



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
CURSO DE ECOLOGIA E ANÁLISE AMBIENTAL**

**Como a interação planta-solo pode ameaçar a interação
planta-abelha sob as mudanças climáticas ?**

Yasmin Xavier de Sena

Goiânia
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): [Yasmin Xavier de Sena](#)

Título do trabalho: [Como a interação planta-solo pode ameaçar a interação planta-abelha sob as mudanças climáticas ?](#)

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo De Marco Junior, Professor do Magistério Superior**, em 27/06/2025, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **Yasmin Xavier De Sena, Discente**, em 27/06/2025, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5415979** e o código CRC **9B9E1DC9**.

Referência: Processo nº 23070.029399/2025-49 SEI nº 5415979

Yasmin Xavier de Sena

Como a interação planta-solo pode ameaçar a interação planta-abelha sob as mudanças climáticas ?

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do grau de Ecólogo e Analista Ambiental.

Orientador: Prof (o). Dr (o). Paulo de Marco Junior

Goiânia

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

de Sena, Yasmin Xavier

Como a interação planta-solo pode ameaçar a interação planta-abelha sob as mudanças climáticas ? [manuscrito] / Yasmin Xavier de Sena. - 2025.

XLVII, 47 f. : il.

Orientador: Prof. Paulo De Marco Júnior .

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Ciências Biológicas (ICB), Ecologia e Análise Ambiental, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, gráfico, tabelas.

1. Mudanças climáticas, . 2. Desconexão, . 3. Vochysia rufa, . 4. Unidades de conservação, . 5. Sobreposição.. I. Júnior, Paulo De Marco, orient. II. Título.

CDU 57



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 18 dias do mês de junho do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Como a interação planta-solo pode ameaçar a interação planta-abelha sob as mudanças climáticas ?**”, de autoria de **Yasmin Xavier de Sena**, do curso de Ecologia e Análise Ambiental, do Instituto de Ciências Biológicas da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo **Prof. Dr. Paulo De Marco Júnior (Instituto de Ciências Biológicas/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Profa. Dra. Edivani Villaron Franceschinelli (Instituto de Ciências Biológicas/UFG)** e **Dr. Edgar Luiz de Lima (Pós-Graduação em Ecologia e Evolução/UFG)**. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de dez (10,0), tendo sido o TCC considerado **aprovado**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo De Marco Junior, Professor do Magistério Superior**, em 18/06/2025, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **Edivani Villaron Franceschinelli, Professora do Magistério Superior**, em 23/06/2025, às 17:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



Documento assinado eletronicamente por **EDGAR LUIZ DE LIMA, Usuário Externo**, em 23/06/2025, às 17:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) .



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_a_cesso_externo=0, informando o código verificador **5415978** e o código CRC **51533A22**.

A todos que contribuíram para a minha formação. Sobretudo, à minha mãe, que, mesmo à distância e com dificuldades, fez o possível e o impossível para que eu seguisse o meu caminho

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade de poder realizar minha formação em uma universidade reconhecida.

Ao meu orientador Paulo De Marco Júnior, que mesmo atarefado, sempre conseguiu me ajudar e nortear no mundo universitário. E quem também me ensinou coisas incríveis, não só no âmbito acadêmico, mas para a vida.

E as duas melhores pessoas com quem tive o privilégio de fazer amizade, Mariana do C. F. M. Pereira e Rebeca dos Santos Gabriel, sem vocês duas esses anos não teriam sido tão incríveis quanto foram.

O manuscrito foi preparado com a intenção de ser publicado na revista Biological Conservation.

(<https://www.sciencedirect.com/journal/biological-conservation/publish/guide-for-authors>)

“A beleza do mundo natural está nos detalhes, e a sabedoria está em reconhecê-los antes que desapareçam.”

E.O. Wilson.

RESUMO

O objetivo do trabalho é analisar como as mudanças climáticas podem desconectar as interações ecológicas existentes entre a espécie vegetal *Vochysia rufa* e seus polinizadores. Além disso, buscou-se verificar a eficácia das Unidades de Conservação em proteger as espécies frente às mudanças de uso de solo no sistema. A metodologia se baseia na análise dos dados de distribuição geográfica das espécies, que foram coletados no Google Scholar e Web of Science, pareados com os dados climáticos atuais retirados do WorldClim e os dados de clima futuro que comparam cenários de maior e menor governança. Para o modelo da planta também incluímos os dados do solo a partir do SoilGrids. A modelagem de todas as variáveis foi realizada no RStudio usando o pacote ENMTML. A quantidade de área sobreposta na distribuição entre a planta e os polinizadores foi avaliada em relação à sua presença dentro das Unidades de Conservação, permitindo avaliar se o atual sistema de UCs é capaz de proteger essas espécies futuramente. É esperado que haja diferença de sobreposição entre a distribuição de *Vochysia* e os polinizadores, já que frente ao avanço das mudanças climáticas os polinizadores poderiam se locomover para locais mais adequados, enquanto que as plantas não, e ainda que em cenários de maior governança haja menor perda de distribuição. Além disso, espera-se que as UCs protejam as duas espécies, já que ambas têm ampla distribuição.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Desconexão, *Vochysia rufa*, Unidades de conservação, Sobreposição.

How plant-soil interaction could threaten the interaction with plant-bee interaction under climate change?

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze how climate change may disrupt the existing ecological interactions between the plant species *Vochysia rufa* and its pollinators. Additionally, the study aims to assess the effectiveness of Protected Areas (Conservation Units) in safeguarding these species in the face of land-use changes. The methodology is based on the analysis of species distribution data, which were collected from Google Scholar and Web of Science, and matched with current climate data from WorldClim and future climate data comparing scenarios of high and low environmental governance. For the plant model, soil data from SoilGrids were also included. All variable modeling was performed in RStudio using the ENMTML package. The overlapping area between the distributions of the plant and its pollinators was assessed in relation to their presence within Protected Areas, allowing the evaluation of whether the current protected area system is capable of ensuring the future conservation of these species. It is expected that there will be a mismatch between the distributions of *Vochysia* and its pollinators, as climate change progresses, pollinators may shift to more suitable areas, while the plants may not, especially considering the limitations imposed by soil. Moreover, it is expected that under scenarios of higher governance, there will be less distributional loss. In addition, Protected Areas are expected to protect both species, as they both currently have a wide geographical distribution.

Keywords: Climate change, Disconnection, *Vochysia rufa*, Conservation units, Overlap.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUC: Area Under the Curve

CBD: Convention on Biological Diversity

CMIP6: Coupled Model Intercomparison Project – Phase 6

ENMTML: Ecological Niche Modeling Tool in Machine Learning

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ISRIC: International Soil Reference and Information Centre

MAXENT: Maximum Entropy

OR: Omission Rate

PAs: Protected Areas

PCA: Principal Component Analysis

PRES_ABS_RATIO: Razão entre presença e ausência utilizada na calibração dos modelos

RDF: Random Forests

SSP: Shared Socioeconomic Pathways

SVM: Support Vector Machine

UCs: Unidades de Conservação

WDC-Soils: World Data Centre for Soils

WoSIS: World Soil Information Service

SUMÁRIO

1. Apresentação	13
2. Introdução	15
3. Metodologia	20
3.1 Dados de Ocorrência	20
3.2 Dados Climáticos	20
3.3 Dados de Solo	22
3.4 Procedimentos de Modelagem	24
3.5 Avaliação do Modelo	26
3.6 Procedimentos Analíticos	27
4. Resultados	29
5. Discussão	35
6. Referências Bibliográficas	38

1. APRESENTAÇÃO

As mudanças climáticas globais são alterações a longo prazo que afetam as características do clima e temperatura da Terra. A média da temperatura do planeta está aumentando, com cada 1°C de mudança de temperatura que move as zonas ecológicas da Terra em cerca de 160km. Se o clima esquentar 4°C no próximo século, as espécies no Hemisfério Norte poderão ter de se deslocar cerca de 500km para encontrar um regime climático adequado. As mudanças climáticas também alteram as interações ecológicas existentes entre as espécies, tal qual a representada no estudo realizado por Fontúrbel et al., no qual é analisada a interação ecológica entre *Tristerix corymbosus* (uma espécie de visco hemiparasita), *Sephanoides sephanoides* (um beija-flor) e *Dromiciops gliroides* (um marsupial arbóreo) no Chile. Neste exemplo, as alterações climáticas que levam ao estresse hídrico não afetam somente o visco, mas também outras espécies de plantas com frutos carnosos, o que diminui drasticamente a disponibilidade geral de recursos para *D. gliroides*, impactando suas reservas de energia para o inverno. Assim ocorre um efeito em cascata onde o visco *T. corymbosus* é particularmente afetado, esse sendo a principal fonte de alimento para o beija-flor e para o marsupial. Com esta relação é possível ressaltar que mesmo mudanças muito pequenas na fenologia de espécies vegetais individuais podem ter grandes impactos nos mutualismos de polinização em toda a comunidade.

Os atores principais deste projeto são as interações mutualísticas entre a espécie *Vochysia rufa* e as 15 espécies de abelhas que a polinizam. Pensando nessa relação, é importante ressaltar a influência que o solo desempenha na determinação da distribuição das plantas e das propriedades de ciclagem de nutrientes da vegetação. Estudos controlados sugerem que o aumento consistente no dióxido de carbono atmosférico, nitrogênio reativo, temperatura e outros fatores, impactam a produtividade primária e qualidade das plantas, assim como a alimentação, distribuição e fenologia dos herbívoros. Deste modo, tais mudanças no clima afetam os três agentes do nosso estudo: o solo, a espécie de planta e o polinizador, cada um sendo impactado de forma diferente, assim como também reagem de formas distintas a esse distúrbio.

A justificativa da realização deste trabalho está na necessidade de incluir as complexas relações existentes entre as espécies no processo de análise do efeito das mudanças climáticas. Mesmo que as mudanças climáticas afetem aspectos menos impactantes da fenologia de uma

espécie, isso pode desencadear perdas em cascata nas espécies mutualistas e mudanças relevantes na comunidade. Esse estudo permite melhorar as previsões sobre como interações entre espécies podem moldar os resultados das alterações devido a mudanças climáticas e o melhor planejamento de ações e/ou mitigação dos impactos que elas venham a causar nas espécies e em suas comunidades interligadas.

2. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais representam uma das principais ameaças à biodiversidade, provocando alterações duradouras nos padrões de temperatura, precipitação e regimes sazonais em escala planetária. Tais mudanças já estão deslocando zonas ecológicas a uma taxa média estimada de 160 km para cada aumento de 1°C na temperatura média global (Thuiller, 2007). Com projeções apontando para um possível aquecimento de até 4°C neste século, muitas espécies, especialmente no Hemisfério Norte, podem ser forçadas a migrar centenas de quilômetros em busca de condições climáticas adequadas (Thuiller, 2007; Warren et al., 2023). No entanto, os impactos das mudanças climáticas não se limitam às distribuições geográficas individuais das espécies. Interações ecológicas complexas, como mutualismos, predação e competição, também estão sujeitas a alterações, o que pode comprometer a integridade funcional dos ecossistemas. Estudos têm demonstrado que modificações ambientais, como o aumento do estresse hídrico, podem afetar diretamente a dinâmica populacional de plantas e, indiretamente, influenciar as espécies que delas dependem, alterando redes ecológicas inteiras (Fontúrbel et al., 2021). Mesmo pequenas mudanças na fenologia de espécies vegetais podem desencadear efeitos em cascata sobre interações tróficas e mutualísticas, com potenciais consequências para a persistência das comunidades naturais (Memmott, 2007).

As alterações no clima têm impacto na abundância relativa e diversidade dos polinizadores (Thomas C, 2004). Este grupo é particularmente sensível às variações ambientais e muitas vezes incapazes de se aclimatar de forma eficaz (Thomas C, 2004; Tanda, A.S, 2023). Essas podem levar à desconexão nas interações planta-polinizador por meio de separação temporais (fenológicas) e espaciais (distributivas), reduzindo a disponibilidade de parceiros mutualísticos (S.J. Hegland et al., 2009). Essas incompatibilidades surgem quando

os parceiros originais experimentam uma sobreposição temporal ou espacial reduzida, resultando em um desacoplamento trófico parcial ou completo (Stenseth & Mysterud, 2002; Visser & Both, 2005). Quando as plantas e seus polinizadores não estão mais sincronizados temporalmente ou espacialmente existe a possibilidade de que novos mutualismos possam surgir para ocupar esses nichos vazios. Por exemplo, Alarcón et al. (2008) observaram que uma rede planta-polinizador alterou sua estrutura ao longo dos anos devido a mudanças no clima e outros fatores. No entanto, a reorganização das interações planta-polinizador em novos contextos nem sempre é possível ou benéfica para todas as espécies. Espécies que possuem parceiros altamente específicos ou vivem em habitats fragmentados podem não encontrar substitutos adequados para seus polinizadores perdidos, o que aumenta o risco de declínio populacional.

O solo desempenha um papel crucial na determinação da distribuição geográfica de plantas (Zuquim et al.,2020; Van der Putten et al.,2010). Além das variáveis ambientais e interações bióticas, ele fornece o substrato necessário para o crescimento das plantas e influencia diretamente sua distribuição geográfica. Embora as mudanças climáticas globais afetem a distribuição das espécies pela alteração dos padrões climáticos (Staudinger et al.,2013; Van der Putten et al.,2010), os solos não devem sofrer mudanças consistentes em sua distribuição em resposta ao clima em um intervalo de tempo de poucos anos. Isso implica que muitas espécies especializadas em determinados tipos de solo terão uma capacidade limitada de se adaptar às mudanças climáticas por meio da dispersão para novas áreas climaticamente adequadas. Considerando essa premissa, nossa expectativa para *Vochysia rufa* e seus polinizadores podem exemplificar esse fenômeno. Com as mudanças climáticas, áreas que atualmente oferecem condições ideais para a espécie podem deixar de ser adequadas no futuro. Entretanto, enquanto os polinizadores podem se deslocar ativamente para regiões onde as condições ambientais sejam favoráveis à sua sobrevivência, *Vochysia* permanece

dependente das características do solo, principalmente os latossolos, a qual tem mais aptidão (Haridasan, M., 1982). Embora *Vochysia rufa* possa realizar a dispersão passiva de suas sementes principalmente pelo vento (Gonçalves, 2020), essa é menos eficiente do que a locomoção ativa dos polinizadores. A dispersão das plantas ocorre lentamente e depende de fatores como a viabilidade da semente, a distância percorrida e a adequação do solo no novo local, enquanto os polinizadores podem rapidamente abandonar áreas desfavoráveis e colonizar novas regiões. Essa diferença na capacidade de locomoção amplia a assimetria na resposta das espécies às mudanças ambientais. Se as novas áreas adequadas para o clima não coincidirem com os solos apropriados, a distribuição da planta pode sofrer uma redução drástica. Por outro lado, em casos onde um polinizador depende fortemente de uma determinada planta, a redução na distribuição da planta pode levar, a curto prazo, a uma diminuição na distribuição desse mutualista.

Neste estudo, alguns tipos de alterações que exercem alguma influência sobre plantas e polinizadores podem ser explicitadas, como as mudanças nos padrões de precipitação onde secas e eventos de chuvas mais frequentes e/ou prolongados podem alterar a abundância e disponibilidade de plantas floridas, conseqüentemente afetando a dieta e saúde de seus polinizadores (I. Bartomeus,2011). Alguns estudos controlados também sugerem que mudanças como o aumento consistente no dióxido de carbono atmosférico, nitrogênio reativo, temperatura e outros fatores, acabam impactando na produtividade primária das plantas (T.J. Massad,2010) conseqüentemente afetando a qualidade de recursos para o polinizador.

Com base no que já foi descrito é notável que essas mudanças causam óbvias alterações nas espécies e por conseguinte na comunidade em que ela está inserida, isso com alterações a curto prazo, agora o avanço de tais modificações a longo prazo pode ter conseqüências mais severas. Mesmo que possam ser mais difíceis de prever, existem alguns estudos que elucidam

um pouco sobre o impacto potencial, por exemplo, J. Memmott (2007) argumenta que “As mudanças na fenologia induzidas pelas alterações climáticas têm o potencial de perturbar a sobreposição temporal entre os polinizadores e os seus recursos alimentares florais, assumindo que não existem mecanismos de compensação”. Além disso, espera-se que espécies especializadas sejam mais vulneráveis a tais perturbações (J. Memmott, 2007). Há ainda a dificuldade em se notar a extinção de interações ecológicas, já que um dos elementos pode persistir por muito tempo após o desaparecimento do outro, seja por ter um ciclo de vida longo ou por algum mecanismo de compensação (D. Janzen, 1974).

Os atores principais desta pesquisa são as interações mutualísticas entre a espécie *Vochysia rufa* e as 14 espécies de abelhas que a polinizam. Pensando nessa relação, é importante ressaltar a influência que o solo desempenha na determinação da distribuição das plantas e das propriedades de ciclagem de nutrientes da vegetação (J. Pastor, 1988). Estudos controlados sugerem que o aumento consistente no dióxido de carbono atmosférico, nitrogênio reativo, temperatura e outros fatores, impactam a produtividade primária e qualidade das plantas, assim como a alimentação, distribuição e fenologia dos herbívoros (T.J. Massad, 2010). Deste modo, tais mudanças no clima afetam os três agentes do nosso estudo: o solo, a espécie vegetal e o polinizador, cada um sendo impactado de forma diferente, assim como também reagem de formas distintas a esse distúrbio.

Assim, a realização deste trabalho está na necessidade de incluir as complexas relações existentes entre as espécies no processo de análise do efeito das mudanças climáticas. Mesmo que as mudanças climáticas afetem aspectos menos impactantes da fenologia de uma espécie, isso pode desencadear perdas em cascata nas espécies mutualistas e mudanças relevantes na comunidade. Esse estudo permite melhorar as previsões sobre como interações entre espécies podem moldar os resultados das alterações devido a mudanças climáticas e o melhor planejamento de ações e/ou mitigação dos impactos que elas venham a causar nas espécies e

em suas comunidades interligadas. Portanto, o objetivo deste estudo é verificar se as mudanças climáticas podem desconectar a interação ecológica entre as abelhas polinizadoras e *Vochysia rufa*. Além disso, o estudo permitirá uma análise das mudanças de distribuição destas espécies de abelhas polinizadoras, permitindo avaliar a sua vulnerabilidade às mudanças climáticas, além de averiguar a eficácia das UCs (Unidades de Conservação) com relação à proteção das espécies.

3. METODOLOGIA

3.1 Dados de Ocorrência

Os procedimentos de coleta de dados começaram com a pesquisa em plataformas como o Google Scholar e Web of Science, procurando por artigos sobre mudanças climáticas e como elas poderiam afetar as relações entre as espécies. Como uma parte do objetivo deste trabalho envolve a relação entre espécies, foi realizado o levantamento sistemático sobre a ecologia e polinização de *Vochysia rufa* como também sobre as potenciais abelhas polinizadoras desta. Agora no que tange a parte climática do estudo, é primeiro necessário saber a distribuição geográfica de *V. rufa* e de seus polinizadores, logo, o levantamento dos pontos de ocorrência da mesma e dos polinizadores foi realizado utilizando-se de plataformas como o Re flora e o GBIF para montar esse acervo, onde obtivemos um total de 31.201 pontos de ocorrência para *Vochysia* (com 395 números de ocorrência única) e 37.137 pontos para suas 14 espécies de polinizadores encontradas (com 2.690 pontos de ocorrência única).

3.2 Dados Climáticos

Os dados de clima atual foram retirados do Worldclim 2.0 (S. Fick, R. Hijmans, 2017). Os dados climáticos são derivados de modelos de clima a partir de informações sobre precipitação e temperatura que são convertidos em variáveis bioclimáticas largamente utilizadas nessa literatura (T.H. Booth, 2014). Além disso, dados climáticos para as mesmas variáveis foram obtidos de cenários climáticos para o futuro nos relatórios do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change - www.ipcc.ch/) que se utilizam dos SPPs (Shared Socioeconomic Pathways) que são cenários com base em suposições sobre como a população, a educação, a utilização de energia, tecnologia e outros fatores poderão mudar ao

longo do século (K. Riahi,2017). A junção dessas suposições com as ambições de mitigação são traduzidas em cenários de emissões de gases de efeito estufa, assim, é possível ter projeções de alterações climáticas com base nestes cenários que descrevem uma série de climas futuros plausíveis.

As narrativas escolhidas para este projeto foram os cenários SSP245 e SSP585, que se destacam como os mais adequados para o Brasil. O SSP245 representa uma trajetória intermediária de emissões futuras de gases de efeito estufa, considerando que medidas de proteção climática estão sendo adotadas, configurando-se como o limite superior da gama de cenários descritos na literatura (B.C. O'Neill, 2016). Esse cenário prevê um aumento de temperatura de cerca de 2,4°C até 2100. Em contrapartida, o SSP585 é uma atualização do CMIP5 RCP8.5, integrando fatores socioeconômicos e caracterizando um desenvolvimento fortemente dependente de combustíveis fósseis, resultando em um aumento de temperatura de aproximadamente 5,8°C até o final do século (B.C. O'Neill, 2016).

Para explorar esses cenários, selecionamos cinco modelos climáticos que fazem parte do CMIP6, um esforço colaborativo para padronizar e comparar projeções climáticas globais. Para a escolha desses modelos o critério utilizado foi a aderência de suas estimativas climáticas para o clima atualmente observado nas áreas centrais do Brasil. Essa comparação foi feita a partir dos trabalhos de (Bazzanela et al, 2024), que apresentam correlações entre o clima predito e o observado pelos diferentes modelos climáticos. O CNRM-ESM2-1, desenvolvido pelo CNRM-CERFACS, é destacado pela sua modelação integrada de processos biogeoquímicos, como o ciclo do carbono, além de aerossóis e química atmosférica, permitindo analisar como esses fatores influenciam as respostas a forçantes externas e as projeções climáticas futuras (Séférián et al., 2019). O FIO-ESM-2-0, uma atualização do FIO-ESM v1.0, melhora a simulação de processos oceânicos e as interações ar-mar, essenciais

para representar fenômenos como El Niño e as mudanças nas correntes oceânicas (CMIP6 Overview, 2020). O IPSL-CM6A-LR, desenvolvido pelo Institut Pierre-Simon Laplace, concentra-se na resposta dos sistemas climáticos a forçantes radiativas, como gases de efeito estufa, e na modelação de monções e padrões de precipitação (IPSL Model Contributions, 2020). Por fim, os modelos EC-Earth3-Veg e EC-Earth3-Veg-LR, do consórcio EC-Earth, incorporam vegetação dinâmica, permitindo avaliar a interação entre mudanças no uso da terra e o clima. A versão de baixa resolução (Veg-LR) é utilizada em simulações que exigem menor capacidade computacional, mantendo um equilíbrio eficaz entre custo e precisão (Döscher, 2022).

3.3 Dados de Solo

Os dados de solo utilizados foram retirados da base de dados WoSIS (World Soil Information Service, <https://www.isric.org/explore/wosis>). Foi desenvolvido e mantido pelo ISRIC (International Soil Reference and Information Centre), WDC-Soils (World Data Centre for Soils) e fornece uma gama crescente de dados de perfil de solo padronizados e avaliados quanto à qualidade (Batjes NH, 2024). Se baseia em contribuições voluntárias de detentores/provedores de dados em todo o mundo. O banco de dados de solo utilizado conta com 11 variáveis analisadas, sendo elas 5 físicas: Densidade aparente (bdod), Fragmentos grosseiros (cfvo), Teor de argila (clay), Conteúdo de areia (sand), Teor de silte (silt), 4 químicas: Capacidade de troca catiônica (cec), Azoto (nitrogen), pH da água (pH20), Carbono orgânico do solo (soc), e 2 propriedades derivadas: Densidade de carbono orgânico (ocd) e Estoque de carbono orgânico (ocs).

Das variáveis físicas, densidade aparente é definida como a razão entre a massa de sólidos secos em estufa e o volume total ou em massa, incluindo tanto o volume de sólidos quanto o espaço poroso que depende da extensibilidade do solo. Foram avaliadas 6 camadas

variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em cg/cm^3 . Fragmentos grosseiros é a parte sólida da massa do solo que é subdividida em uma fração menor e uma maior que 2mm, essas frações são frequentemente denotadas como fração de terra fina e de terra grossa (Soil Survey Staff 2022a). Foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (cm^3/dm^3). Teor de argila, Conteúdo de areia e conteúdo de silte são todos análises de material gravimétrico na fração de terra fina, todos também foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (g/kg).

Das variáveis químicas, a capacidade de troca catiônica é uma estimativa da quantidade total de cátions retidos em locais de troca, em um pH pré-definido, por exemplo, em pH7 que foi o analisado (Dixon et al. 1977). Foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (cmolc/kg). Nitrogênio, nos solos está presente como NO_3^- e NH_4^+ com quantidades insignificantes de NO_2^- , juntos eles formam a fração mineral N. Para determinação do Nitrogênio total, dois métodos são comumente usados: combustão de matéria orgânica em um forno e digestão com tratamento ácido e aquecimento (Shepherd et al. 2022). Foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (cg/kg). O pH da água é uma medida da acidez ou alcalinidade em solos, definida como o logaritmo negativo (base 10) da atividade dos íons hidrônio (H^+) na água. Foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em ($\text{pH} \cdot 10$). Carbono orgânico do solo é dividido em várias frações e componentes, as principais são carbono orgânico e inorgânico, materiais orgânicos mais grossos que 2mm são considerados resíduos. A fração de terra fina é a base para as análises laboratoriais de carbono do solo. Foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (dg/kg).

Das propriedades derivadas, densidade de carbono orgânico, foram avaliadas 6 camadas variando de 0-5cm ~ 60-100cm que foram medidas em (g/dm^3), já o estoque de carbono orgânico, foi avaliada 1 camada variando de 0-30cm que foi medida em (t/ha).

3.4 Procedimentos de Modelagem

No processo de modelagem da distribuição das espécies utilizou-se a biblioteca ENMTML (Andrade *et al.*, 2020). Os modelos foram ajustados para o presente e projetados para o futuro, possibilitando estimativas sobre potenciais alterações nas áreas de ocorrência. Para garantir a robustez das análises, foram adotados critérios mais rigorosos, como um número mínimo de ocorrências de 5 pontos únicos uma vez que a acurácia do modelo está diretamente relacionada ao tamanho da amostra (Wisz *et al.*, 2008). Para minimizar problemas relacionados à colinearidade entre os preditores, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA), selecionando os eixos que representam 95% da variância total como um novo conjunto de preditores (Heikkinen *et al.*, 2006; De Marco & Nóbrega, 2018). A calibração do modelo considerou a alocação de pseudo-ausências e pontos de background, definida pelo método restrição ambiental (environmental constrain), que se baseia nas regiões menos adequadas preditas pelo modelo Bioclim (Engler *et al.*, 2004). Além disso, a razão entre presença e ausência (PRES_ABS_RATIO) foi definida como 1, garantindo um equilíbrio na distribuição dos dados de presença e pseudo-ausência. A área de acessibilidade é um tópico importante para o ajuste de modelos (Barve *et al.*, 201), definindo onde os pontos de background devem ser amostrados. Consideramos como área acessível para as espécies modeladas toda a região do Neotrópico como área de estudo. A área de calibração neotropical adotada considera as possibilidades históricas de dispersão de propágulos das espécies estudadas. Essa abordagem, fundamentada no conhecimento biológico, reconhece que o ambiente atual das espécies é moldado por condições evolutivas passadas. Dessa forma, a calibração inclui áreas que refletem não apenas as condições ambientais ideais, mas também os limites impostos pela biologia e pela história ecológica das espécies. Ao considerar a região neotropical como área de calibração, assumiu-se que as espécies de abelhas

polinizadoras teriam historicamente alcançado diversas áreas dessa região, incluindo locais com maior conectividade ecológica.

Para reduzir incertezas, evitou-se a extrapolação ambiental (Extrapolation=FALSE), prevenindo projeções em condições ambientais desconhecidas (Fitzpatrick & Hargrove, 2009). Quando múltiplos modelos foram gerados para a mesma espécie, os resultados das avaliações incluíram a média e o desvio padrão das previsões, aumentando a confiabilidade dos resultados. Modelos baseados em PCA foram empregados na combinação de mapas de adequação, utilizando o primeiro componente como saída final. A abordagem de ensemble incorporou quatro algoritmos distintos, combinando suas melhores características para aprimorar as previsões de distribuição das espécies. Entre os algoritmos utilizados, destacam-se o Support Vector Machine (SVM) (Karatzoglou et al., 2004), Random Forests (RDF) (Liaw & Wiener, 2002) e o Maximum Entropy (MAXENT) com ajustes padrão (Phillips, 2017). O MAXENT, amplamente reconhecido por sua robustez na modelagem de nicho ecológico, mostrou-se eficiente especialmente em casos de dados limitados de presença. Para garantir previsões mais acuradas, utilizou-se o método SUP (média dos melhores algoritmos). Além disso, aplicou-se um método a posteriori denominado PRES, que seleciona apenas patches com registros confirmados de ocorrência. Essa abordagem restringe padrões de adequação de espécies baseando-se em estimativas de acessibilidade do local, sem incluí-las como preditores na fase de ajuste do modelo (Mendes et al., 2020). A validação dos modelos foi conduzida por meio de um particionamento geográfico dos dados de ocorrência utilizando o método BLOCK, que divide os registros em uma estrutura de tabuleiro de xadrez, garantindo que subconjuntos alternados sejam utilizados para calibração e avaliação (Roberts et al., 2017). Essa abordagem reduz o viés espacial e aumenta a confiabilidade da inferência sobre a distribuição das espécies.

A análise final dos dados buscou estimar a sobreposição entre a distribuição da planta e seus polinizadores no presente e no futuro, considerando as mudanças projetadas em diferentes cenários climáticos. O grau de sobreposição foi avaliado por meio de inferência por intervalo de confiança, incorporando a variação entre os cenários como covariável, bem como o tamanho da distribuição da espécie polinizadora e sua relação com o solo. Também foi analisada a quantidade de área sobreposta dentro de unidades de conservação, permitindo avaliar a eficácia do atual sistema de proteção ambiental na manutenção dessas espécies e suas interações ecológicas ao longo do tempo. Por fim, para definir os limites de avaliação e fortalecer a robustez das análises, utilizou-se a métrica Sorensen, que maximiza o valor de adequação das distribuições modeladas (Leroy et al., 2018). Os dados climáticos foram analisados com base em diferentes cenários projetados por múltiplos modelos climáticos, fornecendo uma compreensão abrangente das alterações esperadas em escalas temporais variadas.

3.5 Avaliação do Modelo

A avaliação dos modelos desenvolvidos baseou-se na validação cruzada por meio da métrica Sorensen, amplamente reconhecida por evitar superestimações relacionadas à ausência de dados. Esse processo utilizou partições geográficas alternadas entre os dados de ajuste e validação, assegurando maior precisão nas projeções de distribuição. Para aprimorar a interpretação dos resultados, os intervalos de confiança foram calculados considerando a variabilidade entre os diferentes modelos climáticos, permitindo mensurar as incertezas associadas às projeções futuras. A combinação dessas abordagens garantiu maior confiabilidade e precisão aos resultados, especialmente em cenários climáticos complexos e de alta incerteza.

3.6 Procedimentos Analíticos

A avaliação das projeções foi realizada por meio da métrica Sorensen, que é mais adequada por ser menos afetada pela prevalência das espécies (Leroy et al., 2018). Valores AUC (Área Sob a Curva) também são relatados para fins de comparação com estudos anteriores que utilizavam essa métrica (Phillips et al., 2006). Além disso, foram utilizados valores de OR (Omission Rate) para indicar as taxas de omissão que afetam a interpretação dos modelos (Tabela. 1).

Tabela. 1. Resultados dos algoritmos usados no modelo, para cada espécie de polinizador avaliado. Espécies sem valores são aquelas cujos os pontos de ocorrência não alcançaram o valor mínimo de cinco pontos (OCC Unique).

POLINIZADOR	OCC Unique	AUC	TSS	SORENSEN	OR
<i>Bombus atratus</i>	50	0,933	0,933	0,965	0,066
<i>Bombus morio</i>	283	0,989	0,941	0,970	0,047
<i>Bombus pauloensis</i>	480	0,980	0,958	0,978	0,041
<i>Centris dorsata</i>	5	1,000	1,000	1,000	0,000
<i>Ctenioschelus goryi</i>	17	0,880	0,600	0,833	0,000
<i>Epicharis bicolor</i>	6	1,000	1,000	1,000	0,000
<i>Epicharis iheringii</i>	3				
<i>Epicharis rustica</i>	32	1,000	1,000	1,000	0,000
<i>Euglossa townsendi</i>	75	0,994	0,956	0,977	0,043
<i>Nannotrigona testaceicornis</i>	126	0,985	0,921	0,960	0,052
<i>Oxaea flavescens</i>	73	0,960	0,909	0,952	0,090
<i>Santiago mourei</i>	1				
<i>Tetragona clavipes</i>	157	0,988	0,936	0,967	0,063
<i>Trigona angustula</i>	775	0,995	0,948	0,974	0,017
<i>Trigona spinipes</i>	607	0,994	0,939	0,969	0,038

As análises realizadas foram baseadas na quantificação da sobreposição entre as áreas de ocorrência da planta *Vochysia rufa* e das espécies de polinizadores, considerando projeções

de distribuição tanto no presente quanto em diferentes cenários futuros. Inicialmente, foram organizados os arquivos raster contendo as projeções de ocorrência da planta e dos polinizadores, com base em diferentes modelos, cenários climáticos e para dois períodos futuros distintos. As camadas raster correspondentes à distribuição presente da planta foram carregadas, assim como as projeções futuras, sendo organizadas por cenário e ano. Para cada espécie de polinizador, foi extraída sua camada raster correspondente à distribuição atual, e calculado o número total de pixels ocupados (indicando o tamanho da distribuição presente). Esse mesmo procedimento foi realizado para as distribuições futuras, de forma a obter o tamanho da área projetada para cada espécie em cada cenário e período. Para estimar a sobreposição espacial entre a planta e os polinizadores, foi utilizado o produto entre os rasters de presença das duas espécies: no presente, multiplicando a distribuição da planta com a dos polinizadores; no futuro, com as projeções correspondentes. A variação percentual da sobreposição foi calculada com a equação 1.

$$\frac{\text{Sobreposição}_{\text{Presente}} - \text{Sobreposição}_{\text{Futuro}}}{\text{Sobreposição}_{\text{Presente}}} \times 100 \quad \text{Equação 1.}$$

A análise de sobreposição foi conduzida de formas distintas para responder a diferentes perguntas. A sobreposição entre os polinizadores e as áreas protegidas ao longo do tempo foi avaliada com o uso de um gráfico tipo forest plot, que resume as médias de sobreposição por modelo climático e cenários políticos (SSP245 e SSP585) em dois períodos distintos (2041~2060 e 2081~2100), permitindo observar padrões de mudança esperados na proteção das espécies. Nessa estratégia, as comparações estatísticas foram feitas utilizando inferência por intervalo de confiança. Já os boxplots com mapas de distribuição foram utilizados para demonstrar visualmente a diferença de sobreposição espacial entre a planta *Vochysia* e seus polinizadores dentro das UCs sob diferentes cenários climáticos, destacando quais modelos apresentaram maior impacto nas áreas de coocorrência. Por fim, uma regressão

linear simples foi aplicada para investigar a relação entre a área total de UCs e a área ocupada por cada espécie de polinizador dentro dessas unidades, representando uma medida de proporcionalidade espacial da sobreposição. Tal regressão foi forçada para a origem, o que permite interpretar a inclinação da reta como a proporção da distribuição da interação que está protegida pelo conjunto de unidades de conservação avaliadas (De Marco, 2023). Essas análises complementares permitiram uma compreensão abrangente da interação entre mudança climática, distribuição de espécies e efetividade das áreas protegidas.

4. RESULTADOS

As análises realizadas a partir da modelagem das espécies de polinizadores indicam que a maioria delas sofrerá mudanças na distribuição ao longo do século, sendo essas mudanças especialmente pronunciadas após o ano de 2040. O gráfico de mudanças percentuais médias ao longo do tempo (Fig. 1) revela que há perdas nas áreas de sobreposição a partir de 2041. Antes disso, entre 2021 e 2040, não há evidência robusta de perdas expressivas de sobreposição. Essa tendência de declínio se intensifica gradualmente até 2100, especialmente nos cenários de menor governança (SSP585). A maior parte das espécies apresenta declínio, com destaque para perdas mais severas nas últimas décadas analisadas (2081-2100). A única exceção notável é *Trigona spinipes*, espécie amplamente distribuída e pouco sensível às mudanças projetadas, que manteve um nível de sobreposição relativamente estável nos cenários de maior governança.

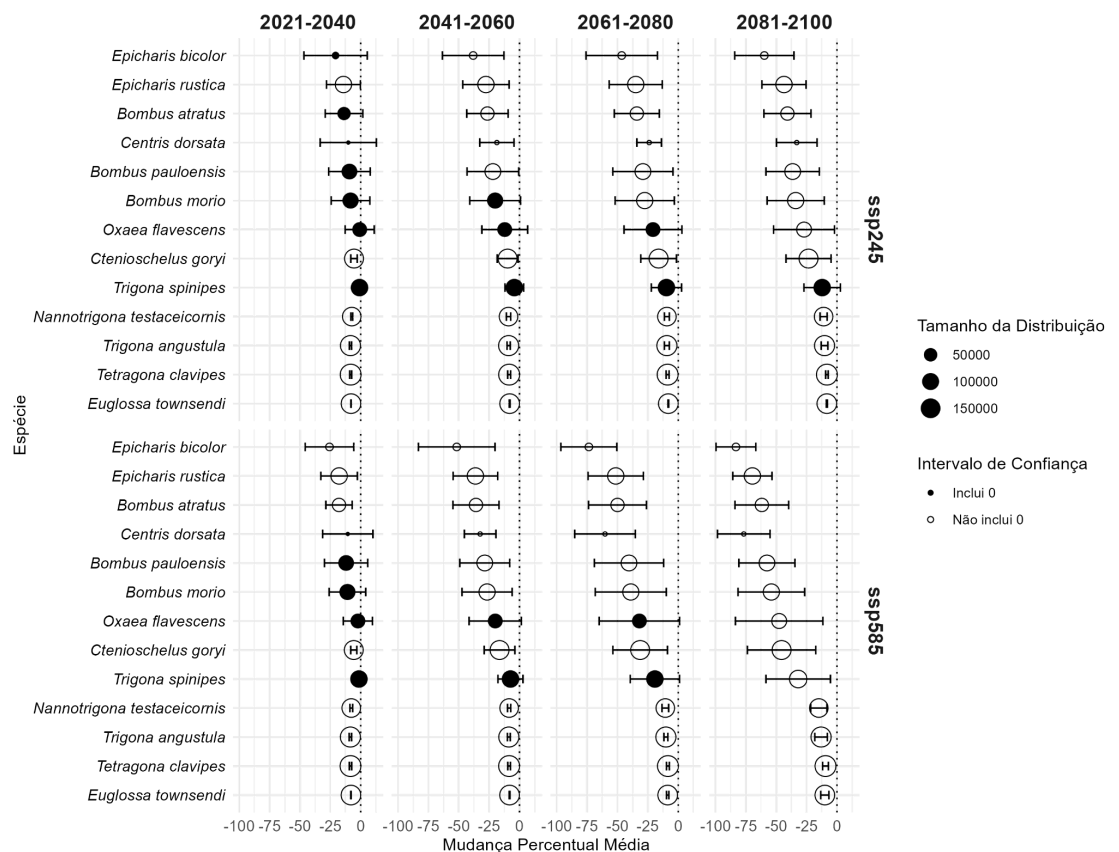


Fig. 1. Percentual de mudança na sobreposição entre polinizadores e *Vochysia rufa* considerando diferentes períodos e cenários climáticos. Círculos representam a média da mudança percentual de sobreposição entre a distribuição projetada de polinizadores e as *V. rufa*, com base em modelos de distribuição de espécies (SDMs). Pontos vazados indicam intervalos de confiança que não incluem zero, sugerindo mudança significativa; pontos preenchidos indicam intervalos que incluem zero. Tamanhos dos pontos representam a área de distribuição presente de cada espécie. Facetas superiores e inferiores correspondem aos cenários de emissões SSP245 e SSP585, respectivamente, enquanto as colunas representam os períodos projetados de 2021~2040 a 2081~2100.

A análise da sobreposição espacial entre *Vochysia rufa* e seus polinizadores revelou variações expressivas em função dos diferentes cenários climáticos futuros e períodos projetados. No cenário atual (presente), a distribuição das áreas com sobreposição espacial concentra-se principalmente na região norte do Brasil, incluindo trechos do sul da Amazônia e partes do Cerrado (Fig. 2). Nesses locais, a intensidade da sobreposição, representada pelas cores mais quentes nos mapas, reflete áreas com maior coocorrência entre a planta e seus

potenciais polinizadores. No horizonte mais distante, 2080-2100, os mapas indicam uma intensificação dos efeitos do clima sobre as áreas de sobreposição (Fig. 2). Sob cenário SSP245, os padrões mantêm uma tendência de retração, enquanto sob SSP585 há forte redução e fragmentação das áreas de sobreposição. Essas observações são corroboradas pelo gráfico central, que resume a média de sobreposição para cada modelo e cenário, incluindo seus respectivos intervalos de confiança. De modo geral, os modelos sob SSP245 apresentam médias de sobreposição superiores às obtidas em SSP585, indicando que cenários menos extremos podem favorecer maior manutenção da conectividade entre *V. rufa* e seus polinizadores. Além disso, os valores médios tendem a diminuir ao longo do tempo, com intervalos de confiança mais deslocados para valores negativos em 2100, refletindo uma tendência de redução na sobreposição espacial futura (Fig. 1). O modelo CNRM-ESM2-1, que integra processos biogeoquímicos, se destaca por apresentar menor alteração ao longo do tempo, sugerindo maior estabilidade das interações sob esse cenário. Por outro lado, o modelo EC-Earth3-VegLR, que incorpora vegetação dinâmica e, portanto, representa de forma mais explícita os efeitos do uso do solo combinado ao clima, apresenta as maiores perdas de sobreposição.

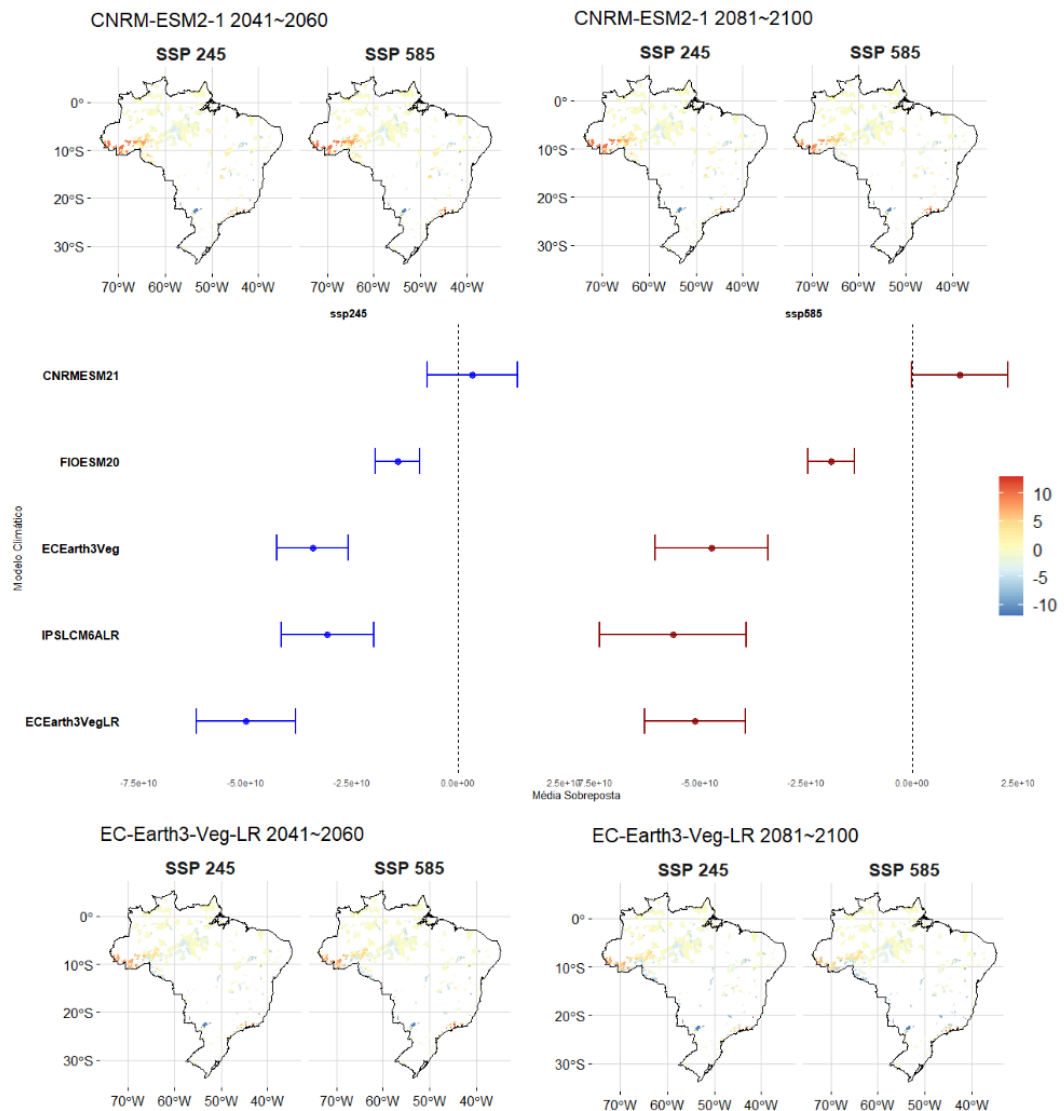


Fig. 2. Mudança percentual na sobreposição entre *Vochysia rufa* e seus polinizadores em Unidades de Conservação (UCs), sob diferentes modelos climáticos, períodos futuros (2041~2060 e 2081~2100) e cenários de emissões (SSP245 e SSP585). Mapas mostram a variação espacial da sobreposição entre a distribuição projetada de *Vochysia rufa* e polinizadores, com base em modelos de distribuição de espécies (SDMs). As cores representam o percentual de mudança na sobreposição entre presente e futuro: tons azulados indicam redução, tons avermelhados indicam aumento, e tons neutros (branco/amarelo) indicam pouca ou nenhuma mudança. O gráfico do tipo forest plot, posicionado ao centro, apresenta a média da mudança na sobreposição entre as distribuições projetadas da planta e seus polinizadores, com barras horizontais indicando o intervalo de confiança para diferentes modelos climáticos.

No que se refere à relação entre a proteção oferecida pelas Unidades de Conservação (UCs) e a distribuição das espécies (Fig. 3), a área total da UC foi calculada multiplicando a área total por 10^{11} km². Evidenciamos que espécies com maior área de distribuição tendem a ter uma sobreposição ligeiramente maior com as UCs, embora essa relação seja fraca, tendo o máximo de proteção observado sido de apenas 6%, um valor inferior ao estabelecido pelas Metas de Aichi, que recomendava a conservação de pelo menos 17% das áreas terrestres e 10% das áreas marinhas (CBD, 2020). Esse percentual também está abaixo da nova Meta 3 do Quadro Global de Biodiversidade de Kunming-Montreal, que visa proteger pelo menos 30% dessas áreas até 2030, reforçando a necessidade de ampliar os esforços de conservação para garantir a proteção efetiva da biodiversidade (CBD, 2022). O valor da inclinação da regressão (0.019) indica que, para cada aumento de 10^{11} km² na área total da UC, a área de sobreposição aumenta, em média, apenas 0.019×10^{11} km², ou seja, um ganho marginal. Isso sugere que o aumento da área de UCs não tem sido eficaz para proteger interações ecológicas entre *V. rufa* e seus polinizadores, com esses padrões demonstrando que as estratégias atuais de conservação não estão conseguindo garantir a proteção das interações ecológicas, o que pode comprometer a manutenção dos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo.

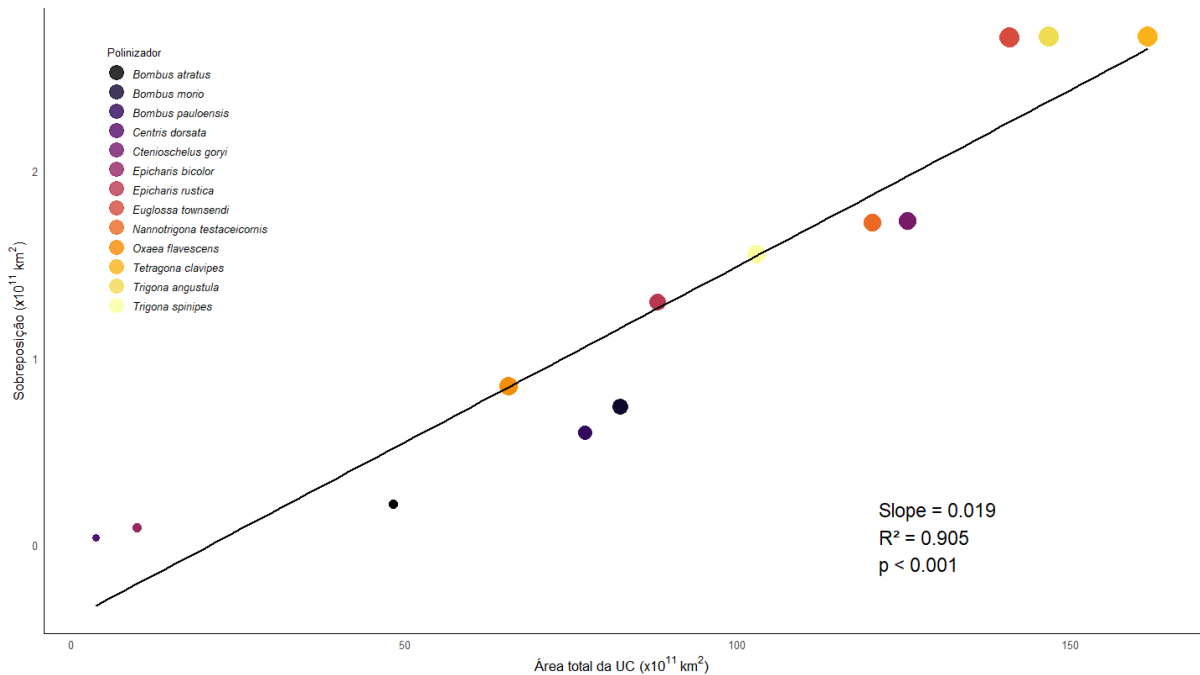


Fig. 3. Relação entre a área total das unidades de conservação (UCs) e a área de sobreposição com a planta *Vochysia rufa* para diferentes espécies de polinizadores. Cada ponto representa uma espécie de polinizador, com a cor indicando a identidade da espécie e o tamanho do ponto proporcional à área de sobreposição. A linha preta representa o ajuste de regressão linear entre as variáveis. Os valores do slope, R^2 e p indicam a força, direção e significância estatística da relação.

Essa tendência é particularmente preocupante para espécies com distribuição mais restrita, que possuem menor chance de estarem incluídas nos limites das UCs. Isso pode estar relacionado ao fato de que a criação das UCs no Brasil historicamente prioriza a conservação de mamíferos e aves, negligenciando insetos polinizadores, como as abelhas, mesmo quando estas possuem papel ecológico crucial e distribuição limitada. Esse padrão de proteção desigual pode comprometer seriamente a persistência dessas espécies e de suas interações ecológicas, resultando em efeitos em cascata sobre os serviços ecossistêmicos de polinização.

Em suma, os resultados apontam para uma realidade preocupante, onde mesmo em cenários de maior governança, as interações entre *Vochysia rufa* e seus polinizadores estão em declínio, e que ainda, a expansão das UCs por si só não garante uma proteção eficiente, o que

nos leva a pensar na necessidade de rever estratégias de conservação com foco mais explícito na preservação de interações ecológicas e dos serviços ecossistêmicos associados.

5. DISCUSSÃO

Os resultados do presente estudo reforçam a complexidade das interações entre mudanças climáticas, plantas e seus polinizadores, destacando a vulnerabilidade de *Vochysia rufa* e suas espécies polinizadoras. O cenário de menor governança demonstrou uma intensificação dos efeitos negativos ao longo do tempo, mesmo em 2021. Isso evidencia a necessidade de considerar o impacto contínuo das mudanças climáticas em diferentes escalas temporais e geográficas. Embora *Trigona spinipes* apresente resiliência relativa devido à sua ampla distribuição geográfica, a redução de sobreposição para esta espécie também se torna evidente em um horizonte de 100 anos, destacando que nenhuma espécie está completamente imune aos impactos projetados.

Os modelos climáticos utilizados, como IPSL-CM6A-LR e EC-Earth3-Veg, apresentaram perdas significativas devido às suas ênfases em diferentes variáveis ecológicas, como padrões de precipitação e mudanças na vegetação (Boucher et al., 2020; EC-Earth Consortium, 2020). Essas diferenças ressaltam a importância de integrar múltiplos cenários climáticos para captar melhor as incertezas associadas a projeções futuras. Além disso, os resultados mostraram que os impactos não dependem exclusivamente da governança ambiental; mesmo em cenários com maior governança, as perdas de sobreposição são inevitáveis devido às alterações climáticas, nas análises que não consideram os efeitos do solo. De fato, com a inclusão dos dados de solo, os modelos apontam uma perda ainda maior e significativa ao longo do tempo em ambos os cenários analisados (SSP245 e SSP585). A

limitação imposta por atributos edáficos, reduziu ainda mais as áreas com condições adequadas à persistência das espécies. Essa perda foi observada de forma contínua nas projeções futuras, sendo especialmente acentuada no cenário de altas emissões (SSP585), no qual as restrições combinadas de clima e solo resultaram em uma diminuição substancial das áreas de sobreposição. Isso evidencia que, mesmo em contextos com políticas de conservação mais eficazes, a resposta dos ecossistemas às mudanças climáticas pode ser agravada por fatores locais, como as limitações impostas pelas características do solo. Todos esses resultados podem ser explicados pela nossa hipótese inicial de que o solo restringe as possibilidades de adaptação das espécies de plantas às mudanças climáticas, em comparação com as possibilidades de mudanças de distribuição aberta às abelhas. Estudos indicam que *V. rufa* têm uma certa aptidão a tipos de solo como o Latossolo, onde ela mantém altas concentrações de alumínio em substratos mais ácidos, mas em solos calcários, esse acúmulo cai drasticamente (Haridasan, M., 1982; Haridasan, M et al.,1986). Outro estudo (Andrade et al.,2023) demonstra a plasticidade fisiológica de *Vochysia* frente ao substrato rico em Ni, onde não há a hiperacumulação de alumínio, apenas concentrando o nitrogênio em tecidos foliares. Esses estudos podem reforçar nossa hipótese, no entanto, a forma como os solos foram incluídos no modelo ainda reflete uma lacuna na associação ou uma associação predominantemente estatística, que não incorpora de forma explícita os mecanismos de controle dessas populações. Além disso, a escala espacial de variação das características dos solos pode ser muito menor do que as das características climáticas e incorporadas de forma incompleta em nossos modelos. Essa reflexão sugere que, os cenários avaliados apontam para uma desconexão nas distribuições da planta com de seus polinizadores, mas que isso pode ser ainda mais complexo se modelos mais elaborados, mecanísticos e com resolução espacial mais alta, puderem ser desenvolvidos no futuro. Infelizmente, a construção desses modelos depende de um maior conhecimento da história natural e demografia de todas as espécies

envolvidas, além de um melhor conhecimento da própria interação. Esses aspectos são pouco conhecidos para a interação discutida nesse trabalho e para a maioria das interações planta-polinizadores ameaçadas em sistemas como o Cerrado brasileiro (Biesmeijer, J.C et al., 2007; Boff, S. et al., 2025; Oliveira, P.E et al., 2006; Hall, M., Johnson, S.D., 2022).

A frequência com que os impactos são observados mesmo em 2021 e sua intensificação em cenários de menor governança indicam que ações imediatas de mitigação podem retardar os impactos negativos, mas não os eliminar completamente. A ausência de governança acelera os efeitos adversos, mesmo para espécies amplamente distribuídas como *Trigona spinipes*, sugerindo que estratégias integradas, considerando tanto o clima quanto o uso do solo, são fundamentais para a conservação das interações planta-polinizador. Assim, conclui-se que a proteção das interações planta-polinizador depende de abordagens que integrem governança, clima, solo e variabilidade biológica. Estratégias que combinem mitigação climática com conservação ecológica são essenciais para garantir a continuidade dos serviços de polinização prestados a *Vochysia rufa* e, por extensão, a estabilidade dos ecossistemas neotropicais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, R., Waser, N.M., Ollerton, J., 2008. Year-to-year variation in the topology of a plant–pollinator interaction network. *Oikos* 117, 1796–1807. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2008.16987.x>
- Andrade, A.F.A. de, Velazco, S.J.E., De Marco Júnior, P., 2020. ENMTML: An R package for a straightforward construction of complex ecological niche models. *Environ. Model. Softw.* 125, 104615. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104615>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S.P., Peterson, A.T., Soberón, J., Villalobos, F., 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecol. Model.* 222, 1810–1819.
- Bartomeus, I., Ascher, J.S., Wagner, D., Danforth, B.N., Colla, S., Kornbluth, S., Winfree, R., 2011. Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108, 20645–20649. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115559108>
- Bartomeus, I., Ascher, J.S., Gibbs, J., Danforth, B.N., Wagner, D.L., Hedtke, S.M., Winfree, R., 2013. Historical changes in northeastern US bee pollinators related to shared ecological traits. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 4656–4660. <https://doi.org/10.1073/pnas.1218503110>
- Batjes, N.H., 2025. World Soil Information Service (WoSIS) – Procedures for standardizing and coding soil analytical method descriptions (version 2025). ISRIC Report 2025/01, ISRIC - World Soil Information, Wageningen. <https://10.17027/isric-wdsoils-1nh7-zr51>
- Batjes, N.H., Calisto, L., de Sousa, L.M., 2024. WoSIS-latest: Standardised world soil profile data. ISRIC Soil Data Hub. <https://tinyurl.com/39xhaa9d>

Bazzanella, A.C., Dereczynski, C., Luiz-Silva, W., et al., 2024. Performance of CMIP6 models over South America. *Clim. Dyn.* 62, 1501–1516. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06979-1>

Booth, T.H., Nix, H.A., Busby, J.R., Hutchinson, M.F., 2014. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. *Divers. Distrib.* 20, 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>

Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A.L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., et al., 2020. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 12, e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>

Boucher, O., Denvil, S., Levassasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., Dupont, E., Lurton, T., 2020. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 12, e2019MS002010. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>

Bradley, N.L., Leopold, A.C., Ross, J., Huffaker, W., 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96, 9701–9704. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.17.9701>

CBD - Convention on Biological Diversity, 2020. Global Biodiversity Outlook 5. <https://www.cbd.int/gbo5>

CBD – Convention on Biological Diversity, 2022. Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. Document CBD/COP/15/L.25. <https://www.cbd.int/doc/c/e6d3/cd1d/daf663719a03902a9b116c34/cop-15-l-25-en.pdf>

De Marco, P., Nóbrega, C.C., 2018. Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. *PLOS ONE* 13, e0202403.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202403>

De Marco, P. Jr., Oliveira, B.F., Beuchle, R., Rangel, T.F., Sano, E.E., Chaves, P.B., Vieira, M.V., Diniz-Filho, J.A.F., Machado, R.B., 2023. The value of private properties for the conservation of biodiversity in the Brazilian Cerrado. *Science* 380, 298–301.

<https://doi.org/10.1126/science.abq7768>

Dixon, J.B., Weed, S.B., Kittrick, J.A., Milford, M.H., White, J.L., 1977. Minerals in soil environments. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.

Döscher, R., Acosta, M., Alessandri, A., et al., 2022. The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geosci. Model Dev.* 15, 2973–3020.

<https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

EC-Earth Consortium, 2020. EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6. Earth System Grid Federation. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.672>

Engler, R., Guisan, A., Rechsteiner, L., 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *J. Appl. Ecol.* 41, 263–274.

Fick, S., Hijmans, R., 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Fitzpatrick, M.C., Hargrove, W.W., 2009. The projection of species distribution models and the problem of non-analog climate. *Biodiversity and Conservation* 18, 2255–2261.

<https://doi.org/10.1007/s10531-009-9584-8>

- Fontúrbel, F.E., Nespolo, R.F., Amico, G.C., Watson, D.M., 2021. Climate change can disrupt ecological interactions in mysterious ways: Using ecological generalists to forecast community-wide effects. *Clim. Change Ecol.* 2, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100044>
- Gonçalves, D.J.P., Shimizu, G.H., Ortiz, E.M., Jansen, R.K., Simpson, B.B., 2020. Historical biogeography of Vochysiaceae reveals an unexpected perspective of plant evolution in the Neotropics. *Am. J. Bot.* 107, 1004–1020.
- Gordo, O., Sanz, J.J., 2005. Phenology and climate change: A long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia* 146, 484–495. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0240-z>
- Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., et al., 1981. Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science* 213, 957–966. <https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957>
- Haridasan, M., 1982. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant and Soil* 65, 265–273. <https://doi.org/10.1007/BF02374657>
- Haridasan, M., Paviani, T.I., Schiavini, I., 1986. Localization of aluminium in the leaves of some aluminium-accumulating species. *Plant and Soil* 94, 435–437. <https://doi.org/10.1007/BF02374336>
- Heikkinen, R.K., Luoto, M., Araújo, M.B., Virkkala, R., Thuiller, W., Sykes, M.T., 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Prog. Phys. Geogr.* 30, 751–777.
- Hegland, S.J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjerknæs, A.-L., Totland, Ø., 2009. How does climate warming affect plant-pollinator interactions? *Ecol. Lett.* 12, 184–195. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01269.x>

Janzen, D., 1974. The deflowering of Central America. *Nat. Hist. NY* 83, 49.

Karatzoglou, A., Smola, A., Hornik, K., Zeileis, A., 2004. kernlab – An S4 package for kernel methods in R. *J. Stat. Softw.* 11, 1–20. <https://doi.org/10.18637/jss.v011.i09>

Kerr, J.T., Pindar, A., Galpern, P., et al., 2015. Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science* 349, 177–180. <https://doi.org/10.1126/science.aaa7031>

Leroy, B., Delsol, R., Hugueny, B., Meynard, C.N., Barhoumi, C., Barbet-Massin, M., Bellard, C., 2018. Without quality presence–absence data, discrimination metrics such as TSS can be misleading measures of model performance. *Journal of Biogeography* 45, 1994–2002. <https://doi.org/10.1111/jbi.13402>

Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and regression by randomForest. *R News* 2(3), 18–22.

Massad, T.J., Dyer, L.A., 2010. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant-herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interact.* 4, 181–188. <https://doi.org/10.1007/s11829-010-9102-7>

Meinshausen, M., Nicholls, Z.R.J., Lewis, J., et al., 2020. The Shared Socioeconomic Pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.* 13, 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>

Mendes, P., Velazco, S.J.E., Andrade, A.F.A., De Marco, P., 2020. Dealing with overprediction in species distribution models: How adding distance constraints can improve model accuracy. *Ecological Modelling* 431, 109180. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109180>

Memmott, J., Craze, P.G., Waser, N.M., Price, M.V., 2007. Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecol. Lett.* 10, 710–717.

<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01061.x>

O’Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., et al., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 3461–3482.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Parmesan, C., 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37, 637–669.

<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>

Pastor, J., Post, W.M., 1988. Response of northern forests to CO₂-induced climate change. *Nature* 334, 55–58. <https://doi.org/10.1038/334055a0>

Phillips, S., 2017. Maxnet: Fitting ‘Maxent’ species distribution models with ‘glmnet’. R package version 0.1.4.

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., et al., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob. Environ. Change* 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Roberts, D.R., Bahn, V., Ciuti, S., et al., 2017. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography* 40, 913–929.

Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., et al., 2019. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 11, 4182–4227. <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>

Sepulchre, P., Caubel, A., Ladant, J.-B., et al., 2019. IPSL-CM5A2. An Earth system model designed for multi-millennial climate simulations: Boundary conditions and outputs. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3549769>

Staudinger, M.D., Carter, S.L., Cross, M.S., Dubois, N.S., Duffy, J.E., Enquist, C., Griffis, R., Hellmann, J.J., Lawler, J.J., O'Leary, J., Morrison, S.A., Sneddon, L., Stein, B.A., Thompson, L.M., Turner, W., 2013. Biodiversity in a changing climate: a synthesis of current and projected trends in the US. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11, 465–473. <https://doi.org/10.1890/120272>

Shepherd, K.D., Ferguson, R., Hoover, D., et al., 2022. A global soil spectral calibration library and estimation service. *Soil Secur.* 7, 100061.

Soil Survey Staff, 2022. Soil Survey Laboratory Methods Manual (Version 6.0). Soil Surv. Investig. Rep. No. 42, USDA-NRCS, Lincoln, NE. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/SSIR42.pdf>

Stenseth, N.C., Mysterud, A., 2002. Climate, changing phenology, and other life history traits: Nonlinearity and match–mismatch to the environment. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99, 13379–13381. <https://doi.org/10.1073/pnas.212519399>

Suttle, K.B., Thomsen, M.A., Power, M.E., 2007. Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science* 315, 640–642. <https://doi.org/10.1126/science.1136401>

Tanda, A.S., 2023. Advances in Insect Pollination Technology in Sustainable Agriculture. IK International Pvt Ltd.

Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., et al., 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427, 145–148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>

Thuiller, W., 2007. Climate change and the ecologist. *Nature* 448, 550–552. <https://doi.org/10.1038/448550a>

Tylianakis, J.M., Didham, R.K., Bascompte, J., Wardle, D.A., 2008. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecol. Lett.* 11, 1351–1363. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01250.x>

Van der Putten, W.H., Macel, M., Visser, M.E., 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, 2025–2034. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0037>

Visser, M.E., Both, C., 2005. Shifts in phenology due to global climate change: The need for a yardstick. *Proc. R. Soc. B* 272, 2561–2569.

Warren, R., Price, J., Vanderwal, J., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T.J., Jarvis, A., Shoo, L.P., Williams, S.E., Watts, G., 2023. The implications of global warming of 1.5 °C and 2 °C for endemic species. *Climatic Change* 180, 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03666-2>

Wisz, M.S., Hijmans, R.J., Li, J., et al., 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Divers. Distrib.* 14, 763–773.

Zuquim, G., Costa, F.R.C., Tuomisto, H., Prado, J., Moulatlet, G.M., Figueiredo, F.O.G., Emilio, T., Lehtonen, S., Schietti, J., Levisi, L., Quesada, C.A., 2020. The importance of soils in predicting the future of plant habitat suitability in a tropical forest. *Plant and Soil* 450, 151–170. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03915-9>