

Uso do modelo MaxEnt para prever a potencial distribuição de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil

Carlos Eduardo Gonçalves Pedroza ¹, Paulo Regis Menezes Sousa ², Selma Freire de Brito ^{3*}

¹Graduado em Ciências Biológicas, Universidade Estadual do Ceará, Brasil.

²Doutor em Engenharia de Teleinformática, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Brasil.

³Doutora em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual do Ceará, Brasil. (*Autor correspondente: selma.brito@uece.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 23/10/2023 – Revisado em: 08/01/2024 – Aceito em: 10/05/2024

RESUMO

Espécies invasoras são responsáveis por uma série de danos ambientais e econômicos em todo o mundo. *Prosopis juliflora* é uma espécie exótica bastante difundida no nordeste brasileiro, sendo descrita como invasora em algumas regiões. O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição potencial de *P. juliflora* no nordeste do Brasil utilizando o modelo de máxima entropia. Inicialmente foram coletados dados de ocorrência nativa e exótica de *P. juliflora* e selecionadas variáveis bioclimáticas. A modelagem foi realizada no software MaxEnt e o modelo gerado foi validado através da curva ROC (Receiver Operating Characteristic) e do cálculo da área sob a curva. Com base nos fatores abióticos utilizados, a modelagem mostrou que há alta probabilidade de ocorrência da espécie no nordeste brasileiro, com cerca de 9.510,51 km² altamente favoráveis. Os estados do Maranhão e do Piauí apresentam pouca ou nenhuma área adequada, enquanto o Ceará e o Rio Grande do Norte apresentam as áreas mais favoráveis. A precipitação e a temperatura mínima mais fria são os fatores que mais afetam a ocorrência desta espécie. Recomenda-se que a região Nordeste seja monitorada para avaliar processos de invasão e impactos desta espécie.

Palavras-Chaves: Algaroba, Caatinga, Conservação Ambiental, Espécies exóticas, Modelagem de nicho.

Use of the MaxEnt model to predict the potential distribution of *Prosopis juliflora* in Northeast Brazil

ABSTRACT

Invasive species are responsible for a range of environmental and economic damages across the world. *Prosopis juliflora* is an exotic species widespread in northeast Brazil, being described as invasive in some regions. The objective of this work is to evaluate the potential distribution of *P. juliflora* in northeast Brazil using the maximum entropy model. Initially, data on the native and exotic occurrence of *P. juliflora* were collected and bioclimatic variables were selected. The modeling was carried out in the MaxEnt software and the generated model was validated using the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve and the calculation of the area under the curve. Based on the abiotic factors used, the modeling showed that there is a high probability of occurrence of the species in the Brazilian northeast, with around 9,510.51 km² highly favorable. The states of Maranhão and Piauí have little or no suitable area, while Ceará and Rio Grande do Norte have the most favorable areas. Precipitation and colder minimum temperatures are the factors that most affect the occurrence of this species. It is recommended that the Northeast region be monitored to evaluate invasion processes and impacts of this species.

Keywords: Algaroba, Caatinga, Environmental Conservation, Exotic species, Niche modeling.

Uso del modelo MaxEnt para predecir la distribución potencial de *Prosopis juliflora* en el Nordeste de Brasil

RESUMEN

Las especies invasoras son responsables de una variedad de daños ambientales y económicos en todo el mundo. *Prosopis juliflora* es una especie exótica muy extendida en el noreste de Brasil, siendo descrita como invasora en algunas regiones. El objetivo de este trabajo es evaluar la distribución potencial de *P. juliflora* en el nordeste de Brasil utilizando el modelo de máxima entropía. Inicialmente Pedroza, C.E.G., Sousa, P.R.M., Brito, S.F. (2024). Uso do modelo MaxEnt para prever a potencial distribuição de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.12, n.2, p.51-63.



se recolectaron datos sobre la ocurrencia nativa y exótica de *P. juliflora* y se seleccionaron variables bioclimáticas. El modelado se realizó en el software MaxEnt y el modelo generado se validó mediante la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) y el cálculo del área bajo la curva. Con base en los factores abióticos utilizados, la modelación mostró que existe una alta probabilidad de ocurrencia de la especie en el nordeste brasileño, con alrededor de 9.510,51 km² altamente favorables. Los estados de Maranhão y Piauí tienen poca o ninguna superficie adecuada, mientras que Ceará y Rio Grande do Norte tienen las zonas más favorables. La precipitación y la temperatura mínima más fría son los factores que más inciden en la aparición de esta especie. Se recomienda monitorear la región noreste para evaluar procesos de invasión e impactos de esta especie. excepcionalmente, cite al autor o autores y el año. Además, se deben evitar abreviaciones fuera del estándar o inusuales, pero si son esenciales, deben ser definidas en su primera mención en el propio resumen.

Palabras clave: Algaroba, Caatinga, Conservación Ambiental, Especies exóticas, Modelado de nichos.

1. Introdução

A manutenção da biodiversidade está diretamente relacionada a uma boa qualidade de vida. Uma das ameaças à conservação biológica são as espécies exóticas invasoras, que em todo o mundo são responsáveis por uma série de danos ambientais e econômicos, reduzindo a biodiversidade e eliminando espécies nativas (Gioria et al., 2014; Rai; Singh, 2020; Vujanovic et al., 2022). Apesar dos impactos apontados, a introdução e disseminação de espécies exóticas, mediadas principalmente por atividades humanas, é cada vez maior (Zhao et al., 2020).

Buscando compreender o processo de invasão ou de antecipar-se a este, estudos têm utilizado a modelagem de potencial distribuição para conhecer o potencial invasor de algumas espécies e também avaliar os efeitos do clima na sua distribuição (Shrestha et al., 2018; Yan et al., 2020; Layola et al., 2022; Qin; Li, 2023). Nestes estudos são utilizadas ocorrências geográficas conhecidas das espécies e características climáticas das áreas de ocorrência para gerar modelos de potencial distribuição (Padalia et al., 2015). Portanto, é avaliado se uma espécie é capaz de se estabelecer (sobreviver e reproduzir) em determinadas áreas, ou seja, conhecer o seu nicho fundamental (Hutchinson, 1957).

A maior parte do nordeste do Brasil é ocupada pelo domínio da Caatinga, uma floresta tropical sazonalmente seca, marcada por variadas fisionomias (Queiroz et al., 2017). Diferentes pressões ameaçam a conservação da biodiversidade da Caatinga, sendo uma delas as espécies exóticas invasoras (Andrade et al., 2009; Sousa et al., 2016; Santos; Fabricante, 2019). Uma das espécies exóticas que ocorre na região é *Prosopis juliflora* (SW) D.C., conhecida como Algaroba, pertence à família Fabaceae, é uma árvore que atinge até 18 m de altura (Mendes, 1987) e é, originária do Peru. No nordeste brasileiro foi introduzida na década de 1940, apresentando potencialidades para o reflorestamento, uso madeireiro e uma opção de forragem durante o período de estiagem (Andrade et al., 2009). De acordo com Damasceno et al. (2017), esta espécie apresenta ainda usos medicinais, alimentícios e evidente potencial tecnológico. *P. juliflora* é uma espécie bem adaptada às condições semiáridas e se dispersa com facilidade pela região, ocupando o lugar de espécies nativas de porte arbustivo e arbóreo (Andrade et al., 2009).

As características de uso e a elevada adaptação às condições do semiárido, associados à falta de manejo e dispersão promovida pelos rebanhos, transformaram esta espécie em um potencial problema (Pegado et al., 2006). Diferentes pesquisas têm relatado *P. juliflora* como uma espécie invasora na Caatinga (Pegado et al., 2006; Andrade et al., 2009; Gonçalves et al., 2015), além de também ser descrita como invasora em diferentes regiões do mundo (Dakhil et al., 2021), sendo capaz de reduzir a biodiversidade nativa (Andrade et al., 2009; Hussain et al., 2021) e os níveis de água no solo (Howari et al., 2022), podendo causar até danos à saúde humana (Hussain et al., 2020).

Prosopis juliflora domina áreas agrícolas abandonadas ao longo das margens dos rios (Wakie et al., 2014). Além disso, nas áreas invadidas ocorre a drástica redução das espécies nativas, devido a competição ou inibição do seu estabelecimento (Pegado et al., 2006). De acordo com Andrade et al. (2009), a introdução da espécie *P. juliflora* desencadeou diferentes impactos para a biodiversidade da Caatinga, levando à competição

por espaço, água, nutrientes e dispersores com espécies arbustivas e arbóreas nativas. Apesar dos danos ambientais relatados, também é uma espécie muito útil para a população desta região, o que tem colaborado para a disseminação crescente desta espécie exótica (Damasceno et al., 2017).

A modelagem de potencial distribuição pode auxiliar na identificação dos possíveis locais de ocorrência desta espécie e conhecer o seu potencial de se disseminar pelo nordeste brasileiro, auxiliando a planejar estratégias de manejo e de usos adequados da espécie. Com isto, os objetivos deste trabalho foram (1) realizar uma modelagem do potencial de distribuição de *P. juliflora* na região Nordeste; (2) identificar como as variáveis ambientais afetam a distribuição desta espécie.

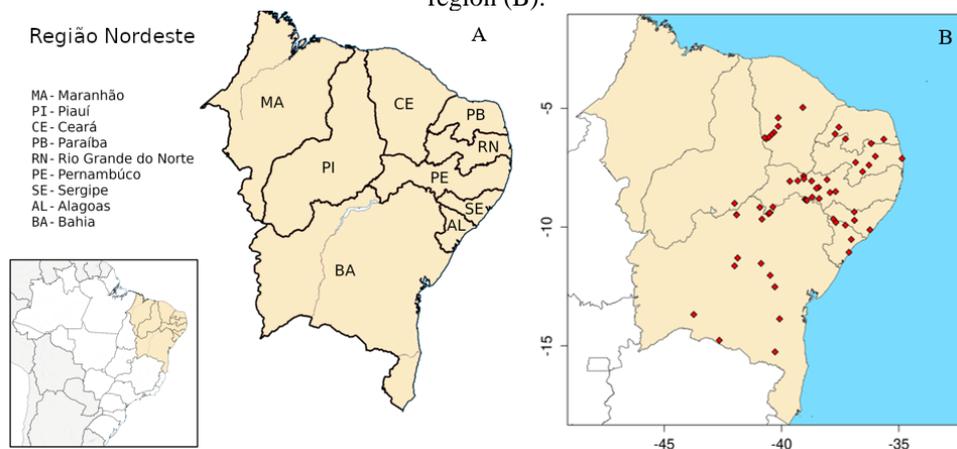
2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A fitofisionomia da Caatinga ocupa grande parte da região semiárida do Brasil. A temperatura média fica entre 25 e 30° C e com precipitação anual irregular e média entre 600 e 1000 mm de chuva. Em áreas elevadas, por causa de efeitos orográficos, a precipitação pode chegar a 1800 mm por ano (Andrade et al., 2017) (Figura 1).

Figura 1 - Estados da região Nordeste do Brasil (A) e pontos de ocorrência de *Prosopis juliflora* na região Nordeste (B).

Figure 1 - States in the Northeast region of Brazil (A) and points of occurrence of *Prosopis juliflora* in the Northeast region (B).



A região Nordeste do Brasil (-48.75°N, -32.39°N; -18.34°E, -1.04°E) tem uma área de cerca de 1.554.291,74 km². A maior parte da Caatinga está localizada nos nove estados que compõem a região Nordeste (Silva et al., 2017), sendo estes: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Alagoas, Sergipe e Bahia (Figura 1A). As espécies vegetais que ocorrem na Caatinga caracterizam-se pela deciduidade, sendo composta principalmente por árvores e arbustos, geralmente com folhas reduzidas e com a presença de espinhos (Fernandes; Queiroz, 2018).

2.2 Dados de ocorrência da espécie e variáveis ambientais

Os dados de distribuição de *P. juliflora* foram obtidos no *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) (<http://data.gbif.org>) e *Species Link* (<http://slink.cria.org.br/>). Dados duplicados, ou inválidos foram

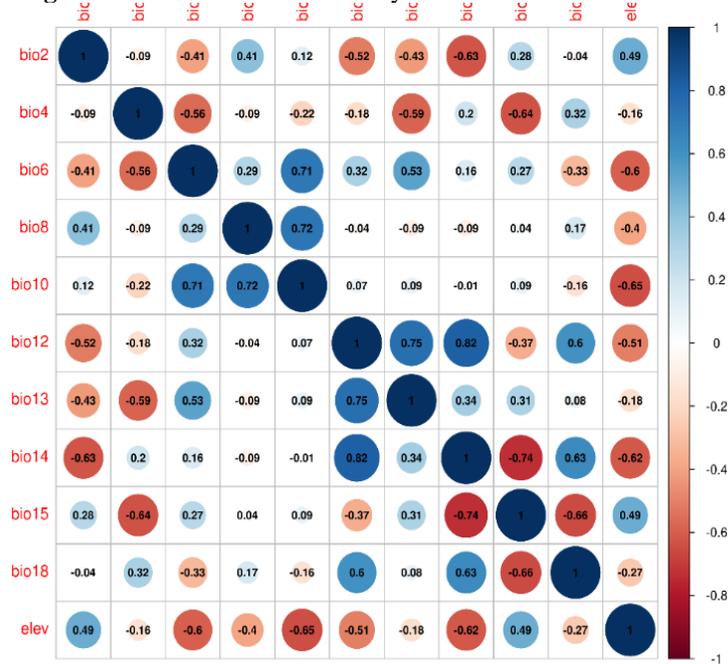
removidos, e coordenadas com distância entre si menores que 5 km foram mescladas, por fim, foram obtidos 95 pontos de distribuição efetivos (Figura 1B).

Para este estudo dezenove variáveis bioclimáticas foram obtidas a partir do conjunto de dados do *Worldclim2* (www.worldclim.org). As informações do clima disponíveis no *Worldclim*, são registros de interpolação climática dos anos de 1950 a 2000 (Fick; Hijmans, 2017). As variáveis representam características mensais e anuais relacionadas à temperatura média, amplitude térmica e precipitação, com resolução espacial de 2,5 minutos.

Em modelos de distribuição de espécies a escolha das variáveis, bem como a correlação entre elas pode afetar a “compactação” ou “suavidade” espacial e melhorar a capacidade preditiva do modelo (Lissovsky; Dudov, 2021). Dessa forma, as variáveis foram selecionadas utilizando o método Jackknife para a avaliação do nível de influência das mesmas (Zhang et al., 2021), além de uma análise de correlação de Pearson usando o ambiente R v3.6.3. Dentre as variáveis consideradas altamente correlacionadas (correlação acima de 0,8), foram selecionadas apenas aquelas com maior nível de influência para o modelo (Figura 2).

Figura 2- Análise de correlação de Pearson das variáveis ambientais.

Figure 2- Pearson correlation analysis of environmental variables.



Como resultado, foi obtido um conjunto de 11 variáveis: temperatura média diurna (bio2), sazonalidade da temperatura (bio4), temperatura mínima do mês mais frio (bio6), temperatura média no trimestre mais úmido (bio8), temperatura média no trimestre mais quente (bio10), precipitação anual (bio12), precipitação no trimestre mais úmido (bio13), precipitação do mês mais seco (bio14), sazonalidade da precipitação (bio15), precipitação no trimestre mais quente (bio18) e a elevação (elev) (Figura 2).

2.3 Modelagem de distribuição

A modelagem de distribuição foi realizada no software MaxEnt, versão 3.4.4 (https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent), que fornece uma estimativa do quanto um habitat é adequado para uma espécie, com valores de 0 (probabilidade baixa) a 1 (probabilidade alta). O modelo gerado

usando 70% dos dados obtidos para a calibração (dados de treinamento) e os 30% restantes para a sua validação (dados de teste).

A avaliação da modelagem se deu através da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) e do cálculo da área sob a curva (*Area Under Curve* - AUC). O AUC é uma medida da capacidade de um modelo em discriminar presenças de ausências, e varia de 0,5 (modelo aleatório) a um valor máximo de 1,0 (perfeita discriminação). A soma da proporção de contribuição percentual e a proporção da importância da permutação (SPCPI) foi usada como um critério para medir o impacto das principais variáveis ambientais (Yan et al., 2020). Ao final, os dados gerados pelo MaxEnt, contendo a distribuição potencial, foram processados utilizando o ambiente R, versão 3.6.3.

Para posterior visualização e análise, os resultados dos modelos Maxent foram importados para o ambiente R versão 3.6.3 e agrupados conforme o potencial de ocorrência em quatro classes: não suscetível (0-0,25), baixo potencial (0,25-0,50), médio potencial (0,50 -0,75) e alto potencial (0,75-1).

3. Resultados

A Porcentagem de contribuição das variáveis ambientais utilizadas na modelagem de potencial distribuição de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Porcentagem de contribuição das variáveis ambientais utilizadas na modelagem de potencial distribuição de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil.

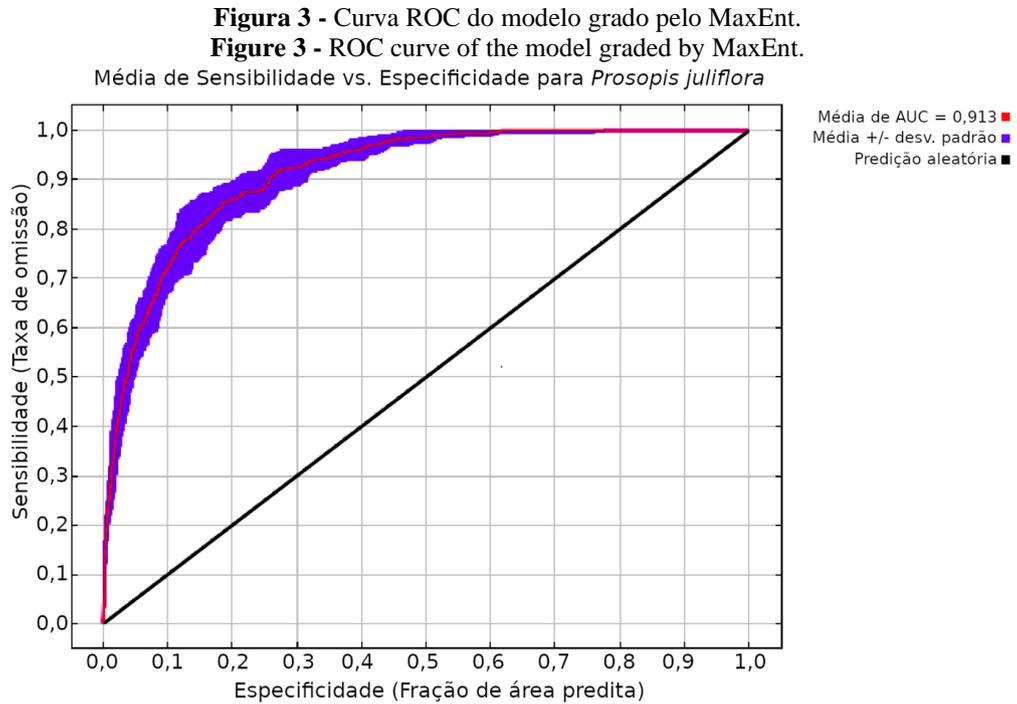
Table 1 - Percentage of contribution of environmental variables used in modeling the potential distribution of *Prosopis juliflora* in Northeast Brazil.

Variáveis	Porcentagem de contribuição	Importância de permutação (%)	*SPCPI	Classificação
bio12	49,9	11,3	61,2	1
bio6	8,0	12,0	20,0	2
bio8	4,5	9,8	14,3	3
bio2	6,5	3,9	10,4	4
bio4	3,2	5,9	9,1	5
bio13	4,8	3,1	7,9	6
bio18	2,8	4,5	7,3	7
bio15	3,0	3,8	6,8	8
bio10	1,2	3,2	4,4	9
elev	0,7	3,1	3,8	10
bio14	1,1	1,7	2,8	11

*SPCPI: soma da proporção percentual de contribuição e proporção de importância da permutação.

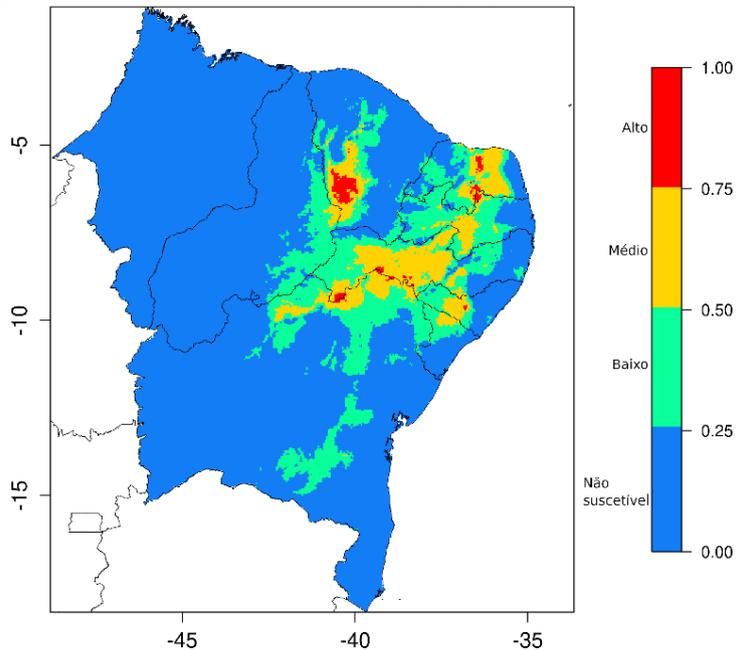
A porcentagem total de contribuição acumulada das 11 variáveis climáticas não correlacionadas utilizadas para a modelagem foi de 85,7%, mostrando a relevância dessas variáveis na distribuição desta espécie exótica no nordeste do Brasil. Sendo que a precipitação anual (49,9%), a temperatura mínima do mês mais frio (8,0%) e a temperatura média diurna (6,5%), são as três variáveis que mais contribuíram para o modelo (Tabela 1), portanto as que explicam melhor a ocorrência desta espécie.

A curva ROC gerada pelo modelo possui um valor médio de AUC de 0,913 mostrando que o modelo foi muito eficiente na determinação da distribuição geográfica potencial de *P. juliflora* (Figura 3).



O mapa de distribuição potencial de *P. juliflora* na região Nordeste mostra que o estado do Maranhão, apresenta todo o seu território não suscetível (cor azul). Enquanto isso, os estados do Ceará, Paraíba, Rio Grande do Norte, Pernambuco e parte da Bahia concentram as áreas com alta probabilidade de estabelecimento dessa invasora (cor vermelha) (Figura 4).

Figura 4 - Distribuição potencial de *Prosopis juliflora* no Nordeste do Brasil.
Figure 4 - Potential distribution of *Prosopis juliflora* in Northeast Brazil.



Aproximadamente 9.510,51 km² da área total do Nordeste são altamente favoráveis, 99.038,62 km² têm probabilidade média, e 243.645,48 km² têm probabilidade baixa e 1.202.097,01 km² não são suscetíveis ao estabelecimento desta espécie exótica invasora (Tabela 2).

Tabela 2 - Área e proporção para cada nível de adequação para a potencial ocorrência de *Prosopis juliflora* por estado do Nordeste do Brasil.

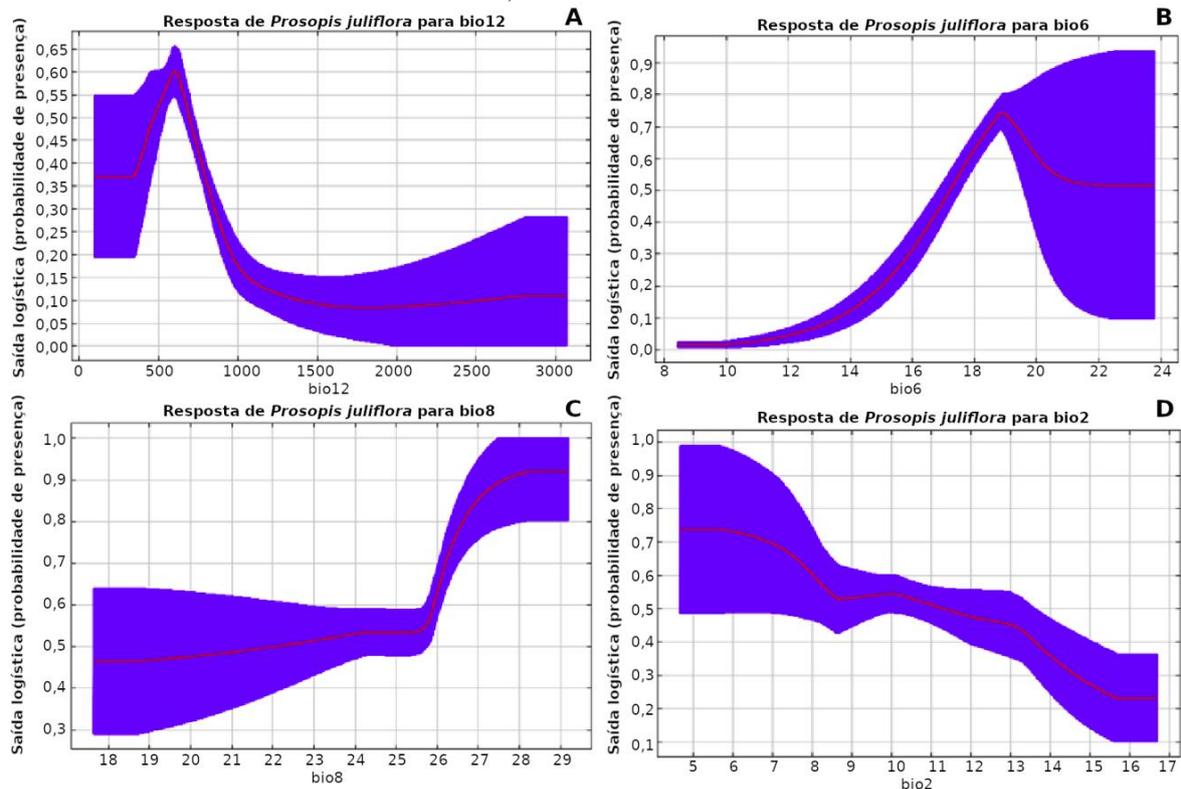
Table 2 - Area and proportion for each suitability level for the potential occurrence of *Prosopis juliflora* by state in Northeast Brazil.

Estado	Susceptibilidade							
	Não há		Baixa		Média		Alta	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Ceará	103311,71	69,37	26892,56	18,06	13329,17	8,95	5387,03	3,62
Rio Grande do Norte	17405,09	32,96	19128,58	36,22	14787,95	28,00	1489,43	2,82
Pernambuco	25728,20	26,21	35214,81	35,88	35934,78	36,61	1270,53	1,29
Bahia	463182,30	82,02	83337,72	14,76	17482,12	3,10	731,03	0,13
Paraíba	15041,71	26,64	32238,27	57,09	8725,04	15,45	464,77	0,82
Alagoas	15115,70	54,42	7903,77	28,45	4591,32	16,53	167,72	0,60
Sergipe	13153,25	60,02	6587,08	30,06	2174,78	9,92	0,00	0,00
Piauí	217221,59	86,34	32342,68	12,86	2013,47	0,80	0,00	0,00
Maranhão	331937,45	100,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Região Nordeste	1202097,01	77,34	243645,48	15,68	99038,62	6,37	9510,51	0,61

Entre os estados que compõem o Nordeste, aqueles com alta tendência para *P. juliflora* são: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco (Tabela 2). No entanto, quando considerados os níveis de suscetibilidade alta e média, 37,9% do território pernambucano e 30,82% do Rio Grande do Norte, apresentam potencial para o estabelecimento desta invasora. Bahia (82,02), Piauí (86,34%) e Maranhão (100%), concentram as maiores áreas proporcionais aos seus territórios classificados como não adequados (Tabela 2).

As quatro variáveis com maiores efeitos no modelo são bio12 (precipitação anual), bio6 (temperatura mínima do mês mais frio), bio8 (temperatura média no trimestre mais úmido) e bio2 (variação da temperatura média diurna). As curvas do modelo geradas para *P. juliflora* mostram que a ocorrência desta espécie é maior com precipitação anual entre 500 e 700 mm (Figura 5A).

Figura 5- Curva de resposta das variáveis com os maiores percentuais de contribuição e importância. A - bio12, B - bio6, C - bio8 e D - bio2.



Com relação a temperatura mínima do mês mais frio, observa-se uma curva crescente a partir de 14°C até 19°C (Figura 5B). Para a temperatura média no trimestre mais úmido observou-se que a curva se torna crescente para médias acima de 26°C (Figura 5C). Para a variação da temperatura média diurna observou-se que a curva se torna decrescente para variações acima de 6°C (Figura 5D).

4. Discussão

O modelo gerado com variáveis climáticas para a potencial distribuição de *P. juliflora* no nordeste do Brasil, foi considerado confiável e com bom desempenho, conforme o valor de AUC de 0,913. Segundo Elith et al. (2006), quanto mais próximo de 1 maior a eficiência do modelo para prever a ocorrência de uma espécie. Estudos recentes apontam que o MaxEnt é uma ferramenta eficiente para conhecer o potencial de estabelecimento de uma espécie em diferentes regiões (Santos et al., 2017; Ji et al., 2020; Yan et al., 2020; Chen et al., 2022). Além disso, os modelos gerados são importantes para gestão de espécies exóticas invasoras em todo o mundo (West et al., 2016; Srivastava et al., 2019; Sorbe et al., 2023).

A região Nordeste apresenta grandes áreas favoráveis para o estabelecimento de *P. juliflora*, sendo que as probabilidades variam conforme os estados. Heshmati et al. (2019) realizaram uma modelagem com *P. juliflora* a nível global, e afirmaram que em condições climáticas adequadas, esta espécie tem potencial de invadir áreas de vegetação nativa e de se expandir em áreas onde já é invasora. Portanto, a ocorrência de *P. juliflora* deve ser monitorada tanto nas áreas onde já ocorre em elevada densidade quanto em áreas onde a

ocorrência é baixa ou ainda não ocorre.

No geral as espécies invasoras tendem a deslocar a vegetação de áreas nativas devido a sua capacidade competitiva superior. Pegado et al. (2006) relataram que *P. juliflora* pode se sobressair durante a colonização e reduzir a vegetação nativa. Isto pode acontecer porque esta espécie reduz o crescimento de mudas em termos de área foliar, diâmetro do caule e altura da planta, e aumenta a mortalidade de mudas de algumas espécies lenhosas da Caatinga (Nascimento et al., 2014). Além da capacidade competitiva, o potencial desta invasora de se expandir para diferentes regiões relaciona-se as suas características reprodutivas, como alta dispersão (Shiferaw et al., 2004; Pegado et al., 2006) e germinação em uma ampla faixa de temperatura, tanto no claro quanto no escuro (El-Keblawy; Al-Rawai, 2005).

Uma grande extensão territorial do Nordeste (9510,51 km²) é altamente susceptível a ocorrência de *P. juliflora*, sendo os estados com maior território nesta condição o Ceará e o Rio Grande do Norte. Estes resultados estão de acordo com os estudos sobre invasão e impactos desta espécie no Brasil, que se concentram principalmente nestes dois estados. Andrade et al. (2009) relataram que no Rio Grande do Norte *P. juliflora* afeta significativamente a diversidade das comunidades invadidas. Além disso, Pegado et al. (2006), observaram no estado da Paraíba que *P. juliflora* forma densas populações dominando o estrato arbóreo. Embora não existam estudos demonstrando os impactos em outros estados, dados de ocorrência desta espécie coletados para esta pesquisa indicam a sua presença em quase todo o território da região. Pegado et al. (2006) afirmam que em muitos casos ainda não foram realizados estudos sobre a gravidade do problema causado por espécies introduzidas no Nordeste, como é o caso de *P. juliflora*. Embora não seja um estudo recente, até então poucas pesquisas neste sentido foram realizadas.

Um dos fatores mais determinantes para a ocorrência de uma espécie é o clima (Taylor et al., 2012), e a análise da relação entre variáveis ambientais e a potencial ocorrência de *P. juliflora*, mostrou que a probabilidade de estabelecimento desta invasora muda conforme as variáveis ambientais. Embora as atividades humanas contribuam para a dispersão de espécies exóticas invasoras, os fatores climáticos são determinantes para a densidade destas espécies em um certo local (Zhao et al., 2020). Entre as variáveis ambientais que mais afetam a ocorrência de *P. juliflora* está a precipitação anual e a temperatura mínima do mês mais frio.

Os ambientes com precipitações anuais maiores que 700 mm apresentam uma redução da probabilidade de estabelecimento de *P. juliflora*. A fitofisionomia da Caatinga, que ocupa quase toda a região Nordeste, recebe água principalmente das chuvas, com precipitação média de 773 mm e 70% deste volume pode concentrar-se em um único mês (Andrade et al., 2017). A variação da temperatura é outro fator determinante para o estabelecimento de *P. juliflora*. A média do trimestre mais úmido acima de 26° C aumenta a probabilidade de ocorrência dessa espécie, o que favorece sua ocorrência na região Nordeste, que geralmente apresenta temperaturas mais elevadas. Segundo Silva et al. (2017), a média de temperatura não varia tanto ao longo do ano na Caatinga. Portanto, as características de temperatura e baixa precipitação no Nordeste ajudam a explicar o sucesso de estabelecimento desta espécie exótica na região.

P. juliflora é uma espécie sempre verde e resistente a seca, que se estabelece com sucesso em outras regiões semiáridas do mundo (Dzikiti et al., 2013). Assim, muitos impactos causados por essa espécie já foram registrados em regiões semiáridas (Kumar; Mathur, 2014). Berhanu e Tesfaye (2006) e Howari et al. (2022) mostraram que *P. juliflora* afetou a biodiversidade de regiões áridas e semiáridas, reduzindo sua abundância e distribuição. O aumento da área de ocorrência desta invasora também tem um sério impacto negativo na quantidade de água subterrânea na área invadida (Howari et al. (2022), o que é um efeito muito preocupante em regiões onde a água é o fator ambiental mais limitante. Na Caatinga ainda não há estudos sobre a taxa de consumo de água subterrânea em áreas invadidas. Hussain et al. (2020) relataram que a invasora *P. juliflora* é uma fonte de grãos de pólen altamente alergênicos e seus espinhos causam lesões e infecções.

Dakhil et al. (2021) em um estudo sobre o risco de invasão de *P. juliflora*, mostraram que sua capacidade de invasão apresenta maior adequação nas pradarias tropicais e subtropicais, savanas e matagais, como é o caso da Caatinga que ocupa quase toda a região Nordeste. Além das áreas de ocorrência favoráveis atualmente, um estudo de Heshmati et al. (2019), avaliando cenários de mudanças climáticas, observou que o Brasil é um

dos países com maior aumento de habitats adequados para *P. juliflora*. Conforme Shrestha et al. (2018), as modelagens de distribuição de espécies podem orientar o controle de espécies exóticas invasoras e as áreas de potencial invasão pode ser incluídas na avaliação de risco e gestão. Para *P. juliflora*, recomenda-se traçar planos de manejo e de usos adequados, para que suas populações se mantenham sob controle. Embora, o modelo gerado mostre uma probabilidade de estabelecimento, faz-se o alerta para que nos estados com alta probabilidade seja planejado o manejo sustentável. Considerando que esta espécie possui múltiplos usos pela população e significativos potenciais biotecnológicos (Damasceno et al., 2017), pode-se incluir seus usos como formas de manejo.

De acordo com Rai e Kim (2020), a avaliação de espécies invasoras em nações emergentes deve considerar uma perspectiva socioecológica/econômica, e não apenas um incômodo que deve ser eliminado. Uma pesquisa de Ilukor et al. (2016), realizada em aldeias afetadas pela invasão de *P. juliflora* em Afar, Ethiopia, combina diferentes estratégias de subsistência, como o pastoreio móvel, pequena agricultura e produção de carvão para conviver com esta invasora. Na Caatinga Lima et al. (2018) realizaram um levantamento das espécies mais utilizadas como madeira, sendo que *P. juliflora* está entre as mais utilizadas. Isto pode ser uma forma de manejo desta espécie exótica, principalmente em comunidades rurais que tendem a explorar de forma intensiva as espécies nativas. Portanto, este pode ser um caminho para uma convivência adequada e sustentável com *P. juliflora*, na região Nordeste, planejar e orientar seus usos pela população conforme cada estado, começando pelos mais afetados. Seria importante realizar ação para identificar a convivência da população da região Nordeste com esta invasora, de forma a planejar ações de manejo visando a convivência com *P. juliflora*.

5. Conclusão

O modelo de distribuição de *P. juliflora* mostra que esta espécie tem alto potencial de invasão em alguns estados do Nordeste. Os estados do Ceará e Rio Grande do Norte se mostraram com maior faixa territorial proporcionalmente favoráveis. A ocorrência desta espécie é afetada negativamente em ambientes com precipitação anual maior que 700 mm e com variação de temperatura diária acima de 6°C.

Recomenda-se que todos os estados da região sejam monitorados, uma vez que fatores não analisados neste estudo, como as interações bióticas, também atuam determinando a ocorrência desta espécie. Outras pesquisas podem ser elaboradas para avaliar mais características do potencial invasor desta espécie na região Nordeste, bem como o desenvolvimento de estratégias de manejo.

6. Referências

Andrade, E. M. de, Aquino, D. N., Chaves, L. C. G. & Lopes, F. B. (2017). “**Water as Capital and Its Uses in the Caatinga**”. In: da Silva, J. C.; Leal, I.; Tabarelli, M, (eds.), Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America. Cham: Springer, p.23-63.

Andrade, L.A., de Fabricante, J.R. & Oliveira F.X. de. (2009). Invasão biológica por *Prosopis juliflora* (Sw.) DC.: impactos sobre a diversidade e a estrutura do componente arbustivo-arbóreo da caatinga no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Acta botânica brasílica**, 23(4), 935-943.

Berhanu, A. & Tesfaye, G. (2006). The *Prosopis juliflora* Dilemma, impacts on dryland biodiversity and some controlling methods. **Journal of Dry lands**, 1,158-164.

Chen, K., Wang, B., Chen, C. & Zhou, G. (2022). Modelagem MaxEnt para prever a distribuição atual e futura de *Pomatosace filicula* sob cenários de mudanças climáticas no planalto Qinghai-Tibete. **Plantas**, 11 (5), p.670.

Dakhil, M.A., El-Keblawy, A., El-Sheikh, M.A., Halmy, M.W.A., Ksiksi, T. & Hassan, W.A. (2021). Global Invasion Risk Assessment of *Prosopis juliflora* at Biome Level: Does Soil Matter? **Biology**, 10(3),1-18.

- Damasceno, G.A.B., Ferrari, M. & Giordani, R.B. (2017). *Prosopis juliflora* (SW) D.C., an invasive specie at the Brazilian Caatinga: phytochemical, pharmacological, toxicological and technological overview. **Phytochem Reviews**, 16, 309-331.
- Dzikiti, S., Schachtschneider, K., Naiken, V., Gush, M., Moses, G. & Le Maitre, D.C. (2013). Water relations and the effects of clearing invasive *Prosopis* trees on groundwater in an arid environment in the Northern Cape, South Africa. **Journal of Arid Environments**, 90, 103e113.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudi'k, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, J.R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.M., Peterson, A.T., Phillips, S.J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R.E., Soberón, J., Williams, S., Wisz, M.S. & Zimmermann, N.E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. **Ecography**, 29, 129-151.
- El-Keblawy, A. & Al-Rawai, A. (2005). Effects of salinity, temperature and light on germination of invasive *Prosopis juliflora* (Sw.) D.C. **Journal of Arid Environments**, 61, 555-565.
- Fernandes, M.F. & Queiroz, L.P. (2018). Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, 70(4), p.51-56.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, 37(12), 4302-4315.
- Gioria, M., Jarosík, V. & Pysek, P. (2014). Impact of invasions by alien plants on soil seed bank communities: Emerging patterns. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, 16, 132-142.
- Gonçalves, G.S., Andrade, L.A. de, Xavier, K.R.F. & Silva, J.F. da. (2015). Métodos de controle de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. (Fabaceae) em áreas invadidas no semiárido do Brasil. **Ciência Florestal**, 25(3), .645-653.
- Heshmati, I., Khorasani, N., Shams-Esfandabad, B. & Riazi, B. (2019). Forthcoming risk of *Prosopis juliflora* global invasion triggered by climate change: implications for environmental monitoring and risk assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, 191(2), 72.
- Howari, F. M., Sharma, M., Nazzal, Y., El-Keblawy, A., Mir, S., Xavier, C. M., ... & Alaydaros, F. (2022). Changes in the invasion rate of *Prosopis juliflora* and its impact on depletion of groundwater in the northern part of the United Arab Emirates. **Plants**, 11(5), 682.
- Hussain, M. I., Shackleton, R. T., El-Keblawy, A., Del Mar Trigo Pérez, M., & González, L. (2020). Invasive Mesquite (*Prosopis juliflora*), an allergy and health challenge. **Plants**, 9(2), 141.
- Hussain, M. I., Shackleton, R., El-Keblawy, A., González, L., & Trigo, M. M. (2021). Impact of the invasive *Prosopis juliflora* on terrestrial ecosystems. **Sustainable Agriculture Reviews**, 52, 223-278.
- Hutchinson, G.E. (1957). Concluding remarks. **Cold Spring Harbor Symp**, 22, 415-427.
- Ilukor, J., Rettberg, S., Treydte, A. & Birner, R. (2016). To eradicate or not to eradicate? Recommendations on *Prosopis juliflora* management in Afar, Ethiopia, from an interdisciplinary perspective. **Pastoralism: Research, Policy and Practice**, 6, 14.
- Ji, W., Han, K., Lu, Y. & Wei, J. (2020). Predicting the potential distribution of the vine mealybug, *Planococcus ficus* under climate change by MaxEnt. **Crop Protection**, 137, 1-8.
- Kumar, S. & Mathur, M. (2014). Impact of invasion by *Prosopis juliflora* on plant communities in arid grazing

lands. **Tropical Ecology**, 55(1), 33-46.

Layola, M.R., Semwal, M., Rana, T.S. & Nair, N.K. (2022). Predicting potential suitable habitat for *Ensete glaucum* (Roxb.) Cheesman using MaxEnt modelling. **Flora**, 278, 152007.

Lima, J. R. F., Lima, G. D. S., de Lucena, C. M., Carvalho, T. K. N., & de Lucena, R. F. P. (2018). Inventário in situ como método para avaliação da extração de recursos madeireiros na caatinga: estudo de caso no município de Cabaceiras (Paraíba, Brasil). **Revista Nordestina de Biologia**, 26(1).

Lissovsky, A. A., & Dudov, S. V. (2021). Species-distribution modeling: advantages and limitations of its application. 2. MaxEnt. **Biology Bulletin Reviews**, 11(3), 265-275.

Mendes, A. S., & Alves, M. V. S. **A degradação da madeira e sua preservação**. Brasília: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1987. 57p.

Nascimento, C.E. de S., Tabarelli, M., Silva, C.A.D. da, Leal, I.R., Tavares, W. de S., Serrão, J.E. & Zanuncio, J.C. (2014). The introduced tree *Prosopis juliflora* is a serious threat to native species of the Brazilian Caatinga vegetation. **Science of the Total Environment**, 481, 108-113.

Padalia, H., Srivastava, V. & Kushwaha, S.P.S. (2015). How climate change might influence the potential distribution of weed, bushmint (*Hyptis suaveolens*)? **Environmental Monitoring and Assessment**, 187, 210.

Pegado, C.M.A., Andrade, L.A., Félix, L.P. & Pereira, I. M. (2006). Efeitos da invasão biológica de algaroba - *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. sobre a composição e a estrutura do estrato arbustivo-arbóreo da caatinga no Município de Monteiro, PB, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, 20(4), 887-898.

Qin, X., & Li, M. (2023). Predicting the potential distribution of *Oxalis debilis* Kunth, an invasive species in China with a maximum entropy model. **Plants**, 12(23), 3999.

Queiroz, L.P., Cardoso, D., Fernandes, M. & Moro, M. (2017). "Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain". In: da Silva, J. C.; Leal, I.; Tabarelli, M, (eds.), **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Cham: Springer p. 23-63.

Rai, P.K. & Kim, K.H. (2020). Invasive alien plants and environmental remediation: a new paradigm for sustainable restoration ecology. **Restoration Ecology**, 28(1), 3-7.

Rai, P.K. & Singh, J.S. (2020). Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. **Ecological Indicators**, 111, 106020.

Santos, L.A. & Fabricante, J.R. (2019). Impactos da exótica invasora *Boerhavia diffusa* L. sobre a diversidade de espécies do estrato herbáceo e arbustivo autóctone de uma área ripária na Caatinga, Sergipe, Brasil. **Scientia Plena**, 15, 012401-13.

Santos, L.A. dos, Mendes, M.F., Kruger, A.P., Blauth, M.L., Gottschalk, M.S. & Garcia, F.R.M. (2017). Global potential distribution of *Drosophila suzukii* (Diptera, Drosophilidae). **PLoS One**, 0174318.

Shiferaw, H., Teketay, D., Nemomissa, S. & Assefa, F. (2004). Some biological characteristics that foster the invasion of *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. At middle awash Rift Valley area, North-Eastern Ethiopia. **Journal of Arid Environments**, 58(2), 135-154.

Shrestha, U.B., Sharma, K.P., Devkota, A., Siwakoti, M. & Shrestha, B.B. (2018). Potential impact of climate change on the distribution of six invasive alien plants in Nepal. **Ecological Indicators**, 95, 99-107.

- Silva, J.M.C. da, Barbosa, L.C.F., Leal, I.R. & Tabarelli, M. (2017). “The Caatinga: Understanding the Challenges”. In: da Silva, J. C.; Leal, I.; Tabarelli, M, (eds.), **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Cham: Springer, 23-63.
- Sorbe, F., Gränzig, T., & Förster, M. (2023). Evaluating sampling bias correction methods for invasive species distribution modeling in Maxent. **Ecological Informatics**, 76, 102124.
- Sousa, F.Q. de; Andrade, L.A. & Xavier, K.R.F. (2016). *Cryptostegia madagascariensis* Bojer ex Decne.: impactos sobre a regeneração natural em fragmentos de caatinga. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 11(1), 39-45.
- Srivastava, V., Lafond V. & Griess, V.C. (2019). Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. **CAB Reviews**, 14(020), 1-13.
- Taylor, S., Kumar, L., Reid, N. & Kriticos, D.J. 2012. Climate Change and the Potential Distribution of an Invasive Shrub, *Lantana camara* L.. **PLoS One**, 7, e35565.
- Vujanović, D., Losapio, G., Milić, S., & Milić, D. (2022). The impact of multiple species invasion on soil and plant communities increases with invasive species co-occurrence. **Frontiers in Plant Science**, 13, 875824.
- Wakie, T.T., Evangelista, P.H., Jarnevich, C.S. & Laituri, M. (2014). Mapping current and potential distribution of non-native *Prosopis juliflora* in the Afar region of Ethiopia. **PLoS One**, 9, e112854.
- West, A.M., Kumar, S., Brown, C.S., Stohlgren, T.J. & Bromberg, J. (2016). Field validation of an invasive species Maxent model. **Ecological Informatics**, 36, 126-134.
- Yan, H., Feng, L., Zhao, Y., Feng, L., Zhu, C., Qu, Y. & Wang, H. (2020). Predicting the potential distribution of an invasive species, *Erigeron canadensis* L., in China with a maximum entropy model. **Global Ecology and Conservation**, 21, e00822.
- Zhang, Y., Tang, J., Ren, G., Zhao, K., & Wang, X. (2021). Global potential distribution prediction of *Xanthium italicum* based on Maxent model. **Scientific Reports**, 11(1), 16545.
- Zhao, Z., Reddy, G.V.P., Chen, L., Qin, Y. & Li Z. (2020). The synergy between climate change and transportation activities drives the propagation of an invasive fruit fly. **Journal of Pest Science**, 93, 615-625.