

TALITA SANTOS EL HINDI

**Futuros efeitos climáticos sobre as rotas
migratórias de uma ave sul-americana
(*Tyrannus savana*; Passeriformes:
Tyrannidae)**

Rio Claro

2021



TALITA SANTOS EL HINDI

**FUTUROS EFEITOS CLIMÁTICOS SOBRE AS ROTAS MIGRATÓRIAS
DE UMA AVE SUL-AMERICANA (*TYRANNUS SAVANA*;
PASSERIFORMES: TYRANNIDAE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau de Bacharela em Ciências biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Pizo Ferreira –
Departamento de Biodiversidade, Instituto de Biociências, UNESP, Rio Claro, SP

Coorientadora: Dra. Natália Stefanini da Silveira –
Departamento de Biodiversidade, Instituto de Biociências, UNESP, Rio Claro, SP

Colaborador: Alex E. Jahn – Indiana University,
Environmental Resilience Institute, IU Bloomington, Indiana, USA

Rio Claro

2021

H662f

Hindi, Talita Santos El

Futuros efeitos climáticos sobre as rotas migratórias de uma ave sul-americana (*Tyrannus savana*; Passeriformes: Tyrannidae) / Talita Santos El Hindi. -- Rio Claro, 2021

34 p. : fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biotecnologia, Rio Claro

Orientador: Marco Aurélio Pizo Ferreira

Coorientadora: Natália Stefanini da Silveira

1. Biologia. 2. Zoologia. 3. Animais Populações. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biotecnologia, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

TALITA SANTOS EL HINDI

**FUTUROS EFEITOS CLIMÁTICOS SOBRE AS ROTAS MIGRATÓRIAS
DE UMA AVE SUL-AMERICANA (*TYRANNUS SAVANA*;
PASSERIFORMES: TYRANNIDAE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharela em Ciências biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco Aurélio Pizo Ferreira (orientador)

Dra. Natália Stefanini da Silveira (coorientadora)

Ma. Vanesa Fabíola Bejarano Alegre

Dra. Karlla Vanessa de Camargo Barbosa

Aprovado em: 18 de janeiro de 2022

Talita Santos El Hindi

Marco A. Pizo

Natalia Stefanini da Silveira

Assinatura do discente

Assinatura do orientador

Assinatura da coorientadora

"As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP"

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento e apoio a esse trabalho de processo 2019/22228-0.

Sou muito grata a meus pais, Rosineide e Ahmad, meus avós, Sebastiana e Claudomiro, minha tia Silvia que me ajudou num momento de dificuldade, e ao restante da minha família, pelo apoio e ajuda para que eu pudesse passar esses anos de graduação com dedicação somente a ela.

Quero agradecer ao Laboratório de Ecologia de Aves por me acolher, pela Natalia e Marco aceitarem me orientar, vocês me ajudaram muito e foram pacientes comigo, gostei muito de trabalhar com vocês nesse projeto. Também sou muito grata pela colaboração do Alex, e pela ajuda do Maurício.

Aos meus amigos Alicia, Catarina, Gustavo, Hayen, Iryna, Juliana, Lucas, Marcio e Natalia por aguentarem meus surtos, vocês ficaram do meu lado em todos os momentos bons e não me abandonarem durante os períodos difíceis.

Meus outros amigos Andreza, Eloá, Daniela, Gabriela, Giovanna, Helena, Isabela, Mariana, Marta e Mario que me ajudaram muito, serei eternamente grata a vocês também. E agradeço muito ao Arthur, Rafaela e Silvia que me acolheram no grupo das passarinhadas e me apresentaram o belo mundo das aves, pelo qual nunca achei que fosse tão encantador.

Também sou grata ao Hoseok, Jimin, Jungkook, Namjoon, Seokjin, Taehyung, Yoongi e o meu cachorro Bob, por me ajudarem a manter a sanidade durante o período de isolamento devido a pandemia, no qual redigi esse trabalho e fiz os relatórios associados ao projeto, vocês são tão importantes para mim quanto a minha família e amigos.

Queria dizer vários nomes, tem tanta gente que me ajudou só de ouvir sobre o que eu trabalhei nesse projeto e me encorajou, vocês têm a minha gratidão, por mais simples que tenha sido a sua atenção.

Por fim, gostaria de agradecer a você que está lendo esse trabalho, espero que goste, porque eu fiz com carinho e amor pelas aves.

고마워 내가 나이게 해줘서
이 내가 날게 해줘서
이런 내게 날갯 줘서
꼬깃하던 날 개 줘서
답답하던 날 깨줘서
꿈 속에만 살던 날 깨워줘서
널 생각하면 날 개어서
슬픔 따윈 나 개 줘서
Thank you, "우리" 가 돼 줘서

- 방탄소년단

Abstract

The Fork-tailed flycatcher *Tyrannus savanna* present migratory strategies that differ between populations. The Argentine populations performs austral migration (i.e., trespass the Tropic of Capricorn during the breeding season), while Brazilian populations perform intertropical migration (stay the entire year between the Tropics), both overwintering at northern South America. The aim of this project was to answer if their adequate areas of wintering and reproduction would be affected and modified by future climate change, and which migratory system would suffer the higher impact. Therefore, a climate model was produced using presence data with previsions to the years of 2050 and 2070. Our discoveries showed that all populations will be affected, with dislocation of potential areas, and gain or loss of adequate territories, but also stability in both periods of reproduction and wintering. Those who execute austral migration will be the most affected, with bigger displacement and losses of potentially adequate territories.

Keywords: Biology. Zoology. Animal populations.

Resumo

A espécie tesourinha *Tyrannus savana* possui estratégias migratórias que difere entre suas populações. As populações argentinas realizam migração austral (ultrapassam o trópico de Capricórnio durante a estação reprodutiva), e as populações brasileiras realizam migração intratropical (permanecem o ano inteiro entre os trópicos), ambas com internada no norte sul-americano. O objetivo desse trabalho foi responder se as áreas de refúgio de inverno e reprodução serão afetadas e modificadas pelas mudanças climáticas futuras, e qual sistema migratório sofrerá maior impacto. Fizemos um modelo climático usando dados de ocorrência com camadas climáticas para o ano de 2050 e 2070. Descobrimos que todas as populações sofrerão impactos relacionados ao deslocamento de áreas potenciais adequadas e ganho ou perda de territórios adequados, mas também haverá estabilidade tanto no período de reprodução quanto de inverno. Aquelas que realizam migração austral serão as mais afetadas com maior deslocamento e perda de territórios potencialmente adequados.

Palavras-chave: Biologia. Zoologia. Animais Populações.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Sistemas migratórios	8
1.2 Impacto das mudanças climáticas.....	10
2 OBJETIVOS	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1 Banco de dados	11
3.2 Variáveis bioclimáticas	12
3.3 Modelagem de nicho ecológico	14
4 RESULTADOS	15
4.1 Camadas bioclimáticas.....	15
4.2 Modelagem de nicho ecológico	18
4.2.1 MIGRANTES INTRATROPICAIS.....	18
4.2.2 MIGRANTES AUSTRALIS	24
5 DISCUSSÃO	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas migratórios

Aves migratórias possuem sistemas complexos de migração nos quais diferentes populações de uma mesma espécie podem utilizar sistemas migratórios diferentes, ou ainda podem usar estratégias parcialmente migratórias (Faaborg et al, 2010). Esses sistemas compostos por movimentos entre os locais de reprodução e invernada, incluindo suas rotas e locais de parada envolvem adaptações na fisiologia, morfologia e comportamento, sofrendo influências de fatores abióticos, interações ecológicas e pressões seletivas (Jahn e Cueto, 2012). Nos Neotrópicos é possível observar padrões gerais de migração em resposta a sazonalidade climática (e.g. como nas tesourinhas, *Tyrannus savana*), e a sazonalidade de recursos (e.g. *Sporophila falcirostris* e *S. frontalis* que seguem o padrão de produção de sementes de bambus) (Areta et al, 2013; Somenzari et al, 2018).

Além dos padrões gerais, dois padrões geográficos são observados em populações de *T. savana*: migração intratropical e migração austral. Duas das populações possuem todo o seu ciclo anual na América do Sul, sendo que a migração intratropical consiste numa estratégia em que as aves não ultrapassem os trópicos, enquanto que a migração austral corresponde a aves que se reproduzem em latitudes mais austrais e passam a invernada nos trópicos Sul-Americanos (Faaborg et al, 2010).

Na migração intratropical de *T. savana*, a partida do local de invernada para aves que saem, por exemplo, de Brasília e São Paulo em direção à Floresta Amazônica, é entre julho e agosto, com chegada entre o fim de agosto e início de setembro. A população que realiza migração austral possui período de invernada de abril até setembro. O início da migração de primavera ocorre entre o final agosto e setembro, quando saem de Buenos Aires e La Pampa na, Argentina e vão em direção à Floresta Amazônica, com chegada em outubro (Figura 1).

Portanto, a principal diferença entre essas duas estratégias é a distância percorrida entre o local de invernada e o local de reprodução. Essa diferença tem implicações para as rotas migratórias adotadas, que oferecem diferentes cenários climáticos e disponibilidade de recursos, de forma que há desafios diferentes pouco

conhecidos, especialmente porque não se conhece todas as pressões seletivas que moldam essas estratégias migratórias entre populações co-específicas (Jahn et al, 2019).

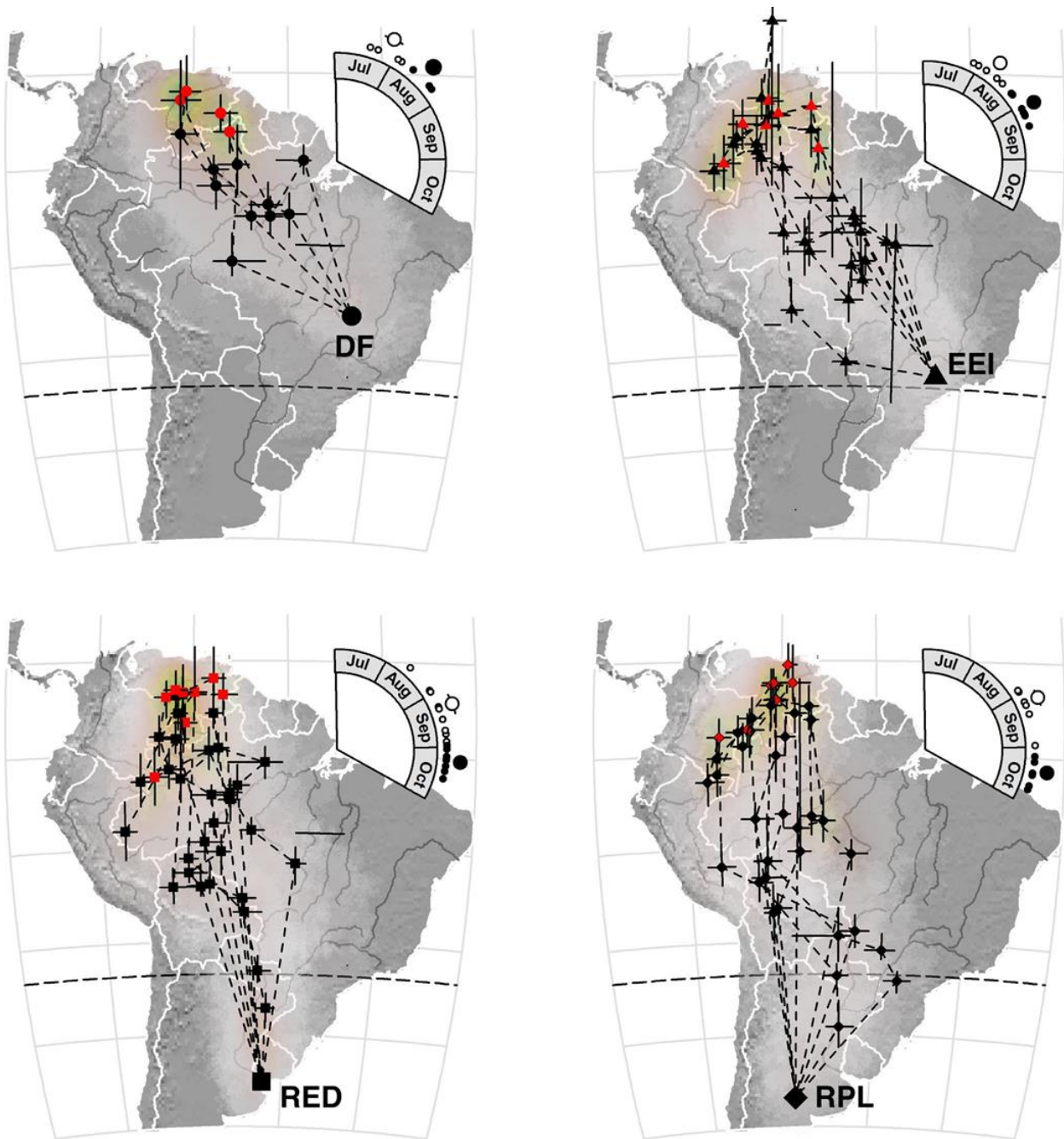


Figura 1. Rotas de migração de primavera e locais de paradas das tesourinhas de quatro locais de reprodução na América do Sul. Os símbolos grandes de cada mapa representam o local de reprodução, os símbolos vermelhos e pequenos representam os períodos de invernada estacionária. As linhas nos polígonos representam 95% de credibilidade no intervalo de latitude e longitude. As linhas pontilhadas podem não representar o caminho real de migração que os indivíduos usaram entre os locais de parada. O sombreamento nos locais de invernada no norte da América do Sul representa localização incerta. A inserção em cada mapa mostra o local de partida da primavera (círculos pequenos abertos) e subsequentemente a data de chegada da reprodução (círculos pequenos fechados) de cada indivíduo. A data de partida média (círculo grande aberto) e de chegada (círculo grande fechado) para cada

população também é mostrada (linhas mostradas em alguns círculos grandes representam erro padrão). DF: Distrito Federal, Brasil; EEI: Estação Ecológica de Itirapina, São Paulo, Brasil; RED: Reserva Natural El Destino, Buenos Aires, Argentina; RPL: Reserva Provincial Parque Luro e propriedades privadas vizinhas, La Pampa, Argentina; SD: desvio padrão. Fonte: Jahn et al, 2019.

1.2 Impacto das mudanças climáticas

As variações climáticas ao longo do tempo causam impacto na história de vida dos seres vivos. O impacto atinge níveis que vão do organismo até biomas inteiros, podendo ser observado em três eixos: espacial, temporal e individual (Bellard et al, 2012).

Esses impactos das mudanças climáticas bruscas atingem, por exemplo, os sistemas migratórios das aves (como perda de território e alterações de rotas nos sistemas de migração presente no Holártico). Assim como outros grupos migratórios (e.g. insetos e invertebrados marinhos), que modificam datas de partida e chegada, afetando negativamente a reprodução (Zurell et al, 2018; Parmesan, 2006).

Dessa maneira, este projeto foi construído com o objetivo de dar continuidade ao trabalho do Pesquisador Dr. Alex Jahn, (Indiana University, Environmental Resilience Institute, IU Bloomington, Indiana, USA) no projeto FAPESP "A evolução da migração das aves: A teoria atual se aplica na América do Sul?" (Processo no. 12/17225-2) investigou a migração da tesourinha *T. savana* no continente sul-americano (Jahn et al, 2019; Bejarano e Jahn, 2018; Jahn et al, 2016; Jahn et al 2013; Jahn e Cueto, 2012; MacPherson et al, 2018). Investigamos as áreas de distribuição da espécie *T. savana* em dois sistemas de migração distintos em previsões climáticas futuras para responder se (1) haverá modificações nas áreas de invernada e reprodução e, se houver mudanças, (2) quais mudanças serão essas (perda ou ganho de território) e (3) qual sistema de migração será mais afetado.

A primeira hipótese que foi testada é que tanto a estratégia migratória intratropical quanto a austral sofrerão impacto de mudanças climáticas, pois há evidências de que todos os grupos taxonômicos estudados sofrem impactos em todos os níveis decorrente das mudanças climáticas (Parmesan, 2006; Bellard et al, 2012). As tesourinhas, por apresentarem sistemas migratórios complexos, são altamente dependentes da pontualidade de saída e chegada dos seus locais de invernada e reprodução (Jahn et al, 2012).

A segunda hipótese que foi testada previa a estratégia de migração austral sofrer maior impacto climático que a estratégia de migração intratropical, pois a precipitação é um preditor importante na distribuição de populações migrantes austrais de *T. Savana* (MacPherson et al; 2018). Os migrantes austrais possuem um contexto ecológico diferente das populações migrantes intratropicais, com sazonalidade mais definida e maior altitude nos locais de reprodução, com pressões seletivas diferentes (Jahn et al, 2019). Como resultado, essas populações se tornam menos resiliente às mudanças de clima e precipitação, que também acarretam problemas na obtenção de recursos e estratégias reprodutivas.

2 OBJETIVOS

Investigar as áreas distribuição da espécie *T. savana* em dois sistemas de migração distintos sob cenários climáticos futuros para elucidar as dinâmicas pelas quais a espécie passa, entender os impactos que as mudanças climáticas causam nessas áreas e como isso reflete em duas populações diferentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Banco de dados

Os dados utilizados foram provenientes de registros fornecidos do trabalho de Jahn et al (2019) que consta no banco de dados Movebank (www.movebank.org/). Os registros do trabalho de Jahn et al (2019) foram coletados por geolocalizadores que monitoraram o movimento de 28 indivíduos de *T. savana*, resultando em 9223 pontos (dados brutos). Eles possuem quatro pontos de origem nas áreas de reprodução: Brasília e São Paulo no Brasil, Buenos Aires e La Plata na Argentina. Usamos período de um ciclo reprodutivo de reprodução, migração de outono, invernada e migração de primavera.

Os dados foram computadorizados em tabelas no Excel, compreendendo a data e ano de coleta, localização do registro (latitude e longitude), código específico do

geolocalizador e enumeração dos indivíduos. Eles foram separados de acordo com sua população de origem, respeitando os quatro grupos estabelecidos: população argentina em migração de primavera, população brasileira em migração de primavera, população brasileira em invernada e população argentina em invernada. Além disso acrescentamos os grupos brasileiros e argentinos em outono e reprodução, respectivamente.

Usamos nesse trabalho apenas os dados de áreas de reprodução e invernada, e para definir ambos os períodos de migração de primavera e invernada usamos as datas que constam no trabalho de Jahn et al (2019), no qual consta a data específica do início e chegada da migração de primavera e da duração do período de invernada de todos os 28 indivíduos da espécie.

Usamos a data do primeiro indivíduo a ter partido e do último a ter chegado para todos os migrantes da Argentina e todos os do Brasil como período de migração de primavera, e usamos a duração média do período de invernada para contar os meses anteriores da migração de primavera. O mesmo método foi usado para usar de referência os períodos de reprodução e outono (Jahn et al, 2016).

Utilizando a América do Sul como *background*, registros contendo erros dos geolocalizador e *outliers* (i.e. coordenadas imprecisas) foram removidos. Os registros contendo a mesma identificação, data e localização também removidos. Além disso, todos os pontos contidos em cada célula de um *grid* com células de 1 km de lado foram removidos para resultar em apenas um ponto de ocorrência dentro de cada célula escolhida aleatoriamente no processo de rarefação dos pontos. Utilizamos os softwares R 3.6.3 para aplicação dos filtros e rarefação dos pontos de ocorrência e QGis 3.12.0 para a projeção dos mapas contendo os registros.

3.2 Variáveis bioclimáticas

Modelos de nicho ecológico são comumente projetados em paleoclimas simulados com Modelos de Circulação Geral (GCMs). Em termos gerais, um GCM é uma representação matemática dos processos físicos que operam na atmosfera, oceano, criosfera e superfícies terrestres e são largamente aplicadas em testes e previsões de

respostas climáticas globais para variações em parâmetros planetários sobre as dinâmicas climáticas dos GCMs (VARELA, 2015).

Utilizamos os respectivos GCMs do CMPI5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>) hospedados na plataforma WorldClim (<https://worldclim.org/>) versão 1.4 em uma resolução de aproximadamente 2,5 km x 2,5 km no Equador: CCSM4 University of Miami – RSMAS, Estados Unidos; MIROC-ESM Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japão; MRI-CGCM3 Meteorological Research Institute, Japão. Os GCMs obtidos são para os cenários presente e futuro, e foram cortados para compreender exclusivamente a América do Sul como *background*.

Para o cenário futuro utilizamos as projeções de clima para os anos de referência de 2050 (média para o período 2041-2060) e 2070 (média para o período 2055-2070) em dois cenários de emissão contrastantes (IPCC, 2014): (i) IPCC AR-CMIP 5 / RCP 8.5 (isto é, requisito de energia máxima, emissões equilibradas entre fontes fósseis e não fóssil) e, (ii) IPCC AR-CMIP 5 / RCP 4.5 (média demanda de energia, menores emissões se comparado ao RCP 8.5).

Para reduzir a dimensionalidade e colinearidade das 19 variáveis bioclimáticas (GIANNINI et al 2012), construímos uma Análise de Componentes Principais (PCA) com valores padronizados, e para os eixos com autovalor acima de 1 (cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação), selecionamos as variáveis com maior contribuição através dos valores de carga. Depois selecionamos as variáveis de precipitação e temperatura correspondentes às características do movimento de migração das tesourinhas, variáveis com meses ou quartis mais quentes e úmidos marcam os períodos de reprodução, variáveis com meses ou quartis mais frios e secos marcam o período de invernada.

Todas essas análises foram realizadas no R (R Development Core Team, 2018) com os pacotes raster (HIJMANS, 2016) e rgdal (BIVAND et al., 2017) para realizar o manejo dos rasters. A PCA foi realizada através da função “prcomp” do pacote vegan. Os mapas contendo os pontos de ocorrência foram projetados através do QGIS (QGIS

Development Team, 3.12.0, 2015) e utilizando a máscara de cobertura do solo “Land Use” da plataforma EarthEnv (<https://www.earthenv.org/landcover>; TUANMU e JETZ 2014).

3.3 Modelagem de nicho ecológico

Utilizamos o *software* R versão 3.0.5 para estimar as distribuições potenciais (áreas de invernada e reprodução) de quatro populações de *T. savana* (população migrante intratropical com origem em São Paulo, migrante intratropical com origem em Brasília, migrante austral com origem em Buenos Aires e migrante austral com origem em La Plata). Os algoritmos que foram utilizados para estimar as distribuições potenciais, MAXENT, Random Forests (RF) e Support Vector Machine (SVM) possuem abordagem aprendizagem de máquina (*Machine Learning*), que usa o conceito de análise de Cluster (classificação de observações em grupos homogêneos (dois ou mais)).

Clustering é um método de aprendizado não supervisionado (Guisan et al, 2017), sendo estes baseados em dados de presença e background (MAXENT) e presença/pseudo ausência (SVM e RF) (Li; Guo; Elkan, 2011). O Maxent é baseado em dados de presença e background, utiliza a estimativa da densidade máxima de entropia, na qual a distribuição verdadeira da espécie é representada como uma probabilidade de distribuição Y sobre um conjunto X de locais na área de estudo (Li et al, 2011; Phillips et al, 2006).

O RF combina muitas árvores de classificação para produzir classificações mais precisas. Os subprodutos dos cálculos de RF incluem medidas de importância variável e medidas de similaridade de pontos de dados que podem ser usados para agrupamento, escalonamento multidimensional, representação gráfica e imputação de valor ausente (Cutler et al, 2006). O algoritmo SVM mapeia os dados num novo hiperespaço no qual padrões mais complicados podem ser representados de forma simples, reduzindo a entrada de *outliers* (Tax, 2001).

Foram geradas dez réplicas para cada cenário (presente, RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 e RCP 8.5 2070). A validação do modelo se deu pelo índice AUC (*area under the curve*) que consiste em dividir aleatoriamente os pontos de ocorrência

em 70% dos pontos em treino e 30% dos pontos em teste (Peterson et al, 2011). Utilizamos o método TSS (*True Skill Statistic*) para a validação, um teste que não sofre influência da prevalência das espécies estudadas (Allouche; Tsoar; Kadmon, 2006). Levamos em consideração o limiar de máxima sensibilidade e especificidade, reconhecido como melhor limiar para utilização de métodos somente presença (Liu; Newell; White, 2016). Todos os mapas resultantes foram sobrepostos utilizando a abordagem de conjunto de frequência (*frequency ensemble forecasting*).

Usamos o valor limite de “sensibilidade e especificidade máximas” de cada modelo construído para transformar o mapa contínuo em um mapa binário, para minimizar os erros de omissão e balancear a sensibilidade e especificidade (Guisan et al, 2017). Depois, concatenamos as réplicas dos mesmos algoritmos, bem como as réplicas entre algoritmos. Ao final obtivemos um mapa final de adequabilidade contínuo para o presente e para cada projeção futura. Por fim, avaliamos o sentido biológico dos modelos, comparamos os resultados parciais obtidos do presente com cada projeção do cenário futuro, e comparamos a influência destas variáveis na escolha de áreas disponíveis no processo de migração e na distribuição geográfica da espécie.

4 RESULTADOS

4.1 Camadas bioclimáticas

Das 19 variáveis ambientais disponibilizadas selecionamos as camadas, para ambos os sistemas migratórios, com os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação para construção dos modelos (figuras 2-5). Para os modelos de invernada foram selecionadas as camadas BIO04, BIO06, BIO15, BIO17 e BIO19 (figuras 2 e 3). Para a época de reprodução foram selecionadas: BIO04, BIO05, BIO15, BIO16 e BIO18 (figuras 4 e 5).

As variáveis dos meses e trimestres mais quentes e úmidos marcam os períodos de reprodução, as com meses ou trimestres mais frios e secos marcam o período de invernada. São elas BIO04 = Temperatura Sazonal (Desvio Padrão *100), BIO05 = Temperatura Máxima do Mês mais Quente, BIO06 = Temperatura Mínima do Mês mais Frio, BIO15: Precipitação Sazonal (Coeficiente de Variação), BIO16 = Precipitação do

Trimestre mais Úmido, BIO17 = Precipitação do Trimestre mais Seco, BIO18 = Precipitação do Trimestre mais Quente e BIO19 = Precipitação do Trimestre mais Frio.

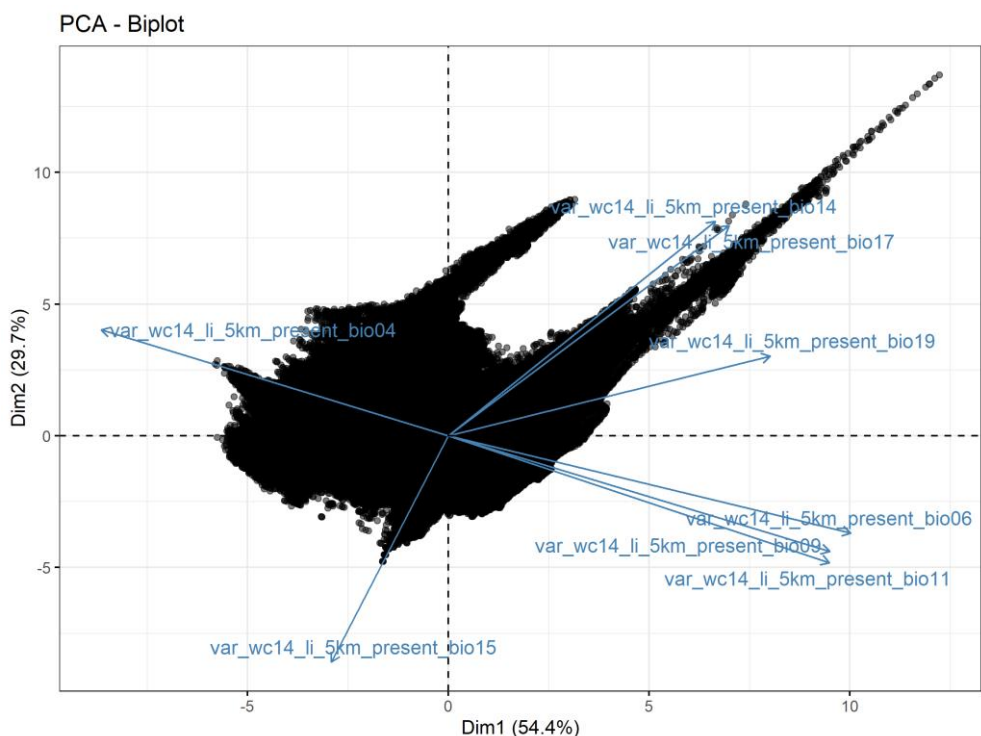


Figura 2. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de inverno. Cada vetor representa uma variável bioclimática indicada pelo nome "bio_xx" na ponta de cada um, os vetores mais próximos entre si são mais correlacionados. Nesse trabalho selecionamos as camadas com menor correlação (os vetores mais distantes entre si) e com mais contribuição a dimensão da PCA.

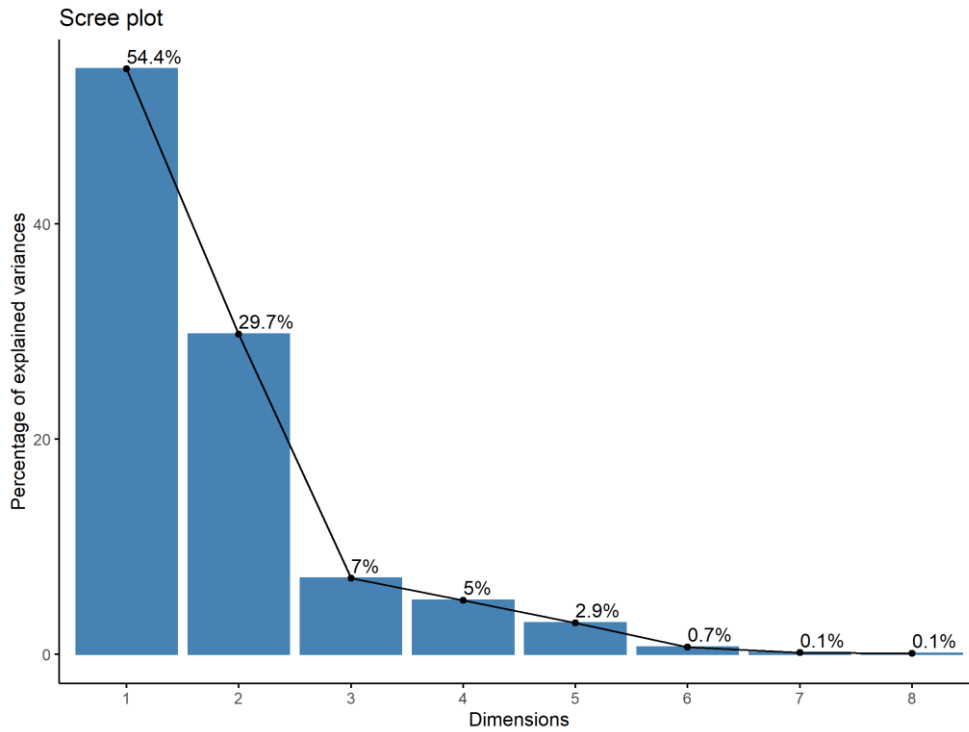


Figura 3. Scree plot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de inverno. O gráfico representa a porcentagem de contribuição de cada eixo (dimensão) da PCA. Nesse trabalho foi selecionado os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação.

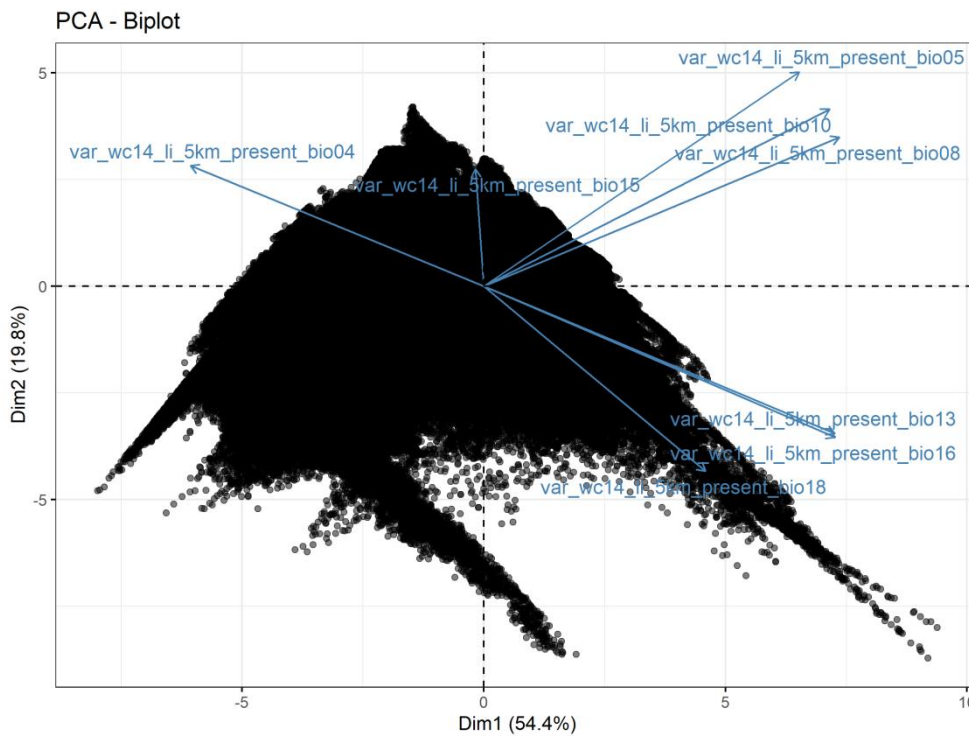


Figura 4. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de reprodução. Cada vetor representa uma variável bioclimática indicada pelo nome “bio_xx” na ponta de cada um, os vetores mais próximos entre si são mais correlacionados. Nesse trabalho selecionamos as camadas com menor correlação (os vetores mais distantes entre si) e com mais contribuição a dimensão da PCA.

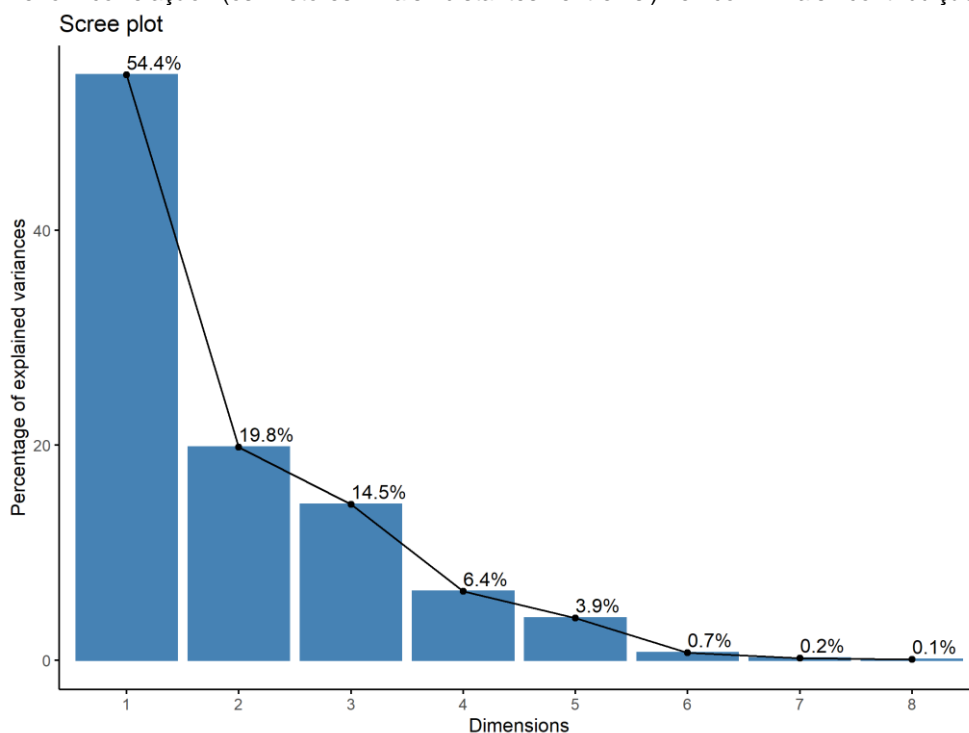


Figura 5. Scree plot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de reprodução. O gráfico representa a porcentagem de contribuição de cada eixo (dimensão) da PCA. Nesse trabalho foi selecionado os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação.

4.2 Modelagem de nicho ecológico

Ao todo, foram gerados 96 modelos finais com todas as réplicas, sendo 12 por população separados de acordo com o período migratório (nidificação e invernada). Os 12 modelos de diferentes algoritmos para o mesmo período reprodutivo e projeção (presente e futuro) foram concatenados para melhor visualização. O limite de corte utilizado para todos os modelos foi o *threshold* de máxima sensibilidade e especificidade. Os gráficos e mapas de perdas e ganhos contém somente a projeção futura rcp 8.5, pois é a projeção que mais apresenta diferença na comparação com o presente.

4.2.1 MIGRANTES INTRATROPICAIS

Para a invernada dos indivíduos amostrados em Brasília houve maior estabilidade para ambas as projeções de 2050 e 2070, seguida de grandes ganhos de

território ao sul (figura 6A) também para 2050 e 2070, mas contendo grandes e pequenas perdas no centro da área (figura 7A). Pequenos e médios ganhos e médias perdas não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Nos mapas de adequabilidade de invernada (figura 8), o presente mostra uma área menor com mais adequabilidade no extremo nordeste da área de inverno, enquanto que na projeção RCP 4.5 de 2050 mostra maiores ganhos. As projeções RCP 8.5 de 2050 e 2070 mostram uma perda suave de adequabilidade nessa área e um pouco de ganho na borda sul de toda a área de invernada, sendo mais acentuada no ano de 2070.

Nas áreas de nidificação houve mais grandes perdas do que estabilidade para ambas as projeções de 2050 e 2070 (figura 6B), essa concentrada nas áreas leste, sul e sudeste do mapa (figura 7B).

Na adequabilidade das áreas de nidificação (figura 9), a projeção para o presente mostra grande adequabilidade na área, sendo perdida gradualmente entre as projeções futuras RCP 4.5 e 8.5 de 2050. Houve poucos ganhos nas projeções RCP 4.5 e 8.5 para o ano de 2070, ao sul da área de invernada, e poucas perdas na adequabilidade total no nordeste da área.

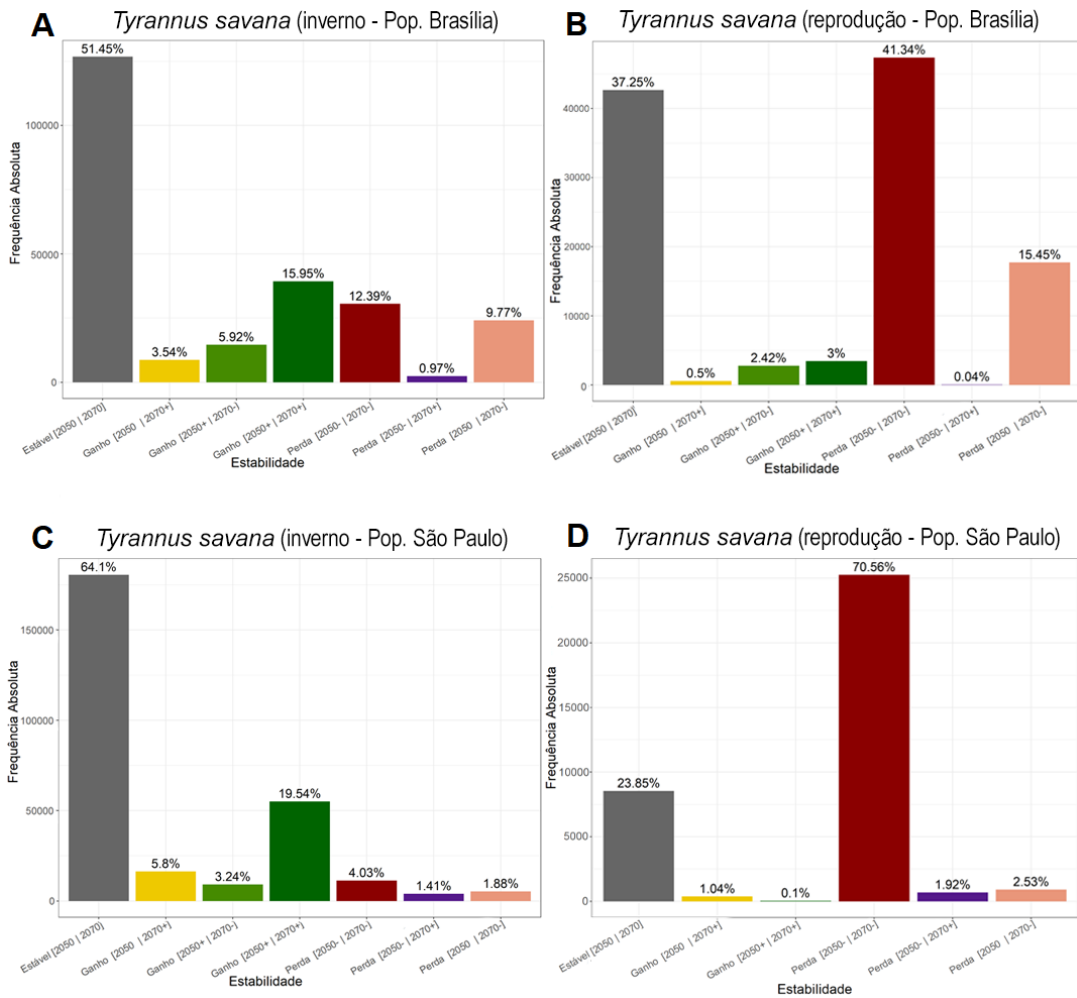


Figura 6. Gráfico de perdas e ganhos dos migrantes intratropicais na projeção RCP 8.5. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente. O sinal positivo na frente do ano da projeção no eixo horizontal significa ganhos positivos, o sinal negativo significa perda e nenhum sinal significa estabilidade. O esquema de cores de cada ano corresponde a paleta de cores do mapa de estabilidade (figura 7).

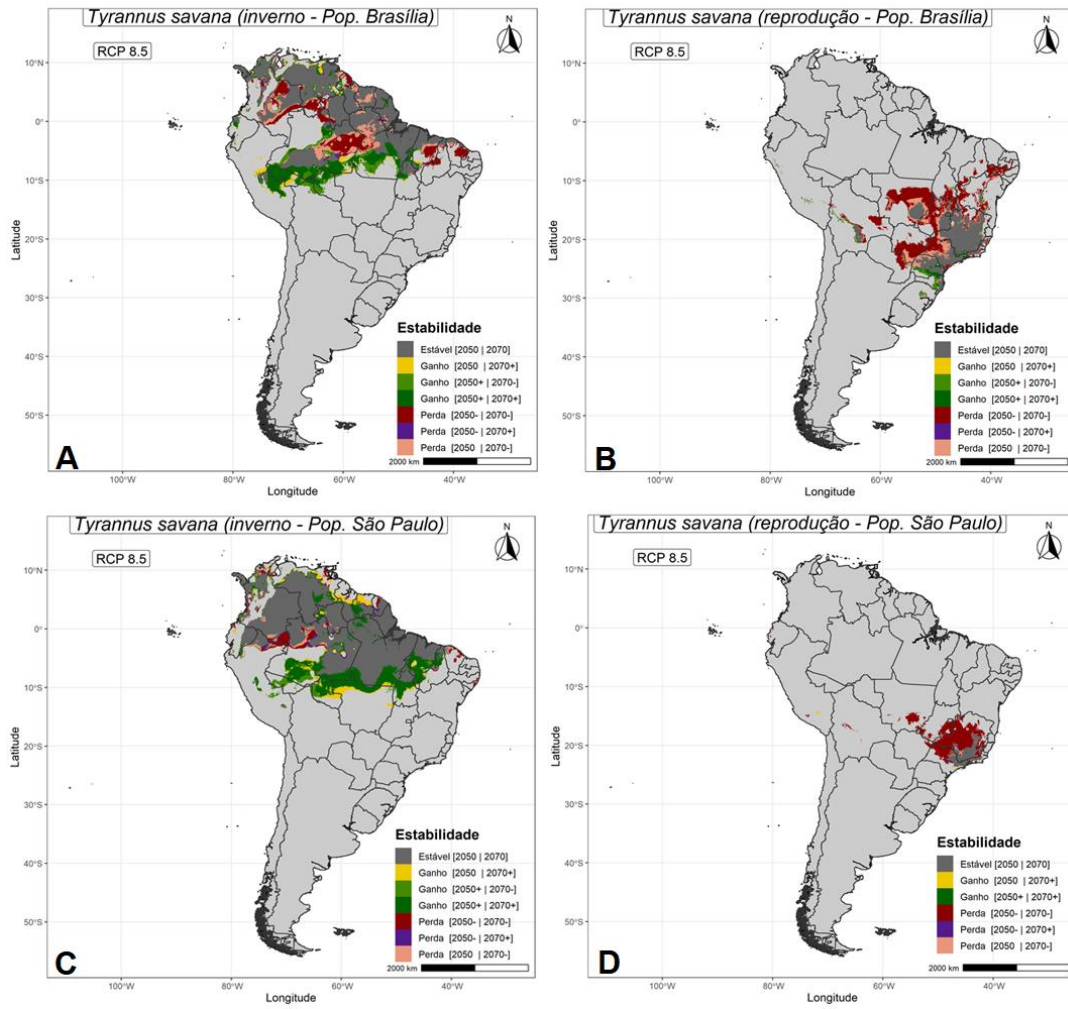


Figura 7. Mapa de perdas e ganhos dos migrantes intratropicais. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente.

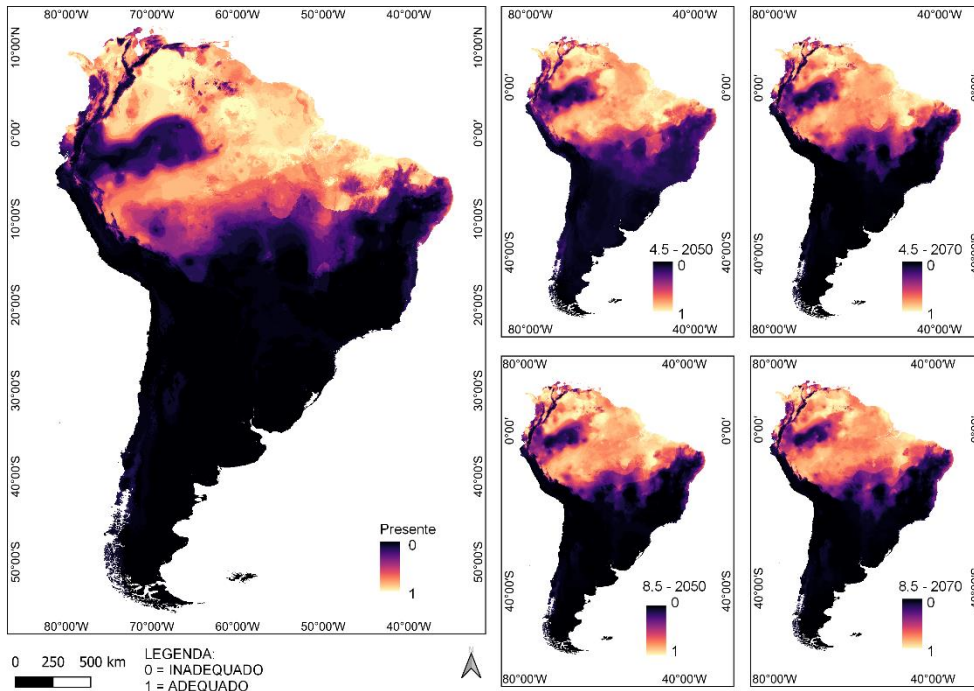


Figura 8. Adequabilidade da população de Brasília em áreas de invernoada.

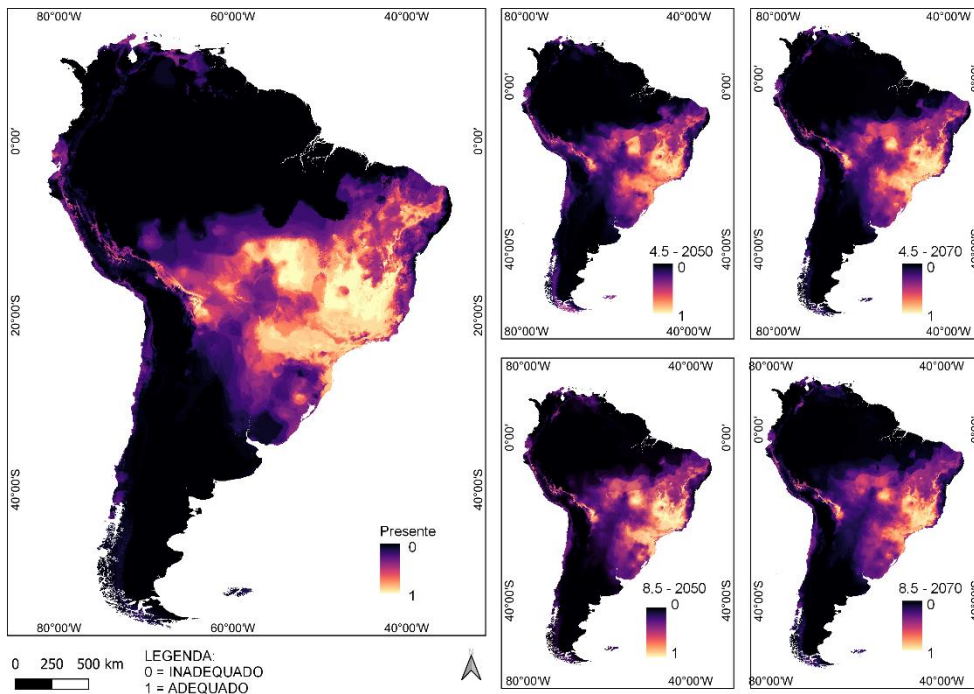


Figura 9. Adequabilidade da população de Brasília em áreas de reprodução.

Para a invernada dos indivíduos amostrados em São Paulo, também houve maior estabilidade, seguida de grandes e pequenos ganhos para as projeções RCP 8.5 2050 e 2070 (figura 6C), essas concentradas ao sul da área marcada (figuras 7C e 10).

As áreas de nidificação de maior adequabilidade tiveram redução e grande descolamento, do extremo nordeste na projeção do presente para o sudeste em todas as projeções futuras, sendo a projeção RCP 4.5 para o ano de 2050 com maiores perdas (figura 10).

Quanto à reprodução, houve grandes perdas, seguidas de estabilidade ambas para as projeções de 2050 e 2070 (figura 6D). Essas perdas localizadas ao norte e nordeste da área de nidificação, enquanto a estabilidade se manteve ao sul/sudeste (figura 7D), alinhadamente com o mapa de adequabilidade (figura 11).

Ainda na adequabilidade, as projeções RCP 4.5 para os anos de 2050 e 2070 apresentaram perdas de adequabilidade graduais nas bordas das áreas, e as projeções RCP 8.5 para ambos os anos mostraram mais perdas nas bordas e redução da área adequada, sendo o ano de 2070 com mais perdas.

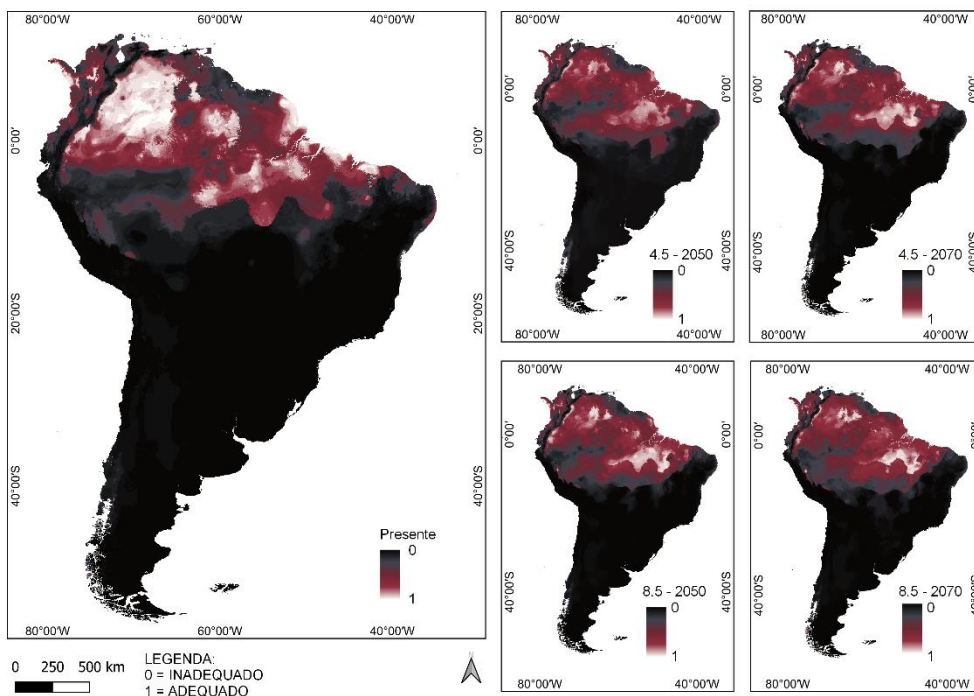


Figura 10. Adequabilidade da população de São Paulo em áreas de invernada.

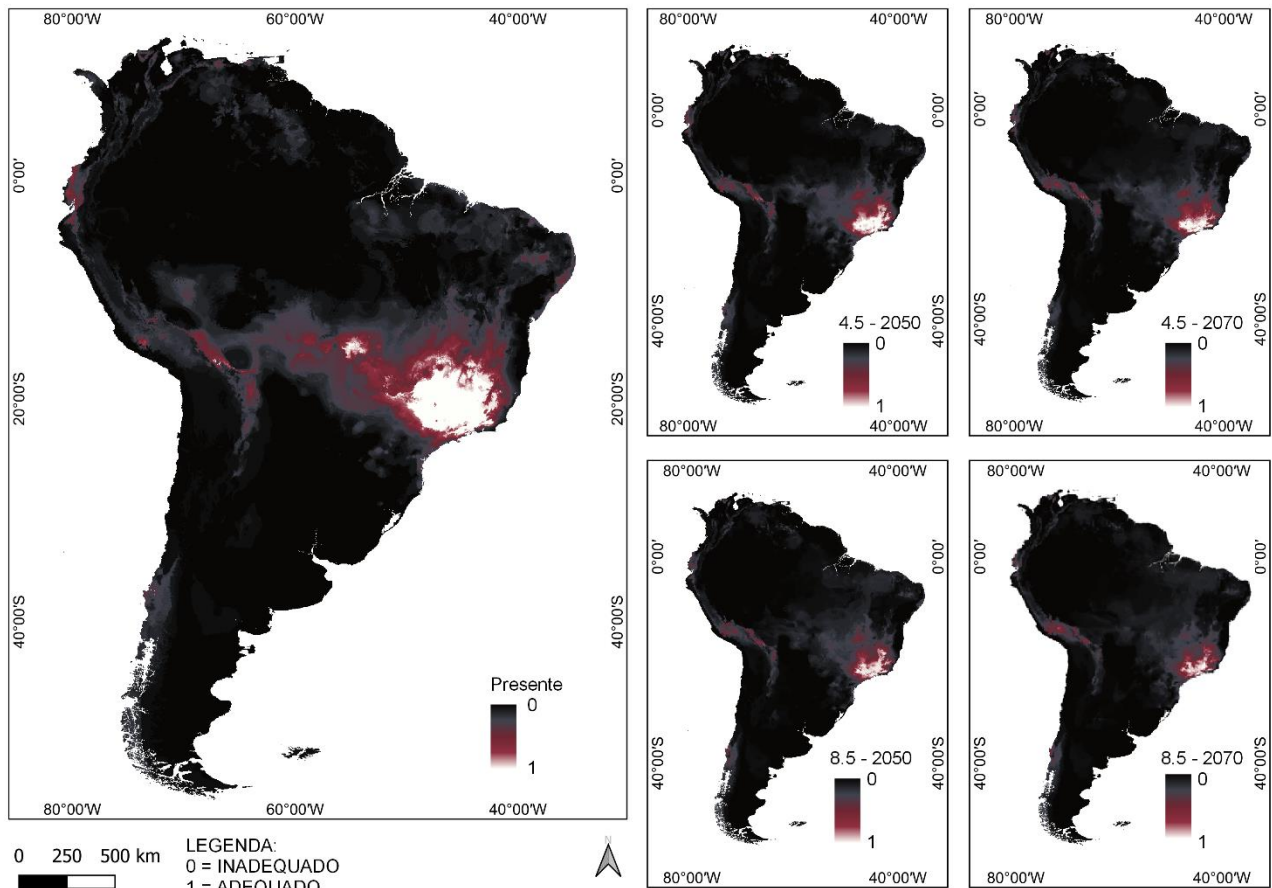


Figura 11. Adequabilidade da população de São Paulo em áreas de reprodução.

4.2.2 MIGRANTES AUSTRALIS

Para a invernada dos indivíduos amostrados em Buenos Aires, houve maior estabilidade ao norte e nordeste, seguida de grandes perdas no oeste do território (figura 12A e 13A). Pequenas e médias perdas, e ganhos, não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Quanto a adequabilidade, não houve deslocamento das áreas adequadas. Há maior perda de território na projeção futura 4.5 para o ano de 2050. As perdas mostradas nas projeções futuras de RCP 4.5 de 2070 e 8.5 de 2050 e 2070 são nas bordas das áreas, que diminuiram gradualmente entre si, marcadas como mais adequadas na projeção presente.

Na reprodução, houve mais grandes perdas, seguidas da estabilidade tanto para a projeção de 2050 quanto para a de 2070 (figura 12B). Pequenas e médias perdas, e ganhos, também não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Também houve maior perda de território na projeção futura 4.5 para o ano de 2050. As perdas localizadas no norte do território do mapa de perdas e ganhos, assim como mostra a adequabilidade (figuras 13B e 15), nas projeções RCP 4.5 2050, 2070 e RCP 8.5 2050, para a projeção de 2070 as perdas na área adequada tiveram o formato de “afunilamento”.

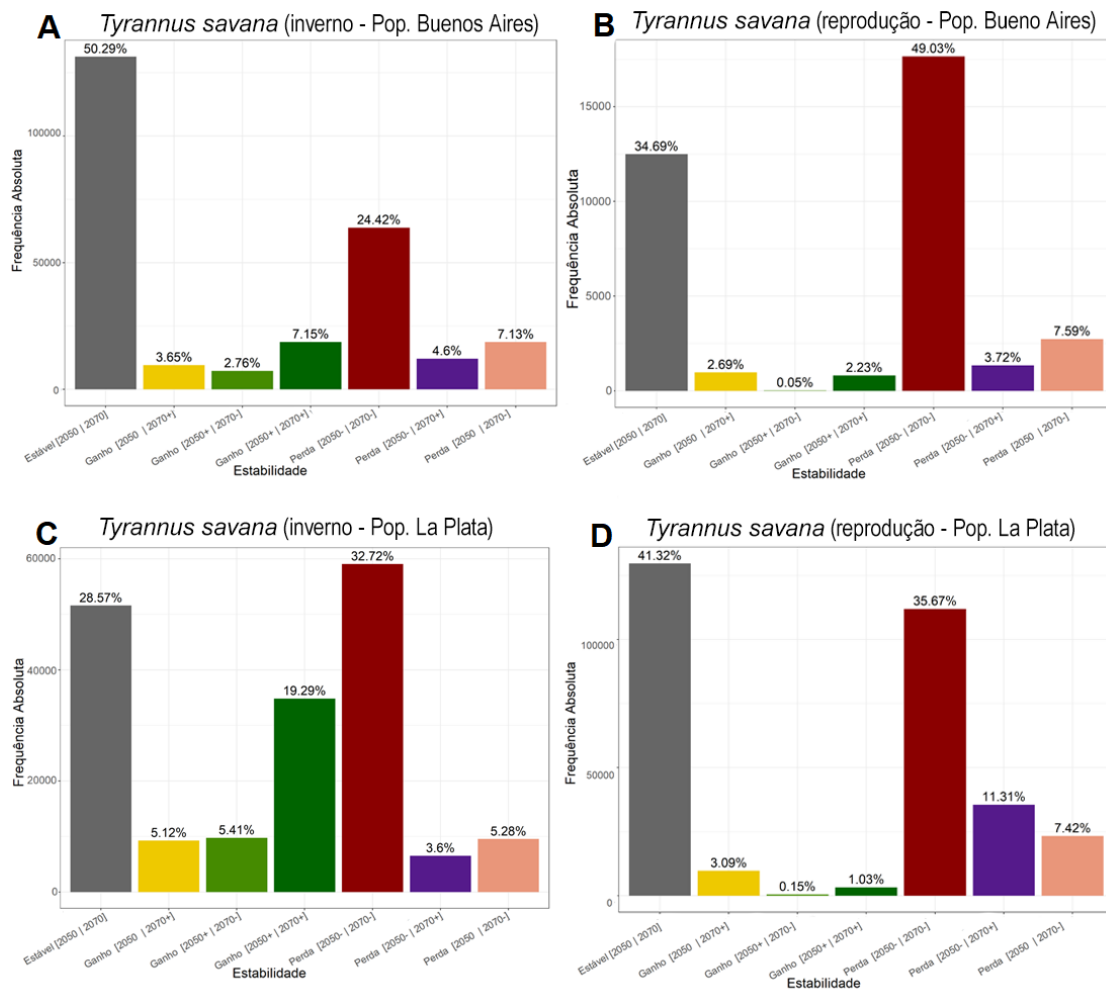


Figura 12. Gráfico de perdas e ganhos dos migrantes austrais na projeção RCP 8.5. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente. O sinal positivo na frente do ano da projeção no eixo horizontal significa ganhos positivos, o sinal negativo significa perda e nenhum sinal significa estabilidade. O esquema de cores de cada ano corresponde a paleta de cores do mapa de estabilidade (figura13).

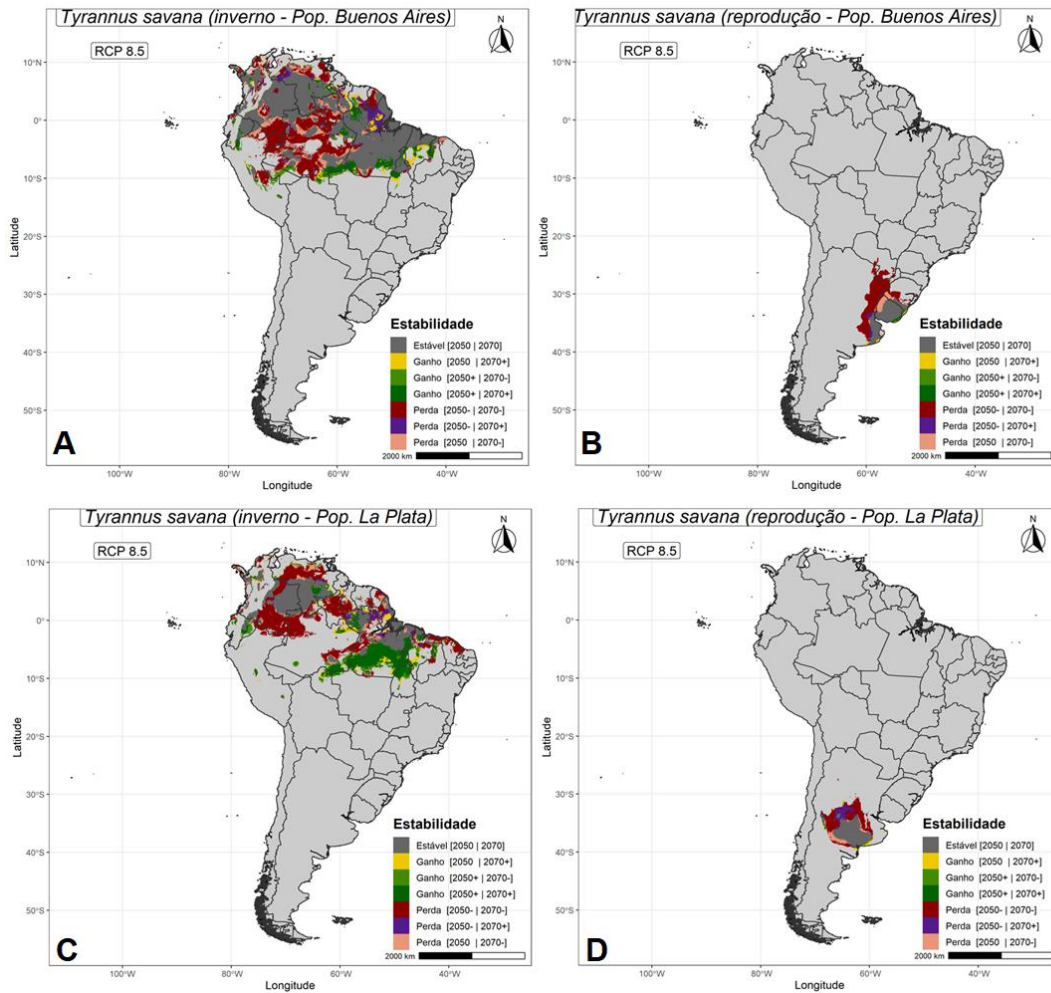


Figura 13. Mapa de perdas e ganhos dos migrantes austrais. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente.

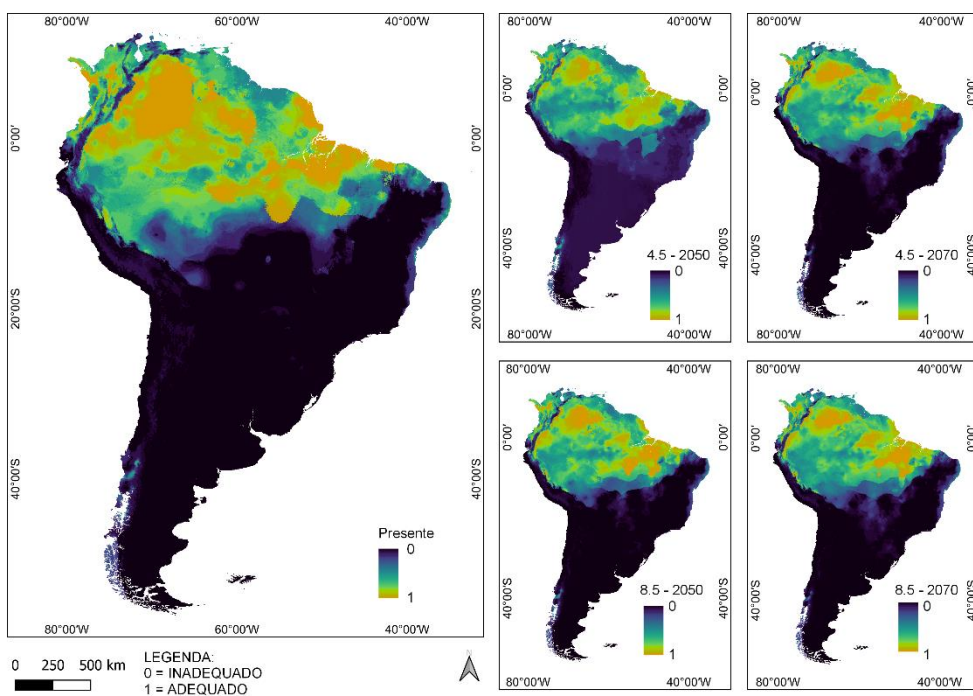


Figura 14. Adequabilidade da população de Buenos Aires em áreas de invernada.

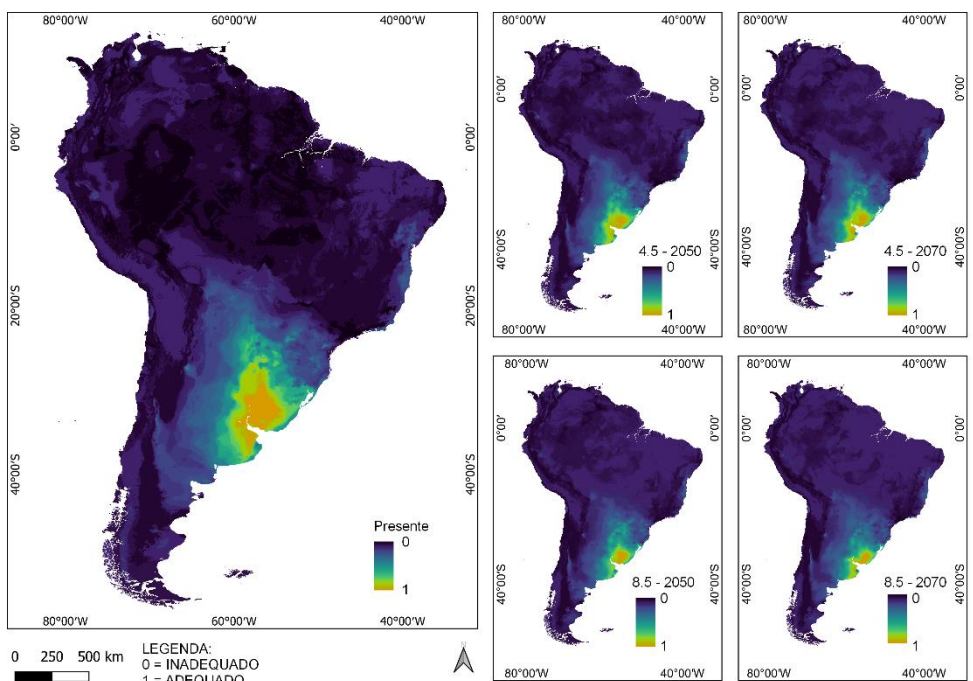


Figura 15. Adequabilidade da população de Buenos Aires em áreas de reprodução.

Para a invernada dos indivíduos amostrados em La Plata, houve grandes perdas no perímetro norte da área, grandes áreas de estabilidade ao norte e nordeste, e também

grandes ganhos ao sul da área de estabilidade presente no norte do território em ambas as projeções RCP 8.5 2050 e 2070 (figuras 12C e 13C).

A adequabilidade (figura 16) da população sofreu modificações alinhadas com o que demonstram os dados de perdas e ganhos. As projeções RCP 4.5 2070 e 8.5 2050 tiveram perdas, e são mais acentuadas nas projeções RCP 4.5 2050 e 8.5 2070 nas áreas demarcadas como adequadas na projeção presente.

Na reprodução da população de La Plata há maior estabilidade, localizadas ao sul/sudeste do território, seguida de grandes perdas ao norte e nordeste. Há algumas perdas pequenas ao extremo oeste e perdas médias no nordeste da área de reprodução (figuras 12D e 13D). Grandes ganhos, e pequenas e médias perdas e ganhos, respectivamente, não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Nos mapas de adequabilidade (figura 17) é possível visualizar as perdas nas bordas das áreas demarcadas adequadas na projeção presente diminuir nas projeções RCP 4.5 2050, 2070 e 8.5 2050, e teve uma diminuição drástica na projeção RCP 8.5 2070.

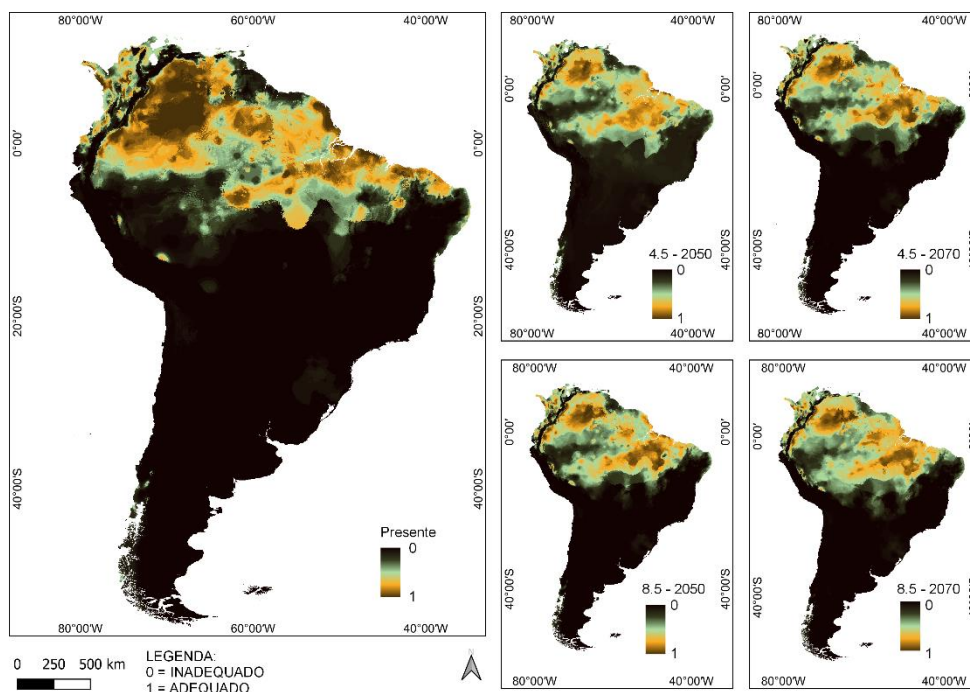


Figura 16. Adequabilidade da população de La Plata em áreas de inverno.

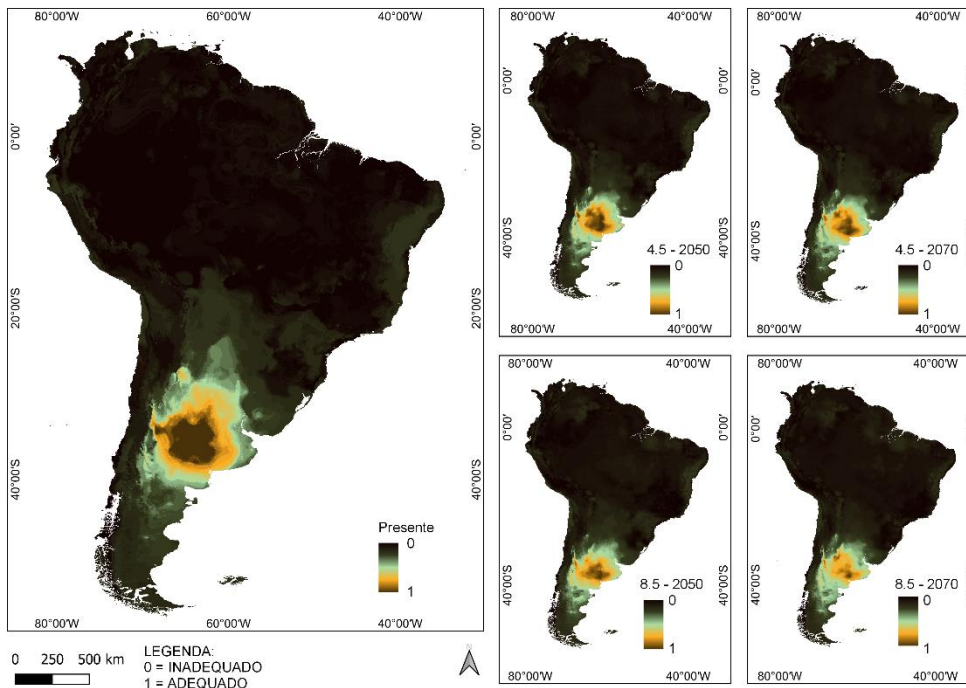


Figura 17. Adequabilidade da população de La Plata em áreas de reprodução.

5 DISCUSSÃO

A seleção de camadas ambientais considerando as dinâmicas das áreas de invernada e reprodução da espécie influenciou positivamente a nossa análise. Isso devido os indivíduos de ambas populações partirem de acordo com a mudança de estação (Jahn et al, 2019), identificadas nas camadas pelas mudanças de precipitação e temperatura. Nisso observamos mais acurácia às previsões dos impactos das mudanças climáticas nas áreas adequadas à espécie.

Observamos pouco overfitting em relação aos modelos, que são previsões de modelo enviesadas em outras regiões ou outros períodos (Li e Wang, 2013). Devido ao fato de que a *T. savana* é cosmopolita e ocorre por toda a extensão da América do Sul (Jahn e Tuero, 2020), ao optar pela resolução das camadas 5km x 5km para esse recorte de background, acarretou modelos de maior confiança por conter uma resolução adequada ao tamanho do recorte.

Com exceção da população de La Plata, que obteve maiores perdas nas áreas de inverno, as outras três populações mantiveram maior estabilidade quanto a ganho ou perda de território. Quanto à adequabilidade, nosso estudo mostra que as populações, em especial a população de São Paulo, tiveram perda de áreas climaticamente adequadas no futuro, com o deslocamento dessas áreas para outras regiões. O deslocamento ocorre quando um território adequado sofre perdas de área em local e tem ganhos de área em outro local.

Na reprodução, apenas a população de La Plata manteve áreas climaticamente adequadas estável, enquanto que as outras três populações tiveram mais perdas do que ganhos. Esses refúgios também tiveram pouco deslocamento, com exceção da população de Brasília, que além de ter grandes perdas, teve um deslocamento para o extremo leste. Por serem áreas menores de refúgio comparadas às áreas de invernada, potencialmente são mais suscetíveis a mudanças mais drásticas.

Como vimos modificações em ambos os períodos de nidificação e inverno, para ambos os sistemas migratórios, mesmo os territórios que se mantiveram estáveis, isso responde a nossa primeira pergunta, se haveria modificações nessas áreas adequadas. No entanto, há evidências de que as áreas expostas à estabilidade climática de longo prazo (refúgios) têm um papel crítico na persistência da biodiversidade, pois são áreas úteis para a sua conservação (Terribile et al, 2012).

Descobrimos tanto ganhos quanto perdas de território, principalmente no período de reprodução para as populações de Buenos Aires, Brasília e São Paulo, e no período de inverno para a população de La Plata. Apenas as populações que realizam migração intratropical tiveram ganhos significativos no período de invernada. Isso corrobora com nossa primeira hipótese de que ambos os sistemas migratórios iriam sofrer impactos devido às mudanças climáticas.

O deslocamento de áreas adequadas, também observado em outras espécies migratórias da América do Sul (*Turdus nigriceps*, *T. subalaris*, e *T. flavipes*), mostram deslocamentos nas rotas migratórias dessas aves também em altitude (Da Silveira et al, 2021). Porém não podemos afirmar modificações de altitude para a *T. savana* porque não utilizamos camadas de paisagem para essa análise. Então, analisar mudanças na

altitude podem potencialmente exibir mais custos que as mudanças climáticas causam nesses migrantes.

Considerando a maior visualização de impactos em perdas/ganhos e modificações de adequabilidade em todas as populações, observamos que os migrantes austrais sofreram maior impacto das mudanças climáticas. Nisso, a nossa segunda hipótese também é corroborada. E fornecendo resposta a nossa pergunta final, também levamos em conta que os modelos nos mostraram resultados diferentes entre populações que realizam a mesma estratégia migratória.

Como dito anteriormente, a estabilidade visível nos modelos potencialmente evidencia a estabilidade da populações migrantes. Enquanto que o processo de especiação entre as populações migrantes se diferenciam morfológica e fisiologicamente de forma sutil, as não migrantes (*T. savana monachus*, *sanctaemartae* e *circumdatus*) dentro desses territórios de refúgio da *T. savana*, seguem trajetórias de evolução diferente (Gómez-Bahamón et al, 2020). Nossa abordagem é restrita às populações migrantes, no entanto é importante entender a complexidade da dinâmica da espécie como um todo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos das mudanças climáticas nas estratégias de migração de aves na América do Sul são pouco estudados, e descobrimos mais informações sobre como esses efeitos poderão causar nas áreas potenciais de refúgio da tesourinha. Vimos que todos os cenários projetados para os períodos futuros das tesourinhas foram eficientes em prever a variação das áreas ao sofrer esses impactos, positivos ou negativos. Mesmo assim, os modelos desse trabalho são estritamente climáticos e consideram apenas metade do ciclo anual da espécie, o que faz ser necessário modelos para os corredores de migração de primavera e outono.

Também é necessário incluir camadas de paisagem, como por exemplo camadas de cobertura de solo, que podem incluir informações de como a altitude pode ser afetada pelos mesmos efeitos vistos nesses modelos. As camadas de paisagem cruzadas com os dados do clima auxiliariam a reduzir o pequeno *overfitting* observado.

Enfatizamos, enfim, que esses modelos dão um passo a mais para a compreensão do complexo sistema migratório dessa espécie, instigando a curiosidade de perseguir detalhes que moldam as características de diversos aspectos, sendo um deles, das áreas de refúgio da espécie.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allouche, O; Tsoar, A; Kadmon, R (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* **43(6)**: 1223–1232

Areta, JI; Bodrati, A; Thom, G; Rupp, AE; Velazquez, M; Holzmann, I; Carrano, E; Zimmermann, CE (2013). Natural History, Distribution, and Conservation of Two Nomadic Sporophila Seed eaters Specializing on Bamboo in the Atlantic Forest. *The Condor* **115**: 237–252

Barbet-Massin, M; Jiguet, F; Albert, CH; Thuiller, W (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods In Ecology And Evolution* **3**: 327-338

Bejarano, V; Jahn, AE (2018). Relationship between arrival timing and breeding success of intra-tropical migratory Fork-tailed Flycatchers (*Tyrannus savana*). *J. Field Ornithol* **0**: 1-8

Bellard, C; Bertelsmeier, C; Leadler, P; Thuiller, W; Courchamp, F (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters* **15**: 365-377.

Cutler, DR; Edwards, TC; Beard, KH; Cutler, A; Hess, KT; Gibson, J; Lawler, JJ (2006). Random Forests for classification in ecology. *Ecology* **88(11)**: 2783–2792

Dalapicolla J (2016) [Internet]. Tutorial de modelos de distribuição de espécie: guia teórico. Laboratório de Mastozoologia e Biogeografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, disponível em:
< <http://blog.ufes.br/lamab/tutoriais>>

Faaborg, J; Holmes, RT; Anders, AD; Bildstein, KL; Dugger, KM; Gauthreaux Jr, AS; Heglund, P; Hobson, KA; Jahn, AE; Johnson, DH; Latta, SC; Levey, DJ; Marra, PP; Merkord, CL; Nol, E; Rothstein, SI; Sherry, TW; Sillett, TS; Thompson III, FR; Warnock, N (2010). Recent advances in understanding migration systems of New World land birds. *Ecology monographs* **80**: 3-48

Giannini, TC; Siqueira, MF; Acosta, AL; Barreto, FCC; Saraiva, AM; Alves-dos-Santos I (2012). Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia* **63**: 733-749

Gómez-Bahamón, V; Márquez, R; Jahn, AE; Miyaki, CY; Tuero, DT; Laverde-R, O; Restrepo, S; Cadena, CD (2020). Speciation Associated with Shifts in Migratory Behavior in an Avian Radiation. *Current Biology* **30**: 1–10

Guisan, A; Thuiller, W; Zimmermann, NE (2017). Habitat suitability and distribution models with applications in R. *Cambridge University Press*.

Intergovernmental Panel On Climate Change (2014). Climate change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 151 pp

Jahn, AE; Cereghetti, J; Cueto, VR; Hallworth, MT; Levey DJ; Marini MA; Masson, D; Pizo, MA; Sarasola, JH; Tuero, DT (2019). Breeding latitude predicts timing but not rate of spring migration in a widespread migratory bird in South America. *Wiley Ecology and Evolution* **9**: 5752–5765

Jahn, AE; Seavy, NE; Bejarano, V; Guzmán, MB; Provinciano, ICC; Pizo, MA; MacPherson, M (2016). Intra-tropical migration and wintering areas of Fork-tailed Flycatchers (*Tyrannus savana*) breeding in São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia* **24**: 116-121

Jahn, AE; Levey, DJ; Cueto, VR; Ledezma, JP; Tuero, DT; Fox, JW; Masson, D (2013). Long-distance bird migration within South America revealed by light-level geolocators. *The Auk* **130**: 223–229

Jahn AE, Cueto VR (2012). The potential for comparative research across New World bird migration systems. *J ornithol* **153**: 199-205

Li, W; Guo, Q; Elkan, C (2011). Can we model the probability of presence of species without absence data? *Ecography* **34(6)**: 1096–1105

Liu, C; Newell, G; White, M (2011). On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution* **6(1)**: 337–348

MacPherson, MP; Jahn, AE; Murphy, MT; Kim, DH; Cueto, VR; Tuero, DT; Hill, ED (2018). Follow the rain? Environmental drivers of *Tyrannus* migration across the New World. *American Ornithological Society* **4**: 881-894

Merow, C; Smith, MJ; Silander Jr, JA (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* **36**: 1058-1069

Parmesan C (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Ecol. Evol.* **37**: 637-639

Peterson, AT; Soberón, J; Pearson, RG; Anderson, RP; Martínez-Meyer E; Nakamura, M; Araújo, MB (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions. *Princeton University Press*

Phillips, SJ; Anderson, RP; Schapire, RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231–259

Phillips, SB et al (2006). Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. *International Journal of Global Environmental Issues* **6(2-3)**: 231–252

Da Silveira, NS; Vancine, MH; Jah, AE; Pizo MA; Sobral-Souza T (2021). Future climate change will impact the size and location of breeding and wintering areas of migratory thrushes in South America. *Ornithological Applications* **123**:1–16

Somenzari M; Amaral, PP; Cueto, VR; Guaraldo, VC; Jahn, AE; Lima, DM; Lima, PC; Lugarini, C; Machado, CG; Martinez, J; Nascimento, JLX; Pacheco, JF; Paludo, D; Prestes, NP; Serafini, PP; Silveira, LF; Sousa, AEBA; Sousa, NA; Souza, MA; Telino-Júnior, WR; Whitney, BM (2018). An overview of migratory birds in Brazil. *Pap. Avulsos Zool.* **58**: 1-66

Tax DMJ (2001). One-class classification: concept-learning in the absence of counter-examples [tese]. Delft University of Technology, Delft, Países Baixos.

Terribile, LC; Lima-Ribeiro, RS; Araújo, MB; Bizão, N; Collevatti, RG; Dobrovolski, R; Franco, AA; Guilhaumon, F; Lima, JS; Murakami, DM; Nabout, JC; Oliveira, G; Oliveira, LK; Rabelo, SG; Rangel, TF; Simon, LM; Soares, TN; Telles, MPC; Diniz-Filho JAF (2012). Areas of Climate Stability of Species Ranges in the Brazilian Cerrado: Disentangling Uncertainties Through Time. *Natureza & Conservação* **10(2)**:152-159

Zurell, D; Graham, CH; Gallien, L; Thuiller, W; Zimmermann, NE (2018) Long-distance migratory birds threatened by multiple independent risks from global change. *Nature Climate Change* **8**: 992–996

H662f

Hindi, Talita Santos El

Futuros efeitos climáticos sobre as rotas migratórias de uma ave sul-americana (*Tyrannus savana*; Passeriformes: Tyrannidae) / Talita Santos El Hindi. -- Rio Claro, 2021

34 p. : fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biotecnologia, Rio Claro

Orientador: Marco Aurélio Pizo Ferreira

Coorientadora: Natália Stefanini da Silveira

1. Biologia. 2. Zoologia. 3. Animais Populações. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biotecnologia, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

TALITA SANTOS EL HINDI

**Futuros efeitos climáticos sobre as rotas
migratórias de uma ave sul-americana
(*Tyrannus savana*; Passeriformes:
Tyrannidae)**

Rio Claro

2021



TALITA SANTOS EL HINDI

**FUTUROS EFEITOS CLIMÁTICOS SOBRE AS ROTAS MIGRATÓRIAS
DE UMA AVE SUL-AMERICANA (*TYRANNUS SAVANA*;
PASSERIFORMES: TYRANNIDAE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Câmpus de Rio Claro, para obtenção do grau de Bacharela em Ciências biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Pizo Ferreira –
Departamento de Biodiversidade, Instituto de Biociências, UNESP, Rio Claro, SP

Coorientadora: Dra. Natália Stefanini da Silveira –
Departamento de Biodiversidade, Instituto de Biociências, UNESP, Rio Claro, SP

Colaborador: Alex E. Jahn – Indiana University,
Environmental Resilience Institute, IU Bloomington, Indiana, USA

Rio Claro

2021

TALITA SANTOS EL HINDI

**FUTUROS EFEITOS CLIMÁTICOS SOBRE AS ROTAS MIGRATÓRIAS
DE UMA AVE SUL-AMERICANA (*TYRANNUS SAVANA*;
PASSERIFORMES: TYRANNIDAE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Bacharela em Ciências biológicas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco Aurélio Pizo Ferreira (orientador)

Dra. Natália Stefanini da Silveira (coorientadora)

Ma. Vanesa Fabíola Bejarano Alegre

Dra. Karlla Vanessa de Camargo Barbosa

Aprovado em: 18 de janeiro de 2022

Talita Santos El Hindi

Marco A. Pizo

Natalia Stefanini da Silveira

Assinatura do discente

Assinatura do orientador

Assinatura da coorientadora

"As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP"

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento e apoio a esse trabalho de processo 2019/22228-0.

Sou muito grata a meus pais, Rosineide e Ahmad, meus avós, Sebastiana e Claudomiro, minha tia Silvia que me ajudou num momento de dificuldade, e ao restante da minha família, pelo apoio e ajuda para que eu pudesse passar esses anos de graduação com dedicação somente a ela.

Quero agradecer ao Laboratório de Ecologia de Aves por me acolher, pela Natalia e Marco aceitarem me orientar, vocês me ajudaram muito e foram pacientes comigo, gostei muito de trabalhar com vocês nesse projeto. Também sou muito grata pela colaboração do Alex, e pela ajuda do Maurício.

Aos meus amigos Alicia, Catarina, Gustavo, Hayen, Iryna, Juliana, Lucas, Marcio e Natalia por aguentarem meus surtos, vocês ficaram do meu lado em todos os momentos bons e não me abandonarem durante os períodos difíceis.

Meus outros amigos Andreza, Eloá, Daniela, Gabriela, Giovanna, Helena, Isabela, Mariana, Marta e Mario que me ajudaram muito, serei eternamente grata a vocês também. E agradeço muito ao Arthur, Rafaela e Silvia que me acolheram no grupo das passarinhadas e me apresentaram o belo mundo das aves, pelo qual nunca achei que fosse tão encantador.

Também sou grata ao Hoseok, Jimin, Jungkook, Namjoon, Seokjin, Taehyung, Yoongi e o meu cachorro Bob, por me ajudarem a manter a sanidade durante o período de isolamento devido a pandemia, no qual redigi esse trabalho e fiz os relatórios associados ao projeto, vocês são tão importantes para mim quanto a minha família e amigos.

Queria dizer vários nomes, tem tanta gente que me ajudou só de ouvir sobre o que eu trabalhei nesse projeto e me encorajou, vocês têm a minha gratidão, por mais simples que tenha sido a sua atenção.

Por fim, gostaria de agradecer a você que está lendo esse trabalho, espero que goste, porque eu fiz com carinho e amor pelas aves.

고마워 내가 나이게 해줘서
이 내가 날게 해줘서
이런 내게 날갯 줘서
꼬깃하던 날 개 줘서
답답하던 날 깨줘서
꿈 속에만 살던 날 깨워줘서
널 생각하면 날 개어서
슬픔 따윈 나 개 줘서
Thank you, "우리" 가 돼 줘서
- 방탄소년단

Abstract

The Fork-tailed flycatcher *Tyrannus savanna* present migratory strategies that differ between populations. The Argentine populations performs austral migration (i.e., trespass the Tropic of Capricorn during the breeding season), while Brazilian populations perform intertropical migration (stay the entire year between the Tropics), both overwintering at northern South America. The aim of this project was to answer if their adequate areas of wintering and reproduction would be affected and modified by future climate change, and which migratory system would suffer the higher impact. Therefore, a climate model was produced using presence data with previsions to the years of 2050 and 2070. Our discoveries showed that all populations will be affected, with dislocation of potential areas, and gain or loss of adequate territories, but also stability in both periods of reproduction and wintering. Those who execute austral migration will be the most affected, with bigger displacement and losses of potentially adequate territories.

Keywords: Biology. Zoology. Animal populations.

Resumo

A espécie tesourinha *Tyrannus savana* possui estratégias migratórias que difere entre suas populações. As populações argentinas realizam migração austral (ultrapassam o trópico de Capricórnio durante a estação reprodutiva), e as populações brasileiras realizam migração intratropical (permanecem o ano inteiro entre os trópicos), ambas com internada no norte sul-americano. O objetivo desse trabalho foi responder se as áreas de refúgio de inverno e reprodução serão afetadas e modificadas pelas mudanças climáticas futuras, e qual sistema migratório sofrerá maior impacto. Fizemos um modelo climático usando dados de ocorrência com camadas climáticas para o ano de 2050 e 2070. Descobrimos que todas as populações sofrerão impactos relacionados ao deslocamento de áreas potenciais adequadas e ganho ou perda de territórios adequados, mas também haverá estabilidade tanto no período de reprodução quanto de inverno. Aquelas que realizam migração austral serão as mais afetadas com maior deslocamento e perda de territórios potencialmente adequados.

Palavras-chave: Biologia. Zoologia. Animais Populações.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Sistemas migratórios	8
1.2 Impacto das mudanças climáticas.....	10
2 OBJETIVOS	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1 Banco de dados	11
3.2 Variáveis bioclimáticas	12
3.3 Modelagem de nicho ecológico	14
4 RESULTADOS	15
4.1 Camadas bioclimáticas.....	15
4.2 Modelagem de nicho ecológico	18
4.2.1 MIGRANTES INTRATROPICAIS.....	18
4.2.2 MIGRANTES AUSTRALIS	24
5 DISCUSSÃO	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistemas migratórios

Aves migratórias possuem sistemas complexos de migração nos quais diferentes populações de uma mesma espécie podem utilizar sistemas migratórios diferentes, ou ainda podem usar estratégias parcialmente migratórias (Faaborg et al, 2010). Esses sistemas compostos por movimentos entre os locais de reprodução e invernada, incluindo suas rotas e locais de parada envolvem adaptações na fisiologia, morfologia e comportamento, sofrendo influências de fatores abióticos, interações ecológicas e pressões seletivas (Jahn e Cueto, 2012). Nos Neotrópicos é possível observar padrões gerais de migração em resposta a sazonalidade climática (e.g. como nas tesourinhas, *Tyrannus savana*), e a sazonalidade de recursos (e.g. *Sporophila falcirostris* e *S. frontalis* que seguem o padrão de produção de sementes de bambus) (Areta et al, 2013; Somenzari et al, 2018).

Além dos padrões gerais, dois padrões geográficos são observados em populações de *T. savana*: migração intratropical e migração austral. Duas das populações possuem todo o seu ciclo anual na América do Sul, sendo que a migração intratropical consiste numa estratégia em que as aves não ultrapassem os trópicos, enquanto que a migração austral corresponde a aves que se reproduzem em latitudes mais austrais e passam a invernada nos trópicos Sul-Americanos (Faaborg et al, 2010).

Na migração intratropical de *T. savana*, a partida do local de invernada para aves que saem, por exemplo, de Brasília e São Paulo em direção à Floresta Amazônica, é entre julho e agosto, com chegada entre o fim de agosto e início de setembro. A população que realiza migração austral possui período de invernada de abril até setembro. O início da migração de primavera ocorre entre o final agosto e setembro, quando saem de Buenos Aires e La Pampa na, Argentina e vão em direção à Floresta Amazônica, com chegada em outubro (Figura 1).

Portanto, a principal diferença entre essas duas estratégias é a distância percorrida entre o local de invernada e o local de reprodução. Essa diferença tem implicações para as rotas migratórias adotadas, que oferecem diferentes cenários climáticos e disponibilidade de recursos, de forma que há desafios diferentes pouco

conhecidos, especialmente porque não se conhece todas as pressões seletivas que moldam essas estratégias migratórias entre populações co-específicas (Jahn et al, 2019).

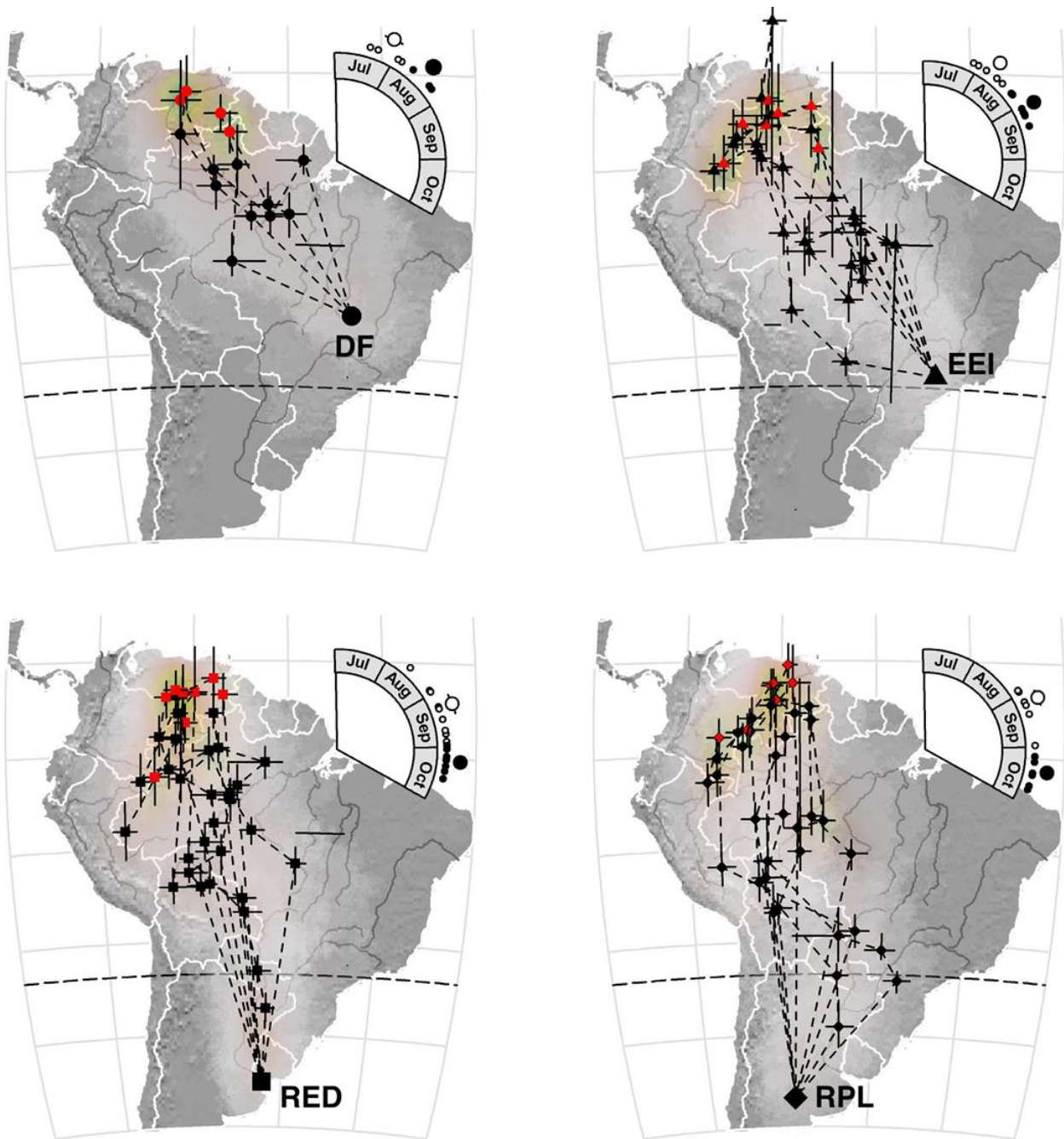


Figura 1. Rotas de migração de primavera e locais de paradas das tesourinhas de quatro locais de reprodução na América do Sul. Os símbolos grandes de cada mapa representam o local de reprodução, os símbolos vermelhos e pequenos representam os períodos de invernada estacionária. As linhas nos polígonos representam 95% de credibilidade no intervalo de latitude e longitude. As linhas pontilhadas podem não representar o caminho real de migração que os indivíduos usaram entre os locais de parada. O sombreamento nos locais de invernada no norte da América do Sul representa localização incerta. A inserção em cada mapa mostra o local de partida da primavera (círculos pequenos abertos) e subsequentemente a data de chegada da reprodução (círculos pequenos fechados) de cada indivíduo. A data de partida média (círculo grande aberto) e de chegada (círculo grande fechado) para cada

população também é mostrada (linhas mostradas em alguns círculos grandes representam erro padrão). DF: Distrito Federal, Brasil; EEI: Estação Ecológica de Itirapina, São Paulo, Brasil; RED: Reserva Natural El Destino, Buenos Aires, Argentina; RPL: Reserva Provincial Parque Luro e propriedades privadas vizinhas, La Pampa, Argentina; SD: desvio padrão. Fonte: Jahn et al, 2019.

1.2 Impacto das mudanças climáticas

As variações climáticas ao longo do tempo causam impacto na história de vida dos seres vivos. O impacto atinge níveis que vão do organismo até biomas inteiros, podendo ser observado em três eixos: espacial, temporal e individual (Bellard et al, 2012).

Esses impactos das mudanças climáticas bruscas atingem, por exemplo, os sistemas migratórios das aves (como perda de território e alterações de rotas nos sistemas de migração presente no Holártico). Assim como outros grupos migratórios (e.g. insetos e invertebrados marinhos), que modificam datas de partida e chegada, afetando negativamente a reprodução (Zurell et al, 2018; Parmesan, 2006).

Dessa maneira, este projeto foi construído com o objetivo de dar continuidade ao trabalho do Pesquisador Dr. Alex Jahn, (Indiana University, Environmental Resilience Institute, IU Bloomington, Indiana, USA) no projeto FAPESP "A evolução da migração das aves: A teoria atual se aplica na América do Sul?" (Processo no. 12/17225-2) investigou a migração da tesourinha *T. savana* no continente sul-americano (Jahn et al, 2019; Bejarano e Jahn, 2018; Jahn et al, 2016; Jahn et al 2013; Jahn e Cueto, 2012; MacPherson et al, 2018). Investigamos as áreas de distribuição da espécie *T. savana* em dois sistemas de migração distintos em previsões climáticas futuras para responder se (1) haverá modificações nas áreas de invernada e reprodução e, se houver mudanças, (2) quais mudanças serão essas (perda ou ganho de território) e (3) qual sistema de migração será mais afetado.

A primeira hipótese que foi testada é que tanto a estratégia migratória intratropical quanto a austral sofrerão impacto de mudanças climáticas, pois há evidências de que todos os grupos taxonômicos estudados sofrem impactos em todos os níveis decorrente das mudanças climáticas (Parmesan, 2006; Bellard et al, 2012). As tesourinhas, por apresentarem sistemas migratórios complexos, são altamente dependentes da pontualidade de saída e chegada dos seus locais de invernada e reprodução (Jahn et al, 2012).

A segunda hipótese que foi testada previa a estratégia de migração austral sofrer maior impacto climático que a estratégia de migração intratropical, pois a precipitação é um preditor importante na distribuição de populações migrantes austrais de *T. Savana* (MacPherson et al; 2018). Os migrantes austrais possuem um contexto ecológico diferente das populações migrantes intratropicais, com sazonalidade mais definida e maior altitude nos locais de reprodução, com pressões seletivas diferentes (Jahn et al, 2019). Como resultado, essas populações se tornam menos resiliente às mudanças de clima e precipitação, que também acarretam problemas na obtenção de recursos e estratégias reprodutivas.

2 OBJETIVOS

Investigar as áreas distribuição da espécie *T. savana* em dois sistemas de migração distintos sob cenários climáticos futuros para elucidar as dinâmicas pelas quais a espécie passa, entender os impactos que as mudanças climáticas causam nessas áreas e como isso reflete em duas populações diferentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Banco de dados

Os dados utilizados foram provenientes de registros fornecidos do trabalho de Jahn et al (2019) que consta no banco de dados Movebank (www.movebank.org/). Os registros do trabalho de Jahn et al (2019) foram coletados por geolocalizadores que monitoraram o movimento de 28 indivíduos de *T. savana*, resultando em 9223 pontos (dados brutos). Eles possuem quatro pontos de origem nas áreas de reprodução: Brasília e São Paulo no Brasil, Buenos Aires e La Plata na Argentina. Usamos período de um ciclo reprodutivo de reprodução, migração de outono, invernada e migração de primavera.

Os dados foram computadorizados em tabelas no Excel, compreendendo a data e ano de coleta, localização do registro (latitude e longitude), código específico do

geolocalizador e enumeração dos indivíduos. Eles foram separados de acordo com sua população de origem, respeitando os quatro grupos estabelecidos: população argentina em migração de primavera, população brasileira em migração de primavera, população brasileira em invernada e população argentina em invernada. Além disso acrescentamos os grupos brasileiros e argentinos em outono e reprodução, respectivamente.

Usamos nesse trabalho apenas os dados de áreas de reprodução e invernada, e para definir ambos os períodos de migração de primavera e invernada usamos as datas que constam no trabalho de Jahn et al (2019), no qual consta a data específica do início e chegada da migração de primavera e da duração do período de invernada de todos os 28 indivíduos da espécie.

Usamos a data do primeiro indivíduo a ter partido e do último a ter chegado para todos os migrantes da Argentina e todos os do Brasil como período de migração de primavera, e usamos a duração média do período de invernada para contar os meses anteriores da migração de primavera. O mesmo método foi usado para usar de referência os períodos de reprodução e outono (Jahn et al, 2016).

Utilizando a América do Sul como *background*, registros contendo erros dos geolocalizador e *outliers* (i.e. coordenadas imprecisas) foram removidos. Os registros contendo a mesma identificação, data e localização também removidos. Além disso, todos os pontos contidos em cada célula de um *grid* com células de 1 km de lado foram removidos para resultar em apenas um ponto de ocorrência dentro de cada célula escolhida aleatoriamente no processo de rarefação dos pontos. Utilizamos os softwares R 3.6.3 para aplicação dos filtros e rarefação dos pontos de ocorrência e QGis 3.12.0 para a projeção dos mapas contendo os registros.

3.2 Variáveis bioclimáticas

Modelos de nicho ecológico são comumente projetados em paleoclimas simulados com Modelos de Circulação Geral (GCMs). Em termos gerais, um GCM é uma representação matemática dos processos físicos que operam na atmosfera, oceano, criosfera e superfícies terrestres e são largamente aplicadas em testes e previsões de

respostas climáticas globais para variações em parâmetros planetários sobre as dinâmicas climáticas dos GCMs (VARELA, 2015).

Utilizamos os respectivos GCMs do CMPI5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>) hospedados na plataforma WorldClim (<https://worldclim.org/>) versão 1.4 em uma resolução de aproximadamente 2,5 km x 2,5 km no Equador: CCSM4 University of Miami – RSMAS, Estados Unidos; MIROC-ESM Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japão; MRI-CGCM3 Meteorological Research Institute, Japão. Os GCMs obtidos são para os cenários presente e futuro, e foram cortados para compreender exclusivamente a América do Sul como *background*.

Para o cenário futuro utilizamos as projeções de clima para os anos de referência de 2050 (média para o período 2041-2060) e 2070 (média para o período 2055-2070) em dois cenários de emissão contrastantes (IPCC, 2014): (i) IPCC AR-CMIP 5 / RCP 8.5 (isto é, requisito de energia máxima, emissões equilibradas entre fontes fósseis e não fóssil) e, (ii) IPCC AR-CMIP 5 / RCP 4.5 (média demanda de energia, menores emissões se comparado ao RCP 8.5).

Para reduzir a dimensionalidade e colinearidade das 19 variáveis bioclimáticas (GIANNINI et al 2012), construímos uma Análise de Componentes Principais (PCA) com valores padronizados, e para os eixos com autovalor acima de 1 (cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação), selecionamos as variáveis com maior contribuição através dos valores de carga. Depois selecionamos as variáveis de precipitação e temperatura correspondentes às características do movimento de migração das tesourinhas, variáveis com meses ou quartis mais quentes e úmidos marcam os períodos de reprodução, variáveis com meses ou quartis mais frios e secos marcam o período de hibernação.

Todas essas análises foram realizadas no R (R Development Core Team, 2018) com os pacotes raster (HIJMANS, 2016) e rgdal (BIVAND et al., 2017) para realizar o manejo dos rasters. A PCA foi realizada através da função “prcomp” do pacote vegan. Os mapas contendo os pontos de ocorrência foram projetados através do QGIS (QGIS

Development Team, 3.12.0, 2015) e utilizando a máscara de cobertura do solo “Land Use” da plataforma EarthEnv (<https://www.earthenv.org/landcover>; TUANMU e JETZ 2014).

3.3 Modelagem de nicho ecológico

Utilizamos o *software* R versão 3.0.5 para estimar as distribuições potenciais (áreas de invernada e reprodução) de quatro populações de *T. savana* (população migrante intratropical com origem em São Paulo, migrante intratropical com origem em Brasília, migrante austral com origem em Buenos Aires e migrante austral com origem em La Plata). Os algoritmos que foram utilizados para estimar as distribuições potenciais, MAXENT, Random Forests (RF) e Support Vector Machine (SVM) possuem abordagem aprendizagem de máquina (*Machine Learning*), que usa o conceito de análise de Cluster (classificação de observações em grupos homogêneos (dois ou mais)).

Clustering é um método de aprendizado não supervisionado (Guisan et al, 2017), sendo estes baseados em dados de presença e background (MAXENT) e presença/pseudo ausência (SVM e RF) (Li; Guo; Elkan, 2011). O Maxent é baseado em dados de presença e background, utiliza a estimativa da densidade máxima de entropia, na qual a distribuição verdadeira da espécie é representada como uma probabilidade de distribuição Y sobre um conjunto X de locais na área de estudo (Li et al, 2011; Phillips et al, 2006).

O RF combina muitas árvores de classificação para produzir classificações mais precisas. Os subprodutos dos cálculos de RF incluem medidas de importância variável e medidas de similaridade de pontos de dados que podem ser usados para agrupamento, escalonamento multidimensional, representação gráfica e imputação de valor ausente (Cutler et al, 2006). O algoritmo SVM mapeia os dados num novo hiperespaço no qual padrões mais complicados podem ser representados de forma simples, reduzindo a entrada de *outliers* (Tax, 2001).

Foram geradas dez réplicas para cada cenário (presente, RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 e RCP 8.5 2070). A validação do modelo se deu pelo índice AUC (*area under the curve*) que consiste em dividir aleatoriamente os pontos de ocorrência

em 70% dos pontos em treino e 30% dos pontos em teste (Peterson et al, 2011). Utilizamos o método TSS (*True Skill Statistic*) para a validação, um teste que não sofre influência da prevalência das espécies estudadas (Allouche; Tsoar; Kadmon, 2006). Levamos em consideração o limiar de máxima sensibilidade e especificidade, reconhecido como melhor limiar para utilização de métodos somente presença (Liu; Newell; White, 2016). Todos os mapas resultantes foram sobrepostos utilizando a abordagem de conjunto de frequência (*frequency ensemble forecasting*).

Usamos o valor limite de “sensibilidade e especificidade máximas” de cada modelo construído para transformar o mapa contínuo em um mapa binário, para minimizar os erros de omissão e balancear a sensibilidade e especificidade (Guisan et al, 2017). Depois, concatenamos as réplicas dos mesmos algoritmos, bem como as réplicas entre algoritmos. Ao final obtivemos um mapa final de adequabilidade contínuo para o presente e para cada projeção futura. Por fim, avaliamos o sentido biológico dos modelos, comparamos os resultados parciais obtidos do presente com cada projeção do cenário futuro, e comparamos a influência destas variáveis na escolha de áreas disponíveis no processo de migração e na distribuição geográfica da espécie.

4 RESULTADOS

4.1 Camadas bioclimáticas

Das 19 variáveis ambientais disponibilizadas selecionamos as camadas, para ambos os sistemas migratórios, com os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação para construção dos modelos (figuras 2-5). Para os modelos de invernada foram selecionadas as camadas BIO04, BIO06, BIO15, BIO17 e BIO19 (figuras 2 e 3). Para a época de reprodução foram selecionadas: BIO04, BIO05, BIO15, BIO16 e BIO18 (figuras 4 e 5).

As variáveis dos meses e trimestres mais quentes e úmidos marcam os períodos de reprodução, as com meses ou trimestres mais frios e secos marcam o período de invernada. São elas BIO04 = Temperatura Sazonal (Desvio Padrão *100), BIO05 = Temperatura Máxima do Mês mais Quente, BIO06 = Temperatura Mínima do Mês mais Frio, BIO15: Precipitação Sazonal (Coeficiente de Variação), BIO16 = Precipitação do

Trimestre mais Úmido, BIO17 = Precipitação do Trimestre mais Seco, BIO18 = Precipitação do Trimestre mais Quente e BIO19 = Precipitação do Trimestre mais Frio.

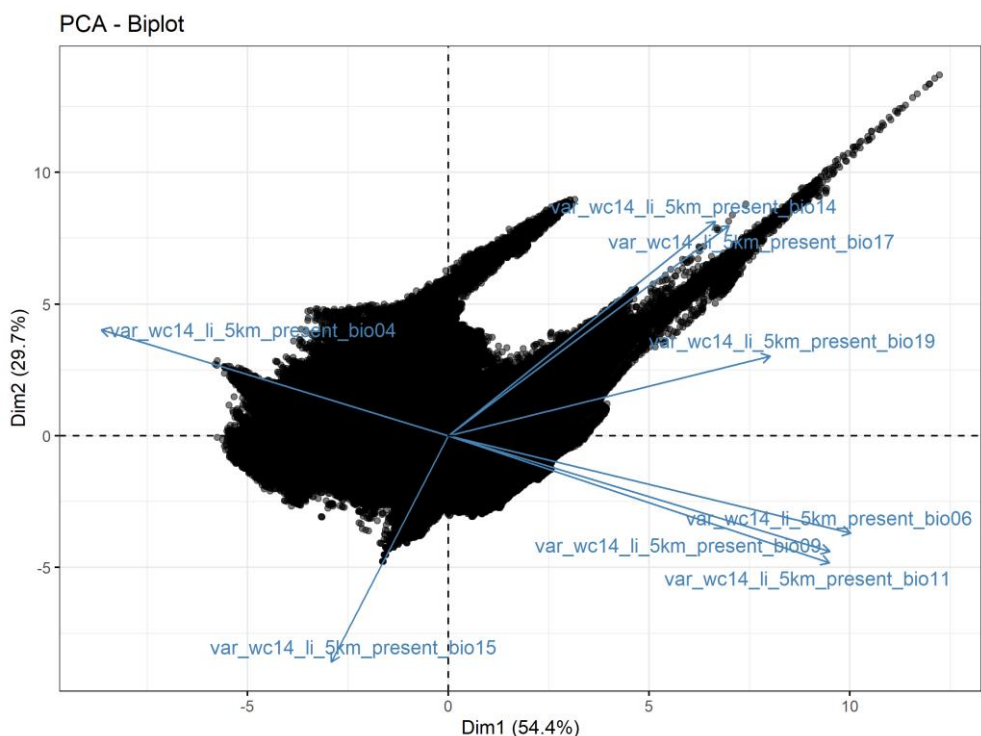


Figura 2. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de inverno. Cada vetor representa uma variável bioclimática indicada pelo nome "bio_xx" na ponta de cada um, os vetores mais próximos entre si são mais correlacionados. Nesse trabalho selecionamos as camadas com menor correlação (os vetores mais distantes entre si) e com mais contribuição a dimensão da PCA.

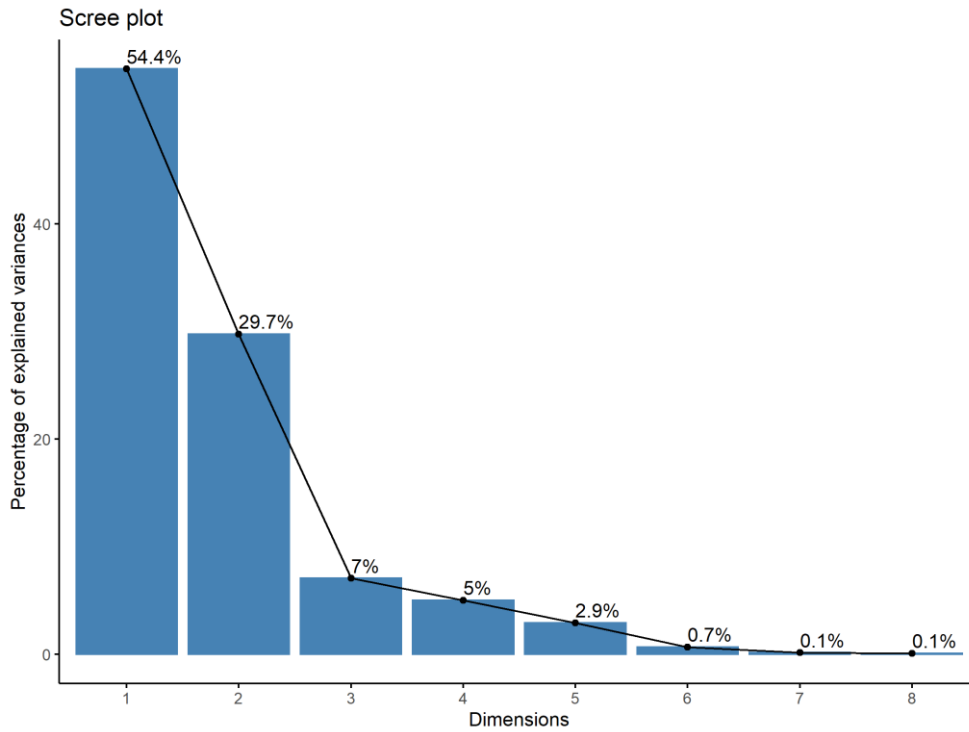


Figura 3. Scree plot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de inverno. O gráfico representa a porcentagem de contribuição de cada eixo (dimensão) da PCA. Nesse trabalho foi selecionado os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação.

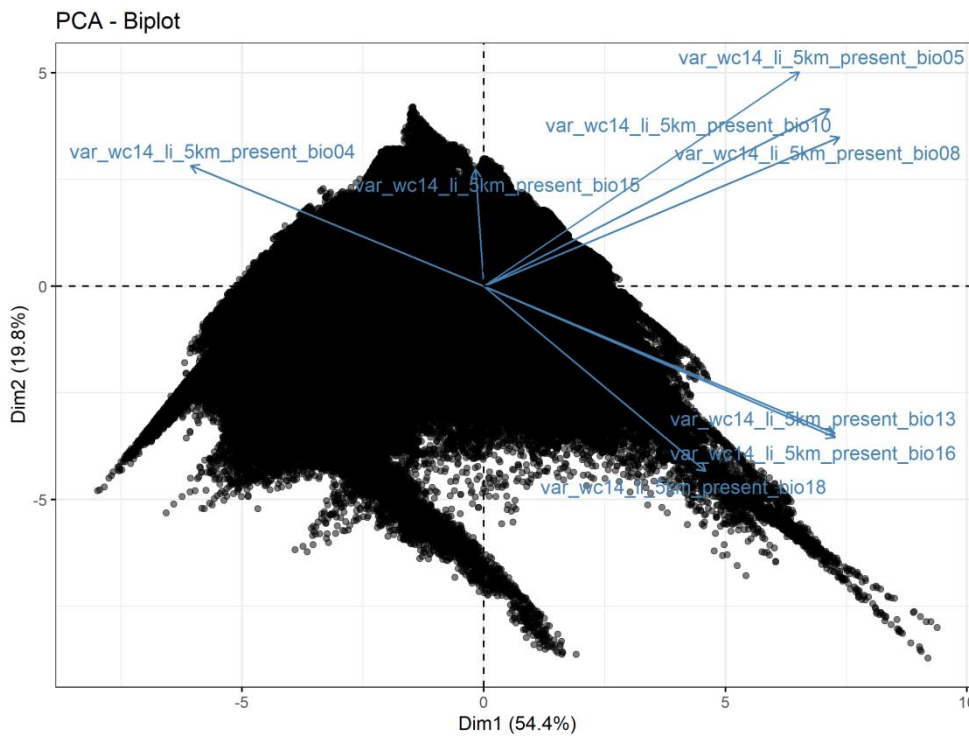


Figura 4. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de reprodução. Cada vetor representa uma variável bioclimática indicada pelo nome “bio_xx” na ponta de cada um, os vetores mais próximos entre si são mais correlacionados. Nesse trabalho selecionamos as camadas com menor correlação (os vetores mais distantes entre si) e com mais contribuição a dimensão da PCA.

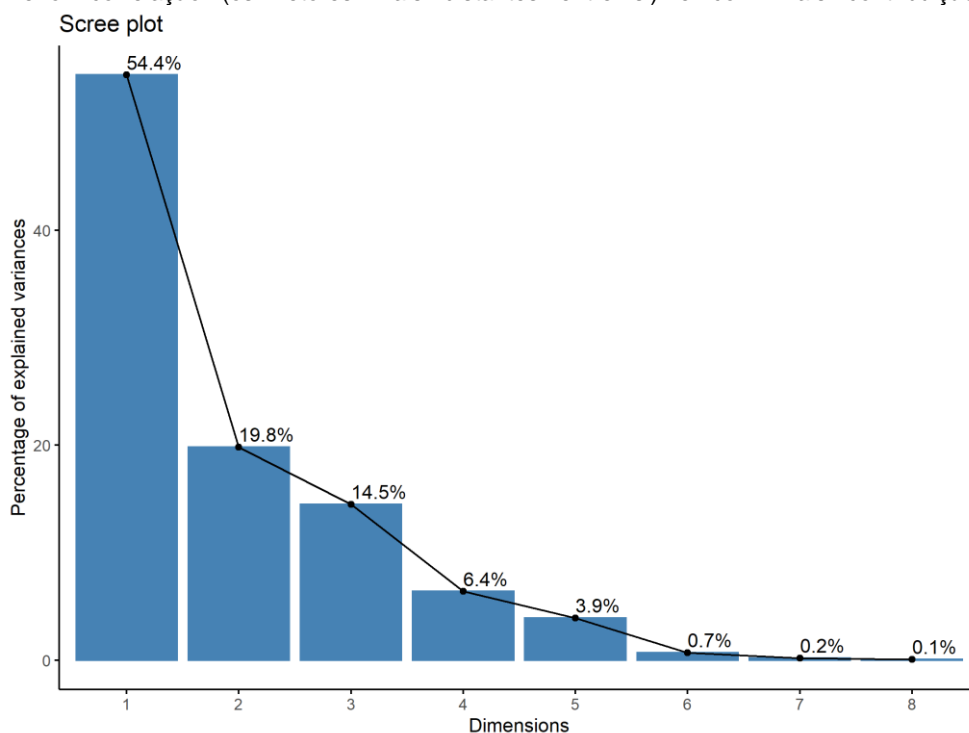


Figura 5. Scree plot da Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis bioclimáticas do WorldClim 1.4 para os modelos de reprodução. O gráfico representa a porcentagem de contribuição de cada eixo (dimensão) da PCA. Nesse trabalho foi selecionado os cinco primeiros eixos com explicação de 90% da variação.

4.2 Modelagem de nicho ecológico

Ao todo, foram gerados 96 modelos finais com todas as réplicas, sendo 12 por população separados de acordo com o período migratório (nidificação e invernada). Os 12 modelos de diferentes algoritmos para o mesmo período reprodutivo e projeção (presente e futuro) foram concatenados para melhor visualização. O limite de corte utilizado para todos os modelos foi o *threshold* de máxima sensibilidade e especificidade. Os gráficos e mapas de perdas e ganhos contém somente a projeção futura rcp 8.5, pois é a projeção que mais apresenta diferença na comparação com o presente.

4.2.1 MIGRANTES INTRATROPICAIS

Para a invernada dos indivíduos amostrados em Brasília houve maior estabilidade para ambas as projeções de 2050 e 2070, seguida de grandes ganhos de

território ao sul (figura 6A) também para 2050 e 2070, mas contendo grandes e pequenas perdas no centro da área (figura 7A). Pequenos e médios ganhos e médias perdas não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Nos mapas de adequabilidade de invernada (figura 8), o presente mostra uma área menor com mais adequabilidade no extremo nordeste da área de inverno, enquanto que na projeção RCP 4.5 de 2050 mostra maiores ganhos. As projeções RCP 8.5 de 2050 e 2070 mostram uma perda suave de adequabilidade nessa área e um pouco de ganho na borda sul de toda a área de invernada, sendo mais acentuada no ano de 2070.

Nas áreas de nidificação houve mais grandes perdas do que estabilidade para ambas as projeções de 2050 e 2070 (figura 6B), essa concentrada nas áreas leste, sul e sudeste do mapa (figura 7B).

Na adequabilidade das áreas de nidificação (figura 9), a projeção para o presente mostra grande adequabilidade na área, sendo perdida gradualmente entre as projeções futuras RCP 4.5 e 8.5 de 2050. Houve poucos ganhos nas projeções RCP 4.5 e 8.5 para o ano de 2070, ao sul da área de invernada, e poucas perdas na adequabilidade total no nordeste da área.

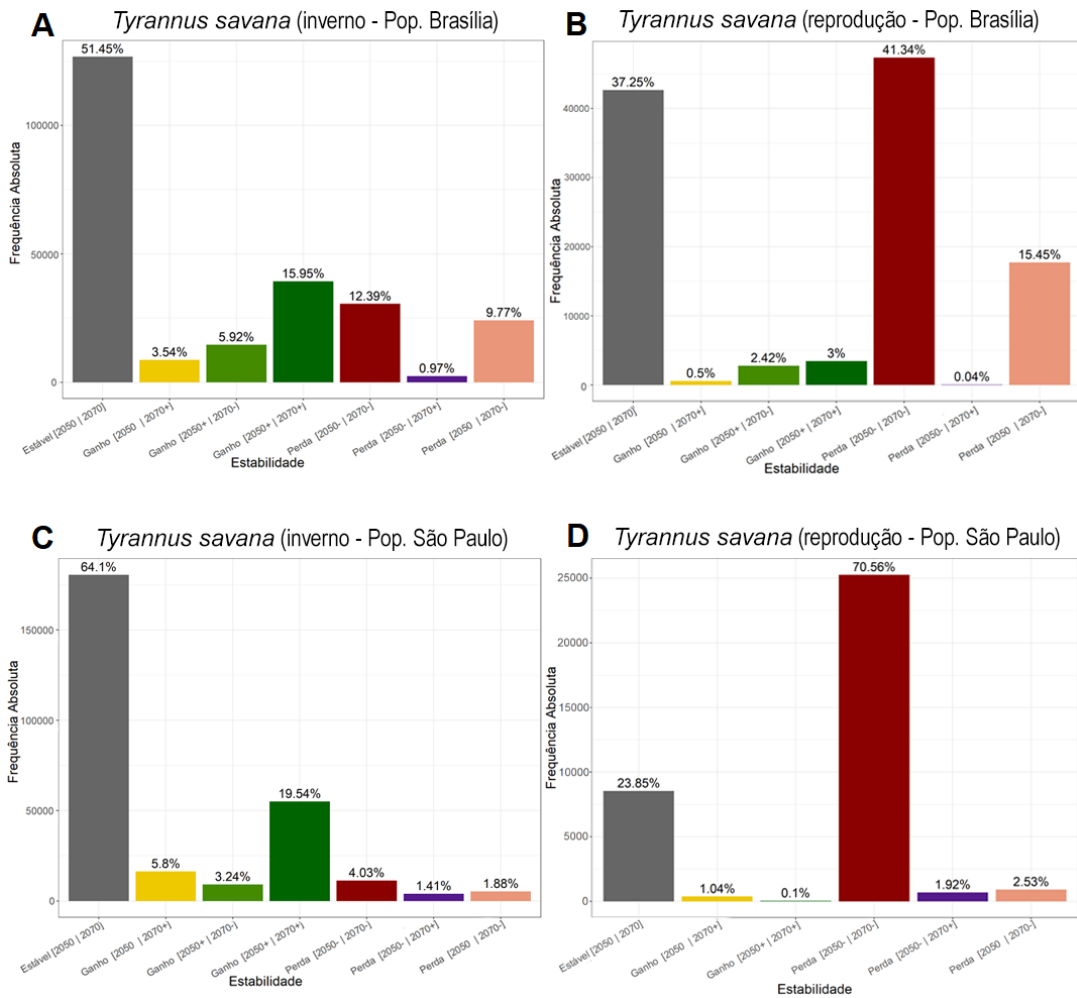


Figura 6. Gráfico de perdas e ganhos dos migrantes intratropicais na projeção RCP 8.5. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente. O sinal positivo na frente do ano da projeção no eixo horizontal significa ganhos positivos, o sinal negativo significa perda e nenhum sinal significa estabilidade. O esquema de cores de cada ano corresponde a paleta de cores do mapa de estabilidade (figura 7).

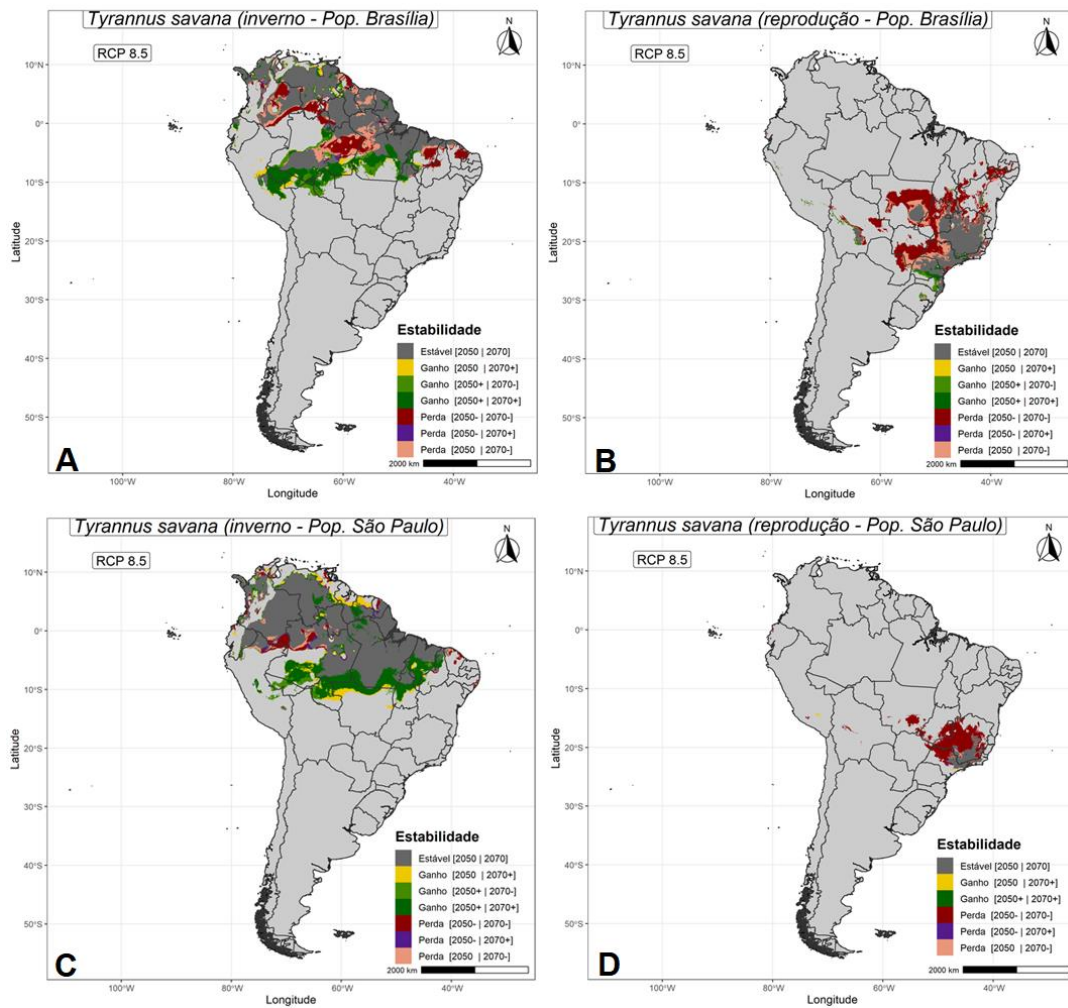


Figura 7. Mapa de perdas e ganhos dos migrantes intratropicais. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente.

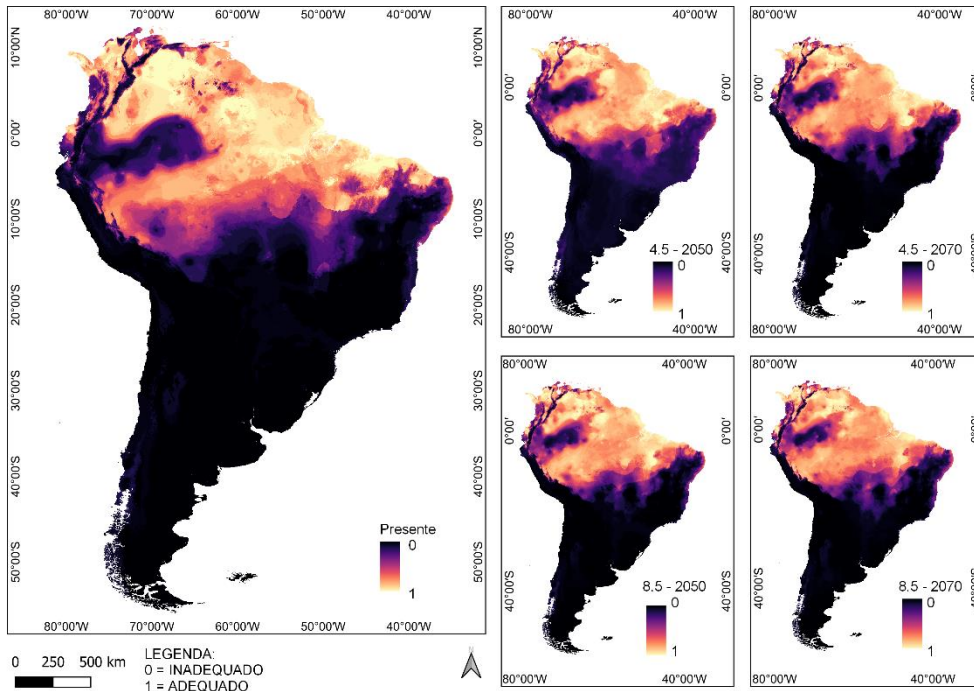


Figura 8. Adequabilidade da população de Brasília em áreas de invernada.

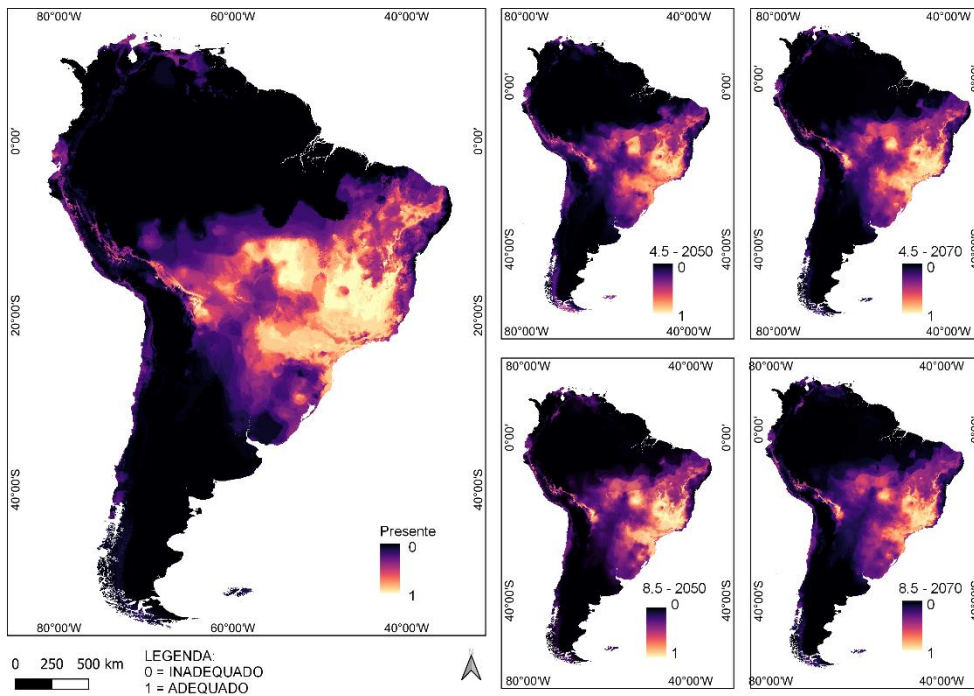


Figura 9. Adequabilidade da população de Brasília em áreas de reprodução.

Para a invernada dos indivíduos amostrados em São Paulo, também houve maior estabilidade, seguida de grandes e pequenos ganhos para as projeções RCP 8.5 2050 e 2070 (figura 6C), essas concentradas ao sul da área marcada (figuras 7C e 10).

As áreas de nidificação de maior adequabilidade tiveram redução e grande descolamento, do extremo nordeste na projeção do presente para o sudeste em todas as projeções futuras, sendo a projeção RCP 4.5 para o ano de 2050 com maiores perdas (figura 10).

Quanto à reprodução, houve grandes perdas, seguidas de estabilidade ambas para as projeções de 2050 e 2070 (figura 6D). Essas perdas localizadas ao norte e nordeste da área de nidificação, enquanto a estabilidade se manteve ao sul/sudeste (figura 7D), alinhadamente com o mapa de adequabilidade (figura 11).

Ainda na adequabilidade, as projeções RCP 4.5 para os anos de 2050 e 2070 apresentaram perdas de adequabilidade graduais nas bordas das áreas, e as projeções RCP 8.5 para ambos os anos mostraram mais perdas nas bordas e redução da área adequada, sendo o ano de 2070 com mais perdas.

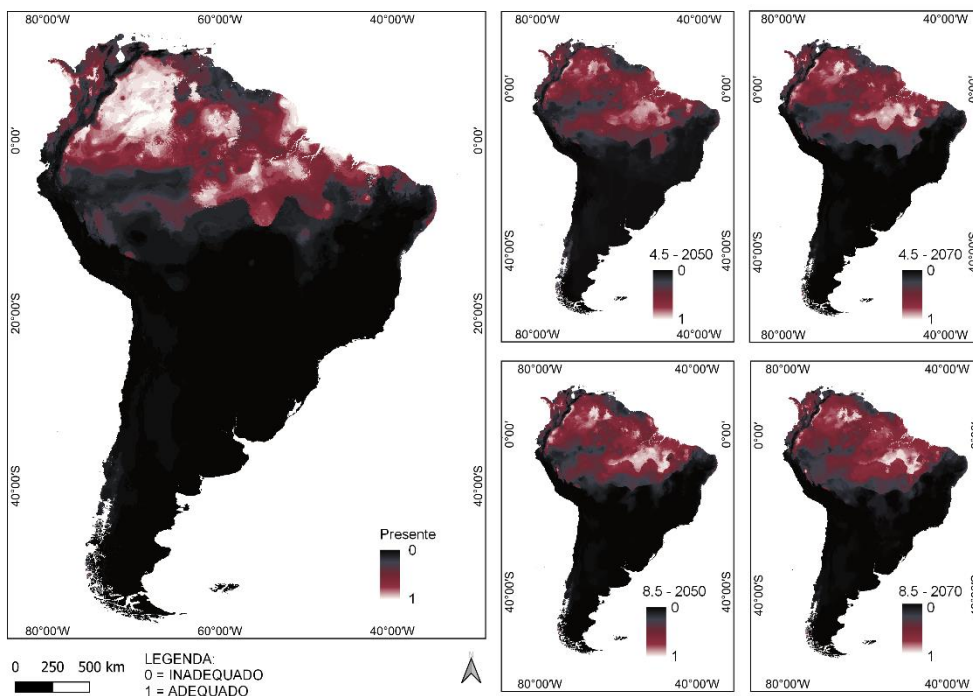


Figura 10. Adequabilidade da população de São Paulo em áreas de invernada.

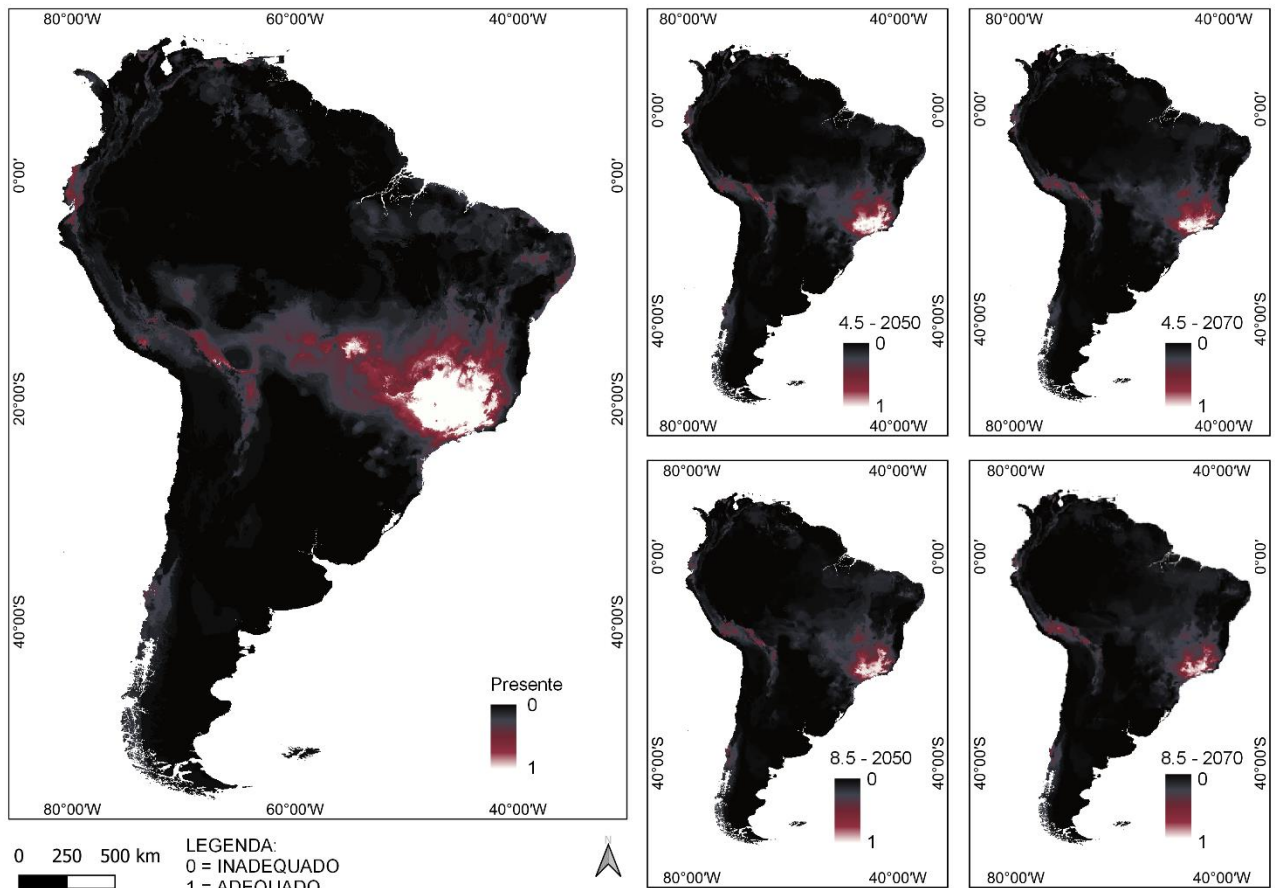


Figura 11. Adequabilidade da população de São Paulo em áreas de reprodução.

4.2.2 MIGRANTES AUSTRALIS

Para a invernada dos indivíduos amostrados em Buenos Aires, houve maior estabilidade ao norte e nordeste, seguida de grandes perdas no oeste do território (figura 12A e 13A). Pequenas e médias perdas, e ganhos, não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Quanto a adequabilidade, não houve deslocamento das áreas adequadas. Há maior perda de território na projeção futura 4.5 para o ano de 2050. As perdas mostradas nas projeções futuras de RCP 4.5 de 2070 e 8.5 de 2050 e 2070 são nas bordas das áreas, que diminuíram gradualmente entre si, marcadas como mais adequadas na projeção presente.

Na reprodução, houve mais grandes perdas, seguidas da estabilidade tanto para a projeção de 2050 quanto para a de 2070 (figura 12B). Pequenas e médias perdas, e ganhos, também não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Também houve maior perda de território na projeção futura 4.5 para o ano de 2050. As perdas localizadas no norte do território do mapa de perdas e ganhos, assim como mostra a adequabilidade (figuras 13B e 15), nas projeções RCP 4.5 2050, 2070 e RCP 8.5 2050, para a projeção de 2070 as perdas na área adequada tiveram o formato de “afunilamento”.

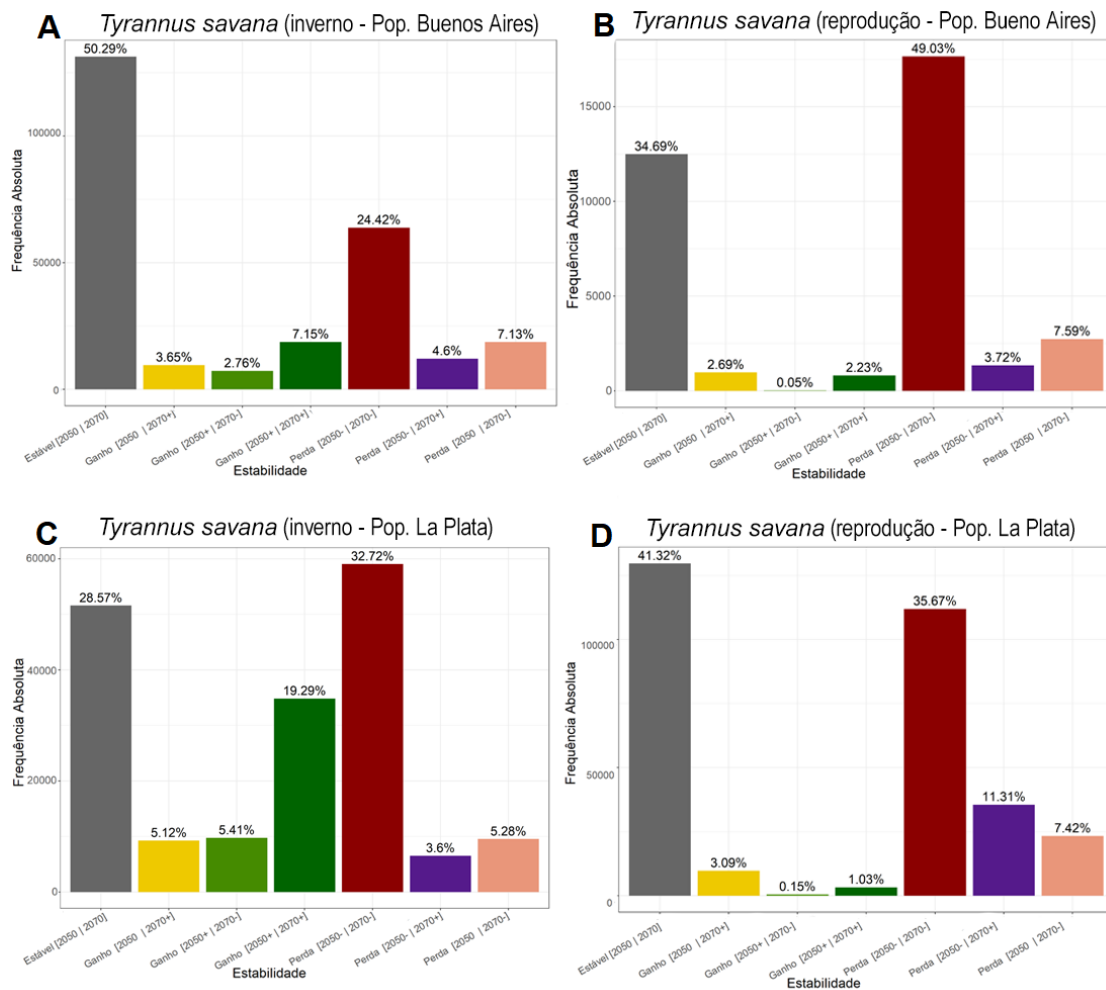


Figura 12. Gráfico de perdas e ganhos dos migrantes austrais na projeção RCP 8.5. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente. O sinal positivo na frente do ano da projeção no eixo horizontal significa ganhos positivos, o sinal negativo significa perda e nenhum sinal significa estabilidade. O esquema de cores de cada ano corresponde a paleta de cores do mapa de estabilidade (figura13).

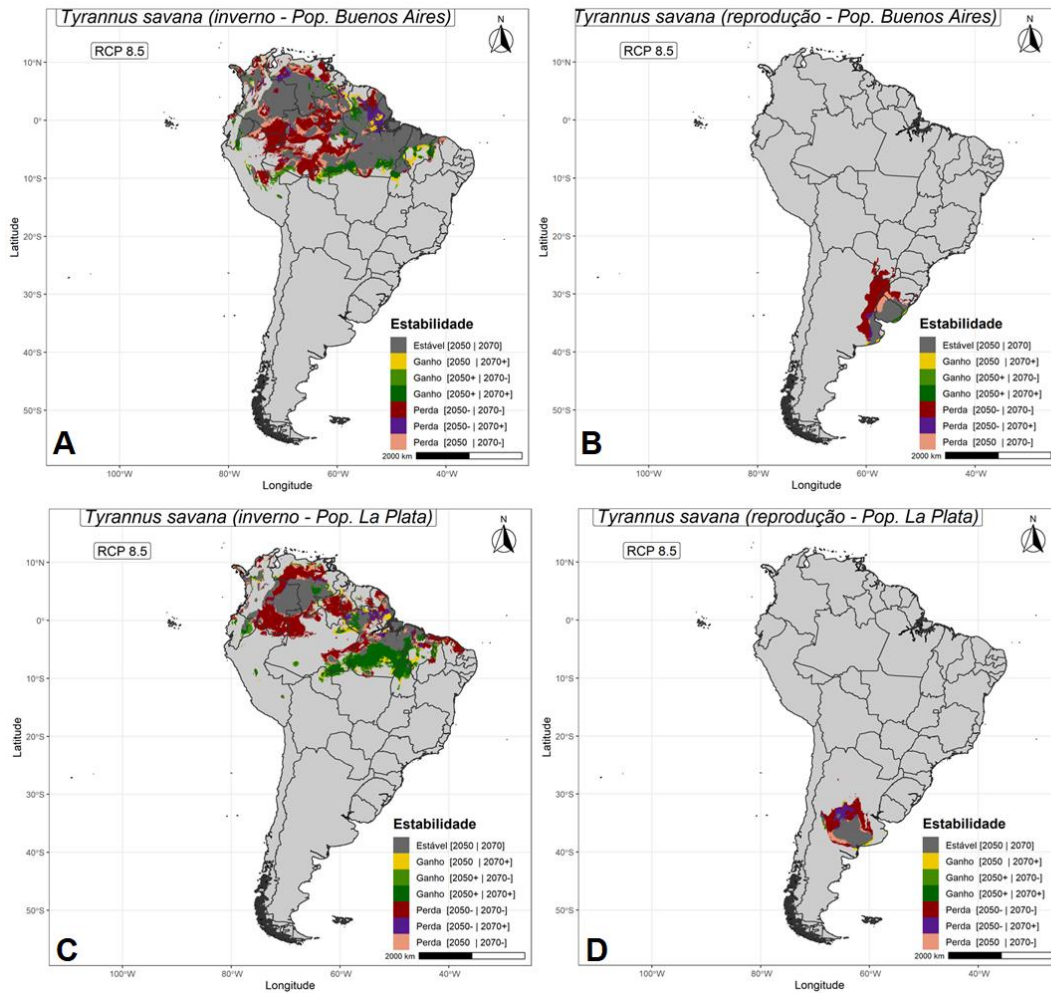


Figura 13. Mapa de perdas e ganhos dos migrantes austrais. A cor cinza escuro corresponde a estabilidade. O amarelo, verde claro e verde escuro correspondem a ganhos pequenos, médios e grandes, respectivamente. O rosa, roxo e vermelho correspondem a perdas pequenas, médias e grandes, respectivamente.

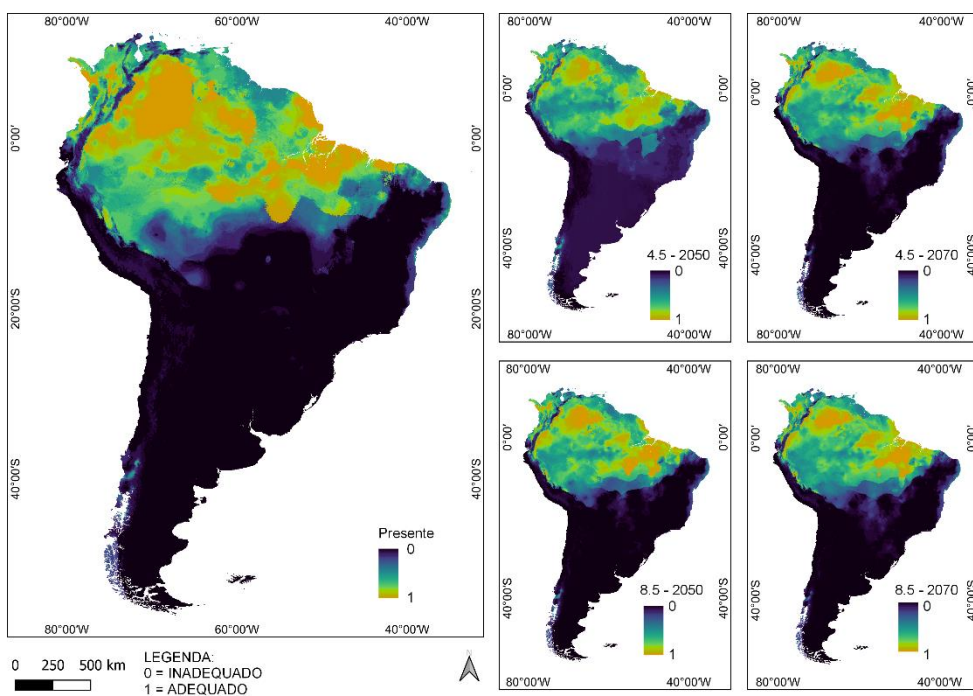


Figura 14. Adequabilidade da população de Buenos Aires em áreas de invernada.

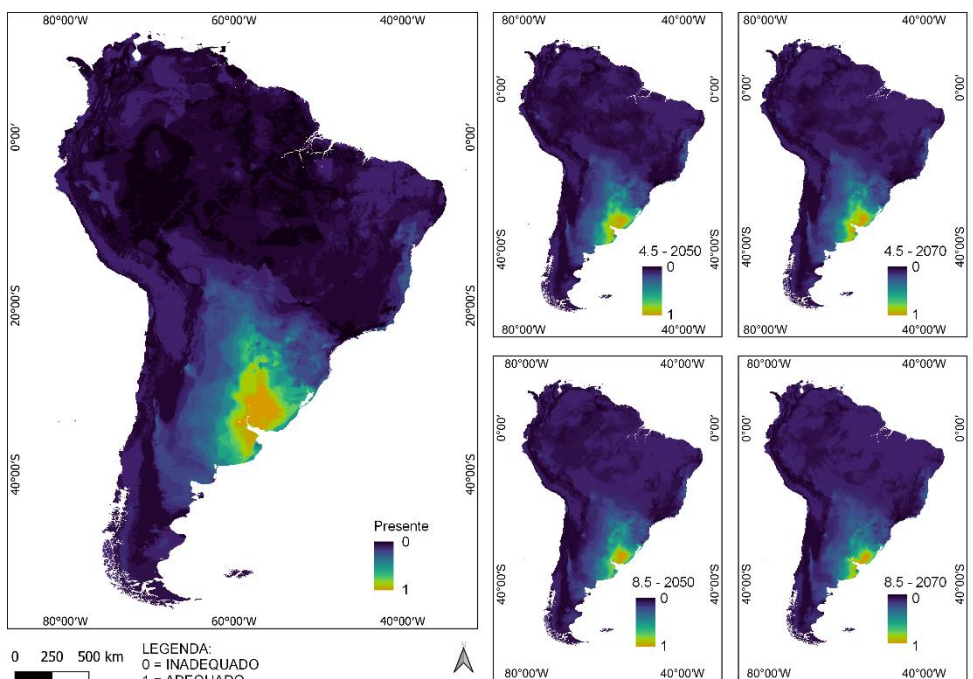


Figura 15. Adequabilidade da população de Buenos Aires em áreas de reprodução.

Para a invernada dos indivíduos amostrados em La Plata, houve grandes perdas no perímetro norte da área, grandes áreas de estabilidade ao norte e nordeste, e também

grandes ganhos ao sul da área de estabilidade presente no norte do território em ambas as projeções RCP 8.5 2050 e 2070 (figuras 12C e 13C).

A adequabilidade (figura 16) da população sofreu modificações alinhadas com o que demonstram os dados de perdas e ganhos. As projeções RCP 4.5 2070 e 8.5 2050 tiveram perdas, e são mais acentuadas nas projeções RCP 4.5 2050 e 8.5 2070 nas áreas demarcadas como adequadas na projeção presente.

Na reprodução da população de La Plata há maior estabilidade, localizadas ao sul/sudeste do território, seguida de grandes perdas ao norte e nordeste. Há algumas perdas pequenas ao extremo oeste e perdas médias no nordeste da área de reprodução (figuras 12D e 13D). Grandes ganhos, e pequenas e médias perdas e ganhos, respectivamente, não tiveram valores significativos para ambas as projeções.

Nos mapas de adequabilidade (figura 17) é possível visualizar as perdas nas bordas das áreas demarcadas adequadas na projeção presente diminuir nas projeções RCP 4.5 2050, 2070 e 8.5 2050, e teve uma diminuição drástica na projeção RCP 8.5 2070.

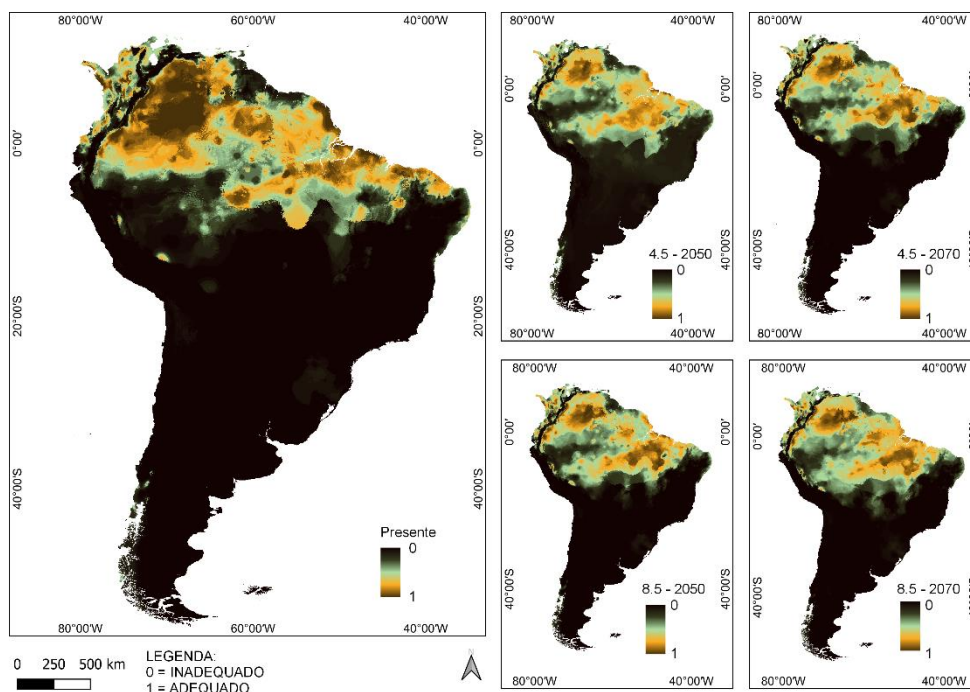


Figura 16. Adequabilidade da população de La Plata em áreas de inverno.

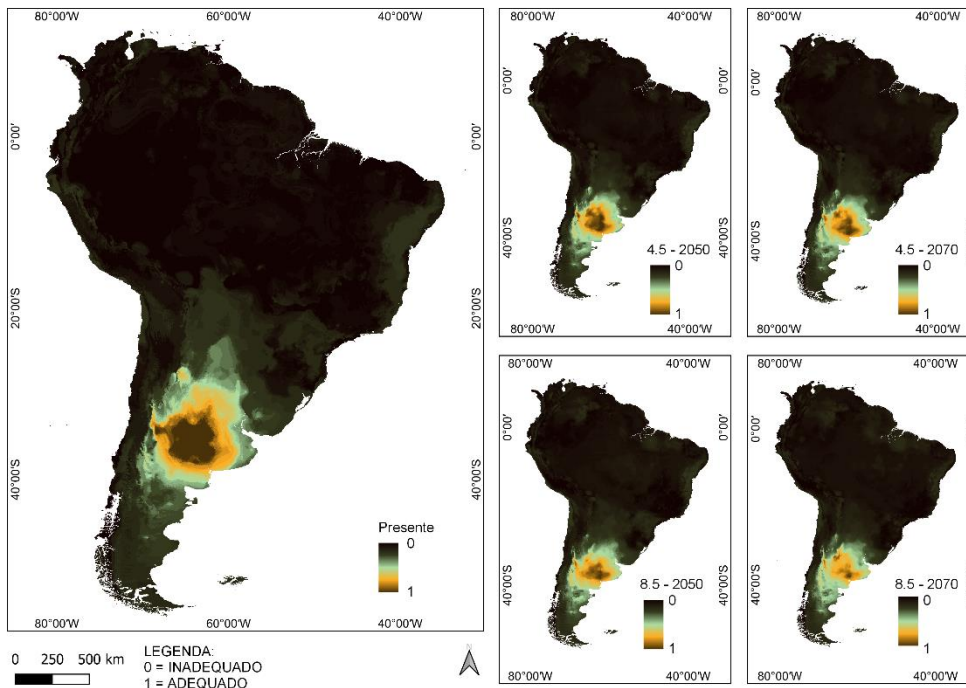


Figura 17. Adequabilidade da população de La Plata em áreas de reprodução.

5 DISCUSSÃO

A seleção de camadas ambientais considerando as dinâmicas das áreas de hibernação e reprodução da espécie influenciou positivamente a nossa análise. Isso devido os indivíduos de ambas populações partirem de acordo com a mudança de estação (Jahn et al, 2019), identificadas nas camadas pelas mudanças de precipitação e temperatura. Nisso observamos mais acurácia às previsões dos impactos das mudanças climáticas nas áreas adequadas à espécie.

Observamos pouco overfitting em relação aos modelos, que são previsões de modelo enviesadas em outras regiões ou outros períodos (Li e Wang, 2013). Devido ao fato de que a *T. savana* é cosmopolita e ocorre por toda a extensão da América do Sul (Jahn e Tuero, 2020), ao optar pela resolução das camadas 5km x 5km para esse recorte de background, acarretou modelos de maior confiança por conter uma resolução adequada ao tamanho do recorte.

Com exceção da população de La Plata, que obteve maiores perdas nas áreas de inverno, as outras três populações mantiveram maior estabilidade quanto a ganho ou perda de território. Quanto à adequabilidade, nosso estudo mostra que as populações, em especial a população de São Paulo, tiveram perda de áreas climaticamente adequadas no futuro, com o deslocamento dessas áreas para outras regiões. O deslocamento ocorre quando um território adequado sofre perdas de área em local e tem ganhos de área em outro local.

Na reprodução, apenas a população de La Plata manteve áreas climaticamente adequadas estável, enquanto que as outras três populações tiveram mais perdas do que ganhos. Esses refúgios também tiveram pouco deslocamento, com exceção da população de Brasília, que além de ter grandes perdas, teve um deslocamento para o extremo leste. Por serem áreas menores de refúgio comparadas às áreas de invernada, potencialmente são mais suscetíveis a mudanças mais drásticas.

Como vimos modificações em ambos os períodos de nidificação e inverno, para ambos os sistemas migratórios, mesmo os territórios que se mantiveram estáveis, isso responde a nossa primeira pergunta, se haveria modificações nessas áreas adequadas. No entanto, há evidências de que as áreas expostas à estabilidade climática de longo prazo (refúgios) têm um papel crítico na persistência da biodiversidade, pois são áreas úteis para a sua conservação (Terribile et al, 2012).

Descobrimos tanto ganhos quanto perdas de território, principalmente no período de reprodução para as populações de Buenos Aires, Brasília e São Paulo, e no período de inverno para a população de La Plata. Apenas as populações que realizam migração intratropical tiveram ganhos significativos no período de invernada. Isso corrobora com nossa primeira hipótese de que ambos os sistemas migratórios iriam sofrer impactos devido às mudanças climáticas.

O deslocamento de áreas adequadas, também observado em outras espécies migratórias da América do Sul (*Turdus nigriceps*, *T. subalaris*, e *T. flavipes*), mostram deslocamentos nas rotas migratórias dessas aves também em altitude (Da Silveira et al, 2021). Porém não podemos afirmar modificações de altitude para a *T. savana* porque não utilizamos camadas de paisagem para essa análise. Então, analisar mudanças na

altitude podem potencialmente exibir mais custos que as mudanças climáticas causam nesses migrantes.

Considerando a maior visualização de impactos em perdas/ganhos e modificações de adequabilidade em todas as populações, observamos que os migrantes austrais sofreram maior impacto das mudanças climáticas. Nisso, a nossa segunda hipótese também é corroborada. E fornecendo resposta a nossa pergunta final, também levamos em conta que os modelos nos mostraram resultados diferentes entre populações que realizam a mesma estratégia migratória.

Como dito anteriormente, a estabilidade visível nos modelos potencialmente evidencia a estabilidade da populações migrantes. Enquanto que o processo de especiação entre as populações migrantes se diferenciam morfológica e fisiologicamente de forma sutil, as não migrantes (*T. savana monachus*, *sanctaemartae* e *circumdatus*) dentro desses territórios de refúgio da *T. savana*, seguem trajetórias de evolução diferente (Gómez-Bahamón et al, 2020). Nossa abordagem é restrita às populações migrantes, no entanto é importante entender a complexidade da dinâmica da espécie como um todo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os efeitos das mudanças climáticas nas estratégias de migração de aves na América do Sul são pouco estudados, e descobrimos mais informações sobre como esses efeitos poderão causar nas áreas potenciais de refúgio da tesourinha. Vimos que todos os cenários projetados para os períodos futuros das tesourinhas foram eficientes em prever a variação das áreas ao sofrer esses impactos, positivos ou negativos. Mesmo assim, os modelos desse trabalho são estritamente climáticos e consideram apenas metade do ciclo anual da espécie, o que faz ser necessário modelos para os corredores de migração de primavera e outono.

Também é necessário incluir camadas de paisagem, como por exemplo camadas de cobertura de solo, que podem incluir informações de como a altitude pode ser afetada pelos mesmos efeitos vistos nesses modelos. As camadas de paisagem cruzadas com os dados do clima auxiliariam a reduzir o pequeno *overfitting* observado.

Enfatizamos, enfim, que esses modelos dão um passo a mais para a compreensão do complexo sistema migratório dessa espécie, instigando a curiosidade de perseguir detalhes que moldam as características de diversos aspectos, sendo um deles, das áreas de refúgio da espécie.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allouche, O; Tsoar, A; Kadmon, R (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* **43(6)**: 1223–1232

Areta, JI; Bodrati, A; Thom, G; Rupp, AE; Velazquez, M; Holzmann, I; Carrano, E; Zimmermann, CE (2013). Natural History, Distribution, and Conservation of Two Nomadic Sporophila Seed eaters Specializing on Bamboo in the Atlantic Forest. *The Condor* **115**: 237–252

Barbet-Massin, M; Jiguet, F; Albert, CH; Thuiller, W (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models: how, where and how many? *Methods In Ecology And Evolution* **3**: 327-338

Bejarano, V; Jahn, AE (2018). Relationship between arrival timing and breeding success of intra-tropical migratory Fork-tailed Flycatchers (*Tyrannus savana*). *J. Field Ornithol* **0**: 1-8

Bellard, C; Bertelsmeier, C; Leadler, P; Thuiller, W; Courchamp, F (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters* **15**: 365-377.

Cutler, DR; Edwards, TC; Beard, KH; Cutler, A; Hess, KT; Gibson, J; Lawler, JJ (2006). Random Forests for classification in ecology. *Ecology* **88(11)**: 2783–2792

Dalapicolla J (2016) [Internet]. Tutorial de modelos de distribuição de espécie: guia teórico. Laboratório de Mastozoologia e Biogeografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, disponível em:
< <http://blog.ufes.br/lamab/tutoriais>>

Faaborg, J; Holmes, RT; Anders, AD; Bildstein, KL; Dugger, KM; Gauthreaux Jr, AS; Heglund, P; Hobson, KA; Jahn, AE; Johnson, DH; Latta, SC; Levey, DJ; Marra, PP; Merkord, CL; Nol, E; Rothstein, SI; Sherry, TW; Sillett, TS; Thompson III, FR; Warnock, N (2010). Recent advances in understanding migration systems of New World land birds. *Ecology monographs* **80**: 3-48

Giannini, TC; Siqueira, MF; Acosta, AL; Barreto, FCC; Saraiva, AM; Alves-dos-Santos I (2012). Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia* **63**: 733-749

Gómez-Bahamón, V; Márquez, R; Jahn, AE; Miyaki, CY; Tuero, DT; Laverde-R, O; Restrepo, S; Cadena, CD (2020). Speciation Associated with Shifts in Migratory Behavior in an Avian Radiation. *Current Biology* **30**: 1–10

Guisan, A; Thuiller, W; Zimmermann, NE (2017). Habitat suitability and distribution models with applications in R. *Cambridge University Press*.

Intergovernmental Panel On Climate Change (2014). Climate change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 151 pp

Jahn, AE; Cereghetti, J; Cueto, VR; Hallworth, MT; Levey DJ; Marini MA; Masson, D; Pizo, MA; Sarasola, JH; Tuero, DT (2019). Breeding latitude predicts timing but not rate of spring migration in a widespread migratory bird in South America. *Wiley Ecology and Evolution* **9**: 5752–5765

Jahn, AE; Seavy, NE; Bejarano, V; Guzmán, MB; Provinciato, ICC; Pizo, MA; MacPherson, M (2016). Intra-tropical migration and wintering areas of Fork-tailed Flycatchers (*Tyrannus savana*) breeding in São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia* **24**: 116-121

Jahn, AE; Levey, DJ; Cueto, VR; Ledezma, JP; Tuero, DT; Fox, JW; Masson, D (2013). Long-distance bird migration within South America revealed by light-level geolocators. *The Auk* **130**: 223–229

Jahn AE, Cueto VR (2012). The potential for comparative research across New World bird migration systems. *J ornithol* **153**: 199-205

Li, W; Guo, Q; Elkan, C (2011). Can we model the probability of presence of species without absence data? *Ecography* **34(6)**: 1096–1105

Liu, C; Newell, G; White, M (2011). On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution* **6(1)**: 337–348

MacPherson, MP; Jahn, AE; Murphy, MT; Kim, DH; Cueto, VR; Tuero, DT; Hill, ED (2018). Follow the rain? Environmental drivers of *Tyrannus* migration across the New World. *American Ornithological Society* **4**: 881-894

Merow, C; Smith, MJ; Silander Jr, JA (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* **36**: 1058-1069

Parmesan C (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Ecol. Evol.* **37**: 637-639

Peterson, AT; Soberón, J; Pearson, RG; Anderson, RP; Martínez-Meyer E; Nakamura, M; Araújo, MB (2011). Ecological Niches and Geographic Distributions. *Princeton University Press*

Phillips, SJ; Anderson, RP; Schapire, RE (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231–259

Phillips, SB et al (2006). Modelling and analysis of the atmospheric nitrogen deposition in North Carolina. *International Journal of Global Environmental Issues* **6(2-3)**: 231–252

Da Silveira, NS; Vancine, MH; Jah, AE; Pizo MA; Sobral-Souza T (2021). Future climate change will impact the size and location of breeding and wintering areas of migratory thrushes in South America. *Ornithological Applications* **123**:1–16

Somenzari M; Amaral, PP; Cueto, VR; Guaraldo, VC; Jahn, AE; Lima, DM; Lima, PC; Lugarini, C; Machado, CG; Martinez, J; Nascimento, JLX; Pacheco, JF; Paludo, D; Prestes, NP; Serafini, PP; Silveira, LF; Sousa, AEBA; Sousa, NA; Souza, MA; Telino-Júnior, WR; Whitney, BM (2018). An overview of migratory birds in Brazil. *Pap. Avulsos Zool.* **58**: 1-66

Tax DMJ (2001). One-class classification: concept-learning in the absence of counter-examples [tese]. Delft University of Technology, Delft, Países Baixos.

Terribile, LC; Lima-Ribeiro, RS; Araújo, MB; Bizão, N; Collevatti, RG; Dobrovolski, R; Franco, AA; Guilhaumon, F; Lima, JS; Murakami, DM; Nabout, JC; Oliveira, G; Oliveira, LK; Rabelo, SG; Rangel, TF; Simon, LM; Soares, TN; Telles, MPC; Diniz-Filho JAF (2012). Areas of Climate Stability of Species Ranges in the Brazilian Cerrado: Disentangling Uncertainties Through Time. *Natureza & Conservação* **10(2)**:152-159

Zurell, D; Graham, CH; Gallien, L; Thuiller, W; Zimmermann, NE (2018) Long-distance migratory birds threatened by multiple independent risks from global change. *Nature Climate Change* **8**: 992–996