

Artigo

Opuntia ficus-indica (L.) Mill. e as Mudanças Climáticas: Uma Análise a Luz da Modelagem de Distribuição de Espécies no Bioma Caatinga

Arnóbio de Mendonça Barreto Cavalcante^{1,2} , Pedro Hugo Cândido Fernandes²,
Emerson Mariano da Silva²

¹*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro Regional do Nordeste,
Unidade de Eusébio, Eusébio, CE, Brasil.*

²*Mestrado Profissional em Climatologia e Aplicações nos Países da CPLP e África,
Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

Recebido em: 8 de Abril de 2020 - Aceito em: 26 de Maio de 2020

Resumo

As previsões de mudanças climáticas no bioma Caatinga para esse século são de aumento na temperatura do ar e redução das chuvas. A combinação desse fenômeno físico com invasões biológicas pode potencializar perdas de biodiversidade local. O objetivo do estudo foi modelar a distribuição potencial de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., um cacto invasor no bioma Caatinga em cenários climáticos futuros e avaliar sua dinâmica espaço-temporal para fins de conservação do bioma. Para tal, utilizou-se do algoritmo MaxEnt, dados de presença da espécie-alvo e 10 variáveis ambientais. Ademais, considerou-se os intervalos de tempo futuro 2041-2060 e 2061-2080, atual 1961-1990 e os cenários RCP4.5 e 8.5 do CMIP5. Com a modelagem bioclimática e as modificações climáticas inclusas foi possível apontar para dois efeitos futuros sobre as atuais áreas adequadas para a presença da espécie-alvo invasora. O primeiro, haveria uma expansão paulatina dessas áreas até 2070 em RCP4.5 ou até 2050 em RCP8.5. No segundo, a partir de 2070 em RCP8.5 haveria contração até o final do século. A expansão da espécie-alvo invasora poderia ser administrada desde que, observado o componente humano que facilita a introdução da planta no bioma e o conceito de sustentabilidade socioeconômico e ambiental, por exemplo, cultivando-a sob condições de isolamento para fins forrageiro.

Palavras-chave: aquecimento global, cacto, espécie invasora, maxent.

Opuntia ficus-indica (L.) Mill. and Climate Change: An Analysis in the Light of Modeling Potential Distribution of Species in the Caatinga Biome

Abstract

The predictions of climate change in the Caatinga biome for this century are for an increase in air temperature and a reduction in rainfall. The combination of this physical phenomenon with biological invasions can increase losses of local biodiversity. The objective of the study was to model the potential distribution of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., an invasive cactus in the Caatinga biome in future climatic scenarios and to evaluate its space-time dynamics for the purpose of conservation of the biome. For this purpose, the MaxEnt algorithm was used, data on the presence of the target species and 10 environmental variables. In addition, the future time intervals 2041-2060 and 2061-2080, current 1961-1990 and the scenarios RCP4.5 and 8.5 of CMIP5 were considered. With bioclimatic modeling and climate changes included, it was possible to point to two future effects on the current areas suitable for the presence of the invasive target species. The first, there would be a gradual expansion of these areas until 2070 in RCP4.5 or until 2050 in RCP8.5. In the second, from 2070 on RCP8.5 there would be contraction until the end of the century. The expansion of the invasive target species could be managed as long as, observed the human component that facilitates the introduction of the plant in the biome and the concept of socioeconomic and environmental sustainability, for example, growing it under conditions of isolation for forage purposes.

Keywords: global warming, cactus, invasive species, maxent.

1. Introdução

Desde o período das grandes navegações quando interconectou-se boa parte das terras emersas do planeta e dos seis continentes, que o intenso fluxo das idas e vindas das embarcações favoreceu uma das mais relevantes interferências humanas na natureza; a introdução de uma espécie em área onde não ocorre naturalmente. Essas introduções de espécies pretéritas ocorriam de forma intencional ou acidental e, atualmente, continuam acontecendo. O fato é que várias espécies de animal, vegetal e microrganismo passaram a se estabelecer em locais onde não seriam naturalmente encontradas. Essas primeiras translocações de espécies de uma região a outra do planeta tiveram a intenção de suprir necessidades básicas alimentares (humana e animal), bem como para cultivos agrícolas, florestais e outros usos diretos. Como consequência, vários ecossistemas do mundo acumularam espécies estrangeiras ou exóticas (Lowe *et al.*, 2004; Van Kleunen *et al.*, 2015).

As espécies exóticas quando desembarcam em uma nova área e passam a ocupar rapidamente esse ambiente, representam uma ameaça para a fauna e flora locais, podendo levar espécies nativas à extinção e alterar processos ecossistêmicos (Weber, 2017) que, por conseguinte, geram prejuízos socioeconômicos (Reaser *et al.*, 2007; Leão *et al.*, 2011). À vista disso, a invasão de espécies exóticas sobre ecossistemas naturais passou a ser uma das mais severas ameaças à conservação da biodiversidade, constituindo-se em uma das cinco principais causas de depauperização da biodiversidade no mundo (CDB, 2014).

O Brasil que se destaca no cenário mundial como um país megadiverso, tem-se deparado com essa ameaça desde o século XVIII, quando ocorreram os primeiros registros oficiais de invasões biológicas no país (Zenni e Ziller, 2011). Atualmente, na base de dados nacional de espécies exóticas invasoras constam 461 espécies encontradas no país e dentre elas a *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., popularmente conhecida por palma forrageira (Instituto Hórus, 2019).

A palma forrageira é originária do centro do México (Flores, 1994; Griffith, 2004) e a partir deste centro de origem espalhou-se entre os povos da América Central, Caribe e América do Sul por meio do comércio. No Brasil, a introdução da palma forrageira é motivo de muitas controvérsias entre os pesquisadores. Pessoa (1967) afirmou que a introdução da palma se deu pelos portugueses na época da colonização, inicialmente, para a produção de corantes naturais “carmim” e, posteriormente, para uso como forragem por volta de 1915. Duque (1980) afirmou que a palma foi introduzida no Nordeste, provavelmente, depois de 1900. Após a seca de 1932, por ordem do Ministério da Viação foram plantados do Piauí até a Bahia diversos campos de demonstração, sendo este o primeiro grande trabalho de difusão da palma forrageira no Nor-

deste. Hoje, a palma forrageira está presente em todos os estados da região Nordeste, exceto no Maranhão (Instituto Hórus, 2019; Splink, 2019).

Na região Nordeste do Brasil é onde está localizado a quase totalidade do bioma Caatinga, a maior região de floresta tropical seca sazonal da América do Sul e única no mundo (Silva *et al.*, 2017). O bioma Caatinga, além da presença confirmada da palma forrageira e de outras 50 espécies de plantas exóticas invasoras ou potencialmente invasoras (Leão *et al.*, 2011), tem sido apontado como uma das regiões ecológicas do mundo mais vulneráveis às mudanças climáticas previstas para este século (Baettig *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2014; Seddon *et al.*, 2016).

Para o bioma foi projetado uma tendência de aumento no número de meses com déficit hídrico ou aridização (Marengo, 2008 e 2014; Sales *et al.*, 2015; Lacerda *et al.*, 2016; Marengo *et al.*, 2017) e de aumento na temperatura do ar próximo à superfície em até 4,4 °C no cenário mais crítico, ao final deste século. Quanto à precipitação, entretanto, há maior grau de incerteza nas previsões, embora seja esperada uma redução até 2100 (Sales *et al.*, 2015, Torres *et al.*, 2017).

Essas previsões trazem preocupações, sobretudo, para a adequabilidade de habitats das espécies nativas, pois alguns estudos já mostraram indícios de perda de habitats para as espécies vegetais da Caatinga, considerando projeções de mudanças no clima (Rodrigues *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2019). Somado a isso, estudos apontaram que a devastação da flora de um bioma é um facilitador à invasão de espécies exóticas (Margalef, 1994; Woitke e Dietz, 2002; Pujadas, 2001; Ziller e Zalba, 2007). O bioma Caatinga já perdeu acima de 50% de sua vegetação original (Brasil, 2016). Portanto, a integridade das áreas remanescentes do bioma Caatinga deve focar-se em uma série de ameaças, em destaque aqui as bioinvasões, as mudanças climáticas e o sinergismo potencial dessas duas ameaças, que muitas vezes os efeitos negativos desses fatores combinados é de maior severidade para os ecossistemas naturais (Didham *et al.*, 2007). As mudanças climáticas podem aumentar a capacidade de muitas espécies exóticas invasoras de invadir novas áreas, ao mesmo tempo que diminuem a resistência dos ecossistemas naturais à invasão (Thuiller *et al.*, 2005).

Então, parece justificável que estudos devam ser realizados para conhecer os impactos da introdução proposital de plantas exóticas invasoras no bioma, bem como predições de áreas de alto potencial de ocorrência em cenários climáticos futuro. Está última, certamente, poderia oferecer uma ideia da expansão ou retração (dinâmica) da invasão na área geográfica atingida pela espécie invasora. E, a partir dessas informações aprimorar o suporte para os tomadores de decisão em setores relacionados à conservação da vida selvagem e do ecossistema (Peterson e Shaw, 2003; Phillips *et al.*, 2006)

Nesse contexto, uma ferramenta que pode fornecer uma compreensão preliminar nessa abordagem são os modelos de distribuição potencial de espécie. Esses modelos associam as localizações de uma espécie para um conjunto de variáveis ambientais que são projetados para prever a distribuição da espécie. A premissa central da abordagem é que, o melhor indicador das exigências climáticas de uma espécie é a sua atual área de distribuição (Guisan e Zimmermann, 2000; Guisan e Thuiller, 2005), e essa espécie só será capaz de estabelecer-se em outras áreas com as mesmas condições climáticas. Embora os modelos de distribuição de espécie venham sendo usados para investigar as distribuições de diferente espécies exóticas invasoras já alguma tempo, recentemente, ganharam grande impulso na busca de compreensão das relações entre espécies exóticas invasoras e mudanças do clima.

Portanto, considerando os fenômenos em conjunto, bioinvasão e mudanças climáticas, associado ao parco conhecimento sobre o *modus operandi* da bioinvasora palma forrageira no bioma, traçou-se os seguintes objetivos: 1) modelar a distribuição potencial de áreas climaticamente adequadas para a presença da palma forrageira no bioma Caatinga em cenários climáticos futuros e; 2) avaliar a dinâmica espaço-temporal das áreas projetadas. Espera-se contribuir para uma primeira aproximação da dinâmica espaço-temporal da espécie-alvo no médio e longo prazos no bioma e fornecer aos gestores ambientais, informações para uma avaliação de risco potencial de invasão.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo foi a extensão atual do bioma Caatinga, cuja área é de 844.453 km² ou 10% do território Nacional (IBGE, 2004), bioma situado na sua quase totalidade na região Nordeste do Brasil (Fig. 1). Por situar-se totalmente entre o Equador e o Trópico de Capricórnio (3° a 18° Sul), o bioma dispõe de abundante intensidade luminosa em todo seu território e durante todo o ano. As temperaturas são altas e pouco variáveis espacial e temporalmente, com médias anuais entre 25° e 30 °C (Sampaio, 2003). A precipitação anual, ao contrário da temperatura, varia amplamente no tempo e no espaço. As médias oscilam de pouco menos de 300 mm até mais de 1.000 mm (Reddy, 1983). O número de meses secos aumenta das bordas para o centro do bioma, com algumas áreas experimentando períodos de 7 a 10 meses sem disponibilidade de água para as plantas (Prado, 2003). Conforme a classificação climática de Köppen, o bioma está submetido ao clima semiárido - BSh (Alvares *et al.*, 2014).

O relevo da região apresenta grandes depressões, planaltos sedimentares e maciços residuais com algumas elevações superando 1.000 metros de altitude (Souza e

Oliveira, 2006). Nessa grande região ecológica a vegetação dominante é a Floresta Tropical Seca Sazonal - FTSS (Pennington *et al.*, 2009). Aqui, ocorrem cerca de 200 famílias botânicas das quais a *Cactaceae* está entre as mais importantes, com uma riqueza de 94 espécies nativas endêmicas e não endêmicas (Flora do Brasil, 2019). Vale destacar que, há bastante tempo os cactos desempenham importante papel social, econômico e ambiental para a região (Taylor e Zappi, 2004; Cavalcante *et al.*, 2013; Cavalcante e Vasconcelos, 2016) sendo esses aspectos, justamente, os facilitadores para a presença da palma forrageira no bioma.

2.2. Espécie selecionada

A palma forrageira é originária do centro do México (Flores, 1994; Griffith, 2004) e, atualmente, está presente na América Central, Caribe, América do Sul, Europa, África, Ásia, Austrália, Estados Unidos etc. (Novoa *et al.*, 2014). Essa distribuição mundial ampla da palma forrageira evidencia que a espécie é altamente adaptável à diferentes ambientes.

Na região Nordeste do Brasil, particularmente, onde é utilizada para alimentação animal, a palma forrageira está presente em todos os estados da região, exceto no Maranhão, ocorrendo de preferência em ambientes naturais áridos com vegetação herbácea e arbustiva, onde gera impactos ecológicos ao formar agrupamentos densos que impedem o crescimento da vegetação nativa (Instituto Hórus, 2019; Splink, 2019). No bioma Caatinga ocorrem 94 espécies de cactos nativos e outras três espécies exóticas (Flora do Brasil, 2020). Dentre as espécies exóticas apenas *O. ficus-indica* é oficialmente considerada espécie invasora (Instituto Hórus, 2019). Sua classificação é de alto risco de invasão (Leão *et al.*, 2011).

A seleção da *O. ficus-indica* para a modelagem da distribuição geográfica potencial se deveu além dos aspectos supracitados, também, ao satisfatório conhecimento biológico e ecológico disponível sobre a espécie e, sobretudo, à adequabilidade quantitativa e qualitativa dos dados bióticos requeridos pelo algoritmo.

2.3. Registros de presença global e regional

Os registros de presença global e regional da espécie-alvo na forma de coordenadas geográficas decimais foram obtidos a partir de três bancos de dados *online*: GBIF, SPLINK e Instituto Hórus. Não se utilizou de registros de ausência da espécie. Os registros de presença foram conferidos um a um e na sequência, removidos aqueles redundantes e espacialmente correlacionados. Restaram 109 pontos de presença na região central do México, onde a palma forrageira é nativa, e 32 pontos no bioma Caatinga, a área invadida (Fig. 2a,b). Como o desempenho da modelagem depende do tamanho da amostra e da prevalência da espécie (Van Proosdij *et al.*,

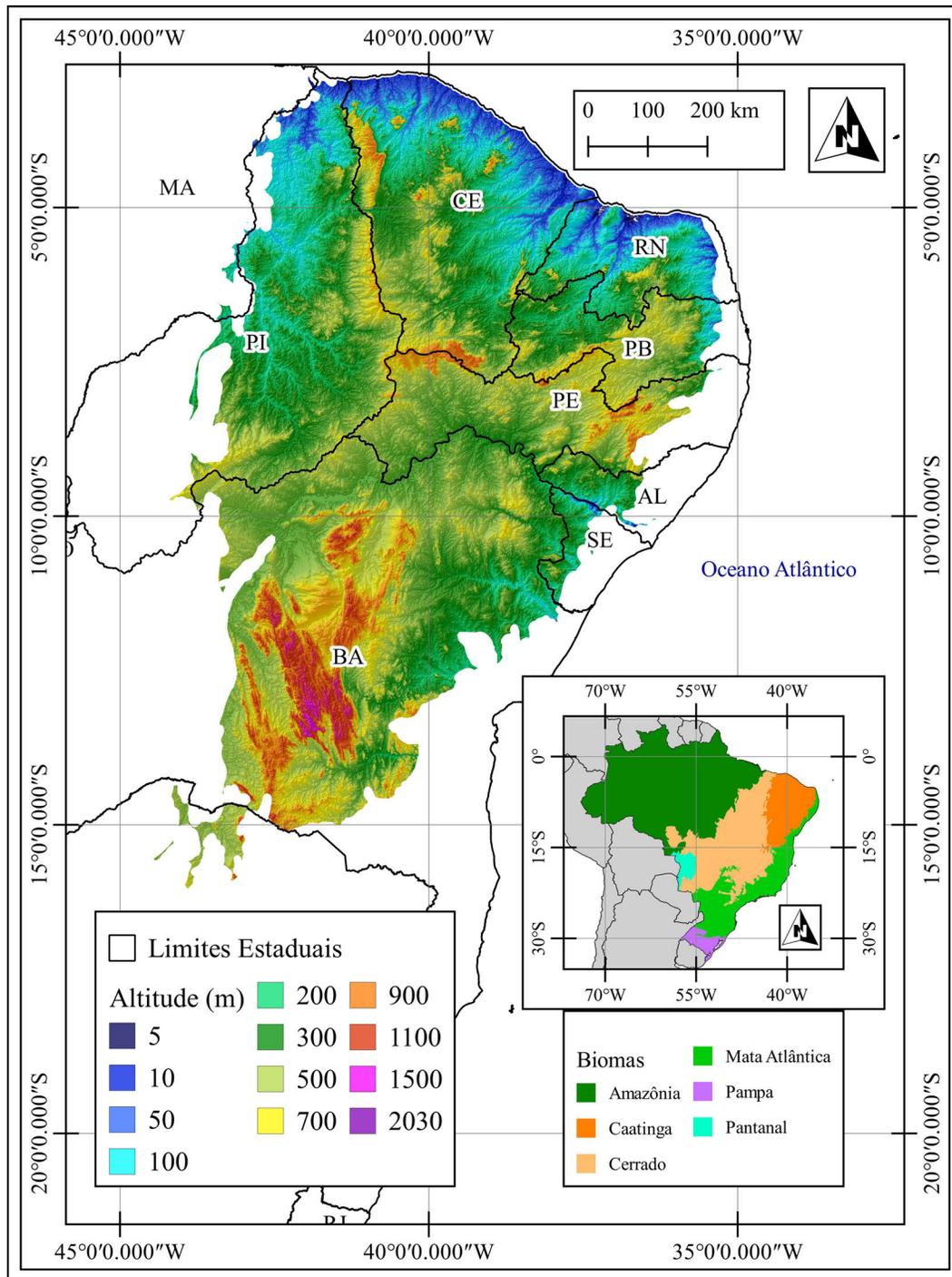


Figura 1 - Localização do bioma Caatinga.

2016), os tamanhos das amostras supracitados foram adequados.

2.4. Preditores ambientais

Quanto à seleção das variáveis ambientais com significância ecológica e estatística para uso na modelagem, inicialmente levou-se em conta a efetividade da variável

em disparar e encerrar eventos fisiológicos e em dispor espacialmente plantas na escala espacial de operação do estudo. Isso foi levado em consideração por meio de literatura especializada (Ab'Sáber, 2003; Taylor e Zappi, 2004; Albuquerque *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2017), que apontou para as variáveis climáticas. As outras variáveis ambientais da estrutura de modelagem

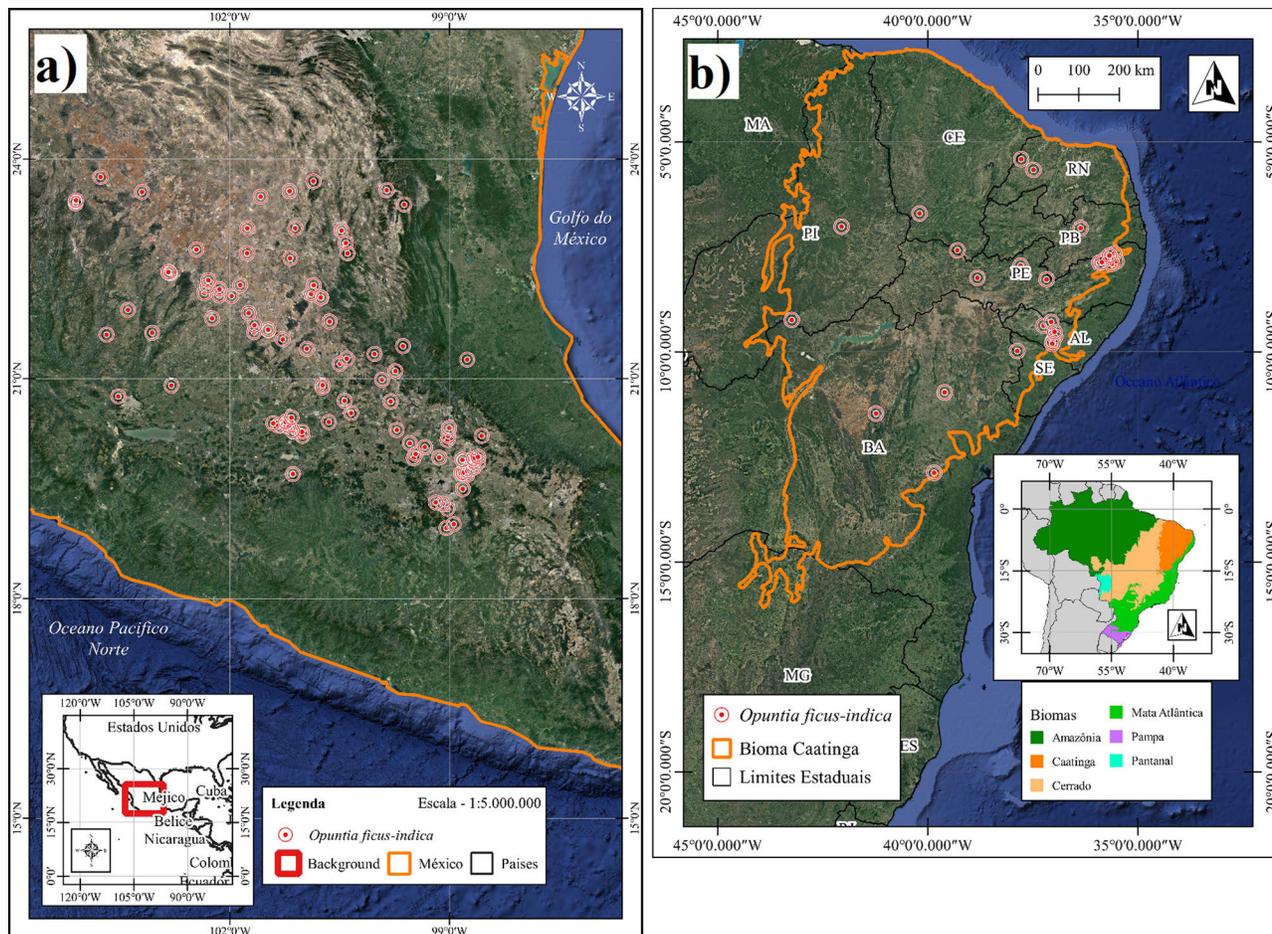


Figura 2 - (a) Pontos de presença de *O. ficus-indica* em área nativa, região central do México e (b) em área invadida, bioma Caatinga, região nordeste do Brasil.

como topográfica, uso da terra, tipo de solo e interação biótica, portanto, não foram consideradas na pesquisa.

Para as variáveis climáticas temperatura (11) e precipitação (8) com resolução espacial de 30 arc-segundos (~ 1 km), os dados foram baixados a partir de WorldClim 1.4 (Hijmans *et al.*, 2005). Na sequência foi realizada uma Análise de Componentes Principais - PCA (Manly e Alberto 2017). Esse procedimento busca reduzir erros nos modelos produzidos, especialmente, os ocasionados pela correlação entre as variáveis ambientais, melhorando a precisão dos modelos de distribuição potencial das espécies (Cruz-Cárdenas *et al.* 2014). Assim, transformou-se o conjunto inicial de 22 variáveis ambientais em 10 variáveis mais independentes e com maior poder preditivo. As variáveis ambientais selecionadas com seus respectivos códigos foram: Bio2 - variação diurna média de temperatura; Bio4 - sazonalidade da temperatura; Bio6 - temperatura mínima do mês mais frio; Bio13 - precipitação do mês mais chuvoso; Bio14 - precipitação do mês mais seco; Bio15 - sazonalidade da precipitação; Bio16 - precipitação do trimestre mais chuvoso; Bio17 - precipitação do tri-

mestre mais seco; Bio18 - precipitação do trimestre mais quente e Bio19 - precipitação do trimestre mais frio.

Para as condições climáticas futuras utilizou-se de dados do modelo global HadGEM2-ES (Hadley Global Environment Model 2 - Earth System), alinhados aos períodos de tempo 2041-2060 e 2061-2080 centrados, respectivamente, em 2050 e 2070 (Hijmans *et al.*, 2005) e aos cenários RCP4.5 e 8.5 (Van Vuuren *et al.*, 2011) do CMIP5. As condições climáticas atuais tomadas como referência, corresponderam aos dados observados para o período de 1961-1990 (*op. cit.*). Selecionou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 devido, o primeiro corresponder a um cenário mais realístico no futuro e o segundo, ao cenário mais pessimista previsto, ambos cenários considerados relevantes para os tomadores de decisão em questões de impactos, adaptação, vulnerabilidade e mitigação (WRCP, 2009).

2.5. Modelagem e simulação

O programa utilizado para a modelagem foi o Max-Ent (Phillips *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2018), uma das

ferramentas mais populares para a modelagem de distribuição de espécies (Merow *et al.*, 2013), com algumas alterações na configuração padrão conforme sugerido por Raes e Steege (2007) e observando a espécie-alvo. Cada modelo final produzido resultou da média de 32 replicações e os mapas foram elaborados no programa QGIS. Para avaliação da precisão dos modelos calculou-se a *Area Under the receiver operating characteristic Curve* - AUC máxima alcançável e a AUC média (Phillips *et al.*, 2006). O valor da AUC varia de 0 a 1, onde um valor AUC de 0,50 indica que o modelo não teve um desempenho melhor que o aleatório, ao passo que, um valor AUC de 1,0 indica discriminação perfeita (Elith *et al.*, 2006). Ademais, foi calculada a extensão de áreas originalmente ocupadas, estendidas e contraídas da espécie-alvo usando um SIG, desde o presente e à medida que o clima se altera.

3. Resultados e Discussão

Levando-se em consideração às condições de clima atual e futuro e os dados bióticos disponíveis, os modelos de distribuição potencial produzidos para *O. ficus-indica* apresentaram desempenho satisfatório, com valores de AUC acima de 0,78 (Tabela 1), assegurando confiança moderada aos modelos.

Em relação ao conjunto das 10 variáveis ambientais utilizadas, as que mais contribuíram para a construção dos modelos foram: Bio13 - precipitação do mês mais chuvoso; Bio15 - sazonalidade da precipitação; Bio16 - precipitação do trimestre mais chuvoso; e Bio19 - precipitação do trimestre mais frio. As quatro variáveis ambientais juntas contribuíram com aproximadamente 65%. As demais variáveis ambientais contribuíram com cerca de 35% dos quais 19% foram contribuições de variáveis relacionadas à temperatura. Isso revela que a construção dos modelos de distribuição foi fortemente influenciada por variáveis de precipitação (Bio13, Bio15, Bio16 e Bio19), apesar da contribuição irrisória da variável Bio18 - precipitação do trimestre mais quente, com menos de 2%.

Essa influência maior da precipitação quando comparada com a temperatura já era esperada, haja vista a precipitação (chuva) ser o elemento do clima mais controlador e dominante da vida em terras secas, como no bioma Caatinga, onde a chuva inicia e encerra vários processos ecofisiológicos tais como, fenológico e germinação

de sementes (Albuquerque *et al.*, 2012). Além disso, dependendo da combinação do volume de chuvas com a distribuição espaço-temporal no bioma, o resultado pode ser favorável ou crítico para a mortalidade de plantas jovens (Araújo *et al.*, 2005) e, conseqüentemente, para a presença ou ausência de espécies em determinado lugar (Silva *et al.*, 2017). Portanto, a presença de *O. ficus-indica* em determinada lugar do bioma Caatinga, certamente, estaria condicionada ao regime das chuvas.

No que se refere aos modelos, um total de cinco modelos finais de distribuição potencial MaxEnt foram produzidos para a espécie-alvo: um modelo de distribuição potencial atual (Fig. 3a e 4a); dois modelos de distribuição potencial considerando RCP4.5 para 2050 e 2070 (Fig. 3b, c); e dois outros modelos de distribuição potencial RCP8.5 em 2050 e 2070 (Fig. 4b, c).

O modelo de distribuição potencial para a condição de clima atual mostrou todo o alcance atual de *O. ficus-indica* no bioma Caatinga, por meio de gradiente de probabilidade de ocorrência variando de zero (ausência) até 1,00 (presença) da espécie-alvo (Figs. 3a e 4a). Isso permitiu conhecer além das áreas já conhecidas a partir dos registros de presença, outras áreas no bioma em condições ambientais adequadas ou não para a presença da espécie-alvo. Essas outras áreas adequadas apareceram de forma contíguas ou isoladas das atuais áreas adequadas. Vale destacar aqui, as áreas de alto potencial de ocorrência (> 0,75 de chance de presença) que somaram cerca de 55 mil km², correspondendo a 6,5% da área total do bioma (Tabela 2), bem como a borda leste do bioma, que concentrou grande parte dessas áreas (Figs. 3a e 4a).

Por seu turno, os modelos de distribuição potencial para os cenários climáticos futuros centrados em 2050 e 2070 (Fig. 3bc e 4bc) mostraram que as áreas de alto potencial, quando comparadas às áreas de distribuição potencial atual, tenderiam a uma variação espacial positiva e negativa no decorrer desse século. Esses modelos de distribuição potencial apontaram, inicialmente, para uma expansão das áreas de alto potencial em RCP4.5/2050/2070 e até em RCP8.5/2050. Posteriormente, apontaram para uma contração dessas áreas em RCP8.5/2070, considerado o pior dos cenários para esse século, ou seja, mais calor, menos chuva e mais lugares inóspitos. A expansão atingiria seu máximo no cenário RCP8.5/2050, com 12% a mais de área adequada em relação a área referencial de clima atual (Tabela 2) e, a partir de RCP8.5/2070, entraria em contração com perdas de 4% de área de alto potencial em relação a última expansão em RCP8.5/2050.

Com a modelagem bioclimática e as modificações climáticas inclusas, foi possível apontar para dois efeitos futuros sobre as atuais áreas adequadas para a presença da espécie-alvo. O primeiro, haveria uma expansão paulatina dessas áreas até 2070 em RCP4.5 ou até 2050 em RCP8.5. No segundo, a partir de 2070 em RCP8.5 haveria contração até o final do século. Tal dinâmica de expansão e

Tabela 1 - Valores de AUC para os modelos finais.

Estado do clima	Fatias de tempo	AUC
Atual	1961-1990 (baseline)	0,79
RCP4.5	2041-2060 (2050)	0,79
	2061-2080 (2070)	0,79
RCP8.5	2041-2060 (2050)	0,79
	2061-2080 (2070)	0,79

contração ocorreriam de forma mais pronunciada na borda leste do bioma e com variações espaciais menores no

interior. Portanto, confirmando-se a diminuição da precipitação e aumento de temperatura no bioma Caatinga

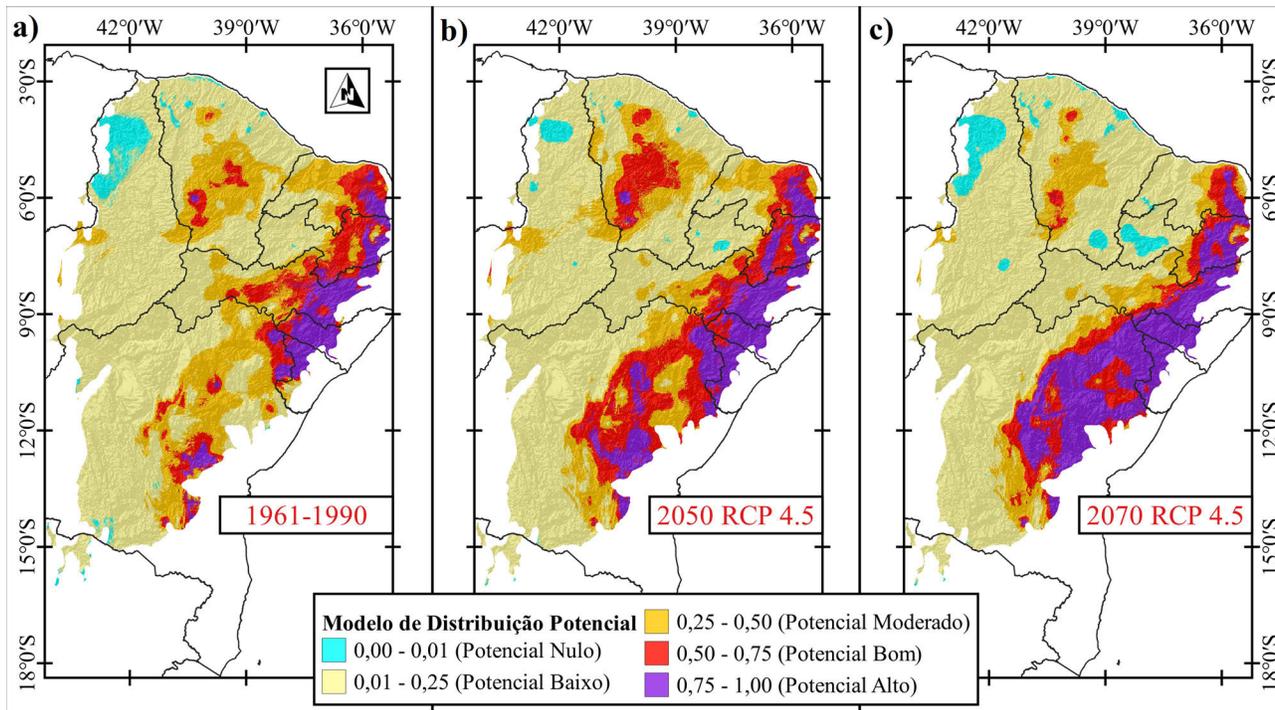


Figura 3 - Simulação da distribuição potencial atual (a) e projetadas para 2050 (b) e 2070 (c) sob o cenário RCP4.5 para *O. ficus-indica* no bioma Caatinga.

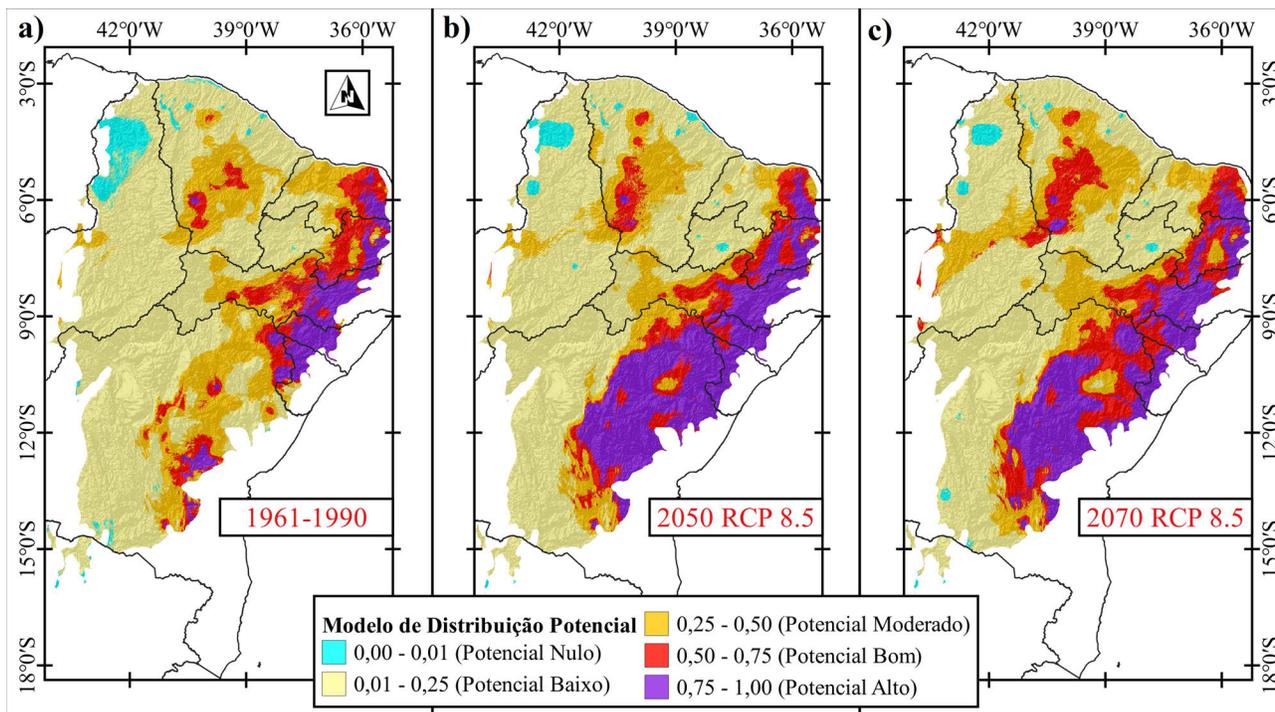


Figura 4 - Simulação da distribuição potencial atual (a) e projetadas para 2050 (b) e 2070 (c) sob o cenário RCP8.5 para *O. ficus-indica* no bioma Caatinga.

Tabela 2 - Valores absolutos e relativos para as áreas de alto potencial de presença (> 0.75 de chance de presença) da espécie-alvo em relação ao estado do clima no bioma Caatinga.

Estado do clima	Atual	RCP4.5		RCP8.5	
Intervalo (ano)	1961-1990 (baseline)	2041-2060 (2050)	2061-2080 (2070)	2041-2060 (2050)	2061-2080 (2070)
Área (km ²)	54.138,09	86.876,93	132.909,55	158.446,58	132.646,70
Área (%)	6,41	10,28	15,73	18,76	15,70
Expansão (%)	-	3,87	9,33	12,35	9,26

para esse século, em um primeiro momento a palma forrageira seria favorecida ganhando áreas adequadas, assim elevando o risco de invasão em partes ainda não ocupadas por ela no bioma para, posteriormente, essas áreas de maior chance de ocorrência entrarem em declínio e, por conseguinte, contendo a invasão. Nesse último momento, visualiza-se um final de século com condições ambientais difíceis para a presença da espécie-alvo, mas não para sua extinção local.

Essa dinâmica espaço-temporal de expansão e contração verificada para a *O. ficus-indica* no bioma Caatinga em resposta às mudanças climáticas previstas, não é incomum em cactáceas. Vários trabalhos relataram igual resposta para outras espécies nativas e não nativas invasoras em diversas terras secas (zonas áridas e semiáridas) do mundo, quando simuladas frente às mudanças climáticas. Cavalcante e Duarte (2019) modelaram a distribuição de três espécies de cactos nativos do bioma Caatinga sob cenários climáticos futuros e, em todas as simulações, os modelos futuros projetaram para uma contração drástica das áreas de alto potencial de ocorrência das espécies-alvo em relação às áreas originais, sendo essas áreas de alto potencial remanescentes, majoritariamente, elevações no bioma e detentoras de características climáticas específicas. Butler *et al.* (2012) também avaliaram os efeitos de três cenários de mudanças climáticas do IPCC para 2050 e 2080 sobre a distribuição da cactácea *Echinocereus reichenbachii* nas Grande Planícies dos Estados Unidos e, em todos os cenários investigados a área adequada para a espécie estudada, ao contrário, expandiu em relação à área atual. Já para Cortes *et al.* (2014) que estudaram a distribuição potencial de quatro espécies de cactos do estado de Chihuahua (MEX) sob três cenários do IPCC e quatro períodos de tempo (2000, 2020, 2050 e 2080), as projeções para as áreas potenciais foram diversas com contração, estabilidade e expansão.

Um achado interessante revelado da observação da dinâmica espaço-temporal de *O. ficus-indica* no bioma Caatinga foi a localização destino das áreas de potencial acima de 0.50. Essas áreas se posicionaram fortemente na borda leste do bioma Caatinga, com extenso contato com o

bioma Mata Atlântica, uma floresta tropical úmida. Isso pode sugerir que na região de fronteira entre os biomas, melhores condições de disponibilidade de água, poderiam favorecer a presença da espécie-alvo, quando às alterações do clima se agravassem, sobretudo, em termos de declínio das chuvas.

4. Considerações Finais

A combinação entre mudanças climáticas e espécies exóticas invasoras pode resultar em aumento no risco de invasão de ecossistemas intactos ou em uma oportunidade de contenção da bioinvasão nesses ecossistemas (Bradley, 2009). Para o caso da *O. ficus-indica* no bioma Caatinga, confirmando-se as mudanças climáticas e baseando-se nos modelos de distribuição potencial gerados para os diferentes cenários climáticos futuros, a expansão da palma forrageira observada seria um risco real de invasão, mas esse risco poderia ser administrado desde que levado em consideração o componente humano, facilitador da introdução da planta no bioma para fins de sustentabilidade socioeconômica nas épocas de secas prolongadas.

Então, parece razoável diante da possibilidade de impacto negativo futuro da espécie-alvo no bioma Caatinga, recomendar ações preventivas que envolvessem as comunidades locais. Essas ações preventivas seriam na direção de produção isolada e uso controlado da espécie (não em áreas intactas do bioma) por meio de programas de conscientização das comunidades locais na primeira metade do século XXI. Informações seriam repassadas sobre a biologia/ecologia da espécie-alvo e seus impactos na biodiversidade, bem como sobre as conexões existentes entre a espécie, os meios de subsistência das comunidades e as mudanças climáticas correntes.

Por fim, ainda que os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade não possam ser preditos com precisão, porque existem muitas incertezas (Bellard *et al.*, 2012), a modelagem da distribuição potencial de espécie pode nos ajudar a ter uma primeira aproximação desses impactos (Pearson e Dawson, 2003) e, assim, fornecer aos gestores ambientais preciosas informações para uma avaliação mais apurada sobre os perigos potenciais de invasão por espécies exóticas.

Referências

- AB'SÁBER, A.N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 160 p, 2003.
- ALBUQUERQUE, U.P.; ARAÚJO, E.L.; EL-DEIR, A.C.A.; LIMA, A.L.A.; SOUTO, A. *et al.* Caatinga revisited: ecology and conservation of an important seasonal dry forest. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 1-18, 2012.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classifica-

- tion map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ARAÚJO, E.; MARTINS, F.; SANTOS, F. Establishment and death of two dry tropical forest woody species in dry and rainy seasons in northeastern Brazil. In: NOGUEIRA, R.J. M.; ARAÚJO, E.L.; WILLADINO, L.G.; CAVALCANTE, U.M.T. (Eds). **Estresses Ambientais: Danos e Benefícios em Plantas**. Recife: Imprensa Universitária UFRPE, p. 76-91, 2005.
- BAETTIG, M.B.; WILD, M.; IMBODEN, M.D.A climate change index: where climate change may be more prominent in the 21st century. *Geophysical Research Letters*, v. 34, n. 01705, p. 1-6, 2007.
- BELLARD, C.; BERTELSMEIER, C.; LEADLEY, P.; THUILLER, W.; COURCHAMP, F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, v. 15, n. 4, p. 365-377, 2012.
- BRADLEY, B.A. Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. *Global Change Biology*, v. 15, p. 196-208, 2009.
- BRASIL - 5º Relatório Nacional para a Convenção sobre Diversidade Biológica / Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Brasília: MMA, 2016.
- BUTLER, C.J.; WHEELER, E.A.; STABLER, L.B. Distribution of the threatened lace hedgehog cactus (*Echinocereus reichenbachii*) under various climate change scenarios. *Journal of the Torrey Botanical Society*, v. 139, n. 1, p. 46-55, 2012.
- CAVALCANTE, A.M.B.; MENEZES, M.O.T.; MACHADO, M.C. **Cactos do Semiárido do Brasil: Guia Ilustrado**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, p. 103. 2013.
- CAVALCANTE, A.M.B.; VASCONCELOS, G.C.L. Comércio legal de cactos ornamentais: oportunidade para uso sustentável no semiárido do Brasil. *Revista Econômica do Nordeste*, v. 47, p. 9-19, 2016.
- CAVALCANTE, A.M.B.; DUARTE, A.S. Modeling the Distribution of Three Cactus Species of the Caatinga Biome in Future Climate Scenarios. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, v. 45, n. 2, p. 191-203, 2019.
- CBD - Convention on Biological Diversity. **Biodiversity and Climate Change**. Secretariat of the Convention on Biological Diversity: Montreal, 2014.
- CORTES, L.; DOMÍNGUEZ, I.; LEBGUE, T.; VIRAMONTES, O.; MELGOZA, A.; PINEDO, C.; CAMARILLO, J. Variation in the distribution of four cacti species due to climate change in Chihuahua, México. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, p. 390-402, 2014.
- CRUZ-CÁRDENAS, G.; LÓPEZ-MATA, L.; VILLASEÑOR, J.L.; ORTIZ, E. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, v. 85, n. 1, p. 189-199, 2014.
- DIDHAM, R.K.; TYLIANAKIS, J.M.; GEMMELL, N.J.; RAND, T.A.; EWERS, R.M. Interactive effects of habitat modification and species invasion on native species decline. *Science Direct*, v. 22, p. 489-496, 2007.
- DUQUE, S.G. **O Nordeste e as Culturas Xerófilas**. Mossoró: Escola Superior de Agricultura de Mossoró/Fundação Guimarães Duque, 3. Ed., 316p, 1980.
- ELITH, J.; GRAHAM, C.H.; ANDERSON, R.P.; ZIMMERMANN, N.E. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, v. 29, n. 2, p. 129-151, 2006.
- FLORA DO BRASIL. **Brazilian Flora 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2019 Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- FLORES, C. A. V. **Producción, Industrialización y Comercialización del Nopal como Verdura em México**. CIES-TAAM - UACH. Chapingo, México, p. 18. 1994.
- GBIF - Global Biodiversity Information Facility. **Occurrence Download**. Disponível em: <https://www.gbif.org/>. Acesso em: 7 dez. 2018.
- GRIFFITH, M.P. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): new molecular evidence. *American Journal Botany*, v. 91, n. 11, p. 1915-1921, 2004.
- GUISAN A.; ZIMMERMANN N.E. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, v. 135, p. 147-186, 2000.
- GUISAN, A.; THUILLER, W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, v. 8, n. 9, p. 993-1009, 2005.
- HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, 2005.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil, Escala 1:5.000**. Rio de Janeiro, IBGE, 2004.
- INSTITUTO HÓRUS DE DESENVOLVIMENTO E CONSERVAÇÃO AMBIENTAL. Disponível em: <https://institutohorus.org.br/>. Acesso em 16 mar. 2019.
- LACERDA, F.F.; NOBRE, P.; SOBRAL, M.C.M.; LOPES, G.M.B.; ASSAD, E.D. Tendência do clima do semiárido frente as perspectivas das mudanças climáticas globais; o caso de Araripina, Pernambuco. *Revista do Departamento de Geografia USP*, v. 31, p. 132-141, 2016.
- LEÃO, T.C.C.; ALMEIDA, W.R.; DECHOUM, M.; ZILLER, S.R. **Espécies Exóticas Invasoras no Nordeste do Brasil: Contextualização, Manejo e Políticas Públicas**. Recife: Centro de Pesquisas Ambientais do Nordeste - CEPAN, 99p, 2011.
- LOWE, S.; BROWNE, M.; BOUDJELAS, S.; DE POORTE, M. **100 de las Especies Exóticas Invasoras más dañinas del mundo**. Auckland: Grupo Especialista de Especies Invasoras - GEEI, 12p, 2004.
- MANLY, B.F.J.; ALBERTO, J.A.N. **Multivariate Statistical Methods: A Primer**. Boca Raton: CRC Press, 120 p. 2017.
- MARENGO, J.A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semiárido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149-175, 2008.
- MARENGO, J.A. O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, n. 103, p. 25-32, 2014.

- MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil: past, present and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.
- MARGALEF, R. Dynamics aspects of diversity. **Journal of Vegetation Science**, v. 5, n. 4, p. 451-456, 1994
- MEROW, C.; SMITH, M.J.; SILANDER JUNIOR, J.A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. **Ecography**, v. 36, n. 10, p. 1058-1069, 2013.
- NOVOA, A.; ROUX, J.J.; ROBERTSON, M.P.; WILSON, J.R.U.; RICHARDSON, D.M. Introduced and invasive cactus species: a global review. **AoB Plants**, v. 7, p. 1-14, 2014.
- PEARSON, R.G.; DAWSON, T.P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? **Global Ecology and Biogeography**, v. 12, p. 361-371, 2003.
- PENNINGTON, R.T; LAVIN, M.; OLIVEIRA-FILHO, A.T. Woody plant diversity, evolution and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology Evolution and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 437-457, 2009.
- PESSOA, A.S. **Cultura da Palma Forrageira**. Recife: SUDENE / Divisão de documentação (Agricultura, 5), 98 p, 1967.
- PETERSON, T.A.; SHAW, J. Lutzomyia vectors for cutaneous leishmaniasis in Southern Brazil: ecological niche models, predicted geographic distributions, and climate change effects. **International Journal for Parasitology**, v. 33, p. 919-931, 2003.
- PHILLIPS, S.J.; ANDERSON, R.P.; SCHAPIRE, R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.
- PHILLIPS, S.J.; DUDÍK, M.; SCHAPIRE, R.E. **Software Maxent para Modelagem de Nichos e Distribuições de Espécies** (versão 3.4.1). Disponível em: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Acessado em: 18 set. 2018.
- PRADO, D. As Caatingas da América do Sul. In: LEAL, I.R.; TABARELLI, M.; SILVA, J.M. C. (Eds). **Ecologia e Conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 3-73, 2003.
- PUJADAS, J. **Land-use and Socio-economic Correlates of Plant Invasions in European and North African Countries**. Centre de Recerca Ecologica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona. 2001.
- QGIS Development Team, 2018. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acessado em: 20 set. 2018.
- RAES, N.; TER STEEGE, H. A null model for significance testing of presence only species distribution models. **Ecography**, v. 30, n. 5, p. 727-736, 2007.
- REASER, J.K.; MEYERSON, L.A.; CRONK, Q.; DE POORTER, M. *et al.* Ecological and socioeconomic impacts of invasive alien species in island ecosystems. **Environmental Conservation**, Cambridge, v. 34, n. 2, p. 1-14, 2007.
- REDDY, S.J. Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment a review. **Embrapa Semiárido Artigo em periódico indexado ALICE**, v. 18, n. 8, p. 823-847, 1983.
- RODRIGUES, P.M.S.; SILVA, J.O.; EISENLOHR, P.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests. **Brazilian Journal of Biology**, v. 75, n. 3, p. 679-684, 2015.
- SALES, D.C.; COSTA, A.A.; SILVA, E.M.; CAVALCANTE, A.M.B. *et al.* Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.
- SAMPAIO, E.V.S.B. Caracterização da caatinga e fatores ambientais que afetam a ecologia das plantas lenhosas. In: SALES, V.C. (Ed.). **Ecossistemas brasileiros: manejo e conservação**. Fortaleza: Expressão Gráfica Editora, p. 129-142, 2003.
- SANTOS, M.G.; OLIVEIRA, M.T.; FIGUEIREDO, K.V.; FALCÃO, H.M. *et al.* Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, n. 1, p. 83-99, 2014.
- SEDDON, A.W.; MACIAS-FAURIA, M.; LONG, P.R.; BENZ, D.; WILLIS, K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. **Nature**, v. 531, n. 7593, p. 229-232, 2016.
- SILVA, J.M.C.; LEAL, I.R.; TABARELLI, M. (Eds.). **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer, 482p, 2017.
- SILVA, J.L.S.; CRUZ-NETO, O.; PERES, C.A. TABARELLI, M. *et al.* Climate change will reduce suitable Caatinga dry forest habitat for endemic plants with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies. **PloSOne**, v. 14, n. 5, p. 1-24, 2019.
- SOUZA, M.J.N.; OLIVEIRA, V.P.V. Os enclaves úmidos e sub-úmidos do semi-árido do Nordeste brasileiro. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, v. 5, n. 9, p. 85-102, 2006.
- SPLINK. **Dados e Ferramentas**. Disponível em: www.splink.cria.org.br. Acesso em: 7 dez. 2019.
- TAYLOR, N.P.; ZAPPI, D.C. **Cacti of Eastern Brazil**. The Royal Botanic Gardens: Kew., 499p, 2004.
- THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAUJO, M.B. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 14, p. 347-357, 2005.
- TORRES, R.R.; LAPOLA, D.M.; GAMARRA, N.L.R. Future Climate Change in the Caatinga. In: SILVA, J.M.C. da; LEAL, I.R.; TABARELLI, M. (Eds.). **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer, p. 383-410, 2017.
- VAN KLEUNEN, M.; DAWSON, W.P.; PERGL, J.; ESSL, F. Global exchange and accumulation of non-native plants. **Nature**, v. 525, n. 7567, p. 100-103, 2015.
- VAN PROOSDIJ, A.S.; SOSEF, M.S.; WIERINGA, J.J.; RAES, N. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. **Ecography**, v. 39, n. 6, p. 542-552, 2016.

- VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K. *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.
- WEBER, E. **Invasive Plant Species of the World: A Reference Guide to Environmental Weeds**. 2nd ed., Walingford: CABI, 581p, 2017.
- WCRP (World Climate Research Programme), **Evaluating and Improving Regional Climate Projections**. Workshop Report, Toulouse, France, 11-13, 2009, WCRP Informal Report. Disponível em http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/workshops/documents/cordex_workshop09.pdf. Acesso em: 04 fevereiro 2019.
- WOITKE, M.; DIETZ, H. **Shifts in Dominance of Native and Invasive Plants in Experimental Patches of Vegetation**. Julius-von-Sachs Institute of Biosciences, Wurzburg University, Germany, p. 12-15, 2002.
- WORLDCLIM. **Worldclim Version 1**. Disponível em: <http://worldclim.org/version1>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- ZENNI, R.D.; ZILLER, S.R. An overview of invasive plants in Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 34. n. 3, p. 431-446, 2011.
- ZILLER, S.R.; ZALBA, S. Propostas de ação para prevenção e controle de espécies exóticas invasoras. **Natureza & Conservação**, v. 5, n. 2, p. 8-15, 2007.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.