



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro Biomédico
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Quezia de Melo Ramalho da Silva

**Efeitos da alteração da cobertura florestal e das mudanças
climáticas sobre a distribuição de anuros florestais e endêmicos da
Mata Atlântica**

Rio de Janeiro
2020

Quezia de Melo Ramalho da Silva

Efeitos da alteração da cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre a distribuição de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Jayme Augusto Prevedello

Coorientador: Prof. Dr. Mauricio de Almeida Gomes

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

S586 Silva, Quezia de Melo Ramalho da.
Efeitos da alteração da cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre a distribuição de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica/ Quezia de Melo Ramalho da Silva. – 2020.
59 f.: il.

Orientador: Jayme Augusto Prevedello
Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

1. Anuro - Mata Atlântica - Teses. 2. Reflorestamento - Mata Atlântica - Teses.
3. Mudanças climáticas - Mata Atlântica - Teses. I. Prevedello, Jayme Augusto. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes. III. Título.

CDU 597.8

Patricia Bello Meijinhos CRB7/5217 - Bibliotecária responsável pela elaboração da ficha catalográfica

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Quezia de Melo Ramalho da Silva

Efeitos da alteração da cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre a distribuição de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jayme Augusto Prevedello (Orientador)
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

Prof. Dr. Carlos Frederico Duarte da Rocha
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes – UERJ

Prof.^a Dra. Maria Lucia Lorini
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Aos seres que coxam e sobrevivem às mudanças.

AGRADECIMENTOS

Ao Jayme Prevedello, por ter me acolhido em 2016 no Laboratório de Ecologia de Paisagens e por toda a dedicação em me orientar ao longo desses anos. Pela paciência e atenção que o fazem um professor e um exemplo a ser seguido. Por ser uma das pessoas mais inteligentes e admiráveis que os eventos estocásticos da vida me fizeram conhecer.

Ao Mauricio Almeida-Gomes, por ser um coorientador tão atencioso e disponível. Por todo o aprendizado herpetológico concedido desde o início da jornada.

À Luara Tourinho, pela colaboração ímpar que, por tantas vezes, se caracterizou muito mais como uma orientação. Pela paciência em rodar linha por linha dos *scripts*, pela rispidez carinhosa que muito me fez crescer e pelas infinitas risadas.

À Mariana Vale, por estar sempre tão disposta a esclarecer dúvidas, acrescentar ideias e se atentar aos detalhes.

À Manoela Woitovicz-Cardoso, quem despertou o meu grande amor pelos anfíbios e segue acreditando em mim a cada escolha. Por vezes, ser mãe, outras, irmã e sempre, amiga.

Ao projeto “Sapos além do brejo” desenvolvido com muito carinho junto com meus amigos “sapólogos” do Laboratório de Vertebrados da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com o apoio do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração do Mosaico Central Fluminense. Obrigada, Vitor Borges, Marcus Vinicius Vieira, Rodrigo Fonseca e Raquel Rosa.

Aos integrantes do Laboratório de Ecologia de Paisagem, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, por toda contribuição quando necessário. Especialmente à Andreza Siqueira, pela amizade que entende sobre o amor pelos seres de barriga no chão tanto quanto eu.

Ao Laboratório de Vertebrados da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. À Luciana Fusinatto, à Carla Siqueira e ao Marlon Almeida que se disponibilizaram a me ajudar com os aspectos ecológicos e funcionais dos meus tão queridos anfíbios.

Ao Programa de Pós-Graduação de Ecologia e Evolução da Universidade do Estado do Rio de Janeiro por todo aprendizado e suporte. Aos amigos que fiz durante o percurso e ao aprendizado que ultrapassa qualquer sala de aula. À Sônia Regina e à Verusca Machado que sempre se disponibilizam para me ajudar.

À Fundação do Ministério de Educação do Brasil (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro durante os dois anos de mestrado.

Aos meus pais, que me apoiam até quando a compreensão falha. Pelo aprendizado das coisas que mais valem na vida. Por eu saber ouvir “não” e gostar ainda mais do “sim” quando ele chega.

Às minhas irmãs, Luiza e Rogéria, por serem companhias risonhas para os dias. Por toda euforia a cada conquista e por toda presença mesmo quando distantes.

Às minhas crianças, Heitor e Arthur, que não me deixam esquecer de olhar às coisas mais simples da vida. Pela alegria desmedida que me invade a cada vez que os vejo e pelas aventuras com os sapinhos que ainda vamos vivenciar juntos.

Aos meus amigos, por deixarem tudo mais leve, bonito e divertido. Nos laboratórios, nos campos, na república e em qualquer lugar em que a amizade possa existir com amorosidade.

Ao Lucas Sobral Marcondes, por ser sempre um amigo que vale a pena ter por perto. Por estar perto mesmo morando em outro estado e por todos os anos de amizade que me ensinaram a desaprender para aprender de novo depois.

À Paula Diniz, por tanto sempre. Por todas as horas gastas me ajudando em cada etapa da dissertação e mais ainda por todas as horas me encorajando a não desistir de nenhum sonho. Por ser a pessoa que me faria atravessar a cidade em bicicleta e por entender todas as entrelinhas.

É preciso estar atento, e descobrir o bichinho que se mexe debaixo da folhagem.

Não o mate: se cubra de flores e entre para brincar com ele.

Matilde Campilho

RESUMO

SILVA, Quezia de Melo Ramalho da. *Efeitos da alteração da cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre a distribuição de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica*. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

As atividades antrópicas têm gerado diversas mudanças em escala global que ameaçam a biodiversidade. Estudos indicam que as mudanças climáticas, em particular, podem causar redução na área de ocorrência de diversas espécies. Além disso, a perda de habitat pode reduzir a biodiversidade substancialmente, pois é a principal causa de extinção de espécies no globo. Entretanto, estudos recentes sugerem que, ao invés de perda, haverá ganho de habitat em alguns biomas florestais nas próximas décadas – caracterizando o processo da “transição florestal”. Tal ganho pode permitir a ocupação, por algumas espécies, de áreas que atualmente estão desmatadas, podendo inclusive compensar ou minimizar os efeitos das mudanças climáticas. O objetivo geral deste trabalho foi quantificar os efeitos combinados do aumento de cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre espécies de anuros florestais e endêmicas da Mata Atlântica brasileira, considerada um *hotspot* de biodiversidade. Para gerar mapas de distribuição atual e futura (2050) das 10 espécies de anfíbios anuros selecionadas, foi feita uma modelagem de distribuição de espécies (SDM), utilizando os algoritmos BIOCLIM, GLM, MaxEnt, Random Forest e SVM. Para analisar o efeito da mudança de cobertura florestal, foram obtidos mapas de cobertura florestal atual (2000) e futura (2050), pelo modelo *Global Biosphere Management Model* (GLOBIOM) seguindo dois cenários: um pessimista, o *Business-as-Usual* (BAU), que assume que a cobertura florestal da Mata Atlântica permanecerá quase inalterada; e um otimista, o *Forest Code without small farms amnesty* (FCnoSFA), que assume a restauração das áreas de reserva legal das propriedades rurais. Os resultados indicam que as mudanças climáticas terão efeitos espécie-específicos sobre os anuros, com redução de adequabilidade climática para três espécies, e aumento de adequabilidade climática para sete espécies. Para as três espécies que devem sofrer redução de adequabilidade climática, o aumento de cobertura florestal, previsto no cenário FCnoSFA, tem o potencial de compensar os efeitos negativos das mudanças climáticas, resultando em ganho de adequabilidade ambiental total. Esses resultados reforçam a importância do reflorestamento e das políticas de uso do solo para a biodiversidade de anuros florestais da Mata Atlântica.

Palavras-chave: Biodiversidade. Uso do solo. Reflorestamento. Conservação.
Anuros.

ABSTRACT

SILVA, Quezia de Melo Ramalho da. *Effects of climate change and forest cover on the distribution of endemic anurans to the Atlantic Forest*. 2020. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Evolução) – Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Anthropic activities have generated several global changes that threaten biodiversity at a global scale. Studies indicate that climate change, particularly, may reduce the area of occurrence for many species. Moreover, habitat loss can substantially reduce biodiversity, since it is the main cause of species' extinction on the globe. However, recent studies suggest that instead of loss there will be habitat increase in some forest biomes in the next decades – characterizing the forest transition process. Such increase may allow the occupation, by some species, in currently deforested areas, being able to even compensate or decrease climate change effects. The overall goal of this research was to quantify the combined effects of the increase of forest cover and the climate changes on endemic anurans of the Brazilian Atlantic rainforest, considered a biodiversity hotspot. To generate current and future (2050) distribution maps of the 10 selected anuran species, Species Distribution Modelling (SDM) was performed, using the algorithms BIOCLIM, GLM, MaxEnt, Random Forest e SVM. In order to analyze the effect of forest cover change, current (2000) and future (2050) forest cover maps were obtained by Global Biosphere Management Model (GLOBIOM), following two scenarios: Business-as-Usual (BAU), which assumes that forest cover of Atlantic rainforest will remain almost unchanged; and a more optimist scenario, Forest Code without small farms amnesty (FCnoSFA), which assumes the restoration of legal reserve areas of rural properties. Results indicate that climate change will have species-specific effects on anurans, with decreased climate suitability for three species, and increased climate suitability for seven species. For the three species that should undergo a reduction in climate suitability, the increase of forest cover, provided on FCnoSFA scenario, has the potential to compensate the negative effect of climate change, resulting in an increase of total environment suitability. These results reinforce the importance of reforestation and the land use policies to Atlantic Rainforest anuran biodiversity.

Keywords: Biodiversity. Land use. Reforestation. Conservation. Anurans.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alterações nas adequabilidades climática, florestal e ambiental (total), entre o presente e o ano de 2050, para todas as espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica.....	28
Figura 2 – Alterações nas adequabilidades climáticas entre o presente e o ano de 2050, para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica.....	30
Figura 3 – Alterações nas adequabilidades florestais para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.....	32
Figura 4 – Alterações nas adequabilidades ambientais sem sinergia para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.....	35
Figura 5 – Alterações nas adequabilidades ambientais com sinergia para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mudança de adequabilidade climática para todas as espécies entre o presente e o ano de 2050.....	29
Tabela 2 – Mudanças de adequabilidade de habitat (i.e. cobertura florestal) para as 10 espécies, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal, entre o presente e o ano de 2050.....	31
Tabela 3 – Mudanças de adequabilidade de ambiental sem sinergia (adequabilidade climática X adequabilidade florestal) para as 10 espécies de anfíbios endêmicas da Mata Atlântica, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.....	34
Tabela 4 – Mudanças de adequabilidade ambiental com sinergia (adequabilidade climática X adequabilidade florestal) para as 10 espécies, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAU	<i>Business as Usual</i>
CanESM2	<i>Canadian Earth System Model</i>
CRC	Comprimento rosto-cloacal
FC	<i>Forest Code</i>
FCnoSFA	<i>Forest Code without small farms amnesty</i>
GBIF	<i>Global Biodiversity Information Facility</i>
GCM	Modelo de Circulação Geral
GLOBIOM	<i>Global Biosphere Management Model</i>
HadGEM2-ES	<i>Hadley Centre Global Environmental Model</i>
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IIASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i>
MNRJ	Museu Nacional do Rio de Janeiro
MZUSP	Museu de Zoologia da USP
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
SDM	Modelagem de Distribuição de Espécies
SiBBR	Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira
TSS	<i>True Skill Statistic</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	15
1	METODOLOGIA.....	18
1.1	Área de estudo.....	18
1.2	Espécies estudadas.....	18
1.3	Registros de ocorrência.....	19
1.4	Seleção dos dados climáticos.....	20
1.5	Obtenção dos dados de cobertura florestal.....	22
1.6	Adequabilidade climática.....	23
1.7	Adequabilidade florestal.....	25
1.8	Adequabilidade ambiental sem sinergia.....	25
1.9	Adequabilidade ambiental com sinergia	25
1.10	Análise de dados.....	26
2	RESULTADOS.....	28
2.1	Efeitos gerais sobre as 10 espécies de anuros em conjunto.....	28
2.2	Variabilidade de respostas entre as espécies.....	29
3	DISCUSSÃO.....	40
3.1	Adequabilidade climática	41
3.2	Adequabilidade florestal.....	41
3.3	Adequabilidades ambientais	41
3.4	Diferenças de respostas entre as espécies.....	43
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS.....	46

APÊNDICE A – Registros de ocorrência das 10 espécies após a limpeza dos dados.....	52
APÊNDICE B – Correlação entre as variáveis bioclimáticas selecionadas gerada a partir da Matriz de Correlação de Pearson. A correlação entre as variáveis é maior quanto mais próxima de 1 (tons azuis) e de -1 (tons vermelhos)	53
APÊNDICE C – Valores de <i>True Skill Statistic</i> (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral CANESM2.....	54
APÊNDICE D – Valores de <i>True Skill Statistic</i> (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral HADGEM2ES.....	55
APÊNDICE E – Valores de <i>True Skill Statistic</i> (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral MIROC5.....	56
APÊNDICE F – Adequabilidade climática para todas as espécies para todos os General Circulation Models (GCMs) no ano de 2050.....	57
ANEXO A –Informações gerais sobre as espécies focais.....	58
ANEXO B –Características intrínsecas das espécies focais.....	59

INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas têm gerado diversas mudanças em escala global que ameaçam a biodiversidade (Steffen *et al.*,2015). As mudanças climáticas, em particular, têm recebido grande atenção, uma vez que diversos estudos indicam que elas devem causar redução da área de ocorrência de diversas espécies (Araújo *et al.*, 2004; Lemes, Melo & Loyola, 2014). Outra ameaça à biodiversidade são as mudanças no uso do solo, em particular a perda de habitat, considerada a principal causa de extinção de espécies no globo (Fahrig, 2003; Haddad *et al.*, 2015; Püttker *et al.*,2015). Brooks *et al.* (2002) demonstraram que o declínio da biodiversidade e a grande possibilidade de extinção em hotspots está intimamente relacionado com a perda de habitat. Desta forma, compreender os efeitos combinados das mudanças no clima e no uso do solo é essencial para predizer padrões futuros de biodiversidade e estabelecer estratégias de conservação e manejo adequadas (Steffen *et al.*,2015).

Apesar de haver uma ampla literatura avaliando os efeitos isolados das mudanças climáticas e da perda de habitat, os efeitos combinados dos dois processos são menos conhecidos (Bonan, 2008). Os estudos que avaliaram os efeitos combinados da perda de habitat e de mudanças climáticas estimaram maior alteração da área de ocorrência para diversas espécies em relação a estudos que avaliaram esses processos de forma independente (Jetz *et al.*,2007; Loiselle *et al.*,2010; Dilts *et al.*, 2016; Gouveia *et al.*, 2016). No entanto, estudos recentes têm sugerido que haverá ganho de habitat em muitas regiões nas próximas décadas, incluindo algumas florestas tropicais, caracterizando o processo da “transição florestal” (Rudel *et al.*,2005; Lira *et al.*,2012; Costa *et al.*,2018).

Especificamente na Mata Atlântica, o processo da “transição florestal”pode estar associado a uma conjunção de fatores (*e. g.*, êxodo rural, abandono da produção de carvão vegetal), dentre eles ao surgimento do Código Florestal original (Lei N.º 4.771/1965; Lira *et al.*, 2012), substituído, no presente, pelo Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012). Devido ao importante papel exercido pelas características da paisagem na manutenção de espécies, o início deste processo seria fortemente positivo a longo prazo para a conservação da biodiversidade da

Mata Atlântica brasileira, principalmente para espécies florestais, uma vez que é previsto que táxons que apresentam esta característica respondam mais fortemente à estrutura da paisagem (Lira *et al.*, 2012).

O ganho de cobertura florestal pode permitir a ocupação de áreas que atualmente estão desmatadas. O aumento do fluxo gênico e da probabilidade de persistência das espécies nessas novas áreas habitáveis poderá favorecer a expansão da área de ocorrência de espécies dependentes de floresta (Costa *et al.*, 2018). Se isso de fato ocorrer, é possível que o ganho de cobertura florestal compense a redução da adequabilidade ambiental causada pelas mudanças climáticas, mantendo ou mesmo elevando a adequabilidade ambiental total para as espécies. Porém, essa hipótese ainda não foi explorada na literatura, uma vez que os estudos que combinaram mudanças da cobertura florestal e mudanças climáticas consideraram apenas os cenários de perda de habitat.

Além de aumentar a quantidade de habitat, o ganho de cobertura florestal pode beneficiar as espécies por reduzir a temperatura local, tornando o microclima mais adequado para a ocorrência das espécies (Ewers & Banks-Leite, 2013, Li *et al.*, 2015; Prevedello *et al.*, 2019). Por exemplo, um aumento de 50% na cobertura florestal pode reduzir a temperatura local em 1.11 ± 0.26 °C, em média, em regiões tropicais (Prevedello *et al.*, 2019). Assim, o ganho de cobertura florestal pode atuar de forma sinérgica, e não apenas combinada, com as mudanças climáticas. Em outras palavras, o aumento da cobertura florestal pode atuar em *feedback* com as mudanças climáticas, aumentando a adequabilidade climática do habitat, o que pode resultar em uma compensação sobre o efeito negativo das mudanças climáticas. Entretanto, pouco é conhecido sobre o efeito sinérgico entre mudanças climáticas e ganho de habitat sobre a distribuição das espécies.

O objetivo geral do presente estudo foi quantificar os efeitos combinados do aumento de cobertura florestal e das mudanças climáticas sobre a biodiversidade. Para tanto, serão utilizados como organismos-modelo espécies endêmicas de anfíbios anuros florestais, da Mata Atlântica. Anfíbios são bons modelos para o estudo para entender os efeitos da perda de habitat e de mudanças climáticas, pois são altamente sensíveis à ambos processos (Stuart *et al.*, 2004). Nas últimas quatro décadas, observou-se declínios em populações de anfíbios em todo mundo, sendo o grupo de vertebrados terrestres com a maior proporção de espécies ameaçadas (Gardner, 2001; Stuart, 2004; IUCN, 2019).

Os objetivos específicos deste trabalho foram: **(1)** Determinar o efeito individual das mudanças climáticas sobre a distribuição das espécies; **(2)** Determinar o efeito individual da mudança de cobertura florestal sobre a distribuição das espécies; **(3)** Determinar o efeito combinado sem sinergia dos dois processos; **(4)** Avaliar o efeito combinado com sinergia dos dois processos. As hipóteses levantadas foram: **(1)** As mudanças climáticas futuras irão reduzir a adequabilidade climática para as espécies de anuros; **(2)** O ganho de cobertura florestal irá aumentar a adequabilidade de habitat para as espécies; **(3)** Como consequência, a adequabilidade ambiental total (climática + habitat) irá aumentar; **(4)** Se ocorrerem de forma sinérgica, o aumento de cobertura florestal irá compensar o efeito negativo das mudanças climáticas sobre a área de ocorrência das espécies.

1 METODOLOGIA

1.1 Área de estudo

A Mata Atlântica foi escolhida como área de estudo, por ser um bioma que apresenta uma enorme riqueza e endemismo de espécies, sendo considerado um *hotspot* de biodiversidade (Myers *et al.*,2000). Além disso, ocupa ampla extensão latitudinal e altitudinal, o que resulta em grandes variações climáticas (Ribeiro *et al.*,2009). Estudos anteriores mostraram que as mudanças climáticas associadas à perda de cobertura florestal podem reduzir as áreas de ocorrência de diversas espécies endêmicas da Mata Atlântica, aumentando a probabilidade de extinção dessas espécies (*e.g.* Loiselle *et al.*,2010, Gouveia *et al.*, 2016).

Há indícios de que esse bioma esteja passando pela transição florestal, ou seja, uma tendência de ocorrer maior ganho do que perda de cobertura florestal (Lira *et al.*,2012; Costa *et al.*,2018). Em um estudo recente, foi estimado que há 28% de cobertura vegetal remanescente (Rezende *et al.*, 2018). Adicionalmente, é previsto um ganho de cobertura florestal para os próximos anos (Câmara *et al.*,2015), com ações como as do Pacto da Mata Atlântica, incluindo a possível restauração de 15 milhões de hectares de floresta até 2050 (Planejamento Estratégico, 2010).

1.2 Espécies estudadas

Neste estudo, foram selecionadas 10 espécies de anfíbios anuros florestais e endêmicas da Mata Atlântica, classificadas como “ameaçada”, “vulnerável” ou “quase ameaçada” (Frost, 2019; IUCN, 2019): *Allobates olfersioides* Lutz, 1925 (Anura: Aromobatidae), *Aplastodiscus cavicola* Cruz & Peixoto, 1984 (Anura: Hylidae), *Aplastodiscus eugenioi* Carvalho-e-Silva & Carvalho-e-Silva, 2005 (Anura: Hylidae), *Chiasmocleis lacrimae* Peloso, Sturaro, Forlani, Gaucher, Motta & Wheeler, 2014 (Anura: Microhylidae), *Cycloramphus acangatan* Verdade & Rodrigues, 2003 (Anura: Cycloramphidae), *Cycloramphus brasiliensis* Steindachner, 1864 (Anura: Cycloramphidae), *Dasylops schirchi* Miranda-Ribeiro, 1924 (Anura: Microhylidae), *Ischnocnema oea* Heyer, 1984 (Anura: Brachycephalidae), *Ololygon trapicheiroi* B.

Lutz, 1954 (Anura: Hylidae) e *Thoropa saxatilis* Cocroft & Heyer, 1988 (Anura: Cycloramphidae).

Estas espécies ocorrem no Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil, com a amplitude altitudinal variando de 648,37 m à 1049.93 m (ver tópico 1.10.). O tamanho do corpo, medido pelo comprimento rosto-cloacal (CRC), varia de 1,3 cm à 5,6 cm para os indivíduos machos e de 1,6 cm à 6,2 cm para os indivíduos fêmeas dessas espécies (Haddad *et al.*, 2013). Todas as espécies são noturnas e exclusivamente florestais, com exceção da *Allobates olfersioides*, que é diurna e pode também utilizar áreas abertas como habitat. Além disso, possuem ampla variação em seus sítios de canto e modos reprodutivos (Haddad *et al.*, 2013; IUCN, 2019 e FROST, 2019; anexos A e B, f. 57 e 58). Foram selecionadas espécies de anuros endêmicas da Mata Atlântica, porque, de maneira geral, a maior parte das espécies ameaçadas no mundo são endêmicas de *hotspots* (Brooks *et al.*, 2002). Além disso, todas estas espécies utilizam a floresta como habitat, pois um dos objetivos do presente estudo é avaliar os efeitos do ganho de cobertura florestal sobre elas.

1.3 Registros de ocorrência

O levantamento dos registros de ocorrência das espécies ao longo da Mata Atlântica foi feito através de diversas fontes complementares:

- I. **Bases de dados online:** *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBr), *speciesLink*, HerpNet e Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio);
- II. **Museus:** Museu Nacional do Rio de Janeiro (MNRJ) e Museu de Zoologia da USP (MZUSP);
- III. **Literatura:** *Data Paper – ATLANTIC AMPHIBIANS: a data set of amphibian communities from the Atlantic Forests of South America* (Vancine *et al.*, 2018).

A taxonomia das espécies foi verificada através da plataforma *Amphibian Species of the World* (<<http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/>>). Assim, foram coletados registros de ocorrência considerando todas as sinônimas de cada espécie, para maximizar o número de registros.

A limpeza dos dados foi realizada no ambiente R 3.5.1 (R Core Team, 2018), usando o pacote 'spThin' (Aiello-Lammens *et al.* 2019), onde:

- I. Os registros repetidos (*i.e.* com coordenadas iguais) foram deletados, mantendo apenas um registro por coordenada;
- II. Não foram considerados registros distanciados a menos de 1 km de outros registros, que é a resolução dos *rasters* climáticos, para maximizar a independência dos dados;
- III. Foram consideradas apenas espécies com 15 ou mais registros de ocorrência, para uma modelagem minimamente robusta, totalizando 563 registros de ocorrência para as 10 espécies (Apêndice A, f. 51). As espécies florestais e endêmicas da Mata Atlântica que tiveram menos de 15 registros de ocorrência foram excluídas.

1.4 Seleção dos dados climáticos

As variáveis bioclimáticas foram compilados para o presente (média mensal entre 1960 a 1990) e para o futuro em 2050 (média mensal entre 2041 a 2060), a partir da base de dados do *WorldClim* (<www.worldclim.org>), que apresenta 19 variáveis bioclimáticas derivadas de dados de temperatura e de precipitação (Hijmans *et al.*, 2005). A resolução escolhida foi a de 30 arc-segundos (células em torno de 1 km de lado) para a resolução do grão ser a mais fina possível, de acordo com o habitat das espécies selecionadas. As variáveis foram recortadas segundo a distribuição dos pontos de ocorrência de cada espécie dentro da Mata Atlântica, incluindo também um *buffer* de 200 km, que compreende a área de ocorrência das espécies estudadas.

Para selecionar as variáveis bioclimáticas a serem utilizadas na modelagem de distribuição das espécies, foi gerada uma matriz de correlação de Pearson entre

as variáveis, utilizando o pacote *corrplot* versão 0.84 (Wei & Sinko, 2017) no ambiente R 3.5.1 (R Core Team, 2018). A partir desta matriz, a seleção das variáveis bioclimáticas atendeu a quatro critérios:

- I. A primeira variável bioclimática (BIO1 → Temperatura média anual) precisava ser selecionada, para análise da sinergia entre mudanças de cobertura florestal e mudanças climáticas, seguindo Prevedello *et al.* (2019; ver tópico 1.9.);
- II. Variáveis relativamente pouco correlacionadas entre si (com coeficiente de correlação ≤ 0.65);
- III. Variáveis que incluíssem tanto valores de tendência central (média) quanto valores extremos;
- IV. Variáveis tanto de temperatura quanto de precipitação. Os critérios III e IV, em conjunto, aumentam a probabilidade de identificar mais acuradamente as áreas climaticamente adequadas para as espécies.

Assim, foram selecionadas as seguintes variáveis (Apêndice B, f. 52):

- I. BIO1 → Temperatura média anual;
- II. BIO7 → Amplitude de temperatura anual (BIO5 - BIO6) *;
- III. BIO12 → Precipitação anual;
- IV. BIO13 → Precipitação do mês mais úmido;
- V. BIO19 → Precipitação do trimestre mais frio.

*A amplitude de temperatura anual (BIO7) é obtida pela subtração da temperatura máxima do mês mais quente (BIO5) pela temperatura mínima do mês mais frio (BIO6).

Os dados do *WorldClim* foram utilizados tanto para selecionar as variáveis bioclimáticas quanto para gerar os pontos de *background* e de pseudo-ausências (necessários para alguns algoritmos de modelagem; ver tópico 1.6.), por serem dados reais (observados) do clima do presente. Entretanto, para realizar a modelagem de distribuição de espécies (SDM) no presente e no futuro, foram utilizados dados do modelo Eta.

O modelo Eta (<<http://etamodel.cptec.inpe.br/>>) foi escolhido por ser regional (e não global), sendo mais acurado para a América do Sul. Além disso, os dados do presente apresentados por este modelo são históricos para cada modelo de circulação geral (GCM), com resolução de 0.2° x 0.2°. Os dados do clima futuro também foram obtidos a partir deste modelo, o que permitiu padronizar a modelagem de distribuição atual e futura, controlando possíveis vieses dos modelos, tornando assim os resultados mais facilmente comparáveis entre presente e futuro. No momento, há três GCMs disponíveis para o modelo Eta: “*Model for Interdisciplinary Research on Climate*” (MIROC5), “*Hadley Centre Global Environmental Model*” (HadGEM2-ES) e *Canadian Earth System Model* (CanESM2). Todos eles foram utilizados durante a modelagem (ver tópico 1.6.).

1.5 Obtenção dos dados de cobertura florestal

Para analisar o efeito de mudanças futuras na cobertura florestal da Mata Atlântica sobre os anuros, foram obtidos mapas de cobertura florestal atual (2000) e futura (2050), através do modelo *Global Biosphere Management Model* (GLOBIOM) (<<https://www.globiom.org/>>), desenvolvido pelo *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) com o objetivo de analisar as políticas de uso do solo no Brasil (Câmara *et al.*, 2015).

Para o ano de 2050, utilizamos dois cenários de uso do solo distintos:

- I. ***Business as Usual (BAU)*** – **cenário pessimista**: assume que a cobertura florestal da Mata Atlântica permanecerá quase inalterada, sem o controle efetivo do desmatamento e sem reflorestamento para recompor áreas desmatadas. É o cenário sem a aplicação do Novo Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012), mas com a aplicação da Lei da Mata Atlântica (Lei 11.428/2006), por este motivo que a taxa de desmatamento neste cenário para Mata Atlântica é baixa (Câmara *et al.*, 2015);

- II. **Forest Code without small farms amnesty (FCnoSFA) – cenário otimista:** este cenário, além de englobar pressupostos do Novo Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012), como o desmatamento ilegal e a Lei da Mata Atlântica (Lei 11.428/2006) aplicada, ainda assume a restauração das áreas de reserva legal das propriedades rurais pelos pequenos agricultores (Câmara *et al.*, 2015).

O cenário otimista (FCnoSFA) prevê, portanto, ganho de cobertura florestal em algumas áreas da Mata Atlântica. Por outro lado, o cenário pessimista (BAU) serve como base de comparação, e resulta em leve perda de cobertura florestal.

1.6 Adequabilidade climática

Para quantificar o efeito individual das mudanças climáticas sobre os anuros (objetivo 1), foi realizada uma Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM), utilizando a abordagem correlativa (Anderson, 2013; Pacifici *et al.*, 2015). As SDMs correlativas utilizam os registros de ocorrência das espécies e as variáveis preditoras (e.g. dados climáticos) como dados de entrada para prever a probabilidade de ocorrência das espécies (Peterson *et al.*, 2011). Neste estudo, foram utilizados os registros de ocorrência das 10 espécies focais (Apêndice A, f. 51) e as 5 variáveis bioclimáticas selecionadas (Apêndice B, f. 52) do presente (média mensal entre 1950 a 2000) e do futuro para 2050 (média mensal entre 2041 a 2060). Os dados do cenário futuro seguiram as previsões do cenário de emissão de gases de efeito estufa “*business as usual*”, que corresponde ao *Representative Concentration Pathways* (RCP) 8.5, do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC–previsões do AR6, disponíveis a partir de março de 2018) para o ano de 2050. O RCP 8.5 é o mais provável (realista), pois representa um cenário com alto crescimento populacional e baixos desenvolvimentos econômico e tecnológico, o que levaria, a longo prazo, à uma alta demanda energética e a uma taxa acelerada de emissão dos gases do efeito estufa na atmosfera (Riahi *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011). Utilizando o modelo Eta, foram testadas as previsões de três GCMs dentro deste cenário futuro: MIROC5, HadGEM2-ES e CanESM2.

Como diferentes algoritmos de modelagem de distribuição geram diferentes previsões (Elith & Graham, 2009), foram utilizados cinco algoritmos com abordagens matemáticas distintas, amplamente discutidos na literatura (Diniz-Filho *et al.*, 2009), dos quais: um é envelope climático (BIOCLIM), um é estatístico (GLM) e três são aprendizado de máquina (SVM, MaxEnt e Random Forest). Para o BIOCLIM, foram utilizados apenas os dados de presença (registros de ocorrência) das espécies. Para o MaxEnt, foram utilizados dados de presença e de *background* – 10 mil pontos por espécie dentro da área de modelagem de cada espécie (*i.e.* cada *buffer* de 200 km). Para os demais algoritmos, que exigem dados de ausência, foram gerados 10 pontos de pseudo-ausências para cada ponto de ocorrência, seguindo Lobo & Tognelli (2011):

- I. Considerando um mínimo polígono convexo ao redor dos pontos de presença;
- II. Dentro de um *buffer* de 200 km ao redor do mínimo polígono;
- III. Os pontos de pseudo-ausência foram sorteados apenas em *pixels* com a adequabilidade climática= 0, obtida pelo BIOCLIM (para detalhes, ver Lobo & Tognelli, 2011).

Os modelos foram gerados separando os registros de ocorrência das espécies em 90% para treino e 10% para teste por validação cruzada, sendo esse procedimento repetido dez vezes para cada algoritmo (BIOCLIM, GLM, SVM, MaxEnt e Random Forest), para cada modelo de circulação geral (MIROC5, HadGEM2-ES e CanESM2). Como medida de desempenho, foi aplicado o *True Skill Statistic* (TSS) (Allouche *et al.*, 2006; apêndices C, D e E, f. 53, 54, 55) e os modelos consensuais (*ensemble forecasting*; Araújo & New, 2007) foram estabelecidos para cada espécie a partir da média ponderada pelo TSS. A adequabilidade climática por *pixel*, varia de 0 (completamente inadequado climaticamente) a 1 (completamente adequado climaticamente). Todas as análises da SDM foram realizadas no ambiente R 3.5.1 (R Core Team, 2018), utilizando o pacote 'dismo' (*version* 1.0–5; Hijmans *et al.*, 2017).

1.7 Adequabilidade florestal

Para analisar o efeito individual da mudança de cobertura florestal sobre os anuros (objetivo 2), foram utilizados os mapas de cobertura florestal atual (2000) e futura (2050) do GLOBIOM, com resolução de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Os valores originais de cobertura florestal, por *pixel*, foram transformados de porcentagem (0-100%) para variarem entre 0 e 1, e ajustados para a mesma resolução dos mapas de adequabilidade climática ($\sim 0.2^\circ \times 0.2^\circ$). Assim, os mapas de adequabilidade climática (objetivo 1) e de adequabilidade de habitat (*i.e.* cobertura florestal; objetivo 2) tornaram-se diretamente comparáveis, permitindo avaliar os efeitos combinados dos dois processos, como explicado nos dois tópicos a seguir.

1.8 Adequabilidade ambiental sem sinergia

Para analisar os efeitos combinados das mudanças climáticas e da cobertura florestal (objetivo 3), os mapas de adequabilidade climática (objetivo 1) e de adequabilidade de habitat (*i.e.* cobertura florestal; objetivo 2) foram multiplicados. Assim, foram gerados novos mapas, que mostram a adequabilidade ambiental total (tanto climática quanto florestal), em cada *pixel*, variando entre 0 e 1, para cada espécie.

1.9 Adequabilidade ambiental com sinergia

Para analisar a sinergia entre as mudanças climáticas e as mudanças de cobertura florestal (objetivo 4), primeiro foi estimado o efeito do ganho de cobertura florestal sobre a temperatura local. Para tanto, foi utilizada a equação de Prevedello *et al.* (2019), que permite estimar a redução da temperatura local com base na porcentagem de aumento da cobertura florestal. Nesse estudo, os autores estimaram que, para o Brasil, um aumento de 21.7% na cobertura florestal reduz a temperatura média anual em 0.36°C . Com base nessa relação, é possível estimar a mudança na temperatura média para qualquer valor de ganho ou perda de cobertura florestal.

A equação foi aplicada para cada *pixel* dos mapas de cobertura florestal da Mata Atlântica, gerando, assim, um mapa com estimativas de redução de temperatura, em função do aumento de cobertura florestal, por *pixel*. Esse mapa foi somado ao mapa de temperatura futura (BIO 1 de 2050), gerando um novo mapa de temperatura futura. Esse mapa foi aplicado para a modelagem da adequabilidade climática futura, em conjunto com as outras quatro variáveis bioclimáticas (BIO 7, BIO 12, BIO 13 e BIO19), utilizando os mesmos procedimentos explicados anteriormente (tópico 1.6.). O mapa resultante dessa modelagem foi então multiplicado pelo mapa de cobertura florestal, como no objetivo 3, permitindo assim avaliar o efeito sinérgico das mudanças climáticas e do ganho de cobertura florestal sobre a adequabilidade total para cada espécie.

1.10 Análise de dados

As amplitudes altitudinais e latitudinais de cada espécie de anuro foram calculadas através de um *raster* de altitude (obtido de <https://dds.cr.usgs.gov/srtm/>) e das coordenadas geográficas de ocorrência das espécies, respectivamente, no ambiente R 3.5.1 (R Core Team, 2018). As coordenadas com os registros de ocorrência foram plotadas nos mapas e, assim, os valores foram extraídos. A amplitude altitudinal (Δ) é o resultado da subtração da altitude máxima pela altitude mínima. Da mesma forma, a amplitude latitudinal (Δ) é o resultado da subtração da latitude máxima pela latitude mínima.

- **Análises estatísticas**

Para atingir os quatro objetivos, foram comparados os mapas de adequabilidade futura e presente, sob os diferentes cenários, para cada espécie. Essas comparações permitiram quantificar o ganho ou a redução média de adequabilidade, em função de (1) mudanças climáticas, isoladamente; (2) ganho florestal, isoladamente; (3) combinação dos dois processos, sem sinergia; e (4) sinergia entre os dois processos.

Para avaliar se o ganho ou perda de adequabilidade (climática, florestal e ambiental) foram estatisticamente significativos, para o grupo dos anuros como um todo (10 espécies em conjunto), foram realizados os seguintes procedimentos. Primeiro, para cada espécie, foi calculada cada adequabilidade média no presente e cada adequabilidade média no futuro, considerando todos os *pixels* da área de distribuição da espécie. Segundo, para cada espécie, foi calculada a diferença entre a adequabilidade média no futuro e a adequabilidade média no presente (*i.e.* a mudança de adequabilidade), sendo que valores positivos indicam ganho de adequabilidade. Assim, foram obtidos 10 valores de mudança de cada adequabilidade, um por espécie. Finalmente, foi aplicado um teste-t de uma amostra para os 10 valores, avaliando se estes diferiam significativamente de 0.

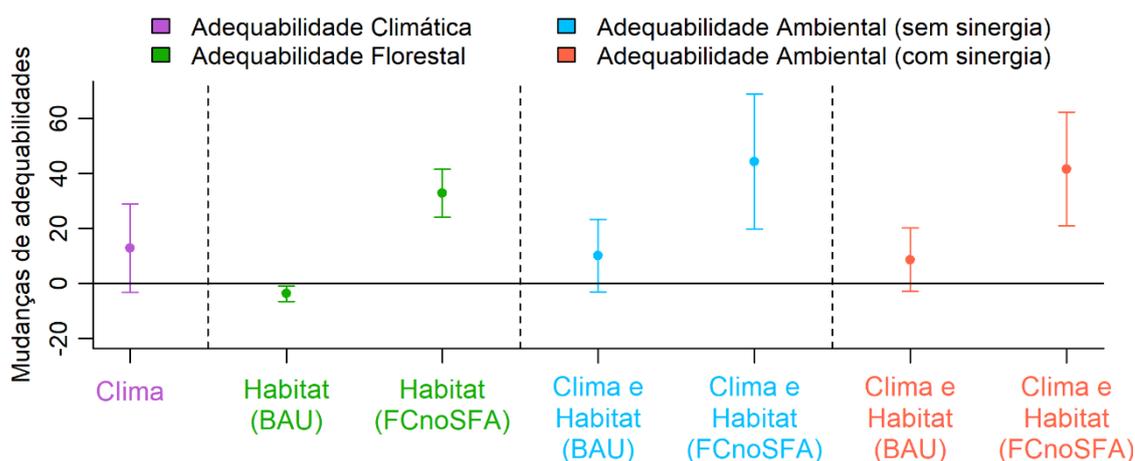
2 RESULTADOS

2.1 Efeitos gerais sobre as 10 espécies de anuros em conjunto

Considerando as 10 espécies de anuros em conjunto, a mudança de adequabilidade climática entre o presente e o futuro não foi significativa ($t= 1.55$, $gl= 9$, $p= 0.16$; em roxo na Figura 1). Por outro lado, a mudança de adequabilidade de habitat foi reduzida significativamente no cenário BAU ($t= - 2.62$, $gl= 9$, $p= 0.03$), e aumentou significativamente no cenário FCnoSFA ($t= 7.3147$, $gl= 9$, $p= < 0.001$; em verde na Figura 1).

A mudança de adequabilidade ambiental sem sinergia não foi significativa no cenário BAU ($t= 1.49$, $gl= 9$, $p= 0.17$), mas aumentou significativamente no cenário FCnoSFA ($t= 3.54$, $gl= 9$, $p= 0.006$; em azul na Figura 1). Da mesma forma, a mudança de adequabilidade ambiental com sinergia não foi significativa no cenário BAU ($t= 1.45$, $gl= 9$, $p= 0.18$), mas aumentou significativamente no cenário FCnoSFA ($t= 3.95$, $gl= 9$, $p= 0.003$; em laranja na Figura 1).

Figura 1 - Alterações nas adequabilidades climática, florestal e ambiental (total), entre o presente e o ano de 2050, para as 10 espécies de anuros florestais endêmicas da Mata Atlântica.



Legenda: As cores roxo, verde, azul e vermelho representam, respectivamente, as mudanças de: adequabilidade climática, adequabilidade florestal, adequabilidade ambiental sem sinergia e adequabilidade ambiental com sinergia. Valores positivos no eixo y indicam aumento de adequabilidade entre o presente e o futuro (2050); a linha horizontal mostra a ausência de mudança de adequabilidade ($y = 0$). Os pontos representam as mudanças médias entre as 10 espécies, e as barras representam os intervalos de confiança de 95%. Fonte: A autora, 2020.

2.2 Variabilidade de respostas entre as espécies

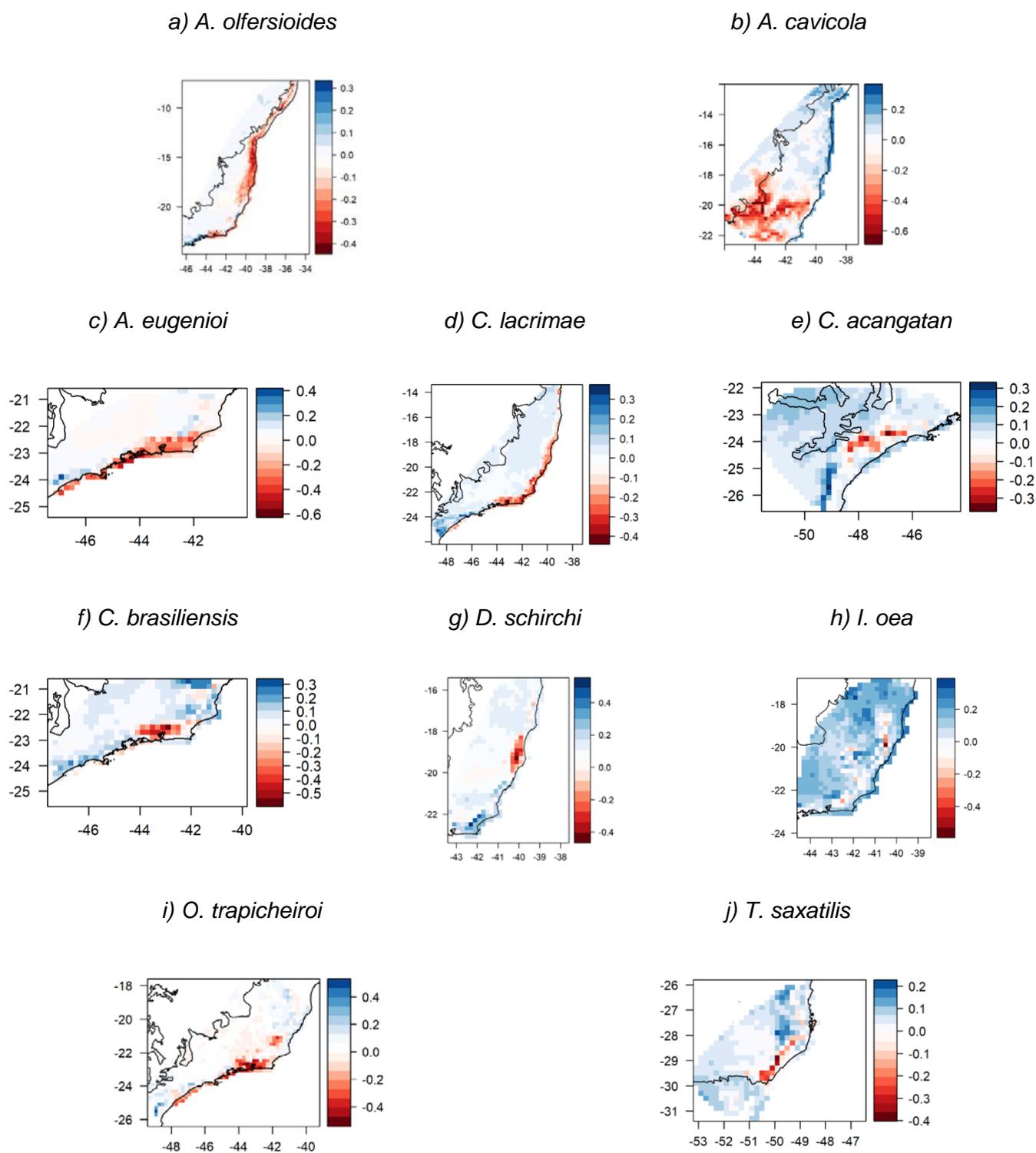
Considerando apenas os efeitos individuais das mudanças climáticas entre o presente e o ano de 2050, houve aumento médio de 12.78% na adequabilidade climática para as 10 espécies, sendo que houve aumento da adequabilidade climática para 7 espécies e redução para 3 espécies (Tabela 1). Houve uma ampla variação entre as 10 espécies, com uma redução de -17.18% de adequabilidade para *Aplastodiscus cavicola* (Figura 2.a; Tabela 1) e um aumento de adequabilidade de 65.00% para *Ischnocnema oea* (Figura 2.h; Tabela 1). Os resultados de mudança de adequabilidade climática para cada modelo de circulação geral (GCM) estão apresentados no Apêndice F (f. 56).

Tabela 1 - Mudança de adequabilidade climática para todas as espécies entre o presente e o ano de 2050.

Espécie	Mudança de adequabilidade climática (%)
<i>Allobates olfersioides</i>	-14.05
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	-17.18
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	-8.78
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	2.89
<i>Cycloramphus acangatan</i>	28.40
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	11.80
<i>Dasylops schirchi</i>	42.79
<i>Ischnocnema oea</i>	65.00
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	4.37
<i>Thoropa saxatilis</i>	12.60
MÉDIA ± DESVIO PADRÃO	12.78 ± 26.08

Legenda: Valores positivos indicam aumento de adequabilidade, e valores negativos indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

Figura 2 - Alterações nas adequabilidades climáticas entre o presente e o ano de 2050, para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica.



Legenda: Valores positivos (azul) indicam aumento de adequabilidade; valores negativos (vermelho) indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

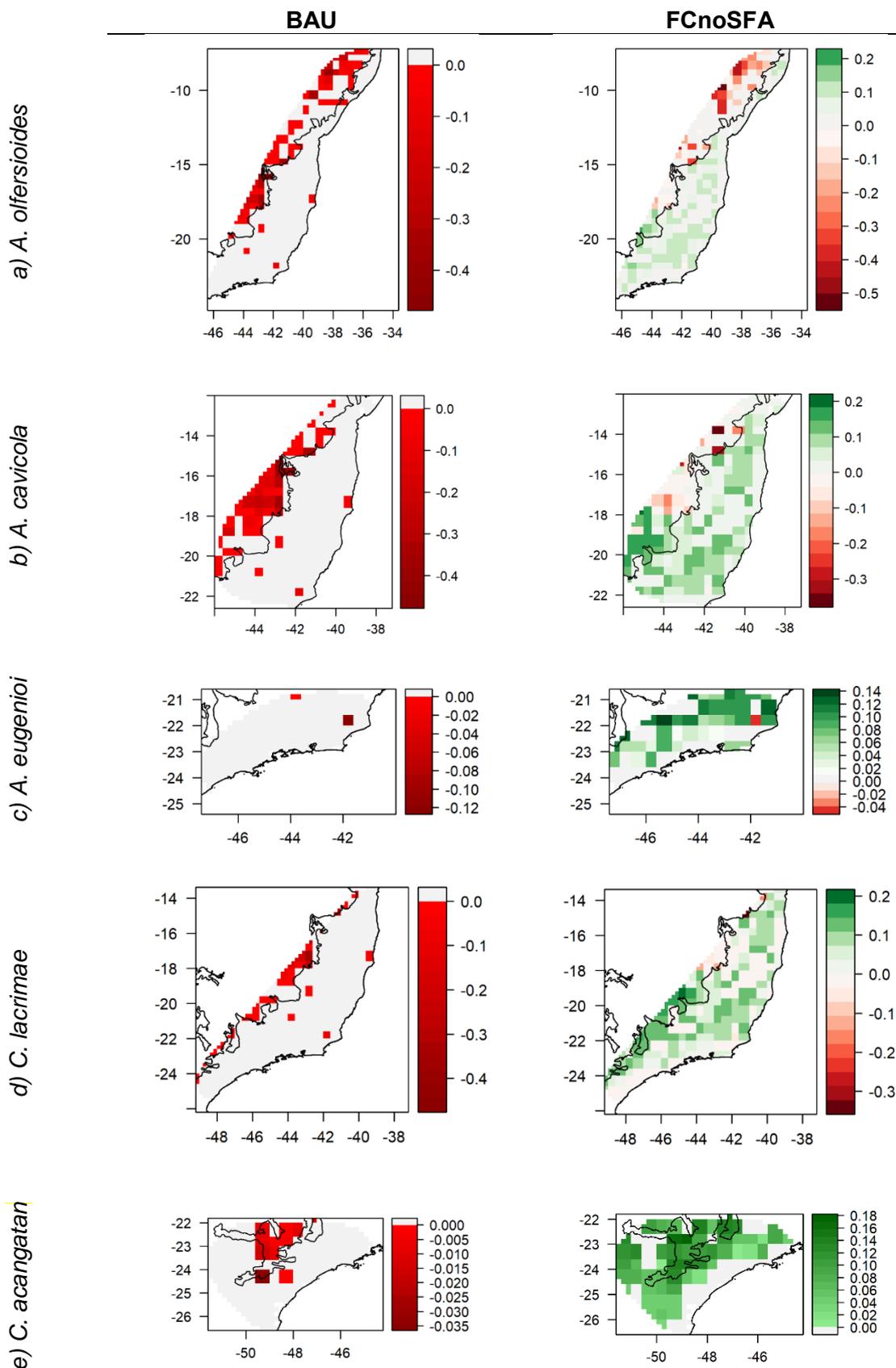
A manutenção do cenário atual de uso do solo (cenário BAU), com leve perda de floresta até 2050, reduziria a adequabilidade florestal em -3.72%, em média, para as 10 espécies (Tabela 2). No entanto, esses efeitos variam em magnitude entre as 10 espécies, entre uma redução de -0.48% de adequabilidade para *Thoropa saxatilis* (Figura 3.j; Tabela 2) e uma redução de -13.45% para *Aplastodiscus cavicola* (Figura 3.b; Tabela 2). Por outro lado, se o Novo Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012) fosse cumprido e a anistia dos pequenos agricultores revogada (cenário FCnoSFA), a adequabilidade florestal aumentaria em 32.76%, em média, para as 10 espécies, variando entre um aumento de 2.83% de adequabilidade para *Allobates olfersioides* (Figura 3.a; Tabela 2) e um aumento de 49.83% de adequabilidade para *Ischnocnema oea* (Figura 3.h; Tabela 2).

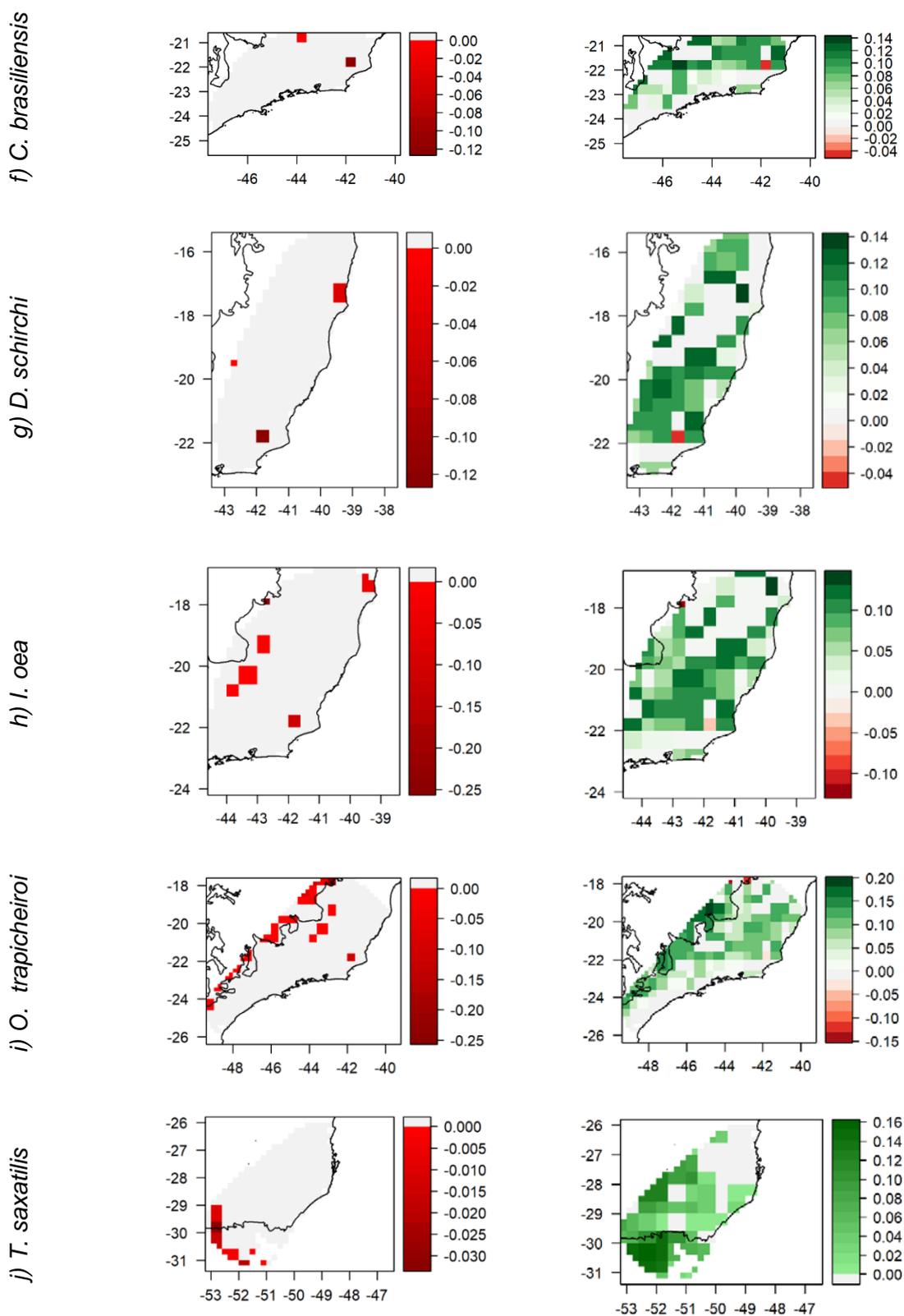
Tabela 2 - Mudanças de adequabilidade de habitat (i.e. cobertura florestal) para as 10 espécies, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal, entre o presente e o ano de 2050.

Espécie	BAU (%)	FCnoSFA (%)
<i>Allobates olfersioides</i>	-10.18	2.83
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	-13.45	23.53
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	-0.96	30.77
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	-4.68	34.68
<i>Cycloramphus acangatan</i>	-1.04	38.32
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	-0.90	33.51
<i>Dasypops schirchi</i>	-1.36	45.95
<i>Ischnocnema oea</i>	-1.73	49.83
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	-2.46	46.66
<i>Thoropa saxatilis</i>	-0.48	21.50

Legenda: Valores positivos indicam aumento de adequabilidade, e valores negativos indicam redução de adequabilidade. O cenário BAU prevê que a cobertura florestal da Mata Atlântica permanecerá quase inalterada, com leve perda de floresta. Por outro lado, o cenário FCnoSFA prevê que vai ocorrer a restauração das áreas de reserva legal das propriedades rurais, de acordo com o Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012). Fonte: A autora, 2020.

Figura 3 - Alterações nas adequabilidades florestais para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.





Legenda: Valores positivos (verde) indicam aumento de adequabilidade; valores negativos (vermelho) indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

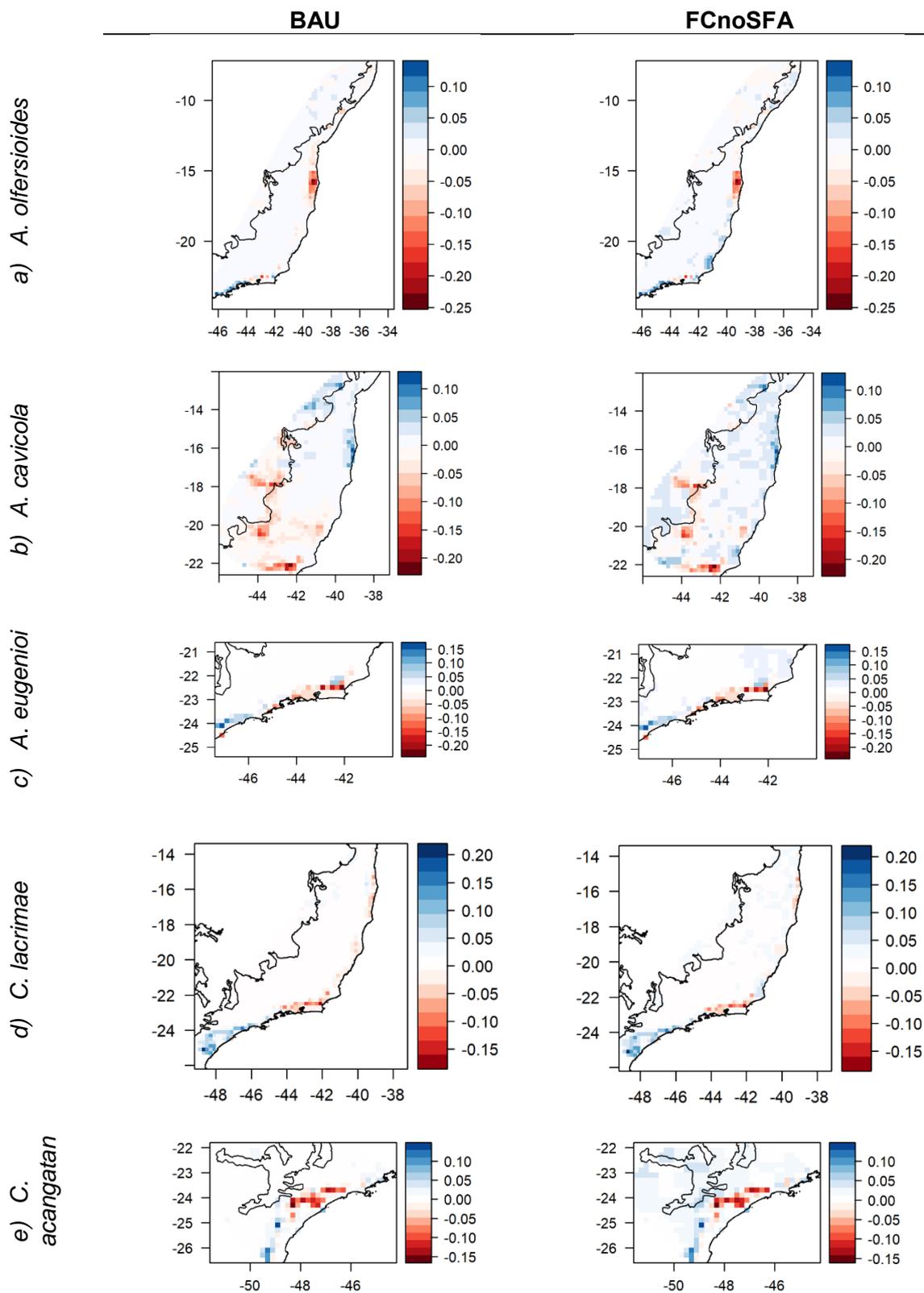
O cenário florestal BAU combinado com o cenário climático RCP 8.5, sem sinergia, aumentaria a adequabilidade ambiental em 10.08%, em média, para as 10 espécies, com 7 espécies apresentando uma resposta positiva e 3 uma resposta negativa (Tabela 3). Houve uma grande variação nas respostas das 10 espécies, de uma redução de -18.78% de adequabilidade para *Aplastodiscus cavicola* (Figura 4.b; Tabela 3) a um aumento de adequabilidade de 49.14% para *Ischnocnema oea* (Figura 4.h; Tabela 3). Entretanto, o cenário florestal FCnoSFA combinado com o cenário climático RCP 8.5, sem sinergia, aumentaria a adequabilidade ambiental em 44.29%, em média, para as 10 espécies. Neste cenário todas as espécies apresentam uma resposta positiva, variando entre um aumento de 4.48% de adequabilidade para *Allobates olfersioides* (Figura 4.a; Tabela 3) a um aumento de 122.99% para *Ischnocnema oea* (Figura 4.h; Tabela 3).

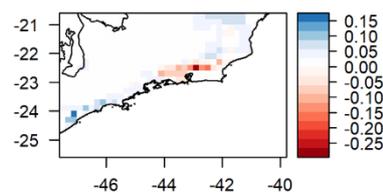
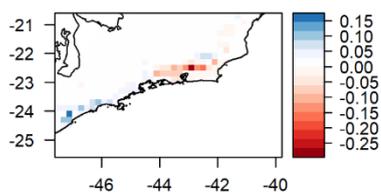
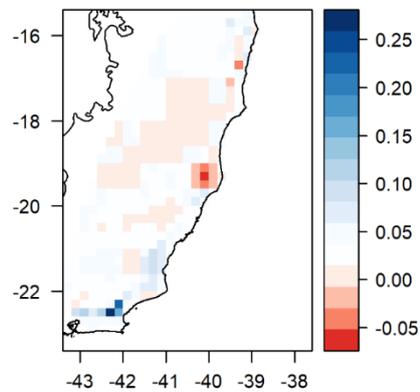
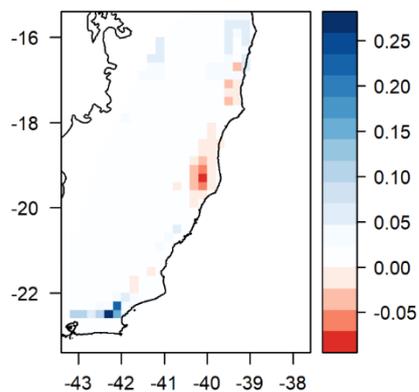
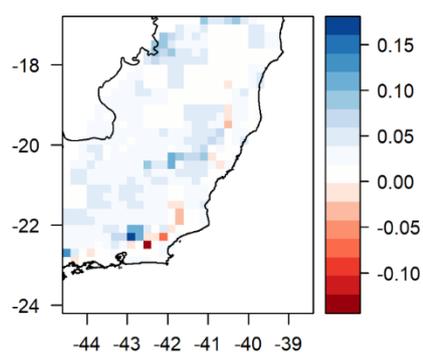
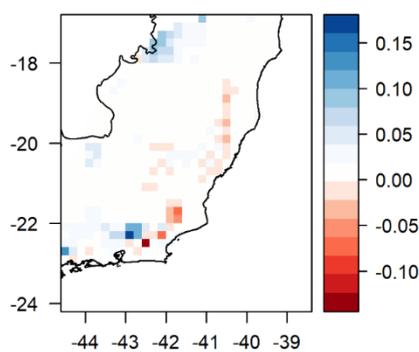
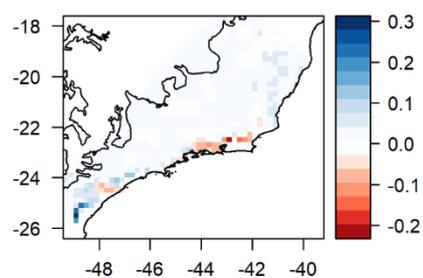
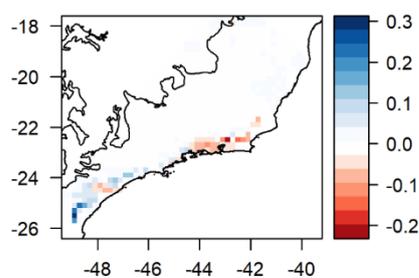
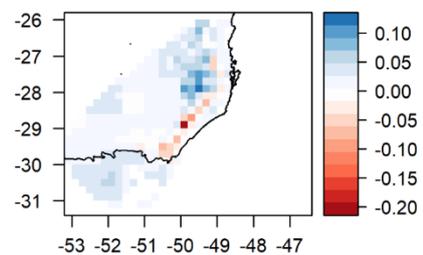
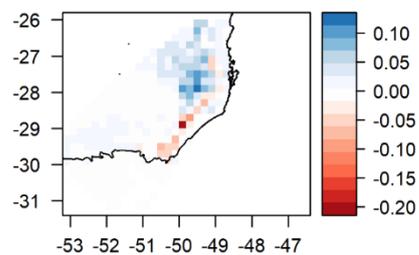
Tabela 3 - Mudanças de adequabilidade de ambiental (adequabilidade climática X adequabilidade florestal), sem sinergia, para as 10 espécies de anfíbios endêmicas da Mata Atlântica, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.

Espécie	BAU (%)	FCnoSFA (%)
<i>Allobates olfersioides</i>	-11.33	4.48
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	-18.78	15.23
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	-1.60	18.66
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	12.88	39.76
<i>Cycloramphus acangatan</i>	2.91	31.07
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	6.46	30.62
<i>Dasylops schirchi</i>	42.85	108.86
<i>Ischnocnema oea</i>	49.14	122.99
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	6.51	41.30
<i>Thoropa saxatilis</i>	11.72	29.92

Legenda: Valores positivos indicam aumento de adequabilidade, e valores negativos indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

Figura 4 - Alterações nas adequabilidades ambientais sem sinergia para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.



f) *C. brasiliensis*g) *D. schirchi*h) *I. oea*i) *O. trapicheiroi*j) *T. saxatilis*

Legenda: Valores positivos (azul) indicam aumento de adequabilidade; valores negativos (vermelho) indicam reduao de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

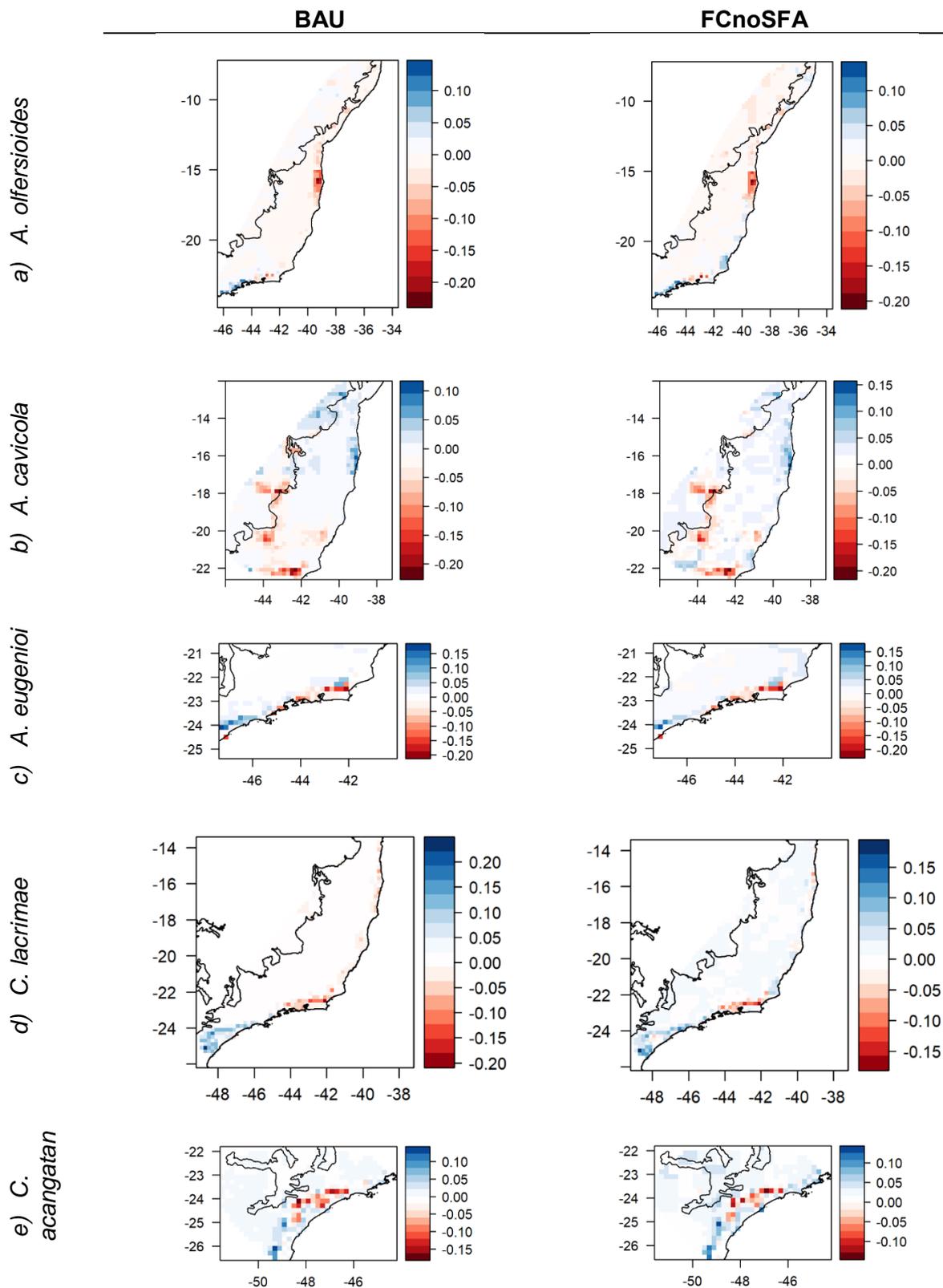
O cenário florestal BAU combinado com o cenário climático RCP 8.5, com sinergia, aumentaria a adequabilidade ambiental em 8.54%, em média, para as 10 espécies, com 8 mostrando respostas positivas e 2 repostas negativas (Tabela 4). Esses efeitos variam muito entre as 10 espécies, entre uma redução de -23.58 de adequabilidade para *Aplastodiscus cavicola* (Figura 5.b; Tabela 4) a um aumento de adequabilidade de 42.81% para *Dasylops schirchi* (Figura 5.g; Tabela 4). Entretanto, o cenário florestal FCnoSFA combinado com o cenário climático RCP 8.5, com sinergia, aumentaria a adequabilidade ambiental em 41.55%, em média, para as 10 espécies. Neste cenário todas as espécies apresentam uma resposta positiva, variando entre um aumento de 4.16% de adequabilidade para *Allobates olfersioides* (Figura 5.a; Tabela 4) a um aumento de 108.01% para *Dasylops schirchi* (Figura 5.g; Tabela 4).

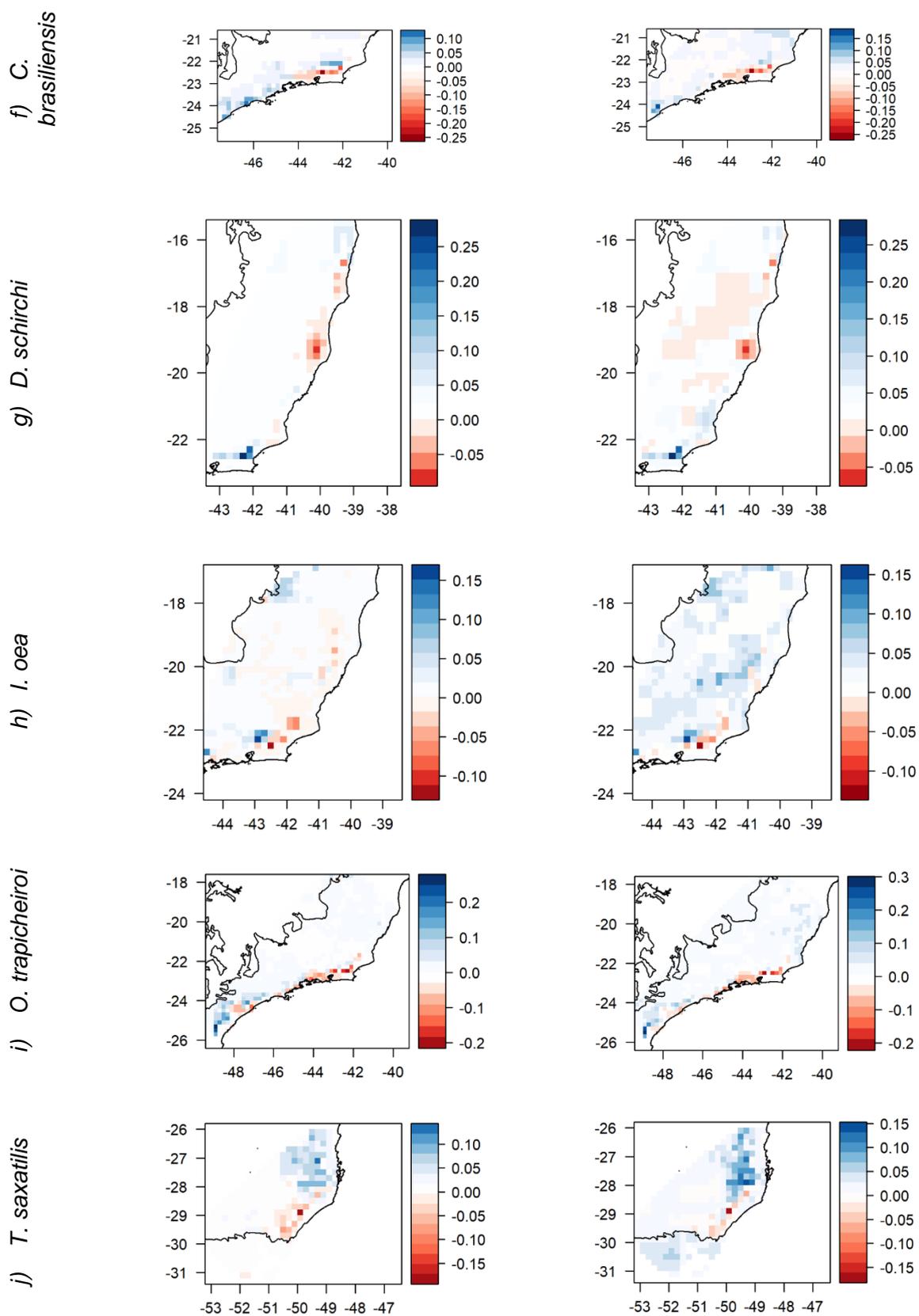
Tabela 4 - Mudanças de adequabilidade ambiental com sinergia (adequabilidade climática X adequabilidade florestal) para as 10 espécies, nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.

Espécie	BAU (%)	FCnoSFA (%)
<i>Allobates olfersioides</i>	- 10.78	4.16
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	-23.58	20.64
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	4.33	16.23
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	7.22	26.73
<i>Cycloramphus acangatan</i>	0.48	44.82
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	9.61	25.76
<i>Dasylops schirchi</i>	42.81	108.01
<i>Ischnocnema oea</i>	24.30	92.24
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	8.00	39.10
<i>Thoropa saxatilis</i>	23.06	37.82
MÉDIA ± DESVIO PADRÃO	8.54 ± 18.63	41.55 ± 33.27

Legenda: Valores positivos indicam aumento de adequabilidade, e valores negativos indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

Figura 5 - Alterações nas adequabilidades ambientais com sinergia para as 10 espécies de anuros florestais e endêmicos da Mata Atlântica nos dois cenários de mudanças de cobertura florestal (BAU e FCnoSFA), entre o presente e o ano de 2050.





Legenda: Valores positivos (azul) indicam aumento de adequabilidade; valores negativos (vermelho) indicam redução de adequabilidade. Fonte: A autora, 2020.

3 DISCUSSÃO

3.1 Adequabilidade climática

De maneira geral, é previsto que, com o aumento de temperatura e diminuição da precipitação, os anfíbios percam adequabilidade climática no futuro (hipótese 1), reduzindo as suas distribuições geográficas e abundâncias e, em alguns casos, podendo até ser extintos (Haddad, Giovanelli & Alexandrino, 2008). Entretanto, neste estudo, a hipótese 1 foi refutada. Algumas características intrínsecas aos anfíbios os tornam muito vulneráveis à dessecação. O tegumento dos anfíbios é fino e permeável, e boa parte da respiração é realizada através da pele (respiração cutânea), assim, esta precisa estar constantemente úmida. Sendo assim, esta classe tende a apresentar período de atividade noturno e evitar altas temperaturas (Haddad, Giovanelli & Alexandrino, 2008).

Considerando todas as 10 espécies em conjunto, a mudança de adequabilidade climática entre o presente e o futuro (2050) não foi significativa, uma vez que houve grande variabilidade entre as espécies. Das 10 espécies estudadas, sete sofreram ganho de adequabilidade climática, enquanto apenas três sofreram redução. Um estudo de modelagem realizado na Mata Atlântica (Lemes, Melo & Loiola, 2014) estimou que o número de espécies de anfíbios dentro de áreas de proteção (APs) deve diminuir em decorrência das mudanças climáticas. O que condiz com diversos estudos que estimaram a área de ocorrência para anfíbios (*e.g.*, Araújo, Thuiller & Pearson, 2006; Blaustein *et al.*, 2010) e para diferentes táxons (*e.g.*, Araújo *et al.*, 2004; Sinervo *et al.*, 2010; Nadeau & Fuller, 2016) em diversos lugares do mundo. Entretanto, outros estudos realizados com anfíbios na América do Sul estimaram que a adequabilidade climática futura pode expandir, contrair (*e.g.*, Haddad, Giovanelli & Alexandrino, 2008; Costa, Carnaval & Toledo, 2012; Schivo *et al.*, 2019) ou ainda permanecer a mesma (Zank *et al.*, 2014) dependendo da espécie estudada. Sendo assim, ainda não há um padrão claro do efeito das mudanças climáticas sobre os anuros.

3.2 Adequabilidade florestal

No cenário pessimista (BAU), considerando todas as espécies em conjunto, há uma perda de adequabilidade florestal (adequabilidade de habitat) significativa. Isto porque, para o bioma Mata Atlântica, este cenário assume que a cobertura florestal permanecerá aproximadamente a mesma do presente (considerando o ano de 2000), sem o controle efetivo do desmatamento e sem políticas públicas de reflorestamento para restaurar áreas desmatadas (Câmara *et al.*,2015).

Por outro lado, considerando o cenário otimista (FCnoSFA), a adequabilidade de habitat aumentou significativamente para os anfíbios, corroborando a hipótese 2. Neste cenário, além da implementação do Novo Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012), com o controle do desmatamento ilegal e a aplicação da Lei da Mata Atlântica (Lei 11.428 / 2006), ainda exige que os pequenos agricultores restaurem as áreas de reserva legal das propriedades rurais que foram desmatadas antes do código ser estabelecido (Câmara *et al.*,2015).

Para a Mata Atlântica, apenas o cenário *Forest Code* (FC; cenário que assume a implementação do Código Florestal Brasileiro – Lei 12.651/2012) do GLOBIOM não é o suficiente para manutenção da biodiversidade (Câmara *et al.*, 2015). Segundo Câmara *et al.* (2015), este cenário é muito similar ao cenário BAU, ou seja, não há ganho de cobertura florestal para este bioma. Sendo assim, é necessário revogar a anistia dos pequenos agricultores (cenário FCnoSFA) para aumentar a quantidade de habitat adequado para a ocorrência de espécies. Como as espécies estudadas são florestais (Haddad *et al.*, 2013), a quantidade de cobertura florestal é um *proxy* de adequabilidade de habitat. Sendo a perda de habitat a principal causa de extinção de espécies no mundo (Fahrig 2003; Püttker *et al.*,2015), a restauração de áreas florestais é fundamental para aumentar a quantidade de habitat para estas e outras espécies dependentes de floresta.

3.3 Adequabilidades ambientais

Para todos os 10 anuros florestais, como um grupo, os efeitos combinados e sinérgicos foram muito similares. Essa similaridade provavelmente decorre do fato de que o efeito sinérgico foi considerado apenas em relação a uma variável (=

temperatura média anual), uma vez que o efeito da cobertura florestal sobre a temperatura local já foi quantificado (Prevedello *et al.*, 2019). No caso dos anfíbios, eles podem responder tanto à precipitação quanto à temperatura (Ospina *et al.*, 2013). Em regiões florestais, o desmatamento pode ter um impacto direto sobre a precipitação (Berbet & Costa, 2003), ou seja, uma maior quantidade de floresta pode aumentar a precipitação. Entretanto, como não há estudos quantificando esse efeito em escalas locais, não é possível modelar a sinergia para as outras variáveis selecionadas.

No cenário BAU, a adequabilidade ambiental total, tanto sem quanto com sinergia, não difere significativamente de zero, ou seja, não é modificada substancialmente do presente para o futuro. Isto porque a mudança na cobertura florestal na Mata Atlântica é muito pequena, permanecendo com aproximadamente 17 Mha no futuro (2050; Câmara *et al.*, 2015). Este efeito poderia ser maior neste mesmo cenário em outros biomas, como na Amazônia, por exemplo, que poderá perder aproximadamente 60 Mha de floresta até 2050 neste mesmo cenário (Câmara *et al.*, 2015). Já no cenário FCnoSFA, a adequabilidade ambiental total irá aumentar, em função do ganho substancial de aproximadamente 7 Mha de floresta, que seriam recuperados para compensar desmatamentos ilegais anteriores (Câmara *et al.*, 2015), corroborando a hipótese 3.

Para as três espécies que perderam adequabilidade climática no futuro (*Allobates olfersioides*, *Aplastodiscus cavicola* e *Aplastodiscus eugenioi*), o ganho de floresta pode compensar o efeito negativo das mudanças climáticas, tanto com quanto sem o efeito sinérgico, corroborando a hipótese 4. Em outras palavras, a redução da área climaticamente adequada, causada pelas mudanças climáticas, seria compensada pelo aumento da área de habitat adequado, resultando em ganho final na área de ocorrência das espécies. Esse resultado ilustra novamente a importância do cumprimento do Novo Código Florestal Brasileiro (Lei 12.651/2012) e de políticas públicas para restaurar a cobertura florestal na Mata Atlântica (e.g., a revogação da anistia dos pequenos produtores), como sugerido no cenário FCnoSFA (Câmara *et al.*, 2015).

3.4 Diferenças de respostas entre as espécies

As possíveis ameaças (e.g., perda de habitat, mudanças climáticas) que provocam o declínio de espécies podem variar de acordo com a região geográfica (Blaustein *et al.*, 2010). No caso dos anfíbios, essas ameaças podem variar também entre as espécies, uma vez que os anfíbios podem apresentar diferentes tipos de resposta de acordo com os seus estágios de vida (e.g., girino, imago, adulto; Blaustein *et al.*, 2010). Em termos de adequabilidade de habitat, todas as 10 espécies responderam de forma muito parecida, com leve perda para todas no cenário BAU e ganho substancial para todas no cenário FCnoSFA, como era previsto (hipótese 2). Costa *et al.* (2018) constataram que o aumento de cobertura florestal pode expandir a área de ocorrência de diversas espécies dependentes de floresta, o que reforça o padrão claro encontrado no presente estudo. No entanto, em termos de adequabilidade climática, houve muita variabilidade entre as espécies (desvio padrão de $\pm 26,08$), com uma redução de -17,18% de adequabilidade para *Aplastodiscus cavicola* a um aumento de adequabilidade de 65,00% para *Ischnocnema oea*. Como consequência, houve também muita variação de adequabilidade ambiental, com ou sem sinergia. Esta variabilidade de resposta ao clima não está relacionada à altitude, à latitude ou às características intrínsecas (período de atividade, hábito, tamanho, sítio de canto ou modo reprodutivo) das espécies (anexos A e B, f. 57 e 58).

Como as espécies de anfíbios são ectotérmicas, esta variabilidade de respostas pode ser explicada, por exemplo, pelas restrições fisiológicas distintas entre elas (Sinervo *et al.*, 2010). Haddad, Giovanelli & Alexandrino (2008) mostraram que anfíbios que apresentam modos reprodutivos mais basais, com ovos depositados em água parada (e.g., *Chiasmocleis lacrimae*, *Dasylops schirchi* e *Ololygon trapicheiroi*) e espécies com especializações reprodutivas, com deposição de ovos em chão de mata e desenvolvimento direto (e.g., *Ischnocnema oea*), podem ser mais resistentes às mudanças climáticas. No presente estudo, todas as espécies que apresentam estes modos reprodutivos obtiveram ganho de adequabilidade climática, e, conseqüentemente ganho de adequabilidade ambiental, no futuro. Katzenberger *et al.* (2012) demonstraram que espécies com baixa tolerância ao aquecimento (e.g., anfíbios de áreas abertas) podem apresentar maior risco de

extinção, uma vez que, possivelmente, já estão vivendo no seu limite máximo de temperatura. Neste estudo, foram utilizados apenas anfíbios anuros florestais, o que pode explicar as respostas positivas da maioria das espécies (70%) em relação ao aumento de temperatura previsto para 2050.

É importante destacar que além dos efeitos diretos do clima sobre os anfíbios, os efeitos indiretos também podem afetar esse táxon. Pounds *et al.* (2006) propuseram que o aumento da temperatura previsto, para muitas regiões, pode propiciar condições ideais para a proliferação do fungo quitrídio (*Batrachochytrium dendrobatidis*). Em outras palavras, a disseminação da quitridiomicose pode estar relacionada às mudanças climáticas. Uma análise global (Scheele *et al.*, 2019) estimou que o declínio de cerca de 500 espécies está associado ao fungo quitrídio nas últimas décadas, das quais 90 foram extintas. Esta análise também indica que anuros de maior tamanho corporal (CRC) têm sido mais afetados pela quitridiomicose. Os anfíbios da Mata Atlântica têm sido amplamente infectados pelo *Batrachochytrium dendrobatidis* (Carnaval *et al.*, 2006), o que ressalta a importância de estudos que correlacionem mudanças climáticas com a proliferação do patógeno. Além disso, o sistema imunológico de diversas espécies de anfíbios pode ser afetado pelas alterações no clima, levando-os a maior susceptibilidade às infecções (Raffel *et al.*, 2006).

Na literatura, há diversos outros efeitos relacionados ao clima que podem afetar os anfíbios de forma negativa, como a alteração na frequência e na taxa de repetição de vocalizações, o que pode implicar em maior custo energético (e.g., Lingnau & Bastos, 2007; Wells, 2007; Haddad, Giovanelli & Alexandrino, 2008), além da alteração no sucesso reprodutivo e na disponibilidade de habitats e alimentos (e.g., Donnelly & Crump, 1998; Haddad, Giovanelli & Alexandrino, 2008). Adicionalmente, todas as 10 espécies de anuros florestais utilizadas como modelo foram afetadas negativamente no cenário BAU. Ou seja, se houver perda de cobertura florestal, estas espécies podem ser prejudicadas. Sendo assim, mesmo que um modelo de distribuição estime um aumento na adequabilidade climática no futuro, este aumento sozinho é insuficiente para determinar como os anfíbios serão afetados pelas mudanças futuras no uso do solo e no clima.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu avançar em termos teóricos, aumentando o conhecimento sobre o padrão de distribuição de espécies no presente e no futuro. Adicionalmente, permitiu avançar em termos aplicados, pois possibilitou o teste do potencial da restauração florestal em compensar as mudanças climáticas, beneficiando espécies endêmicas da Mata Atlântica.

As mudanças climáticas, em geral, irão aumentar a adequabilidade climática para os anfíbios florestais e endêmicos da Mata Atlântica estudados, mas há muita variabilidade entre as espécies. Esse resultado refuta a hipótese inicial de que as mudanças climáticas futuras reduziriam a adequabilidade climática para todas as espécies de anfíbios. A variação de perda ou ganho de adequabilidade climática entre as espécies foi de -17.18%, para *Aplastodiscus cavicola*, até 65.00%, para *Ischnocnema oea*. O efeito das mudanças climáticas pode variar até mesmo entre espécies do mesmo gênero (Zank *et al.*, 2014) e em espécies que apresentam características intrínsecas semelhantes (presente estudo). Devido a esta variabilidade de respostas é necessário considerar as especificidades de cada espécie para propor medidas conservacionistas efetivas, visto que a extinção de apenas uma espécie implica em perda de biodiversidade.

A perda de floresta, prevista no cenário BAU, reduzirá a adequabilidade de habitat para todas as espécies de anfíbios estudadas, enquanto o ganho de floresta, previsto no cenário FCnoSFA, irá aumentar a adequabilidade de habitat para todas elas. Para as espécies *Allobates olfersioides*, *Aplastodiscus cavicola* e *Aplastodiscus eugenioi*, que perderão adequabilidade climática em 2050, o ganho de floresta poderá compensar o efeito negativo das mudanças climáticas, independentemente destes processos atuarem com ou sem sinergia. Assim, esses resultados reforçam a importância do reflorestamento e das políticas de uso do solo para a biodiversidade de anuros florestais da Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS

- AIELLO-LAMMENS, M. E. *et al.* R package “spThin”: Functions for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological models. Versão 0.1.0.1. Disponível em: <<https://CRAN.Rproject.org/package=spThin>>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A. & KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied ecology*. v. 43, n.6, p.1223-1232, Dez. 2006.
- ANDERSON, R. P. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1297, n.1, p. 8–28, 2013.
- ARAÚJO, M. B. & NEW, M. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 22, n.1, p. 42-47, 2007.
- ARAÚJO, M. B. *et al.* Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology*, v. 10, n. 9, p. 1618-1626, 2004.
- ARAÚJO, M. B.; THUILLER, W. & PEARSON, R. G. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography*, v. 33, n. 10, p. 1712–1728, 2006.
- BERBET, M. L. C. & COSTA, M. H. Climate Change after Tropical Deforestation: Seasonal Variability of Surface Albedo and Its Effects on Precipitation Change. *Journal of Climate*. v. 16, n. 12, p. 2099-2104, Jun. 2003.
- BLAUSTEIN, A. R *et al.* Direct and Indirect Effects of Climate Change on Amphibian Populations. *Diversity*, v. 2, n. 2, p. 281-313, Fev. 2010.
- BONAN, G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *science*, v. 320, n. 5882, p.1444-1449, Jun.2008.
- BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 dez. 2006. P. 1.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Revogada pela Lei nº 12.561, de 2012. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 set. 1965, P. 9529.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 mai. 2012. P. 1.

BROOKS, T. M. *et al.* Habitat loss and extinction in the *hotspots* of biodiversity. *Conservation Biology*, v. 16, n. 4, p. 909-923, Ago. 2002.

CÂMARA, G. *et al.* *Modelling land use change in Brazil: 2000–2050*. 1 ed. São José dos Campos, Brasília, Laxenburg, Cambridge: INPE, IPEA, IIASA, UNEP-WCMC, 2015.

CARNAVAL, A. C. O. Q. *et al.* Amphibian chytrid fungus broadly distributed in the Brazilian Atlantic Rain Forest. *Eco Health* v. 3, n. 1, p. 41–48, Mar. 2006.

COSTA, G.C. *et al.* Biome stability in South America over the last 30 kyr: Inferences from long-term vegetation dynamics and habitat modelling. *Global ecology and biogeography*, v. 27, n. 3, p. 285-297, Mar. 2018.

COSTA, T. R. N.; CARNAVAL, A. C. O. Q. & TOLEDO, L. F. Mudanças climáticas e seus impactos sobre os anfíbios brasileiros. *Revista da Biologia*, v. 8, p. 33–37, Abr. 2012.

DILTS, T.E. *et al.* Multiscale connectivity and graph theory highlight critical areas for conservation under climate change. *Ecological Applications*, v. 26, n. 4, p.1223-1237, Jun. 2016.

DINIZ-FILHO, J. A. *et al.* Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate changes. *Ecography*, v. 32, n. 6, p. 1–10, Dez. 2009.

DONNELLY, M. A. & CRUMP, L. Potential effects of climate change on two neotropical amphibian assemblages. In: *Potential impacts of climate change on tropical forest ecosystems*, 1 ed., Netherlands: Springer, 1998. p. 401-421.

ELITH, J. & GRAHAM, C.H. Do they? How do they? Why do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography*, v. 32, n.1, p. 66–77, Fev. 2009.

Eta Model. Disponível em: <<http://etamodel.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 03 fev. 2019.

EWERS, R. M. & BANKS-LEITE, C. Fragmentation impairs the microclimate buffering effect of tropical forests. *PLOS ONE*, v. 8, n. 3, p. e58093, Mar. 2013.

FAHRIG, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual review of ecology, evolution and systematics*, v. 34, n. 1, p. 487–515, Nov. 2003

FROST, D.R. *Amphibian Species of the World: An Online Reference*. American Museum of Natural History, New York, USA, 2019. Versão 6.0. Disponível em: <<http://research.amnh.org/vz/herpetology/amphibia/index.php>>. Acesso em: 31. Mar. 2019.

GARDNER, T. Declining amphibian populations a global phenomenon in conservation biology. *Animal Biodiversity and Conservation*, v. 24, n. 2, p. 52-55, 2001.

Global Biodiversity Information Facility (GBIF): Free and Open Access to Biodiversity Data. 2016. Disponível em: <www.gbif.org/>. Acesso em: 09 mar. 2018.

Global Biosphere Management Model (GLOBIOM). Disponível em: <<https://www.globiom.org/>>. Acesso em: 03 mai. 2018.

GOUVEIA, S. F. *et al.* Climate and land use changes will degrade the configuration of the landscape for titi monkeys in Brazil. *Global change biology*, v. 22, n. 6, p. 2003–2012, Jun. 2016.

HADDAD, C. F. B. *et al.* *Guia dos anfíbios da Mata Atlântica: diversidade e biologia*. 1 ed. São Paulo: Anolis Books Editora, 2013.

HADDAD, C. F. B.; GIOVANELLI, J. G. R. & ALEXANDRINO, J. M. B. O aquecimento global e seus efeitos na distribuição e declínio dos anfíbios. In: BUCKERIDGE, M. (Org.). *Biologia & mudanças climáticas no Brasil*. 1 ed. São Carlos: RiMa Editora, 2008. v. 1, p. 195-206.

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

HerpNet. Disponível em: <<http://www.herpnet.org/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

HIJMANS, R. J. *et al.* *R package "dismo": Species distribution modeling*. 2017. Versão 1.1-4. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/index.html>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

HIJMANS, R.J. *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, Dez. 2005.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2019. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

IUCN 2019. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Versão 2019-3. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org/>>. Acesso em: 08. mai. 2019.

JETZ, W. *et al.* Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS Biology*, v. 5, n. 6, p. 1211-1219, Jun. 2007.

KATZENBERGER, M. *et al.* Tolerância e sensibilidade térmica em anfíbios. *Revista da Biologia*, v. 8, p. 25–32, Abr. 2012.

LEMES, P.; MELO, A. S. & LOYOLA, R. D. Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest. *Biodiversity and Conservation*, v. 23, n. 2, p. 357–368, Fev. 2014.

LI, Y. *et al.* Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature communications*, v. 6, p. 6603, Mar. 2015.

LINGNAU, R. & BASTOS, R. P. Vocalizations of the Brazilian torrent frog *Hylodes heyeri* (Anura: Hylodidae): Repertoire and influence of air temperature on advertisement call variation. *Journal of Natural History*, v. 41, n. 17–20, p. 1227–1235, Jul. 2007.

LIRA, P.K. *et al.* Land-use and land-cover change in Atlantic Forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, v. 278, p. 80-89, Ago. 2012.

LOBO, J. M. & TOGNETTI, M. F. Exploring the effect of quantity and location of pseudoabsences and sampling biases on the performance of distribution models with limited point occurrence data. *Journal for Nature Conservation*, v. 19, n. 1, p. 1–7, Jan. 2011.

LOISELLE, B. A. *et al.* Assessing the impact of deforestation and climate change on the range size and environmental niche of bird species in the Atlantic forests, Brazil. *Journal of Biogeography*, v. 37, n. 7, p. 1288–1301, Jul. 2010.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, n. 6772, p. 853-858, Fev. 2000.

NADEAU, C. & FULLER, A. K. Combining landscape variables and species traits can improve the utility of climate change vulnerability assessments. *Biological Conservation*, v. 202, p. 30–38, Out. 2016.

OSPINA, O. E. *et al.* Variable response of anuran calling activity to daily precipitation and temperature: implications for climate change. *Ecosphere*, v. 4, n. 4, p. 1-12, Abr. 2013.

PACIFICI, M. *et al.* Assessing species vulnerability to climate change. *Nature climate change*, v. 5, n. 3, p. 215–24, Mar. 2015.

PETERSON, A. T. *et al.* *Ecological niches and geographical distributions* (MPB-49). Princeton: Princeton University Press, 2011.
Planejamento Estratégico: Pacto pela Restauração da Mata Atlântica. 2017.
 Disponível em: <www.pactomataatlantica.org.br/> Acesso em: 18 abr. 2018.

POUNDS, J. A. *et al.* Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature*, v. 439, n. 7073, p. 161–167, Jan. 2006.

PREVEDELLO, J. *et al.* Impacts of forestation and deforestation on local temperature across the globe. *PLoS one*, v. 14, n. 3, p. e0213368, Mar. 2019.

PÜTTKER, T. *et al.* Immigration rates in fragmented landscapes—empirical evidence for the importance of habitat amount for species persistence. *PLoS One*, v. 6, n. 11, p. e27963, Nov. 2011.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Versão 3.6.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

RAFFEL, T. R. *et al.* Negative effects of changing temperature on amphibian immunity under field conditions. *Functional Ecology*, v.20, n. 5, p. 819–828, Out. 2006.

REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in ecology and conservation*, v. 16, n. 4, p. 208-214, Out. 2018.

RIAHI, K. *et al.* RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, v. 109, n. 1-2, p.33, Nov. 2011.

RIBEIRO, M. C. *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, Jun. 2009.

RUDEL, T.K. *et al.* Forest transitions: towards a global understanding of land use change. *Global environmental change*, v. 15, n. 1, p.23-31, Abr. 2005.

SCHEELE, B. C. *et al.* Amphibian fungal panzootic causes catastrophic and ongoing loss of biodiversity. *Science*, v. 363, n. 6434, p.1459-1463, Mar. 2019.

SCHIVO, F. *et al.* Distribution and richness of amphibians under different climate change scenarios in a subtropical region of South America. *Applied geography*, v. 103, p.70-89, Fev. 2019.

SINERVO, B. *et al.* Erosion of lizard diversity by Climate change and altered thermal niches. *Science*, v. 328, n. 5980, p. 894–899, Mai. 2010

Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBR). Disponível em: <<https://www.sibbr.gov.br/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

speciesLink. Disponível em: <<http://splink.cria.org.br/>>. Acesso em: 23 mar. 2018.

STEFFEN, W. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, v. 347, n. 6223, p.1259855, Fev.2015.

STUART, S. N. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, v. 306, n. 5702, p. 1783–1786, Dez. 2004.

VAN VUUREN, D. P. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. *Climate Change*, v. 109, n. 1-2, p. 5, Nov. 2011.

VANCINE, M.H. *et al.* ATLANTIC AMPHIBIANS: a data set of amphibian communities from the Atlantic Forests of South America. *Ecology*, v. 99, n. 7, p.1692-1692, Jul. 2018.

WEI, T. &SIMKO, V. *R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix.* Versão 0.84. 2017. Disponível em: <<https://github.com/taiyun/corrplot>>. Acesso em: 19 mai. 2018.

WELLS, K. D. *The ecology and behavior of amphibians.* University of Chicago, 2007.

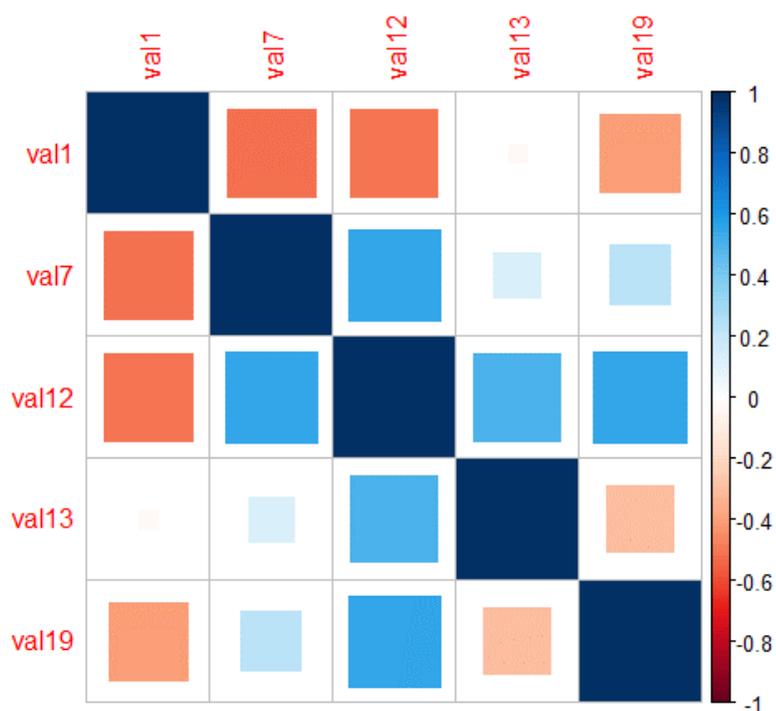
WorldClim – Global Climate Data: Free climate data for ecological modeling and GIS. Versão 1.4. Disponível em: <<http://www.worldclim.org/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

ZANK, C. *et al.* Climate change and the distribution of neotropical red-bellied toads (*Melanophryniscus*, Anura, Amphibia): How to prioritize species and populations? *PLoSOne*, v. 9, n. 4, p. e94625, Abr. 2014.

APÊNDICE A – Registros de ocorrência das 10 espécies após a limpeza dos dados.

Espécies	Registros de ocorrência
<i>Allobates olfersioides</i>	76
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	51
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	54
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	101
<i>Cycloramphus acangatan</i>	43
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	56
<i>Dasylops schirchi</i>	15
<i>Ischnocnema oea</i>	38
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	109
<i>Thoropa saxatilis</i>	20
Total de registros=	563

APÊNDICE B – Correlação entre as variáveis bioclimáticas selecionadas gerada a partir da Matriz de Correlação de Pearson. A correlação entre as variáveis é maior quanto mais próxima de 1 (tons azuis) e de -1 (tons vermelhos). A numeração das variáveis bioclimáticas segue o padrão da fonte dos dados (<https://www.worldclim.org>).



APÊNDICE C – Valores de *True Skill Statistic* (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral CANESM2.

Espécies	<i>BIOCLIM</i>	<i>GLM</i>	<i>MaxEnt</i>	<i>Random</i>	<i>SVM</i>	Média dos 5
	TSS	TSS	TSS	<i>Forests</i> TSS	TSS	algoritmos TSS
<i>Allobates olfersioides</i>	0,69	0,81	0,85	0,92	0,88	0,83
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	0,70	0,86	0,89	0,94	0,90	0,86
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	0,75	0,90	0,88	0,95	0,94	0,88
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	0,82	0,91	0,93	0,95	0,94	0,91
<i>Cycloramphus acangatan</i>	0,73	0,82	0,87	0,94	0,88	0,85
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	0,66	0,82	0,86	0,96	0,94	0,85
<i>Dasypops schirchi</i>	0,74	0,93	0,94	0,92	0,89	0,88
<i>Ischnocnema oea</i>	0,59	0,46	0,69	0,91	0,80	0,69
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	0,76	0,85	0,84	0,90	0,89	0,85
<i>Thoropa saxatilis</i>	0,67	0,83	0,75	0,86	0,90	0,80

APÊNDICE D – Valores de *True Skill Statistic* (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral HADGEM2ES.

Espécies	<i>BIOCLIM</i>	<i>GLM</i>	<i>MaxEnt</i>	<i>Random</i>	<i>SVM</i>	Média dos 5
	TSS	TSS	TSS	<i>Forests</i> TSS	TSS	algoritmos TSS
<i>Allobates olfersioides</i>	0,78	0,86	0,88	0,92	0,90	0,87
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	0,66	0,87	0,90	0,94	0,92	0,86
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	0,79	0,89	0,87	0,93	0,92	0,88
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	0,83	0,93	0,93	0,94	0,94	0,92
<i>Cycloramphus acangatan</i>	0,74	0,78	0,87	0,92	0,90	0,84
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	0,66	0,81	0,77	0,91	0,92	0,81
<i>Dasypops schirchi</i>	0,74	0,93	0,92	0,92	0,95	0,89
<i>Ischnocnema oea</i>	0,52	0,59	0,69	0,89	0,80	0,70
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	0,70	0,84	0,80	0,93	0,83	0,82
<i>Thoropa saxatilis</i>	0,70	0,87	0,68	0,82	0,85	0,78

APÊNDICE E – Valores de *True Skill Statistic* (TSS) para todos os algoritmos e espécies, utilizando o modelo de circulação geral MIROC5.

Espécies	<i>BIOCLIM</i>	<i>GLM</i>	<i>MaxEnt</i>	<i>Random Forests</i>	<i>SVM</i>	Média dos 5 algoritmos
	TSS	TSS	TSS	TSS	TSS	TSS
<i>Allobates olfersioides</i>	0,69	0,85	0,87	0,90	0,86	0,83
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	0,47	0,87	0,85	0,91	0,90	0,80
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	0,79	0,87	0,90	0,94	0,90	0,88
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	0,74	0,92	0,92	0,94	0,95	0,90
<i>Cycloramphus acangatan</i>	0,80	0,77	0,89	0,92	0,88	0,85
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	0,70	0,81	0,88	0,93	0,89	0,84
<i>Dasypops schirchi</i>	0,71	0,95	0,96	0,92	0,94	0,90
<i>Ischnocnema oea</i>	0,49	0,50	0,64	0,84	0,82	0,66
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	0,66	0,76	0,82	0,92	0,83	0,80
<i>Thoropa saxatilis</i>	0,66	0,75	0,74	0,86	0,83	0,77

APÊNDICE F – Adequabilidade climática para todas as espécies para todos os General Circulation Models (GCMs) no ano de 2050.

Espécie	CANESM2	HADGEM2ES	MIROC5	Ensemble
<i>Allobates offersioides</i>	-26,83	-11,19	-4,021	-14,05
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	-20,81	-3,49	-25,88	-17,18
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	-16,20	-2,11	-8,52	-8,78
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	-7,08	3,55	11,24	2,89
<i>Cycloramphus acangatan</i>	0,90	56,60	30,20	28,40
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	15,56	24,45	-5,82	11,80
<i>Dasypops schirchi</i>	90,30	22,67	17,61	42,79
<i>Ischnocnema oea</i>	103,86	55,35	35,73	65,00
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	11,98	5,30	-3,83	4,37
<i>Thoropa saxatilis</i>	9,97	14,93	13,04	12,60
MÉDIA	16,16	16,60	5,97	12,78

ANEXO A– Informações gerais sobre as espécies focais.

Ordem	Família	Espécie	Nome popular	Classificação (IUCN)	Bioma	Ocorrência	Distribuição	Altitude mínima	Altitude máxima	Amplitude altitudinal	Latitude mínima	Latitude máxima	Amplitude latitudinal
Anura	Aromobatidae	<i>Allobates otersioides</i>	Sapinho-foguete	Vulnerável	Mata Atlântica	Sudeste	RJ, MG e ES	2,48	1052,41	1049,93	-8,9	-23,00	14,10
Anura	Hylidae	<i>Aplastodiscus cavicola</i>	Perereca	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste	MG e ES	77,77	1266,68	1188,91	-13,77	-20,84	7,07
Anura	Hylidae	<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	Perereca	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste	RJ e SP	2,48	650,85	648,37	-22,4	-23,62	1,22
Anura	Microhylidae	<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	Rãzinha-da-mata	Ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste e Nordeste	RJ, SP, ES e BA	2,48	1114,61	1112,13	-15,17	-24,42	9,25
Anura	Cycloramphidae	<i>Cycloramphus acangatan</i>	Rãzinha-de-corredeira	Vulnerável	Mata Atlântica	Sudeste	SP	12,00	952,71	940,71	-23,60	-24,96	1,36
Anura	Cycloramphidae	<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	Rãzinha-de-corredeira	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste	RJ	2,48	1289,20	1286,72	-22,23	-23,81	1,58
Anura	Microhylidae	<i>Dasylops schirchi</i>	Sapo-cara-de-porco	Vulnerável	Mata Atlântica	Sudeste e Nordeste	ES e BA	4,86	135,80	130,94	-17,03	-21,74	4,71
Anura	Brachycephalidae	<i>Ischnocnema oea</i>	Rãzinha-do-folhiço	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste	RJ e ES	183,42	1135,74	952,32	-18,50	-22,40	3,91
Anura	Hylidae	<i>Ololygon trapicheiroi</i>	Perereca	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sudeste	RJ	2,48	1114,61	1112,13	-19,22	-24,61	5,39
Anura	Cycloramphidae	<i>Thoropa saxatilis</i>	Rã-do-costão	Quase ameaçada	Mata Atlântica	Sul	SC e RS	6,34	1157,07	1150,72	-27,59	-29,67	2,08

ANEXO B – Características intrínsecas das espécies focais.

Espécie	Tamanho (CRC) fêmeas	Tamanho (CRC) machos	Período de atividade	Hábito	Habitat	Sítio de canto	Modo reprodutivo
<i>Allobates olfersioides</i>	1,6 cm	1,3 cm	Diurno	Reofílico	Áreas abertas ou florestadas	Riachos ou rios	Ovos terrestres; girinos exotróficos
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	3,7 cm	3,4 cm	Noturno	Arborícola	Áreas florestadas	Brejos, lagos e remansos de rios ou riachos	Ovos em pequenas piscinas; girinos exotróficos
<i>Aplastodiscus eugenioi</i>	3,5 cm	3,3 cm	Noturno	Arborícola	Áreas florestadas	Brejos, lagos e remansos de rios ou riachos	Ovos em pequenas piscinas; girinos exotróficos
<i>Chiasmocleis lacrimae</i>	2,3 cm	1,7 cm	Noturno	Criptozoico	Áreas florestadas	Brejos ou lagos	Ovos em água parada, girinos exotróficos
<i>Cycloramphus acangatan</i>	4,3 cm	3,9 cm	Noturno	Criptozoico	Áreas florestadas	Chão de matas	Ovos terrestres; girinos endotróficos
<i>Cycloramphus brasiliensis</i>	6,2 cm	5,6 cm	Noturno	Reofílico	Áreas florestadas	Riachos ou rios	Girinos semi-terrestres e exotróficos
<i>Dasylops schirchi</i>	5,2 cm	3,8 cm	Noturno	Criptozoico	Áreas florestadas	Brejos ou lagos	Ovos em água parada, girinos exotróficos
<i>Ischnocnema oea</i>	2,2 cm	1,9 cm	Noturno	Criptozoico	Áreas florestadas	Chão de matas	Ovos terrestres, desenvolvimento direto
<i>Ololygon trapicheiroi</i>	2,9 cm	2,7 cm	Noturno	Arborícola	Áreas florestadas	Riachos ou rios	Ovos em água parada ou corrente, girinos exotróficos
<i>Thoropa saxatilis</i>	5,9 cm	5,0 cm	Noturno	Terrícola	Áreas florestadas	Paredões rochosos	Girinos semi-terrestres e exotróficos

Fonte: Haddad *et al.*, 2013; IUCN, 2019 e FROST, 2019.