

2. Materiais e métodos

2.1 Espécies estudadas

Modelamos a distribuição de 2 espécies: a de quiróptero *Lonchophylla bokermanni* Sazima *et al.*, 1978, e de bromélia *Encholirium subsecundum* (Baker) Mez.

L. bokermanni Sazima *et al.*, 1978 [sazima1978; dias2013] é uma espécie de morcego de porte médio endêmica do Brasil, fazendo parte do gênero *Lonchophylla* (família Phyllostomidae), que abrange espécies nectarívoras, com focinho alongado e língua comprida [fleming2008]. Com poucas ocorrências no bioma do Cerrado e da Caatinga, em Minas Gerais e Bahia (Tabela 2), o quiróptero possui uma distribuição restrita [claudio2018]. Ainda pouco se conhece sobre a biologia da espécie, porém sabe-se que alimenta-se de pólen, néctar e insetos [moratelli; dias2013].

Em razão da degradação de seus habitats, a classificação de *L. bokermanni* quanto ao seu grau de ameaça está como “Em perigo” de acordo com a Listade Espécies Ameaçadas da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) [claudio2018] e como “Quase ameaçada” pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) [icmbio2018].



Figure 1: *Lonchophylla bokermanni* Sazima *et al.*, 1978. Imagem retirada da fonte: claudio2018

Encholirium subsecundum (Baker) Mez é uma espécie de bromélia do gênero *Encholirium* (família Bromeliaceae) que ocorre em formações rochosas, podendo atingir até 2 metros de altura e com um padrão floral quiropterófilo [matos2004; dias2013]. A espécie é endêmica do Brasil, com ocorrências nos biomas da Caatinga, Mata Atlântica e, principalmente, no Cerrado [matos2004; forzza2005; sazima1989], nos estados de Minas Gerais e Bahia (Tabela 1). Embora existam outras espécies de morcegos nectarívoros na área de ocorrência de *E. subsecundum*, *L. bokermanni* é o único polinizador conhecido da bromélia [sazima1989]. *E. subsecundum* não se encontra no Livro Vermelho da Flora do Brasil [martinelli2013] ou na Lista Vermelha da IUCN [iucn].



Figure 2: *Encholirium subsecundum* (Baker) Mez. Imagem de: N. Taylor & D. Zappi

2.2 Ocorrências

Para o processo de Modelagem de Distribuição são necessários registros georreferenciados das espécies. Assim, foram coletados os registros de ocorrências de *Encholirium subsecundum* e *Lonchophylla bokermanni* em 3 bancos de registros online: Specielink, GBIF e SiBBr, que reúnem registros de coleções de espécies. Também foram utilizados registros de artigos que fizeram coletas de espécies.

Foram reunidos 24 registros ao todo da espécie *L. bokermanni*, com o único parâmetro prévio de possuírem coordenadas georreferenciadas. Em seguida, os registros com coordenadas geográficas duplicadas foram retirados da base de dados, sobrando apenas uma ocorrência entre as duplicadas. Então, um *buffer* com raio de 5 km foi criado ao redor de cada registro e foram selecionados apenas uma ocorrência dentro de cada *buffer*, a fim de diminuir o viés amostral na seleção de ocorrências pelo modelo [Hijmans2001]. Por fim, sobraram 8 registros, os quais foram utilizados para as modelagens (Ver tabela 2).

O mesmo método de limpeza e tratamento dos registros de ocorrência foram utilizados com os dados da *E. subsecundum*, inicialmente com 82 registros e após a retirada de registros duplicados e seleção de um registro por *buffer*, restaram 37 ocorrências de localidade da espécie (Ver tabela 1) que foram utilizados nas modelagens.

Todas as ocorrências restantes tiveram a descrição de município e localidades dos registros confrontados com os pontos de georreferenciamento (latitude e longitude), com o objetivo de verificar se estavam de acordo. Nenhum registro restante possuía descrição de localidade que não estivesse

de acordo com a posição geográfica descrita.

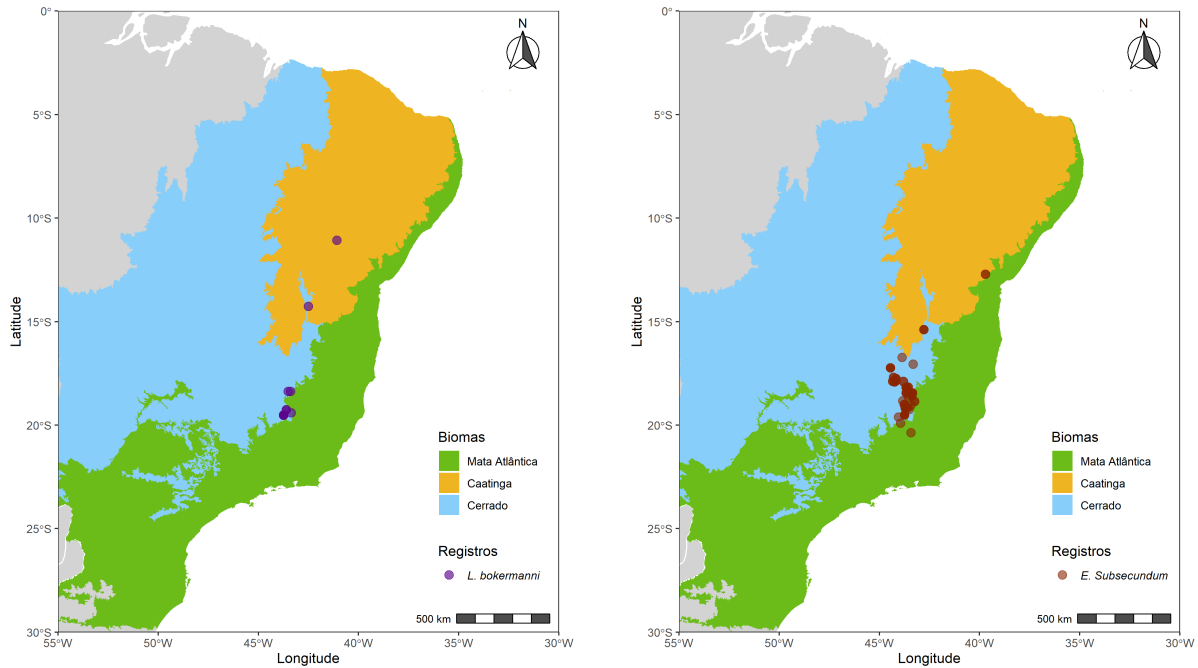


Figure 3: Gráfico das localidades de *L. bokermanni* (à esquerda) e *E. subsecundum* (à direita).

2.3 Dados ambientais

Para produzir os modelos de distribuição potencial das espécies utilizamos camadas ambientais obtidas do projeto WorldClim [worldclim], com resolução espacial de 2.5 arc-minutos (aproximadamente 4.5 km no equador) e representando o clima atual, correspondendo à média das observações de 1970 a 2000. As 19 variáveis bioclimáticas (Tabela 3) derivam de dados de temperatura e precipitação, representando tendências anuais, condições extremas e sazonalidade [worldclim].

Para as predições de distribuições futuras, utilizamos camadas projetadas do clima global para o ano de 2050 (média de 2041 a 2060) de acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [IPCC], obtidas também através do projeto WorldClim [worldclim]. São camadas de 19 biovariáveis (Tabela 3) projetadas para o futuro, com resolução de 2.5 arc-minutos e usando o modelo de circulação CNRM-CM5, do laboratório francês *Centre National de Recherches Meteorologiques*, representando dois cenários distintos de emissão de gases do efeito estufa conforme o *Representative Concentration Pathways* (RCPs), o de RCP 45 (cenário no qual as emissões de CO_2 começam a diminuir a partir de 2045) e de RCP 85 (as emissões de gases continuam a crescer ao longo do século 21) [Vuuren2011].

Diversos autores apontaram problemas de multicolinearidade de variáveis climáticas em modelagens de distribuição [braunisch2013; cardenas2014], afetando diretamente os resultados e

performance dos modelos. A fim de avaliar a gravidade da colinearidade entre os pontos de ocorrências das duas espécies e o conjunto de biovariáveis do clima atual, medimos o Fator de Inflação da Variância (VIF) das camadas ambientais. Para os dados de ocorrência da planta *E. subsecundum*, o teste resultou em 12 (de 19) variáveis bioclimáticas com problemas de colinearidade (Tabela 4). Enquanto que para o morcego *L. bokermanni*, 17 variáveis apresentaram alto grau de colinearidade (Tabela 5). Valores de VIF maiores que o limiar 10 já indicam problema de colinearidade.

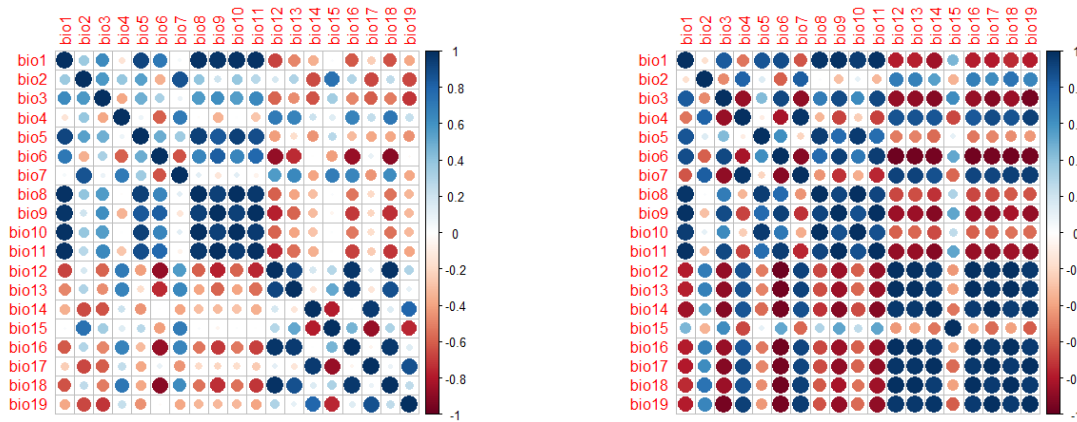


Figure 4: Matriz de correlação entre as variáveis bioclimáticas para a espécie *E. subsecundum* (à esquerda) e *L. bokermanni* (à direita)

2.4 Modelo de Distribuição Potencial

Para o processo de modelagem foi utilizado o pacote SDM (*Species Distribution Modelling*) [sdm], (versão 1.0-89), da linguagem de programação R [r], versão 4.1.1, por apresentar uma série de funções importantes que automatizam o processo de modelagem, além de conter diversos algoritmos de modelagem.

Nós usamos o algoritmo correlativo de modelagem de distribuição Maxent (*Maximum Entropy*) [maxent], versão 3.4.4, disponível no pacote SDM. Maxent é um *software*, de uso livre, para a modelagem da distribuição potencial de espécies a partir da técnica de *machine learning* conhecida como *maximum entropy modeling*.

Maxent recebe como *input* as ocorrências georreferenciadas da espécie e o conjunto de dados camadas ambientais (variáveis preditoras) determinados pelo usuário e dividido em *grid cells* ao longo de uma região escolhida [merow2013]. Diante disso, o algoritmo amostra uma quantidade de localizações de *background* das camadas ambientais, que são confrontadas com as localizações geográficas da espécie, gerando como *output* um modelo que traduz a probabilidade de distribuição da espécie para cada *grid cell*, dada a aptidão às condições ambientais preditas para a espécie. Maxent procura, assim, a distribuição mais espalhada (de entropia máxima) para a espécie na região de estudo.

O algoritmo foi escolhido devido a sua performance superior a outros quando utilizado quanti-

dades pequenas de dados de ocorrência das espécies [hijmans2008; hernandez2006], crucial para nós devido a quantidade pequena de dados para a espécie de morcego *L. bokermanni*. Além disso, Maxent requer apenas ocorrências de presença das espécies, excluindo a necessidade de registros de ausência e facilitando o trabalho com espécies que possuem baixa quantidade de registros ou não possuam registros de ausência.

Como parâmetros de modelagem para o Maxent, utilizamos regularização igual a 1 e prevalência de 50%, ambos valores padrão. O parâmetro de extrapolação e *clamping* foram permitidos para gerar previsões além da distribuição presente das espécies. Para cada espécie foram geradas 50 replicações, metade usando o método de validação por *bootstrap* e a outra metade por *cross validation*. 70% dos registros de ocorrência foram separados e utilizados para treino e 30% para o teste dos modelos. 10 mil pontos de *background* foram gerados aleatoriamente ao longo de cada camada ambiental, os quais foram usados para a modelagem como amostras das variáveis ambientais. Foram utilizados parâmetros padrão para a modelagem devido à falta de informação sobre o habitat e capacidade de dispersão das espécies modeladas.

Fizemos uma modelagem prévia, para cada espécie, com os parâmetros mencionados e todas as variáveis ambientais. A partir de então, as três camadas ambientais com maior importância para os modelos (ver gráficos 6 e 7) de acordo com o AUC foram selecionadas e separadas para a utilização em uma nova modelagem final, com apenas as variáveis ambientais selecionadas do modelo prévio e os parâmetros apresentados no parágrafo anterior.

A fim de avaliar a performance dos modelos criados pelo Maxent, foi empregado o AUC (*Area Under the Curve*) parcial da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*) [maxent], obtido ao plotar valores de sensibilidade no eixo y e 1-especificidade no eixo x e com valores variando de 0 (modelo com 100% de taxa de erro) a 1 (modelo totalmente em acordo com a distribuição observada). O AUC é uma medida estatística independente da escolha do limiar (*threshold*) e tornou-se muito popular para esimar a performance de modelos de distribuição. O valor de limiar para os modelos de cada espécie foi obtido a partir da maximização da especificidade mais a sensibilidade [liu2013], o qual é independente da quantidade de pseudo-ausências, o que pode ser vantajoso ao se utilizar pequenas quantidade de dados. Com o limiar é possível converter os mapas de adequabilidade das espécies para mapas binários (presença-ausência).

O modelo de cada espécie foi então projetado para os cenários futuros, de RCP 4.5 e 8.5, e para o presente gerando 6 mapas de distribuição potencial, 3 da planta e 3 do morcego.

2.5 Estimativa da sobreposição e *mismatch* espacial

Seguindo o método apresentado por gorostiague2018, para o cálculo dos potenciais impactos das mudanças climáticas na distribuição espacial das espécies utilizamos uma variável da alteração na distribuição nos cenários futuros em relação à distribuição potencial no presente. Também estimamos a distribuição compartilhada (sobreposta) entre a planta e o morcego e então calculamos a diferença entre essa área nos cenários futuros com respeito ao presente. A distribuição compar-

tilhada representa a área de encontro entre o morcego polinizador e a planta (*spatially matched range*), assumindo que o morcego é efetivo e sua presença já garante a polinização da planta.

A taxa de correspondência espacial (*spatial match*) foi calculada como a diferença entre a distribuição potencial de cada espécie e a distribuição compartilhada. A taxa de *mismatch* é a taxa de correspondência espacial subtraída de 100. Valores de *mismatch* abaixo de 20% foram considerados como baixo, isto é, menos de 20% da distribuição de uma espécie não está sobreposta com a distribuição da outra [gorostiague2018].