



Modelagem preditiva de *Peltogyne maranhensis*, espécie ameaçada de extinção no Cerrado do Maranhão, Nordeste do Brasil

Jamerson Rodrigo dos Prazeres Campos¹, Vanessa Maria Silva da Cruz², Felipe Correa Sousa³, Eduardo Bezerra de Almeida Jr.⁴

¹ Doutorando do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia (Bionorte) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), CEP: 65080-805, São Luís (MA), Brasil. jam_rod002@yahoo.com.br (autor para correspondência). ² Engenheira Florestal. Universidade Federal do Pará (UFPA). CEP: 66075-110, Belém (PA), Brasil. Telefone: (+55 91) 99327-8089, vanessa.msc@hotmail.com. ³ Graduando em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Laboratório de Estudos Botânicos (LEB), CEP 65080-805, São Luís (MA), Brasil. felipecor3399@gmail.com. ⁴ Professor do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia (Bionorte) e do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), CEP: 65080-805, São Luís (MA), Brasil. ebaj25@yahoo.com.br

Artigo recebido em 20/12/2022 e aceito em 31/07/2023

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi realizar a modelagem preditiva da distribuição geográfica da espécie *Peltogyne maranhensis* no cerrado maranhense. O levantamento de dados foi realizado através de inventários florestais, os quais foram coletados pontos geográficos de ocorrência da espécie, juntamente com banco de dados disponibilizados on-line. As variáveis ambientais utilizadas para a construção do modelo foram clima, topografia, solo e vegetação. Para avaliar as variáveis mais importantes em prever a distribuição da espécie, utilizou-se o modelo-teste de Jackknife. A validação do modelo foi feita através da Área Sob a Curva (AUC). Foram registrados 42 indivíduos de *Peltogyne maranhensis* distribuídos no cerrado do Maranhão. Das variáveis utilizadas, as topográficas não apresentaram ganho significativo para o modelo, com valores de AUC foram acima de 0,90. Constatou-se que a modelagem foi eficiente em prever os locais de ocorrência da espécie, com excelente desempenho avaliado pelos índices, além de evidenciar sua eficácia para identificar nichos ecológicos com poucos dados de ocorrência registrados.

Palavras-chave: Biogeografia. Nicho ecológico. Inventário florístico. Distribuição potencial

Predictive modeling of *Peltogyne maranhensis*, an endangered species in the cerrado of Maranhão state, Northeastern Brazil

ABSTRACT

The purpose of this study was to perform a predictive modeling of the *Peltogyne maranhensis* geographic distribution in the Cerrado of Maranhão. The data collection was conducted using forest inventories, which were collected geographic points of occurrence of species, in association with the database available online. The environmental variables used in the model conception were climate, topography, soil, and vegetation. To evaluate the most important variables to predict species distribution, the Jackknife test model was applied. The model validation was verified using the Area Under the Curve method (AUC). A total of 42 individuals of *Peltogyne maranhensis* distributed in the cerrado of Maranhão were registered. Regarding the variables used, the topographic related did not present significant contribution to the model, with AUC values above 0.90. The model was efficient in predicting the occurrence areas for the key species with high performance as evaluated by the indexes, in addition to evidencing the effectiveness of identifying ecological niches for the species with few occurrence data recorded.

Keywords: Biogeography. Ecological niche. Floristic inventory. Potential distribution.

Introdução

O cerrado é considerado como a savana mais rica do mundo em termos de biodiversidade, com uma flora composta por mais de 13 mil espécies, sendo 44% consideradas endêmicas (Guilherme et al., 2016). Por apresentar alta relevância ecológica, está entre as 35 áreas que foram identificadas como hotspot mundial de biodiversidade devido a elevada riqueza biológica (Myers et al., 2000; Mittermeier et al., 2005).

O bioma cerrado ocupa 22% do território brasileiro, considerado o segundo maior do Brasil, presente em 11 Estados do país (MMA, 2009). No entanto, devido à forte degradação ambiental, o bioma já perdeu mais de 50% de sua cobertura vegetal original (INPE, 2017). As áreas desmatadas estão localizadas majoritariamente na fronteira agrícola, que consiste na porção norte do cerrado, formada pelo Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, conhecida como MATOPIBA. E a principal causa do desmatamento está ligada a expansão do agronegócio, especialmente a produção de soja (Buainain; Garcia; Vieira Filho, 2018; Araújo et al., 2019; Oliveira et al., 2022), visto que a região é muito atrativa e pleiteada pelos interesses de capital nacional e internacional (Nepomoceno e Carniatto, 2022).

No Maranhão, o cerrado abrange 64% do território, sendo composto por um complexo vegetacional com ecótonos e diferentes fitofisionomias, que vão desde áreas com predominância de espécies arbóreas formando dossel, até campos abertos de vegetação herbácea (Ribeiro e Walter, 1998). Apresenta importância social e econômica, pois parte da população complementa sua renda com a comercialização de produtos florestais não madeireiros, como frutos e ervas medicinais (Spinelli-Araujo et al., 2016). No entanto, algumas espécies nativas tem ficado mais escassas devido ao desmatamento, em especial a exploração de madeira (Bispo et al., 2022).

A degradação e a fragmentação de ambientes naturais e consequente perda de habitat da fauna e flora favorece o aumento da “lista vermelha” de espécies ameaçadas de extinção (Tilman et al., 1994; Santos, 2014; Strassburg et al., 2017; Souza e Reis, 2021). A Portaria nº 443 do Ministério do Meio Ambiente, que dispõe a lista nacional oficial da flora ameaçada de extinção, apresenta uma listagem com 2.113 espécies protegidas; destas, 615 são indicadas como ameaçadas no Cerrado (Santos, 2014; Brasil, 2022).

Nesse cenário, está inserida a espécie

Peltogyne maranhensis Huber ex Ducke, conhecida como pau-roxo, classificada como ameaçada de extinção e que ocorre no cerrado maranhense. A espécie apresenta alta relevância socioeconômica para a região, porém com baixo registros de coleta para o Estado.

Peltogyne maranhensis é uma árvore nativa e endêmica do Brasil, da família Fabaceae, e possui elevado potencial econômico por apresentar madeira de alta durabilidade e resistente ao ataque de xilófagos (Lima e Cordula, 2015). Essas características levaram a exploração excessiva e diminuição da população da espécie. O que contribuiu para que essa árvore fosse categorizada como vulnerável (REFLORA, 2019), na lista de espécies ameaçadas de extinção. Considerando o baixo registro de ocorrência dessa espécie na natureza, associada a perda contínua dos ambientes naturais, faz-se necessária uma reavaliação da distribuição da espécie e dos habitats ainda existentes (Zarate et al., 2022).

Neste sentido, dados biogeográficos podem contribuir para elaboração de propostas e estratégias de conservação, fornecendo uma avaliação direcionada sobre o status de conservação e ocorrência da espécie. Com isso, a modelagem preditiva de distribuição geográfica (Elith et al., 2011; Merow; Smith; Silander, 2013; Maciel; Oliveira-Filho e Eisenlohr, 2016), contribui por gerar modelos de nicho ecológico das espécies (Zarate et al., 2022). O que torna possível detectar onde uma espécie ou grupo de espécies pode se estabelecer, devido as condições ambientais existentes.

Esse procedimento tem contribuído para determinar a amplitude de distribuição geográfica das espécies (Moura et al., 2017; Coelho et al., 2016; Costa et al., 2018, Kunwar et al., 2021), possibilitando uma ampla variedade de aplicações em pesquisa de conservação (Murphy e Smith, 2021). Essas aplicações podem estar direcionadas para prever cenários futuros de ocorrência das espécies em resposta as mudanças climáticas (Gomes et al., 2022; Silva et al., 2022; Hussein e Estifanos, 2023), auxiliar no planejamento de estratégias para recuperação de áreas alteradas, conectividade da paisagem e criação de áreas protegidas (Gomes-Silva e Leal, 2021).

Assim, o presente estudo tem como objetivo realizar uma modelagem preditiva de distribuição geográfica de *Peltogyne maranhensis* no cerrado maranhense com vistas a ampliar o conhecimento biogeográfico da espécie a partir da indicação do possível nicho ecológico,

considerando as áreas de maior adequabilidade ambiental.

Material e métodos

Área de estudo

O Maranhão possui 329.642,170km² de extensão territorial, com população estimada em 7.000.229 milhões de habitantes e densidade demográfica de 19,81 hab/km² (IBGE, 2017).

Devido a posição geográfica do Estado e a presença de áreas ecotonais, a região do cerrado recebe influências climáticas da Amazônia e da Caatinga. Na região central e leste do cerrado maranhense, o clima predominante é seco e sub-úmido, com temperaturas médias anuais superiores a 26°C e índices pluviométricos que variam entre 1100 e 1300mm. Nas demais regiões, o clima é caracterizado como tropical sub-úmido, com precipitações entre 1700 a 2000mm e temperaturas médias de 24°C (Maranhão, 2011).

Os tipos de solos predominantes no Estado são os latossolos amarelo (33,87 %), argissolos vermelho-amarelo (18,76 %), neossolos litóticos e quartzarênicos (15,82 %), plintossolos argilúvico (13,77 %) e luvisolos crômico (6,70 %) (Maranhão, 2011). Na porção sul do cerrado maranhense são registrados neossolos litóticos, ao norte os neossolos quartzarênicos e na região central, os luvisolos crômicos e latossolos.

O relevo do Estado é dividido em duas grandes áreas, sendo elas: a região de planície no litoral, caracterizada pela presença de tabuleiros e baixadas alagadas, e a região de planalto, caracterizado por formações basálticas com presença de chapadas e serras (Maranhão, 2011).

Devido aos biomas distintos registrados, como Amazônia, Caatinga e Cerrado, o Maranhão apresenta uma vegetação bastante diversa. O cerrado apresenta diferentes fitofisionomias, categorizadas como cerrado *stricto sensu* (cerrado típico), campo sujo, cerradão, cerrado rupestre, vereda, mata de ripária, mata de galeria e cerrado de mata seca (Kuhlmann, 2018).

Coleta dos dados

O estudo foi realizado em duas etapas: a primeira etapa consistiu em selecionar a espécie a partir de dados de inventários florestais realizados entre os anos de 2017 e 2022 (dados primários), em diferentes áreas do cerrado maranhense (Figura 1). E a segunda, consistiu no levantamento de pontos de ocorrência da espécie a partir de banco de dados *on-line* (dados secundários).

O levantamento ocorreu a partir da instalação de parcelas amostrais medindo 2.000m² (20m x 100m) cada, distribuídas sistematicamente, com distanciamento de 200m. Foram mensurados os indivíduos com Circunferência a Altura do Peito (CAP) ≥ 22 cm e anotados os pontos geográficos de todos os indivíduos. Para identificação da espécie foram coletadas amostras de material botânico e encaminhadas para o Herbário do Maranhão (MAR) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Na segunda etapa foi realizado uma busca de pontos de ocorrência (coordenadas geográficas) da espécie, adquiridos a partir da base de dados do Sistema global de Informação sobre Biodiversidade (GBIF, 2019). Os dados de ocorrência registrados para o *Peltogyne maranhense* totalizaram 29 ocorrências na plataforma do GBIF e 13 amostras a partir do levantamento primário.

Análise dos dados

Os modelos preditivos de distribuição potencial foram gerados no BioDinâmica, considerando todos os pontos de ocorrência registrados para a espécie. Posteriormente, recortou-se os modelos gerados apenas para o cerrado maranhense. O BioDinâmica é um conjunto de ferramentas analíticas pertencente ao freeware Dinamica-EGO (<http://www.dinamicaego.com>).

Para elaboração dos modelos foram utilizadas variáveis ambientais em formato raster, com resolução espacial de aproximadamente 1 km e resolução radiométrica de 16 Bits. Os dados climáticos, incluindo temperatura e precipitação (máxima, média e mínima) foram obtidos na plataforma de dados WorldClim (Fick e Hijman, 2017); e os topográficos (inclinação e declividade) através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2019). As informações sobre solo e vegetação foram consultadas na base de dados AmbData, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (AMBDATA, 2016).

Os rasters das variáveis selecionadas foram recortados, delimitando o território do Brasil, utilizando o software ArcGis 10.2. Para as variáveis que possuíam diversas camadas, como precipitação e temperatura, realizou-se a composição de acordo com a variação climática (máxima, média e mínima), a fim de juntá-las em um único arquivo.

Para analisar as variáveis mais importantes para prever a distribuição da espécie selecionada

foi utilizado modelo-teste “Jackknife” no programa Maxent. Esse teste estima a significância de uma variável ambiental individualmente, de modo que aquelas que resultam em valores muito próximos de zero são descartadas do modelo por não apresentarem influência significativa na predição

de distribuição da espécie. Assim, as que alcançarem valores próximos a 1, evidenciam dados altamente correlacionadas com a distribuição (Pearson et al., 2007). Para este estudo, as variáveis que alcançaram valores acima de 0,90 foram selecionadas para o modelo.

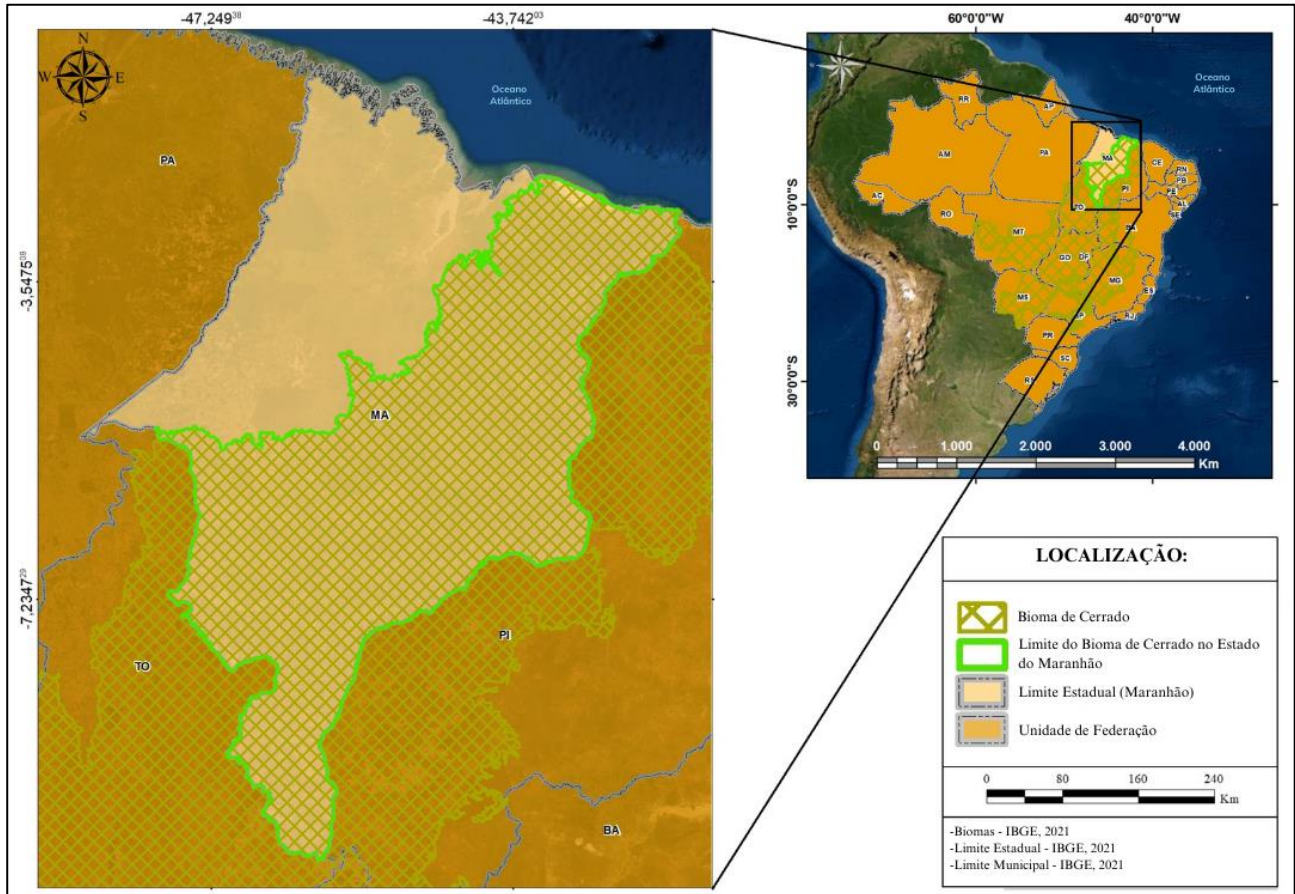


Figura 1. Mapa da área do cerrado registrado para o estado do Maranhão, nordeste do Brasil.

Os modelos de distribuição foram elaborados através do software BioDinâmica, empregando os algoritmos para modelos de nicho ecológico e distribuição, sendo eles: SVM (Suport Vector Machine – Máquina de Vetores de Suporte) e o Bioclim (envelope bioclimático). Os algoritmos são baseados em dados de presença e ausência de um ponto de ótimo ecológico para a espécie, definido pelo centro dos pontos de ocorrência no espaço ecológico, produzindo mapas em escala de cores crescentes, onde os tons mais escuros ou quentes indicam maior adequabilidade da espécie ao ambiente (Marco-Junior e Siqueira, 2009; Costa et al., 2018).

A estimativa de distribuição de adequabilidade de ocorrência da espécie no espaço geográfico foi realizada a partir de variáveis ambientais relacionadas com a presença da espécie

e a paisagem. Os valores esperados de cada variável ficaram de acordo com os valores empíricos observados dos pontos de ocorrência, tornando a distribuição mais próxima à distribuição uniforme (Phillips; Anderson; Schapire, 2006; Lima-Ribeiro e Diniz-Filho, 2012).

O algoritmo SVM foi utilizado para resolver problemas de reconhecimento padrão, minimizando o risco estrutural de classificar de maneira errônea os padrões ainda não vistos pela distribuição dos dados (Marco-Junior e Siqueira, 2009).

Para estabelecer o limite da distribuição da espécie, foi necessário minimizar a omissão e a sobreprevisão do modelo. Nesse sentido, quando há ocorrência apenas de dados, recomenda-se a utilização de envelopes bioclimáticos como o Bioclim, que procura determinar uma região com

característica climática similar as de onde a espécie foi registrada (Merow; Smith; Silander, 2013).

A validação do modelo foi realizada por meio da Área Sob a Curva (AUC – Area Under Curve), a qual é calculada através da obtenção da curva ROC (Receiver Operating Characteristics). A curva ROC é produzida em um gráfico plotando a sensibilidade (eixo X) contra a especificidade (eixo Y) do modelo, cuja sensibilidade é a proporção de presenças verdadeiras do total de ausências verdadeiras, e a especificidade é proporção de ausências verdadeiras em relação as ausências preditas (Marco-Junior e Siqueira, 2009).

Os valores de AUC próximos de 1 indicam que o modelo apresenta alto desempenho para prever os locais de ocorrência da espécie. Enquanto o inverso pode ser dito dos valores próximos de 0,5, que classificam o modelo como aleatório (Lima-Ribeiro e Diniz-Filho, 2012). Os resultados de AUC foram classificados de acordo com a metodologia de Metz (1986), que os categoriza em: muito ruim ($>0,5$ e $\leq 0,6$), ruim ($>0,6$ e $\leq 0,7$), médio ($>0,7$ e $\leq 0,8$), bom ($>0,8$ e $\leq 0,9$) e excelente ($>0,9$ e $\leq 1,0$).

Resultados e discussão

Foram registrados um total de 42 indivíduos de *Peltogyne maranhensis* com distribuição geográfica real, a partir dos dados de inventários florestais e registros dos herbários online. O teste de Jackknife demonstrou que as variáveis topográficas (inclinação e declividade) não apresentaram ganho significativo para o modelo por representarem forte influência sobre o modelo de nicho ecológico (Tabela 1).

A avaliação do desempenho dos modelos com o uso do índice AUC, apresentou valores acima de 0,90, evidenciando melhor acurácia do modelo (Metz, 1986). Os índices dos modelos preditivos de distribuição Bioclim obteve AUC = 0,92 e acurácia = 0,90. Já o SVM alcançou AUC = 1 e acurácia = 0,92, demonstrando melhor desempenho.

A utilização do Bioclim apresentou uma distribuição mais restrita, enquanto o SVM ampliou a área de distribuição (Figura 2). Os tons mais quentes indicam áreas com maior adequabilidade ambiental para que a espécie ocorra (Pearson et al., 2007; Moura et al., 2017).

Tabela 1. Lista das variáveis selecionadas e seus respectivos valores após o teste de Jackknife. Legenda: Temp. = temperatura; Máx. = máxima; Méd. = média; Mín. = mínima.

VARIÁVEIS PREDITORAS	TESTE DE JACKKNIFE	
	DESCRIÇÃO	VALOR
Solo	–	1.11
Vegetação	–	1.01
Temperatura Anual	Máx. – Méd. – Mín.	1.00
Precipitação Anual	Máx. – Méd. – Mín.	0.98
Bio 1	Temp. média anual	0.97
Bio 2	Variação diurna de temp.	0.96
Bio 3	Isotermalidade	1.00
Bio 4	Sazonalidade da temp.	0.92
Bio 5	Temp. máx. do mês mais quente	0.91

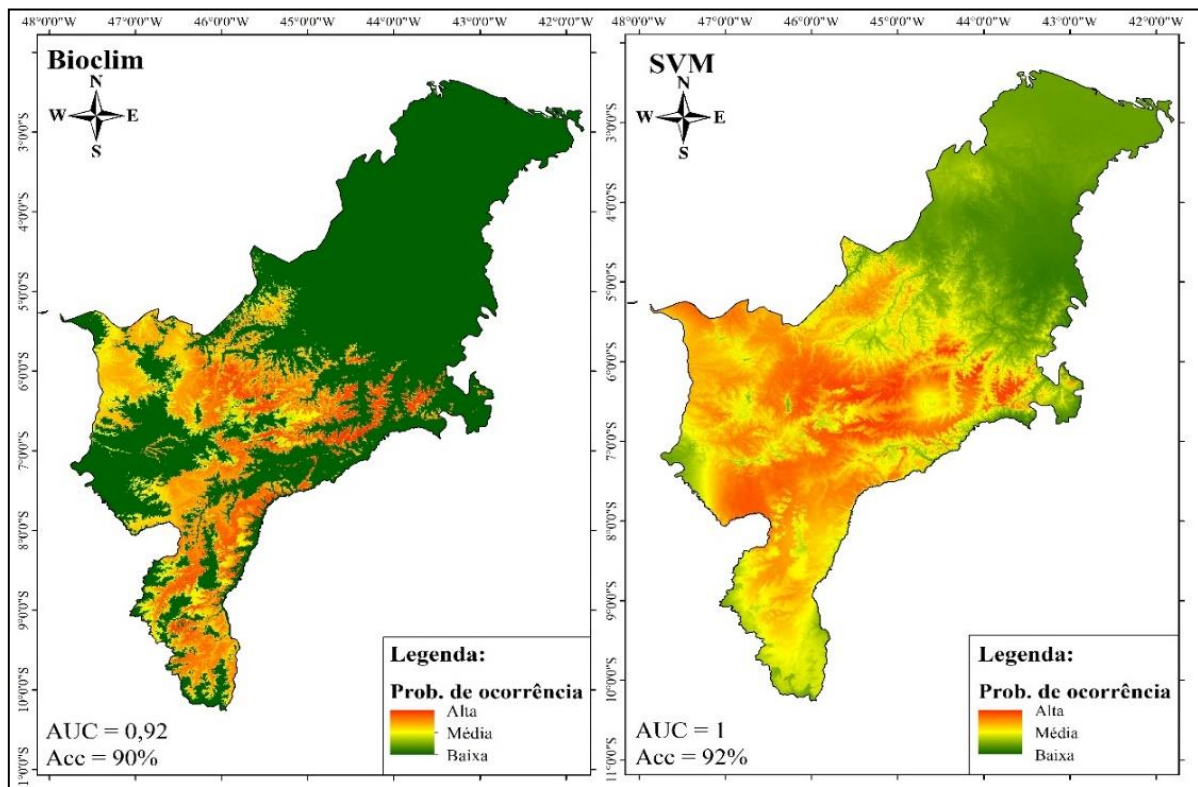


Figura 2. Mapa de distribuição potencial de *Peltogyne maranhensis* no cerrado maranhense, utilizando Bioclim e SVM. Legenda: AUC (“Area under curve”); Acc (acurácia).

A partir da modelagem realizada, foi possível observar que o algoritmo SVM ajustou-se melhor ao modelo. Evidenciou também que a maior adequabilidade ambiental para essa espécie encontra-se nas regiões noroeste, central e sudoeste do Estado. Os modelos expuseram um gradiente de adequabilidade, considerando as condições ambientais que formam o nicho ecológico da espécie, aumenta-se a possibilidade de ocorrência. As áreas adjacentes a essas, por exemplo, apresentaram adequabilidade de ocorrência média, tendo em vista as características ambientais próximas as áreas de maior predição.

Alguns estudos (Amaral et al., 2012; Lima e Cordula, 2015; Maciel; Oliveira-Filho; Eisenlohr, 2016), evidenciam, de forma geral, uma baixa densidade de indivíduos de *Peltogyne maranhensis*, reforçando o endemismo da espécie no Brasil. No presente trabalho, ressalta-se a baixa ocorrência para o Maranhão, tendo apenas, 42 indivíduos registrados. Essa baixa densidade de ocorrência pode estar relacionada a raridade da planta ou a menor quantidade de coletas na região. Com isso, torna-se prioritária a ampliação de pesquisas de florística, taxonomia e biogeografia, em regiões da Amazônia e Cerrado, direcionadas a conservação e manejo da espécie (Maciel et al., 2016; Jácome et al., 2021).

A seleção pelo teste do jackknife das variáveis relacionadas com o clima (precipitação e temperatura), o solo e a vegetação, está intimamente relacionada à autoecologia de *P. maranhensis*. Coelho et al. (2016) afirmam que as variáveis ambientais selecionadas através desse teste ajudam a entender o nicho ecológico da espécie. A modelagem da espécie evidencia também sua ocorrência em áreas de vegetação mais adensadas como mata ripária, cerradão e o cerrado típico (*stricto sensu*). Além de se desenvolver melhor em ambientes cuja precipitação tem um período mais longo durante o ano; a espécie ocorre em solos minerais, com alta permeabilidade de água, como luvissolos, latossolos vermelho-amarelo e argissolos (REFLORA, 2019).

Nesse contexto, os dados contidos no Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no estado do Maranhão, instituído pelo Decreto Estadual nº 27.317/2011, indicam que as fitofisionomias (mata ripária, cerradão e cerrado típico) podem ser observadas desde o norte até a região central do cerrado maranhense (Maranhão, 2011). Essas informações convergem com o possível nicho ecológico predito pelos algoritmos para *Peltogyne maranhensis*, o qual demonstrou o seu maior potencial de ocorrência nas regiões noroeste,

central e sudoeste do cerrado maranhense (Figura 2).

O fato das variáveis ambientais de topografia (inclinação e declividade) não terem alcançado ganhos significativos para a modelagem de distribuição, indica que a espécie pode ser adaptada aos diferentes tipos de relevo do cerrado maranhense. Caracterizados como planícies e planaltos acompanhados de chapadas e serras, que podem até ocorrer no mesmo município (Maranhão, 2011).

De modo geral, o uso do Bioclim levou a diminuição do tamanho da área de distribuição predita no modelo, restringindo as espécies em locais onde há maior adequabilidade de habitats (Figura 2). Lima-Ribeiro e Diniz-Filho (2012) explicam que por não produzir um gradiente contínuo de adequabilidade como os demais métodos, o Bioclim indica ambientes cujas características estejam dentro do envelope bioclimático, apontando de forma restrita se um local é adequado ou não à ocorrência da espécie.

O SVM modelou uma distribuição mais ampla, maximizando os resultados assim como também foi apontado por Marco-Junior e Siqueira (2009). Esses autores esclarecem que isso ocorre devido a uma propriedade especial dos algoritmos do tipo SVM que, simultaneamente, minimizam os erros de classificação empírica e maximizam a margem geométrica do modelo. O modelo de *Peltogyne maranhensis* que mostrou melhor desempenho foi do algoritmo SVM, que obteve valores de AUC e acurácia mais altos quando comparados ao Bioclim.

Hussein e Estifanos (2023) também obtiveram elevado valor de AUC (0,96) utilizando o SVM para modelar a espécie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. na Etiópia, considerando os impactos das mudanças climáticas globais. Gomes-Silva e Leal (2021) relataram que os valores AUC superior a 0,80 podem indicar modelos adequadamente ajustados aos dados obtidos, quando validados pelo conjunto de dados do teste utilizado. No entanto, Sanchez-Martinez et al. (2021) alertaram que modelos de distribuição de espécies amplamente usados, de forma geral, podem apresentar suposições simplificadoras, pois muitas vezes não consideram importantes atributos ecológicos e evolutivos; podendo dificultar a caracterização do nicho da espécie.

Vale ressaltar que, apesar dos mapas demonstrarem as áreas onde existe maior adequabilidade de ocorrência da espécie (Figura 2), isso não significa que nos pontos mais claros a ocorrência seja nula, mas sim, de menor

adequabilidade. Essa inferência é corroborada pela diferença de variação das áreas de distribuição entre os algoritmos, enquanto um minimizou a área de ocorrência, o outro ampliou para áreas não previstas no outro modelo.

Por se tratar de uma espécie ameaçada de extinção, a modelagem preditiva visou identificar áreas potenciais para ampliar o conhecimento da ocorrência da espécie, no intuito de direcionar novas pesquisas, aumentar os esforços de coletas e auxiliar na conservação. Isso contribuirá para aumentar a possibilidade de sucesso de sua reintrodução em seu ambiente natural (Giannini et al., 2012; Alexandre; Lorini; Grelle, 2013; Henderson et al., 2023). Observa-se, também, a urgente necessidade de aumentar as áreas protegidas do cerrado, bem como realizar pesquisas sobre a eficácia das unidades de Conservação já existentes para proteção das espécies da flora que são consideradas raras, endêmicas, ecologicamente sensíveis ou ameaçadas (Cardoso et al., 2023).

Conclusões

Diante dos dados apresentados, a modelagem foi eficiente em apresentar modelos das áreas de possível ocorrência de *Peltogyne maranhensis*, além de evidenciar a eficácia dos modelos para uma espécie com poucos registros de ocorrência. As variáveis ambientais de maior influência sob o modelo de distribuição foram o solo, a vegetação e a temperatura.

As áreas do noroeste, central e sudoeste, do cerrado maranhense, apresentaram maior adequabilidade ambiental para o estabelecimento de *Peltogyne maranhensis*, podendo indicar possível nicho ecológico da espécie.

Por fim, o uso da modelagem preditiva de distribuição geográfica mostrou-se importante por auxiliar em pesquisas direcionadas para a conservação e manejo de espécies que estão ameaçadas de extinção. Além de servir de alerta para a necessidade de intensificar os estudos sobre a espécie, devido a acelerada degradação das áreas de cerrado no estado do Maranhão.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) pela realização de estágio no New York Botanical Garden do primeiro autor. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (finance code 001). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade

do último autor (316031/2021-6 EBAJ). Ao Laboratório de Estudos Botânicos (LEB) e ao Herbário do Maranhão (MAR), da Universidade Federal do Maranhão, pelos equipamentos, estrutura física e recursos humanos.

Referências

- Alexandre, B. R., Lorini, M. L., Grelle, C. E. V., 2013. Modelagem preditiva de distribuição de espécies ameaçadas de extinção: um panorama das pesquisas. *Oecologia Australis* 19, 483-508. <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2013.1704.04>
- Amaral, D. D., Vieira, I. C. G., Salomão, R. P., Almeida, S. S., Jardim, M. A. G., 2012. The status of conservation of urban forests in eastern Amazonia. *Brazilian Journal of Biology* 72, 257-265. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000200005>
- AMBDATA, 2016. Variáveis ambientais para modelagem de distribuição de espécies. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/download.php>>. Acesso em 20 de jan. de 2022.
- Araújo, M. L. S., Sano, E. E., Bolfe, É. L., Santos, J. R. N., dos Santos, J. S., Silva, F. B., 2019. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). *Land Use Policy* 80, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>
- Bispo, T. W., Braga, C. L., Lima, C. C., Rocha, S. F., 2022. Bacuri: o mercado do fruto que simboliza o extrativismo sul-maranhense, no Brasil. *Revista Grifos* 31(57), 01-20. <http://dx.doi.org/10.22295/grifos.v31i57.6730>
- Buainain, A. M., Garcia, J. R., Vieira Filho, J. E., 2018. A economia agropecuária do Matopiba. *Estudos Sociedade e Agricultura* 26, 376-401. <https://doi.org/10.36920/esa-v26n2-6>
- Brasil. Portaria MMA nº 148 de 07 de junho de 2022. Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção. Diário Oficial da União, Brasília, DF, de 08 de junho de 2022.
- Cardoso, M. N., Shimano, Y., Cruz, P. V., Boldrini, R., Mariano, R., Nessimian, J. L., Molineri, C., Salles, F. F., Andrade, A. F. A., Marco Jr, P., Juen, L., 2023. Assessing the distribution of mayflies (Ephemeroptera: Insecta) in the Brazilian Amazon to guide more effective conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 33, 337-348 <https://doi.org/10.1002/aqc.3934>
- Coelho, G. L. N., Carvalho, L. M. T., Gomide, L. R., 2016. Modelagem preditiva de distribuição de espécies pioneiras no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51, 207-214. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000300002>
- Costa, T.R. et al., 2018. Modelagem preditiva da espécie *Lychnophora pohlii* SCH. BIP. no estado de Minas Gerais. *Nativa* 6, 100-106. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i1.4696>
- Souza, J. R., Reis, L. N. G., 2021. Geoprocessing and landscape ecology for assessment fragmentation and connectivity of the habitats of the microregion of Ceres, Goiás (Brazil). *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista* 17(3), 26-38. <https://doi.org/10.17271/1980082717320213035>
- Elith, F. et al., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Conservation Biogeography* 17, 43–57. DOI:<https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Fick, S. E.; Hijmans, R. J., 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land áreas. *International Journal of Climatology* 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Giannini, T. C., Siqueira, M. F., Acosta, A. L., Barreto, F. C. C., Saraiva, A. M., Alves-dos-Santos, I., 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. *Rodriguésia* 63, 733-749. <https://doi.org/10.1590/S217578602012000300017>
- GBIF - Global Biodiversity Information Facility., 2019. Acesso a dados de biodiversidade. Disponível em <<https://doi.org/10.15468/dl.akycka>>. Acesso em 04 de mar. de 2019.
- Gomes, L. M., Bezerra, C. D. S., Aguiar, A. V. D., Wrege, M. S., Lopes, M. T. G., 2022. Prediction of the natural distribution and conservation of *Urena lobata* L. in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 52, e72594. <https://doi.org/10.1590/198340632022v5272594>
- Gomes-Silva, F. F., Leal, E. S. B., 2021. Últimos refúgios da onça-parda (*Puma concolor*) no Brasil: áreas prioritárias para a conservação sob a perspectiva da modelagem de distribuição geográfica. *Revista de Geografia* 38(1), 127-140. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2021.246100>

- Guilherme, F.A.G. et al., 2016. Flora do Cerrado: ferramentas de conservação da diversidade vegetal no sudoeste goiano. In: Peixinho, D.M., Sousa, M.S. (org). Reconfiguração do Cerrado: uso, conflitos e impactos ambientais. Goiânia: UFG/REJ (eds), p. 35-52.
- Henderson, A. F., Santoro, J. A., Kremer, P., 2023. Impacts of spatial scale and resolution on species distribution models of American chestnut (*Castanea dentata*) in Pennsylvania, USA. *Forest Ecology and Management* 529, 120741. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120741>
- Hussein, A., Estifanos, S., 2023. Modeling impacts of climate change on the distribution of invasive *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. in Ethiopia: Implications on biodiversity conservation. *Heliyon* 9(4), e14927. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14927>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. 2017. Estatística dos municípios do estado do Maranhão. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/panorama>>. Acesso em 15 de ago. de 2018.
- Kuhlmann, M., 2018. Frutos e sementes do Cerrado: espécies atrativas para a fauna. Brasília: M. K. Peres, 464 p.
- Kunwar, R. M., et al., 2021. Distribution and habitat modeling of *Dactylorhiza hatagirea* (D. Don) Soo, *Paris polyphylla* Sm. and *Taxus* species in Nepal Himalaya. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* 20, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100274>
- Lima, H. C., Cordula, E., 2015. Peltogyne in lista de espécies da flora do Brasil. Disponível em <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB78752>>. Acesso em 15 de jan. de 2019.
- Ribeiro, M. S. L.; Diniz-Filho, J. A. F., 2012. Modelando a distribuição geográfica das espécies no passado: uma abordagem promissora em paleoecologia. *Revista Brasileira de Paleontologia* 15, 371-385. doi:10.4072/rbp.2012.3.12
- Maciél, E. A., Oliveira-Filho, A. T., Eisenlohr, P. V., 2016. Prioritizing rare tree species of the Cerrado-Amazon ecotone: warnings and insights emerging from a comprehensive transitional zone of South America. *Natureza & Conservação* 14, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.002>
- Maranhão., 2011. Plano de ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas no estado do Maranhão. Disponível em <http://www.fundoamazonia.gov.br/export/sites/default/pt/.galleries/documentos/prevencao-e-controle-do_desmatamento/Plano_Estadual_Maranhao.pdf>. Acesso em 21 de out. de 2018.
- Marco-Júnior, P., Siqueira, M. F., 2009. Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista. *Megadiversidade* 5, 65-76
- Merow, C., Smith, M. J., Silander Jr., J. A., 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36, 1058-1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Metz, C. E., 1985. ROC methodology in radiologic imaging. *Investigational Radiology. Investigative Radiology* 21, 720-733.
- Mittermeier, R. A. et al., 2005. A brief history of biodiversity conservation in Brazil. *Conservation Biology* 19, 601-611.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente., 2009. Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado. Disponível em <www.mma.gov.br/estruturas/201/_arquivos/ppcerrado_201.pdf>. Acesso em: 14 de abr. de 2022.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais., 2017. Prodes - Incremento anual de área desmatada no Cerrado Brasileiro. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/cerrado>>. Acesso em 03 de out. de 2018.
- Jácome, C. C., Duarte, P. J., Pires, M. R., Mori, F. A., Lafetá, B. O., Sartori, C. J., 2021. Anatomia macroscópica de madeiras comercializadas no município de São João Evangelista, estado de Minas Gerais, Brasil. In: W. V. Vangelista (Org.). *Madeiras nativas e plantadas do Brasil: qualidade, pesquisas e atualidades*. Editora Científica Digital, p. 230-243. 10.37885/210504704
- Moura, C., Costa, T., Oliveira, P., Bueno, M., Machado, E. L., 2017. Modelo preditivo do potencial de distribuição geográfica da espécie *Richeria grandis* Vahl. no estado de Minas Gerais e sua relação com as flutuações climáticas do quaternário. *Enciclopédia Biosfera* 14, 911-923. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2017A73
- Murphy, S. J., Smith, A. B., 2021. What can community ecologists learn from species distribution models?. *Ecosphere* 12(12), e03864. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3864>
- Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., Fonseca, G. A.B., Kent, J., 2000. Biodiversity

- hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nepomoceno, T. A. R., Carniatto, I., 2022. A nova fronteira agrícola do Brasil: um ensaio teórico sobre a insustentabilidade na região do Matopiba. *Revista Cerrados* 20(01), 95-119. <https://doi.org/10.46551/rc24482692202205%20>
- Oliveira, A. B., Sousa Paz, D. A., Jesus Salles, J. S., Schwingel, P. R., Neto, J. G. P., 2022. Territorialização do agronegócio florestal: expansão da silvicultura de eucalipto sobre a agricultura familiar nos municípios de Açailândia e Itinga do Maranhão, Maranhão, Brasil. *Revista Contexto Geográfico* 7(15), 15-30. <https://doi.org/10.28998/contegeo.v7i15.14438>
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., Peterson, A. T., 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34, 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Schapire, R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- REFLORA. 2019. Lista de espécies da flora do Brasil. Disponível em <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>>. Acesso em 07 de mar. de 2022.
- Ribeiro, J. F., Walter, B. M. T., 1998. Fitofitofisionomia do Bioma Cerrado. In: Sano, S.M., Almeida, S.P. (org.). *Cerrado: ambiente e flora*. Brasília: Embrapa, p. 89-166.
- Sanchez-Martinez, P., Marcer, A., Mayol, M., & Riba, M. (2021). Shaping the niche of *Taxus baccata*, a modelling exercise using biologically meaningful information. *Forest Ecology and Management*, 501, 119688. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119688>.
- Santos, A. A. D., Rodrigues, Y. O., Carvalho, O. S., 2014. Levantamento das espécies de plantas ameaçadas do cerrado. *Public Knowledge Project* 3, 1-14.
- Silva, L. S., Costa, T. R., Teixeira, R. S., 2022. Modelagem preditiva de *Vellozia cinerascens* (Mart.) Mart. ex Seub: As Mudanças Climáticas poderão afetar sua ocorrência? *Diversitas Journal* 7(4), 2331-2342. DOI: 10.48017/dj.v7i4.2013
- Spinelli-Araujo, L. et al., 2016. Conservação da Biodiversidade do Estado do Maranhão: cenário atual em dados geoespaciais. *Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 29 p.
- Strassburg, B. B. N. et al., 2017. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology and Evolution* 1, 1-3. DOI: 10.1038/s41559-017-0099
- Tilman, D. et al., 1994. Habitat destruction and the extinction debt. *Nature* 371, 65-66. DOI: 10.1038/371065a0
- USGS - United States Geological Survey., 2019. Portal do serviço geológico dos Estados Unidos. Disponível em <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em 02 de out. de 2018.
- Vapnik, V., 1995. *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer Verlag. 314p.
- Zarate, M. A., Shanee, S., Charpentier, E., Sarmiento, Y., Schmitt, C. A., 2023. Expanded distribution and predicted suitable habitat for the critically endangered yellow-tailed woolly monkey (*Lagothrix flavicauda*) in Perú. *American Journal of Primatology* 85(2), e23464. DOI: 10.1002/ajp.23464.