

AVALIANDO A VULNERABILIDADE FUNCIONAL DE MUSGOS ENDÊMICOS DA FLORESTA ATLÂNTICA SOB MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Anna Cristina Ferreira de Araújo^{1*}, Yeison Jaroc Lombo Sanchez¹, Kátia Cavalcanti Pôrto¹, Mércia Patrícia Pereira Silva¹
¹Universidade Federal de Pernambuco; *E-mail para contato: anna.cristinaaraujo@ufpe.br

INTRODUÇÃO

O aquecimento global relacionado ao aumento dos níveis de CO₂ constitui uma séria ameaça à viabilidade de estabelecimento e manutenção de diversas espécies e tem sido considerado um dos fatores primordiais na atual crise de extinção (STORK, 2010). Por outro lado, cada espécie pode responder de maneira particular ao aquecimento global. Se uma espécie tem um nicho climático com condições ambientais ótimas restritas, então qualquer mudança nessas condições pode afetar seu desempenho e levar a uma diminuição da sua área de distribuição (KAFASH *et al.*, 2018). Assim, espécies endêmicas são potenciais perdedoras em relação às mudanças climáticas, pois tendem a utilizar menos recursos e ter maior especialização de nicho ecológico (HARVEY; PAGEL, 1991), devido a sua menor amplitude de nicho (COWLING, 2001). Alterações nas condições bióticas e abióticas podem afetar profundamente a estrutura das comunidades de espécies endêmicas tornando-as vulneráveis e, conseqüentemente, impactar a diversidade funcional dos ecossistemas. Logo, quantificar a vulnerabilidade funcional dessas espécies, ou seja, o grau em que elas e suas funções associadas podem mudar quando expostas a ameaças, é crucial para racionalizar o manejo de ecossistemas e as ações de conservação (AUBER *et al.*, 2022). Essa abordagem pode ser particularmente interessante para as briófitas, grupo de plantas basais atraqueófitas que, devido suas características intrínsecas, como ausência de sistema vascular lignificado e poiquiloidria, respondem, de forma geral, rapidamente às variações ambientais (GLIME, 2017a). Assim, estudos avaliando a vulnerabilidade funcional, em função das mudanças climáticas, de espécies endêmicas são interessantes particularmente na Floresta Atlântica (FA), na qual é considerada um hotspot global de biodiversidade e é considerado o segundo Domínio mais ameaçado de extinção do mundo. Abriga também uma enorme diversidade e endemismo de briófitas, sobretudo de musgos, incluindo cerca de 90% da riqueza de musgos conhecida para o país (AMORIM; MENINI NETO; LUIZI-PONZO, 2021) com aproximadamente 118 espécies endêmicas (ca. 33% das briófitas endêmicas do Brasil) com dados de ocorrência para a FA (FLORA E FUNGA DO BRASIL). Diante disso, dada a alta representatividade de musgos endêmicos na Floresta Atlântica, este trabalho se propõe a utilizar essas plantas como organismos modelos para avaliar a vulnerabilidade funcional das espécies deste Domínio fitogeográfico frente às mudanças climáticas.

METODOLOGIA

Para todas as análises e mapeamento foram considerados os limites do Domínio fitogeográfico da Floresta Atlântica. Foi elaborada uma lista das espécies de musgos endêmicos da FA a partir do site da Flora e Funga do Brasil, utilizando os seguintes filtros: “musgos”, “nativa do Brasil”, “somente endêmicas do Brasil” e “ocorre somente no Domínio fitogeográfico da Floresta Atlântica”, complementada com artigos científicos publicados. As coordenadas geográficas de ocorrência das espécies foram extraídas dos bancos de dados SpeciesLink e GBIF. Para cada espécie foram compilados 12 traços funcionais binários relacionados à captação e manutenção hídrica e à proteção contra a incidência luminosa: sistema reprodutivo monoico; sistema reprodutivo dioico; forma de crescimento exigente (flabeliforme, pendente, caudado e dendróide); forma de crescimento intermediária (trama e tapete); forma de crescimento tolerante à dessecação (tufo e coxim); concavidade do filídio; hialocistos; papilas; pigmentação escura; costa; costa excurrente e costa ocupando >50% da largura do filídio. As análises de modelagem de distribuição potencial em relação às mudanças climáticas, foram baseadas na ocorrência dos grupos funcionais. Para selecionar os traços mais representativos para o conjunto das espécies, elas foram agrupadas em entidades funcionais (FEs) com o pacote mFD (MAGNEVILLE *et al.*, 2021), formando, assim, os grupos funcionais. O clima atual foi descrito com base no Worldclim 2.0. As projeções climáticas para o futuro, a médio (2041-2060) e longo prazo (2081-2100), foram obtidas do CMIP6 (resolução de 30 segundos), utilizando-se 19 variáveis bioclimáticas para cada período. Os modelamentos de distribuição potencial das entidades funcionais dos musgos endêmicos foram realizados com o pacote modler (SÁNCHEZ-TAPIA *et al.*, 2018) usando os modelos climáticos BCC-CSM2-MR e MIROC6 nos dois cenários de mudanças climáticas (otimista e pessimista) para cada período. Para identificar as principais diferenças de traços entre as FEs foi utilizado NMDS. A diferença da área de adequabilidade ambiental (>50%) entre os modelos, cenários e períodos foi acessada com o teste de Kruskal-Wallis. As FEs foram divididas em duas classes, com uma única espécie (considerada vulnerável) e com mais de uma espécie, e essa classificação foi avaliada em função da área de adequabilidade ambiental (>50%) através do teste de Wilcoxon. Todas as análises foram realizadas no R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisadas 11 entidades funcionais, contemplando todo o espectro de funcionalidade. O NMDS apresentou duas principais demandas conflitantes (trade-offs) entre as FEs em relação aos traços mais representativos (Figura 1). O primeiro trade-off foi observado entre a presença de sistema reprodutivo dioico ($r^2=0.7478$, $p=0.004$) e forma de vida tolerante ($r^2=0.4187$, $p=0.04$) e o sistema reprodutivo monoico ($r^2=0.7478$, $p=0.004$). Ortogonalmente, o segundo trade-off envolveu a presença de hialocisto ($r^2=0.812$, $p=0.002$), concavidade ($r^2=0.8077$, $p=0.002$) e papila ($r^2=0.5363$, $p=0.005$), e costa ($r^2=0.7462$, $p=0.002$). Os demais traços não foram significativos. De forma geral, a área de adequabilidade >50% dos modelos, períodos e cenários foi menor do que o presente. No entanto, não houve diferença significativa da área de adequabilidade ambiental (>50%) entre modelos (KW=0.26915, $p=0.8741$), períodos (KW=0.28959, $p=0.8652$), cenários (KW=0.54171, $p=0.7627$) e categorias de entidades funcionais (W=1240, $p=0.8633$) (Figura 2). A maioria das FEs tem distribuição restrita, particularmente na região sudeste, o que se manteve considerando os diferentes cenários e períodos. Diante disso, observou-se que a comunidade dos musgos endêmicos da

FA é marcada pela insegurança funcional, com 54,5% das entidades funcionais formadas por apenas uma espécie, aliada a distribuição restrita e ao fato de que os traços mais representativos são relacionados a economia hídrica, como hialocistos, concavidade do filídio e sistema reprodutivo. Além disso, essa comunidade pode estar sendo afetada por condições microclimáticas não avaliadas nesse estudo. Interessantemente, variáveis ecológicas locais podem ser melhor preditoras da composição de plantas do que variáveis regionais de paisagens (BACARO *et al.*, 2008). Provavelmente, isso acontece com as briófitas porque suas populações, sobretudo de endêmicas, podem estar distribuídas em uma área muito pequena e as inúmeras variáveis relevantes para a comunidade podem exibir toda a sua gama em distâncias muito curtas, sem importar a extensão da região em estudo. De fato, os musgos respondem eficientemente a filtros ambientais locais, devido a sua sensibilidade a mudanças ambientais locais. Isto se deve ao fato de que os musgos são, em geral, ectohídricos, i.e., absorvem e transportam água pela superfície externa do corpo vegetativo, e não apresentam mecanismos especializados para regular a perda hídrica, culminando em alta sensibilidade a mudanças microambientais (PROCTOR *et al.*, 2007). Ademais, a maioria dos musgos têm metabolismo fotossintético C3 com ponto de saturação de luz da fotossíntese em irradiância modesta quando comparada à maioria das plantas vasculares (MARSCHALL; PROCTOR, 2004). Na ausência de lignina, cutícula cerosa e estômatos no corpo vegetativo dos musgos, essas plantas podem secar rapidamente quando expostas à alta luminosidade e pouca disponibilidade hídrica. Neste trabalho, a comunidade de musgos endêmicos da FA apresentou como mais representativos traços funcionais relacionados à economia hídrica, como hialocistos e concavidade do filídio. Várias características morfológicas têm sido sugeridas para influenciar a interação das briófitas com condições climáticas. Por exemplo, os hialocistos fornecem um reservatório hídrico, encharcando as células fotossintéticas. Como a célula hialina é uma célula morta, sua única função parece ser fornecer água para a porção fotossintética do filídio. A concavidade do filídio também está relacionada à otimização da fotossíntese: enquanto a parte côncava armazena água, a parte convexa realiza a troca gasosa (GLIME, 2017b). Essas características morfológicas fazem com que os musgos tenham elevada capacidade de reter água, o que pode chegar a aproximadamente 200% e 3000% do seu peso seco (MICHEL *et al.*, 2013; OISHI, 2018), e serem responsáveis pela manutenção e balanço hídrico dos ecossistemas, principalmente em florestas tropicais úmidas.

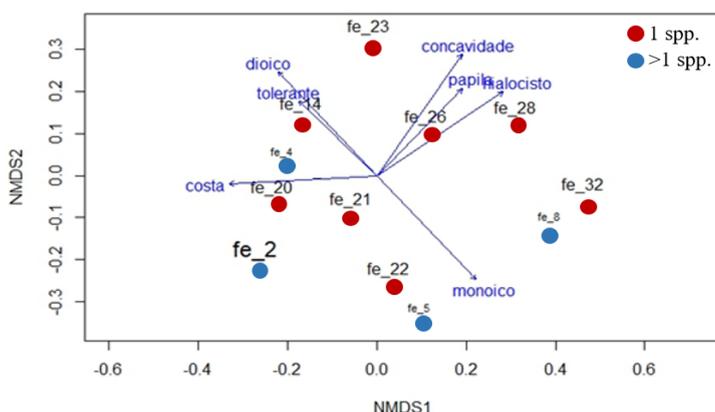


Figura 1. NMDS das entidades funcionais e traços funcionais dos musgos endêmicos da Floresta Atlântica. Stress = 0.1079.

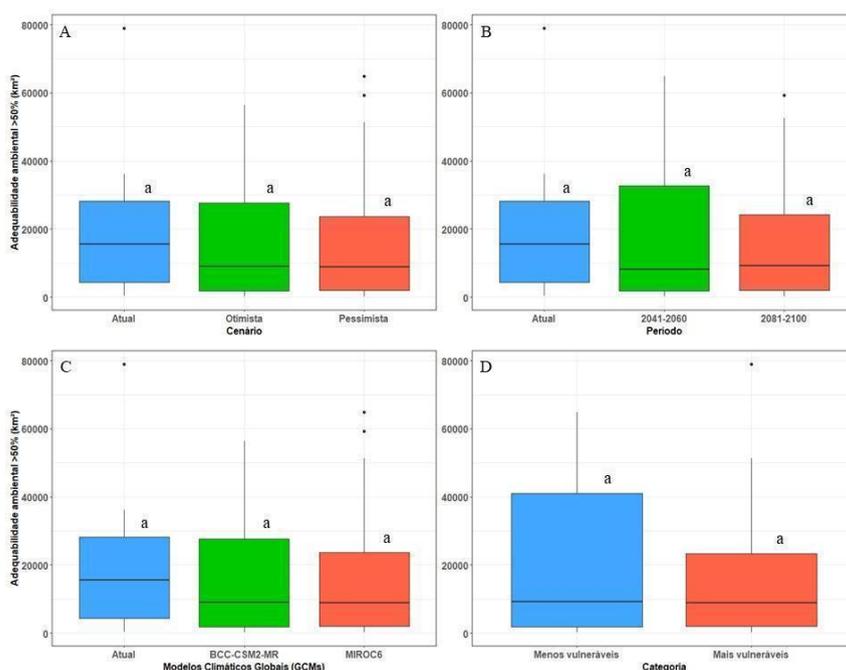


Figura 2. Box-plots da relação da área de adequabilidade ambiental (>50%) em função dos Cenários (A), Períodos (B), Modelos Climáticos (C) e Categoria de entidade funcional (D). Categoria mais vulneráveis = 1 espécie; menos vulnerável > 1 espécie.

CONCLUSÕES

O grau de insegurança funcional da comunidade é marcante, com grande parte das entidades funcionais com somente uma espécie e nem todos os traços representados em várias entidades funcionais, o que pode levar a uma perda de função devido à falta de espécies funcionalmente redundantes. Além disso, em resposta às mudanças climáticas globais, a maioria dos grupos funcionais de musgos endêmicos da Floresta Atlântica se manteve com sua distribuição restrita, podendo levar a extinção dessas espécies em suas localidades de ocorrência. Assim, com a continuidade do estudo, espera-se fornecer informações importantes para os procedimentos de conservação de musgos na Floresta Atlântica.

Autorização legal

Não se aplica.

Fomento

Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE).

Palavras-chave: Atributos funcionais; briófitas; modelos de distribuição potencial; projeções futuras.

Referências

- AMORIM, E. T.; MENINI NETO, L.; LUIZI-PONZO, A. P. An overview of richness and distribution of mosses in Brazil. **Plant Ecology and Evolution**, v. 154, n. 2, p. 183-191, 2021.
- AUBER, A. *et al.* A functional vulnerability framework for biodiversity conservation. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 4774, 2022.
- BACARO, G. *et al.* The role of regional and local scale predictors for plant species richness in Mediterranean forests. **Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology**, v. 142, n. 3, p. 630-642, 2008.
- COWLING, R. M. Endemism. **Encyclopedia of diversity**, v. 2, p. 497-507, 2001.
- FLORA E FUNGA DO BRASIL.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Available at: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Accessed on: 29 Jun. 2023.
- GLIME, J. M. Introduction. Chapt. 1. *In*: GLIME, J. M. **Bryophyte Ecology**. Volume 1. Physiological Ecology. Ebook sponsored by Michigan Technological University and the International Association of Bryologists. 2017a. Last updated 22 March 2023 and available at <<http://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/>>.
- GLIME, J. M. Water Relations: Leaf Strategies – Structural. Chapt. 7-4a. *In*: GLIME, J. M. **Bryophyte Ecology**. Volume 1. Physiological Ecology. Ebook sponsored by Michigan Technological University and the International Association of Bryologists. 2017b. Last updated 5 June 2022 and available at <<http://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/>>.
- HARVEY, P. H.; PAGEL, M. R. **The comparative method in evolutionary biology**. Oxford: Oxford University Press, 1991. 239 p. ISBN 0198546416.
- KAFASH, A. *et al.* Climate change produces winners and losers: Differential responses of amphibians in mountain forests of the Near East. **Global Ecology and Conservation**, v. 16, p. e00471, 2018.
- MAGNEVILLE, C. *et al.* mFD: an R package to compute and illustrate the multiple facets of functional diversity. **Ecography**, v. 2022, n. 1, 2021.
- MARSCHALL, M.; PROCTOR, M. C. F. Are Bryophytes Shade Plants? Photosynthetic Light Responses and Proportions of Chlorophyll a, Chlorophyll b and Total Carotenoids. **Annals of Botany**, v. 94, n. 4, p. 593-603, 2004.
- MICHEL, P. *et al.* Impact of disturbance on above-ground water storage capacity of bryophytes in New Zealand indigenous tussock grassland ecosystems. **New Zealand Journal of Ecology**, v. 13, n. 1, p. 114-126, 2013.
- OISHI, Y. Evaluation of the Water-Storage Capacity of Bryophytes along an Altitudinal Gradient from Temperate Forests to the Alpine Zone. **Forests**, v. 9, n. 7, p. 433, 2018.
- PROCTOR, M. C. F. *et al.* Desiccation-tolerance in bryophytes: a review. **The Bryologist**, v. 110, n. 4, p. 595-621, 2007.
- SÁNCHEZ-TAPIA, A. *et al.* Model-R: A Framework for Scalable and Reproducible Ecological Niche Modeling. *In*: MOCSKOS, E.; NESMACHNOW, S. (Ed.). **High Performance Computing**. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- STORK, N. E. Re-assessing current extinction rates. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, n. 2, p. 357-371, 2009.