

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

SARAH MENDONÇA RIGOTTO

**SUCESSO REPRODUTIVO DE *FERNSEEA ITATIAIAE* NO CONTEXTO
COMUNITÁRIO DAS INTERAÇÕES PLANTA-POLINIZADOR**

ALFENAS/MG

2024

SARAH MENDONÇA RIGOTTO

**SUCESSO REPRODUTIVO DE *FERNSEEA ITATIAIAE* NO CONTEXTO
COMUNITÁRIO DAS INTERAÇÕES PLANTA-POLINIZADOR**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientadora: Prof. Dr^a. Marina Wolowski Torres

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Joaquim Bergamo

ALFENAS/MG

2024

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Rigotto, Sarah Mendonça .

Sucesso reprodutivo de *Fernseea itatiaiae* no contexto comunitário das interações planta-polinizador / Sarah Mendonça Rigotto. - Alfenas, MG, 2024.

46 f. : il. -

Orientador(a): Marina Wolowski Torres.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Campos de altitude. 2. Conservação. 3. Mata Atlântica. 4. Polinização.
I. Torres, Marina Wolowski, orient. II. Título.

SARAH MENDONÇA RIGOTTO

“ Sucesso reprodutivo de *Fernseea itatiaiae* no contexto comunitário das interações planta-polinizador ”

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 23 de fevereiro de 2024.

Profa. Dra. Marina Wolowski Torres

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Profa. Dra. Érica Hasui

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Dra. Alessandra Ribeiro Pinto

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)



Documento assinado eletronicamente por **Marina Wolowski Torres, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2024, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1184736** e o código CRC **07963096**.

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o amor e conhecimento que me transmitiram.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), agradeço à bolsa concedida.

À Universidade Federal de Alfenas pelo apoio e pela oportunidade de realizar esta pesquisa. Aos professores que cruzaram meu caminho durante a graduação e o mestrado, fundamentais para o meu desenvolvimento. Um agradecimento especial aos motoristas que nos levaram ao Parque Nacional do Itatiaia e compartilharam um pouco dos perrengues do campo.

Ao Parque Parque Nacional do Itatiaia e ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela concessão da licença de pesquisa e pelo uso do abrigo de pesquisa Casa de Pedra. Especialmente aos funcionários do parque, pela ajuda durante nossas estadias no alojamento.

À minha orientadora, Profa. Dra. Marina Wolowski Torres, por me guiar durante todos esses anos, foi fundamental para a concepção deste trabalho. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Pedro Joaquim Bergamo, agradeço por toda a ajuda na parte teórica e principalmente em campo, foi essencial para meu crescimento.

Aos meus pais, Ana e Flávio, e ao meu irmão Pedro, por todo o amor, carinho e dedicação, além de todas as oportunidades que puderam me proporcionar, e por sempre me incentivarem e apoiarem em todas as decisões durante toda a minha trajetória. Vocês são minha base, força e motivação sempre.

À minha companheira de vida e namorada, Daniëlle, por toda a paciência, cuidado e suporte nos momentos difíceis durante essa trajetória, e por celebrar comigo todas as conquistas até aqui.

Ao amigo que a graduação me deu, Ricardo, agradeço toda a parceria em campo, por compartilhar comigo todos os perrengues e os momentos felizes ao longo dos meses. Aos meus colegas do Laboratório de Botânica e aos amigos pessoais, agradeço por todo o companheirismo durante o processo.

Por fim, agradeço a todos que cruzaram meu caminho até aqui, que me ajudaram, direta ou indiretamente, para que essa etapa pudesse ser concluída.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Animais polinizadores são de grande importância para a reprodução de diversas plantas, visto que contribuem para produção de sementes e permitem o cruzamento entre indivíduos, levando à variabilidade genética. Em comunidades, os polinizadores compartilhados conectam as espécies de plantas, podendo influenciar umas às outras por meio de efeitos indiretos, como facilitação ou competição por visitas de animais como os beija-flores. Neste contexto, uma importante fonte de recursos para beija-flores são espécies de Bromeliaceae. *Fernseea itatiaiae* é uma bromélia ornitófila que possui distribuição restrita aos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia (sudeste do Brasil), avaliada como em perigo de extinção (EN). Buscamos entender o papel das redes de interação planta-beija-flor para a manutenção da comunidade de ornitófilas dos campos de altitude e, conseqüentemente, a conservação de *Fernseea itatiaiae*. Para isso, mensuramos a fenologia de floração das espécies ornitófilas ao longo de três trilhas do Parque Nacional do Itatiaia. Em seguida, avaliamos a sobreposição do uso dos beija-flores entre as espécies por meio da rede planta-polinizador, e avaliamos a importância das espécies da rede por meio de métricas ao nível de espécie (*d'*, *species strength*, *closeness* e *weighted closeness*). Para avaliar o sistema reprodutivo e o sucesso da polinização em *F. itatiaiae* realizamos tratamentos controlados de polinização e a germinação das sementes geradas. Os resultados de rede mostraram que as espécies que apresentaram interações mais fortes com os beija-flores compartilhados na comunidade foram *Fuchsia regia*, *F. itatiaiae* e *Buddleja speciosissima*. Ao avaliar a conexão das espécies de plantas na rede os valores obtidos não são suficientes para determinar o quanto estão próximas e quais nós possuem papel central e influente. Entretanto, ao associar a dependência de polinizadores para a reprodução de *F. itatiaiae* com o resultado de rede, vemos sua importância na comunidade e seu papel como mediadora de processos de compartilhamento de polinizadores. Além disso, os experimentos mostraram que a presença de vizinhos ornitófilos e outras flores ornitófilas na comunidade não influencia tanto na presença de *F. itatiaiae* na comunidade, e que seu sucesso reprodutivo depende diretamente da presença de beija-flores. Nossos resultados destacam a importância de *F. itatiaiae* na comunidade de ornitófilas nos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia. Além de contribuir para a manutenção de espécies vegetais no ambiente, também contribui para a permanência de espécies de beija-flores responsáveis pela polinização de outras espécies ornitófilas.

Palavras-chave: campos de altitude; conservação; Mata Atlântica; polinização.

ABSTRACT

Animal pollinators are of great importance for plant reproduction, as they contribute to seed production and promote outcrossing between individuals, leading to genetic variability. In communities, shared pollinators connect plant species, potentially influencing each other through indirect effects, such as facilitation or competition for visits from animals like hummingbirds. In this context, an important resource for hummingbirds is the Bromeliaceae family. *Fernseea itatiaiae* is an ornithophilous bromeliad with a restricted distribution to the high-altitude fields of Itatiaia National Park (southeast Brazil), assessed as endangered (EN). We investigated the role of plant-hummingbird interaction networks in maintaining the ornithophilous community of high-altitude fields and, consequently, the conservation of *Fernseea itatiaiae*. To achieve this, we measured the flowering phenology of ornithophilous species along three trails in the Itatiaia National Park. Subsequently, we assessed the overlap in hummingbird use among species in the plant-pollinator network and evaluated the importance of species in the network using species-level metrics (d', species strength, closeness, and weighted closeness). To assess the reproductive system and pollination success in *F. itatiaiae*, we conducted controlled pollination treatments and germination tests of the seeds generated. Network results showed that species with stronger interactions with shared hummingbirds in the community were *Fuchsia regia*, *F. itatiaiae*, and *Buddleja speciosissima*. When evaluating the species metrics in the network, the obtained values are not sufficient to determine how close they are and which nodes play a central and influential role. However, by associating *F. itatiaiae*'s dependence on pollinators for reproduction with network outcomes, we see its importance in the community and its role as a mediator of pollinator-sharing processes. Additionally, experiments showed that the presence of ornithophilous neighbors and other ornithophilous flowers in the community does not significantly influence *F. itatiaiae*'s pollination, and its reproductive success depends directly on the presence of hummingbirds. Our results highlight the importance of *F. itatiaiae* in the ornithophilous community in the high-altitude fields of Itatiaia National Park. In addition to contributing to the maintenance of plant species in the environment, it also contributes to the persistence of hummingbird species responsible for pollinating other ornithophilous species.

Keywords: high-altitude grasslands; conservation; Atlantic Forest; pollination.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Indivíduos de *Fernseea itatiaiae* em fase reprodutiva na trilha dos Cinco Lagos do Parque Nacional do Itatiaia: (A) Inflorescência com flores e botões florais; (B) Indivíduo com frutos em desenvolvimento; (C) Indivíduo inteiro, com roseta de folhas e inflorescência ao centro 22
- Figura 2 - Placas de petri contendo duas folhas de papel filtro umedecidas com água destilada, com sementes de *Fernseea itatiaiae* organizadas para serem colocadas em estufa BOD para avaliar a germinação 23
- Figura 3 - (A) Lâmina de estigma de *Fernseea itatiaiae* contendo pólen (10x); (B) Pólen de *Fernseea itatiaiae* (40x) 24
- Figura 4 - Espécies ornitófilas encontradas ao longo das três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia. (A) *Agarista hispidula*; (B) *Alstroemeria foliosa*; (C) *Alstroemeria isabelleana*; (D) *Barbacenia gounelleana*; (E) *Buddleja speciosissima*; (F) *Esterhazyia eitenorum*; (G) *Fernseea itatiaiae*; (H) *Fuchsia campos-portoi*; (I) *Fuchsia regia*; (J) *Gaultheria serrata*; (K) *Hippeastrum morelianum*; (L) *Lepechinia speciosa*; (M) *Rhabdocalon coccineum*; (N) *Salvia itatiaiensis*; (O) *Siphocampylus westinianus* 26
- Figura 5 - Fenologia de floração de 15 espécies ornitófilas que ocorrem na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, entre os meses de setembro de 2022 a fevereiro de 2023. A linha fina representa o período total de cada florada e a linha grossa, o pico de floração (meses em que foram registrados maiores números de flores da espécie) 27
- Figura 6 - Rede de interação entre as 11 espécies ornitófilas que receberam visitas e as quatro espécies de beija-flores observadas 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de espécies ornitófilas encontradas ao longo das três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia (trilha do Morro do Couto, trilha dos Cinco Lagos, trilha para o Abrigo Rebouças)	25
Tabela 2 - Análise da sobreposição de floração, por meio do índice de Müller, de 14 espécies ornitófilas com a espécie focal <i>Fernseea itatiaiae</i> , observadas nas três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, no período de setembro de 2022 a fevereiro de 2023	27
Tabela 3 - Matriz de efeito da sobreposição dos polinizadores em cada uma das 11 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flor por meio do índice de Müller. As siglas foram definidas pelas duas primeiras letras do gênero e do epíteto específico. A escala de cores varia dos maiores valores (cinza escuro) para os menores (cinza claro) na sobreposição com <i>Fernseea itatiaiae</i>	29
Tabela 4 - Métricas de centralidade avaliadas em cada uma das 11 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flores	30
Tabela 5 - Matriz de efeito da sobreposição dos polinizadores em cada uma das 10 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flor por meio do índice de Müller, simulando a retirada de <i>Fernseea itatiaiae</i> na rede. As siglas foram definidas pelas duas primeiras letras do gênero e do epíteto específico	31
Tabela 6 - Métricas de centralidade avaliadas para cada uma das 10 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flores, simulando a retirada de <i>Fernseea itatiaiae</i> na rede ...	32
Tabela 7 - Número total de sementes, taxa de frutificação (%), nº de frutos, nº de flores, nº total de sementes, média de sementes por fruto e desvio padrão gerados nos três tratamentos realizados de autopolinização espontânea (AE), polinização natural (N) e suplementação de pólen (S) em indivíduos de <i>Fernseea itatiaiae</i> , na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, nos meses de dezembro de 2022 e janeiro de 2023	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	Sucesso reprodutivo de <i>Fernseea itatiaiae</i> no contexto comunitário das interações planta-polinizador	15
1	Introdução	16
2	Materiais e métodos	19
2.1	<i>Sistema de estudo e Fenologia de floração</i>	19
2.2	<i>Rede de interação planta-beija-flor</i>	20
2.3	<i>Sistema reprodutivo de <i>Fernseea itatiaiae</i></i>	22
2.4	<i>Sucesso da polinização em <i>Fernseea itatiaiae</i></i>	24
3	Resultados	25
3.1	<i>Fenologia de floração</i>	25
3.2	<i>Rede de interação planta-beija-flor</i>	29
3.3	<i>Sistema reprodutivo de <i>Fernseea itatiaiae</i></i>	33
3.4	<i>Sucesso da polinização em <i>Fernseea itatiaiae</i></i>	34
4	Discussão	34
5	Conclusão	38
6	Agradecimentos	39
7	Referências Bibliográficas	39
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44
	APÊNDICE A - MATERIAL SUPLEMENTAR	46

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os polinizadores contribuem para a produção de sementes em aproximadamente 90% das espécies de plantas com flores, sendo que metade das espécies dependem deles para a maior ou toda produção de sementes (Rodger *et al.* 2021; Tong *et al.* 2023). No entanto, muitas espécies que têm animais como polinizadores possuem sistema de reprodução misto, ou seja, podem se autopolinizar sem a assistência desses animais (Whitehead *et al.* 2018). Embora a autofecundação seja comum, estudos mostram que a quantidade de sementes produzidas dessa maneira é geralmente menor em relação à produção por meio de visitação de polinizadores (Rodger *et al.* 2021). No nível de espécie, plantas com esse tipo de sistema ainda necessitam da polinização por animais, visto que, a longo prazo, a autofecundação levaria ao fim do cruzamento entre indivíduos da mesma espécie (Ollerton *et al.* 2011).

Em sistemas mutualísticos, coadaptações morfológicas podem resultar em plantas com formas de corola floral que coincidem com o aparelho alimentar de seus polinizadores mais eficazes (Sonne *et al.* 2019). Além disso, para que essas interações aconteçam, as plantas apresentam atributos florais que são importantes para seus polinizadores, como recursos, e atributos de atração, como coloração e odores específicos (Gegear *et al.* 2017). Espécies de plantas ornitófilas possuem atributos florais que auxiliam na atração e na polinização por aves polinizadoras, como os beija-flores (Faegri e van der Pijl 1979). Dentre esses atributos temos antese diurna, cores vibrantes, ausência de odor, presença de néctar, além de flores tubulares que permitem o acesso do bico dos beija-flores (Faegri & van der Pijl 1979; Sonne *et al.* 2019). Assim, além de garantir a reprodução das plantas na comunidade, as interações planta-polinizador também garantem recompensas para esses animais, como o néctar (Ollerton *et al.* 2011).

As interações planta-polinizador influenciam a coexistência de plantas, podendo determinar a composição de espécies vegetais de uma comunidade (Sargent e Ackerly 2008). Em uma comunidade, as espécies de plantas estão conectadas por polinizadores compartilhados em redes complexas de interações ecológicas, podendo influenciar umas às outras por meio de efeitos indiretos (Bergamo *et al.* 2017). Tais efeitos podem incluir competição por visitas de polinizadores ou facilitação (Sargent e Ackerly 2008). Em sistemas tropicais, a visita de beija-flores muitas vezes é limitada pelas características morfológicas das plantas e por correspondência espaço-temporal, o que resulta em maior especialização nesses ambientes (Maruyama *et al.* 2014; Bergamo *et al.* 2017). Com isso, a semelhança fenotípica possui maior importância para o potencial de efeitos indiretos em sistemas especializados,

uma vez que as características florais restringem as interações entre plantas e polinizadores (Bergamo *et al.* 2017). Características como morfologia floral, produção de néctar, hábito da planta e fenologia determinam a escolha de habitat, recursos e comportamento de forrageamento dos beija-flores em uma comunidade (Wolowski *et al.* 2013). Dessa forma, semelhança fenotípica entre as plantas pode determinar os padrões de visitação dos beija-flores. Ou seja, aqueles que possuem bico curto acessam legitimamente flores com corolas curtas, deixando as que possuem corolas longas para aqueles de bico longo, que, embora também possam acessar as flores curtas, evitando a competição (Bergamo *et al.* 2017).

Os membros da família Bromeliaceae representam uma fonte significativa de recursos para beija-flores, visto que é a principal família onde a polinização por vertebrados predomina sobre a polinização por insetos (Sazima *et al.* 1996). A presença constante de bromeliáceas ornitófilas ao longo do ano permite a permanência dos beija-flores polinizadores em uma comunidade, podendo ajudar a maximizar o sucesso reprodutivo das espécies (Wolowski *et al.* 2017; Bergamo *et al.* 2022). Portanto, indivíduos dessa família desempenham papel crucial na manutenção da fauna de beija-flores, beneficiando não apenas as aves, mas também as próprias bromélias e outras espécies ornitófilas (Buzato *et al.* 2000). Além disso, a maior disponibilidade de flores ornitófilas, incluindo as bromélias, como recurso para polinizadores ocorre na estação chuvosa, período em que ocorre a reprodução da maioria das espécies de beija-flores, o que mostra a interdependência entre estes organismos (Sick 1984).

A bromélia *Fernseea itatiaiae* (Wawra) Baker possui distribuição restrita aos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia, e é listada como espécie em perigo de extinção (CNCFlora 2012). Seus indivíduos apresentam estrutura floral intimamente relacionada à polinização por beija-flores, como inflorescências vistosas, brácteas róseas e flores tubulares que se posicionam de forma exposta no interior da roseta (Smith & Downs 1979). Além disso, a disposição de seus órgãos reprodutivos favorece o contato com o bico do polinizador, e seu período de floração ocorre na estação chuvosa, entre os meses de setembro a janeiro (Zambon 2020).

A partir dessas informações, buscamos, por meio deste trabalho, estudar a rede de interações ecológicas entre plantas e beija-flores relacionando com a conservação de uma espécie ameaçada de extinção. Para isso, avaliamos uma comunidade de plantas ornitófilas nos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia, onde há elevado número de espécies endêmicas e ameaçadas, como *F. itatiaiae* (Aximoff *et al.* 2016; Moreira *et al.* 2020). Assim, tendo *F. itatiaiae* como espécie focal, buscamos entender o ciclo fenológico das espécies

locais e quais desempenham papéis-chave na rede de interação planta-beija-flor. Buscamos entender quais espécies são responsáveis pela permanência dos beija-flores no local, levando à manutenção da comunidade de plantas ornitófilas dos campos de altitude e, conseqüentemente, à permanência e conservação de *F. itatiaiae*.

SUCESSO REPRODUTIVO DE *FERNSEEA ITATIAIAE* NO CONTEXTO COMUNITÁRIO DAS INTERAÇÕES PLANTA-POLINIZADOR

Sarah Mendonça Rigotto^{1*}, Pedro Joaquim Bergamo², Ricardo Alves Siqueira Junior¹, Marina Wolowski Torres¹

¹ Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, Minas Gerais, Brasil

² Instituto de Pesquisas Jardim Botânico, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

*sarah.mrigotto@gmail.com

Formatado de acordo com Journal of Mountain Science

Resumo

A análise de redes de interação ajuda a identificar as espécies de plantas e animais importantes para a manutenção da comunidade. Assim, o contexto de comunidade revelado pelas redes de interação pode informar estratégias de conservação de espécies ameaçadas. A bromélia ornitófila *Fernseea itatiaiae* (Wawra) Baker possui distribuição restrita ao Planalto do Itatiaia (sudeste do Brasil) e, está avaliada como em perigo de extinção (EN). *Fernseea itatiaiae* e mais 14 espécies de plantas apresentam morfologia floral relacionada a polinização por beija-flores (ornitofilia), o que favorece a permanência de beija-flores nessa área. Aqui, mensuramos a fenologia de floração das espécies ornitófilas para avaliar os picos de floração e, por meio de análise de redes de interação, verificamos quais desempenham papel central na rede. Além disso, medimos a taxa de frutificação e produção de sementes de *F. itatiaiae* por meio de experimentos controlados para avaliar seu sucesso reprodutivo, e a quantidade de pólen depositado no estigma para relacionar com o contexto comunitário (abundância mensal de flores coespecíficas, abundância mensal de flores ornitófilas, *display* floral, presença de vizinho ornitófilo). Os resultados apontaram sobreposição do pico de floração de algumas espécies ornitófilas com *F. itatiaiae*, e as espécies que apresentaram interações mais fortes com os beija-flores compartilhados foram *Fuchsia regia*, *F. itatiaiae* e *Buddleja speciosissima*. Além disso, vimos que a presença de vizinhos ornitófilos e outras flores ornitófilas na comunidade não influencia a polinização de *F. itatiaiae* na comunidade, e que seu sucesso reprodutivo depende diretamente da presença de beija-flores. Essa dependência, juntamente com seu papel na rede, mostra a importância de *F. itatiaiae* na comunidade e seu papel como mediadora de processos de compartilhamento de polinizadores.

Palavras-chave: campos de altitude, conservação, Mata Atlântica, polinização.

1. Introdução

A interação planta-polinizador é um processo ecológico chave, isto porque a ausência de polinizadores pode resultar na incapacidade de muitas plantas em se reproduzir (Ollerton et al. 2011). Da mesma forma, a falta de plantas para oferecer recursos para os polinizadores, como pólen e néctar, poderia levar a declínios populacionais em diversas espécies de animais (Ollerton et al. 2011). As variações na visitação dos polinizadores podem levar a um déficit reprodutivo em diversas espécies de plantas, o que enfatiza a relevância dos polinizadores na manutenção de populações de plantas e a possível vulnerabilidade delas diante da diminuição desses polinizadores (Rodger et al. 2021). Essas interações entre as plantas e seus polinizadores podem ser analisadas por meio de redes de interação, que descrevem comunidades de plantas e polinizadores potencialmente interagindo como um sistema (Sargent & Ackerly 2008; Ferreira et al. 2013).

As interações planta-polinizador podem influenciar a montagem da comunidade por meio de três processos principais: filtragem de habitat, facilitação e competição (Sargent & Ackerly 2008). A filtragem de habitat prevê que o ambiente seleciona espécies com adaptações particulares que permitam sua sobrevivência no local. Isso pode ocorrer por meio da ausência de um polinizador específico, impedindo o estabelecimento de uma espécie de planta na comunidade, ou por meio das características do próprio ambiente físico, como luz, clima e disponibilidade de água, que podem determinar quais sistemas de polinização persistem no local (Potts et al. 2003; Sargent & Ackerly 2008). O processo de facilitação em uma rede prevê que uma espécie de planta pode indiretamente aumentar a visitação de polinizadores a uma espécie vizinha, aumentando os níveis de visitação ou atividade de polinizadores compartilhados. Plantas em comunidades pequenas e isoladas têm mais a ganhar com a facilitação por polinizadores (Groom 1998; Sargent & Ackerly 2008). Assim como na filtragem, espécies que ocupam comunidades moldadas por facilitação são previstas para exibir similaridades de traços florais (Sargent & Ackerly 2008). Já em uma comunidade estruturada pela competição é esperada maior diversidade de características fenotípicas que atraem os animais polinizadores, ou seja, síndromes de polinização (Sargent & Ackerly 2008). O processo de competição pode ocorrer por meio da preferência dos polinizadores, onde uma menor quantidade de polinizadores significa que uma ou mais espécies sofrem redução na visitação, ou por meio da transferência de pólen entre as espécies, resultando em menor sucesso reprodutivo (Sargent & Ackerly 2008; Wolowski et al. 2014).

O padrão fenológico e a abundância de espécies na comunidade permitem compreender a reprodução das plantas e a organização espaço-temporal dos recursos disponíveis para os polinizadores (Buzato et al. 2000). Esses fatores determinam como as interações são estruturadas em diferentes redes ecológicas, o que leva a diferenças nos padrões de especialização e compartilhamento de polinizadores (Maruyama et al. 2014; Bergamo et al. 2021). Plantas que florescem em ambientes fenológicos contrastantes, lidam de forma diferente com as interações indiretas mediadas por polinizadores (Bergamo et al. 2020). Assim, abordagens em nível de comunidade permitem quantificar o número de polinizadores que são compartilhados e a contribuição que as espécies de plantas possuem na dieta desses animais (Bergamo et al. 2017). Neste sentido, a diversidade de características dos beija-flores e das plantas podem ser fortes preditores da partição de interações dentro das comunidades (Maruyama et al. 2014; Vizentin-Bugoni et al. 2014; Maglianesi et al. 2015). A análise de redes de interação planta-polinizador pode ser útil para discriminar as espécies de plantas e animais importantes e necessárias para a conservação das espécies, permitindo pensar em formas de manejo adequadas.

Bromeliaceae é um grupo bastante diversificado em afloramentos rochosos na região Neotropical, com papel fundamental na manutenção de diversas formas de vida por meio da criação e manutenção de habitats adequados para outras espécies menos resistentes ao ambiente rochoso (Medina et al. 2006). Dessa forma, representantes da família possibilitam condições para o estabelecimento de outras espécies no ambiente em que ocorrem (Medina et al. 2006). Espécies dessa família são predominantes em comunidades de plantas polinizadas por beija-flores, fazendo com que sejam centrais nas interações indiretas entre as plantas (Wolowski et al. 2017; Bergamo et al. 2020). A alta disponibilidade de plantas ornitófilas em floração, como as bromélias, está relacionada à permanência de beija-flores devido a maior quantidade de recursos disponíveis, o que pode maximizar o sucesso reprodutivo de todas as espécies (Machado & Semir 2006; Wolowski et al. 2017). Entretanto, ainda não se sabe como essas interações indiretas afetam o sucesso reprodutivo de bromélias nos campos de altitude (Machado & Semir 2006; Magalhães 2017).

No Brasil, um dos principais *hotspots* da biodiversidade global é o domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, onde encontram-se os campos de altitude, que possuem altos níveis de diversidade e endemismo (Mittermeier et al. 2011; Kessous & Freitas 2023). Apesar de toda diversidade, muitas espécies estão ameaçadas ou quase ameaçadas de extinção (Kessous & Freitas 2023), sendo o maior índice do país (Martinelli & Moraes 2013). Os campos de altitude são um mosaico de arbustos e pequenos bosques de árvores baixas,

inseridas em uma matriz mais contínua de capim e bambu, além de afloramentos rochosos, ambiente de desenvolvimento de espécies de plantas como as bromélias (Safford 1999). Nos campos de altitude, os padrões de cofloração estão associados à semelhança dos traços florais, que influenciam a variação temporal nas redes de polinização (Bergamo et al. 2020). Embora o processo de facilitação seja predominante nos campos de altitude, espécies polinizadas por beija-flores também são caracterizadas pelo processo de competição, portanto, processos distintos mediados por polinizadores podem atuar na mesma comunidade (Bergamo et al. 2020).

A bromélia ornitófila *Fernseea itatiaiae* (Wawra) Baker é endêmica dos campos de altitude do Planalto do Itatiaia. O local é frequentemente impactado pela ocorrência de incêndios, sendo a maioria de origem antrópica (Aximoff 2011). Devido sua distribuição restrita, onde incêndios prejudicam sua sobrevivência e resultam em declínio contínuo da qualidade do habitat, mesmo dentro da Unidade de Conservação, a espécie é classificada como em perigo (EN) pelo Centro Nacional de Conservação da Flora (CNCFlora 2012). A ocorrência de incêndios contribui para a diminuição no número de indivíduos de plantas e, conseqüentemente, afeta os animais polinizadores que se encontram no local (Freitas & Sazima 2006). Com isso, informações sobre polinização mostram a importância das interações entre plantas e polinizadores para a manutenção e conservação da biodiversidade da flora nos campos de altitude (Freitas & Sazima 2006; Bergamo et al. 2021). Durante sua floração, *F. itatiaiae* pode estar competindo ou sendo facilitada pela presença de outras espécies ornitófilas (Bergamo et al. 2020) Dessa forma, é importante conhecer o contexto da comunidade em seu período de floração para compreender como esses fatores interagem e afetam a reprodução da espécie focal dentro da comunidade (Rivkin et al. 2020). Nesse contexto, é comum haver altos níveis de compartilhamento desses animais em redes de polinização, principalmente em comunidades tropicais, onde há maior diversidade de espécies de plantas polinizadas por animais (Bergamo et al. 2017).

Neste estudo, avaliamos a dependência de polinização e o contexto do sucesso reprodutivo de *F. itatiaiae* em relação às espécies em cofloração da comunidade com as quais compartilha polinizadores, como subsídio para sua conservação nos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia. Considerando que a maior disponibilidade de flores ornitófilas ocorre na estação chuvosa com o período de reprodução de beija-flores (Sick 1984), espera-se que a espécie focal tenha maior sucesso reprodutivo durante a época de cofloração com maior quantidade de espécies ornitófilas, o que levaria a um processo de facilitação das interações na comunidade. Além disso, devido à baixa frequência de visitantes da espécie focal e menor

abundância em comparação com outras espécies ornitófilas (Bergamo et al. 2020), *F. itatiaiae* pode ocupar uma posição mais periférica na rede de interações planta-beija-flor, possivelmente sendo bastante afetada em relação ao contexto comunitário de floração e interações com beija-flores. Neste estudo buscamos responder às seguintes questões: 1- Quais são as espécies de beija-flor e de plantas ornitófilas presentes na rede de interações planta-polinizador dos campos de altitude de Itatiaia, com *F. itatiaiae* como espécie focal? 2- Qual o papel de *F. itatiaiae* e outras espécies ornitófilas na rede de interações planta-polinizador? 3- Quais outras espécies sobrepõe sua floração e uso de polinizadores com *F. itatiaiae*? 4- Qual a dependência de *F. itatiaiae* em relação aos beija-flores para sua reprodução?

2. Materiais e métodos

2.1 Sistema de estudo e Fenologia de floração

A coleta de dados foi realizada nos campos de altitude do Parque Nacional do Itatiaia (PNI), inserido na parte mais elevada da Serra da Mantiqueira, entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, região sudeste do Brasil. O local apresenta elevado número de espécies endêmicas, raras e ameaçadas. É também local de endemismo da bromélia *F. itatiaiae*, que floresce no período de setembro a janeiro (Aximoff et al. 2016; Moreira et al. 2020).

A fenologia de floração foi mensurada de setembro de 2022 a fevereiro de 2023, ao longo de cinco dias em cada mês, ao longo de três trilhas do Parque Nacional do Itatiaia: 1- trilha dos Cinco Lagos, com 1,65 Km (início: 22°22'16.5"S 44°42'09.4"W; fim: 22°22'06.1"S 44°41'30.6"W); 2- trilha para o Abrigo Rebouças, com 1,60 Km (início: 22°22'27.8"S 44°42'03.9"W; fim: 22°22'51.7"S 44°41'15.6"W); 3- trilha para o Morro do Couto, com 1,91 Km (início: 22°22'30.6"S 44°42'21.0"W; fim: 22°23'03.6"S 44°41'43.0"W). As trilhas formam um transecto com 5,16 km de extensão total, ao longo dos quais foram contados o número de flores de cada indivíduo das espécies de plantas ornitófilas encontradas dos dois lados de cada trilha, com distância lateral de um metro.

Obtivemos uma matriz fenológica com o número de flores em cada indivíduo de cada espécie polinizada por beija-flores. Com a matriz, calculamos a abundância geral de flores da comunidade que florescem por mês, para identificar o pico de floração de *F. itatiaiae* e das outras espécies de plantas ornitófilas (Bergamo et al. 2021). A sobreposição na floração entre as espécies ornitófilas foi estimada a partir do índice de Czekanowski, que considera a

sobreposição de nicho temporal entre duas espécies na matriz de fenologia de floração (Castro-Arellano et al. 2010). O índice varia de 0 a 1, onde 0 indica nenhuma sobreposição na floração entre as espécies, e 1 indica uma sobreposição completa entre as espécies. Dessa forma, valores maiores sugerem uma interação mais intensa entre as espécies durante seus períodos de floração, enquanto um valor menor indica uma menor sobreposição e, portanto, uma menor interação ou entre as espécies (Castro-Arellano et al. 2010).

As espécies de plantas ornitófilas foram identificadas a partir de amostras férteis, que foram coletadas manualmente e herborizadas para identificação com apoio da literatura (Souza & Lorenzi 2005). As exsiccatas foram montadas e incluídas na coleção do herbário UALF da UNIFAL-MG. Os beija-flores foram identificados por registro fotográfico ao longo das observações com auxílio de literatura especializada (Grantsau 1988).

2.2 Rede de interação planta-beija-flor

Um estudo anterior mostrou, por meio de observação e tratamentos de polinização, que essa espécie se reproduz preferencialmente através da polinização cruzada e já foram registradas visitas dos beija-flores *Clytolaema rubricauda*, *Stephanoxis lalandi* e *Phaethornis eurynome* (Zambon 2020). Entretanto, a composição de uma comunidade de polinizadores pode variar ao longo do tempo, resultando em diferentes padrões de interação planta-polinizador, alterando a estrutura da rede de interações. Dessa forma, para a análise da rede de interação foram observadas as espécies de plantas ornitófilas que possuem indivíduos em fase reprodutiva no período de setembro de 2022 a fevereiro de 2023. Este período foi escolhido por ser o período de floração de *F. itatiaiae* na área amostral (Zambon 2020). Foi utilizado o método de observação focal que consiste em amostrar indivíduos de planta em floração, por um período padronizado de tempo (Castro 2010). Cada sessão de observação teve duração de pelo menos uma hora, onde foram registradas as espécies de beija-flor que visitaram as flores, o comportamento de visita (se entrava em contato com a parte reprodutiva da planta), o horário e o número de visitas. As observações foram realizadas no intervalo das 8h às 17h, durante um período de cinco dias em cada mês de estudo. Os indivíduos foram selecionados de acordo com a disponibilidade ao longo das três trilhas durante os seis meses de estudo, totalizando 10h mínimas de observação para cada espécie ornitófila.

Embora na literatura a quantidade ideal mínima para registro de interações planta-beija-flor seja de 15h, em nosso estudo só foi possível observar no mínimo 10h por espécie (Vizentin-Bugoni et al. 2014). Isto porque o período de floração de algumas espécies

acabou antes de que conseguíssemos completar 15h de observação e, para outras, a floração começou no final do nosso período de campo. Um período de observação mais curto pode não abranger todas as interações e suas frequências durante a floração da espécie, entretanto, ainda é possível obter informações importantes por meio da interpretação dos resultados. Foram consideradas apenas visitas com potencial para polinização, ou seja, quando o visitante tocou anteras e estigmas. Em seguida, foi construída a rede planta-polinizador, para avaliação da sobreposição no uso de polinizadores entre as espécies polinizadas por beija-flores. Para isso, utilizamos a frequência relativa de visitação (número de flores visitadas/tempo de observação) de cada espécie de beija-flor em cada espécie de planta como força da interação. Em seguida, utilizamos o índice de Müller para cada par de espécies de plantas (Müller et al. 1999), que varia dependendo da estrutura da rede de interações. Em redes mais especializadas, onde as espécies possuem interações mais específicas e direcionadas, os valores do índice tendem a ser menores (próximos de 0). Já nas redes mais generalizadas, onde as espécies possuem interações mais amplas e variadas, seus valores tendem a ser maiores (próximos de 1). Dessa forma, o valor 0 indica que as duas espécies interagem com conjuntos completamente diferentes de parceiros, enquanto o valor 1 indica que elas compartilham exatamente os mesmos parceiros na mesma intensidade. Este é um índice adequado para avaliar sobreposição de nicho em redes de interação, pois leva em consideração as assimetrias de interação, ou seja, as diferentes dependências que cada espécie de planta tem de cada espécie de beija-flor (Carvalho et al. 2014; Bergamo et al. 2017, Bergamo et al. 2022).

Além disso, avaliamos a importância de *F. itatiaiae* e de outras espécies ornitófilas por meio de métricas ao nível de espécie, para avaliar quais desempenham papéis-chave na rede de interação planta-polinizador (González et al. 2010). Foram analisadas as seguintes métricas (González et al. 2010): (1) *d'*: quantifica o grau de especialização de uma espécie em suas interações com outras espécies na rede. Espécies com alto valor de *d'* são altamente especializadas em suas interações com os polinizadores, enquanto aquelas que possuem baixo valor de *d'* possuem interações mais generalizadas; (2) *Species strength*: refere-se à medida de força das espécies na rede, mostrando a importância de uma espécie na rede com base na quantidade total de interações que ela tem com outras espécies. Ou seja, quanto mais interações a espécie possui na rede, maior será seu valor de *species strength*, o que mostra um papel importante na estrutura e na dinâmica da rede de interações. (3) *Closeness*: calcula a proximidade de uma espécie em relação a outras espécies a partir dos seus padrões de interação, indicando o quão conectada está dentro da rede. Calcula a distância média de uma

espécie até todas as outras espécies da rede. Uma espécie com valor alto de *closeness* está mais diretamente conectada com as outras espécies na rede; (4) *Weighted closeness*: leva em consideração a conexão entre as espécies e a força dessas conexões, atribuindo pesos com base na intensidade ou na importância dessas conexões. Dessa forma, um alto valor de *weighted closeness* indica uma posição central e influente na rede, enquanto um baixo valor sugere uma posição mais periférica e menos influente.

Para avaliar o efeito da perda de uma espécie, especialmente quando se trata de uma espécie em extinção, realizamos a simulação da retirada de *F. itatiaiae* da rede. Ou seja, também realizamos a sobreposição de nicho e as métricas ao nível de espécie, porém, considerando que a espécie não faz parte da rede. Isso nos permite entender o papel específico que essa espécie desempenha na comunidade e as consequências de sua perda.

2.3 Sistema reprodutivo de *Fernseea itatiaiae*

O sistema reprodutivo de *F. itatiaiae* foi avaliado por meio da taxa de frutificação e produção de sementes após experimentos controlados de polinização. Para isso, foram feitos tratamentos de autopolinização espontânea, suplementação de pólen e polinização natural em indivíduos selecionados em floração com botões florais e flores abertas durante as expedições a campo. Para cada tratamento, foi selecionada uma flor por indivíduo, de acordo com o número de indivíduos disponíveis em floração distribuídos ao longo das três trilhas. Desta forma, nos meses de dezembro de 2022 e janeiro de 2023 foram selecionados 13 indivíduos e realizados três tratamentos em cada, sendo uma flor para cada tratamento, totalizando 39 flores tratadas.

No tratamento de autopolinização espontânea, as flores foram ensacadas ainda em estágio de botão floral com sacos de tecido voile para avaliar a reprodução na ausência de visitas dos beija-flores. Para a suplementação de pólen, foi coletada uma flor de outro indivíduo e, com a ajuda de um pincel, os grãos de pólen foram removidos das anteras e transferidos para o estigma da flor de outro indivíduo, que estava distante do primeiro de acordo com a disponibilidade ao longo da trilha, no qual foi feito o tratamento. Na polinização natural, as flores ficaram expostas por um período de aproximadamente cinco horas e, posteriormente, foram ensacadas. Após o período de antese as flores foram ensacadas, para permitir o desenvolvimento dos frutos e isolá-los contra herbívoros. Em seguida, foi feito o acompanhamento mensal da formação e do desenvolvimento dos frutos (Figura 2). Quando os frutos atingiram a maturidade, em março de 2023, foram coletados para

contagem de sementes e análise de germinação. Dessa forma, a taxa de frutificação foi calculada pelo número de frutos/número de flores.



Figura 1. Indivíduos de *Fernsea itatiaiae* em fase reprodutiva na trilha dos Cinco Lagos do Parque Nacional do Itatiaia: (A) Inflorescência com flores e botões florais; (B) Indivíduo com frutos em desenvolvimento; (C) Indivíduo inteiro, com roseta de folhas e inflorescência ao centro.

Em laboratório, os frutos foram beneficiados para contagem das sementes. Para analisar a germinação, os frutos foram lavados com água destilada para separar as sementes. Após esse processo, as sementes foram organizadas em placas de petri e expostas a temperatura em torno de 20°C para que pudessem secar. Depois de secas, foram armazenadas em microtubos em *freezer* até o momento de serem colocadas para germinar. Para o experimento de germinação, as sementes foram organizadas em placas de petri com duas folhas de papel filtro no fundo, umedecidas com água destilada, e então colocadas em uma estufa BOD com fotoperíodo de 10 horas e alternância de temperatura entre 20°C e 25°C, por um período de 60 dias, de junho de 2023 a agosto de 2023 (Figura 2).



Figura 2. Placa de petri contendo duas folhas de papel filtro umedecidas com água destilada, com sementes de *Fernseea itatiaiae* organizadas para serem colocadas em estufa BOD para avaliar a germinação.

2.4 Sucesso da polinização em *Fernseea itatiaiae*

Para avaliar o sucesso da polinização no contexto da comunidade foi realizada a contagem de pólen depositado nos estigmas de indivíduos de *F. itatiaiae* (Figura 3). Para isso, foram coletados estigmas de flores senescentes ao final do dia e colocados em microtubo com álcool 70%, de acordo com a disponibilidade de indivíduos floridos, sendo uma flor por indivíduo, totalizando 40 indivíduos ao longo dos seis meses de estudo (setembro de 2022 a fevereiro de 2023). Em cada indivíduo, selecionado de acordo com a disponibilidade ao longo das trilhas, foi estabelecido um plot de dois metros quadrados, para que pudéssemos considerar a vizinhança imediata. Em laboratório, foram montadas lâminas com carmim acético e realizada a contagem do pólen depositado em cada estigma em microscópio óptico. Para obter um número mais preciso da quantidade de pólen que pode ter se desprendido do estigma durante o armazenamento, foi realizada a centrifugação do álcool remanescente nos microtubos por oito minutos a 3000 RPM e então colocados com a tampa aberta na estufa em torno de 70°C, até secarem. Após a secagem, nos microtubos já vazios, foi adicionado 50µl de álcool com auxílio de micropipeta calibrada. Para a contagem, foi pipetado todo o *pellet* formado no fundo do microtubo (50µl) sobre lâmina e coberto com lamínula, para realizar a varredura no microscópio. Assim, foi possível obter a quantidade estimada de grãos de pólen depositados nos estigmas da espécie focal em cada amostra e relacioná-la a quatro variáveis preditoras: abundância mensal de flores coespecíficas, abundância mensal de flores

ornitófilas, *display* floral, presença de vizinho ornitófilo daquela em que o estigma foi coletado. A abundância mensal de flores coespecíficas e de ornitófilas foi registrada por meio da contagem de flores em cada indivíduo encontrado ao longo do transecto delimitado das três trilhas. O *display* floral consiste na contagem do número de flores de cada indivíduo de *F. itatiaiae* focal. Ao coletar os estigmas era registrado a presença ou ausência de plantas vizinhas ornitófilas dentro de um raio de dois metros dos indivíduos de *F. itatiaiae*.

Os dados foram analisados utilizando o software estatístico R Studio (versão 4.3.3, 2024). Utilizamos um modelo generalizado misto com o pacote lme4 (Bates et al. 2015), com distribuição binomial negativa, devido à sobredispersão dos dados de contagem de grãos de pólen, considerando amostras repetidas e variação entre indivíduos. Utilizamos como variável aleatória o indivíduo e o mês de coleta, para levar em consideração amostras repetidas por indivíduo e o contexto da comunidade em cada mês. Para verificar se as premissas do modelo são adequadas aos dados e a distribuição adequada, utilizamos o pacote DHARMA (Hartig & Hartig 2017).

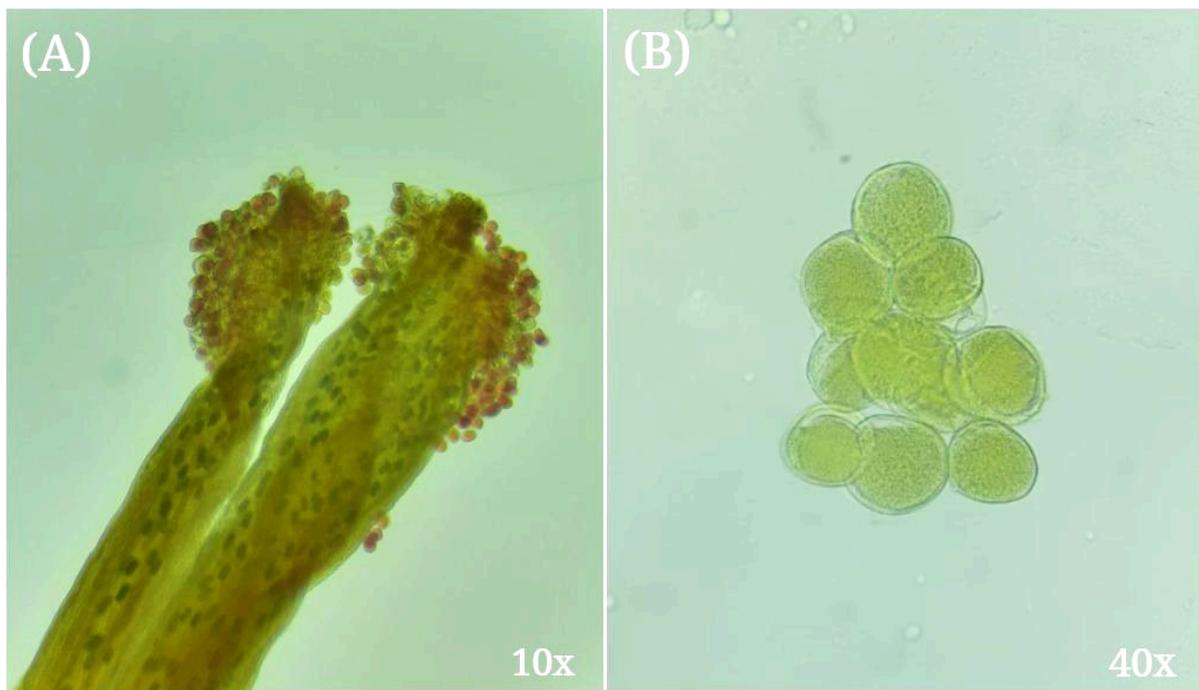


Figura 3. (A) Lâmina de estigma de *Fernseea itatiaiae* contendo pólen (10x); (B) Grãos-de-pólen de *Fernseea itatiaiae* (40x).

3. Resultados

3.1 Fenologia de floração

Ao longo dos três transectos demarcados em cada trilha, registramos 15 espécies ornitófilas em floração (Tabela 1; Figura 4). As famílias mais representativas foram Lamiaceae com três espécies (*Lepechinia speciosa*, *Rhabdocalon coccineum*, *Salvia itatiaiensis*), Alstroemeriaceae com duas espécies (*Alstroemeria foliosa*, *Alstroemeria isabelleana*), Ericaceae com duas espécies (*Agarista hispidula*, *Gaultheria serrata*) e Onagraceae com duas espécies (*Fuchsia campos-portoi*, *Fuchsia regia*).

Tabela 1. Lista de espécies ornitófilas encontradas ao longo das três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia (trilha do Morro do Couto, trilha dos Cinco Lagos, trilha para o Abrigo Rebouças). As siglas foram definidas pelas duas primeiras letras do gênero e do epíteto específico.

Sigla	Espécie	Família
AGHI	<i>Agarista hispidula</i> (DC.) Hook. Ex Nied	Ericaceae
ALFO	<i>Alstroemeria foliosa</i> Mart. Ex Schult. & Schult.f	Alstroemeriaceae
ALIS	<i>Alstroemeria isabelleana</i> Herb	Alstroemeriaceae
BAGO	<i>Barbacenia gounelleana</i> Beauerd	Velloziaceae
BUSP	<i>Buddleja speciosissima</i> Taub	Scrophulariaceae
ESEI	<i>Esterhazyia eitenorum</i> Barringer	Orobanchaceae
FEIT	<i>Fernseea itatiaiae</i> (Wawra) Baker	Bromeliaceae
FUCA	<i>Fuchsia campos-portoi</i> Pilg. & Schulze-Menz	Onagraceae
FURE	<i>Fuchsia regia</i> (Vell.) Munz	Onagraceae
GASE	<i>Gaultheria serrata</i> (Vell.) Sleumer ex Kin.-Gouv	Ericaceae
HIMO	<i>Hippeastrum morelianum</i> Lem	Amaryllidaceae
LESP	<i>Lepechinia speciosa</i> (A.St.- Hil. Ex Benth.) Epling	Lamiaceae
RHCO	<i>Rhabdocalon coccineum</i> (Benth.) Epling	Lamiaceae
SAIT	<i>Salvia itatiaiensis</i> Dusén	Lamiaceae
SIWE	<i>Siphocampylus westinianus</i> (Thunb.) Pohl	Campanulaceae

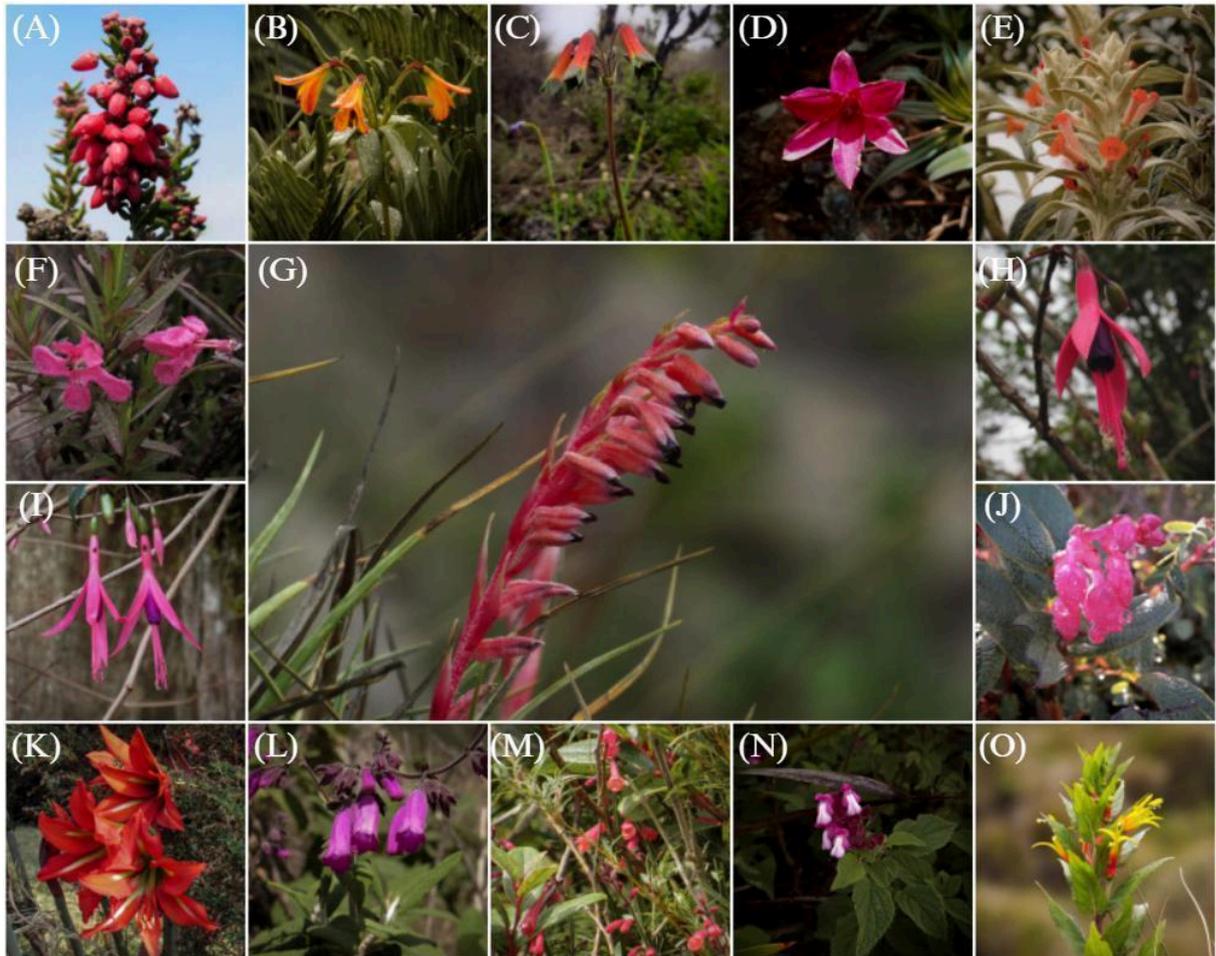


Figura 4. Espécies ornitófilas encontradas ao longo de três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia. (A) *Agarista hispidula*; (B) *Alstroemeria foliosa*; (C) *Alstroemeria isabelleana*; (D) *Barbacenia gounelleana*; (E) *Buddleja speciosissima*; (F) *Esterhazyia eitenorum*; (G) *Fernseea itatiaiae*; (H) *Fuchsia campos-portoi*; (I) *Fuchsia regia*; (J) *Gaultheria serrata*; (K) *Hippeastrum morelianum*; (L) *Lepechinia speciosa*; (M) *Rhabdocaulon coccineum*; (N) *Salvia itatiaiensis*; (O) *Siphocampylus westinianus*.

Foi possível obter um fenograma com o número de indivíduos em floração de cada espécie nos meses de setembro de 2022 a fevereiro de 2023 (Figura 5). O pico de floração de *Fernseea itatiaiae* ocorreu nos meses de novembro e dezembro, sobrepondo principalmente com duas outras espécies, *Buddleja speciosissima* e *Gaultheria serrata*. Além disso, pudemos observar que outras três espécies compartilharam um período menor de seu pico de floração com a espécie focal (*Agarista hispidula*, *Esterhazyia eitenorum* e *Fuchsia campos-portoi*, Figura 5).

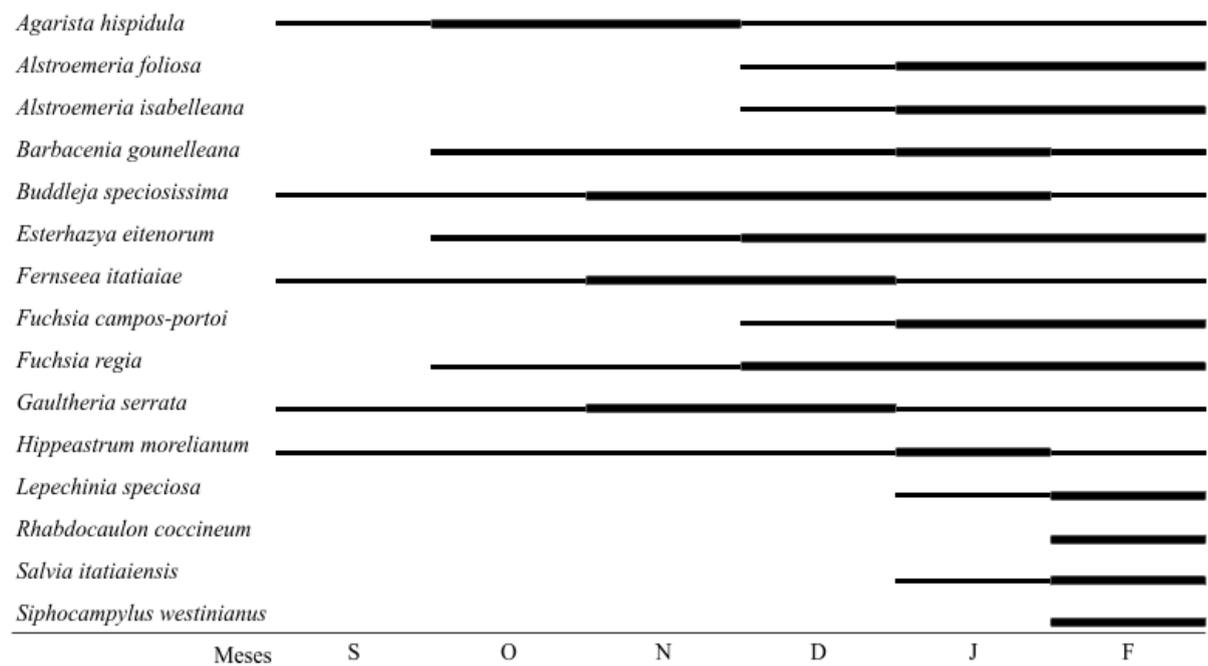


Figura 5. Fenologia de floração de 15 espécies ornitófilas que ocorrem na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, entre os meses de setembro de 2022 a fevereiro de 2023. A linha fina representa o período total de cada florada e a linha grossa, o pico de floração (meses em que foram registrados maiores números de flores da espécie).

Gaultheria serrata, *Buddleja speciosissima* e *Agarista hispidula* possuíram maior sobreposição de floração com *F. itatiaiae*, visto que estavam floridas durante os seis meses de estudo e apresentaram alta quantidade de flores (Tabela 2). Outras espécies apresentaram sobreposição de floração intermediária, como *Barbacenia gounelleana*, *Esterhazyia eitenorum*, *Fuchsia campos-portoi*, *Fuchsia regia* e *Hippeastrum morelianum*. Por outro lado, as demais espécies apresentaram valores baixos de sobreposição na floração com a espécie focal, isso devido ao fato de não florescerem durante todos os seis meses e possuírem pico de floração no momento em que a espécie focal não estava mais com alta quantidade de flores.

Tabela 2. Análise da sobreposição de floração, calculada par a par por meio do método "czech", de 14 espécies ornitófilas com a espécie focal *Fernseea itatiaiae*, observadas nas três trilhas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, no período de setembro de 2022 a fevereiro de 2023.

Espécies ornitófilas	<i>Fernseea itatiaiae</i>
<i>Gaultheria serrata</i>	0,85
<i>Buddleja speciosissima</i>	0,81
<i>Agarista hispidula</i>	0,56
<i>Fuchsia regia</i>	0,45

<i>Esterhazyia eitenorum</i>	0,37
<i>Barbacenia gounelleana</i>	0,28
<i>Hippeastrum morelianum</i>	0,23
<i>Fuchsia campos-portoi</i>	0,15
<i>Alstroemeria isabelleana</i>	0,10
<i>Alstroemeria foliosa</i>	0,07
<i>Salvia itatiaiensis</i>	0,06
<i>Lepechinia speciosa</i>	0,02
<i>Rhabdocalon coccineum</i>	0,01
<i>Siphocampylus westinianus</i>	0,01

3.2 Rede de interação planta-beija-flor

Três espécies de beija-flor atuaram como visitantes florais nos indivíduos de *Fernseea itatiaiae*, sendo estas: *Colibri serrirostris* (COSE), *Stephanoxis lalandi* (STLA) e *Thalurania glaucopis* (THGL). Embora não tenha sido observado visitando indivíduos de *F. itatiaiae*, o beija-flor *Clytolaema rubricauda* (CLRU) foi responsável pela maior frequência de visitas em *Fuchsia regia*, além de ter visitado outras espécies como *Alstroemeria isabelleana* e *Salvia itatiaiensis* (Figura 6). Das 15 espécies ornitófilas identificadas, em quatro delas não foram observadas visitas de beija-flores durante a amostragem, mesmo durante um período mínimo de horas de observação, sendo elas: *Barbacenia gounelleana* (10 horas), *Esterhazyia eitenorum* (11 horas), *Hippeastrum morelianum* (10 horas) e *Rhabdocalon coccineum* (10 horas) (Material suplementar).

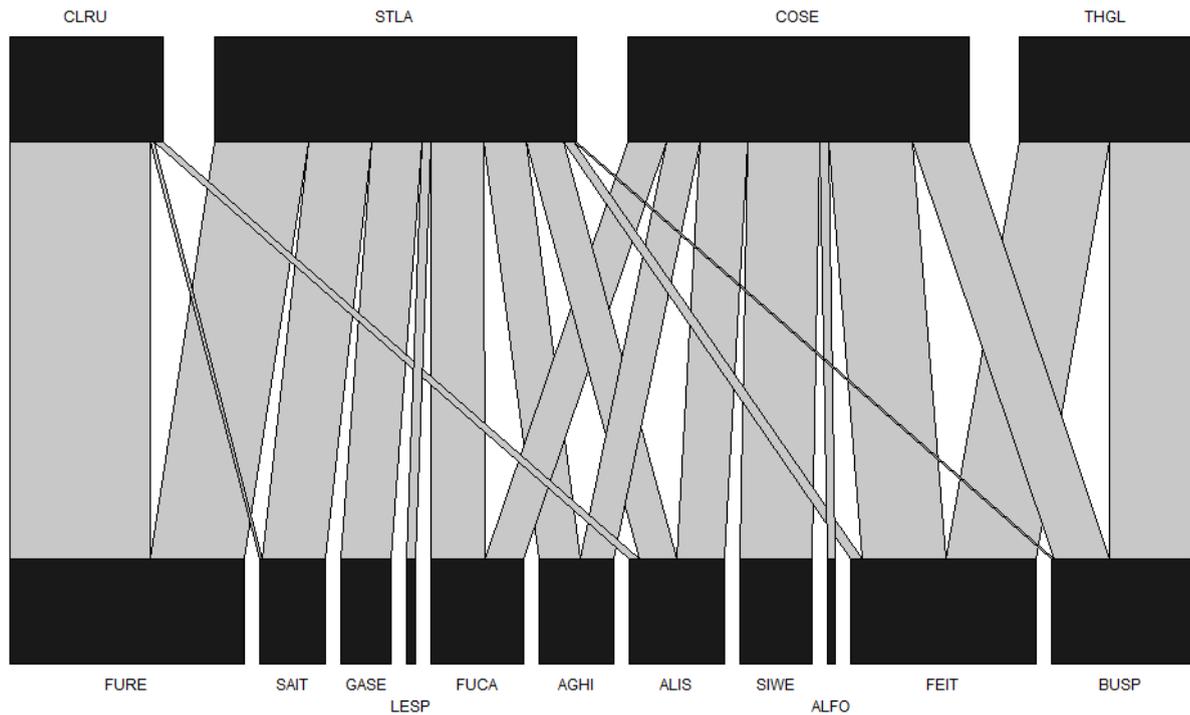


Figura 6. Rede de interação entre as 11 espécies ornitófilas que receberam visitas (linha inferior) e as quatro espécies de beija-flores observadas (linha superior).

Através do índice de Müller, foi possível observar como a espécie focal (FEIT) é afetada por cada espécie da rede (valores da linha da espécie, Tabela 3) e também como ela afeta cada uma dessas espécies por meio da sobreposição de polinizadores (valores da coluna da espécie, Tabela 3). Assim, analisando a linha de FEIT vemos como as espécies possuem baixa influência sobre ela na rede, com exceção de *Buddleja speciosissima* (BUSP), ou seja, ela é uma espécie muito importante para os mesmos polinizadores que são importantes para *F. itatiaiae*. Por outro lado, ao analisar a coluna FEIT vemos que, apesar dos valores serem baixos, ainda assim são maiores comparados com a influência que recebe das espécies, o que nos mostra maior influência da espécie focal sobre as diversas outras espécies da rede, tendo seu maior valor também com BUSP.

Tabela 3. Matriz de efeito da sobreposição dos polinizadores em cada uma das 11 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flor por meio do índice de Müller. As siglas foram definidas pelas duas primeiras letras do gênero e do epíteto específico. A escala de cores varia dos maiores valores (cinza escuro) para os menores (cinza claro) na sobreposição com *Fernseea itatiaiae*.

	AGHI	ALFO	ALIS	BUSP	FEIT	FUCA	FURE	GASE	LESP	SAIT	SIWE
AGHI	-	0,09	0,14	0,07	0,16	0,14	0,14	0,07	0,02	0,09	0,08
ALFO	0,08	-	0,16	0,14	0,32	0,11	0	0	0	0	0,17
ALIS	0,08	0,01	-	0,08	0,18	0,12	0,19	0,05	0,01	0,06	0,09

	AGHI	ALFO	ALIS	BUSP	FEIT	FUCA	FURE	GASE	LESP	SAIT	SIWE
BUSP	0,03	0,01	0,07	-	0,48	0,05	0	0	0	0	0,07
FEIT	0,04	0,01	0,08	0,26	-	0,06	0,01	0	0	0,01	0,08
FUCA	0,09	0,09	0,14	0,06	0,16	-	0,15	0,07	0,02	0,09	0,07
FURE	0,04	0	0,1	0	0,02	0,06	-	0,05	0,01	0,07	0
GASE	0,1	0	0,13	0,01	0,04	0,16	0,25	-	0,03	0,16	0
LESP	0,1	0	0,13	0,01	0,04	0,16	0,25	0,12	-	0,16	0
SAIT	0,1	0	0,13	0,01	0,04	0,15	0,28	0,12	0,03	-	0
SIWE	0,08	0,02	0,16	0,14	0,32	0,11	0	0	0	0	-

Os resultados das métricas ao nível de espécie mostraram que, para a especialização (d') apenas *Fuchsia regia* (FURE) apresentou valor próximo de 1, o que indica maior especialização (Tabela 4). Apesar de ter interagido com apenas dois beija-flores, grande parte de suas interações ocorreram com *Stephanoxis lalandi*, que foi responsável por polinizar o maior número de espécies de plantas. Para a métrica *species strength*, observamos que *Fuchsia regia*, *F. itatiaiae* e *Buddleja speciosissima* desempenharam papel mais importante para os polinizadores da rede, seguidas de *Alstroemeria isabelleana* (ALIS) e *Fuchsia campos-portoi* (FUCA) que também apresentaram valores mais altos, enquanto *Agarista hispidula* (AGHI), *Gaultheria serrata* (GASE), *Salvia itatiaiensis* (SAIT) e *Siphocampylus westinianus* (SIWE) apresentaram valores baixos e próximos, indicando papéis similares na rede. Quando avaliado a proximidade das espécies na rede (*closeness*), os valores registrados indicam que as espécies podem influenciar no compartilhamento de polinizadores entre as plantas, porém foram muito baixos para todas as espécies. O mesmo ocorreu para a métrica *weighted closeness*, que indica os nós que possuem papel central e influente na rede de interação.

Tabela 4. Métricas de centralidade avaliadas para cada uma das 11 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flores.

	d'	species.strength	closeness	weighted.closeness
AGHI	0,15	0,21	0,10	0,09
ALFO	0,23	0,02	0,08	0,01
ALIS	0,09	0,31	0,10	0,09
BUSP	0,38	0,65	0,10	0,07
FEIT	0,33	0,80	0,10	0,10
FUCA	0,16	0,26	0,10	0,11
FURE	0,60	1,18	0,09	0,15
GASE	0,35	0,14	0,09	0,08
LESP	0,22	0,03	0,09	0,02

SAIT	0,33	0,19	0,09	0,10
SIWE	0,42	0,21	0,08	0,08

Ao avaliarmos a retirada de *F. itatiaiae* da rede temos que os valores são baixos e próximos, mostrando que as espécies possuem baixa influência entre si (Tabela 5). Quando avaliamos a coluna de FURE, ou seja, o quanto ela afeta as outras espécies, observamos valores um pouco maiores, porém, a influência das outras espécies sobre ela é baixa. Com isso, a retirada de *F. itatiaiae* confirma sua influência sobre as diversas outras espécies da rede.

Tabela 5. Matriz de efeito da sobreposição dos polinizadores em cada uma das 10 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flor por meio do índice de Müller, simulando a retirada de *Fernseea itatiaiae* na rede. As siglas foram definidas pelas duas primeiras letras do gênero e do epíteto específico.

	AGHI	ALFO	ALIS	BUSP	FUCA	FURE	GASE	LESP	SAIT	SIWE
AGHI	-	0,01	0,14	0,1	0,15	0,15	0,08	0,01	0,1	0,13
ALFO	0,13	-	0,12	0,22	0,15	0	0	0	0	0,28
ALIS	0,11	0,02	-	0,11	0,14	0,2	0,06	0,01	0,07	0,14
BUSP	0,05	0,01	0,07	-	0,06	0	0	0	0	0,11
FUCA	0,12	0,01	0,14	0,1	-	0,15	0,08	0,02	0,1	0,12
FURE	0,05	0	0,08	0	0,06	-	0,06	0,01	0,08	0
GASE	0,12	0	0,11	0,01	0,15	0,27	-	0,03	0,18	0
LESP	0,12	0	0,11	0,01	0,15	0,27	0,14	-	0,18	0
SAIT	0,12	0	0,11	0,01	0,15	0,29	0,14	0,03	-	0
SIWE	0,13	0,03	0,19	0,22	0,15	0	0	0	0	-

Os resultados das métricas ao nível de espécie com a retirada da espécie focal (Tabela 6) mostraram que, tanto para a especialização (d') quanto para *species strength*, *Fuchsia regia* (FURE) e *Buddleja speciosissima* (BUSP) apresentaram maior valor. Ou seja, apesar da retirada de *F. itatiaiae* da rede, FURE e BUSP ainda são as espécies mais importantes para os polinizadores da rede, sendo FURE a mais especialista. Assim como analisado anteriormente, as métricas de proximidade das espécies na rede (*closeness*) e *weighted closeness*, os valores foram baixos para todas as espécies.

Tabela 6. Métricas de centralidade avaliadas para cada uma das 10 espécies ornitófilas encontradas na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia que receberam visitas de beija-flores, simulando a retirada de *Fernseea itatiaiae* na rede.

	d'	species.strength	closeness	weighted.closeness
AGHI	0.14	0.25	0.11	0.09
ALFO	0.26	0.03	0.09	0.02
ALIS	0.08	0.36	0.11	0.11
BUSP	0.61	1.22	0.11	0.08
FUCA	0.15	0.30	0.11	0.12
FURE	0.55	1.18	0.10	0.16
GASE	0.31	0.14	0.10	0.08
LESP	0.19	0.03	0.10	0.02
SAIT	0.29	0.20	0.10	0.10
SIWE	0.48	0.28	0.09	0.09

3.3 Sistema reprodutivo de *Fernseea itatiaiae*

Para a taxa de frutificação, obtivemos 46,15% no tratamento de autopolinização espontânea, 84,62% no tratamento em condições naturais e 76,92% no tratamento de suplementação de pólen (Tabela 7). Os indivíduos testados em condições naturais e para suplementação de pólen apresentaram frutos com maior quantidade de sementes (Tabela 7). A média de sementes por fruto foi de 2,83 no tratamento de autopolinização espontânea, 58,09 no tratamento de polinização natural e 31,3 no tratamento de suplementação de pólen. Esses resultados mostram que a autofecundação foi baixa nos indivíduos de *Fernseea itatiaiae*. Ao comparar a média de sementes por fruto, observamos diferenças entre os tratamentos (qui-quadrado = 0,000247).

Tabela 7. Número total de sementes, taxa de frutificação (%), nº de frutos, nº de flores, nº total de sementes, média de sementes por fruto e desvio padrão gerados nos três tratamentos realizados de autopolinização espontânea (AE), polinização natural (N) e suplementação de pólen (S) em indivíduos de *Fernseea itatiaiae*, na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, nos meses de dezembro de 2022 e janeiro de 2023.

Tratamento	Taxa de Frutificação (%)	Nº de frutos	Nº de flores	Nº total de sementes	Média de sementes por fruto	Desvio-padrão
AE	46,15	6	13	17	2,83	4,4

N	84,62	11	13	639	58,09	34,69
S	76,92	10	13	313	31,3	34,35

3.4 Sucesso da polinização em *Fernseea itatiaiae*

Ao todo, a contagem de grãos de pólen depositados nos estigmas de flores de *F. itatiaiae* apresentou $370,83 \pm 237,32$ (n=40 indivíduos), indicando alta deposição de pólen, mas ampla variação entre as flores dos indivíduos.

Não houve uma relação entre a abundância de flores coespecíficas e a deposição de pólen ($\chi^2 = 0$, $p = 0,81$). De forma similar, também não houve efeito da abundância de flores ornitófilas ($\chi^2 = -0,38$, $p = 0,30$), display floral ($\chi^2 = 0$, $p = 0,84$), nem da presença de vizinho ornitófilo ($\chi^2 = 0,26$, $p = 0,41$) na deposição de pólen.

4. Discussão

Durante o período de observações, registramos quatro espécies de beija-flores, dentre as quais apenas três realizaram visitas em indivíduos de *F. itatiaiae*, sendo elas *Colibri serrirostris*, *Stephanoxis lalandi* e *Thalurania glaucopis*. Além disso, o responsável pelo maior número de visitas em *F. itatiaiae* foi *T. glaucopis*. Em um estudo prévio foram registradas três espécies de beija-flores em *F. itatiaiae*, sendo *Clytolaema rubricauda*, que realizou a maior parte das visitas, *Stephanoxis lalandi* e *Phaethornis eurynome* (Zambon 2020). A diferença entre os resultados dos dois estudos pode ter causas como a variação temporal da realização das observações, e a variação espacial do local onde elas foram realizadas. A presença e atividade dos beija-flores podem variar ao longo do tempo devido a fatores sazonais, como mudanças nas condições climáticas e na disponibilidade de recursos (Arroyo-Correa et al. 2024). Além disso, os estudos podem ter sido conduzidos em locais diferentes dentro do Parque Nacional do Itatiaia, onde a composição da comunidade de beija-flores pode variar. Essa variação na composição da comunidade de polinizadores ao longo do tempo e espaço pode resultar em diferentes padrões de interação na rede planta-polinizador, possivelmente alterando sua estrutura. A diferença nas espécies observadas como principal polinizador pode afetar a quantidade e a qualidade da polinização, influenciando o sucesso reprodutivo da espécie focal na comunidade. Com isso, a diferença entre os dois estudos nos mostra a importância de diversas espécies de beija-flores para *F. itatiaiae*.

A diferença de comportamento entre beija-flores territorialistas e aqueles que seguem “traplines”, ou seja, possuem uma rota de forrageamento, pode ter efeito significativo na estrutura da rede e na dinâmica das interações planta-polinizador (Rombaut et al. 2022). Beija-flores territorialistas podem ter interações mais intensas com um número menor de espécies de plantas em seus territórios, o que leva a uma rede mais especializada, enquanto os que seguem “traplines” podem ter interações mais generalizadas com uma variedade de plantas ao longo da rota de forrageamento, resultando em uma rede mais diversificada (Tavares et al. 2016; Rombaut et al. 2022). Assim, o comportamento das espécies de beija-flores pode influenciar a diversidade, a distribuição e a estabilidade da rede de polinização, moldando a interação planta-polinizador (Maglianesi et al. 2015; Rombaut et al. 2022). As quatro espécies de beija-flores observadas durante o estudo são consideradas territorialistas (Rombaut et al. 2022), o que pode ser observado nas interações mais intensas com uma baixa diversidade de plantas, levando a uma rede mais especializada.

A polinização mediada por animais depende da abundância de recursos florais disponíveis em uma comunidade de plantas. Neste sentido, certas espécies de plantas são importantes por florescerem ao longo de um período maior e, conseqüentemente, oferecer recursos aos polinizadores por mais tempo, permitindo que eles permaneçam no local (Nottebrock et al. 2017). Essas espécies podem compartilhar os polinizadores, influenciando em seus padrões de visitação e potencialmente se envolvendo em interações indiretas, como facilitação ou competição, que dependerá do número de polinizadores compartilhados e da contribuição de recurso que cada espécie de planta tem para manter os polinizadores na comunidade (Bergamo et al. 2017). No período de floração de *F. itatiaiae*, foi possível observar outras espécies ornitófilas em floração na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia (Bergamo et al. 2021). Dentre elas, *Gaultheria serrata*, *Buddleja speciosissima* e *Agarista hispidula* são importantes fontes de recursos para os polinizadores, visto que o período de floração das três se estendeu ao longo dos seis meses de estudo e a quantidade de flores por mês foi alta, provavelmente contribuindo mais com a permanência dos beija-flores no local. Apesar de não terem sido grande fonte de recursos para os polinizadores devido ao número menor de flores por mês, *Barbacenia gounelleana*, *Esterhazyia eitenorum*, *Fuchsia campos-portoi* e *Hippeastrum morelianum* também floresceram durante todo o estudo, o que indica que elas também possuem papel na manutenção dos beija-flores na comunidade.

Assim, além de analisar o comportamento dos beija-flores, é importante identificar as espécies de plantas centrais da rede, o que nos permite compreender o papel funcional que cada espécie desempenha (Lázaro et al. 2019). Espécies mais generalizadas e mais

abundantes frequentemente ocupam posições centrais na rede e são consideradas fundamentais para a estabilidade e o funcionamento de todo o sistema (Lázaro et al. 2019; Lopes et al. 2023). Embora *Fuchsia regia* possua papel mais especialista na rede, sua presença na comunidade mostrou ser fundamental para a permanência do beija-flor *Stephanoxis lalandi*, que apresentou as maiores taxas de interação com as espécies observadas. Além disso, as três espécies que apresentaram interações mais fortes com os beija-flores compartilhados na comunidade foram *Fuchsia regia*, *Fernseea itatiaiae* e *Buddleja speciosissima*. Isso se deve ao fato de que, embora não tenham interagido com as quatro espécies de beija-flor observadas, as três plantas tiveram maiores quantidades de interações com os beija-flores, desempenhando um papel de maior importância para os polinizadores da rede. Ao avaliarmos as métricas *closeness* e *weighted closeness* os valores obtidos foram baixos para todas as espécies. Isso nos mostra que, quando analisamos o quão conectada estão as espécies da rede, levando em consideração o padrão de interação e sua importância, os valores obtidos não são suficientes para determinar o quanto são próximas e quais nós possuem papel mais central e influente (Lázaro et al. 2019; Lopes et al. 2023). Esses resultados são confirmados com a remoção de *F. itatiaiae* da rede, destacando também a importância de *F. regia* e *B. speciosissima* para as interações e manutenção da permanência dos beija-flores na comunidade na ausência da espécie focal.

De modo geral, as espécies ornitófilas da rede possuem baixa influência sobre a espécie focal em relação ao compartilhamento de espécies de beija-flores que são importantes para sua polinização. A exceção foi *Buddleja speciosissima*, assim como a espécie focal também apresentou grande influência sobre *B. speciosissima*, já que compartilham espécies de polinizadores de alta importância para ambas (*Colibri serrirostris* e *Thalurania glaucopis*). Além disso, houve grande sobreposição na floração das duas espécies, o que pode ter influenciado nas interações (Arroyo-Correa et al. 2024). Por outro lado, *F. itatiaiae*, teve alto efeito sobre as outras espécies, visto que recebe visita de espécies de beija-flores de alta importância para espécies como *Buddleja speciosissima*, *Alstroemeria foliosa*, *Siphocampylus westinianus*, *Alstroemeria isabelleana*, *Agarista hispidula* e *Fuchsia campos-portoi*. A dependência de plantas em relação aos polinizadores está positivamente associada à importância das espécies nas redes (Lázaro et al. 2019). Dessa forma, podemos associar a dependência de polinizadores para a reprodução de *F. itatiaiae* com o resultado das métricas de rede, que mostra sua importância na comunidade e seu papel como mediadora de processos de compartilhamento de polinizadores.

As bromélias apresentam características especializadas, como a hercogamia, que muitas vezes dificulta a autopolinização espontânea e favorece a polinização cruzada por animais (Lima 1988). Ainda, há grande variação nos sistemas reprodutivos, onde algumas espécies apresentam taxas maiores de autoincompatibilidade, enquanto outras são mais autocompatíveis e as taxas de autoincompatibilidade são menores (Matallana et al. 2010). Nas flores de *F. itatiaiae* a hercogamia parece não ser suficientemente desenvolvida, indicando, de acordo com o estudo de Zambon (2020), a autoincompatibilidade na espécie (ISI = 0.2). Ainda, este estudo prévio indicou uma condição de autogamia facultativa, o que pode estar relacionado a segurança reprodutiva considerando que essa espécie ocorre em um ambiente com baixa frequência de polinizadores e condições ambientais adversas (Zambon 2020). Entretanto, nossos resultados apontaram valores baixos de autopolinização e altos de polinização natural, com alta frutificação e produção de sementes, confirmando que, embora haja uma alta dependência de polinizadores para sua reprodução, os beija-flores parecem realizar visitas eficientes para assegurar a reprodução da espécie.

Espécies autocompatíveis são menos propensas à limitação de pólen do que aquelas que são auto incompatíveis (Wolowski et al. 2014). Embora nossos resultados apontem para a predominância de auto incompatibilidade em *F. itatiaiae*, no período em que a amostragem foi realizada parece não ter ocorrido limitação polínica, visto que os valores de frutificação da polinização natural e suplementação de pólen foram similares entre si e inferiores para a produção de sementes na suplementação em comparação a polinização natural. Além disso, a média das sementes produzidas por suplementação de pólen foi metade da média obtida nas sementes produzidas por tratamento natural. O baixo valor de autopolinização indica que não há evidência de depressão por exogamia, indicando autoincompatibilidade na espécie. Com isso, o mais provável é que tenha ocorrido algum problema metodológico na suplementação de pólen, visto que, além de esperar uma frutificação mais alta, o número de sementes também deveria ter sido maior.

Além disso, não obtivemos resultados sobre a taxa de germinação dessas sementes, visto que após o período de dois meses de experimento nenhuma semente germinou. Fatores como luz, umidade, temperatura e tempo são importantes para uma germinação adequada, tendo cada espécie necessidades específicas desses fatores para a germinação das sementes (Rasera & de Castro 2020). As condições em que as sementes de *F. itatiaiae* foram submetidas podem não ter sido adequadas para que pudessem germinar. Uma possibilidade é ter ocorrido alguma sensibilidade da semente aos processos de beneficiamento e montagem do experimento. Isto pode ter acontecido na etapa de secagem em ar condicionado, devido à

ausência de uma câmara fria adequada para o procedimento, ou então em seu armazenamento no freezer. Ao congelar, o teor de umidade das sementes ainda podia estar alto, o que pode ter afetado o embrião, que não conseguiu se desenvolver na etapa de germinação. Por outro lado, essas condições podem ter sido suficientes para conservar as sementes, mas a ausência da germinação pode ter se dado por outro fator, como pela necessidade de quebra de dormência.

Esses resultados nos mostram que as condições necessárias para que as sementes de *F. itatiaiae* ainda são incertas, e a espécie depende de polinizadores para se reproduzir, associado ao baixo número de visitas registrado. Isso nos leva à importância de estudos sobre as condições ideais para germinação das sementes desta espécie. Espécies dependentes de polinizadores são mais vulneráveis e a dificuldade de germinação tem implicações importantes para a conservação *ex situ*, principalmente por ser uma espécie em risco de extinção.

As variáveis de abundância mensal de flores coespecíficas; abundância mensal de flores ornitófilas; display floral; presença de vizinho ornitófilo não explicaram a quantidade de grãos-de-pólen depositados nos estigmas da espécie focal. Entretanto, os resultados apontaram que a espécie focal possui mais influência nas outras espécies da rede do que é influenciada por elas. Ou seja, a presença de vizinhos ornitófilos e da abundância de outras flores ornitófilas na comunidade não influencia no sucesso reprodutivo de *F. itatiaiae* na comunidade, mostrando efeitos neutros da vizinhança na polinização da espécie focal. De fato, os resultados indicam que *F. itatiaiae* provavelmente tem mais efeito sobre outras espécies e não vice-versa, com altos valores de índice de Müller e *species strength*.

5. Conclusão

As análises de rede de interação entre as espécies ornitófilas da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia em relação à espécie focal e seus respectivos polinizadores, apontou o papel de *F. itatiaiae* como espécie mediadora na comunidade. Seu sucesso reprodutivo está intrinsecamente relacionado à presença de beija-flores. Dessa forma, seu papel central na rede favorece sua polinização e provavelmente também sustenta outras espécies ornitófilas ao compartilhar seus polinizadores.

Dessa forma, há uma grande necessidade de medidas de manejo que garantam sua conservação, levando a permanência de beija-flores no local e, conseqüentemente, ocorrendo a manutenção da comunidade de plantas ornitófilas dos campos de altitude. Conclui-se que estudos sobre espécies ameaçadas de extinção são amplamente necessários, visto que espécies

dependentes de polinizadores são mais vulneráveis a alterações ambientais, e o desenvolvimento de propostas de políticas públicas voltadas para a conservação dessas espécies dependem de estudos realizados na área.

6. Agradecimentos

SMR agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de mestrado concedida. MW agradece CNPq (Processo 436335/2018-2). PJB agradece FAPERJ (Processo E-26/201.867/2020). Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pela concessão da licença de pesquisa no Parque Nacional do Itatiaia (Processo 84827-1).

7. Referências Bibliográficas

Arroyo-Correa B, Bartomeus I, Jordano P (2024), Flowering synchrony modulates pollinator sharing and places plant individuals along a competition–facilitation continuum. *Oikos* e10477. <https://doi.org/10.1111/oik.10477>

Aximoff I (2011) O que perdemos com a Passagem do Fogo pelos Campos de Altitude do Estado do Rio de Janeiro?. *Biodiversidade Brasileira*, v. 1, n. 2, pp.180-200. (In Portuguese)

Aximoff I, Nunes-Freitas A F, Braga JMA (2016) Regeneração natural pós-fogo nos campos de altitude no Parque Nacional do Itatiaia, sudeste do Brasil. *Oecologia Australis*. <https://doi.org/10.4257/oeco.2016.2002.05>. (In Portuguese)

Bates D, et al. (2015). Package ‘lme4’. *convergence*, 12(1), 2.

Bergamo PJ, et al. (2017) The potential indirect effects among plants via shared hummingbird pollinators are structured by phenotypic similarity. *Ecology*, v. 98(7), pp. 1849-1858. <https://doi.org/10.1002/ecy.1859>

Bergamo PJ, Streher NS, Wolowski M, Sazima M (2020) Pollinator-mediated facilitation is associated with floral abundance, trait similarity and enhanced community-level fitness. *Journal of Ecology*, v. 108(4), pp. 1334-1346. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13348>

Bergamo PJ, Traveset A, Lázaro A (2021). Pollinator-mediated indirect effects on plant fecundity revealed by network indices. *The American Naturalist*, 198(6), 734-749.

Bergamo PJ, Freitas L, Sazima M, Wolowski M (2022) Pollinator-mediated facilitation alleviates pollen limitation in a plant–hummingbird network. *Oecologia*, v. 198(1), 205-217. <https://doi.org/10.1007/s00442-021-05095-3>

Buzato S, Sazima M, Sazima I (2000) Hummingbird-pollinated floras at three Atlantic Forest sites 1. *Biotropica*, v. 32, n. 4b, pp. 824-841. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00621.x>

- Carvalho LG, Biesmeijer JC, Benadi G, et al. (2014) The potential for indirect effects between co-flowering plants via shared pollinators depends on resource abundance, accessibility and relatedness. *Ecology letters*, v. 17, n. 11, pp. 1389-1399. <https://doi.org/10.1111/ele.12342>
- Castro-Arellano I, Lacher Jr TE, Willig MR, Rangel TF (2010) Assessment of assemblage-wide temporal niche segregation using null models. *Methods in ecology and evolution*, v. 1(3), pp. 311-318. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00031.x>
- Castro CSS (2010) Pesquisa com primatas em ambiente natural: técnicas para coleta de dados ecológicos e comportamentais. *R Soc Bras Prog Ciênc*, v. 62, p. 1-27. (In Portuguese)
- CNCFlora. *Fernseea itatiaiae* in Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em <[http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Fernseea itatiaiae](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Fernseea%20itatieiae)>. Acesso em 8 janeiro 2024.
- Freitas L, Sazima M (2006) Pollination biology in a tropical high-altitude grassland in Brazil: interactions at the community level. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, pp. 465-516. [https://doi.org/10.3417/0026-6493\(2007\)93\[465:PBIATH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3417/0026-6493(2007)93[465:PBIATH]2.0.CO;2)
- Ferreira PA, Boscolo D, Viana BF (2013). What do we know about the effects of landscape changes on plant–pollinator interaction networks?. *Ecological Indicators*, 31, 35-40.
- González AMM, Dalsgaard B, Olesen JM (2010) Centrality measures and the importance of generalist species in pollination networks. *Ecological complexity*, v. 7, n. 1, pp. 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.03.008>
- Grantsau R (1988) Os beija-flores do Brasil. Rio de Janeiro, Ed. Expressão e Cultura, p. 233. (In Portuguese)
- Groom MJ (1998) Allee effects limit population viability of an annual plant. *Am. Nat.* 151, 487–496
- Hartig F & Hartig MF (2017). Package ‘dharma’. *R package*.
- Kessous IM, Freitas L (2023) Implementing spatial analyses to measure angiosperm biodiversity from the high-altitude grasslands of the Atlantic forest. *Alpine Botany*, v. 133, pp. 163-178. <https://doi.org/10.1007/s00035-023-00298-1>
- Lázaro A, et al. (2019). Linking species-level network metrics to flower traits and plant fitness. *Journal of Ecology*, v. 108, n. 4, pp.1287-1298. doi:10.1111/1365-2745.13334
- Lima HA (1988) Heterostilia em *Psychotria leiocarpa* Cham. & Schl. (Rubiaceae). *Boletim do Museu Nacional* v. 76, pp. 1-16.
- Lopes SA, Bergamo PJ, Rech AR (2023). Effect of plant traits and network metrics on pollen limitation in hummingbird-pollinated plants from the Brazilian Campos Rupestres. *Flora*, v. 309, p. 152404. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152404>
- Machado CG, Semir J (2006) Fenologia da floração e biologia floral de bromeliáceas ornitófilas de uma área da Mata Atlântica do Sudeste brasileiro. *Brazilian Journal of Botany*, v. 29, pp. 163-174. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042006000100014>

- Maglianesi MA, et al. (2015) Functional structure and specialization in three tropical plant–hummingbird interaction networks across an elevational gradient in Costa Rica. *Ecography*, v. 38, n. 11, p. 1119-1128. <https://doi.org/10.1111/ecog.01538>
- Maruyama PK, et al. (2014) Morphological and spatio-temporal mismatches shape a neotropical savanna plant-hummingbird network. *Biotropica*, v. 46, n. 6, p. 740-747. <https://doi.org/10.1111/btp.12170>
- Magalhães AFP (2017) Interação beija-flores e bromélias de uma formação aberta de restinga. 2017. 55f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Conservação. (In Portuguese)
- Martinelli G, Moraes MA (2013) Desafios para implementação da estratégia global para a conservação de plantas no Brasil. In: Martinelli, G, Moraes, M.A. (Orgs). Livro vermelho da flora do Brasil. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson. pp. 26-39. (In Portuguese)
- Medina BMO, Ribeiro KT, Scarano FR (2006) Plant–Plant and Plant–Topography Interactions on a Rock Outcrop at High Altitude in Southeastern Brazil 1. *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation*, 38(1), 27-34. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00105.x>
- Mittermeier RA, et al. (2011) Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In *Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 3-22.
- Moreira MM, et al. (2020) Using online databases to produce comprehensive accounts of the vascular plants from the Brazilian protected areas: The Parque Nacional do Itatiaia as a case study. *Biodiversity Data Journal*, v. 8. <https://doi.org/10.3897/BDJ.8.e50837>
- Müller CB, et al. (1999) The structure of an aphid–parasitoid community. *Journal of Animal Ecology*, v. 68(2), pp. 346-370. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.1999.00288.x>
- Nottebrock H, et al. (2017) Sugar landscapes and pollinator-mediated interactions in plant communities. *Ecography*, 40(9), 1129-1138. <https://doi.org/10.1111/ecog.02441>
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S (2011) How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, v. 120, n. 3, pp. 321-326. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>
- Rasera GB, de Castro RJS (2020) Germinação de grãos: uma revisão sistemática de como os processos bioquímicos envolvidos afetam o conteúdo e o perfil de compostos fenólicos e suas propriedades antioxidantes. *Brazilian Journal of Natural Sciences*, 3(1), 287. <https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.90>
- R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Rivkin LR, et al. (2020) Variation in pollinator-mediated plant reproduction across an urbanization gradient. *Oecologia*, v. 192, pp. 1073–1083. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04621-z>
- Rodger JG, et al. (2021) Widespread vulnerability of flowering plant seed production to pollinator declines. *Science advances*, v. 7, n. 42, p. eabd3524. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14607882>

- Rombaut LMK et al. (2022) The evolution of the traplining pollinator role in hummingbirds: specialization is not an evolutionary dead end. *Proc. R. Soc. B* 289: 20212484. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.2484>
- Safford HD (1999) Brazilian Páramos I. An introduction to the physical environment and vegetation of the campos de altitude. *Journal of Biogeography*, v. 26, n. 4, 693-712. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1999.00313.x>
- Sargent, R. D., & Ackerly, D. D. (2008). Plant–pollinator interactions and the assembly of plant communities. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(3), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.11.003>
- Sazima I, Buzato S, Sazima M (1996) An assemblage of hummingbird-pollinated flowers in a montane forest in southeastern Brazil. *Botanica Acta*, v. 109, n. 2, p. 149-160. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1996.tb00555.x>
- Schluter D (2000) Ecological character displacement in adaptive radiations. *Am. Nat.* 156, S4–S16
- Sick H (1984) *Ornitologia brasileira: uma introdução*. Vol. 1. Editora Universidade de Brasília, Brasília, DF. (In Portuguese)
- Smith LB, Downs RJ (1979) *Bromeliaceae (Bromelioideae)*. New York: Haffner Press.
- Souza VC, Lorenzi H (2005) *Botânica sistemática: guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II*. (In Portuguese)
- Tavares DC, Freitas L, Gaglianone MC (2016) Nectar volume is positively correlated with flower size in hummingbird-visited flowers in the Brazilian Atlantic forest. *J. Trop. Ecol.* 32, 335–339. (doi:10.1017/S0266467416000250)
- Vizentin-Bugoni J, Maruyama PK, Sazima M (2014) Processes entangling interactions in communities: forbidden links are more important than abundance in a hummingbird–plant network. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 281(1780), p. 20132397. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2397>
- Whitehead M R et al. (2018). Plant mating systems often vary widely among populations. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, p.38. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00038>
- Wolowski M, Ashman TL, Freitas L (2014) Meta-analysis of pollen limitation reveals the relevance of pollination generalization in the Atlantic forest of Brazil. *PLoS One*, v. 9, n. 2, p. e89498, 2014a. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089498>
- Wolowski M, Carnevalheiro LG, Freitas L (2017) Influence of plant–pollinator interactions on the assembly of plant and hummingbird communities. *Journal of Ecology*, v. 105, n. 2, p. 332-344. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12684>
- Zambon V (2020) *Dinâmica de produção de néctar e estratégias reprodutivas em Bromeliaceae: uma abordagem morfofuncional*, 2020. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Campinas, SP.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos apontam que a bromélia ornitófila *Fernseea itatiaiae* apresenta baixa frequência de visitantes florais e menor abundância de indivíduos em floração em comparação com outras espécies ornitófilas na comunidade da parte alta do Parque Nacional do Itatiaia. Dessa forma, esperávamos que ela ocupasse uma posição mais periférica na rede de interações, sendo afetada em relação ao contexto comunitário de floração com outras ornitófilas e interações com beija-flores.

Entretanto, a partir das análises de suas características reprodutivas e da rede de interações planta-beija-flor na comunidade de ornitófilas, nosso estudo mostrou que a espécie focal *F. itatiaiae* apresenta papel mais central na rede, possivelmente mediando processos de compartilhamento de polinizadores. A ausência de limitação polínica na espécie e a menor importância de competição observada na comunidade possivelmente indica um reflexo deste papel central na rede. Dessa forma, além de contribuir para a manutenção de espécies vegetais no ambiente, *F. itatiaiae* também contribui para a permanência de espécies de beija-flores responsáveis pela polinização de outras espécies ornitófilas da comunidade estudada.

Além disso, seu sistema reprodutivo e as nossas análises revelaram que seu sucesso reprodutivo está relacionado às visitas dos beija-flores, resultando em maiores valores de polinização natural, o que foi evidenciado pela taxa de frutificação e produção de sementes nos experimentos. Entretanto, nosso resultado variou em relação aos valores de polinização natural, em comparação com o estudo prévio de Zambon (2020), demonstrando a importância de múltiplas avaliações da reprodução de *F. itatiaiae*, considerando que a espécie pode investir em autopolinização quando as visitas diminuem como uma estratégia para manter a reprodução mesmo em déficit de polinização.

Com isso, reforçamos que estudos voltados para espécies ameaçadas de extinção são de grande necessidade, uma vez que essas informações são necessárias para que se possam propor políticas públicas voltadas para a conservação dessas espécies, principalmente em Unidades de Conservação. Ressaltamos também a importância de estudos voltados para redes de interações ecológicas nos campos de altitude, aplicando métricas de fenologia e redes que possibilitam entender como ocorre a reprodução de determinadas espécies, e a importância delas para a manutenção de polinizadores no local.

REFERÊNCIAS

- AXIMOFF, Izar; NUNES-FREITAS, André Felipe; BRAGA, João Marcelo Alvarenga. Regeneração natural pós-fogo nos campos de altitude no Parque Nacional do Itatiaia, sudeste do Brasil. **Oecologia Australis**, [S. l.] v. 20, n. 02, p. 200-218, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4257/oeco.2016.2002.05>.
- BERGAMO, Pedro Joaquim *et al.* The potential indirect effects among plants via shared hummingbird pollinators are structured by phenotypic similarity. **Ecology**, [S. l.] v. 98, n. 7, p. 1849-1858, 12 jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ecy.1859>.
- BUZATO, Silvana; SAZIMA, Marlies; SAZIMA, Ivan. Hummingbird-Pollinated Floras at Three Atlantic Forest Sites. **Biotropica**, [S. l.] v. 32, n. 4b, p. 824-841, dez. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00621.x>.
- FAEGRI Knut, VAN DER PIJL Leendert. A short history of the study of pollination ecology. **The Principles of pollination ecology**, [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 1-77, 1979. ISBN 9781483293035.
- GEGEAR, Robert J.; BURNS, Rebecca; SWOBODA-BHATTARAI, Katharine A. “Hummingbird” floral traits interact synergistically to discourage visitation by bumble bee foragers. **Ecology**, [S. l.] v. 98, n. 2, p. 489-499, 9 jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ecy.1661>.
- KEMP, Jurene E. *et al.* Dominant pollinators drive non-random community assembly and shared flower colour patterns in daisy communities. **Annals of Botany**, [S. l.] v. 123, n. 2, p. 277-288, 10 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aob/mcy126>.
- MACHADO, Caio Graco; SEMIR, João. Fenologia da floração e biologia floral de bromeliáceas ornitófilas de uma área da Mata Atlântica do Sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Botânica**, [S. l.] v. 29, n. 1, p. 163-174, mar. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-84042006000100014>.
- MOREIRA, Marina *et al.* Using online databases to produce comprehensive accounts of the vascular plants from the Brazilian protected areas: The Parque Nacional do Itatiaia as a case study. **Biodiversity Data Journal**, [S. l.] v. 8, 19 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/bdj.8.e50837>.
- OLLERTON, Jeff; WINFREE, Rachael; TARRANT, Sam. How many flowering plants are pollinated by animals? **Oikos**, [S. l.] v. 120, n. 3, p. 321-326, 21 fev. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>.
- RODGER, James G. *et al.* Widespread vulnerability of flowering plant seed production to pollinator declines. **Science Advances**, [S. l.] v. 7, n. 42, 15 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3524>.
- SAZIMA, I.; BUZATO, Silvana; SAZIMA, Marlies. An Assemblage of Hummingbird-pollinated Flowers in a Montane Forest in Southeastern Brazil. **Botanica Acta**, [S. l.] v. 109, n. 2, p. 149-160, abr. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1996.tb00555.x>.

SICK, Helut. **Ornitologia brasileira: uma introdução**. Vol. 1. Editora Universidade de Brasília, Brasília, DF. 1984

SONNE, Jesper *et al.* The distributions of morphologically specialized hummingbirds coincide with floral trait matching across an Andean elevational gradient. **Biotropica**, [S. l.] v. 51, n. 2, p. 205-218, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/btp.12637>. Acesso em: 15 maio 2024.

TONG, Ze-Yu *et al.* New calculations imply that 90% of flowering plant species are animal-pollinated. **National Science Review**, [S. l.] 11 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad219>.

WOLOWSKI, Marina *et al.* Predominance of self-compatibility in hummingbird-pollinated plants in the Neotropics. **Naturwissenschaften**, [S. l.] v. 100, n. 1, p. 69-79, 23 nov. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00114-012-0995-0>.

WOLOWSKI, Marina; CARVALHEIRO, Luísa G.; FREITAS, Leandro. Influence of plant-pollinator interactions on the assembly of plant and hummingbird communities. **Journal of Ecology**, [S. l.] v. 105, n. 2, p. 332-344, 10 nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12684>.

APÊNDICE A - MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela 1. Número de visitas de cada espécie de beija-flor e tempo total de observação (horas) para 11 espécies ornitófilas que ocorrem na parte alta do Parque Nacional do Itatiaia, durante o período de setembro de 2022 a fevereiro de 2023.

	<i>Clytolaema rubricauda</i>	<i>Colibri serrirostris</i>	<i>Stephanoxis lalandi</i>	<i>Thalurania glaucopis</i>	Tempo total de observação (horas)
<i>Agarista hispidula</i>	0	12	15	0	10
<i>Alstroemeria foliosa</i>	0	3	0	0	10
<i>Alstroemeria isabelleana</i>	5	25	19	0	14
<i>Buddleja speciosissima</i>	0	22	1	33	11
<i>Fernseea itatiaiae</i>	0	49	6	50	16
<i>Fuchsia campos-portoi</i>	0	17	23	0	12
<i>Fuchsia regia</i>	56	0	37	0	11
<i>Gaultheria serrata</i>	0	0	18	0	10
<i>Lepechinia speciosa</i>	0	0	4	0	12
<i>Salvia itatiaiensis</i>	1	0	23	0	10
<i>Siphocampylus westinianus</i>	0	26	0	0	10