valorização da biodiversidade, devem ser incorporadas na elaboração de perguntas e desenvolvimento das pesquisas. Por exemplo, análises de discurso e ações de extensão e popularização desenvolvidas junto a comunidades tradicionais ribeirinhas e indígenas são essenciais. Afinal, são essas pessoas que mantêm a floresta em pé e contribuem para a sensibilização e disseminação quanto às

emergências climáticas e seus impactos na biodiversidade.

Principais resultados para a herpetofauna amazônica

Os resultados obtidos pela comunidade científica para a herpetofauna, em geral, e pelos estudos ecoevolutivos do LEEVI têm contribuído para a compreensão das múltiplas dimensões do conhecimento quanto aos impactos das mudanças climáticas para a herpetofauna amazônica.

Os impactos das mudanças climáticas na herpetofauna são diversos e podem ser tanto diretos quanto indiretos [18], mas os principais são aqueles que causam a redução de suas populações, o que pode levar esses animais à extinção local e mesmo à extinção da espécie como um todo. Por exemplo, revisões do tipo metanálises em amplas escalas geográficas (global) e evolutivas (grandes grupos taxonômicos) encontraram que mais de 65% dos estudos avaliados reportaram efeitos das mudanças climáticas em espécies de anfíbios e répteis, sendo que em metade desses foram encontrados declínios populacionais ou reduções das amplitudes de distribuição [19]. No entanto, o estudo mostra vieses quanto à geografia (maioria dos estudos foram conduzidos na Europa e na América do Norte), taxonomia (só 1% das espécies da América do Sul foram estudadas quando o levantamento foi feito) e questões de pesquisa (por exemplo: falta de inclusão de hipóteses alternativas além

do efeito climático; métodos usados), dificultando conclusões globais [19]. Isso tem reforçado a necessidade de mais estudos em escala regional focados em espécies de regiões complexas, megadiversas e negligenciadas pelo campo da biologia das mudanças climáticas, como a Amazônia.

Em se tratando de lagartos, os efeitos das mudanças climáticas podem ser negativos (por exemplo, levar à perda de área de distribuição e/ou a extinção local), positivos (por exemplo, causar expansão da área de distribuição) ou neutros para espécies em todo o mundo [20] e podem acabar permitindo que espécies melhor adaptadas (ou pré-adaptadas) a condições de calor e de *habitats* abertos possam invadir florestas e afetar a dinâmica das comunidades biológicas [21] e mesmo levar a processos de substituição e/ou savanização herpetofaunística. Modelagens preditivas globais com base em dados de ecofisiologia termal de várias famílias de lagartos estimaram que 4% das populações de lagartos do mundo já foram extintas devido ao aquecimento global e que as taxas de extinção local podem chegar a 39% até 2080 [22]. Lagartos de regiões tropicais são considerados especialmente vulneráveis ao aquecimento global, pois experimentam temperaturas ambientais que já estão próximas ou mesmo excedem suas temperaturas ideais e desempenho máximo quando comparados a espécies de zonas temperadas [21,23]. Assim, estudos locais e regionais

são necessários para avaliar a dinâmica de espécies de regiões de áreas de transição, como entre *habitats* abertos e florestas.

Além disso, alguns répteis, como os quelônios continentais e marinhos, parecem ser particularmente vulneráveis às mudanças climáticas devido a características de história de vida como capacidades de dispersão limitadas e determinação sexual dependente de temperatura [24]. Nos quelônios, que são animais de casco como tartarugas e jabutis, a temperatura é responsável pela determinação sexual ao longo do desenvolvimento, ou seja, por definir se um animal será macho ou fêmea. Em geral, baixas temperaturas produzem machos, enquanto altas temperaturas produzem fêmeas ou temperaturas extremas (altas ou baixas) resultam em fêmeas, enquanto temperaturas médias resultam em machos [24]. Logo, mudanças da temperatura do ambiente onde estão os ninhos com ovos incubados podem fazer com que nasçam mais indivíduos de um mesmo sexo em determinadas populações, tornando desproporcional a razão sexual (que é a proporção entre machos e fêmeas), causando um desequilíbrio e o declínio dessa população. Além disso, estudos indicam que a exposição prolongada dos ninhos a temperaturas extremamente altas produzem mais filhotes com anormalidades do que ninhos expostos por períodos mais curtos, assim como a sobrevivência dos filhotes diminui com o aumento da temperatura de

incubação [25, 26]. Ou seja, além de determinar o sexo, a temperatura também pode aumentar o número de filhotes com anormalidades, o que pode ter impacto negativo na sobrevivência e reprodução das próximas gerações, assim como influenciar a taxa de mortalidade. Em quelônios amazônicos, espera-se que incrementos da temperatura impactem a dinâmica das populações, concomitantemente a ameaças históricas da caça predatória para comércio desses animais para o consumo. Assim, estudos mais aprofundados sobre a relação entre a condição termal do ambiente natural e para cenários futuros, assim como estudos de aspectos da biologia e sobrevivência de quelônios são essenciais para a conservação dessas espécies. As práticas de manejo conservacionista usadas pelas comunidades tradicionais são fundamentais e podem auxiliar pesquisas nessas abordagens, as quais estão em desenvolvimento no âmbito de projetos do LEEVI e laboratórios colaboradores (Iniciativa Amazônia+10 e CNPq).

Segundo a Lista Vermelha da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais das espécies ameaçadas, também conhecida como Lista Vermelha da IUCN (em inglês, *IUCN Red List*), anfíbios são a classe de vertebrados mais ameaçada (40,7% das espécies estão globalmente ameaçadas), sendo que os efeitos continuados e previstos das mudanças climáticas são motivo de preocupação crescente, provocando 39%

das deteriorações do status de conservação desde 2004, seguidas pela perda de *habitat* (37%) [27]. Mudanças climáticas também estão associadas ao aumento de doenças e condições propensas a redução do tempo de vida dos anfíbios, como, por exemplo, nas taxas de infecção de anfíbios por fungos BD (*Batrachochytrium dendrobatidis*), também conhecido como quitrídio, considerado um importante responsável pelo declínio em massa e em escala mundial dos anfíbios [28].

Quanto aos estudos em escala regional focados na herpetofauna da Amazônia e zonas de transição, como o ecótono Amazônia-Cerrado, as pesquisas do LEEVI e grupos de pesquisa colaboradores indicam que muitas espécies e populações de anfíbios e répteis amazônicos são sensíveis aos efeitos do aquecimento global e correm sérios riscos de extinção local. Esse resultado foi encontrado para diversas espécies da herpetofauna com ecologias distintas e usando diferentes abordagens de modelagem preditiva com base em (i) dados de ocorrência e modelos correlativos, por exemplo para pererecas arborícolas do gênero *Pithecopus* [29] e serpentes da família Viperidae [30] e (ii) dados ecofisiológicos e modelos mecanísticos, por exemplo para o lagarto heliófilo *Kentropyx calcarata* [31], lagartos de áreas abertas amazônicas do gênero *Cnemidophorus* [32] e inúmeras outras espécies de lagartos amazônicos [33, 34].

“O controle do desmatamento é a alternativa mais viável para aumentar as chances de resgate evolutivo naturais das populações de lagartos amazônicos frente às mudanças climáticas.”

Apesar disso, os resultados de modelos preditivos também indicam que algumas espécies podem ser beneficiadas pelas mudanças climáticas, expandindo suas distribuições para áreas alteradas por ação humana, indicando interações relevantes com urbanização, cidades e desmatamento. Por exemplo, encontramos esse tipo de resposta para algumas das espécies de lagartos do gênero *Cnemidophorus* [32,35] e para lagartos *Gymnophthalmus underwoodi* [36], ambas espécies associadas a áreas abertas amazônicas e com modo de reprodução partenogenético (quando fêmeas se reproduzem sem que haja fecundação por machos) que as confere grande capacidade de colonização de novos ambientes. Esse tipo de impacto, que em um primeiro momento talvez pudesse ser considerado “positivo”, deve ser interpretado com cautela, pois espécies que se beneficiem de mudanças ambientais expandindo

suas áreas de distribuição podem acabar por impactar as comunidades biológicas locais pelo favorecimento de determinadas espécies conforme as características, levando a substituições de fauna em determinadas porções da Amazônia. Além disso, os estudos indicam que mesmo espécies próximas evolutiva e ecologicamente similares podem ter respostas contrastantes quanto às suas vulnerabilidades e como serão afetadas pelas mudanças ambientais e climáticas. Por exemplo, para o par de espécies de lagartos de áreas abertas amazônicas, *Cnemidophorus lemniscatus* e *C. cryptus*, foram estimados um aumento de 20% e uma diminuição de 44% da área adequada para ocorrência, respectivamente [32]. Assim, é essencial compreender que estudos táxon específicos (i.e., conduzidos para uma ou poucas espécies focais) não devem ser usados como exemplos para realizar generalizações para outros grupos taxonômicos e tomadas de decisão em larga escala.

Aparentemente, alguns aspectos da biologia das espécies, como associação com *habitats* abertos, partenogênese e urbanização são importantes atributos que podem conferir maior resistência aos efeitos das mudanças climáticas. Porém, estudos adicionais com muitas espécies de histórias evolutivas e ecológicas distintas são essenciais para que generalizações possam ser feitas quanto aos atributos que conferem maior resiliência

e potencial adaptativo e para podermos afirmar, com maior confiança, quais espécies sairão como “vencedoras” e “perdedoras” na corrida contra os efeitos deletérios das mudanças climáticas.

Considerando ainda outros níveis de análise da diversidade biológica, pode-se dizer que diferentes regiões geográficas e populações/linhagens biológicas possuem vulnerabilidades e potenciais adaptativos distintos, implicando em variação intraespecífica (i.e., ao nível populacional) dos riscos de extinção de lagartos amazônicos [31-34, 37, 38].

Utilizando abordagens espaciais que integram conjuntos de dados genômicos, de ocorrência das espécies e ambientais, foi encontrado que para algumas espécies de lagartos certas regiões do genoma dessas espécies podem estar evoluindo em resposta a pressões seletivas relacionadas ao clima. Tais achados indicam que existem várias populações de lagartos amazônicos que são localmente adaptadas a condições climáticas específicas e podem lidar melhor com a mudança ambiental ao enfrentar as mudanças climáticas futuras por meio de seleção natural e resgate genético.

Ainda que existam possibilidades de resgate evolutivo no futuro entre populações mal-adaptadas e aquelas populações adaptadas a condições climáticas mais quentes e secas para o calango da mata (*Kentropyx calcarata*), cenários extremos de aquecimento global e

desmatamento impedirão possíveis respostas adaptativas, dificultando o resgate evolutivo entre populações, implicando em uma perda elevada da diversidade biológica do grupo [37]. Por outro lado, cabe destacar que o controle do desmatamento é a alternativa mais viável para aumentar as chances de resgate evolutivo naturais das populações de lagartos amazônicos frente às mudanças climáticas.

Essas informações são essenciais para subsidiar políticas públicas de conservação da ameaçada diversidade de anfíbios e répteis frente às emergências climáticas e o desenvolvimento socioambiental sustentável, sendo fundamental que alcancem o grande público, incluindo estudantes, professores, comunitários, comunicadores e tomadores de decisão em políticas públicas de conservação, o que o laboratório tem feito por meio de múltiplas iniciativas de extensão e popularização científica (Figura 4).

Perspectivas futuras

De modo geral, os estudos indicam que a integração de dados funcionais e genômicos permitem acessar processos usualmente negligenciados em Biologia das Mudanças Climáticas e aprimorar modelos preditivos quanto aos riscos e possíveis respostas das espécies da herpetofauna Amazônica e Neotropical. Ainda, ao incorporar informação funcional (fisiologia) e genômica (adaptação local), os modelos

preditivos de distribuição futura são mais precisos e tendem a recuperar perdas menos extensas porque levam em consideração importantes processos para respostas que mitigam os impactos das mudanças climáticas globais. Em conjunto, esses estudos apontam a herpetofauna como referencial de biodiversidade para entender e mitigar os impactos erosivos das mudanças climáticas sobre espécies e populações naturais amazônicas por meio de novas abordagens ecoevolutivas e socioambientais integrativas.

Em conjunto, os resultados representam grandes avanços para o entendimento de como as mudanças climáticas poderão impactar algumas das espécies e comunidades biológicas de anfíbios e répteis da Amazônia e o que pode ser feito para frear impactos danosos a essa altíssima e única biodiversidade.

No entanto, é importante ressaltar que novos estudos avaliando múltiplas espécies com diferentes ecologias (em diferentes escalas biológicas e espaciais) e testes adicionais são necessários para avaliar a generalidade desses achados e identificar quais características funcionais conferem vulnerabilidade e resistência às espécies, permitindo identificar espécies-chave dos efeitos climáticos. Assim, ainda que se esteja trilhando um importante percurso no avanço e na popularização do conhecimento, há muito a se fazer em termos científicos e conservacionistas.

Para minimizar os riscos de extinção das espécies, é



(Foto: Jordana Ferreira. Reprodução)

Figura 4. Aproximar a população é essencial para o enfrentamento coletivo das mudanças climáticas. Na imagem, duas fotos realizadas durante eventos de popularização científica e educação ambiental em comunidades do interior do Amazonas, iniciativa do Projeto BioClimAmazônia. Dentre as ações do projeto, são realizadas oficinas da herpetofauna amazônica e atividades educativas com jogos, livros, vídeos e atividades de colorir no tema.

essencial que estratégias de conservação que possibilitem a persistência das espécies a longo prazo contemplem essa variação interespecífica e populacional garantindo, por exemplo: (i) a conservação de populações em regiões climaticamente diferentes (e por vezes até contrastantes) para as quais haja adaptação local, (ii) corredores de conectividade entre populações mais vulneráveis e populações mais resilientes para possibilitar o resgate evolutivo e ecológico entre regiões mais e menos vulneráveis (por exemplo, regiões central e sul da Amazônia), a fim de salvaguardar a continuidade de processos ecológicos e evolutivos essenciais para a sobrevivência das espécies; (iii) garantir a sustentabilidade das práticas de

manejo de ninhos e populações de quelônios amazônicos.

Entender sobre ações de mitigação desses impactos é abrir janelas de oportunidade para a conservação das espécies de microrganismos, animais e plantas que mantêm a enorme diversidade e complexidade da Amazônia e os meios de sobrevivência para suas populações tradicionais e diversas outras ao longo do planeta. A distopia pode voltar a ser distopia improvável e parar de assombrar nosso presente e a utopia de um futuro melhor, mas ações urgentes de controle do desmatamento e aquecimento global para que os cenários mais extremos não sejam atingidos são mandatórias para isso.

* **Fernanda P. Werneck** é pesquisadora titular do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), onde atua como líder de grupo de pesquisas CNPq e LEEVI, coordenadora do Programa de Coleções Científicas e Biológicas e curadora da Coleção de Anfíbios e Répteis.

** **Jordana G. Ferreira** é pesquisadora bolsista de Apoio à Difusão do Conhecimento do CNPq associada ao LEEVI, Programa de Coleções Científicas Biológicas, Coordenação de Biodiversidade, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

*** **Felipe Zanusso** é pesquisador Bolsista de Capacitação Institucional CNPq associado ao LEEVI, Programa de Coleções Científicas Biológicas, Coordenação de Biodiversidade, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

Agradecimentos

Agradecemos a todo(a)s o(a)s integrantes e colaboradore(a)s do Laboratório de Ecologia e Evolução de Vertebrados do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (LEEVI) pela parceria nas atividades e pesquisas desenvolvidas; às agências de fomento que apoiam a execução dos nossos projetos, em especial à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (Fapeam) pelo apoio ao projeto BioClimAmazônia, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à FUNBIO e ao Instituto Serrapilheira.

Referências

- [1] MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; et al. *IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] DÍAZ, S.; SETTELE, J.; BRONDÍZIO, E. S.; NGO, H. T.; GUÈZE, M.; AGARD, J.; ARNETH, A. et al. *IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES, 2019.
- [3] VAL, P.; FIGUEIREDO, J.; MELO, G.; FLANTUA, S. G. A.; QUESADA, C. A.; FAN, Y.; ALBERT J. S. et al. *Amazon Assessment Report 2021*. New York: United Nations Sustainable Development Solutions Network, 2021.
- [4] CEBALLOS, G.; EHRlich, P. R.; BARNOSKY, A. D.; GARCÍA, A.; PRINGLE, R. M.; PALMER, T. M. *Science Advances*, v. 1, n. 5, p. e1400253, 2015.
- [5] IUCN. *The IUCN Red List of Threatened Species: version 2022-2*. Cambridge: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2022.
- [6] ALBERT, J. S.; CARNAVAL, A. C.; FLANTUA, S. G. A.; LOHMANN, L. G.; RIBAS, C. C.; RIFF, D. et al. Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, v. 379, n. 6630, p. eabo5003, 2023.
- [7] BARICHIVICH, J.; GLOOR, E.; PEYLIN, P.; BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ESPINOZA, J. C. et al. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, v. 4, n. 9, p. eaat8785, 2018.
- [8] URBAN, M. C. Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, v. 348, n. 6234, p. 571-573, 2015.
- [9] FROST, D. R. *Amphibian species of the world: an online reference version 6.2*. New York: American Museum of Natural History, 2023.
- [10] UETZ, P.; FREED, P.; AGUILAR, R.; REYES, F.; KUDERA, J.; HOSEK, J. *The Reptile Database*. Available from: <http://www.reptile-database.org>. Access on 28 Nov. 2023.
- [11] MOURA, M. R.; JETZ, W. Shortfalls and opportunities in terrestrial vertebrate species discovery. *Nature Ecology & Evolution*, v. 5, p. 631-639, 2021.
- [12] PINSKY, M. L.; COMTE, L.; SAX, D. F. Unifying climate change biology across realms and taxa. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 37, n. 8, p. 672-82, 2022.
- [13] RAZGOUR, O.; TAGGART, J. B.; MANEL, S.; JUSTE, J.; IBÁÑEZ, C.; REBELO, H. et al. An integrated framework to identify wildlife populations under threat from climate change. *Molecular Ecology Resources*, v. 18, p. 18-31, 2017.
- [14] FOX, R. J.; DONELSON, J. M.; SCHUNTER, C.; RAVASI, T.; GAITÁN-ESPITIA, J. D. Beyond buying time: the role of plasticity in phenotypic adaptation to rapid environmental change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 374, n. 1768, 2019.
- [15] PETERSON, M. L.; DOAK, D. F.; MORRIS, W. F. Incorporating local adaptation into forecasts of species' distribution and abundance under climate change. *Global Change Biology*, v. 25, p. 775-793, 2019.
- [16] WALDVOGEL, A.; FELDMEYER, B.; ROLSHAUSEN, G.; EXPOSITO-ALONSO, M.; RELLSTAB, C.; KOFLER, R. et al. Evolutionary genomics can improve prediction of species' responses to climate change. *Evolution Letters*, v. 4, p. 4-18, 2020.
- [17] ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *USP Estudos Avançados*, v. 34, n. 100, p. 53-66, 2020.
- [18] TAYLOR, E. N.; DIELE-VIEGAS, L. M.; GANGLOFF, E. J.; HALL, J. M.; HALPERN, B.; MASSEY, M. D. et al. The thermal ecology and physiology of reptiles and amphibians: a user's guide. *Journal of Ecological and Integrative Physiology*, p. 1-32, 2020.
- [19] WINTER, M.; FIEDLER, W.; HOCHACHKA, W. M.; KOEHNCKE, A.; MEIRI, S.; DE LA RIVA, I. J. Patterns and biases in climate change research on amphibians and reptiles: a systematic review. *Royal Society Open Science*, v. 3, p. 160158, 2016.
- [20] DIELE-VIEGAS, L. M.; FIGUEROA, R. T.; VILELA, B.; ROCHA, C. F. D. Are reptiles toast? A worldwide evaluation of Lepidosauria vulnerability to climate change. *Clim Change*, v. 159, n. 4, p. 581-599, 2020.
- [21] HUEY, R. B.; DEUTSCH, C. A.; TEWKSBURY, J. J.; VITT, L. J.; HERTZ, P. E.; PÉREZ, H. J. A. et al. Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, v. 276, p. 1939-1948, 2009.
- [22] SINERVO, B.; MÉNDEZ-DE-LA-CRUZ, F.; MILES, D. B.; HEULIN, B.; BASTIAANS, E.; CRUZ M. V. S. et al. Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, v. 328, p. 894-899, 2010.
- [23] HUEY, R. B.; KEARNEY, M. R.; KROCKENBERGER, A.; HOLTHUM, J. A. M.; JESS, M.; WILLIAMS, S. E. Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, v. 367, p. 1665-1679, 2012.
- [24] BUTLER, C. J. A review of the effects of climate change on chelonians. *Diversity*, v. 11, n. 8, p. 138, 2019.
- [25] LALOË, J. O.; COZENS, J.; RENOM, B.; TAXONERA, A.; HAYS, G. C. Climate change and temperature-linked hatchling mortality at a globally important sea turtle nesting site. *Global change biology*, v. 23, n. 11, p. 4922-4931, 2017.
- [26] TELEMECO, R. S.; WARNER, D. A.; REIDA, M. K.; JANZEN, F. J. Extreme developmental temperatures result in morphological abnormalities in painted turtles (*Chrysemys picta*): a climate change perspective. *Integrative Zoology*, v. 8, n. 2, p. 197-208, 2013.
- [27] LUEDTKE, J. A.; CHANSON, J.; NEAM, K.; HOBIN, L.; MACIEL, A. O.; CATENAZZI, A. et al. Ongoing declines for the world's amphibians in the face of emerging threats. *Nature*, v. 622, n. 7982, p. 308-314, 2023.
- [28] SCHEELE, B. C.; PASMANS, F.; SKERRATT, L. F.; BERGER, L.; MARTEL, A.; BEUKEMA, W. et al. Amphibian

fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. *Science*, v. 363, n. 6434, p. 1459-63, 2019.

[29] BANDEIRA, L. N. *O papel da evolução de nichos na diversificação e potenciais impactos das alterações climáticas nas pererecas Neotropicais do gênero Pithecopus (Anura: Phyllomedusidae)*. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2021.

[30] ESPÍNDOLA, W. A. *Evolução de nichos e os efeitos de mudanças climáticas na distribuição e padrões e diversidade de serpentes Crotalinae (Bothrops e Bothrocophias, Squamata, Viperidae)*. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2018.

[31] PONTES-DA-SILVA, E.; MAGNUSSON, W. E.; SINERVO, B.; CAETANO, G. H.; MILES, D. B.; COLLI, G. R.; DIELE-VIEGAS, L. M. et al. Extinction risks forced by climatic

change and intraspecific variation in the thermal physiology of a tropical lizard. *Journal of thermal biology*, v. 73, p. 50-60, 2018.

[32] MARTINS, L. F. *Abordagem eco-evolutiva para entender a influência das mudanças do clima e da paisagem em lagartos de formações abertas amazônicas*. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2021.

[33] DIELE-VIEGAS, L. M.; ERNECK, F. P.; ROCHA, C. F. D. Climate change effects on population dynamics of three species of Amazonian lizards. *Comparative Biochemistry and Physiology*, v. 236, 2019.

[34] DIELE-VIEGAS, L. M.; VITT, L. J.; SINERVO, B.; COLLI, G. R.; WERNECK, F. P.; MILES, D. B. et al. Thermal physiology of Amazonian lizards (Reptilia: Squamata). *PLoS One*, v. 13, n. 3, p. e0192834, 2018.

[35] MARTINS, L. F.; CHOUERI, E. L.; OLIVEIRA, A. F. S.; DOMINGOS, F. M. C.

B.; CAETANO, G. H. O.; CAVALCANTE, V. H. G. L. et al. Whiptail lizard lineage delimitation and population expansion as windows into the history of Amazonian open ecosystems. *Systematics and Biodiversity*, v. 19, n. 8, p. 957-975, 2021.

[36] MENDONÇA, L. R. *Os efeitos das alterações ambientais sobre a distribuição e fenótipo de um lagarto partenogenético na Amazônia Central*. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2023.

[37] AZEVEDO, J. A.; FAURBY, S.; COLLI, G. R.; ANTONELLI, A.; WERNECK, F. P. *Deforestation limits evolutionary rescue under climate change in Amazonian lizards*. Preprint. 2023.

[38] YVES, A. *Genômica da adaptação e vulnerabilidade frente às mudanças climáticas em lagartos ombrófilos na Amazônia*. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2023.