

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE
ANIMAL

Samanta Dullius Pereira

**FATORES ASSOCIADOS À DIVERSIDADE BETA DE INTERAÇÕES
ENTRE PLANTAS E BEIJA-FLORES NA MATA ATLÂNTICA**

Santa Maria, RS

2021

Samanta Dullius Pereira

**FATORES ASSOCIADOS À DIVERSIDADE BETA DE INTERAÇÕES
ENTRE PLANTAS E BEIJA-FLORES NA MATA ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Biodiversidade Animal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Biodiversidade Animal**.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Mariana Bender Gomes
Coorientador: Prof. Dr. Cristian de Salles Dambros

Santa Maria, RS

2021

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Pereira, Samanta Dullius
FATORES ASSOCIADOS À DIVERSIDADE BETA DE INTERAÇÕES
ENTRE PLANTAS E BEIJA-FLORES NA MATA ATLÂNTICA / Samanta
Dullius Pereira.- 2021.
41 p.; 30 cm

Orientadora: Mariana Bender Gomes
Coorientador: Cristian de Salles Dambros
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Biodiversidade Animal, RS, 2021

1. Diversidade beta funcional 2. Turnover 3. Rewiring
4. Redes de interação 5. Gradientes ambientais I. Gomes,
Mariana Bender II. Dambros, Cristian de Salles III.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

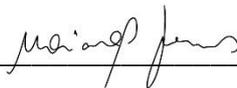
Declaro, SAMANTA DULLIUS PEREIRA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Samanta Dullius Pereira

**FATORES ASSOCIADOS À DIVERSIDADE BETA DE INTERAÇÕES
ENTRE PLANTAS E BEIJA-FLORES NA MATA ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Biodiversidade Animal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Biodiversidade Animal**.

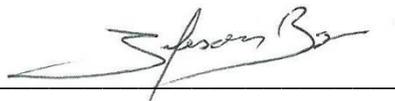
Aprovado em setembro de 2021:



Mariana Bender Gomes, Dra. (UFSM) - Vídeo conferência
(Presidente/Orientadora)



Fernanda Vieira da Costa, Dra. (UFOP) - Vídeo conferência



Jeferson Vizentin-Bugoni, Dr. (UFRGS) - Vídeo conferência

Santa Maria, RS

2021

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer a todos que de alguma forma me ajudaram a concluir este estudo, em especial:

- A minha orientadora Mariana Bender e a meu coorientador Cristian Dambros por confiarem em mim e por todos os ensinamentos, aprendi muito com vocês;

- A Carine Emer e o Jeferson Vizentin-Bugoni pelas sugestões para melhorar este estudo;

- Aos meus amigos Brena Gonçalves, Guilherme Azambuja, Éverton Cadaval, Maraiza da Silva, Luiza Waechter e Isadora Fluck, por todo o apoio emocional nos momentos difíceis e por me incentivarem a não desistir;

- Ao meu namorado João Rafael Alves Oliveira, por todo o amor e carinho, que sempre me deu tanta força, pela compreensão e por acreditar em mim. Por nossas horas de escritas juntos que sempre foram divertidas e me ajudaram muito. Se hoje concluí este estudo em meio a uma pandemia, devo muito a você. Obrigada por tudo;

- Aos meus pais Xixto da Silva Pereira e Inês Dullius Pereira, por todo o apoio.

- Ao meu irmão que fez esse último ano ser um pouco mais leve e divertido, mesmo com o isolamento;

- A Melina Maxwell por todas as vezes que me ajudou com análises e questões pessoais;

- Aos meus colegas do Laboratório de Estatística Teórica e Aplicada (LETA) e Laboratório de Macroecologia e Conservação Marinha, que sempre compartilharam seus conhecimentos, pelas reuniões de escrita e por terem feito a convivência no laboratório ser tão agradável e divertida;

- a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa;

- À Universidade pública, gratuita e de qualidade, pela oportunidade de desenvolver e concretizar este estudo;

Enfim, a todos que fazem parte da minha vida e que são essenciais para fazerem de mim uma pessoa melhor.

RESUMO

FATORES ASSOCIADOS À DIVERSIDADE BETA DE INTERAÇÕES ENTRE PLANTAS E BEIJA-FLORES NA MATA ATLÂNTICA

AUTORA: Samanta Dullius Pereira
ORIENTADORA: Mariana Bender Gomes

A composição de espécies em comunidades pode variar no espaço, ao longo de gradientes geográficos e ambientais. Estas mudanças na composição de espécies podem ter efeitos sobre as interações entre organismos, as quais podem variar de acordo com mudanças na identidade de espécies ou, ainda, em função de mudanças nos atributos funcionais das mesmas. Investigamos como plantas e beija-flores da Mata Atlântica interagem ao longo de gradientes ambientais, bem como a influência de características funcionais nas interações. Esperamos que (i) a mudança na composição de espécies (componente *turnover* taxonômico) seja a principal causa da diversidade beta de interações (*i.e.*, mudança nas interações) entre redes; (ii) as espécies de beija-flores tenham preferência por características funcionais de plantas, e não por espécies e (iii) diferenças ambientais e a distância geográfica maiores resultem em redes com interações mais distintas, entre plantas e beija-flores, quando comparadas com ambientes mais semelhantes e próximos. Compilamos da literatura 22 redes de interação somando 278 espécies de plantas e 31 espécies de beija-flores ao longo da Mata Atlântica, bem como as características funcionais destes organismos. Primeiramente, avaliamos a dissimilaridade entre redes ao longo da distância geográfica (km), decompondo essa dissimilaridade em dois componentes *turnover* taxonômico e o *rewiring*. Depois, investigamos características funcionais de espécies em redes de interação. Por fim, utilizando correlações de Pearson e Regressão Múltipla de Matrizes de distância - MRMs, investigamos como as variáveis ambientais influenciam a diversidade beta de interações. O *turnover* taxonômico foi o componente que mais explicou a diversidade beta de interações, aumentando o poder de explicação em redes mais distantes entre si. Devido ao alto *turnover* taxonômico, o *rewiring* foi baixo e diminuiu o poder de explicação com a distância. A nível funcional, não identificamos mudanças nas interações no gradiente de distância, revelando a sobreposição de *links* entre as redes analisadas no espaço funcional de interações. Beija-flores, por exemplo, interagiram com uma ampla variedade de características funcionais de plantas, sem evidências de correspondência entre atributos comumente associados como comprimento da corola e do bico de beija-flores. Distância geográfica, temperatura mínima e precipitação explicaram 31% das mudanças taxonômicas das interações. Enquanto que, apenas a distância geográfica teve influência nas mudanças funcionais dos *links* e explicou 28% dessas mudanças. Nossos resultados revelam padrões na diversidade beta de interações para redes de plantas e beija-flores ao longo da Mata Atlântica e que a mudança na composição de espécies é o componente que explica estas mudanças nas interações. Os beija-flores interagem com plantas que apresentam uma ampla variedade de características, revelando versatilidade deste grupo quanto às interações.

Palavras-Chave: Diversidade beta funcional. *Turnover*. *Rewiring*. Redes de interação. Gradientes ambientais.

ABSTRACT

FACTORS ASSOCIATED WITH BETA DIVERSITY OF INTERACTIONS BETWEEN PLANTS AND HUMMINGBIRDS IN THE ATLANTIC FOREST

AUTHOR: Samanta Dullius Pereira

ADVISER: Mariana Bender Gomes

The composition of species in communities can vary in space and along geographic and environmental gradients. These changes in species composition can affect the interactions between organisms, which may vary according to changes in the identity of species or as a result of changes in species attributes. We investigate how plants and hummingbirds from the Atlantic Forest interact along environmental gradients, as well as the influence of traits in interactions. We expect that (i) the change in species composition (component of taxonomic turnover) is the main cause of the beta diversity of interactions (*i.e.*, change in interactions) between networks; (ii) hummingbirds species has a preference for plant traits rather than a preference for the plant species and (iii) (iii) larger environmental differences and geographic distance results in networks with distinct interactions between plants and hummingbirds. We have compiled from the literature 22 interaction networks of 278 plant and 31 hummingbird species throughout the Atlantic Forest, as well as the organism's specific traits. Firstly, we analyzed the dissimilarity between networks over geographic distance (km), decomposing this dissimilarity into two components, taxonomic turnover, and rewiring. Later, we investigated species functional traits in the interaction networks. Finally, using Pearson correlations and Multiple Regression on distance Matrices - MRMs, we investigate how environmental variables influence the beta diversity of interactions. The taxonomic turnover was the component that better explained the beta diversity of interactions, increasing its explanatory power according to the distance between networks. Due to the high taxonomic turnover, rewiring was low and its explanatory power decreased with distance. At the functional level, we did not identify changes in the interactions according to the distance gradient, revealing the overlapping of links between the analyzed networks in the functional space of interactions. Hummingbirds, for example, interacted with a wide variety of plant traits, with no evidence of correspondence between commonly associated attributes such as corolla length and hummingbird's bill. Geographical distance, minimum temperature, and precipitation explained 31% of the taxonomic changes of the interactions, while only geographical distance influenced the functional changes of the links and explained 28% of these changes. Our results reveal patterns in the beta diversity of interactions for plant and hummingbird networks throughout the Atlantic Forest and that species composition turnover is the main component that drives changes in interactions. Hummingbirds interact with plants that have a wide variety of traits, revealing the group's versatility in terms of interactions.

Keywords: Functional beta diversity. Turnover. Rewiring. Interaction networks. Environmental gradients.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 HIPÓTESES.....	11
2. METODOLOGIA	12
2.1. COLETA DE DADOS	12
2.2 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS	14
2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	15
2.3.1 Tratamento das características funcionais	15
2.3.2 Mudança de composição taxonômica e funcional das comunidades de plantas e beija-flores ao nível de espécie	15
2.3.3 Mudanças de interações ao nível da rede (beta de interação)	16
2.3.4 Mudança de composição funcional das interações (<i>links</i>) e amplitude das características funcionais de parceiros	17
2.3.5 Variáveis ambientais	18
3. RESULTADOS	21
3.1 MUDANÇA DE COMPOSIÇÃO TAXONÔMICA E FUNCIONAL DAS COMUNIDADES DE PLANTAS E BEIJA-FLORES AO NÍVEL DE ESPÉCIE.....	21
3.2 MUDANÇAS DE INTERAÇÕES AO NÍVEL DA REDE (BETA DE INTERAÇÃO).....	22
3.3 MUDANÇA DE COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DAS INTERAÇÕES (<i>LINKS</i>) E AMPLITUDE DAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DE PARCEIROS.....	24
3.4 VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....	26
4. DISCUSSÃO	28
REFERÊNCIAS	32
MATERIAL SUPLEMENTAR	37

1. INTRODUÇÃO

As interações entre espécies, bem como os mecanismos ecológicos e evolutivos por trás destas interações, sempre atraíram a atenção de pesquisadores. As interações entre grupos que visivelmente coevoluíram são especialmente interessantes, principalmente para grupos que mostram adaptação morfológica extrema entre os parceiros de interação (especialistas), como é o caso de algumas plantas e seus polinizadores (ARDITTI, *et al.*, 2012; BASCOMPTE E JORDANO, 2007; DARWIN, 1862). Os primeiros pesquisadores interpretavam adaptação morfológica como requisito para ocorrência de interação, ou seja, a co-adaptação levaria à fidelidade entre parceiros (ZANATA, *et al.*, 2017). Estudos demonstraram que espécies são capazes de interagir com diversos parceiros, devido à fatores que adicionam imprevisibilidade à disponibilidade de parceiros, como por exemplo: falta de parceiros especializados e/ou baixa abundância de parceiros (TINOCO, *et al.*, 2017; WESER, *et al.*, 2018), falta de sobreposição fenológica (OLESEN, *et al.*, 2011), perda de habitat, mudanças climáticas e invasões biológicas (BURKLE E ALARCÓN, 2011). No entanto, não se sabe se as espécies interagem com novos parceiros morfológicamente semelhantes aos anteriores, ou se a correspondência morfológica é não-essencial.

A ocorrência das interações depende tanto da sobreposição temporal, quanto espacial das espécies (BURKLE E ALARCÓN, 2011). As redes de interação mais distantes geograficamente tendem a apresentar maior dissimilaridade taxonômica (CARSTENSEN, *et al.*, 2014; NEKOLA E WHITE, 1999; TRØJELSGAARD *et al.*, 2015), pois as espécies tendem a ser substituídas no espaço. Essa substituição está associada a diversos fatores, como limitação na capacidade de dispersão das espécies (THOMPSON E GONZALEZ, 2017), competição local (WOLOWSKI, CARVALHEIRO E FREITAS, 2017) e diferenças ambientais entre os locais (BURKLE E ALARCÓN, 2011). Além disso, esta substituição pode ser por espécies funcionalmente semelhantes ou não. No entanto, estudos que analisaram mudanças em redes de interação ao longo do espaço indicam que as redes são robustas, que há muitas espécies funcionalmente equivalentes em grandes escalas (DUPONT, *et al.*, 2009), e que as funções ambientais tendem a ser preservadas entre os locais, mesmo com a perda de identidades taxonômica (HELSEN, *et al.*, 2012; VIZENTIN-

BUGONI, *et al.*, 2019). Ou seja, o *turnover* funcional tende a ser menor que o *turnover* taxonômico ao longo de gradientes de distância geográfica entre redes.

As mudanças na composição de espécies e nas características funcionais disponíveis nas comunidades de plantas e polinizadores ao longo do espaço podem causar mudanças nas interações entre as espécies (EMER, *et al.*, 2018). Além disso, mesmo espécies que coocorrem em diferentes locais podem interagir de maneiras diferentes ou mesmo não interagirem, devido à diferenças no contexto ecológico (POISOT, *et al.*, 2012; POISOT, *et al.*, 2017). A nível local, as comunidades em interação sofrem diversas restrições que podem moldar as interações, como por exemplo: riqueza (FRÜND, *et al.*, 2010), abundância (ABRAHAMCZYK E KESSLER, 2010; SIMMONS, *et al.*, 2019), morfologia (MARUYAMA, *et al.*, 2014; SONNE, *et al.*, 2020; VIZENTIN-BUGONI, *et al.*, 2014), *links* proibidos (JORDANO, BASCOMPTE E OLESEN, 2003; OLESEN, *et al.*, 2011) e composição funcional (MARUYAMA, *et al.*, 2018). As mudanças na natureza das interações podem ser classificadas de duas formas: a primeira é devido a mudança na composição de espécies (*turnover* taxonômico), ou seja, as espécies interagem com parceiros diferentes devido à substituição das espécies entre redes distintas (POISOT, *et al.*, 2012). A segunda forma é devido ao *rewiring* (religamento), onde ambas espécies ocorrem em locais/redes distintos, porém estas interagem com outras espécies e não mais entre si (POISOT, *et al.*, 2012; POISOT, *et al.*, 2017). Estudos sobre mudanças em interações mutualistas descobriram que o principal fator associado à mudança nas interações é o *turnover* taxonômico (*e.g.*, EMER, *et al.*, 2018; SIMANONOK E BERKLE, 2014; TRØSJELSGAARD, *et al.*, 2015). No entanto, estudos de beta diversidade de interações raramente consideram as características funcionais das espécies, salvo algumas exceções (*e.g.* EMER, *et al.*, 2018).

A relação entre *turnover* taxonômico e funcional (características funcionais das espécies) na interação entre parceiros não é amplamente conhecida. Vários estudos encontram alta correspondência de características entre plantas e beija-flores que interagem, e por isso, considera-se que estas características direcionam as interações entre parceiros (DALSGAARD, *et al.*, 2011; MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2014; SIMMONS, *et al.*, 2019). No entanto, processos distintos entre localidades podem levar à coocorrência dos pares em uma situação ecológica distinta (*e.g.*, abundâncias distintas de um dos parceiros; ABRAHAMCZYK E KESSLER, 2010; POISOT, *et al.*, 2017). Isso pode levar os parceiros de interação a interagirem com

outros parceiros possíveis disponíveis (WESER, *et al.*, 2018). A quebra de fidelidade entre parceiros de interação está associada ao aumento da distância geográfica (TRØSJELSGAARD, *et al.*, 2015). No entanto, ainda não se sabe a importância das características funcionais das espécies para determinar novas interações, ou seja, se os novos parceiros são funcionalmente semelhantes aos anteriores. Apesar de estarem em uma mesma localidade, polinizadores são forçados a interagirem com parceiros diferentes, devido à fenologia distinta entre espécies de plantas (OLESEN, *et al.*, 2011). É possível que isso se estenda também ao longo de gradientes ambientais. Devido a essa necessidade adaptativa, é possível que os beija-flores sejam capazes de interagir com uma gama maior de parceiros do que se assume. Esta questão é importante pois uma pequena amplitude de parceiros de interação está associada ao maior risco de extinção (BASCOMPTE E JORDANO, 2007). Dessa forma, em estudos de beta diversidade de interações é relevante medir a importância das características funcionais das espécies na mudança das interações, e não somente a identidade das espécies ou os fatores ambientais que geram estas mudanças.

As redes de interação planta-beija-flor são um bom modelo para compreender padrões de diversidade beta de interações. Primeiro, pela especialização dos beija-flores que ocorreu a partir da coevolução com as plantas que estes polinizam, e segundo, porque espécies que apresentam características funcionais com correspondência morfológica podem facilitar a interação, enquanto dificultam para espécies que não apresentam esta correspondência morfológica (DALSGAARD, *et al.* 2011; MAGLIANESI, *et al.*, 2014). Além disso, beija-flores apresentam ampla distribuição e são aves nectarívoras altamente especializadas (ZANATA, *et al.*, 2017). Como área de estudo, selecionamos a Mata Atlântica, por sua elevada riqueza de espécies de plantas e beija-flores (MYERS, *et al.*, 2000; SFAIR, *et al.*, 2016), diversidade de interações e por se estender ao longo de um amplo gradiente latitudinal (MORELLATO E HADDAD, 2000).

1.1 OBJETIVOS

Nosso objetivo principal é verificar como as espécies de plantas e beija-flores interagem ao longo da Mata Atlântica e como as características funcionais das espécies influenciam suas interações. Especificamente, investigamos (I) como a

mudança na distribuição das espécies ao longo da Mata Atlântica determina a mudança dos parceiros de interação de uma rede para outra, (II) se as espécies de beija-flores têm preferência por espécies de plantas ou pelas características funcionais das mesmas, i.e., se ao mudar o parceiro de interação eles mudam para outra espécie com características funcionais semelhantes ou não e (III) como as variáveis ambientais influenciam as interações entre plantas e beija-flores.

1.2 HIPÓTESES

Nós esperamos que: (I) a mudança na composição de espécies explique mais a mudança nas interações entre redes quando comparada ao *rewiring*, uma vez que a Mata Atlântica cobre uma ampla distribuição espacial e que existe uma forte mudança na composição de plantas e beija-flores na região (SFAIR, *et al.*, 2016; MYERS, *et al.*, 2000); (II) as espécies de beija-flores possuam preferência pelas características funcionais e não por espécies de plantas, i.e., ao mudar de parceiro de interação, o beija-flor interage com uma espécie com características semelhantes; e (III) locais distantes e com diferenças ambientais possuam interações distintas entre plantas e beija-flores.

2. METODOLOGIA

2.1. COLETA DE DADOS

Reunimos conjuntos de dados da literatura que incluíam redes de interação planta-beija-flor ao longo da Mata Atlântica. Utilizamos como ferramenta de pesquisa o Google Acadêmico com as palavras-chaves “beija-flor”, “rede de interação” e “Mata Atlântica”, isoladamente, bem como combinações destas palavras-chave. Também utilizamos os termos pesquisados em inglês, que são “hummingbird”, “network” e “Atlantic forest”. Excluimos artigos baseados em dados previamente publicados, e quando encontrávamos artigos que utilizavam mais de uma rede consideramos cada uma como uma rede independente (e.g. BUZATO, SAZIMA E SAZIMA, 2000; SONNE, *et al.*, 2020). Além disso, excluimos redes com amostragens focadas apenas em um pequeno grupo de espécies (e.g. família ou gênero).

No total, encontramos 17 artigos que se enquadravam em nossos critérios, os quais foram publicados entre 1986 e 2020, totalizando 22 redes de interação. Como algumas redes não apresentaram medidas de abundância de espécies ou esta medida não era padronizada, consideramos apenas a presença e a ausência das interações nas redes. Onze das 22 redes coletadas eram compostas apenas por interações legítimas, *i.e.* quando o beija-flor interage de forma que haja possibilidade de polinização. Nas outras 11 redes, os artigos não especificavam se as interações contabilizadas por eles eram ou não legítimas. Somente identificações a nível de gênero e espécie foram utilizadas, e demais identificações foram excluídas. As espécies que estavam identificadas com as observações “*aff.*” (*i.e.* espécie afim, próxima à espécie indicada) e “*cf.*” (*i.e.* provavelmente é a espécie indicada, mas necessita confirmação) foram assumidas como corretas. A classificação taxonômica foi atualizada segundo as bases Tropicos Missouri Botanical Garden (www.tropicos.org/) e, Kew Botanical Gardens (wcsp.science.kew.org/) para plantas, e IOC World Bird List (www.worldbirdnames.org) para beija-flores. Quando uma espécie não foi encontrada em nenhuma destas bases de dados, o nome atual foi revisado com auxílio de especialistas. Para três espécies de planta a identificação se manteve duvidosa, por isso, estas foram classificadas como “sp_” seguidas de um número e dos dados (e.g. sp_1, local e características funcionais dessa espécie). As

coordenadas geográficas de cada rede, o número total de espécies e sua referência estão resumidas na Tabela S1.

Para beija-flores, a especialização, competição e adaptação a variáveis ambientais pode influenciar as interações com as plantas (MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARTÍN-GONZÁLEZ, *et al.*, 2018), por isso selecionamos as seguintes características funcionais: (I) comprimento do bico, (II) curvatura do bico e (III) peso do beija-flor. Para as duas primeiras medidas utilizamos Zanata, *et al.* (2018) e para o peso utilizamos Grantsau (1988). A medida do comprimento do bico para "*Phaethornis idaliae*" (Bourcier e Mulsant, 1856) foi obtida em Grantsau (1988). Para a mesma espécie e "*Stephanoxis loddigesii*" (Gould, 1831), a curvatura do bico não estava disponível em nenhuma destas duas referências. Logo, essas foram assinaladas como 'NA' para esta característica. Quando dados de peso estavam disponíveis apenas para subespécies, nós utilizamos a média de todas as subespécies. Uma exceção foi para "*Stephanoxis lalandi*" (Vieillot, 1818) que possuía duas subespécies "*S. lalandi lalandi*" e "*S. lalandi loddigesii*" em Grantsau (1988). Posteriormente estas subespécies foram identificadas como duas espécies biológicas, e utilizamos os pesos das subespécies para as atuais espécies (CAVARZERE, *et al.*, 2014). Também utilizamos a média quando o peso estava disponível para macho e fêmeas.

Para plantas, algumas características funcionais têm mostrado relação com a especialização e interação com beija-flores, entre elas: (I) comprimento da corola, (II) tipo da corola, (III) forma de vida, (IV) volume do néctar e (V) concentração de açúcar no néctar (ABRAHAMCZK e KESSLER, 2014; CHMEL, *et al.*, 2021; MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2019; WESER, *et al.*, 2018). Todas as características funcionais das plantas foram consultadas na literatura de onde compilamos as redes. A fim de utilizar as características funcionais medidas nas próprias redes em que as interações ocorreram.

A distância geográfica (km) foi calculada através da distância entre as coordenadas geográficas das localidades que as redes foram amostradas. As variáveis ambientais, altitude (m), temperatura (°C) (máxima, mínima e média) e precipitação (mm), foram extraídas do Worldclim (worldclim.org) utilizando a função "getData" (pacote raster, HIJMANS, 2020).

2.2 ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados reunidos da literatura foram organizados em quatro matrizes principais. Duas matrizes para espécies e suas características funcionais, uma para plantas e outra para beija-flores, onde cada espécie foi representada como uma linha e cada característica funcional como uma coluna. Outras duas matrizes para espécies e as redes, onde cada espécie foi representada como uma linha e cada rede (ou local) como uma coluna. Deste ponto em diante, nós definimos como interação ou *link* o registro de um par de espécies interagindo, (*i.e.* interação entre uma planta e um beija-flor). Criamos também uma matriz com *links*, onde cada linha representa um *link* e as colunas são as características funcionais dos beija-flores e das plantas, sendo então, uma linha composta por um link seguida das características funcionais daquela espécie de beija-flor e das características funcionais daquela espécie de planta. O termo ‘comunidade’ se refere a comunidade de plantas e beija-flores de forma separada, enquanto que o termo ‘rede’ se refere às interações entre as espécies, *i.e.* cada rede tem uma comunidade de plantas e uma de beija-flores, enquanto que a rede corresponde ao conjunto das duas.

Uma vez que as espécies de plantas se repetiam nas diferentes redes amostradas, calculamos a média de cada característica funcional por espécie, ou no caso das variáveis categóricas (tipo da corola e forma de vida), utilizamos a característica funcional mais comumente observada. Para beija-flores, obtivemos da literatura a média de cada característica por espécie e todas as características funcionais foram numéricas. Para algumas espécies de plantas, não foi possível obter características funcionais. Para evitar a exclusão destas interações e permitir calcular a diversidade funcional a nível de comunidade, adicionamos uma característica com valores aleatórios a todas as espécies da comunidade. Esta característica fictícia possuiu valores com distribuição normal com média zero e desvio padrão de 0,1. Estes valores foram todos extremamente baixos comparados aos valores das demais variáveis, tendo pouco impacto nas medidas de dissimilaridade funcional entre as espécies e da diversidade funcional ao nível da comunidade, ao mesmo tempo que permitiu o cálculo funcional sem a exclusão de espécies.

2.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

2.3.1 Tratamento das características funcionais

Nós trabalhamos com análises em dois níveis: espécies e *links*. Para as análises utilizando características funcionais das espécies, nós sumarizamos as características das espécies de plantas e beija-flores utilizando análises de ordenação. Isto é, as múltiplas características funcionais das espécies foram reduzidas em eixos de ordenação que representam conjuntos de características correlacionadas. Utilizando as duas matrizes de espécies vs. característica (a nível de espécie), calculamos a dissimilaridade nas características funcionais entre cada par de espécies de plantas e entre cada par de espécies de beija-flores, gerando duas matrizes de dissimilaridade. Esta dissimilaridade foi calculada utilizando tanto características funcionais contínuas, quanto categóricas através do índice de dissimilaridade de Gower (PAVOINE, *et al.*, 2009), utilizando a função “*dist.ktab*” (pacote *ade4*; DRAY E DUFOUR, 2007). Estas matrizes de dissimilaridade foram então utilizadas para ordenar as espécies com base nas suas dissimilaridades utilizando uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA), com a função “*cmdscale*” (pacote *stats*; R Core Team 2021). Os dois primeiros eixos de PCoA para plantas e beija-flores foram então utilizados como representações das características funcionais nas análises ao nível de comunidade (descritas abaixo).

Assim como ao nível das espécies, sumarizamos as características funcionais dos *links* interagindo em eixos de ordenação. Para isto, utilizamos a matriz construída para os *links*. De maneira análoga ao que foi realizado ao nível de espécie, a dissimilaridade de Gower foi calculada para cada par de links e uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA) foi utilizada para sumarizar as características funcionais dos links em dois eixos de ordenação.

2.3.2 Mudança de composição taxonômica e funcional das comunidades de plantas e beija-flores ao nível de espécie

Para medir as dissimilaridades taxonômica e funcional entre as comunidades de plantas e beija-flores utilizamos a função “*beta.pair*” e uma modificação da função “*functional.beta.pair*” (pacote *betapart*; BASELGA, *et al.*, 2021; modificação para ampliar a eficiência computacional disponível em <https://raw.githubusercontent.com/csdambros/R-functions/master/FunctionalBetaPart.R>). A

dissimilaridade taxonômica entre pares de comunidades foi calculada utilizando o componente *turnover* do índice de Sorensen (similaridade de Simpson) que representa a mudança na composição de espécies entre as redes (BASELGA, 2010). A dissimilaridade funcional entre pares de comunidades foi calculada utilizando o componente *turnover* do índice de Sorensen, que representa a mudança na composição funcional entre as redes (VILLÉGER, NOVACK-GOTTSHAL E MOUILLOT, 2011). Estas análises foram realizadas separadamente para plantas e beija-flores.

Transformamos a distância geográfica entre as redes em uma matriz de distância, calculando a distância do *Great Circle* (WGS84 *ellipsoid*) entre pares de redes, através da função “spDists” (pacote sp; PEBESMA E BIVAND, 2005). Testamos a correlação entre a matriz de distância geográfica com as matrizes de distância taxonômica e funcional, utilizando correlações de Pearson através da função “MRM” (pacote ecodist; GOSLEE E URBAN, 2007). Caso as redes apresentassem baixa dissimilaridade taxonômica (alto compartilhamento de espécies), poderíamos ter o cenário A ou D (Fig.1). Nestes dois cenários não observaríamos correlação da dissimilaridade taxonômica com a distância geográfica. Caso as redes possuíssem alta dissimilaridade taxonômica, poderíamos ter o cenário B ou C (Fig.1). Se a dissimilaridade funcional entre as redes fosse correlacionada com a distância geográfica, isso indicaria que as características funcionais das comunidades mudam com a distância (Fig.1). Caso contrário, indicaria que as mesmas características funcionais das comunidades estão disponíveis/ presentes em todas as redes. Ou seja, a partir dessas análises, já seria possível excluir dois dos cenários descritos em nossas hipóteses (Fig.1), o que nos leva à próxima pergunta “Como essas interações mudam ao longo da Mata Atlântica?”.

2.3.3 Mudanças de interações ao nível da rede (beta de interação)

A fim de responder nossa primeira pergunta: “Como a mudança na distribuição das espécies ao longo da Mata Atlântica determina a mudança dos parceiros de interação através das redes?”, testamos a dinâmica das interações das redes medindo a dissimilaridade entre pares de redes. Nesta abordagem, utilizamos somente a identidade das espécies (abordagem taxonômica), mas não suas características funcionais. A dissimilaridade total ocorre quando duas redes não compartilham nenhuma interação e isso pode ser medido através de dois componentes, o *turnover*

de espécies e o *rewiring* (POISOT, *et al.*, 2012; POISOT, *et al.*, 2017). Também é possível que ambos os componentes expliquem a dissimilaridade entre as redes. Cada componente fornece um valor que varia entre 0 e 1 para cada comparação entre pares de rede, mesmo que a métrica compare espécies entre elas. O *turnover* de espécies corresponde à dissimilaridade entre as redes causada pela mudança na composição de espécies entre redes. Diferente do *turnover*, o *rewiring* ocorre quando a dissimilaridade entre as redes se deve à presença de interações únicas em uma das redes, apesar da coocorrência dos parceiros de interação em ambas as redes (POISOT, *et al.*, 2012). No *rewiring*, a métrica compara somente as espécies que ocorrem em ambas as redes e calcula se esses pares de espécies mantem a interação com o mesmo parceiro da outra rede, ou se mudam para outra espécie, mesmo havendo a possibilidade de interagir com a mesma (*e.g.* cenário D, Fig.1). Testamos a diversidade beta de interações, utilizando a função “betalinkr” (pacote bipartite; DORMANN, *et al.*, 2009). Ao longo da distância, se o *turnover* taxonômico for alto, é esperado que o *rewiring* seja baixo devido às mudanças das espécies entre os pares de rede o que dificulta que um mesmo par de espécies (planta-beija-flor) esteja presente em mais de uma rede. Se o *rewiring* for alto, pode indicar que as espécies em interação não são tão fieis a seus parceiros de interação, *i.e* mesmo que um mesmo par de espécies esteja presente em duas ou mais redes, estes podem interagir em uma rede e não na outra. O que nos leva a próxima pergunta “se as interações mudam entre redes, será que os beija-flores interagem com plantas com características funcionais semelhantes?”

2.3.4 Mudança de composição funcional das interações (*links*) e amplitude das características funcionais de parceiros

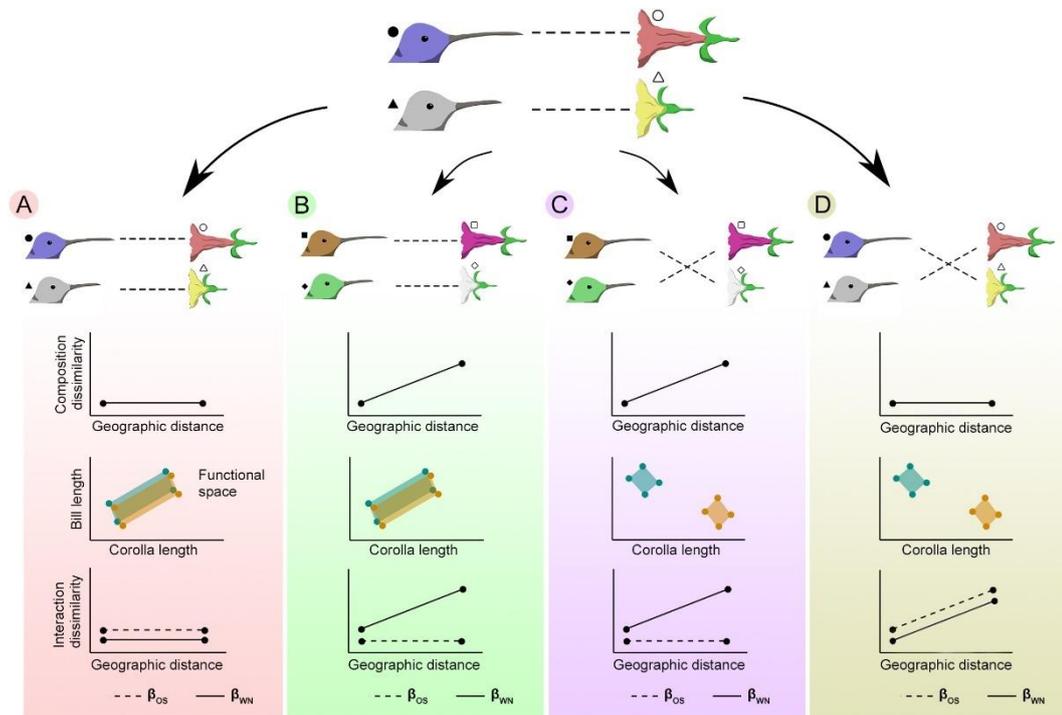
Embora tenhamos utilizado as métricas descritas acima para medir o *rewiring* das espécies entre redes, estas métricas utilizam somente a identidade das espécies e a mudança nas interações, mas não quantifica a influência das características funcionais dos parceiros nas interações. Ou seja, é possível que uma espécie de beija-flor interaja com espécies taxonomicamente distintas de plantas (*rewiring*), mas com características funcionais similares. Para responder nossa segunda pergunta “As espécies de beija-flores têm preferência pela espécie de planta ou pelas características funcionais das plantas, *i.e.*, se ao mudar o parceiro de interação os beija-flores mudam para outra espécie com características semelhantes ou não”,

construímos o espaço funcional dos *links*. Para isso, utilizamos os eixos da PCoA que representam valores da dissimilaridade das interações, onde o eixo x é a PC_1 dos beija-flores e eixo y é a PC_1 das plantas. O espaço funcional dos *links* permite a visualização das diferentes interações entre as espécies envolvidas nos *links* e suas características funcionais. Se os espaços funcionais das redes estiverem sobrepostos, isso indica que os *links* ocorrem entre características funcionais muito semelhantes ao longo das redes da Mata Atlântica (Fig.1 A ou B). Por outro lado, se os espaços funcionais das redes não se sobrepõem, isso indica que os *links* ocorrem entre características funcionais diferentes ao longo das redes da Mata Atlântica (Fig.1 C ou D). Para testar se a correspondência morfológica, testamos a correlação entre comprimento do bico dos beija-flores e comprimento da corola das plantas. Para isso, utilizamos a função ‘cor.test’ (pacote stats; R Core Team 2021). Assim, poderíamos verificar se a mudança nos *links* estaria ligada a um conjunto de características funcionais ou mais especificamente à correspondência morfológica do comprimento do bico com o comprimento da corola.

2.3.5 Variáveis ambientais

Para testar a influência de variáveis ambientais nas dissimilaridades taxonômica e funcional dos *links* entre redes, nós escolhemos variáveis que têm revelado efeitos sobre interações plantas-beija-flores (DALSGAARD, *et al.*, 2018; MARUYAMA, *et al.*, 2018; POISOT, *et al.*, 2017; SONNE, *et al.*, 2019). Primeiramente, para evitar a inclusão de variáveis ambientais correlacionadas, testamos a colinearidade entre altitude (m), temperatura (°C) (máxima, mínima e média) e precipitação (mm) (Tab. S2), utilizando a função “cor” (pacote stats; R Core Team 2021). Excluímos as variáveis que possuíam correlação maior que 0.4, mantendo apenas temperatura mínima e precipitação para as análises. As três temperaturas eram fortemente correlacionadas e escolhemos a temperatura mínima. Para testar a influência da distância geográfica, temperatura mínima e precipitação nas mudanças nos *links*, testamos a relação entre essas variáveis ambientais e as dissimilaridades taxonômica e funcional dos *links* entre redes. Transformamos todas as variáveis ambientais em matrizes de distância e calculamos a distância entre elas utilizando uma regressão linear através da função a função “MRM” (pacote ecodist; GOSLEE E URBAN, 2007). Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team 2021).

Figura 1 – Possíveis cenários para hipóteses deste estudo. Simplificamos ao máximo as possibilidades, afim de facilitar a compreensão, dessa forma as diferentes cores e símbolos representam mudanças taxonômicas, enquanto diferenças nas formas representam mudanças nas características funcionais (corola longa/ curta e bico longo/ curto). Com base na literatura, assumimos que as características funcionais estariam disponíveis em todas as redes, *i.e.*, se repetem nas duas comunidades de cada cenário (A, B, C e D). As linhas tracejadas representam os *links*/interação entre as espécies de planta e beija-flor. Abaixo, podemos visualizar a representação gráfica de cada cenário, para a dissimilaridade taxonômica, funcional e de interação (β_{WN} e β_{OS}). No cenário **A** não ocorre mudança taxonômica e as interações entre as espécies se mantêm, *i.e.*, as interações se mantêm com as mesmas espécies e características funcionais. Dessa forma, o gráfico taxonômico não tem correlação com a distância geográfica e o espaço funcional desse cenário apresenta forte sobreposição (polígono azul e laranja). Isso é esperado caso não ocorra *turnover* taxonômico nem *rewiring* (β_{OS}), *i.e.*, quando um mesmo par de parceiros de interação ocorre em mais de uma rede, eles interagem com o mesmo parceiro (fidelidade de parceiro), e a dissimilaridade total de interação (β_{WN}) também não apresenta correlação com a distância; no cenário **B** ocorre mudança taxonômica, porém as interações entre as características funcionais se mantêm, dessa forma, o gráfico taxonômico é fortemente correlacionado com a distância geográfica, enquanto o espaço funcional desse cenário apresenta forte sobreposição. Isso é esperado caso as características funcionais determinem as interações, independente das espécies. Dessa forma, como as espécies são completamente diferentes não há *rewiring* (β_{OS}), mas ainda há alta dissimilaridade de interações (β_{WN}); no **C** também há mudança taxonômica, porém aqui, as espécies mudam suas interações para outras espécies com características funcionais completamente distintas. Essa mudança pode ser causada pela mudança taxonômica, ou porque as características funcionais das espécies não determinam suas interações. Dessa forma, o gráfico taxonômico é fortemente correlacionado com a distância geográfica e os espaços funcionais desse cenário não se sobrepõem. Aqui apesar da alta dissimilaridade de interações (β_{WN}), também não há *rewiring* (β_{OS}); por outro lado, no **D**, apesar de não ter mudança taxonômica, as interações se alteram (β_{WN}), ocorrendo *rewiring* (β_{OS}), onde não há fidelidade de parceiros de interação e possivelmente as características funcionais não têm influência sobre as interações.

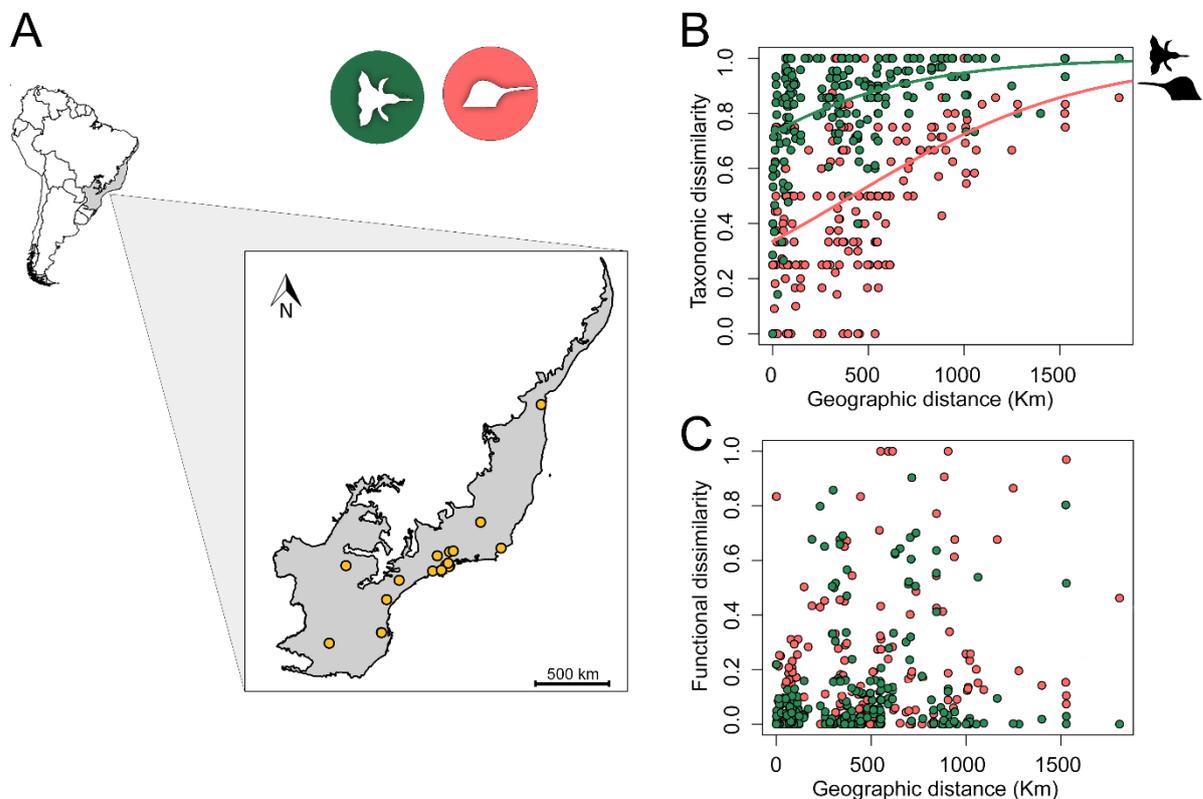


3. RESULTADOS

3.1 MUDANÇA DE COMPOSIÇÃO TAXONÔMICA E FUNCIONAL DAS COMUNIDADES DE PLANTAS E BEIJA-FLORES AO NÍVEL DE ESPÉCIE

As 22 redes de interação compiladas apresentam 278 espécies de plantas, 31 espécies de beija-flores e 1213 interações, distribuídas entre 13°07'12.0"S, 41°34'48.0"W e 27°53'25"S, 52°13'39"W (Fig.2, A). A dissimilaridade taxonômica das comunidades de plantas aumenta em função da distância geográfica mais fortemente do que a dissimilaridade de beija-flores (plantas $r^2=0.17$, $p<0.01$; beija-flores $r^2=0.23$, $p<0.01$). Comunidades separadas por mais de 1500 km de distância não compartilham nenhuma espécie de planta, mas mantém o compartilhamento de algumas espécies de beija-flores (Fig.2, B). Entretanto, nós não identificamos mudanças significativas da diversidade beta funcional das comunidades ao longo do gradiente de distância (plantas $r^2=0.02$, $p= 0.29$; beija-flores $r^2=0.06$, $p=0.07$), *i.e.*, as características funcionais estão distribuídas entre as comunidades de forma mais homogênea do que a identidade das espécies, de maneira que as características funcionais das redes se mantêm ao longo da Mata Atlântica apesar da mudança taxonômica (Fig.2, C).

Figura 2 – Distribuição das redes de interação e da diversidade beta taxonômica e funcional das comunidades ao longo da Mata Atlântica. Em (A) mapa da Mata Atlântica com a distribuição das redes de interação (pontos em amarelo); em (B) dissimilaridade taxonômica entre comunidades de plantas e beija-flores ao longo da distância geográfica (plantas $r^2=0.17$ e beija-flores $r^2=0.23$, ambos com $p<0.01$); e em (C) dissimilaridade funcional entre comunidades de plantas e beija-flores ao longo da distância geográfica (plantas $r^2=0.02$, $p=0.29$ e beija-flores $r^2=0.06$, $p=0.07$).

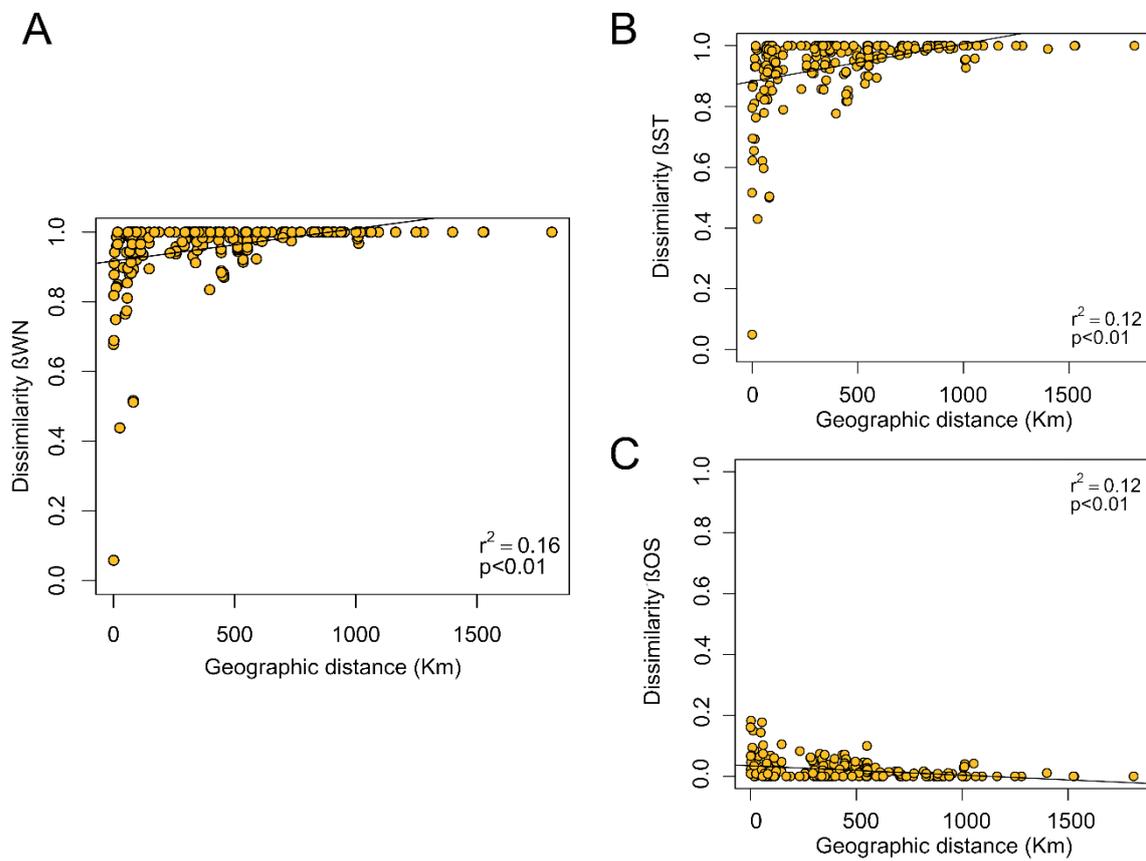


3.2 MUDANÇAS DE INTERAÇÕES AO NÍVEL DA REDE (BETA DE INTERAÇÃO)

A dissimilaridade total entre interações aumenta com a distância geográfica, de forma que duas redes separadas por distâncias maiores que 700 km praticamente não possuem nenhuma interação em comum ($r^2 = 0.16$, $p<0.01$) (Fig. 3, A). Estas mudanças podem ser causadas pelo *turnover* taxonômico de plantas e/ou beija-flores, como observado acima, ou por *rewiring* (mudança nas preferências taxonômicas; β_{os}). Verificamos que de 80-100% da mudança nas redes pode ser explicada pelo *turnover* taxonômico (β_{ST}), que é positivamente relacionado com a distância

geográfica ($r^2 = 0.12$, $p < 0.01$) (Fig. 3, B). Todavia, a dissimilaridade entre duas redes explicada por *rewiring* não ultrapassa 20% e é correlacionada negativamente com a distância geográfica ($r^2 = 0.12$, $p < 0.01$) (Fig.3, C).

Figura 3 – Diversidade beta de interações, em (A) dissimilaridade total entre pares de redes ao longo da distância geográfica - β_{WN} ; em (B) componente que explica quanto da dissimilaridade total é explicada apenas pelo *turnover* taxonômico - β_{ST} ; e em (C) componente que explica o quanto da dissimilaridade total é explicada apenas por *rewiring* - β_{OS} .



3.3 MUDANÇA DE COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DAS INTERAÇÕES (*LINKS*) E AMPLITUDE DAS CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DE PARCEIROS

Quando analisamos as mudanças nas interações sob uma perspectiva funcional, observamos que cada rede possui uma diversidade funcional semelhante e que quase todas as combinações de características funcionais de plantas e beija-flores ocorrem em todas as redes (Fig. 4 e 5). Conseqüentemente, as interações entre as características funcionais de plantas e beija-flores não possui padrão geográfico claro (Fig. S1). Além disso, a correlação entre o comprimento do bico dos beija-flores e o comprimento da corola das plantas com as quais interagem é fraca ($r=0.17$; $p>0.05$) (Fig. 6).

Figura 4 – Espaço funcional representando as características funcionais das interações (características das plantas e beija-flores juntas), cada ponto representa um *link* (interação planta e beija-flor). Em (A) distribuição dos *links* no espaço funcional; em (B) o espaço funcional ocupado pelos *links* de espécies em cada uma das 22 redes é representado por um polígono, quanto mais forte o tom de azul, mais redes estão sobrepostas.

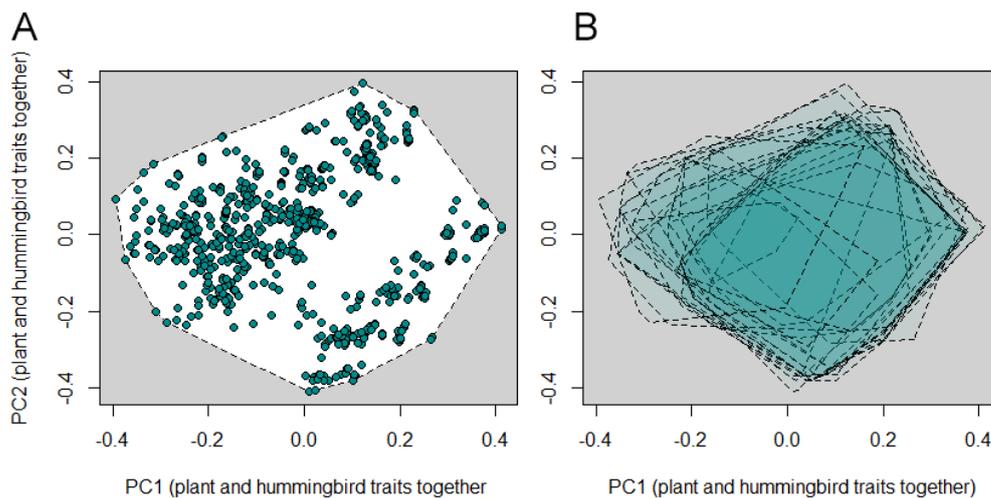


Figura 5 – Representação dos *links* entre as espécies de plantas e beija-flores (ponto), *i.e.*, espaço funcional dos *links* com o eixo x contendo PC1 dos beija-flores e o eixo y contendo a PC1 das plantas. O PC1 dos beija-flores representa principalmente a curvatura e comprimento do bico ($r=0.97$), enquanto que PC1 das plantas representa principalmente o volume de néctar ($r=0.36$). As elipses azuis englobam 95% dos pontos de cada rede, em vermelho e amarelo estão representadas as diferentes interações das plantas com características funcionais nas extremidades opostas, em cinza e rosa as diferentes interações dos beija-flores com características funcionais bem distintas. Observe que a espécie de beija-flor em cinza interage com as espécies de plantas nos dois extremos do espaço funcional, em vermelho e amarelo. Pontos com duas cores representam a interação das espécies representadas pelas cores. Exemplos das espécies representadas: vermelho = *Quesnelia humilis* Mez, amarelo = *Albizia pedicellaris* (DC.) L. Rico, cinza = *Clytolaema rubricauda* (Boddaert, 1783) e rosa = *Phaethornis eurynome* (Lesson, R. 1832).

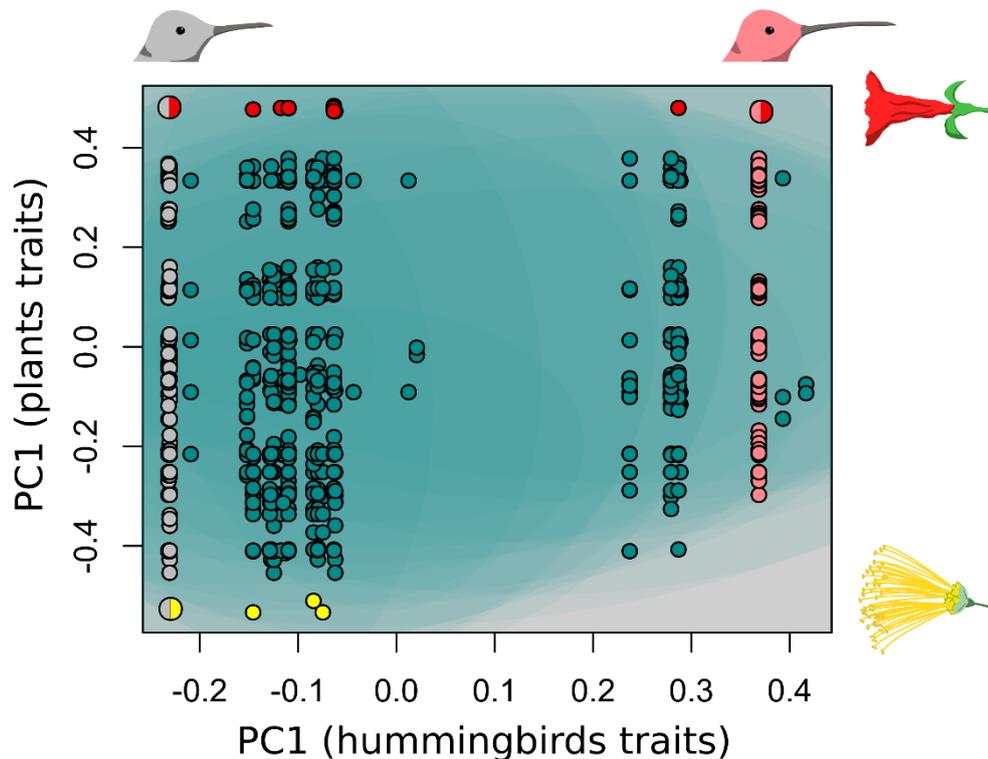
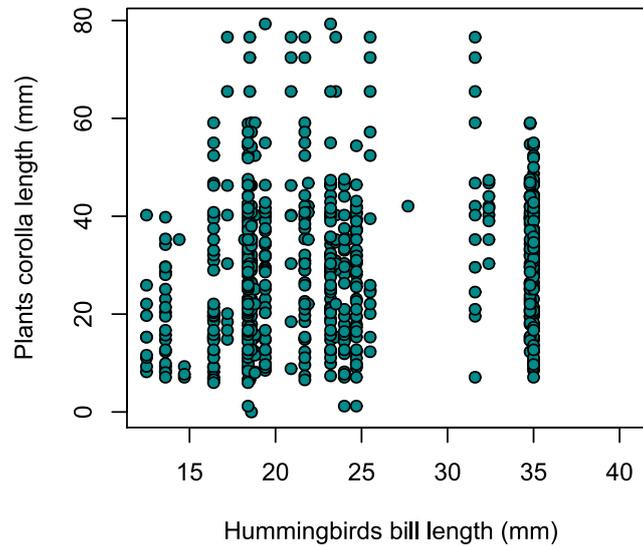


Figura 6 – Correlação entre comprimento da corola das plantas e o comprimento do bico dos beija-flores, *links* representados em azul ($r=0.17$; $p<0.01$).



3.4 VARIÁVEIS AMBIENTAIS

A distância geográfica, a temperatura mínima e a precipitação explicam 31% das mudanças taxonômicas das interações entre redes ($p<0.05$; Tab. 1). Por outro lado, as mudanças funcionais entre redes só tiveram relação significativa com a distância geográfica ($p<0.05$), que explicou 28% da variação na dissimilaridade funcional dos *links* (Tab. 1).

Tabela 1 – Análise de regressão múltipla de matrizes (MRM) para as variáveis ambientais: distância geográfica (km), temperatura mínima (°C) e precipitação média (mm) como variáveis preditoras da diversidade beta taxonômica e funcional dos *links* entre pares de redes. As três variáveis ambientais juntas explicaram 31% da diversidade beta taxonômica dos links ($r^2= 0.31$; $p<0.01$) e 28% da diversidade beta funcional dos links ($r^2= 0.28$; $p<0.01$).

Variáveis	Diversidade Beta	p-valor	r²
Distância geográfica	Taxonômica dos <i>links</i>	0.001*	0.13
Temperatura mínima		0.001*	0.16
Precipitação média		0.001*	0.09
Distância geográfica	Funcional dos <i>links</i>	0.001*	0.28
Temperatura mínima		0.38	0.0007
Precipitação média		0.50	0.00003

4. DISCUSSÃO

Nós investigamos como a diversidade beta taxonômica, funcional e de interações das comunidades de plantas e beija-flores mudam ao longo da Mata Atlântica. Nós descobrimos que ao longo da Mata Atlântica há grande mudança na composição de espécies, principalmente de plantas (Fig. 2). A mudança na composição de espécies entre as comunidades faz com que poucas interações sejam compartilhadas entre as diferentes redes quando analisamos a dissimilaridade de interações. Isto é, há grande mudança nas interações entre redes distantes geograficamente, mas a grande mudança na identidade das espécies oferece poucas oportunidades de *rewiring*, já que poucos pares de espécies parceiras coocorrem em mais do que uma rede (Fig. 3). Uma vez que as mudanças de composição de plantas e beija-flores estão associadas com a distância e com o clima, a mudança nas interações também ocorre ao longo destes gradientes (Tabela 1). Diferente do esperado (MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2014; TRØSJEELSGAARD, *et al.*, 2015), verificamos que os beija-flores são capazes de interagir com plantas que apresentam uma ampla variedade de características funcionais (Fig. 4; Fig. 5). Por exemplo, beija-flores com o bico longo (e.g. com comprimento do bico de 35mm) interagem tanto com plantas com corola curta quanto longa (Fig. 5). Desta forma, não parece haver uma grande preferência dos beija-flores por plantas com certas características funcionais ou uma forte mudança nestas preferências ao longo da Mata Atlântica.

A nível de comunidade, detectamos uma dissimilaridade taxonômica maior para as plantas do que para os beija-flores (Fig. 2, B). Um padrão semelhante foi identificado para redes planta-polinizador (CARSTENSEN, *et al.*, 2014) e inseto-planta (NOVOTNY, *et al.*, 2009). Possivelmente, esse padrão está associado à mobilidade e capacidade de dispersão dos polinizadores (THOMPSON E GONZALEZ, 2017). A maior riqueza taxonômica de plantas (278 espécies) em comparação ao beija-flores (31 espécies) também pode favorecer este padrão (SFAIR, *et al.*, 2016). Ainda, os polinizadores necessitam interagir com várias plantas para suprir a necessidade constante de recurso (néctar; BRICE, 1992), enquanto que, as plantas podem interagir com um número menor de polinizadores, pois necessitam deles apenas no período de floração (ABREU E VIEIRA, 2004; BUZATO, *et al.*, 2000; OLESEN, *et al.*, 2008).

Porém, quando verificamos a relação entre dissimilaridade funcional e distância geográfica, esta não foi significativa, o que indica que apesar do *turnover* taxonômico ao longo da Mata Atlântica, as comunidades das redes são funcionalmente similares, ou seja, as espécies possuem características funcionais semelhantes (Fig. 2, C). Corroborando que as funções ambientais tendem a ser preservadas entre os locais, mesmo com a mudança na identidade das espécies (HELSEN, *et al.*, 2012; VIZENTIN-BUGONI, *et al.*, 2019).

Nós identificamos um aumento da dissimilaridade de interações com a distância geográfica (Fig. 3, A). Ao analisar esta dissimilaridade, notamos que muitas interações se modificam simplesmente devido ao *turnover* taxonômico entre as comunidades e não estão associadas às mudanças de parceiros de interação entre as espécies - *rewiring* (Fig. 3, B). Quando um conjunto de espécies apresenta uma distribuição mais ampla que seus parceiros de interação, as espécies precisam interagir com outros parceiros, como espécies de plantas distintas e/ou com características funcionais possivelmente distintas (BURKLE E ALARCÓN, 2011; PETANIDOU, *et al.*, 2008; TRØSJEELSGAARD, *et al.*, 2015; WESER, *et al.*, 2018). Esse *rewiring* pode ser particularmente forte em escalas geográficas pequenas (VIZENTIN-BUGONI, *et al.*, 2019). Embora os beija-flores tenham uma distribuição um pouco mais ampla que as plantas e ocorra maior proporção de *rewiring* em escalas geográficas relativamente pequenas (Fig. 3, C), nas amplas escalas geográficas investigadas aqui, houve uma grande mudança taxonômica tanto das plantas quanto dos beija-flores. Consequentemente, na maior parte da Mata Atlântica, espécies distintas de plantas foram observadas interagindo com espécies distintas de beija-flores, sem que houvesse *rewiring*.

Mesmo quando não ocorre *rewiring*, ainda seria possível que as espécies que tiveram que mudar de parceiros de interação, mudassem para espécies com características funcionais similares (HELSEN, *et al.*, 2012; VIZENTIN-BUGONI, *et al.*, 2019). Este pressuposto é assumido por modelos de estimativas de coextinções em redes mutualísticas, os quais incorporam a possibilidade de *rewiring* baseada no acoplamento de características funcionais, assumindo que a probabilidade de *rewiring* depende do grau de acoplamento de características funcionais (e.g. bicos e corolas) (VIZENTIN-BUGONI, *et al.*, 2019). No entanto, nossos resultados não corroboram essa hipótese. Quando verificamos a amplitude de características funcionais dos pares em interação que são formados, observamos que a maioria das espécies

interagem com uma variedade muito maior de características funcionais do que o esperado (Fig. 5). Por exemplo, verificamos que beija-flores pequenos e com bicos retos e curtos, como *Clytolaema rubricauda* (Boddaert, 1783) conseguem interagir com uma variedade de parceiros com características funcionais muito distintas. Porém, mesmo beija-flores que apresentam características funcionais tidas como de especialistas (DALSGAARD, *et al.*, 2009; MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2014), como o *Phaethornis eurynome* (Lesson, R. 1832) que apresenta tamanho grande, bico longo e curvo, também conseguem interagir com flores que possuem características funcionais distintas. Mesmo quando testamos a correlação entre o comprimento do bico e o comprimento da corola, que tradicionalmente é visto como um dos principais direcionadores para a ocorrência das interações planta-beija-flor (DALSGAARD, *et al.*, 2011; MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2014; SIMMONS, *et al.*, 2019), não encontramos um padrão claro de interação (Fig. 6). Desta forma, características próprias de cada local podem ser o principal direcionador para a ocorrência de interações entre os pares (FRÜND, *et al.*, 2010; DALSGAARD, *et al.*, 2018; POISOT, *et al.*, 2017), em vez das características funcionais das espécies.

Nossas redes estão distribuídas ao longo da Mata Atlântica, abrangendo áreas bem heterogêneas, tanto em condições físicas (variação de altitude e latitude) como também de urbanização. Além disso, muitas de nossas redes estão localizadas na região sudeste da Mata Atlântica. Juntas, essas variações podem contribuir para que nossos resultados em ampla escala não apresentem um padrão claro quanto as interações entre as características funcionais, pois diversas características bióticas e abióticas operam de diferentes maneiras em diferentes escalas (DALSGAARD, *et al.*, 2018; SIMMONS, *et al.*, 2019; SONNE, *et al.*, 2019; SONNE, *et al.*, 2020). Além disso, nossos dados possuem algumas limitações, mas buscamos minimizá-las. Por exemplo, é possível que algumas das interações presentes sejam de beija-flores interagindo com plantas que eles não polinizam (interações ilegítimas). Entretanto, metade das redes coletadas (n=11) registraram apenas interações legítimas, sendo pouco provável que o padrão seja completamente resultante disto. Ao menos para estas características funcionais, não existe forte correspondência morfológica.

Quando avaliamos a relação da diversidade beta taxonômica dos *links* com a distância geográfica e variáveis climáticas, verificamos que as variáveis ambientais explicaram 31% da variação. A distância geográfica explicou 13%, a temperatura mínima 16% e a precipitação 9% nas mudanças taxonômicas dos *links* (Tab.1). A

distância geográfica, como demonstrado neste estudo, está relacionada principalmente à substituição das espécies ao longo do gradiente, tendo influência direta na mudança taxonômica das espécies que compõem o *link*. Além disso, a temperatura e precipitação também podem ser responsáveis pelas mudanças nas interações através da mudança na amplitude de características com as quais as espécies interagem (POISOT, *et al.*, 2017; SONNE, *et al.*, 2019; MARUYAMA, *et al.*, 2018), ou seja, as espécies agem como generalistas ou especialistas dependendo do gradiente ambiental.

Por outro lado, a diversidade beta funcional dos *links* não foi influenciada pelas variáveis climáticas, sendo correlacionada apenas com a distância geográfica, em 28% (Tab. 1). No entanto, verificamos que esta correlação entre a diversidade beta funcional dos *links* e a distância geográfica se dá em função das variáveis categóricas “tipo da corola” e/ou “forma de vida” (estas características podem estar variando ao longo do gradiente). Análises complementares para explorar esta mudança não dão suporte para as características funcionais, tanto das plantas como dos beija-flores, como direcionadoras das interações (Fig. S1). Nós encontramos evidências de que a diversidade beta funcional dos *links* se mantém constante ao longo da Mata Atlântica, pois apesar de uma pequena mudança, ela não foi significativa.

Nossos resultados revelam que características funcionais similares, de plantas e beija-flores, estão presentes nas redes de interação ao longo da Mata Atlântica, apesar da mudança na identidade das espécies. Ainda, o elevado *turnover* de espécies é o principal responsável pela dissimilaridade entre redes, sendo mais relevante que o *rewiring* na mudança das interações. Surpreendentemente, nossas análises em ampla escala revelam que as interações planta-beija-flor ocorrem com uma amplitude de características funcionais maior do que relatado anteriormente (*e.g.*, MAGLIANESI, *et al.*, 2014; MARUYAMA, *et al.*, 2014; TRØSJELSGAARD, *et al.*, 2015), tanto por parte de plantas quanto de beija-flores. Isso sugere que as espécies são mais flexíveis do que se supunha em relação as características funcionais de espécies com as quais estabelecem interações. Estes resultados indicam que as redes de interação planta-beija-flor são versáteis, e que a correspondência morfológica não é essencial para várias interações.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMCZYK, S.; KESSLER, M. **Hummingbird diversity, food niche characters, and assemblage composition along a latitudinal precipitation gradient in the Bolivian lowlands**. *Journal of Ornithology*, v. 151, p. 615–625, 2010. DOI: 10.1007/s10336-010-0496-x
- ABRAHAMCZYK, S.; KESSLER, M. **Morphological and behavioural adaptations to feed on nectar: how feeding ecology determines the diversity and composition of hummingbird assemblages**. *Journal of Ornithology*, 2014. DOI: 10.1007/s10336-014-1146-5
- ABREU, C. R. M.; VIEIRA, M. F. **Os beija-flores e seus recursos florais em um fragmento florestal de Viçosa, sudeste brasileiro**. *Lundiana*, v. 5, n. 2, p. 129-134, 2004.
- ARDITTI, J.; *et al.* **'Good Heavens what insect can suck it' – Charles Darwin, *Angraecum sesquipedale* and *Xanthopan morgani praedicta***. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v.169, p. 403-432, 2012.
- BASCOMPTE, J.; JORDANO, P. (2007). **Plant-Animal Mutualistic Networks: The Architecture of Biodiversity**. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 38, p. 567–93, 2007. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818
- BASELGA, A. **Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity**. *Global Ecology and Biogeography*, v. 19, p. 134–143, 2010. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x
- BASELGA, A.; *et al.* **betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components**. R package version 1.5.3. 2021. < <https://CRAN.R-project.org/package=betapart> >
- BRICE, A. T. 1992. **The essentiality of nectar and arthropods in the diet of the Anna's Hummingbird (*Calypte anna*)**. *Comparative Biochemistry and Physiology A: Physiology*, v. 101, p. 151–155. DOI: 10.1016 / 0300-9629 (92) 90643-5
- BURKLE, L. A.; ALARCÓN, R. **The Future of Plant–Pollinator Diversity: Understanding Interaction Networks Across Time, Space, and Global Change**. *American Journal of Botany*, v. 98, n. 3, p. 528-538, 2011.
- BUZATO, S.; SAZIMA, M.; SAZIMA, I. **Hummingbird-Pollinated Floras at Three Atlantic Forest Sites**. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 824-841, 2000.
- CARSTENSEN, D.W.; *et al.* **Beta Diversity of Plant-Pollinator Networks and the Spatial Turnover of Pairwise Interactions**. *PLoS ONE*, v. 9, n. 11, e112903, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0112903

- CAVARZERE, V.; *et al.* **Taxonomy and biogeography of *Stephanoxis* Simon, 1897 (Aves: Trochilidae)**. *Papéis Avulsos de Zoologia*, v. 54, p. 69-79, 2014.
- CHMEL, K.; *et al.* **Bird pollination syndrome is the plant's adaptation to ornithophily, but nectarivorous birds are not so selective**. *Oikos*, v. 00, p. 1-14, 2021. DOI: 10.1111/oik.08052
- DALSGAARD B.; *et al.* **Trait evolution, resource specialization and vulnerability to plant extinctions among Antillean hummingbirds**. *Proceedings of the Royal Society B*, v. 285, 20172754, 2018. DOI: 10.1098/rspb.2017.2754
- DALSGAARD, B.; *et al.* **Specialization in plant-hummingbird networks is associated with species richness, contemporary precipitation and Quaternary climate-change velocity**. *PLoS ONE*, v. 6, n. 10, e25891, 2011. DOI: 10.1371/journal.pone.0025891
- DARWIN, C. **On the Various Contrivances by which British and Foreign Orchids are Fertilised by Insects and the Good Effects of Inter-crossing**. John Murray, London, 1862.
- DRAY, S.; DUFOUR, A. **The ade4 Package: Implementing the Duality Diagram for Ecologists**. *Journal of Statistical Software*, v. 22, n. 4, p. 1-20, 2007. DOI: 10.18637/jss.v022.i04
- DORMANN, C.F.; *et al.* **Indices, graphs and null models: analyzing bipartite ecological networks**. *The Open Ecology Journal*, v. 2, p. 7-24, 2009.
- DUPONT, Y. L.; *et al.* **Spatio-temporal variation in the structure of pollination networks**. *Oikos*, v.118, p. 1261-1269, 2009. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2009.17594.x,
- EMER, C.; *et al.* **Seed-dispersal interactions in fragmented landscapes – a metanetwork approach**. *Ecology Letters*, 2018. DOI: 10.1111/ele.12909
- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. **WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas**. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.
- FRÜND, J.; LINSENMAIR, K. E.; BLÜTHGEN, N. **Pollinator diversity and specialization in relation to flower diversity**. *Oikos*, v. 119, p. 1581–1590, 2010.
- GILL, F.; DONSKER, D.; RASMUSSEN, P. (Eds). **IOC World Bird List (v10.1)**, 2020. DOI: 10.14344/IOC.ML.10.1.
- GOSLEE, S. C.; URBAN, D. L. **The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data**. *Journal of Statistical Software*, v. 22, n. 7, p. 1-19, 2007.

- GRANTSAU, R. **Os beija-flores do Brasil: uma chave de identificação para todas as formas de beija-flores do Brasil**. Rio de Janeiro: Expressão e Cultura, 1988.
- HELSEN, K.; HERMY, M.; HONNAY, O. **Trait but not species convergence during plant community assembly in restored semi-natural grasslands**. *Oikos*, 2012.
- HIJMANS, R. J. **Raster: Geographic Data Analysis and Modeling**. R package version 3.0-12, 2020. < <https://CRAN.R-project.org/package=raster> >
- JORDANO, P.; BASCOMPTE, J.; OLESEN, J. M. **Invariant properties in coevolutionary networks of plant-animal interactions**. *Ecology Letters*, v. 6, p. 69–81, 2003. DOI: 10.1046 / j.1461-0248.2003.00403.x
- MARTÍN-GONZÁLEZ, A. M.; *et al.* **Meta-networks for the study of biogeographical traits in ecological networks: the Mexican hummingbird-plant assemblage**. *The Science of Nature*, v. 105, n. 54, p. 1-11, 2018. DOI: 10.1007/s00114-018-1578-5
- MAGLIANESI, M. A.; *et al.* **Morphological traits determine specialization and resource use in plant–hummingbird networks in the neotropics**. *Ecology*, v. 95, n.12, p. 3325–3334, 2014. DOI: 10.1890/13-2261.1
- MARUYAMA, P. K.; *et al.* **Plant-hummingbird interaction networks in urban areas: Generalization and the importance of trees with specialized flowers as a nectar resource for pollinator conservation**. *Biological Conservation*, v. 230, p. 187–194, 2019. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.12.012
- MARUYAMA, P. K.; *et al.* **Functional diversity mediates macroecological variation in plant–hummingbird interaction networks**. *Global Ecology and Biogeography*, p. 1-14, 2018. DOI: 10.1111/geb.12776
- MARUYAMA, P. K.; *et al.* **Morphological and Spatio-Temporal Mismatches Shape a Neotropical Savanna Plant-Hummingbird Network**. *BIOTROPICA*, v. 46, n. 6, p. 740–747, 2014. DOI: 10.1111/btp.12170
- MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. **Introduction: The Brazilian Atlantic Forest**. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 786-792, 2000.
- MYERS, N.; *et al.* **Biodiversity hotspots for conservation priorities**. *Nature*, v. 403, n. 24, 2000.
- NEKOLA J. C.; WHITE P. S. **The distance decay of similarity in biogeography and ecology**. *Journal Biogeography*, v. 26, p. 867–878, 1999. DOI: 10.1046/j.1365-2699.1999.00305.x
- NOVOTNY, V.; *et al.* **Beta diversity of plant–insect food webs in tropical forests: a conceptual framework**. *Insect Conservation and Diversity*, v. 2, p. 5–9, 2009. DOI: 10.1111/j.1752-4598.2008.00035.x

- OLESEN, J. M.; *et al.* **Missing and forbidden links in mutualistic networks.** Proceedings of the Royal Society B, v. 278, p. 725–732, 2011. DOI: 10.1098/rspb.2010.1371
- OLESEN, J. M.; *et al.* **Temporal dynamics in a pollination network.** Ecology, v. 89, n. 6, p. 1573–1582, 2008. DOI: 10.1890/07-0451.1
- PAVOINE, S.; *et al.* **On the challenge of treating various types of variables: Application for improving the measurement of functional diversity.** Oikos, v. 118, p. 391–402, 2009.
- PEBESMA, E. J.; BIVAND, R. S. 2005. **Classes and methods for spatial data in R.** R News, v. 5, n. 2, < <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/> >
- PETANIDOU, T.; *et al.* **Long-term observation of a pollination network: fluctuation in species and interactions, relative invariance of network structure and implications for estimates of specialization.** Ecology Letters, v. 11, n. 6, p. 564–575, 2008. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01170.x
- POISOT, T.; *et al.* **The dissimilarity of species interaction networks.** Ecology Letters, 2012. DOI: 10.1111/ele.12002
- POISOT, T.; *et al.* **Hosts, parasites, and their interactions respond to climatic variables.** bioRxiv preprint, 2017. DOI: 10.1101/079780.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL < <https://www.R-project.org/> >.
- SFAIR, J.C.; *et al.* **Taxonomic and functional divergence of tree assemblages in a fragmented tropical forest.** Ecological Applications, v. 26, p. 1816–1826, 2016.
- SIMANONOK, M. P.; L. A. BURKLE. **Partitioning interaction turnover among alpine pollination networks: spatial, temporal, and environmental patterns.** Ecosphere, v. 5, n. 11, p. 149, 2014. DOI: 10.1890/ES14-00323.1
- SIMMONS, B. I.; *et al.* **Abundance drives broad patterns of generalisation in plant–hummingbird pollination networks.** Oikos, v. 00, p. 1–9, 2019. DOI: 10.1111/oik.06104
- SONNE, J.; *et al.* **Ecological mechanisms explaining interactions within plant–hummingbird networks: morphological matching increases towards lower latitudes.** Proceedings of the Royal Society B, v. 287, 2020. DOI: 10.1098/rspb.2019.2873
- SONNE, J.; *et al.* **The distributions of morphologically specialized hummingbirds coincide with floral trait matching across an Andean elevational gradient.** Biotropica, p. 1–14, 2019. DOI: 10.1111/btp.12637

- THOMPSON, P. L.; GONZALEZ, A. **Dispersal governs the reorganization of ecological networks under environmental change.** *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, n. 0162, 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0162
- TINOCO, B. A.; *et al.* **Effects of hummingbird morphology on specialization in pollination networks vary with resource availability.** *Oikos*, v. 126, p. 52–60, 2017. DOI: 10.1111/oik.02998
- TRØJELSGAARD, K.; *et al.* **Geographical variation in mutualistic networks: similarity, turnover and partner fidelity.** *Proceedings of the Royal Society B*, v. 282, 20142925, 2015. DOI: 10.1098/rspb.2014.2925
- TROPICOS.ORG. **Missouri Botanical Garden.** Acessado em out. de 2020. <<https://tropicos.org>>
- VILLÉGER, S.; NOVACK-GOTTSHAL P.; MOUILLOT, D. **The multidimensionality of the niche reveals functional diversity changes in benthic marine biotas across geological time.** *Ecology Letters*, v. 14, p. 561-568, 2011 DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01618.x
- VIZENTIN-BUGONI, J.; MARUYAMA, P. K.; SAZIMA, M. **Processes entangling interactions in communities: forbidden links are more important than abundance in a hummingbird–plant network.** *Proceedings of the Royal Society B*, v. 281, 20132397, 2014. DOI: 10.1098/rspb.2013.2397
- VIZENTIN-BUGONI, J.; *et al.* **Structure, spatial dynamics, and stability of novel seed dispersal mutualistic networks in Hawai'i.** *Science*, v. 364, p. 78-82, 2019. DOI: 10.1126/science.aau8751
- WASER, N. M.; CARADONNA, P. J.; PRICE, M. V. **Atypical Flowers Can Be as Profitable as Typical Hummingbird Flowers.** *The American Naturalist*, v. 192, n. 5, 2018. DOI: 10.5061/dryad.cd4h7f1.
- WCSP. **World Checklist of Selected Plant Families.** Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew, 2020. Disponível em: < <http://wcsp.science.kew.org/Retrieved> >.
- WOLOWSKI, M.; CARVALHEIRO, L. G.; FREITAS, F. **Influence of plant–pollinator interactions on the assembly of plant and hummingbird communities.** *Journal of Ecology* 2017, v. 105, p. 332-344, 2017. DOI: 10.1111/1365-2745.12684
- ZANATA, T. B.; *et al.* **Bill measurements of hummingbirds in the network database.** Figshare, 2018. Dataset. < <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.6151196.v2> >.
- ZANATA, T. B.; *et al.* **Global patterns of interaction specialization in bird–flower networks.** *Journal of Biogeography*, v. 44, p. 1891–1910, 2017. DOI: 10.1111/jbi.13045

MATERIAL SUPLEMENTAR

Informações gerais:

Plantas

Identificação: Quando uma espécie não foi encontrada nas bases de dados Tropicos Missouri Botanical Garden (www.tropicos.org/) e Kew Botanical Gardens (wcsp.science.kew.org/), o nome atual foi obtido com auxílio de especialistas. Algumas espécies que o especialista não conseguiu identificar como: “*Canistrum_terminalis*” foi tratada como “sp_1”, “*Hohenbergia_sp*” foi tratada como “sp_2” e “*Inga_walleriana*” como “sp_3”.

Características funcionais das espécies: Para “**Life form**” nós criamos categorias e realocamos todas as classificações dos artigos dentro destas categorias: “shrub” representa (shrub, treelet, shrub saxicola, shrub rupicolous), “tree” representa (tree), “epiphyte” representa (epiphyte, fac. epiphyte, herb epiphyte, hemi-parasite, land, *epiphyte), “herb” representa (herb land, herb), “climber” representa (climber, vine, climbing). Sempre que em dúvida, bromélias foram enquadradas na categoria “epiphyte”. No caso das bananeiras *Musa sp.* identificadas nos artigos como “*tree”, classificamos *Musa balbisiana* como “tree” e *Musa ornata* como “shrub”. Para as espécies classificadas como “treelet” todas foram classificadas como “shrub”, exceto *Erythrina speciosa* que foi classificada como “tree”. Para “*Marcgravia_myriostigma*” que estava classificada como “Shrub/epiphytic” foi classificada como “climber” e porque outra espécie do gênero nos nossos dados era classificada dessa forma.

Como para algumas espécies a mesma estava presente nos nossos dados (em outra rede) com uma classificação que se enquadrava nas categorias que criamos, nós mantemos a classificação que se enquadrava: “*Nematanthus_crassifolius*” que estava classificada como “Shrub/epiphytic” foi classificada como “shrub”; “*Nematanthus_fornix*” que estava classificada como “Shrub/epiphytic” foi classificada como “epiphyte”; “*Salvia_sellowiana*” que estava classificada como “Shrub/epiphytic” foi classificada como “shrub”. Para as espécies “*Nematanthus_lanceolatus*” que estava classificada como “Shrub/epiphytic” e

“*Sinningia_cooper*” da rede 14 que era classificada como “Shrub/epiphytic”, nós classificamos respectivamente como “shrub” e “herb”, segundo Blaser, et al. (2012).

Para “**Corolla type**”, no caso da espécie “*Costus_spiralis*” que era classificada como “gullet/tubular” nós classificamos como “tubular” porque a mesma espécie nos nossos dados era classificada dessa forma em outra rede. Para as espécies “*Dombeya_wallichii*” que era classificada como “open”, “*Geranium_sp*” que era classificada como “umbrella”, “*Passiflora_alliacea*” que era classificada como “open” e “*Cinnamomum_verum*” que era classificada como “panícula”, nós classificamos como “rotate”. Para as espécies “*Calliandra_tweedii*” que era classificada como “umbrella” e “*Callistemon_viminalis*” que era classificada como “espiga”, nós classificamos como “dish”. Para a espécie “*Grevillea_banksii*” que era classificada como “umbrella”, nós classificamos como “tubular”. Para as espécies “*Erythrina_falcata*”, “*Buddleja_sp*” e “*Dracaena_arborea*”, que eram classificadas como “Racemo”, nós classificamos como “tubular”.

Para a média do comprimento da corola de “*Vriesea_jonghei*” que era apresentado “50-60”, nós utilizamos a média destes valores “55”.

Tabela S1 – Informações resumidas sobre cada rede de interação.

NETWORK NUMBER	Latitude	LONGITUDE	PLANT RICHNESS	HUMMINGBIRD RICHNESS	SOURCE
1	-13.81	-39.2	16	13	Coelho, 2013
2	-23.28	-45.05	55	9	Sonne, <i>et al.</i> , 2020 (rede 19)
3	-23.32	-44.94	28	11	Sonne, <i>et al.</i> , 2020 (rede 20)
4	-23.35	-44.83	22	13	Sonne, <i>et al.</i> , 2020 (rede 21)
5	-23.36	-44.85	16	5	Sonne, <i>et al.</i> , 2020 (rede 22)
6	-24.18	-47.93	34	12	Sonne, <i>et al.</i> , 2020 (rede 23)
7	-25.32	-48.70	24	10	Malucelli, 2014
8	-27.26	-49.02	7	4	Kohler, 2011
9	-27.26	-49.02	10	4	Kohler, 2011

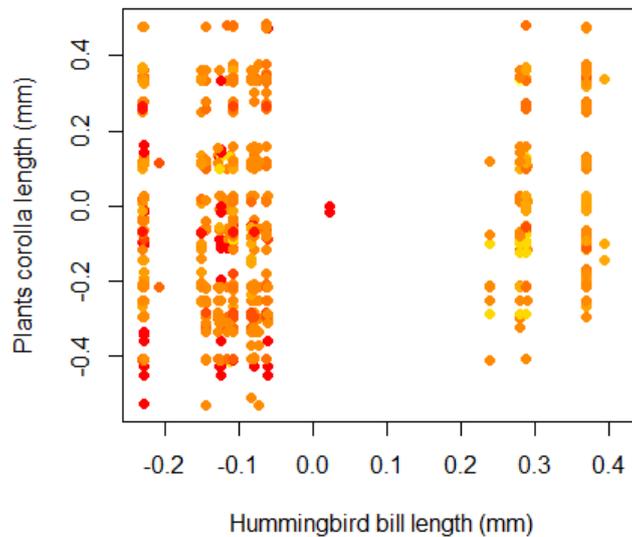
(continuação tabela S1)

10	-27.27	-49.01	18	6	Kohler, 2011
11	-22.27	-41.66	10	3	Fonseca, <i>et al.</i> , 2015
12	-23.37	-44.87	50	12	Araujo, 1996
13	-22.73	-45.58	23	4	Sazima, <i>et. al.</i> , 1996
14	-22.50	-44.83	32	5	Canela, 2006
15	-20.75	-42.92	14	8	Abreu e Vieira, 2004
16	-22.45	-44.60	21	4	Wolowski, <i>et. al.</i> 2013
17	-23.63	-45.86	25	6	Snow e Snow, 1986
18	-23.58	-45.33	43	12	Buzato, <i>et. al.</i> , 2000
19	-22.73	-45.58	25	4	Buzato, <i>et. al.</i> , 2000
20	-23.16	-44.91	31	8	Buzato, <i>et. al.</i> , 2000
21	-23.31	-51.20	22	10	Marcon, 2016
22	-27.89	-52.22	31	7	Mendonça, e Anjos, 2005

Tabela S2 – Correlação entre as variáveis ambientais. GeoDist = distância geográfica (km), Alt = altitude (m); MinTem = temperatura mínima (°C); MaxTem = temperatura máxima (°C); MeaTem = temperatura média (°C) e MeaPre = precipitação média (mm). Em negrito as correlações que apresentaram correlação maior ou igual a 0.4.

	GeoDist	Alt	MinTem	MaxTem	MeaTem	MeaPre
GeoDist	1	-0.137	0.219	-0.191	0.0278	-0.016
Alt	-0.137	1	0.808	0.860	0.849	0.075
MinTem	0.219	0.808	1	0.697	0.889	0.155
MaxTem	-0.191	0.860	0.697	1	0.885	0.007
MeaTem	0.028	0.849	0.889	0.885	1	0.124
MeaPre	-0.016	0.075	0.155	0.007	0.124	1

Figura S1 – Correlação entre o comprimento da corola das plantas (mm) e o comprimento do bico dos beija-flores (mm). Cada ponto representa um link/interação e as cores representam a latitude destas interações, quanto mais vermelho mais ao sul da Mata Atlântica (*i.e.*, maior é a latitude). Apesar da relação das interações com a latitude ser significativa, a explicação dessa relação é baixa 3% ($r^2=0.03$; $p<0.01$).



REFERÊNCIAS

- ABREU, C. R. M.; VIEIRA, M. F. **Os beija-flores e seus recursos florais em um fragmento florestal de Viçosa, sudeste brasileiro.** *Lundiana*, v. 5, p. 129-134, 2004.
- ARAUJO, A. C. **Beija-flores e seus recursos florais numa área de planície costeira do litoral norte de São Paulo, sudeste do Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1996.
- BUZATO, S.; SAZIMA, M.; SAZIMA, I. **Hummingbird-Pollinated Floras at Three Atlantic Forest Sites.** *Biotropica*, v. 32, n. 4b, p. 824-841, 2000.
- BLASER, J. G.; SALIMENA, F. R. G.; CHAUTEMS, A. **Gesneriaceae na Serra Negra, Minas Gerais, Brasil.** *Rodriguésia*, v. 63, n. 3, p. 705-714, 2012. DOI: 10.1590/S2175-78602012000300015

- CANELA, M. B. F. **Interações entre plantas e beija-flores numa comunidade de floresta atlântica montana em Itatiaia, RJ.** Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2006.
- COELHO, A. G. **A comunidade de plantas utilizada por beija-flores no sub-bosque de um fragmento de Mata Atlântica da Bahia, Brasil.** Tese de doutorado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil, 2013.
- FONSECA, L. C. N.; *et al.* **Plant-hummingbird interactions and temporal nectar availability in a restinga from Brazil.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 87, n. 4, p. 2163-2175, 2015.
- KOHLER, G. **Redes de interação planta-beija-flor em um gradiente altitudinal de Floresta Atlântica no Sul do Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2011.
- MALUCELLI, T. S. **Fatores envolvidos na estruturação das redes de polinização beija-flor-plantas em um gradiente sucessional.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2014.
- MARCON, A. P. **Interações dos beija-flores e seus recursos florais em um ambiente antropizado no sul do Brasil.** Atualidades Ornitológicas, v. 193, p. 18-24, 2016.
- MENDONÇA, L. B.; ANJOS, L. **Beija-flores (Aves, Trochilidae) e seus recursos florais em uma área urbana do Sul do Brasil.** Revista Brasileira de Zoologia, v. 22, n. 1, p. 51–59, 2005.
- SAZIMA, I.; BUZATO, S.; SAZIMA, M. **An assemblage of hummingbird-pollinated flowers in a montane forest in southeastern Brazil.** Botanica Acta, v. 109, p. 149–160, 1996.
- SONNE, J.; *et al.* **Ecological mechanisms explaining interactions within plant-hummingbird networks: morphological matching increases towards lower latitudes.** Proceedings of the Royal Society B, v. 287, 2020. DOI: 10.1098/rspb.2019.2873
- SNOW, D. W.; SNOW, B. K. **Feeding ecology of hummingbirds in the Serra do Mar, southeastern Brasil.** Hornero, v. 012, n. 04, p. 286-296, 1986.
- TROPICOS.ORG. **Missouri Botanical Garden.** Acessado em out. de 2020. <<https://tropicos.org>>
- WCSP. **World Checklist of Selected Plant Families.** Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew, 2020. Disponível em: < <http://wcsp.science.kew.org/Retrieved> >.
- WOLOWSKI M.; ASHMAN, T.; FREITAS, L. **Community-wide assessment of pollen limitation in hummingbird-pollinated plants of a tropical montane rain forest.** Annals of Botany, v. 112, p. 903–910; 2013.