

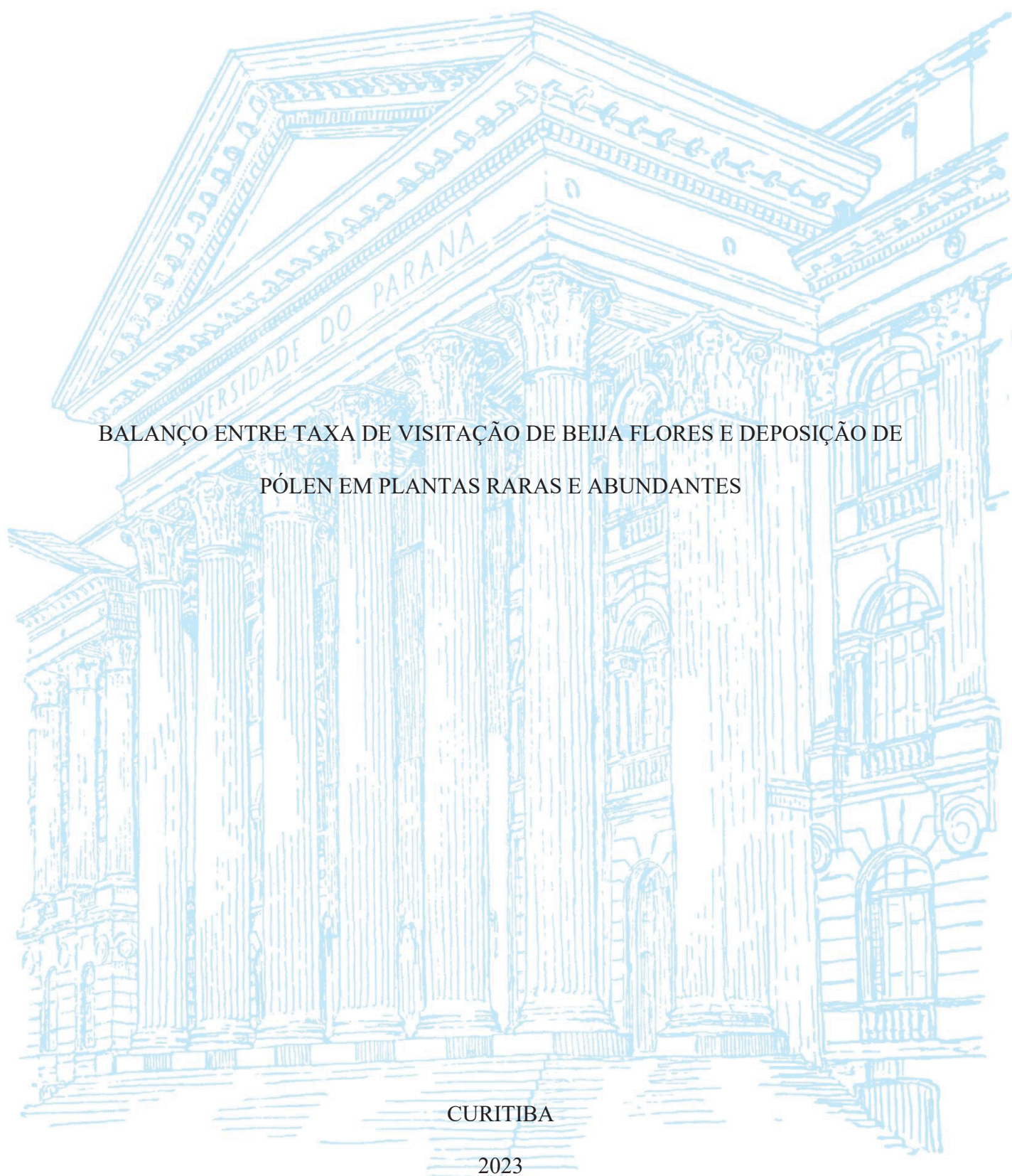
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANILA SYRIANI VELUZA

BALANÇO ENTRE TAXA DE VISITAÇÃO DE BEIJA FLORES E DEPOSIÇÃO DE
PÓLEN EM PLANTAS RARAS E ABUNDANTES

CURITIBA

2023



DANILA SYRIANI VELUZA

BALANÇO ENTRE TAXA DE VISITAÇÃO DE BEIJA FLORES E DEPOSIÇÃO DE
PÓLEN EM PLANTAS RARAS E ABUNDANTES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Botânica, Setor de Ciências Biológicas, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Botânica.

Orientadora: Profa. Dra. Isabela Galarda Varassin

Coorientador: Dr. Tiago Machado-de-Souza

CURITIBA,

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Veluza, Danila Syriani.

Balanço entre taxa de visitação de beija flores e deposição de pólen em plantas raras e abundantes. / Danila Syriani Veluza. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Botânica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Isabela Galarda Varassin.

Coorientador: Dr. Tiago Machado-de-Souza.

1. Polinização. 2. Beija-flor. 3. Plantas raras. 4. Competição (Biologia). 5. Biologia do espaço. I. Varassin, Isabela Galarda. II. Souza, Tiago Machado de, 1987-. III. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Botânica. IV. Título.

Bibliotecária: Rosilei Vilas Boas CRB-9/939



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BOTÂNICA -
40001016004P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BOTÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de DANILA SYRIANI VELUZA intitulada: **BALANÇO ENTRE TAXA DE VISITAÇÃO DE BEIJA FLORES E DEPOSIÇÃO DE PÓLEN EM PLANTAS RARAS E ABUNDANTES.**, sob orientação da Profa. Dra. ISABELA GALARDA VARASSIN, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 22 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

22/09/2023 10:24:15.0

ISABELA GALARDA VARASSIN

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

22/09/2023 12:19:36.0

PEDRO JOAQUIM BERGAMO

Avaliador Externo (INSTITUTO DE PESQUISAS JARDIM BOTANICO DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

22/09/2023 10:58:52.0

ELISA BARRETO PEREIRA

Avaliador Externo (SWISS FEDERAL RESEARCH INSTITUTE WSL, BIRMENSODRF)

Dedico aos meus amores: família, amigos e companheiro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Muriel e Robson, por desde os anos 90 lutarem tanto para me possibilitar tantas alegrias na vida. Queria que soubessem o quão grandiosos são para mim.

Agradeço meus irmãos, Baru e Miurele. Mesmo que em casas diferentes agora, continuo amando e odiando vocês sempre (quem tem irmão sabe rs). São vocês meu elo com meu eu criança. São com vocês que compartilho as memórias mais antigas e importantes da minha vida. Vocês são insubstituíveis.

Agradeço meu companheiro, André, que me acolheu na passagem mais turbulenta e preciosa da minha vida até agora. Obrigada por segurar minha mão e por tantas horas de conversas sobre a vida e os sentimentos. Eu amo a nossa troca. Minha nova família de 5 com o Brau, Bromélia e Brisa.

Agradeço meus colegas da botânica, nem mais nem menos que meus colegas da ecologia, ok? Agradeço ao meu ecólogo preferido, meu amigo Junynho. Sua presença me traz paz amigo, mesmo no caos. Obrigada por tantas risadas de doer a barriga.

Agradeço ao Parque Estadual Serra do Mar pela autorização de estudo no núcleo Cunha (SMA 0260108–005.133/2019), ao Mater Natura - Instituto de Estudos Ambientais pelo apoio logístico, especialmente Helena Zarantonieli e Paulo Pizzi. Agradeço aos membros do laboratório LINTER, principalmente meus orientadores. Agradeço à equipe do projeto EPHI pelos apontamentos no desenvolvimento dessa pesquisa e aos colegas que participaram da coleta de dados comigo: Bryan, Rafas e Rômulo. Esse estudo foi financiado pela CAPES (Finance Code 001 to DV), Mater Natura, Parque Estadual Serra do Mar (SMA 0260108–005.133/2019), ERC (grant 787638, Catherine H. Graham, projeto EPHI), WSL, CNPq (grant 312580/2020-7, IGV).

RESUMO

Competição e facilitação mediada por polinizadores são interações fundamentais na manutenção de comunidades de plantas ao permitirem a coexistência de espécies raras e abundantes. Para entender a dinâmica desses processos, nós avaliamos o efeito da denso-dependência na taxa de visitação e nos tubos polínicos em plantas polinizadas por beija-flor. Além disso, comparamos a similaridade e contribuição funcional das plantas raras e abundantes em competição e facilitação. Identificamos denso-dependência coespecífica negativa na taxa de visitação, mas sem efeito nos tubos polínicos. A similaridade funcional entre as plantas raras e abundantes não variou em contextos distintos de facilitação e competição, com maior contribuição funcional por parte das raras. Nossos resultados indicam a relevância da abundância coespecífica como preditor para inferir interações e padrões de diversidade funcional. A manutenção tanto de atributos mais semelhantes como mais extremos e distantes das raras podem ser uma outra forma de garantir sua vantagem em alta densidade heteroespecífica.

Palavras-chave: polinização por beija-flor, denso-dependência negativa, facilitação, espaço funcional.

ABSTRACT

Pollinator-mediated competition and facilitation are key to maintaining plant communities by allowing rare and abundant species to coexist. To understand the dynamics of these processes, we evaluated the effect of dense dependence on visitation rates and pollen tubes in hummingbird-pollinated plants. Furthermore, we calculate the functional similarity and contribution of rare and abundant plants in competition and facilitation. We identified negative dense-dependence on the visitation rate, but with no effect on pollen tubes. Functional similarity between rare and abundant plants did not vary in different contexts of facilitation and competition, with greater functional contribution by rare ones. Our results indicate the relevance of conspecific abundance as a predictor to infer interactions and patterns of functional diversity. The maintenance of both more similar and more extreme traits from rare species may be another way to guarantee their advantage in high heterospecific density.

Keywords: Hummingbird pollination, Negative density-dependence, Facilitation, Functional space.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hipóteses do estudo. a) Efeito da densidade floral heteroespecífica e coespecífica na taxa de visitação. Espécies com densidade coespecífica alta (plantas abundantes) apresentam menor taxa de visitação em densidade heteroespecífica alta. Espécies com densidade coespecífica baixa (raras) apresentam maior taxa de visitação em densidade heteroespecífica alta, indicando vantagem da raridade, portanto denso-dependência negativa; b) Efeito da denso-dependência negativa na riqueza e sobreposição funcional das plantas. Na facilitação esperamos que as plantas raras e abundantes apresentem maior sobreposição do espaço funcional. Na competição esperamos menor sobreposição funcional.	11
Figura 2. Cálculo das métricas funcionais a partir do espaço funcional das plantas abundantes e raras. a) A riqueza funcional da comunidade corresponde à área total do espaço funcional que as plantas raras e as abundantes cobrem juntas, contando apenas uma vez o espaço que se sobrepõe; b e c) A riqueza funcional das plantas raras e abundantes é o tamanho da área que seus espaços funcionais ocupam separadamente; d) A similaridade funcional corresponde à área de sobreposição dos espaços funcionais; f) A contribuição funcional das plantas raras e abundantes para a riqueza funcional da comunidade corresponde a área não sobreposta somada à área sobreposta dividido por dois.	16
Figura 3. Plantas que ocorreram nos transectos e beija-flores registrados pelas câmeras time-lapse. A) <i>Nidularium innocentii</i> . B) <i>Tillandsia stricta</i> ; C) <i>Siphocampylus longipedunculatus</i> ; D) <i>Phaethornis eurynome</i> visitando <i>Siphocampylus longipedunculatus</i> ; E) Macho de <i>Thalurania glaucopis</i> visitando <i>Aechmea distichantha</i> ; F) Fêmea de <i>Heliodoxa rubricauda</i> visitando <i>Aechmea bocainensis</i>	18
Figura 4. Efeito da densidade floral heteroespecífica e coespecífica na taxa de visitação em escala local. Os pontos representam os resíduos parciais do modelo depois de fixar os efeitos das demais variáveis explanatórias. Em vermelho, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica baixa (até o 2º quartil, plantas raras); em verde, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica média (entre o 2º e 3º quartil); em azul, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica alta (acima do 3º quartil, plantas abundantes).	19
Figura 5. Tubos polínicos em estiletes de três espécies distintas por microscopia de fluorescência. a) <i>Nidularium rutilans</i> com aumento de 20x; b) <i>Siphocampylus longipedunculatus</i> com aumento de 40x; c) <i>Aechmea cylindrata</i> com aumento de 40x. Setas indicam os tubos polínicos.	20
Figura 6. Análise mensal da variação do espaço funcional das plantas raras (em vermelho), médias (em verde) e abundantes (em azul) em cenário de competição e facilitação levando em conta a denso-dependência negativa.	21
Figura 7. Diferença da riqueza funcional das plantas raras (vermelho) e abundantes (azul). Os retângulos indicam o segundo e terceiro quartis, a linha preta de dentro indica a mediana, e as linhas que se estendem acima e abaixo das caixas indicam os quartis inferior e superior.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes do modelo GLMM para taxa de visitação. Valores em negritos representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$).	19
Tabela 2. Coeficientes do modelo GLMM para tubos polínicos. Nenhum dos valores representam valores estatisticamente significativos ($p < 0.05$).	20
Tabela 3. Comparação da riqueza e contribuição funcional entre as plantas raras e abundantes pelos testes de Mann-Whitney e distância euclidiana. Os valores em negrito são estatisticamente significativos ($p < 0.05$).	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAIS E MÉTODOS	11
2.1 TAXA DE VISITAÇÃO E ABUNDÂNCIA FLORAL	11
2.2 AVALIAÇÃO DA DEPOSIÇÃO POLÍNICA	13
2.3 MÉTRICAS FUNCIONAIS	14
3 RESULTADOS	17
3.1 TAXA DE VISITAÇÃO E ABUNDÂNCIA FLORAL	17
3.2 AVALIAÇÃO DA DEPOSIÇÃO POLÍNICA	19
3.3 MÉTRICAS FUNCIONAIS	20
4 DISCUSSÃO	23
REFERÊNCIAS	25
APÊNDICE 1 –As médias das medidas do comprimento da corola, curvatura e volume floral para cada espécie de planta são baseadas no número de flores, independentemente de elas pertencerem a diferentes indivíduos. Espécies com NA representam as espécies que não foi possível obter as medidas. As espécies em negrito são aquelas amostradas para análise dos tubos polínicos.	30
APÊNDICE 2. CURVAS DE RAREFAÇÃO DAS INTERAÇÕES PLANTA-BEIJÁ-FLOR OBSERVADAS (VERDE) E ESTIMADAS (PRETO) NOS TRÊS TRANSECTOS (A, B E C) NO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR - NÚCLEO CUNHA-SP.....	34
APÊNDICE 3. COEFICIENTES DO MODELO GLM PARA RIQUEZA FUNCIONAL. VALORES EM NEGRITOS REPRESENTAM VALORES ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVOS (VALOR-P <0,05).	35
APÊNDICE 4. MÉTRICAS FUNCIONAIS E RESULTADOS DO TESTE DE MANN-WHITNEY COMPARANDO PLANTAS RARAS E ABUNDANTES EM FACILITAÇÃO E COMPETIÇÃO. NENHUMA MÉTRICA FOI SIGNIFICATIVA (P>0,05).	36
APÊNDICE 5. MÉTRICAS FUNCIONAIS, A PARTIR DA FUNÇÃO Dbfd(), E RESULTADOS DO TESTE DE MANN-WHITNEY COMPARANDO PLANTAS RARAS E ABUNDANTES EM FACILITAÇÃO E COMPETIÇÃO, CONSIDERANDO TODOS OS MESES, NÃO SOMENTE AQUELES QUE FORMARAM ESPAÇO FUNCIONAL. NENHUMA MÉTRICA FOI SIGNIFICATIVA (P>0,05).	37

1 INTRODUÇÃO

Espécies de plantas que compartilham polinizadores podem tanto competir entre elas indiretamente, como ter efeitos positivos umas sobre as outras (Rathcke, 1983). Esses dois processos, conhecidos como competição e facilitação respectivamente, desempenham papéis dinâmicos e significativos na organização de comunidades de plantas (Phillips et al., 2020; Pauw, 2013). Ao variarem em importância no tempo e no espaço, de acordo com a disponibilidade de recursos aos polinizadores, permitem que espécies abundantes e raras coexistam (Bergamo et al., 2020a). Em comunidades com baixa quantidade de recursos aos polinizadores, as plantas competem por polinizador e aquelas mais abundantes levam vantagem (Bergamo et al., 2020a; Ghazoul, 2005). Já em alta quantidade de recursos aos polinizadores, as espécies mais abundantes favorecem a visitação às espécies mais raras que se beneficiam pela atração conjunta (Bergamo et al., 2020a; Pauw, 2013;).

Para entender como a competição e a facilitação por polinizador estão atuando em uma comunidade, é preciso avaliar as variações das densidades florais e sua relação com a polinização (Benadi & Pauw, 2018). Os resultados da polinização podem ser quantificados por meio do número de visitas, mas dessa forma não leva em conta o quão eficiente foram as visitas (Bergamo et al., 2020a). A quantidade de grãos de pólen depositada no estigma da flor e o crescimento de tubos polínicos no estilete são comumente utilizados como indicativos da contribuição dos polinizadores para o sucesso reprodutivo feminino. Enquanto a taxa de visitação permite acesso aos efeitos quantitativos da polinização, o pólen e, mais precisamente, os tubos polínicos permitem avaliar os efeitos qualitativos (Alonso et al., 2012).

Além da abundância floral, os padrões de atributos reprodutivos de uma comunidade também refletem a dinâmica entre competição e facilitação por polinizador (Bergamo et al., 2020a). A facilitação pode agir favorecendo a similaridade de atributos florais das espécies, chamada de facilitação por meio do benefício da atração conjunta de polinizadores, ou

favorecendo a diversidade de atributos das espécies ao atrair e manter maior diversidade de polinizadores, chamada de facilitação por meio da diversidade floral (Bergamo et al., 2020b; Ghazoul, 2006). Maior diversidade de atributos já foi também associado à competição que agiria como uma força de seleção para evitar a exclusão competitiva das espécies (Bergamo et al., 2020b). Isto quer dizer que o mesmo processo pode levar a diferentes padrões, a depender da densidade floral da comunidade e do nível de especialização do grupo funcional que poliniza (Bergamo et al., 2020b).

No presente estudo, nós avaliamos o efeito da densidade floral coespecífica e heteroespecífica na taxa de visitação e nos tubos polínicos em plantas polinizadas por beija-flor. Com base na taxa de visitação, inferimos o processo (competição ou facilitação) e a partir dele avaliamos a riqueza e similaridade funcional entre raras e abundantes. Relacionar os processos de facilitação e competição com padrões de abundância e funcionais é um primeiro passo para entender as diferenças ecológicas entre plantas raras e abundantes e inferir os efeitos da polinização na manutenção da comunidade.

Esperamos que em baixa densidade floral heterospecífica, as plantas raras apresentem menor taxa de visitas e deposição polínica que as abundantes. Em alta densidade heterospecífica, esperamos que as plantas raras apresentem maior taxa de visitas que as abundantes, devido à competição intraespecífica entre abundantes e à facilitação de abundantes para raras (Fig. 1a). Em cenários de facilitação, esperamos que as plantas raras e abundantes apresentem maior similaridade de atributos, resultando em espaços funcionais mais sobrepostos quando comparado ao cenário em competição (Fig. 1b).

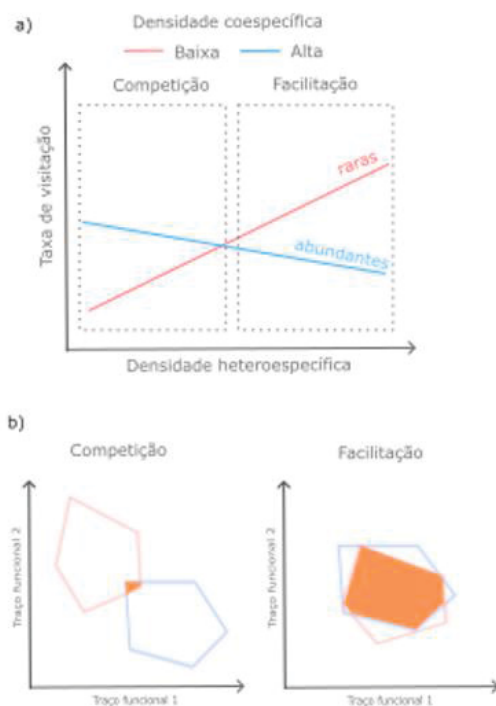


Figura 1. Hipóteses do estudo. a) Efeito da densidade floral heteroespecífica e coespecífica na taxa de visitação. Espécies com densidade coespecífica alta (plantas abundantes) apresentam menor taxa de visitação em densidade heteroespecífica alta. Espécies com densidade coespecífica baixa (raras) apresentam maior taxa de visitação em densidade heteroespecífica alta, indicando vantagem da raridade, portanto denso-dependência negativa; b) Efeito da denso-dependência negativa na riqueza e sobreposição funcional das plantas. Na facilitação esperamos que as plantas raras e abundantes apresentem maior sobreposição do espaço funcional. Na competição esperamos menor sobreposição funcional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 TAXA DE VISITAÇÃO E ABUNDÂNCIA FLORAL

Nós coletamos os dados no Parque Estadual Serra do Mar – Núcleo Cunha (PESM-Cunha, 23°09' S, 44°57' W,), sudeste do Brasil. As áreas estão localizadas a 1.100 m acima do nível do mar, em floresta ombrófila densa submontana. Nós visitamos o local uma vez por mês entre dezembro de 2019 a abril de 2022, exceto de abril a setembro de 2020, março e abril de 2021, devido às restrições impostas pelo COVID-19, totalizando 21 meses de coleta de dados.

Nós definimos três transectos em trilhas já existentes, cada um com 1,5 km de extensão e 10 m de largura. Em cada censo mensal, instalamos seis câmeras tipo *time-lapse* (*Plotwatcher Pro*) em cada transecto. Nós posicionamos as câmeras em frente às plantas focais com flores potencialmente polinizadas por beija-flores e as distribuímos ao longo do transecto de modo que ficassem com uma distância mínima de dez metros entre elas, quando possível. As câmeras

registraram uma foto por segundo e após três dias nós as reposicionamos em outras seis plantas focais para gravar por mais três dias, totalizando 36 câmeras/mês.

Devido ao número de fotos registradas, nós processamos as gravações no Software Deep Meerkat, que selecionou apenas as imagens com movimento (Weinstein, 2015). Revisamos manualmente as imagens selecionadas e mantivemos apenas aquelas que continham interação com beija-flores. Com essas imagens, quantificamos o número de visitas e identificamos as espécies de beija-flores que interagiram com cada planta focal. Nós contabilizamos como uma única visita as imagens de interação da mesma espécie de beija-flor com menos de 20 segundos de diferença entre elas, de forma a evitar recontagem.

Nós realizamos a amostragem mensal da densidade de flores visitadas por beija-flores presentes em cada transecto. A contagem era independente de ser ou não o mesmo indivíduo. Nós contamos de forma direta quando a quantidade de flores total era menor de 50 flores e fizemos uma estimativa quando em um ponto havia mais de 50 flores da mesma espécie. Neste último caso, nós separamos as flores em unidades de mesmo tamanho (ramos ou inflorescências), contamos as flores de cinco unidades e multiplicamos a média dessas cinco unidades pelo número total de unidades no ponto. Consideramos como densidade floral local a densidade de coespecíficos e heteroespecíficos em cada transecto.

Estimamos a completude amostral das interações com base no estimador Chao1 da riqueza de espécies adaptado para estimar a riqueza de interações (Chacoff et al. 2012), considerando o número de interações observadas para cada par de interação planta e beija-flor, ou seja, uma interação única. Calculamos a completude da amostragem como a razão entre a riqueza observada e estimada das interações (Chacoff et al. 2012). O estimador Chao 1 foi calculado usando o pacote “iNEXT” (Hsieh et al. 2014) no ambiente R 4.1.2 (R Core Team, 2023)

Nós ajustamos modelos generalizados mistos (GLMMs) para avaliar o efeito da densidade floral local na taxa de visitação por beija-flores. Nós transformamos a variável resposta (número de visitas na planta focal) em taxa de visitação (visitas/hora) ao incluir o número de horas filmadas, com transformação logarítmica, como *offset* no modelo. Nós determinamos três variáveis fixas a partir da inclusão da densidade floral coespecífica e heteroespecífica local e a interação entre elas como variáveis preditoras no modelo. Nós aplicamos a transformação *z* aos dados de densidade floral para padronização deles, de forma que os valores originais fossem ajustados para terem uma média igual a zero e um desvio padrão igual a um. Incluímos as variáveis meses, espécies das plantas e transectos como fontes de variação aleatórias no intercepto que podem influenciar a taxa de visitação. O modelo seguiu uma estrutura de erro *Poisson* com função de ligação *log* e foi ajustado com a função *glmer* do pacote *lme4* (Bates et al., 2015) do R 4.1.2 (R Core Team, 2023). Para acessar as espécies raras e abundantes, a densidade coespecífica foi dividida em alta, média e baixa, com base nos quartis da amostra. Espécies de plantas com densidade floral coespecífica menor ou igual ao 2º quartil foram classificadas como raras, entre o 2º e 3º quartil foram classificadas como médias, e maiores ou igual ao 3º quartil como abundantes.

Definimos cenários de competição e facilitação para cada mês conforme a variação da taxa de visitação em relação ao mês anterior. Quando a taxa de visitação das espécies raras aumentou em relação ao mês anterior, classificamos aquele mês como prevalecendo facilitação; quando houve redução, classificamos como prevalecendo competição.

2.2 AVALIAÇÃO DA DEPOSIÇÃO POLÍNICA

Para cada flor com interações registradas com as câmeras *time-lapse*, coletamos a flor mais antiga ao final do terceiro dia de gravação e a preservamos em FAA 40% (Formaldeído ácido-acético). Em laboratório, nós clareamos os carpelos em solução de NaOH 6M a 60°C por 40 min, coramos com azul de anilina (Martin, 1959) e contamos os tubos polínicos por meio

de microscopia de fluorescência. Nós realizamos a contagem dos tubos polínicos na região próxima ao estigma e na região intermediária do estilete sentido ovário. Optamos por calcular a média das duas contagens em diferentes alturas do estigma, porque mesmo tubos polínicos compatíveis podem ter desempenhos diferentes. O cálculo desta média minimiza o efeito dessa variação ao considerar a taxa de perda de tubos polínicos dentro do estilete (Németh et al., 2003).

Nós ajustamos GLMMs para avaliar o efeito da densidade floral no número de tubos polínicos. Nós calculamos os *z-scores* dos tubos polínicos com base em cada espécie e utilizamos no modelo como variável resposta. Nós determinamos quatro variáveis fixas a partir da inclusão da taxa de visitação, da densidade floral coespecífica e heteroespecífica local e a interação entre elas como variáveis preditoras no modelo. Nós aplicamos a transformação *z* aos dados de taxa de visitação e densidade floral para padronização. O modelo seguiu uma estrutura de erro Gaussiana com função de ligação identidade, e foi ajustado com a função *glm* do pacote *stats* do ambiente R 4.1.2 (R Core Team, 2023).

2.3 MÉTRICAS FUNCIONAIS

Nós avaliamos o espaço funcional da comunidade em competição e facilitação e a similaridade funcional entre as plantas raras e abundantes nestes cenários. Para tanto, definimos atributos associados com restrições ao acesso floral por beija-flores e que influenciam o compartilhamento destes entre as plantas (Nottebrock et al., 2016; Temeles et al., 2009), sendo eles comprimento, curvatura e volume da corola das flores. O comprimento e curvatura da corola têm relação com a acessibilidade do recurso (néctar) pelo beija-flor, pois o néctar de flores com corolas mais longas e curvas é alcançado por beija-flores com bicos mais longos e curvos (Maglianesi et al., 2015). Essa relação entre comprimento da corola e do bico regula padrões de taxa de visitação por beija-flores em áreas tropicais (Maglianesi et al., 2014). O volume da corola é uma medida que incorpora aspectos do tamanho da flor, o qual está

correlacionado com a taxa de produção de néctar e com o acesso do beija-flor ao recurso (Sonne et al. 2020; Ornelas et al., 2007; Aigner 2004). Beija-flores tendem a visitar flores de tamanho maior uma vez que possuem maior quantidade de néctar (Tavares et al., 2016).

Para os atributos, nós coletamos flores, preferencialmente de indivíduos distintos, de 32 espécies. Fotografamos as flores em vista lateral com escala e calculamos as medidas no programa ImageJ 1.53p (Rasband, 2021). Calculamos o comprimento da corola como a distância, em uma linha reta, da base da corola até o ponto em que as pétalas se separam, sem levar em conta curvaturas ou protuberâncias. Para a curvatura, medimos o ângulo formado entre a linha que vai do ponto médio da abertura da flor até os nectários e a linha que vai dos nectários até a parte dorsal da abertura da flor. Para calcular o volume da corola, usamos o comprimento da corola e seu diâmetro externo de modo que $C_{VOL} = \text{comprimento da corola} \pi (\text{diâmetro externo}/2)^2$ (Maglianesi et al., 2014). O diâmetro externo corresponde ao tamanho da abertura da corola. A partir da média dos atributos florais para cada espécie, nós projetamos as espécies de plantas raras e abundantes em um mesmo espaço funcional tridimensional por meio de análise de coordenadas principais (PCoA). Realizamos uma PCoA por mês, desde que o mês tivesse três ou mais espécies de plantas raras e de plantas abundantes, número mínimo necessário para criar um espaço funcional. Representamos as espécies como pontos no espaço e conectamos os pontos mais extremos de cada grupo (raras e abundantes) para formar dois polígonos que contêm todos os demais pontos em seu interior. Como os dois primeiros eixos das PCoAs juntos explicaram mais de 80% da variação do espaço em todos os meses, nós utilizamos a área desses polígonos para calcular as métricas funcionais.

Calculamos a riqueza funcional da comunidade a partir da área dos dois polígonos, contando apenas uma vez os espaços que se sobrepõem (Fig. 2a) (Cornwell et al, 2006). Para a riqueza funcional das raras e das abundantes, calculamos a área de cada polígono separadamente (Fig. 2b e 2c). Para a similaridade funcional entre elas, calculamos a área de

sobreposição entre os dois polígonos (Fig. 2d) (Villéger et al., 2011). Também calculamos a contribuição de cada grupo, raras e abundantes, para a riqueza funcional da comunidade. Para isso, somamos a área não sobreposta do grupo com a área sobreposta já dividida pelo número de grupos que se sobrepõe. Essa divisão é feita porque cada grupo contribui igualmente com a totalidade da área (Fig. 2e e 2f) (Dehling et al., 2016). Utilizamos o pacote “sf” (Bivand et al., 2013) do ambiente R 4.1.2 (R Core Team, 2023) para os cálculos de áreas e sobreposições. Realizamos o teste de Mann-Withney para comparar as métricas funcionais entre cenários de facilitação e competição.

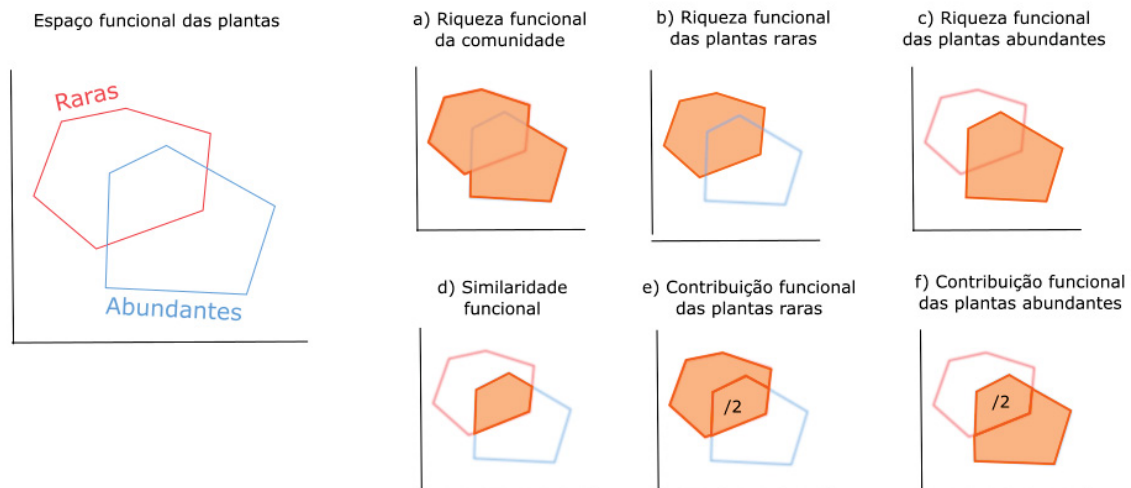


Figura 2. Cálculo das métricas funcionais a partir do espaço funcional das plantas abundantes e raras. a) A riqueza funcional da comunidade corresponde à área total do espaço funcional que as plantas raras e as abundantes cobrem juntas, contando apenas uma vez o espaço que se sobrepõe; b e c) A riqueza funcional das plantas raras e abundantes é o tamanho da área que seus espaços funcionais ocupam separadamente; d) A similaridade funcional corresponde à área de sobreposição dos espaços funcionais; e) A contribuição funcional das plantas raras para a riqueza funcional da comunidade corresponde a área não sobreposta somada à área sobreposta dividido por dois.

Para incluir os meses que não formaram espaço funcional e aumentar a amostragem para comparação entre cenários, também calculamos a riqueza e contribuição funcional por meio do método da distância euclidiana utilizando o cálculo do CWM. Para tanto, usamos a função dbFD do pacote “FD” no ambiente R 4.1.2 (R Core Team, 2023), seguido do cálculo

da distância euclidiana por meio da função *vegdist*. O CWM é a média de cada atributo de cada comunidade (raras e abundantes) ponderada pela abundância de espécies (Ricotta & Moretti, 2011). Utilizamos a matriz resultante com as comunidades nas linhas e os atributos médios nas colunas para análise da distância funcional entre elas. Da mesma forma que os espaços funcionais, realizamos o teste de Mann-Whitney para comparar as métricas funcionais entre raras e abundantes e entre cenários de facilitação e competição.

A riqueza funcional de uma comunidade pode ter correlação com sua riqueza de espécies devido à probabilidade de ocupação de um espaço funcional maior (Mouchet et al., 2010), portanto, espécies raras podem apresentar maior riqueza funcional somente por serem mais numerosas que as abundantes da comunidade. Para identificar esse possível viés no cálculo da riqueza funcional, nós ajustamos um modelo linear generalizado (GLM), considerando a riqueza funcional como variável resposta e a riqueza de espécies e o grupo (rara ou abundante) como variáveis preditoras no modelo. O modelo seguiu uma estrutura de erro *Poisson* com função de ligação *log* e foi ajustado com a função *glmer* o pacote *stats* do ambiente R 4.1.2 (R Core Team, 2023).

3 RESULTADOS

3.1 TAXA DE VISITAÇÃO E ABUNDÂNCIA FLORAL

Nós instalamos câmeras em 252 plantas ao longo dos três transectos, totalizando aproximadamente 18.000 horas de gravação. Nós registramos 8252 interações (Fig. 3) entre 39 espécies de plantas (Apêndice 1) e sete espécies de beija-flores: *Chionomesa fimbriata*, *Chrysuronia versicolor*, *Heliodoxa rubricauda*, *Leucochloris albicollis*, *Phaethornis eurynome*, *Thalurania glaucopis*, *Ramphodon naevius*. A curva de rarefação para os três transectos mostrou uma forte tendência à estabilidade de acúmulo de interações únicas com o aumento das interações registradas, sugerindo uma amostragem suficiente (Apêndice 2).

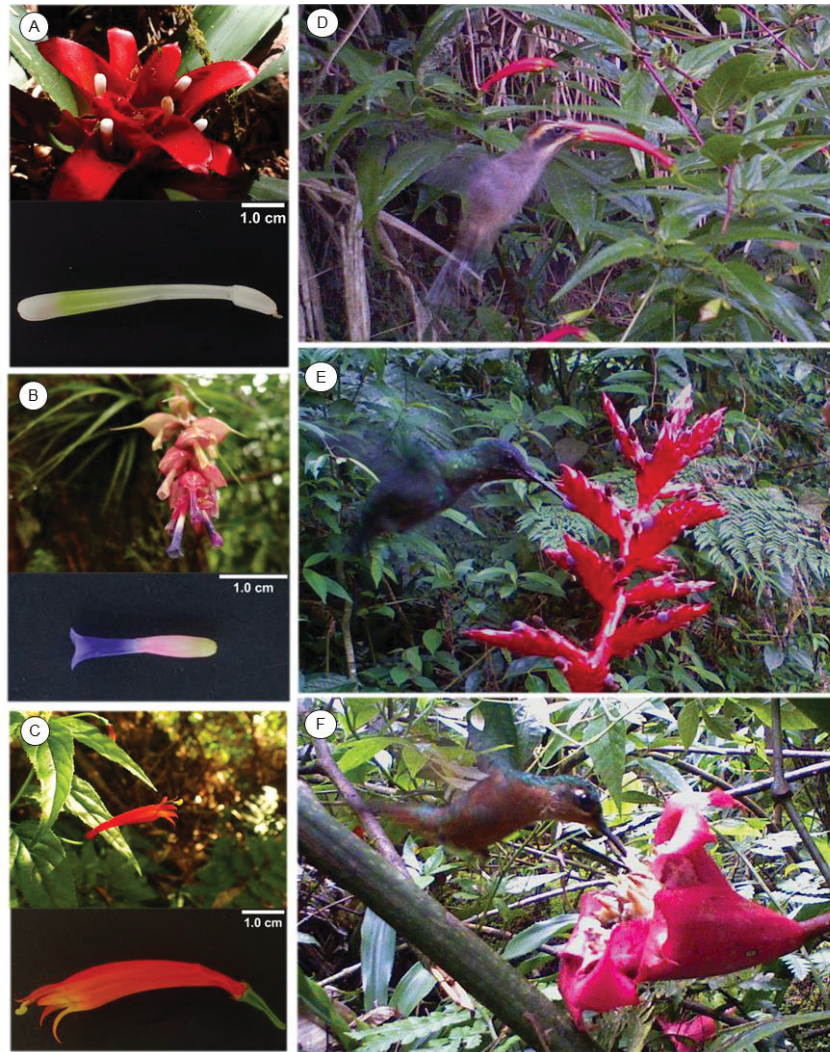


Figura 3. Plantas que ocorreram nos transectos e beija-flores registrados pelas câmeras time-lapse. A) *Nidularium innocentii*. B) *Tillandsia stricta*; C) *Siphocampylus longipedunculatus*; D) *Phaethornis eurynome* visitando *Siphocampylus longipedunculatus*; E) Macho de *Thalurania glaucopis* visitando *Aechmea distichantha*; F) Fêmea de *Heliodoxa rubricauda* visitando *Aechmea bocainensis*.

A interação da densidade coespecífica e heteroespecífica teve efeito negativo na taxa de visitação (Tabela 1). A taxa de visitação das plantas abundantes (alta densidade coespecífica) diminuiu à medida que a densidade heteroespecífica aumentou. O efeito negativo da densidade heteroespecífica quando em alta densidade coespecífica (e vice-versa) indica denso-dependência negativa da taxa de visitação, isto é, desvantagem das plantas abundantes (Fig. 4).

Tabela 1. Coeficientes do modelo GLMM para taxa de visitação. Valores em negritos representam valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$).

Efeitos fixos	Estimativa	X^2 (p)
Densidade coespecífica local	0.07203	< 0.0003
Densidade heteroespecífica local	0.04917	0.0261
Interação das densidades locais	-0.08232	< 0.0001

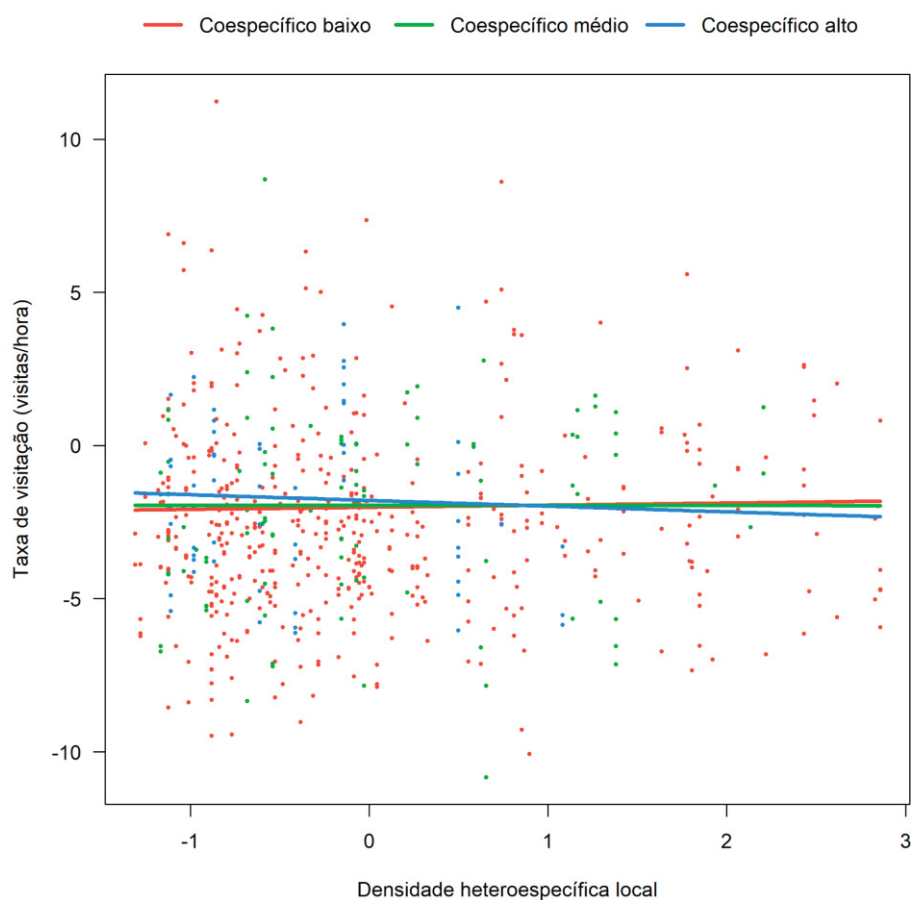


Figura 4. Efeito da densidade floral heteroespecífica e coespecífica na taxa de visitação em escala local. Os pontos representam os resíduos parciais do modelo depois de fixar os efeitos das demais variáveis explanatórias. Em vermelho, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica baixa (até o 2º quartil, plantas raras); em verde, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica média (entre o 2º e 3º quartil); em azul, o efeito da densidade floral heteroespecífica para as espécies com densidade coespecífica alta (acima do 3º quartil, plantas abundantes).

3.2 AVALIAÇÃO DA DEPOSIÇÃO POLÍNICA

Contabilizamos os tubos polínicos de 236 flores de 25 espécies de plantas para avaliar a eficiência de polinização (Fig. 5). As densidades florais e a taxa de visitação não tiveram

efeito no número de tubos polínicos (Tabela 2). O número de tubos polínicos das plantas raras e abundantes não mudou conforme aumentou a densidade heteroespecífica.

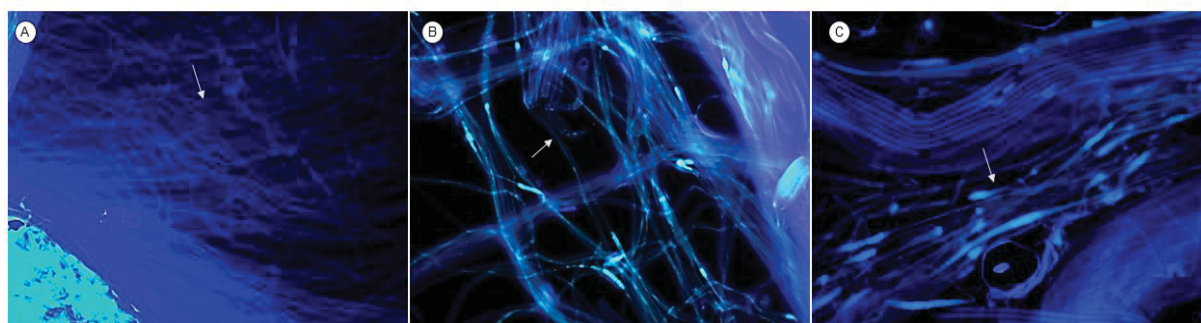


Figura 5. Tubos polínicos em estiletos de três espécies distintas por microscopia de fluorescência. a) *Nidularium rutilans* com aumento de 20x; b) *Siphocampylus longipedunculatus* com aumento de 40x; c) *Aechmea cylindrata* com aumento de 40x. Setas indicam os tubos polínicos.

Tabela 2. Coeficientes do modelo GLMM para tubos polínicos. Nenhum dos valores representam valores estatisticamente significativos ($p < 0.05$).

Efeitos fixos	Estimativa	X^2 (valor-p)
Taxa de visitação	<0.001	0.234
Densidade coespecífica local	<0.001	0.153
Densidade heteroespecífica local	<0.001	0.216
Interação das densidades locais	<0.001	0.936

3.3 MÉTRICAS FUNCIONAIS

Nós registramos facilitação em nove meses (Mar/20, Nov/20, Jan/21, Ago/21, Set/21, Out/21, Dez/21, Jan/22, Mar/22) e competição em onze meses (Jan/20, Fev/20, Out/21, Dez/20, Fev/21, Mar/21, Jun/21, Jul/21, Nov/21, Fev/22, Abr/22). Em virtude do número de espécies em cada mês, a projeção dos espaços funcionais para as raras e abundantes foi limitada a nove meses (Jan/20, Fev/20, Out/20, Nov/21, Fev/22, Nov/20, Ago/21, Out/21, Jan/22). Isso resultou em cinco meses de competição e cinco de facilitação (Fig. 6), onde obtivemos ao menos três espécies distintas de plantas abundantes e três de plantas raras.

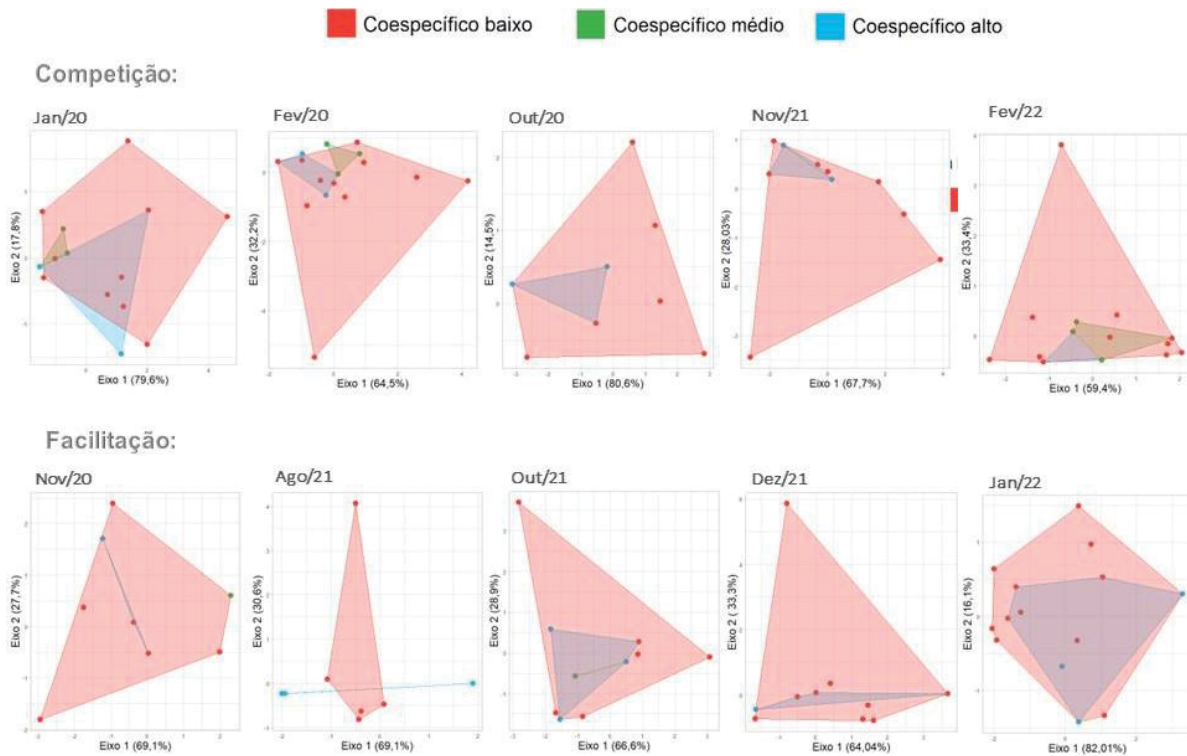


Figura 6. Análise mensal da variação do espaço funcional das plantas raras (em vermelho), médias (em verde) e abundantes (em azul) em cenário de competição e facilitação levando em conta a denso-dependência negativa.

Para ambos os métodos utilizados, tanto pelo espaço funcional como pela distância euclidiana ao considerar todos os meses, não houve diferença significativa na riqueza, similaridade e contribuição funcional ao comparar cenário de facilitação e competição (Apêndice 4 e 5). Entretanto observamos diferenças ao comparar os espaços funcionais das raras e abundantes, independente do cenário (Tabela 3). As plantas raras apresentaram maior riqueza e contribuição funcional para a comunidade. Tanto nos meses de facilitação como de competição, o espaço funcional das espécies abundantes foi contido completamente dentro do espaço das raras, exceto no mês de competição de Jan/20 em que um dos pontos do espaço das abundantes desloca sua área para um pouco fora do espaço funcional das raras (Fig. 5).

Tabela 3. Comparação da riqueza e contribuição funcional entre as plantas raras e abundantes pelos testes de Mann-Whitney e distância euclidiana. Os valores em negrito são estatisticamente significativos ($p < 0.05$).

Métrica	Teste	Raras x Abundantes	
		<i>W</i>	<i>p</i>
Riqueza funcional	Mann-Whitney	97	<0.001
	Distância Euclidiana	129	0.022
Contribuição funcional	Mann-Whitney	100	<0.001

A riqueza de espécies não influenciou o valor da riqueza funcional de espécies raras (5 a 15 espécies) e abundantes (1 a 6 espécies) (Apêndice 3). Entretanto, a riqueza funcional das raras foi maior que a riqueza funcional das abundantes ($p < 0.001$) (Fig. 7).

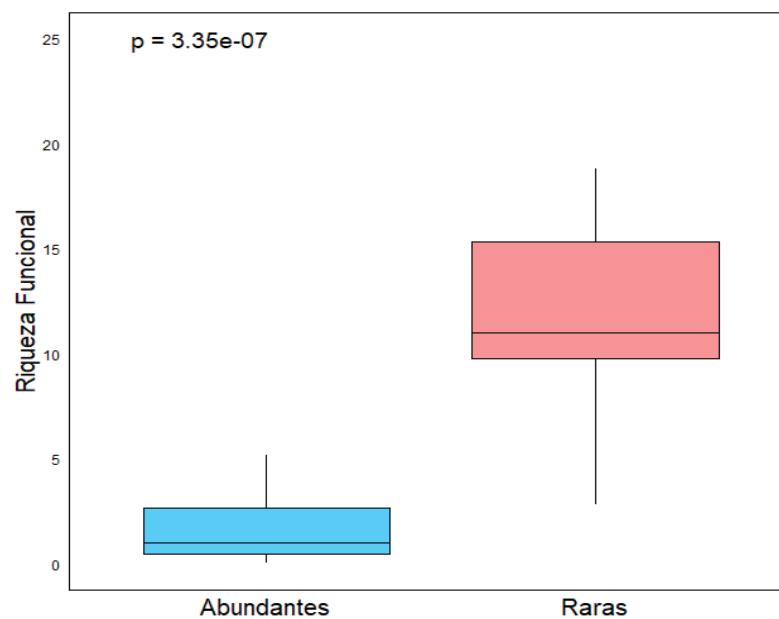


Figura 7. Diferença da riqueza funcional das plantas raras (vermelho) e abundantes (azul). Os retângulos indicam o segundo e terceiro quartis, a linha preta de dentro indica a mediana, e as linhas que se estendem acima e abaixo das caixas indicam os quartis inferior e superior.

4 DISCUSSÃO

Nossos resultados mostram que em alta disponibilidade de recursos aos beija-flores, as plantas raras apresentaram vantagem em termos de visitas, sugerindo prevalência de facilitação pelo benefício da atração conjunta (Bergamo et al., 2020a). Entretanto, a similaridade funcional entre as raras e abundantes não foi maior em facilitação, corroborando com a hipótese de que mecanismos facilitadores não agem necessariamente a favor da similaridade funcional da comunidade (Ghauzoul, 2006). Na verdade, plantas raras mantiveram atributos funcionais extremos e únicos na competição e na facilitação.

De fato, espécies raras tendem a possuir atributos únicos que não são encontrados nas espécies abundantes (Leitão et al., 2016) e podem conduzir a uma maior especialização por polinizador (Wei et al., 2021). No nosso contexto, os beija-flores mais especializados (i.e. com bicos longos e curvos) poderiam visitar flores mais generalistas (i.e. flores curtas e retas), raras e abundantes, e flores mais especialistas (i.e. flores longas e curvas) com atributos mais refinados encontrados exclusivamente nas espécies raras.

A igualdade na deposição polínica mesmo com variação na taxa de visitação, indica que as visitas não foram igualmente eficientes na polinização. Os polinizadores transportam uma quantidade significativamente maior de pólen das plantas abundantes, mesmo estas recebendo menos visitas (Bergamo 2020a; Robertson 1992). Além da diferença no carregamento de pólen, a manutenção de atributos funcionais extremos e únicos nas raras, independente do cenário, possibilita interações com maior ajuste morfológico, preferidas dos beija-flores (Maglianesi et al., 2014). O custo de buscar por flores mais ajustadas por serem mais raras é menor que a mudança de forrageio para as espécies mais abundantes, mas com menor ajuste (Dalsgaard et al., 2021; Weinstein & Graham 2017).

Ao mesmo tempo que a manutenção de atributos extremos e únicos nas raras possibilitam maior ajuste morfológico das interações, a ocupação do mesmo espaço funcional

das abundantes permite que as plantas raras se beneficiem pela atração conjunta com as abundantes. A facilitação pode ser um mecanismo de equalização que promove a coexistência de espécies ao aliviar a limitação de deposição de pólen das plantas mais raras em comparação com as mais abundantes (Bergamo et al., 2022).

Estudos futuros abordando a riqueza funcional dos beija-flores podem ajudar a entender a dinâmica das interações em facilitação e competição ao avaliar o espaço funcional das plantas a partir dos atributos dos polinizadores (Dehling & Stouffer et al, 2018). Nós enfatizamos que conciliar as análises de atributos florais com as análises dos atributos dos polinizadores e a densidade dos mesmos aumenta nosso entendimento da dinâmica de interações entre plantas raras e abundantes (Dehling et al, 2018).

REFERÊNCIAS

- Adler, P.B., Smull, D., Beard, K.H., Choi, R.T., Furniss, T., Kulmatiski, A., *et al.* (2018). Competition and coexistence in plant communities: intraspecific competition is stronger than interspecific competition. *Ecol Lett*, 21, 1319–1329.
- Aigner, P.A. (2004). Floral specialization without trade-offs: Optimal corolla flare in contrasting pollination environments. *Ecology*, 85, 2560–2569.
- Alonso, C., Herrera, C.M. & Ashman, T.-L. (2012). A piece of the puzzle: a method for comparing pollination quality and quantity across multiple species and reproductive events. *New Phytol.*, 193, 532–542.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J. Stat. Soft.*, 67.
- Benadi, G. & Pauw, A. (2018). Frequency dependence of pollinator visitation rates suggests that pollination niches can allow plant species coexistence. *J Ecol*, 106, 1892–1901.
- Bergamo, P.J., Freitas, L., Sazima, M. & Wolowski, M. (2022). Pollinator-mediated facilitation alleviates pollen limitation in a plant–hummingbird network. *Oecologia*, 198, 205–217.
- Bergamo, P.J., Streher, N.S., Wolowski, M. & Sazima, M. (2020a). Pollinator-mediated facilitation is associated with floral abundance, trait similarity and enhanced community-level fitness. *J Ecol*, 108, 1334–1346.
- Bergamo, P.J., Susin Streher, N., Traveset, A., Wolowski, M. & Sazima, M. (2020b). Pollination outcomes reveal negative density-dependence coupled with interspecific facilitation among plants. *Ecol Lett*, 23, 129–139.
- Bergamo, P.J., Wolowski, M., Maruyama, P.K., Vizentin-Bugoni, J., Carneiro, L.G. & Sazima, M. (2017). The potential indirect effects among plants via shared hummingbird pollinators are structured by phenotypic similarity. *Ecology*, 98, 1849–1858.
- Bergamo, P.J., Wolowski, M., Maruyama, P.K., Vizentin-Bugoni, J. & Sazima, M. (2018). Trait patterns across space and time suggest an interplay of facilitation and competition acting on Neotropical hummingbird-pollinated plant communities. *Oikos*, 127, 1690–1700.
- Bivand, R.S., Pebesma, E. & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied Spatial Data Analysis with R*. Springer, New York, NY.

- Chacoff, N.P., Vázquez, D.P., Lomáscolo, S.B., Stevani, E.L., Dorado, J. & Padrón, B. (2012). Evaluating sampling completeness in a desert plant-pollinator network: Sampling a plant-pollinator network. *Journal of Animal Ecology*, 81, 190–200.
- Cornwell, W.K., Schwilk, D.W. & Ackerly, D.D. (2006). A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume. *Ecology*, 87, 1465–1471.
- Dalsgaard, B., Kennedy, J.D., Simmons, B.I., Baquero, A.C., Martín González, A.M., Timmermann, A., *et al.* (2018). Trait evolution, resource specialization and vulnerability to plant extinctions among Antillean hummingbirds. *Proc. R. Soc. B.*, 285, 20172754.
- Dalsgaard, B., Maruyama, P.K., Sonne, J., Hansen, K., Zanata, T.B., Abrahamczyk, S., *et al.* (2021). The influence of biogeographical and evolutionary histories on morphological trait-matching and resource specialization in mutualistic hummingbird–plant networks. *Funct Ecol*, 35, 1120–1133.
- Dehling, D.M., Jordano, P., Schaefer, H.M., Böhning-Gaese, K. & Schleuning, M. (2016). Morphology predicts species’ functional roles and their degree of specialization in plant–frugivore interactions. *Proc. R. Soc. B.*, 283, 20152444.
- Dehling, D.M. & Stouffer, D.B. (2018). Bringing the Eltonian niche into functional diversity. *Oikos*, 127, 1711–1723.
- Gannon, D.G., Hadley, A.S., Kormann, U.G., Andrew Jones, F. & Betts, M.G. (2021). *Testing for pollinator recognition in multiple species of Heliconia* (preprint). Ecology.
- Ghazoul, J. (2005). Pollen and seed dispersal among dispersed plants. *Biol. Rev.*, 80, 413.
- Goulson, D. (2000). Why do pollinators visit proportionally fewer flowers in large patches? *Oikos*, 91, 485–492.
- Hsieh, T.C, Ma, K.H, Chao, A. (2014). CRAN - Package iNEXT: iNterpolation and EXTrapolation for species diversity. R package version 2.0. <http://chao.stat.nthu.edu.tw/blog/software-download>.
- Leitão, R.P., Zuanon, J., Villéger, S., Williams, S.E., Baraloto, C., Fortunel, C., *et al.* (2016). Rare species contribute disproportionately to the functional structure of species assemblages. *Proc. R. Soc. B.*, 283, 20160084.

Maglianesi, M.A., Blüthgen, N., Böhning-Gaese, K. & Schleuning, M. (2014). Morphological traits determine specialization and resource use in plant–hummingbird networks in the neotropics. *Ecology*, 95, 3325–3334.

Maglianesi, M.A., Blüthgen, N., Böhning-Gaese, K. & Schleuning, M. (2015). Functional structure and specialization in three tropical plant-hummingbird interaction networks across an elevational gradient in Costa Rica. *Ecography*, 38, 1119–1128.

Martin, F.W. (1959). Staining and Observing Pollen Tubes in the Style by Means of Fluorescence. *Stain Technology*, 34, 125–128.

Moeller, D.A. (2004). Facilitative interactions among plants via shared pollinators. *Ecology*, 85, 3289–3301.

Mouchet, M.A., Villéger, S., Mason, N.W.H. & Mouillot, D. (2010). Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules: Functional diversity measures. *Functional Ecology*, 24, 867–876.

Németh, M.B. & Smith-Huerta, N.L. (2003). Pollen Deposition, Pollen Tube Growth, Seed Production, and Seedling Performance in Natural Populations of *Clarkia unguiculata* (Onagraceae). *International Journal of Plant Sciences*, 164, 153–164.

Nottebrock, H., Schmid, B., Mayer, K., Devaux, C., Esler, K.J., Böhning-Gaese, K., *et al.* (2017). Sugar landscapes and pollinator-mediated interactions in plant communities. *Ecography*, 40, 1129–1138.

Ornelas, J.F., Ordano, M., De-Nova, A.J., Quintero, M.E. & Garland, T. (2007). Phylogenetic analysis of interspecific variation in nectar of hummingbird-visited plants: The evolution of nectar. *Journal of Evolutionary Biology*, 20, 1904–1917.

Pauw, A. (2013). Can pollination niches facilitate plant coexistence? *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 30–37.

Phillips, R.D., Peakall, R., Van Der Niet, T. & Johnson, S.D. (2020). Niche Perspectives on Plant–Pollinator Interactions. *Trends in Plant Science*, 25, 779–793.

R: The R Project for Statistical Computing. (2023). . Available at: <https://www.r-project.org/>. Last accessed 19 May 2023.

Rathcke, B. (1983). Competition and Facilitation among Plants for Pollination. In: *Pollination Biology*. Elsevier, pp. 305–329.

- Ricotta, C. & Moretti, M. (2011). CWM and Rao's quadratic diversity: a unified framework for functional ecology. *Oecologia*, 167, 181–188.
- Robertson, A.W. (1992). The relationship between floral display size, pollen carryover and geitonogamy in *Myosotis colensoi* (Kirk) Macbride (Boraginaceae). *Biol. J. Linn. Soc.*, 46, 333–349.
- S. Feldman, T., F. Morris, W. & G. Wilson, W. (2004). When can two plant species facilitate each other's pollination? *Oikos*, 105, 197–207.
- Solís-Montero, L. & Vallejo-Marín, M. (2017). Does the morphological fit between flowers and pollinators affect pollen deposition? An experimental test in a buzz-pollinated species with anther dimorphism. *Ecol Evol*, 7, 2706–2715.
- Sonne, J., Vizentin-Bugoni, J., Maruyama, P.K., Araujo, A.C., Chávez-González, E., Coelho, A.G., *et al.* (2020). Ecological mechanisms explaining interactions within plant–hummingbird networks: morphological matching increases towards lower latitudes. *Proc. R. Soc. B.*, 287, 20192873.
- Tavares, D.C., Freitas, L. & Gaglianone, M.C. (2016). Nectar volume is positively correlated with flower size in hummingbird-visited flowers in the Brazilian Atlantic Forest. *J. Trop. Ecol.*, 32, 335–339.
- Temeles, E.J., Koulouris, C.R., Sander, S.E. & Kress, W.J. (2009). Effect of flower shape and size on foraging performance and trade-offs in a tropical hummingbird. *Ecology*, 90, 1147–1161.
- Totland, O. (1994). Intraseasonal variation in pollination intensity and seed set in an alpine population of *Ranunculus acris* in southwestern Norway. *Ecography*, 17, 159–165.
- Villéger, S., Novack-Gottshall, P.M. & Mouillot, D. (2011). The multidimensionality of the niche reveals functional diversity changes in benthic marine biotas across geological time: Long-term functional diversity changes. *Ecology Letters*, 14, 561–568.
- Wei, N., Kaczorowski, R.L., Arceo-Gómez, G., O'Neill, E.M., Hayes, R.A. & Ashman, T.-L. (2021). Pollinators contribute to the maintenance of flowering plant diversity. *Nature*, 597, 688–692.
- Weinstein, B.G. (2015). Motion Meerkat: integrating motion video detection and ecological monitoring. *Methods Ecol Evol*, 6, 357–362.

Weinstein, B.G. & Graham, C.H. (2017). Persistent bill and corolla matching despite shifting temporal resources in tropical hummingbird-plant interactions. *Ecol Lett*, 20, 326–335.

Wolowski, M., Carneiro, L.G. & Freitas, L. (2017). Influence of plant-pollinator interactions on the assembly of plant and hummingbird communities. *J Ecol*, 105, 332–344.

APÊNDICE 1 – AS MÉDIAS DAS MEDIDAS DO COMPRIMENTO DA COROLA, CURVATURA E VOLUME FLORAL PARA CADA ESPÉCIE DE PLANTA SÃO BASEADAS NO NÚMERO DE FLORES, INDEPENDENTEMENTE DE ELAS PERTENCEREM A DIFERENTES INDIVÍDUOS. ESPÉCIES COM NA REPRESENTAM AS ESPÉCIES QUE NÃO FOI POSSÍVEL OBTER AS MEDIDAS. AS ESPÉCIES EM NEGRITO SÃO AQUELAS AMOSTRADAS PARA ANÁLISE DOS TUBOS POLÍNICOS.

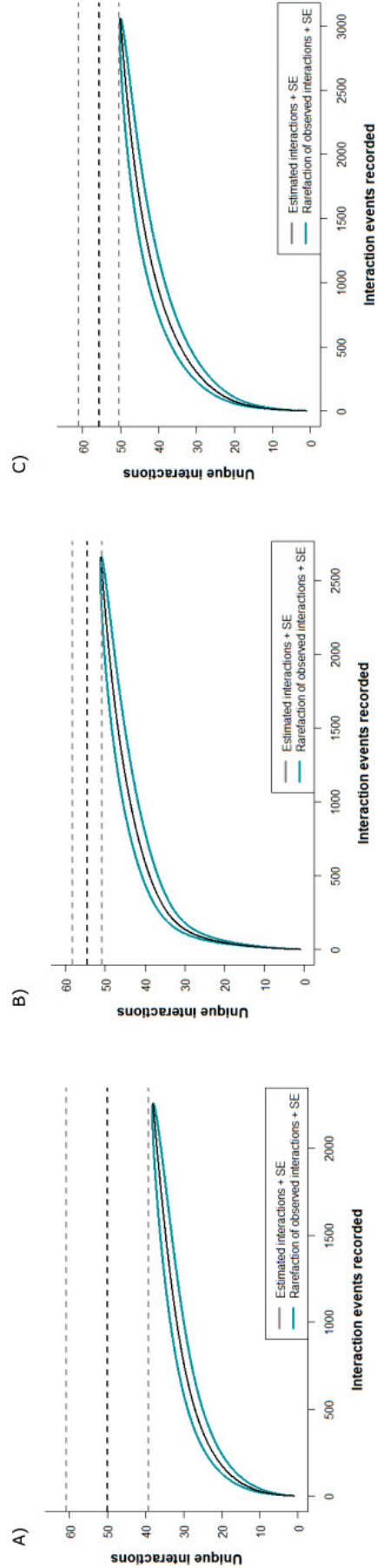
Família	Espécie	Indivíduo		Flores	Comprimento		Curvatura	Volume
					corola (cm)	corola (cm)		
					corola (cm)	corola (cm)		corola (cm³)
Acanthaceae	<i>Justicia polita</i>	5	8	1,57	99,60		5,54	
Bromeliaceae	<i>Aechmea bocainensis</i>	6	8	1,66	17,14		3,17	
Bromeliaceae	<i>Aechmea cylindrata</i>	5	10	2,12	73,30		6,24	
Bromeliaceae	<i>Aechmea distichantha</i>	5	5	1,61	14,45		2,70	
Bromeliaceae	<i>Billbergia distachia</i>	3	3	5,02	26,98		171,86	
Bromeliaceae	<i>Edmundoa ambigua</i>	5	5	3,04	12,32		18,06	
Bromeliaceae	<i>Edmundoa lindenii</i>	2	5	2,83	51,49		14,11	
Bromeliaceae	<i>Nidularium angustibracteatum</i>	5	7	5,55	27,59		111,61	
Bromeliaceae	<i>Nidularium innocentii</i>	5	5	5,21	27,96		107,27	
Bromeliaceae	<i>Nidularium longiflorum</i>	5	6	7,77	56,32		306,76	
Bromeliaceae	<i>Nidularium rutilans</i>	5	5	4,06	38,76		53,86	

Família	Espécie	Indivíduo	Flores	Comprimento corola (cm)	Curvatura corola (cm)	Volume corola (cm³)
Bromeliaceae	<i>Tillandsia geminiflora</i>	5	5	1,50	16,76	1,99
Bromeliaceae	<i>Tillandsia stricta</i>	3	3	2,02	39,68	4,32
Bromeliaceae	<i>Tillandsia tenuifolia</i>	5	5	1,78	163,76	2,63
Bromeliaceae	<i>Vriesea altodaserrae</i>	10	10	3,74	46,35	37,65
Bromeliaceae	<i>Vriesea bituminosa</i>	6	6	6,92	46,60	187,27
Bromeliaceae	<i>Vriesea ensiformis</i>	NA	NA	NA	NA	NA
Bromeliaceae	<i>Vriesea erythrodactylon</i>	4	4	4,52	18,20	129,08
Bromeliaceae	<i>Vriesea heterostachys</i>	NA	NA	NA	NA	NA
Bromeliaceae	<i>Vriesea interrogatoria</i>	7	7	4,61	20,64	125,61
Bromeliaceae	<i>Vriesea jonghei</i>	NA	NA	NA	NA	NA
Bromeliaceae	<i>Vriesea longicaulis</i>	6	6	4,36	50,50	67,81
Bromeliaceae	<i>Vriesea pabstii</i>	5	5	2,88	257,83	22,44
Bromeliaceae	<i>Vriesea vagans</i>	5	5	2,99	198,10	55,40

Família	Espécie	Indivíduo	Flores	Comprimento corola (cm)	Curvatura corola (cm)	Volume corola (cm³)
Bromeliaceae	<i>Wittrockia cyathiformis</i>	1	1	3,03	17,33	14,17
Campanulaceae	<i>Siphocampylus convolvulaceus</i>	2	2	4,58	11,63	145,20
Campanulaceae	<i>Siphocampylus longipedunculatus</i>	7	8	4,81	11,96	115,53
Cannaceae	<i>Canna paniculata</i>	6	7	5,92	35,826	345,48
Gentianaceae	<i>Macrocarpaea inesiaie</i>	6	6	4,55	32,88	49,72
Gesneriaceae	<i>Besleria longimucronata</i>	1	1	2,30	10,43	7,52
Gesneriaceae	<i>Codonanthe cordifolia</i>	1	2	1,44	21,98	1,20
Gesneriaceae	<i>Nematanthus sericeus</i>	5	8	2,41	37,02	10,10
Gesneriaceae	<i>Sinningia cooperi</i>	5	5	3,34	8,68	86,13
Gesneriaceae	<i>Sinningia douglasii</i>	NA	NA	NA	NA	NA
Lamiaceae	<i>Salvia balaustina</i>	5	5	3,42	34,26	67,69
Malvaceae	<i>Callianthe rufinerve</i>	6	8	2,41	158,76	6,91
Onagraceae	<i>Fuchsia regia</i>	6	7	2,87	34,36	67,44

Família	Espécie	Indivíduo	Flores	Comprimento corola (cm)	Curvatura corola (cm)	Volume corola (cm³)
Solanaceae	<i>Brunfelsia hydrangeiformes</i>	9	10	2,42	15,81	8,22
Solanaceae	<i>Brunfelsia uniflora</i>	4	8	2,42	5,05	8,30

APÊNDICE 2. CURVAS DE RAREFAÇÃO DAS INTERAÇÕES PLANTA-BEIJÁ-FLOR OBSERVADAS (VERDE) E ESTIMADAS (PRETO) NOS TRÊS TRANSECTOS (A, B E C) NO PARQUE ESTADUAL DA SERRA DO MAR - NÚCLEO CUNHA-SP.



APÊNDICE 3. COEFICIENTES DO MODELO GLM PARA RIQUEZA FUNCIONAL. VALORES EM NEGRITOS REPRESENTAM VALORES ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVOS (VALOR-P <0,05).

Efeitos fixos	Estimativa	X² (valor-p)
Riqueza de espécies	0.04878	0.126
Abundância (Rara e Abundante)	1.71087	3.35e-07

APÊNDICE 4. MÉTRICAS FUNCIONAIS E RESULTADOS DO TESTE DE MANN-WHITNEY COMPARANDO PLANTAS RARAS E ABUNDANTES EM FACILITAÇÃO E COMPETIÇÃO. NENHUMA MÉTRICA FOI SIGNIFICATIVA (P>0,05).

Cenário	Mês	Riqueza funcional	Riqueza funcional raras	Riqueza funcional abundantes	Similaridade funcional	Contribuição funcional raras (%)	Contribuição funcional abundantes (%)
Competição	Jan/20	11,3584	10,9167	3,4821	1,27	82,73	17,23
Competição	Fev/20	18,8546	18,8280	0,9865	1,05	97,31	2,69
Competição	Out/20	10,2830	10,2830	1,0893	1,11	94,70	5,30
Competição	Nov/21	11,0687	11,0687	0,0659	1,00	99,70	0,30
Competição	Fev/22	2,8105	2,8025	0,01122	1,00	99,66	0,34
Facilitação	Nov/20	13,8912	13,8912	3,2088	1,23	88,45	11,55
Facilitação	Ago/21	15,7961	15,7961	0,7462	1,05	97,64	2,36
Facilitação	Out/21	18,7755	18,7755	0,9915	1,05	97,36	2,64
Facilitação	Dez/21	9,2991	9,299093	5,1581	1,55	72,27	27,73
Facilitação	Jan/22	9,5972	9,58113	0,3928	1,04	97,87	2,13
p (Facilitação x Competição)	-	0,5476	0,6905	1,0	1,0	0,8413	0,8413

APÊNDICE 5. MÉTRICAS FUNCIONAIS, A PARTIR DA FUNÇÃO D_{bfd} , E RESULTADOS DO TESTE DE MANN-WHITNEY COMPARANDO PLANTAS RARAS E ABUNDANTES EM FACILITAÇÃO E COMPETIÇÃO, CONSIDERANDO TODOS OS MESES, NÃO SOMENTE AQUELES QUE FORMARAM ESPAÇO FUNCIONAL. NENHUMA MÉTRICA FOI SIGNIFICATIVA ($P>0,05$).

Cenário	Mês	Riqueza funcional	Riqueza funcional raras	Riqueza funcional abundantes	Dissimilaridade funcional	Dissimilaridade funcional ponderado pela abundância
-	Dez/19	0.30838949	0.105134	0.517142	1.267971	1.404507
Competição	Jan/20	0.532972	0.155376	1.266725	0.496755	1.057628
Competição	Fev/20	3.149525	2.017784	1.423072	1.031538	0.6510246
Facilitação	Mar/20	0.6631	0.412301	0.195374	0.6453759	0.4924215
Competição	Out/20	0.273029	0.111329	0.737413	1.270302	1.873236
Facilitação	Nov/20	0.302336	0.202668	0.737413	0.4227073	0.7219144
Competição	Dez/20	0.332054	0.230756	0.172814	0.9183677	1.513079
Facilitação	Jan/21	0.590675	0.271817	1.4434	1.079464	0.2255534
Competição	Fev/21	0.192367	0.118926	0.195374	1.183242	1.331973
Competição	Mai/21	4.233335	1.534095	6.678605	1.145255	1.666185
Facilitação	Jun/21	3.478051	1.523122	5.996386	1.300733	1.434851
Competição	Jul/21	3.805747	0.605646	5.996386	2.919735	2.732742
Facilitação	Ago/21	1.146905	0.026969	5.996386	0.326565	0.9639693
Facilitação	Set/21	0.966612	0.31165	2.031886	1.214081	1.408987

Facilitação	Out/21	0.696807	0.266863	1.431907	0.3943078	0.9334553
Competição	Nov/21	2.400711	2.038064	1.320291	1.10338	0.6674086
Facilitação	Dez/21	2.178657	1.814792	0.558654	0.3494099	0.5280032
Facilitação	Jan/22	0.577314	0.490106	1.266725	0.4602323	0.4775724
Competição	Fev/22	1.714832	1.430146	0.76494	0.7986639	0.8666097
Facilitação	Mar/22	1.85221	1.190515	0.840091	2.361518	2.103864
Competição	Abr/22	2.2603	0.586936	6.678605	1.043319	1.432793
p (Facilitação x Competição)	-	0.6842	0.6842	1,0	0.1903	0.1051