



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO

MARCELO HENRIQUE TORRES DE MEDEIROS

**MODELAGEM PREDITIVA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PARENTES
SILVESTRES DA COCA (*ERYTHROXYLUM* P.BROWNE,
ERYTHROXYLACEAE KUNTH) ENDÊMICOS DA CAATINGA E DA
CADEIA DO ESPINHAÇO NUM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

MOSSORÓ

2025

MARCELO HENRIQUE TORRES DE MEDEIROS

**MODELAGEM PREDITIVA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PARENTES
SILVESTRES DA COCA (*ERYTHROXYLUM* P.BROWNE,
ERYTHROXYLACEAE KUNTH) ENDÊMICOS DA CAATINGA E DA
CADEIA DO ESPINHAÇO NUM CONTEXTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Linha de Pesquisa: Ecologia e Conservação de Ecossistemas Terrestres.

Orientador: James Lucas da Costa Lima,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

T488 m Torres de Medeiros, Marcelo Henrique Torres de Medeiros.
Modelagem preditiva de distribuição dos parentes silvestres da coca (*Erythroxylum p.browne*, *Erythroxylaceae* Kunth) endêmicos da caatinga e da cadeia do espinhaço num contexto de mudanças climáticas / Marcelo Henrique Torres de Medeiros Torres de Medeiros. - 2025.
58 f. : il.

Orientador: James Lucas da Costa Lima Costa-Lima.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação, 2025.

1. Caatinga. 2. campos rupestres. 3. MaxEnt.
4. Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs); .
5. Unidades de Conservação (UCs).. I. Costa-Lima, James Lucas da Costa Lima, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARCELO HENRIQUE TORRES DE MEDEIROS

**MODELAGEM PREDITIVA DE DISTRIBUIÇÃO DOS PARENTES SILVESTRES
DA COCA (*ERYTHROXYLUM* P.BROWNE, ERYTHROXYLACEAE KUNTH)
ENDÊMICOS DA CAATINGA E DA CADEIA DO ESPINHAÇO NUM CONTEXTO
DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Conservação.

Linha de Pesquisa: Ecologia e Conservação de Ecossistema Terrestres.

Defendida em: 14 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

James Lucas da Costa Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Eveline de Almeida Ferreira, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador Interno (Titular)

Arthur de Souza Soares, Prof. Dr. (UFRN)
Membro Examinador Externo (Titular)

Airton Torres Carvalho, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador Interno (Suplente)

AGRADECIMENTOS

De início, o autor desta dissertação agradece o suporte do professor Dr. James Lucas da Costa Lima. Desde o processo de seleção, o professor foi extremamente importante, oferecendo conselhos valiosos e orientação acadêmica que foram fundamentais para a construção deste trabalho. Agradeço eternamente pelos ensinamentos do professor, desde as broncas até a efetividade desta dissertação. Também agradeço pela oportunidade de trabalhar em uma grande parceria com o gênero *Erythroxylum*, tema que despertou ainda mais meu interesse pela pesquisa científica. Sempre serei grato ao meu orientador por acreditar no meu potencial e por toda paciência durante o processo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço à minha mãe Maria Edjane e a Marcelo Medeiros pelo apoio financeiro.

Agradeço a toda coordenação da PROAE pela moradia estudantil da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, que proporcionou um espaço digno para a realização dos estudos. À professora e ex-reitora Ludmilla, que sempre nos ajudou na moradia 3 da pós-graduação, oferecendo não apenas ajuda com materiais, mas também palavras de incentivo.

Agradeço às grandes amigas que fiz na moradia da pós, ao grande amigo nas lutas diárias que enfrentamos, Leon Denner e Claudeonne, cuja companhia e parceria foram fundamentais para tornar a jornada acadêmica mais leve e motivadora. Também expresso minha gratidão às amigas acadêmicas que construí ao longo desses dois anos, Marcus e Neudo, que foram parceiros incansáveis em trabalhos, pesquisas e momentos de aprendizado mútuo.

Estendo meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, oferecendo apoio, palavras de encorajamento ou simplesmente compartilhando momentos que tornaram essa jornada mais rica e significativa.

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio de todos vocês. Meu sincero agradecimento.

RESUMO

As mudanças ambientais resultantes de ações humanas representam uma das principais ameaças à conservação da biodiversidade, especialmente para espécies ameaçadas e endêmicas. O gênero *Erythroxylum*, reconhecido por sua diversidade e relevância farmacológica e ecológica, ocorre amplamente no Domínio da Caatinga e recentemente teve sua riqueza documentada para os *campos rupestres* da Cadeia do Espinhaço. Nesse sentido, este estudo visou analisar a distribuição geográfica e avaliar o estado de conservação das espécies endêmicas de *Erythroxylum* do Domínio da Caatinga (CD) e Cadeia do Espinhaço (ER), utilizando Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs) para investigar a adequação ambiental diante de preditores climáticos e a eficácia das áreas protegidas. Para tal, cerca de 2.102 registros foram analisados a partir de dados exsicatas de herbários em forma presencial e virtual. As análises foram realizadas utilizando o software Maxent, integrado ao ambiente de programação R. Para modelar a adequação ambiental das espécies no presente e em um cenário futuro (i.e., 2040 e 2080) foi selecionado o cenário SSP370 para o futuro, que projeta um aumento nas emissões de gases de efeito estufa, mas com foco no desenvolvimento sustentável e o e SSP585 um cenário caracterizado por emissões máximas e uma dependência extrema de combustíveis fósseis. Também foram analisadas 45 áreas protegidas (Unidades de Conservação – PAs) nas categorias de Proteção Integral (PI) e Uso Sustentável (US) na categoria Federal do CD e ER. As variáveis escolhidas foram selecionadas a partir do pacote WorldClim2.1, com resolução espacial de 2,5 minutos (5 km x 5 km) e os modelos bioclimáticos foram escolhidos com base na análise de variância (VIF). As variáveis climáticas do WorldClim foram incorporadas ao modelo junto com as coordenadas de ocorrência das espécies, cuja performance foi avaliada por meio das métricas AUC e TSS onde os modelos saíram com AUC entre 0.75 e TSS 0.89 e 0.67 a 0.72, indicando uma precisão preditiva satisfatória. Nossos resultados indicam que, para as espécies que ainda não possuíam classificação de proteção, uma categorizada como vulnerável (VU) e sete como Em Perigo (EN), de acordo com os critérios da União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN). Em relação a adequabilidade ambiental, apenas 2 espécies, *Erythroxylum nordestinum* e *E. pungens*, aumentaram áreas em cenários futuros para o final do século. Os resultados também reforçam que aproximadamente 88,06% dos registros analisados estão fora de áreas protegidas, evidenciando a vulnerabilidade dessas espécies. Os modelos gerados neste estudo indicam que os padrões de precipitação exerceram grande influência para maioria das espécies. Nossos resultados reforçam a importância da manutenção e ampliação das áreas de conservação a nível federal e a urgência

na implementação de estratégias de conservação eficazes voltadas à proteção de espécies ameaçadas.

Palavras-chave: Caatinga. *campos rupestres*. MaxEnt. Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs). Unidades de Conservação (UCs).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Mapa da área do estudo	17
Figura 2	–	Mapa de ocorrência das espécies de <i>Erythroxylum</i>	24
Figura 3	–	Variáveis climáticas utilizadas no estudo.....	33
Figura 4	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum pungens</i>	34
Figura 5	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum nordestinum</i>	35
Figura 6	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum caatingae</i>	36
Figura 7	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum pyan</i>	37
Figura 8	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum oxypetalum</i>	38
Figura 9	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum kanga</i>	40
Figura 10	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum vacciniifolium</i>	41
Figura 11	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum loefgrenii</i>	42
Figura 12	–	Mapas de distribuição potencial de <i>Erythroxylum rosuliferum</i>	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Espécies de <i>Erythroxylum</i> (Erythroxylaceae) do Domínio da Caatinga e Cadeia do Espinhaço.....	18
Tabela 2	–	Variáveis Bioclimáticas disponíveis no pacote do World Climate 2	21
Tabela 3	–	Análise Preliminar das espécies de <i>Erythroxylum</i> endêmicas da Caatinga e da Cadeia do Espinhaço avaliadas para seu status de conservação com base nos critérios e categorias estabelecidos pela IUCN	28
Tabela 4	–	Número de espécimes por tipo de área protegida	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1	HIPÓTESE	16
1	OBJETIVOS	16
	OBJETIVO GERAL	17
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1	ÁREA DE ESTUDO.....	18
2.1	COMPILAÇÃO DE DADOS.....	19
2.3	CURADORIA DOS DADOS, ANÁLISE E FERRAMENTAS.....	20
2.4	TESTE DE GERMINAÇÃO	18
2.5	ÁREAS LEGALMENTE PROTEGIDAS (PAs).....	21
2.6	VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO.....	21
2.7	ALGORITMO SELECIONADO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	22
3	RESULTADOS	23
3.1	REGISTROS DE OCORRÊNCIA.....	24
3.2	DISTRIBUIÇÃO ATUAL E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DAS ESPÉCIES.....	25
3.3	OCORRÊNCIAS EM ÁREAS LEGALMENTE PROTEGIDAS.....	30
3.2	OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DO MODELO MAXENT.....	31
3.5	ANÁLISE DE VARIÁVEIS E SUA IMPORTÂNCIA.....	32
3.6	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ÁREAS POTENCIAIS PARA HÁBITAT NO PRESENTE E FUTURO (2040 E 2080)	34
4	DISCUSSÃO.....	44
5	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS	52

CAPÍTULO 1

Manuscrito a ser submetido ao periódico Ecologies (ISSN: 2673-4133; JCR: 1.7)

Modelagem preditiva de distribuição dos parentes silvestres da coca (*Erythroxylum* P.Browne, Erythroxylaceae Kunth) endêmicos da Caatinga e da Cadeia do Espinhaço num contexto de mudanças climáticas

Marcelo Henrique Torres de Medeiros¹ & James Lucas da Costa-Lima^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Avenida Francisco Mota 572, CEP 59628-900, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brazil

²Departamento de Biociências, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Avenida Francisco Mota 572, CEP 59628-900, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brazil

Resumo

As mudanças climáticas causadas por ações humanas são uma ameaça significativa à biodiversidade, especialmente para espécies endêmicas e ameaçadas. O gênero *Erythroxylum*, com alta diversidade e relevância ecológica e farmacológica, ocorre amplamente no Domínio da Caatinga (CD) e nos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço (ER). Este estudo analisou a distribuição geográfica e o estado de conservação de 12 espécies endêmicas de *Erythroxylum* do CD e ER, utilizando Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs). Foram analisados 2.102 registros de herbários presenciais e virtuais. Os modelos foram elaborados no software Maxent, com dados climáticos do WorldClim2.1, sob resolução de 2,5 minutos. As variáveis bioclimáticas foram selecionadas por análise de variância (VIF). Foram projetados cenários presentes e futuros (2040 e 2080) sob os modelos climáticos SSP370 e SSP585. Os modelos apresentaram boa performance (AUC entre 0,98 e 0,75 e TSS de 0,93 a 0,65). Apenas *Erythroxylum nordestinum* e *E. pungens* apresentaram aumento na adequabilidade ambiental em cenários futuros mais críticos. Os resultados também mostraram que, enquanto 88,06% dos registros de todas as espécies estão fora de áreas protegidas federais (PAs), corroborando nossa hipótese inicial de que as espécies não estão adequadamente protegidas. Para espécies sem classificação, uma foi categorizada como vulnerável (VU) e sete como Em Perigo (EN), segundo critérios da IUCN. Os resultados evidenciam a influência principal de precipitação e segundo Temperatura na distribuição, e destacamos a urgência em implementar estratégias de conservação, como a ampliação de Unidades de Conservação Federal, para garantir a proteção dessas espécies em um cenário de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Caatinga; *campos rupestres*; MaxEnt; Modelos de Distribuição de Espécies (SDMs); Unidades de Conservação (UCs).

1. Introdução

Erythroxylaceae Kunth é uma família de angiospermas com distribuição pantropical (White et al., 2019; Plowman & Hensold 2004). Compreende quatro gêneros (Daly, 2004) e inclui 282 espécies aceitas (POWO, 2024). A maior parte das espécies descritas estão circunscritas ao gênero Pantropical *Erythroxylum* P. Browne (ca. 270), e os outros três gêneros são restritos ao continente Africano: *Aneulophus* Benth., *Nectaropetalum* Engl. e *Pinacopodium* Exell & Mendonça (Heywood et al., 2007).

O Brasil se destaca como um dos principais centros de diversidade e endemismo de *Erythroxylum* (Plowman & Berry 1999). Atualmente, reconhece-se a existência de 137 espécies aceitas no país, sendo 91 delas endêmicas (Flora e Funga do Brasil, 2024). Entretanto, Costa-Lima & Chagas (2020) apontam 160. Refletindo a versatilidade ecológica do gênero, *Erythroxylum* no Brasil apresenta ampla distribuição geográfica e amplitude ecológica, ocorrendo desde florestas úmidas até ambientes semiáridos, como o Domínio da Caatinga (CD) desde o nível do mar até as áreas montanhosas de grande elevação e ao longo da Cadeia do Espinhaço (ER) que estendesse entre os estados de Minas Gerais e Bahia. Apesar dos avanços nos levantamentos taxonômicos e florísticos (e.g., Cordeiro *et al.*, 2017; Costa-Lima et al., 2013, 2014, 2014; Loiola, 2013; Loiola e Cordeiro, 2014; Daly, 2004), persistem lacunas críticas no entendimento da conservação das espécies endêmicas de *Erythroxylum* na CD e ER.

Embora as descrições de novas espécies e os levantamentos florísticos tenham contribuído significativamente para o conhecimento do gênero nas regiões da Caatinga e Cadeia do Espinhaço (Costa-Lima & Chagas, 2018, 2020; Cordeiro & Loiola, 2018; Costa-Lima et al., 2014; Loiola, 2007, 2013; Loiola & Sales, 2008), a modelagem da distribuição de espécies endêmicas ainda representa uma lacuna crítica no conhecimento.

Essa carência torna-se especialmente relevante diante da crescente vulnerabilidade dessas espécies (Costa-Lima & Chagas, 2018), que enfrentam pressões antrópicas e ambientais, como desertificação, queimadas e expansão agrícola (Nascimento et al., 2023; Barbosa & Filho, 2022; Silva et al., 2017; Marengo, 2007). A aplicação de modelos de distribuição potencial é, portanto, fundamental para projetar áreas de ocorrência desse gênero endêmicos e avaliar seu risco de extinção conforme os critérios da IUCN (2024).

Essas lacunas tornam-se ainda mais alarmantes diante da crise ambiental global, marcada pela destruição acelerada de ecossistemas em regiões tropicais, nesse cenário, as mudanças climáticas destacam-se como um dos principais fatores que aceleram a perda de biodiversidade, tanto em escalas regionais quanto globais (Ostad, 2018; Pecl et al., 2017). Em várias regiões do Brasil, como a CD e ER, observa-se o aumento das temperaturas e alterações nos padrões de precipitação (Almazroui et al., 2021; Martins et al., 2018; Salviano et al., 2016;). Como consequência, a diversidade vegetal torna-se cada vez mais vulnerável às variações climáticas, dificultando sua permanência em áreas anteriormente adequadas e aumentando o risco de extinção (Liu et al., 2022; IUCN, 2020; Nic Lughadha et al., 2020; Wardhaugh, 2014; Scholze, 2006).

Essa situação evidencia a urgência de implementar estratégias de conservação, como a criação e manutenção de Unidades de Conservação (PAs), reconhecidas como uma das abordagens mais eficazes para proteger a biodiversidade (Bingham et al., 2019). Essa necessidade é particularmente crítica no CD, uma região que abriga uma rica diversidade de espécies vegetais endêmicas sob constante ameaça, mas que possui apenas 7,7% de sua área legalmente protegida (Silva et al., 2017; Oliveira & Bernard, 2017; Silva et al., 2019; Vieira et al., 2019). Agravando esse cenário, O elevado risco de extinção enfrentado por espécies endêmicas, decorrente das rápidas mudanças climáticas causadas por atividades humanas, destaca a necessidade urgente de adotar medidas de proteção

efetivas (Cámara-Leret et al., 2019; Warren et al., 2013). Nesse panorama, informações sobre os potenciais distribuições geográficas tornam-se fundamentais para embasar o desenvolvimento de estratégias de conservação (Gaisberger et al, 2022; Yan et al., 2021; Kougioumoutzis, 2020). Para alcançar esse objetivo, são utilizados Modelos de Distribuição de espécies (SDMs).

Os SDMs representam uma abordagem que tem ganhado destaque significativo ao longo do último século e tornando-se um dos campos de maior crescimento na ecologia (Franklin, 2013; Lobo, 2010). Esse método tem se mostrado extremamente eficaz na análise da distribuição de espécies, permitindo a avaliação potencial (Guisan et al., 2017; Cianfrani et al., 2018) e, especialmente, a adequação ambiental (Guisan et al., 2013). Ao combinar dados georreferenciados com variáveis bioclimáticas, é possível gerar modelos tanto para o presente quanto para projeções futuras (Hussein e Estifanos, 2023; Urban, 2015; Garavito et al., 2015; Elith e Leathwick, 2009).

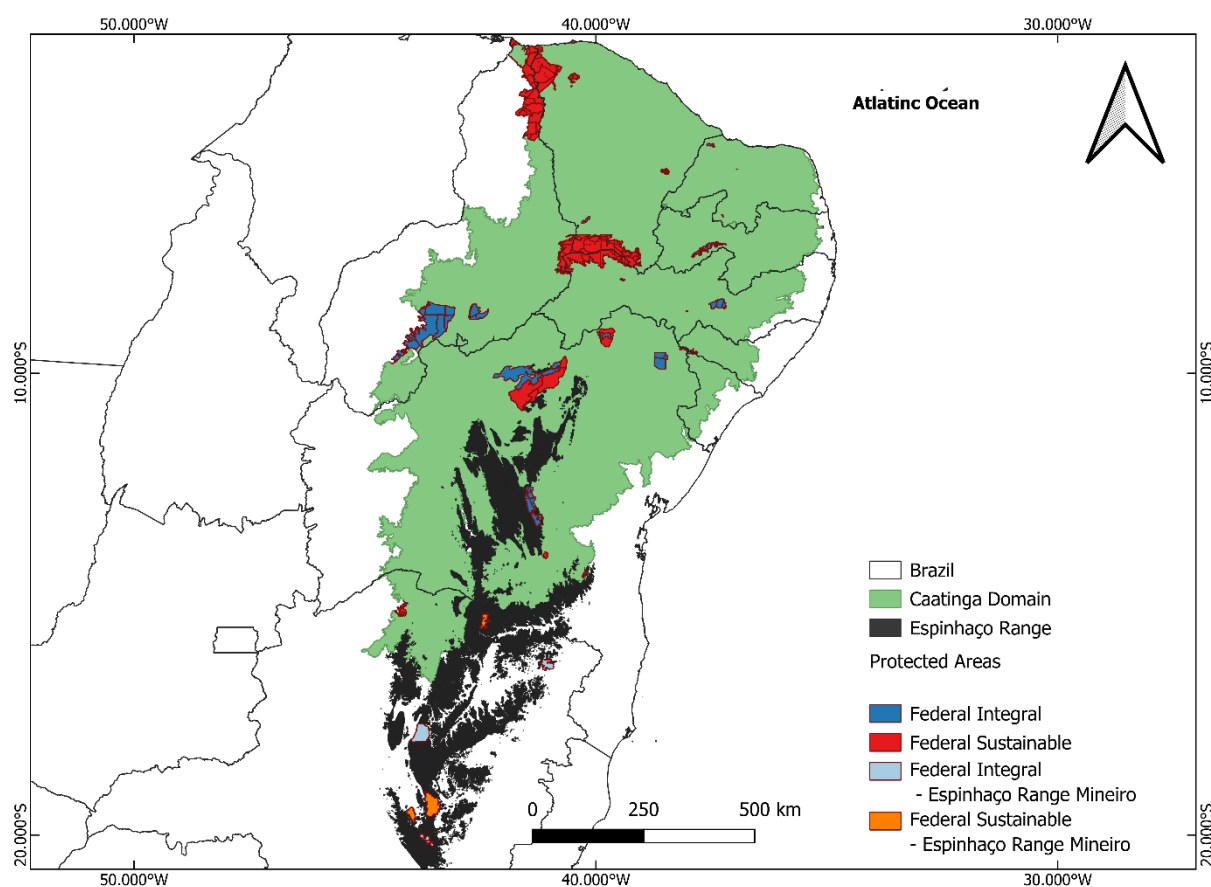
Considerando a escassez de estudos e a divergência de resultados sobre o impacto da crise climática. O estudo teve como objetivo geral modelar a distribuição potencial de espécies do gênero *Erythroxylum*, endêmicas do CD e ER, em um cenário atual e futuro com o modelo Maxent, a fim de avaliar o estado de conservação destas espécies. Com base nesses precedentes, a hipótese testada é que a maioria das áreas de ocorrência dos registros está localizada fora dos limites de PAs, evidenciando lacunas e insuficiências nas estratégias de conservação atualmente adotadas. Os objetivos específicos foram: a) avaliar o estado de conservação das espécies com base nos critérios da IUCN, determinando seu nível de ameaça; b) Comparar diferenças na adequação de cenários climáticos atuais e futuros para essas espécies; c) analisar a eficácia das PAs na salvaguarda das espécies.

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

O CD está localizado predominantemente no Nordeste Brasileiro (Prado, 2003; Andrade-Lima, 1981), com uma área de 912.529 km², representando 10,7% do território nacional. Este domínio abrange todos os estados do Nordeste brasileiro e o norte de Minas Gerais (Queiroz, 2017; Silva et al., 2017). O complexo geológico da Cadeia do Espinhaço, o qual está situado entre os estados da Bahia e Minas Gerais, setorizada em Chapada Diamantina, Espinhaço Mineiro Setentrional e Meridional (Figura 1).

Figura 1. Mapa da área de estudo no Domínio da Caatinga, Cadeia do espinhaço e unidades de conservação Federal.



No CD prevalece o clima semiárido, acompanhado por uma vegetação adaptada a altas temperaturas e resistência a grandes períodos de estiagem (Prado, 2003). As temperaturas médias anuais variam entre 25 a 30 °C, podendo atingir valores mais altos, enquanto a precipitação anual média situa-se entre 773 mm, com máximas de 1200mm (Andrade et al., 2017). Para sobreviver a essas condições desafiadoras, a flora do DC desenvolveu uma série de adaptações morfológicas, anatômicas e fisiológicas (Andrade-Lima, 1981; Fernandes e Queiroz, 2018).

2.2. Compilação de Dados

A partir das listas apresentada por Costa-Lima & Chagas (2020) e da Flora e Funga do Brasil (BFG, 2021), foram selecionadas as espécies do gênero *Erythroxylum* endêmicas do DC e da ER (Tabela 1).

Para cada espécie, foram obtidos registros de ocorrência de amostras depositadas em coleções biológicas (herbários), a partir da consulta as plataformas virtuais Herbário Virtual REFLORA <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual>> e SpeciesLink <<https://specieslink.net>>, totalizando 2.102 registros. Os dados compilados destas plataformas foram oriundos das seguintes coleções: ALCB, ASE, ASU, BAH, BHCB, BHZB, BOTU, BRBA, BOTU, BM ,CEPEC, CEN, CSTR, EAC, EAN, ESA, ESAL, F, FLOR, G, HB, HCDAL, HRSN, HST, HUEM, HUNI, HUEFS ,HVC, HVASF, ICN, INPA, IAN, IPA, JPB, K, MAC, MCCA, MO, MOSS, NY, OUPR, R, RN, P, SP, SPF, TEPB, UB, UEC, UPCB, UCS, UEC, UESC, UFP, UFRN e US. Acrônimos de acordo com *Index Herbariorum* <<https://sweetgum.nybg.org/science/ih/>>.

Tabela 1. *Espécies de Erythroxylum (Erythroxylaceae) com distribuição restrita ao Domínio Fitogeográfico da Caatinga e/ou aos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço.*

Species	Caatinga Domain	Espinhaço Range
---------	-----------------	-----------------

<i>Erythroxylum angelicae</i> Loiola	X	
<i>Erythroxylum caatingae</i> Plowman	X	X
<i>Erythroxylum itan</i> Costa-Lima & E.C.O.Chagas		X
<i>Erythroxylum kanga</i> Costa-Lima & E.C.O.Chagas		X
<i>Erythroxylum loefgrenii</i> Diogo	X	X
<i>Erythroxylum longisetulosum</i> Loiola & M.F.Sales	X	X
<i>Erythroxylum nordestinum</i> Costa-Lima, Loiola & M.Alves	X	
<i>Erythroxylum oxypetalum</i> O.E.Schulz		X
<i>Erythroxylum pyan</i> Costa-Lima	X	X
<i>Erythroxylum pungens</i> O.E.Schulz	X	
<i>Erythroxylum rosuliferum</i> O.E.Schulz	X	X
<i>Erythroxylum vacciniifolium</i> Mart.		X

2.3. Curadoria dos dados, Análise e Ferramentas

Realizamos a remoção de registros duplicados, como coordenadas idênticas, por meio do RStudio (RStudio Team, 2024). Esse procedimento utilizou a função “distinct” do pacote “dplyr” (Wickham et al., 2023). Além disso, em todos os registros foi verificado se os locais indicados de fato correspondiam ao indicado nos rótulos das exsicatas, por meio do Google Earth Pro <<http://ditu.google.cn/>>. Cada espécime foi analisado individualmente para atestar sua correta identificação.

A modelagem de distribuição foi realizada no RStudio, utilizando o algoritmo MaxEnt 3.4.4 (Phillips et al., 2021) e pacotes específicos para Modelos de Distribuição de Espécies SDMs. Adicionalmente, mapas foram elaborados com o software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto QGIS (QGIS Development Team, 2024).

2.4. Avaliação Preliminar do Estado de Conservação

As espécies foram avaliadas preliminarmente quanto ao seu grau de ameaça com base no critério B e nas categorias estabelecidas pela International Union for Conservation of Nature (IUCN, 2024). Para essa avaliação, a “Área de Ocupação” (AOO) e a “Extensão de Ocorrência” (EOO) foram calculadas utilizando a ferramenta online GeoCAT (Bachman et al., 2011). Para a AOO, foram consideradas grades de 2 km².

2.5. Áreas Legalmente Protegidas (PAs)

Foram identificadas as Áreas Legalmente Protegidas (PAs) presentes no CD e ER, com seus *shapefiles* obtidos a partir das bases de dados do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2024).

No Brasil, as PAs são implementadas em diferentes níveis de governança — municipal, estadual e federal — e organizam-se em duas categorias principais: Proteção integral (IP) e Uso Sustentável (SU). Para este estudo, foram selecionadas apenas as PAs sob governança federal, devido a confiabilidade, publicidade e facilidade no acesso aos dados. Os *shapefiles* das PAs foram cruzados com os mapas de distribuição gerados para as espécies a fim de analisar se elas estão ocorrendo em áreas protegidas ou não.

As somas totais de ocorrências foram calculadas para cada categoria de proteção, permitindo a avaliação da distribuição geral. Calculamos as proporções de cada categoria em relação ao total geral de ocorrências de espécimes para cada espécie do estudo conforme descrito por Zar (1999).

2.6. Variáveis Climáticas e Critérios de Seleção

As variáveis bioclimáticas utilizadas foram obtidas, com resolução espacial de 2.5 minutos (5km x 5km), do pacote World Climate 2 <<http://www.worldclim.org>>, que dispõe de 19 variáveis climáticas (Tabela 2) (Fick e Hilmans, 2017).

Tabela 2. *Variáveis Bioclimáticas disponíveis no pacote do World Climate 2 (Fick e Hilmans, 2017).*

Variables	Description
BIO 1	Annual Mean Temperature(°C)
BIO 2	Mean Diurnal Range (monthly (max temp - min temp) (°C)
BIO 3	Isothermality (BIO2/BIO7) (×100) %
BIO 4	Temperature Seasonality (standard deviation ×100) %
BIO 5	Max Temperature of Warmest Month (°C)
BIO 6	Min Temperature of Coldest Month (°C)
BIO 7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6) (°C)
BIO 8	Mean Temperature of Wettest Quarter (°C)
BIO 9	Mean Temperature of Driest Quarter (°C)
BIO 10	Mean Temperature of Warmest Quarter (°C)
BIO 11	Mean Temperature of Coldest Quarter (°C)
BIO 12	Annual Precipitation (mm)
BIO 13	Precipitation of Wettest Month (mm)
BIO 14	Precipitation of Driest Month (mm)
BIO 15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation) %
BIO 16	Precipitation of Wettest Quarter (mm)
BIO 17	Precipitation of Driest Quarter (mm)
BIO 18	Precipitation of Warmest Quarter (mm)
BIO 19	Precipitation of Coldest Quarter (mm)

Para este estudo, foram selecionas variáveis bioclimáticas dos períodos atuais e futuro (2040 e 2080). Para a previsão futura, consideramos dois dos Cenários

Socioeconômicos Compartilhados do sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC, o CMIP6 (IPCC, 2021), cenários de emissão de carbono: SSP3-7.0 (SSP 370) e SSP5-8.5 (SSP 585). O cenário SSP3-7.0, classificado como intermediário, é marcado por emissões de gases de efeito estufa e reflete um futuro em que as políticas atuais são insuficientes para promover uma transição energética significativa. Apesar do aumento nas emissões, ele é menos severo quando comparado ao SSP5-8.5, que representa o pior cenário, caracterizado por emissões máximas e uma dependência extrema de combustíveis fósseis (Lee et al., 2023; IPCC, 2021).

Para cada espécie, foram selecionadas as variáveis climáticas redundantes por meio da análise do fator de inflação de variância (VIF) usando o pacote “usdm” no RStudio (Naime, 2023), a fim de reduzir a multicolinearidade. O coeficiente de Pearson foi aplicado para detectar variáveis fortemente correlacionadas ($r > 0,8$), a fim de se evitar as suas influências relativas.

2.7. Algoritmo selecionado, Calibração e Validação do Modelo

Utilizamos o algoritmo MaxEnt (Modelo de Máxima Entropia) versão 3.4.4 (Phillips et al., 2021) para o processo de modelagem, implementado no RStudio (R Development Core Team, 2024) com o auxílio do pacote “SDM” no R (Naimi & Araújo, 2016). O uso desse modelo permitiu estimar as áreas de adequação ambiental para as espécies de *Erythroxylum*, resultando na elaboração de mapas de distribuição atual e projetada para cenários futuros. Foram utilizados SDMs baseados em presença de fundo (Elith & Leathwick, 2009) e os dados de ocorrência foram integrados às variáveis bioclimáticas. Para representar a disponibilidade ambiental no espaço amostral, foram gerados 10.000 pontos de fundo aleatórios por meio do método “gRandom” do pacote “sdm” no R (Hijmans, et al., 2024; Naimi & Araújo, 2016).

A calibração do MaxEnt envolveu o ajuste do modelo para prever a distribuição potencial. Esse processo foi realizado com 50 replicações por subamostragem, utilizando 70% dos dados para treinamento e 30% para teste, conforme as recomendações de Mathur & Mathur (2024) e Jinga et al. (2021).

A predição do modelo foi avaliada por meio da Área Sob a Curva (AUC) da Curva Receiver Operating Characteristic (ROC) (Phillips et al., 2006), onde a curva reflete a capacidade preditiva do modelo. Então, de 0,5 a 0,6, definido como insatisfatório; de 0,6 a 0,7 como inferior; de 0,7 a 0,8 como moderado; de 0,8 a 0,9 como adequado; e de 0,9 a 1,0 quase perfeito. Além disso, a performance dos modelos também foi avaliada por meio do True Skill Statistic (TSS), uma métrica complementar à AUC para avaliar a performance (Oliveira et al., 2006). A faixa do TSS varia de -1 a 1 (Bai e Hang, 2024). Assim, tem-se: previsão inadequada (-1 a 0,4), mediana (0,4 a 0,5), satisfatória (0,5 a 0,7), muito satisfatória (0,7 a 0,85), excepcional (0,85 a 0,9), previsão quase perfeita (0,9 a 1).

Para quantificar a adequabilidade do habitat nos cenários presente e futuro, calculo a média das adequabilidades preditas pelos modelos pela área de ocorrência, resultando em *rasters* representando a adequabilidade média para cada cenário:

$$\text{Média} = \sum \text{Valores de Adequabilidade} / \text{Número de Valores}.$$

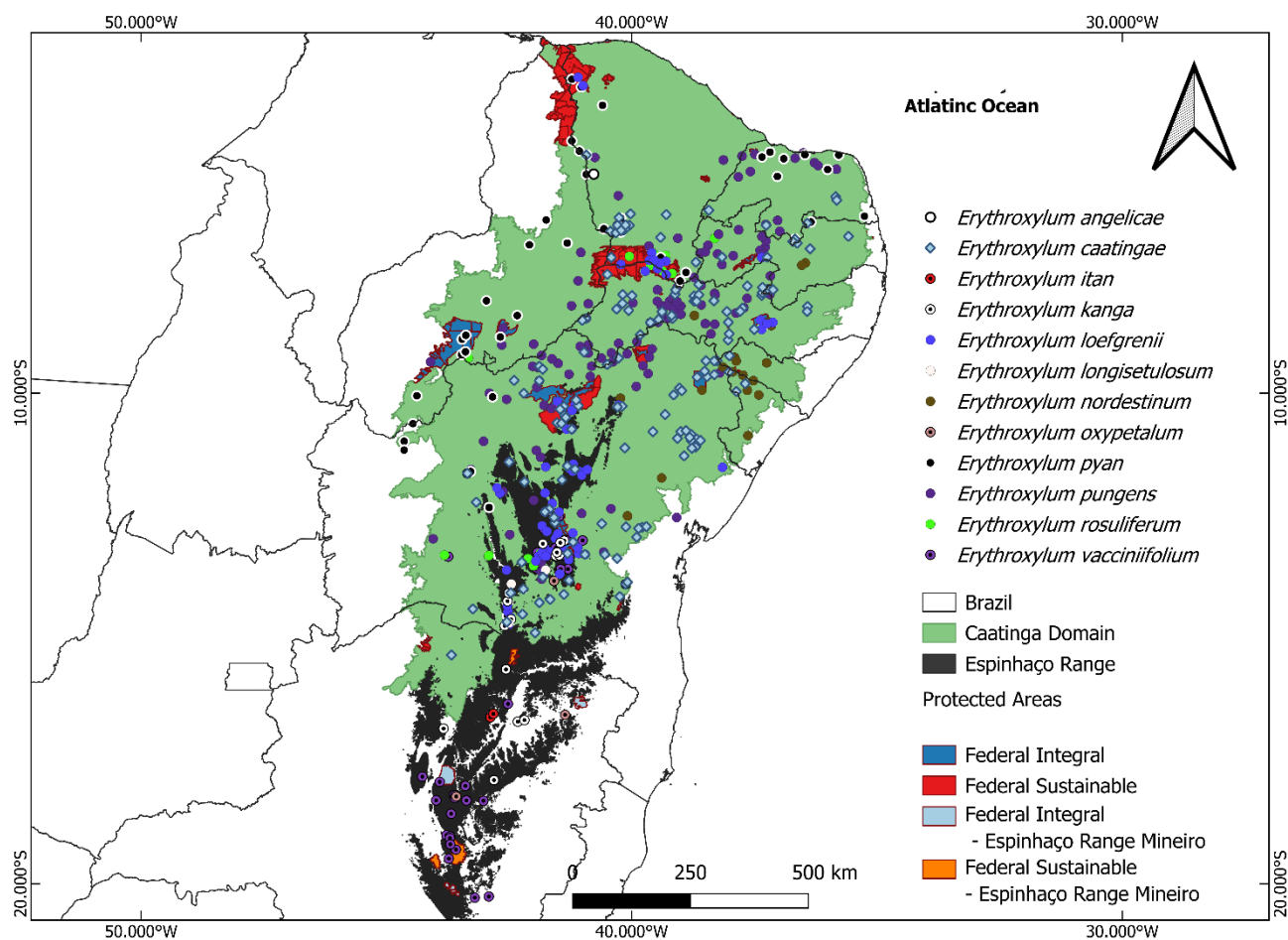
3. RESULTADOS

3.1. Registros de Ocorrência

Após uma análise taxonômica acurada de cada espécime, os 2.102 registros de *Erythroxylum* para o CD e ER foram drasticamente reduzidos para 522 registros, distribuídos da seguinte maneira: *Erythroxylum angelicae* (2 registros), *E. caatingae* (149), *E. itan* (5), *E. kanga* (16), *E. loefgrenii* (68), *E. longisetulosum* (4), *E. nordestinum*

(19), *E. oxypetalum* (22), *E. pungens* (120), *E. pyan* (44), *E. rosuliferum* (32) e *E. vacciniifolium* (42) (Figura 2).

Figura 2. Mapa de ocorrência das espécies de *Erythroxylum* endêmicas do Domínio Fitogeográfico da Caatinga e dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço.



3.2. Distribuição Atual e Avaliação Preliminar do Estado de Conservação das Espécies

As espécies com distribuição predominante no CD, em sua maioria, ocorrem amplamente na caatinga *stricto sensu* ao longa da Depressão Sertaneja, enquanto aquelas exclusivas do ER estão restritas ao campo rupestre nas áreas mais elevadas da Cadeia do Espinhaço (quase sempre a mais de 1.000 m de elevação), incluindo as porções norte e sul da Chapada Diamantina (Bahia) e o Espinhaço Mineiro (Minas Gerais). Nossas análises indicaram que, das espécies consideradas preliminarmente como ameaçadas,

uma espécie foi classificada na categoria Vulnerável (VU) e sete como Em Perigo (EN) (Tabela 3).

Erythroxylum angelicae. – É registrado apenas no planalto da Ibiapaba no estado do Ceará. Presente em vegetação “Carrasco”, a 760 m de altitude. De acordo com a classificação de Loiola (2013) Apesar de possuir apenas registro de 2 amostrar a espécie é classificada como dados insuficientes (DD). Área Protegida onde foi registrada: não foi registrada em área protegida.

Erythroxylum caatingae. – É registrado nos estados da Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e norte de Minas Gerais, amplamente distribuída na Depressão Sertaneja em vegetação de caatinga stricto sensu, floresta estacional decidual e em campos rupestres da Chapada Diamantina. Apesar de possuir uma grande área de ocorrência o EOO de 554,311.644 km², a espécie possui uma área de ocupação (AOO) reduzida, de apenas 596 km², sendo classificada como vulnerável (VU) segundo o critério B2ab(i) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: Estação Ecológica de Aiuaba (Ceará), Área de Proteção Ambiental da Chapada do Araripe (Piauí, Ceará, Pernambuco), Parque de proteção ambiental do Boqueirão da Onça, estação ecológica raso da Catarina e parque nacional da Chapada da Diamantina (Bahia) e Monumento Natural do Rio São Francisco entre (Bahia, Sergipe e Alagoas).

Erythroxylum itan. – É registrado no Espinhaço mineiro (Minas Gerais) entre os municípios de Grão Mogol e Cristália. Conhecida em áreas de floresta estacional, em altitudes de até 1000 m. A espécie foi determinada como Criticamente Em Perigo (CR), por Costa-Lima & Chagas, (2020), de acordo com os critérios B1ab(i,ii,iii) (IUCN, 2024). Possui EOO de 11 km² e AOO de 12 km². Área Protegida onde foi registrada: não foi registrada em área protegida.

Erythroxylum kanga. – É registrado nos estados da Bahia ao longo da Cadeia do Espinhaço, na Chapada Diamantina e norte de Minas Gerais no Espinhaço Mineiro. Conhecido em vegetação de até 1300m, presente em campo rupestre e cerrado. De acordo com a classificação de (Costa-Lima & Chagas, 2020) foi classificado como na categoria de menor preocupação (LC) segundo os Critérios B1b(i,ii,iii) (IUCN,2024). Possui EOO de 45,000 km² e AOO de 5.68 km². Área Protegida onde foi registrada: não foi registrada em área protegida.

Erythroxylum loefgrenii. – É registrado nos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e ao longo do ER (Bahia e Minas Gerais). Ocorre em áreas sedimentares, carrasco e campo rupestre. Apesar da ampla distribuição EOO de 437,485.309 km², possui AOO de 264 km² e foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2ab(i,ii,iii) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: Chapada do Araripe, Serra do Ibiapaba, Floresta Nacional do Araripe-Apodí (Ceará), Serra do Teixeira (Paraíba), Parque Nacional do Catimbau (Pernambuco), área de proteção ambiental do Boqueirão da Onça (Bahia).

Erythroxylum longisetulosum. – É registrado na Chapada Diamantina (Mun. Caetité e Mun. Rio de Contas, Bahia) em vegetação de caatinga. *stricto sensu*. Devido ao número reduzido de registros, possui EOO de 3,272.061 km² e AOO de 16 km² e foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2ab(i,ii,iii) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: não foi registrada em área protegida.

Erythroxylum nordestinum. – É registrado nos estados da Bahia, Sergipe, Pernambuco e Alagoas. Conhecido em vegetação Hiperxerófito da caatinga (Costa-Lima et al., 2014). Com EOO DE 112,217.672 km² e AOO de 76 km², foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2a(i) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi

registrada: Parque nacional do Catimbau (Pernambuco), Monumento Natural do Rio São Francisco (Bahia, Sergipe e Alagoas).

Erythroxylum oxypetalum. – É registrado nos estados da Bahia na Chapada Diamantina e em Minas Gerais no espinhaço mineiro. Registrado em áreas de florestas estacionais decíduais e semidecíduais. Possui EOO de 161,403.562 km² e AOO de 28 km² e foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2b(i,ii,iii) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: não foi registrada em área protegida.

Erythroxylum pungens. – É registrado nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Piauí, Pernambuco e Bahia, em vegetação caatinga *stricto sensu* e vegetação rupestre sobre rochas graníticas e calcárias. Possui EOO de 563,473.177 km² e AOO de 484 km² e foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2a(i) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: ESEC Seridó, FLONA Assu e PARNA da Fuma Feia (Rio Grande do Norte), Chapada do Araripe e Estação Ecológica de Aiuaba (Ceará), Parque Nacional da Serra da Capivara e Serra das Confusões (Piauí), Parque de proteção ambiental do Boqueirão da Onça (Bahia).

Erythroxylum pyan. – É registrado nos estados da Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte. Ocorre em vegetação de caatinga sobre principalmente em solos arenosos. De acordo com a classificação de Costa-Lima & Chagas (2018) como Pouco Preocupante (LC), consideramos o EOO de 650,976.269 km² e EOO 192 km², seguindo o critério B2ab (i,ii,iii) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: Área de Proteção Ambiental Serra da Ibiapaba (Ceará), Parque Nacional Serra da Capivara e Serra das Confusões (Piauí)

Erythroxylum rosuliferum. – É registrado nos estados do Piauí, Ceará, Pernambuco e ao longo do ER (Bahia e Minas Gerais) ocorre em áreas de carrasco e campos rupestres, Com EOO de 257,469.275 km² e AOO de 128 km², foi classificado

como Em Perigo (EN) segundo o critério B2ab(i,ii,iii) (IUCN,2024). Área Protegida onde foi registrada: Floresta Nacional do Araripe-Apodi (Ceará), Parque nacional da Serra das Confusões (Piauí)

Erythroxylum vacciniifolium. – É Restrito aos campos rupestres ao longo do ER (Bahia e Minas Gerais). Com EOO de 175,398.547 km² e AOO de 168 km², foi classificado como Em Perigo (EN) segundo o critério B2b(i,ii,iii) (IUCN, 2024). Área Protegida onde foi registrada: Parque Nacional da Chapada da Diamantina (Bahia), Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira e Parque Nacional das Sempre-Vivas (Minas Gerais)

Tabela 3. Análise Preliminar das espécies de *Erythroxylum* endêmicas da Caatinga e da Cadeia do Espinhaço avaliadas para seu status de conservação com base nos critérios e categorias estabelecidos pela IUCN. Extensão de Ocorrência (EOO), Área de Ocupação (AOO), Categorias de Risco: EN = Ameaçada, CR= Criticamente em Perigo VU = Vulnerável, LC = Pouco Preocupante, Dados Insuficientes = (DD)

Species	EOO (km ²)	AOO (km ²)	Category	Criterion	Major Imminent Threats
<i>Erythroxylum angelicae</i>	-	-	DD	-	-
<i>Erythroxylum caatingae</i>	554,311.644	596	VU	B2ab(i,ii,iii)	Desmatamento, pecuária extensiva
<i>Erythroxylum itan</i>	11	12	CR	B1ab(i,ii,iii)	-
<i>Erythroxylum kanga</i>	45,000	68	LC	B1b(i,ii,iii)	-
<i>Erythroxylum loefgrenii</i>	437,485.309	264	EN	B2ab(i,ii,iii)	Desmatamento, invasão de plantas exóticas

<i>Erythroxylum longisetulosum</i>	3,272.061	16	EN	B2ab(i,ii,iii)	Desmatamento, implementação de parque eólico
<i>Erythroxylum nordestinum</i>	112,217.672	76	EN	B2a(i)	Desmatamento
<i>Erythroxylum oxypetalum</i>	161,403.562	28	EN	B2b(i,ii,iii)	Desmatamento
<i>Erythroxylum pungens</i>	563,473.177	484	EN	B2a(i)	Desmatamento, pecuária extensiva
<i>Erythroxylum pyan</i>	650,976.269	192	LC	B2ab(i,ii,iii)	pecuária extensiva
<i>Erythroxylum rosuliferum</i>	257,469.275	128	EN	B2ab(i,ii,iii)	Desmatamento, implementação de parque eólico
<i>Erythroxylum vacciniifolium</i>	175,398.547	168	EN	B2b(i,ii,iii)	Desmatamento, invasão de plantas exóticas

3.3. Ocorrências em Áreas Legalmente Protegidas

No total, foram analisados registros nas 45 **PAs** nas categorias de IP e SU no CD e ER mineira (Tabela 3). Os resultados mostraram que 88,06% dos registros das espécies de *Erythroxylum* foram realizados fora de áreas protegidas.

Tabela 4: Número de espécimes por tipo de área protegida.

Species	Number	Federal integral	Federal sustainable	Outside of Protected Area
---------	--------	---------------------	------------------------	---------------------------------

<i>Erythroxylum angelicae</i>	1	0	0	1
<i>Erythroxylum caatingae</i>	149	6	8	135
<i>Erythroxylum itan</i>	5	0	0	2
<i>Erythroxylum kanga</i>	16	0	0	16
<i>Erythroxylum loefgrenii</i>	68	3	11	54
<i>Erythroxylum longisetulosum</i>	4	0	0	4
<i>Erythroxylum nordestinum</i>	19	2	0	17
<i>Erythroxylum oxypetalum</i>	22	0	0	22
<i>Erythroxylum pungens</i>	120	4	1	115
<i>Erythroxylum pyan</i>	44	5	2	37
<i>Erythroxylum rosuliferum</i>	32	3	12	17
<i>Erythroxylum vacciniifolium</i>	42	2	3	37
TOTALITY	522			457

3.4. Otimização e Avaliação de Precisão do Modelo MaxEnt

Os SMDs gerados evidenciaram variações em seu desempenho, com resultados amplamente satisfatórios e métricas que refletem a qualidade preditiva dos modelos ajustados. Espécies de *Erythroxylum* com AUC entre 0.90 e 0.98, como *E. vacciniifolium* (0.98), *E. loefgrenii* (0.92), *E. rosuliferum* (0.92), *E. kanga* (0.90), foram classificadas como de desempenho quase perfeito. Estes valores evidenciam excelente discriminação entre habitats adequados e inadequados, com TSS variando de 0.75 a 0.93, o que reflete alta precisão preditiva.

Espécies com AUC entre 0.75 e 0.89, como *Erythroxylum nordestinum* (0.88), *E. rosuliferum* (0.86), *E. pungens* (0.79) e *caatingae* (0.75), demonstraram desempenho moderado a bom, com TSS entre 0.67 a 0.76, indicando uma precisão preditiva

satisfatória. Por outro lado, *E. pyan* apresentou AUC de 0.74 e TSS de 0.65, o que a classifica como com o menor desempenho entre as espécies analisadas. Esses resultados destacam a eficácia geral do modelo MaxEnt.

3.5. Análise de Variáveis e sua Importância

Com base na contribuição percentual dos fatores bioclimáticos, realizamos a análise das relações entre as variáveis ambientais e a distribuição das espécies de *Erythroxylum*. A análise permitiu identificar os principais fatores responsáveis pela distribuição das espécies, evidenciando as variáveis mais importantes e aquelas com menor impacto na modelagem (Figura 3) classificados em precipitação, temperaturas extremas e sazonalidade. Em alguns casos, certas variáveis apresentaram relevância exclusiva para determinadas espécies.

A Isotermalidade (BIO3) exerceu maior influência sobre *E. nordestinum* (21,1%), enquanto isso, as demais espécies apresentaram contribuições inferiores a 7,7%, como *E. caatingae*, *E. loefgrenii*, *E. pyan*, *E. pungens*, *E. rosuliferum* e *E. vacciniifolium*.

Por outro lado, a Sazonalidade da Temperatura (BIO4) foi particularmente relevante para *E. pyan* (38,7%) e *E. caatingae* (14,9%), com contribuições menores para *E. pungens* (11,3%) e *E. vacciniifolium* (10,6%). A Temperatura do Mês Mais Quente (BIO5) exerceu influência apenas sobre *E. pyan* (3,8%), e, mesmo assim, com valor considerado baixo. Quanto a temperaturas extremas, a as variáveis Temperatura Mínima do Mês Mais Frio (BIO6) foi a variável mais importante para *E. vacciniifolium* (58,4%) e Faixa Anual de Temperatura (BIO7) apresentou influência reduzida, com valores abaixo de 5,6%. A Temperatura média do quarto mais úmido (BIO8) foi a variável mais relevante para *E. loefgreni* (60,1%), com contribuições abaixo de 19% para *E. rosuliferum*, *E. pungens* e *E. caatingae*. Já a Temperatura Média do Trimestre Mais Seco (BIO9) foi

utilizada exclusivamente nos modelos de *E. kanga* (4,1%) e *E. nordestinum* (0,7%), com valores baixos.

A Precipitação Anual (BIO12) desempenhou um papel central na distribuição de *E. kanga* (70,1%), com influência relevante também para *E. rosuliferum* (23,7%) e *E. vacciniifolium* (22%). A Precipitação do Mês Mais Seco (BIO14) foi uma das variáveis mais importantes para *E. oxypetalum* (25,9%), com contribuições abaixo de 18,4 % para *E. vacciniifolium*, *E. nordestinum* e *E. pyan*. Já a Sazonalidade da Precipitação (BIO15), destacou-se como a variável mais relevante para *E. pungens* (30,3%), mas contribuiu pouco para as distribuições de *E. caatingae* (6,2%) e *E. rosuliferum* (5,8%).

Para as variáveis relacionadas a trimestres extremos, tem-se Temperatura do Trimestre Mais Chuvoso (BIO16) se apresentando como mais importante para *E. oxypetalum* (42,2%), ao passo em que a Precipitação do Trimestre Mais Quente (BIO18) teve baixas contribuições para a maioria das espécies, com valores abaixo de 9,4 % para, *E. caatingae*, *E. kanga*, *E. loefgrenii*, *E. nordestinum*, *E. oxypetalum*, *E. pyan*, *E. pungens* e *E. rosuliferum*, por fim, a Precipitação do Trimestre Mais Úmido (BIO19) teve influência para *E. pungens* (13,5%) e *E. pyan* (12,2%), *E. caatingae* (11,6%) e *E. rosuliferum* (11,2%).

Figura 3: Variáveis climáticas utilizadas no estudo, com a porcentagem de contribuição variando de > 20% até 60%. Os quadrados em cinza indicam variáveis que não foram consideradas para a espécie.



3.6 Distribuição Espacial de Áreas Potenciais para Hábitat no Presente e Futuro (2040 e 2080)

As projeções de adequabilidade ambiental para as espécies do gênero *Erythroxylum* no CD e ER indicam padrões distintos entre os cenários presente e futuro (2040 e 2080), considerando os modelos SSP 370 e SSP 585. Enquanto algumas espécies apresentaram ganhos consistentes na adequabilidade climática, outras enfrentaram perdas significativas, com mudanças regionais notáveis.

Entre as espécies analisadas, *E. pungens* e *E. nordestinum* (Figura 4 e 5) destacaram-se como as de melhor desempenho, com ganhos significativos em ambos os cenários futuros. Para *E. pungens*, a adequabilidade média aumentou de 0,3150 no cenário presente para 0,4008 (em 2040) e 0,4536 (em 2080) no cenário SSP 370. No cenário mais crítico SSP 585, os valores também subiram, passando de 0,3919 em 2040 para 0,3741

em 2080, tão embora tenha havido uma leve queda no final do século. As áreas mais adequadas foram projetadas para o sul da Bahia e o leste de Sergipe. De forma semelhante, *E. nordestinum* apresentou aumentos consistentes de 0,1402 no presente para 0,2350 em 2040 e 0,2875 em 2080 no SSP 370; enquanto no SSP 585, os ganhos foram mais modestos, com valores de 0,2098 em 2040 e 0,2653 em 2080, apresentado ganhos de mais adequado concentrados no sudeste da Paraíba e no norte da Bahia.

Figura 4: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum pungens* nos períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e futuro distante (2080), em ambos os cenários (SSP 370) e (SSP 585).

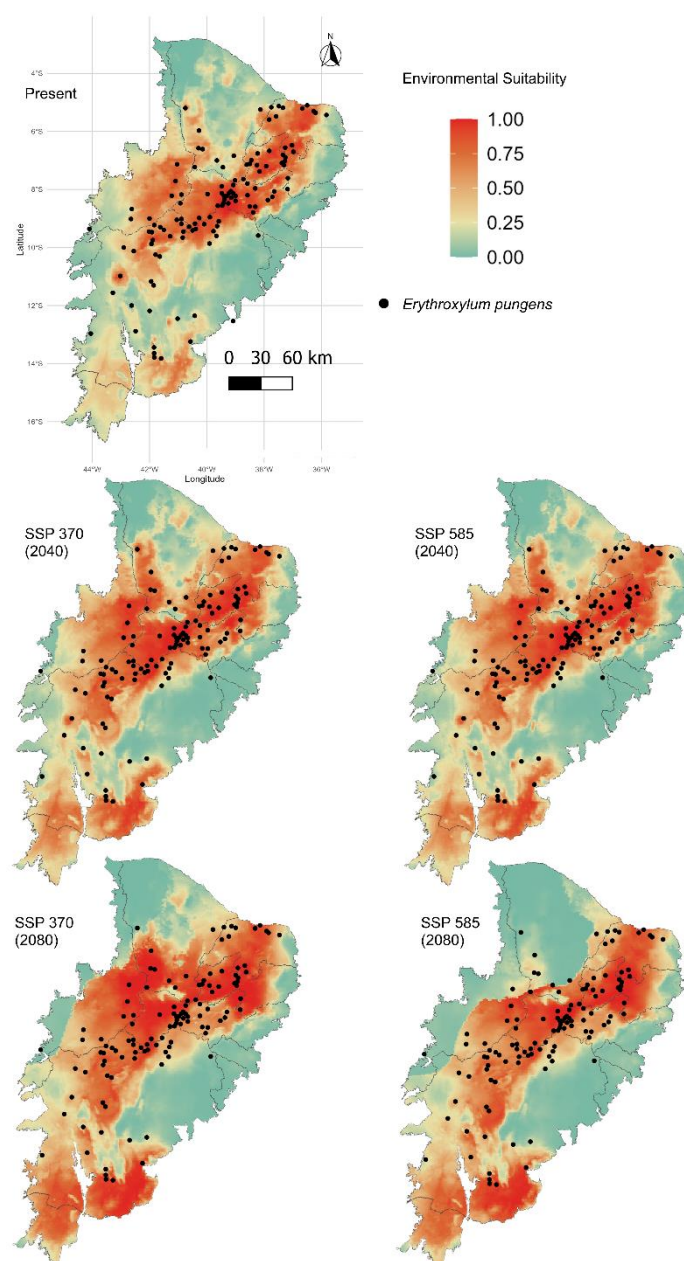
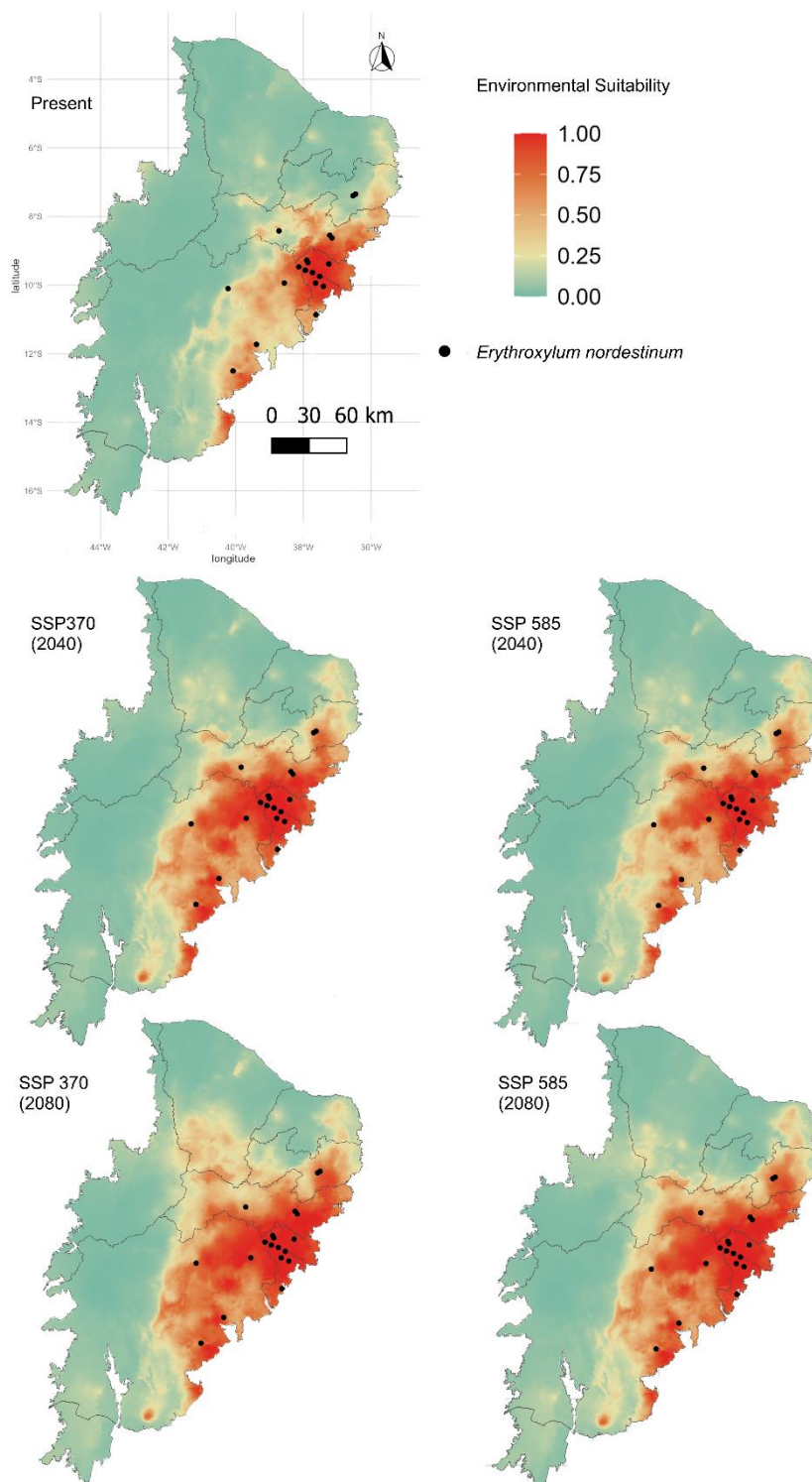


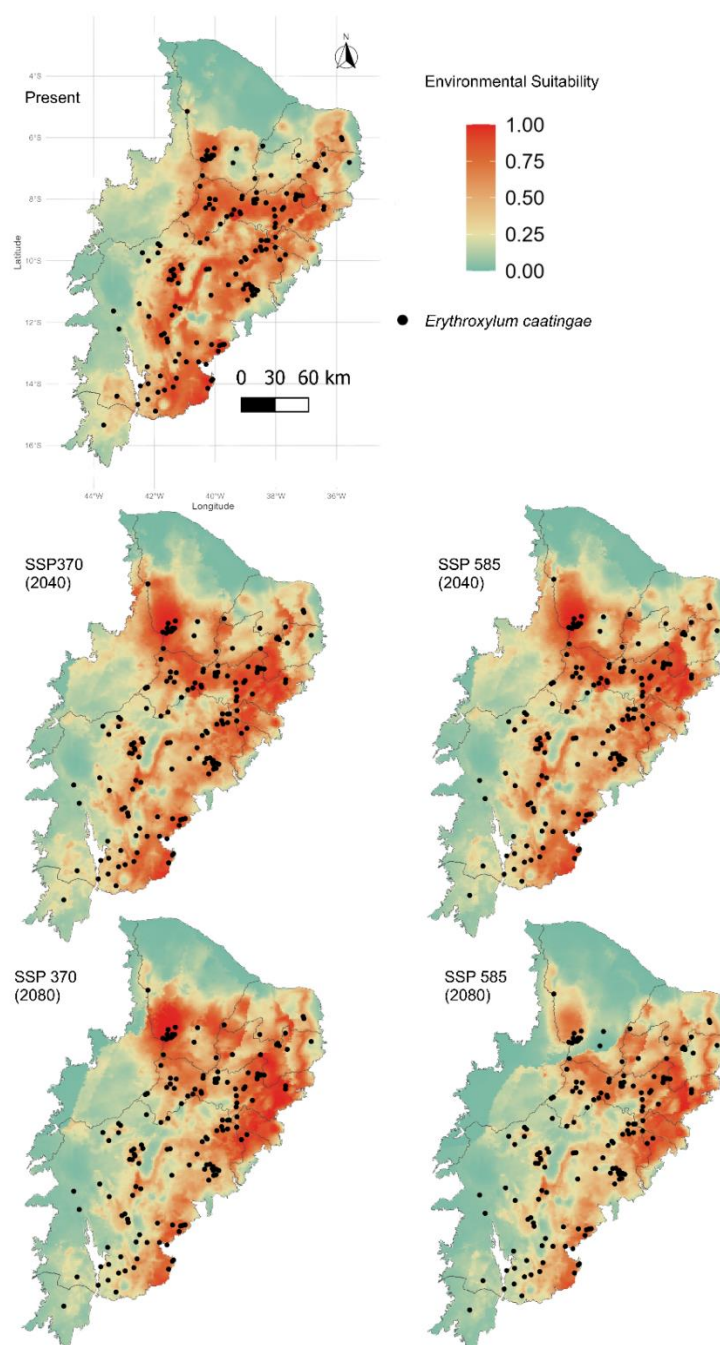
Figura 5: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum nordestinum* nos períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e futuro distante (2080), em ambos os cenários (SSP 370) e (SSP 585).



Por outro lado, *Erythroxylum caatingae* demonstrou um padrão de declínio (Figura 6), com perdas mais acentuadas no cenário SSP 585. No SSP 370, houve um aumento inicial de 0,3586 no presente para 0,3756 em 2040, seguido por uma queda para

0,3398 em 2080. No SSP 585, as perdas foram mais marcadas, com adequabilidade diminuindo para 0,3250 em 2040 e 0,2900 em 2080. Embora a espécie tenha o modelo mantido de Adequado a Mais Adequado em algumas áreas, como nas proximidades dos municípios de litorâneos de João Pessoa, Recife e Maceió, a tendência geral foi de redução.

Figura 6: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum caatingae* nos períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e futuro distante (2080), em ambos os cenários (SSP 370) e (SSP 585).



Espécies como *E. pyan* e *E. oxypetalum* apresentaram flutuações moderadas, com reduções no SSP 370, mas recuperação parcial no SSP 585 (Figura 7 e 8).

Figura 7: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum pyan* nos períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e futuro distante (2080), em ambos os cenários (SSP 370) e (SSP 585).

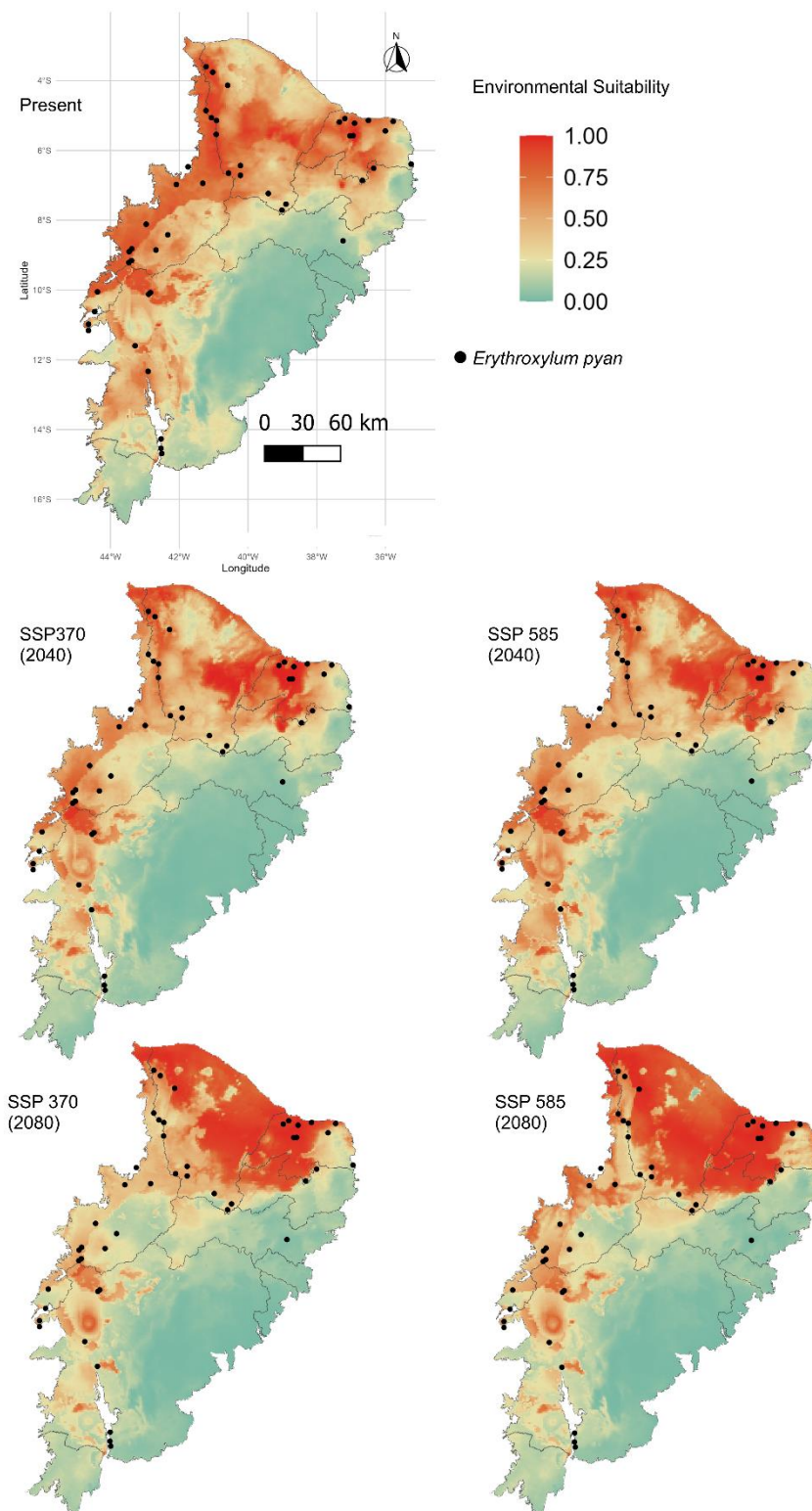
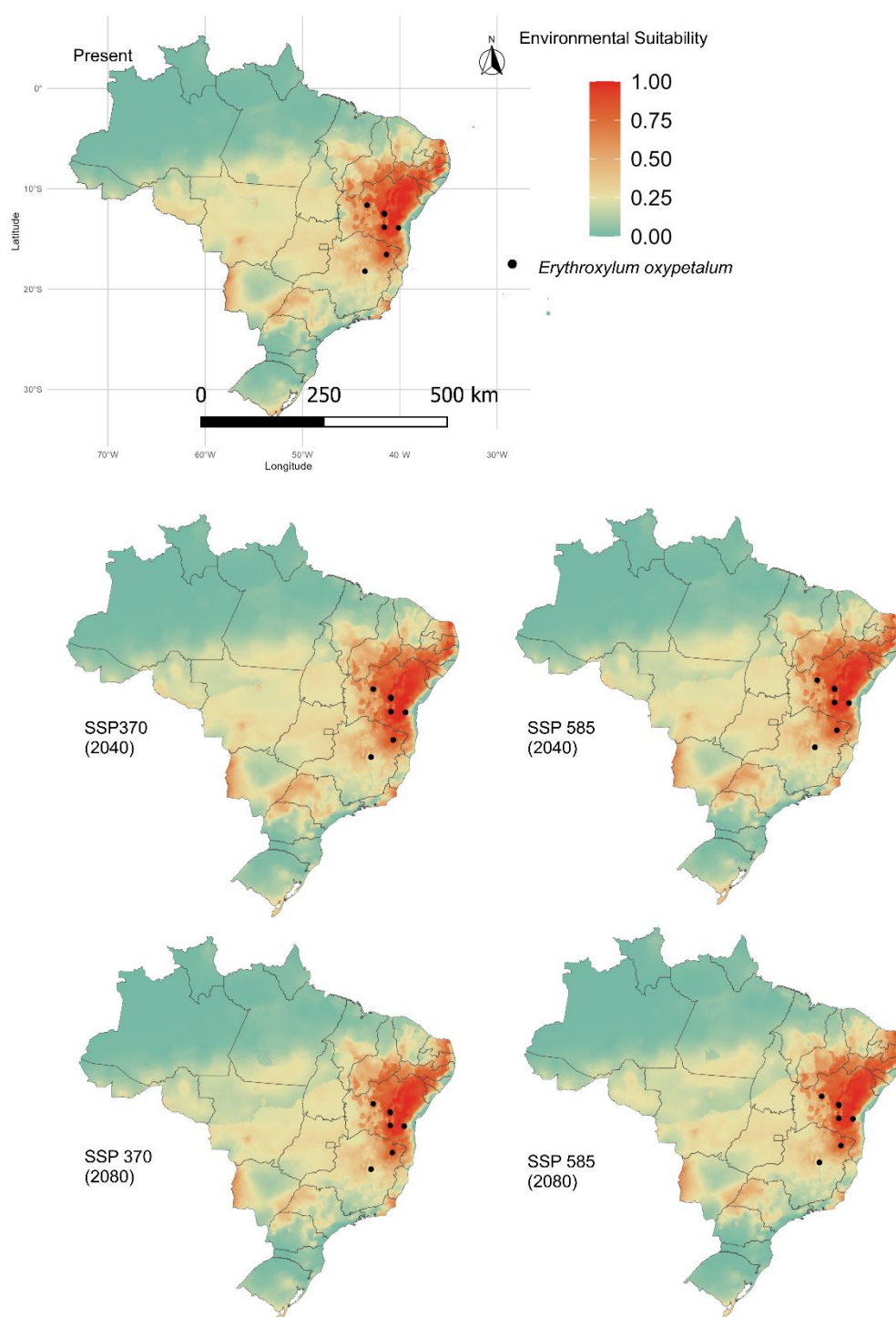


Figura 8: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum oxypetalum* períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e distante (2080), em ambos os cenários (SSP 370) e (SSP 585).



Erythroxylum pyan registrou uma redução no SSP 370, de 0,3695 no presente para 0,3084 em 2040 e 0,3047 em 2080; mas no SSP 585 apresentou uma recuperação, com valores de 0,3250 em 2040 e 0,3482 em 2080. Para essa espécie, as localidades tidas como Mais Adequado se concentraram no norte e oeste do Rio Grande do Norte e no norte, leste e oeste do Ceará. Já *E. oxypetalum* manteve estabilidade relativa, com adequabilidade no SSP 370 aumentando levemente de 0,2056 no presente para 0,2075 em 2040, antes de cair para 0,1939 em 2080. No SSP 585, os valores também apresentaram leve queda, com 0,2055 em 2040 e 0,1929 em 2080, com Mais Adequado concentrado no norte, leste e sul da Bahia.

Espécies como *Erythroxylum kanga* e *Erythroxylum vacciniifolium* sofreram declínios drásticos (Figura 9 e 10), com perdas semelhantes altas em áreas de adequado limitaram-se ao sul da Chapada Diamantina, na Bahia, e ao norte do setor mineiro da ER. *Erythroxylum kanga* teve uma redução de 0,0320 no presente para 0,0305 em 2040 e 0,0157 em 2080 no SSP 370, enquanto no SSP 585 os valores caíram ainda mais, para 0,0274 em 2040 e 0,0121 em 2080. *Erythroxylum vacciniifolium* apresentou um leve aumento inicial no SSP 370 (de 0,2056 no presente para 0,2075 em 2040), seguido por uma queda drástica para 0,0023 em 2080. No SSP 585, os valores foram ainda menores, atingindo 0,0012 em 2080. De maneira similar a *E. kanga* e *E. vacciniifolium*, *E. loefgrenii* apresentou declínio de sua adequabilidade, de 0,1168 no presente para 0,0245 em 2040 e 0,0059 em 2080 no SSP 370, e valores ainda mais baixos no SSP 585, com perda significativa para Não Adequado em todos estados que ocorre da CD (Figura 11)

Figura 9: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum kanga* períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e distante (2080), em ambos cenários (SSP 370) e (SSP 585).

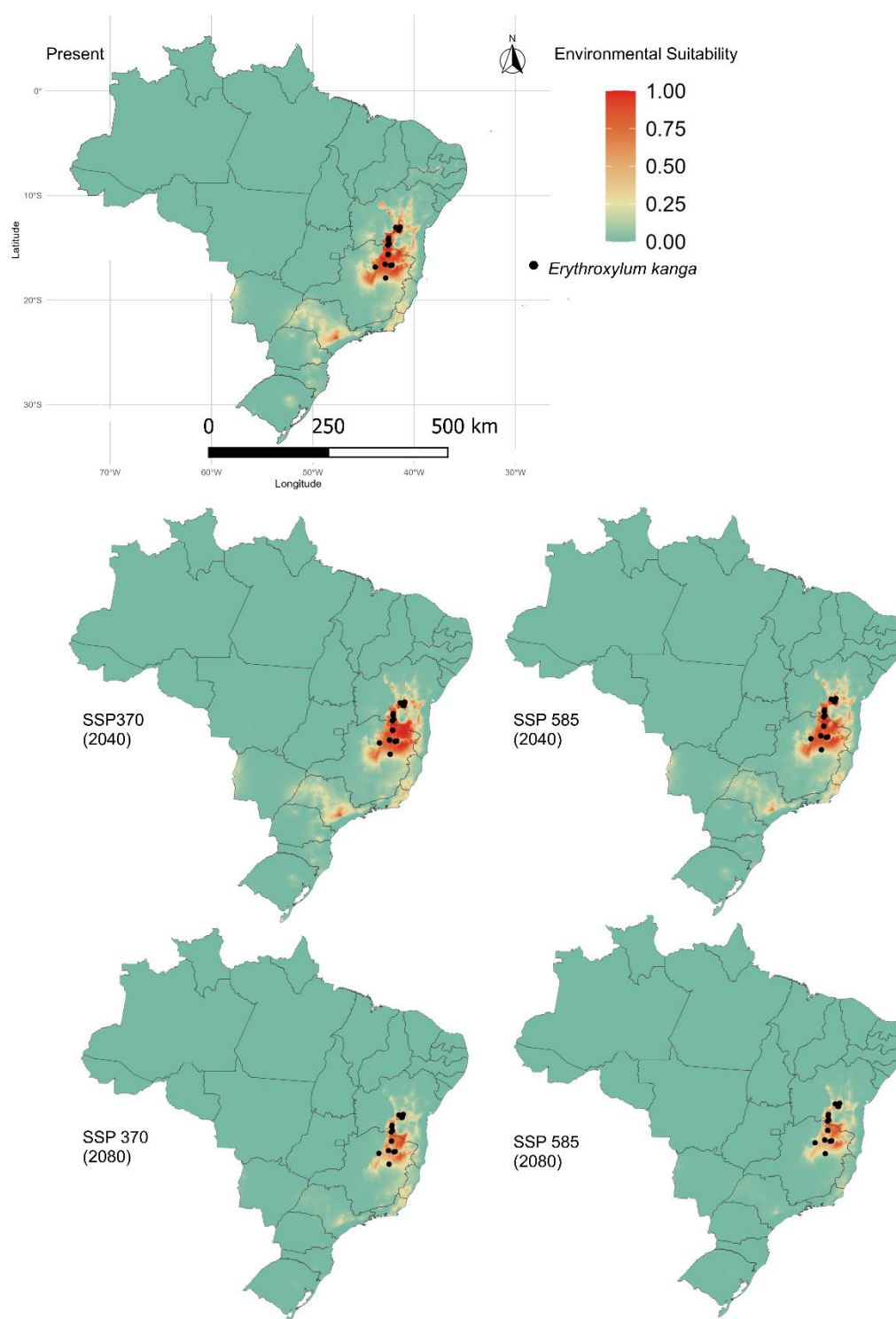


Figura 10: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum vacciniifolium* períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e distante (2080), em ambos cenários (SSP 370) e (SSP 585).

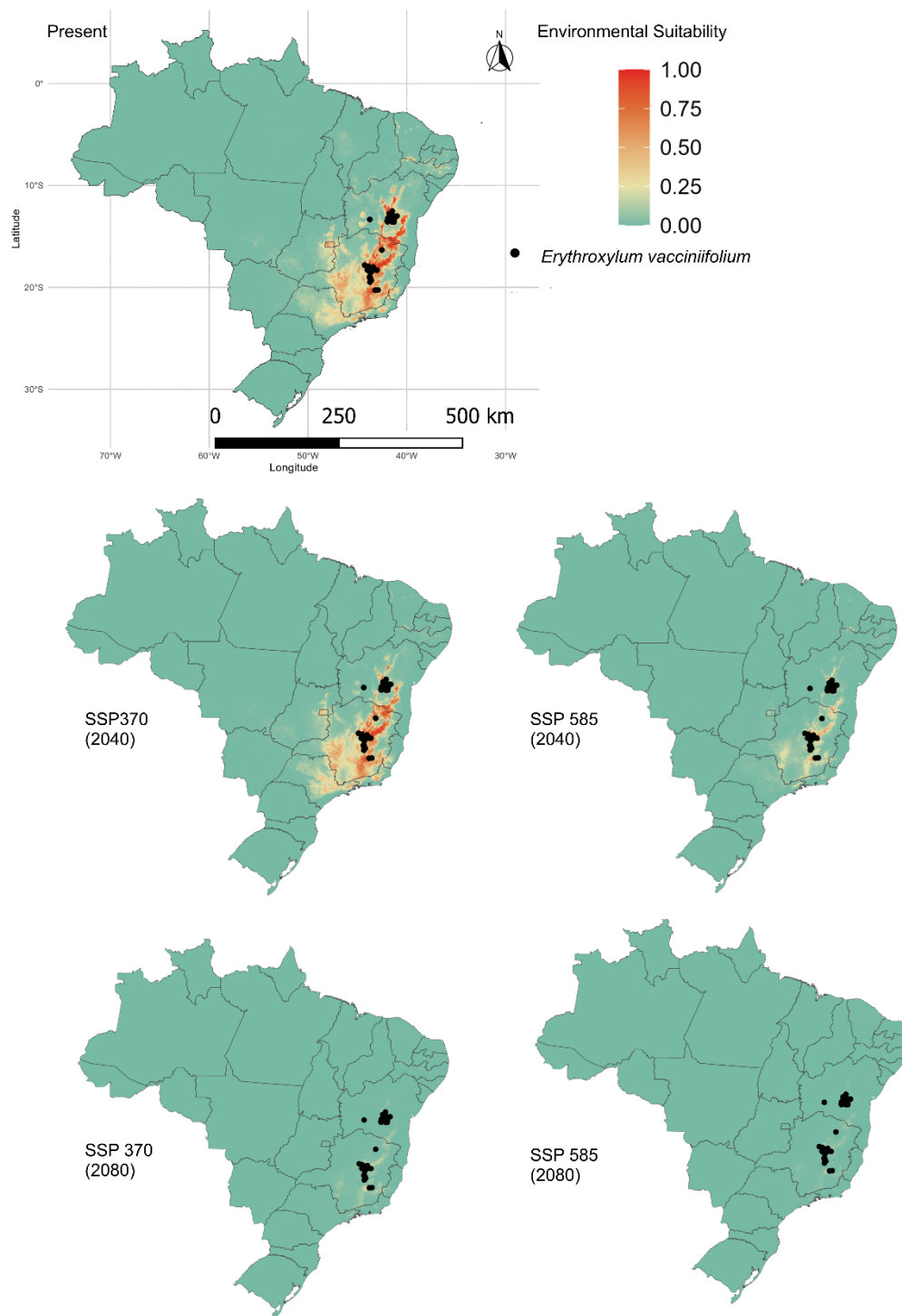
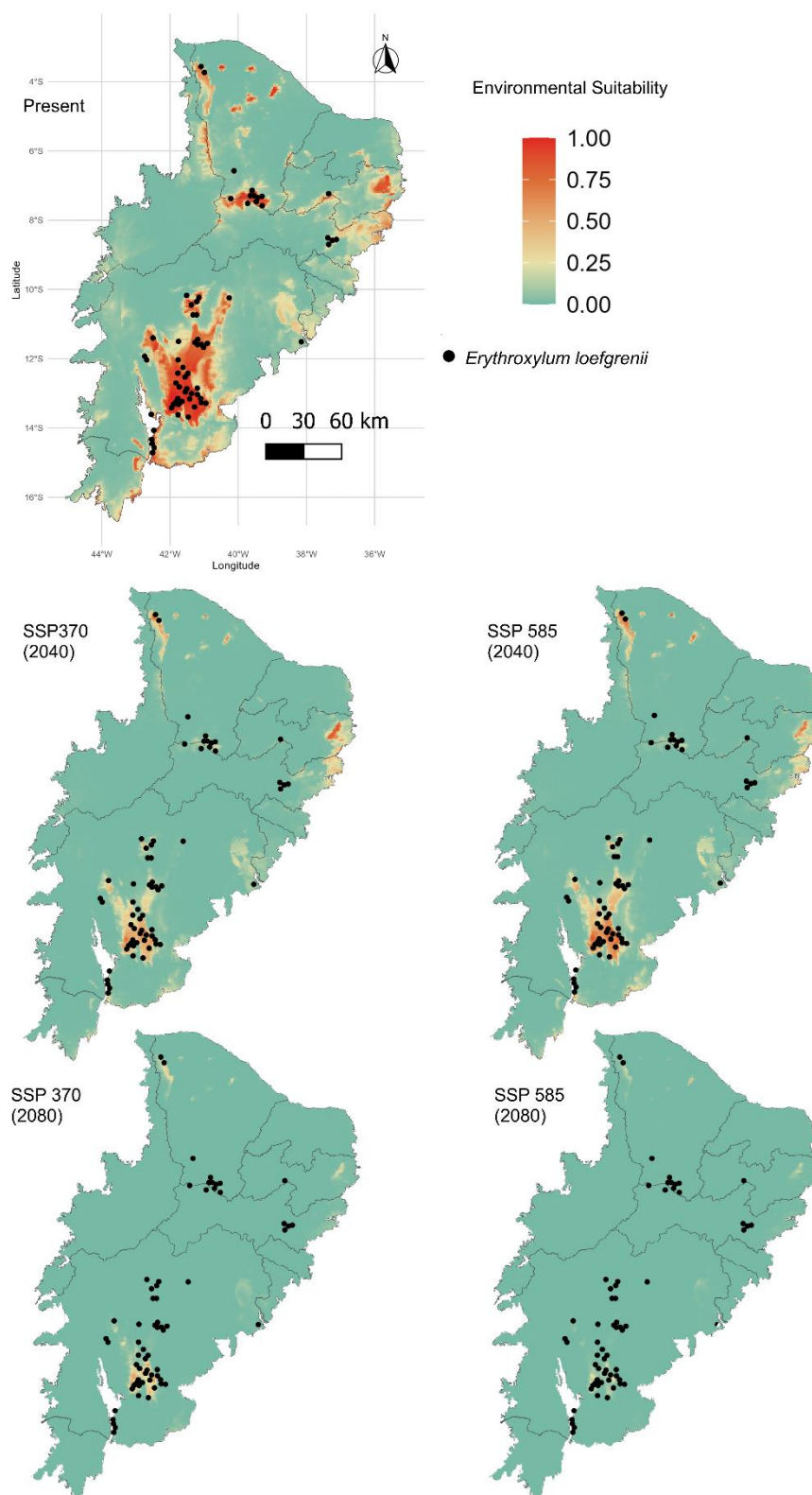
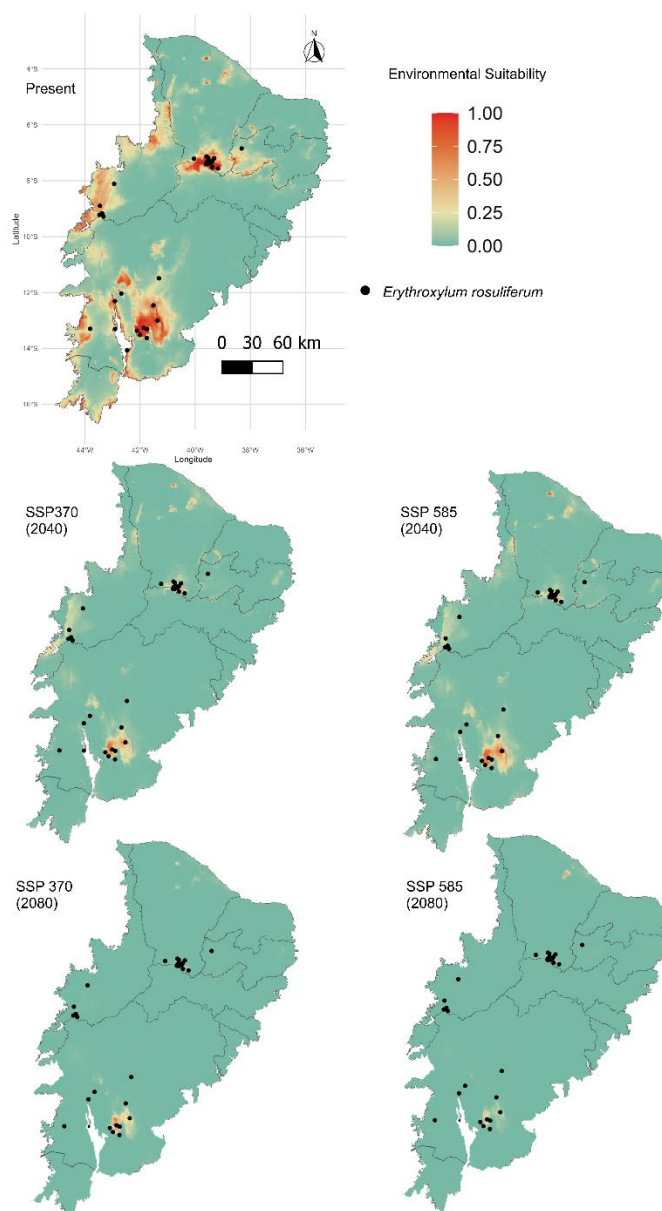


Figura 11: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum loefgrenii* períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e distante (2080), em ambos cenários (SSP 370) e (SSP 585).



Por fim, *Erythroxylum rosuliferum* (Figura 11) apresentou o pior desempenho, com quedas drásticas na adequabilidade ambiental e classificação de Não Adequado. Sua adequabilidade caiu de 0,0249 no presente para 0,0111 em 2040 e 0,0047 em 2080 no SSP 370, com quedas ainda mais drásticas no SSP 585, onde os valores chegaram a 0,0027 em 2080. A espécie teve a classificação de Não Adequado em praticamente todas as regiões do CD, mantendo apenas adequação Moderada em pequena escala no norte do Ceará e Menos Adequado no sul da Bahia.

Figura 12: Mapas de distribuição potencial de *Erythroxylum rosuliferum* períodos climáticos atual, futuro próximo (2040) e distante (2080), em ambos cenários (SSP 370) e (SSP 585).



4. DISCUSSÃO

Este estudo investigou a distribuição e estado de conservação de espécies endêmicas de *Erythroxylum* na Caatinga e Cadeia do Espinhaço utilizando modelos de distribuição (SDMs) no MaxEnt, com base em 2.102 registros e variáveis climáticas do WorldClim. Os resultados demonstraram um cenário crítico para a conservação. Enquanto isso cerca de 88,06% dos registros totais de todas as espécies ocorrem fora de áreas protegidas - expondo a maioria das populações a riscos iminentes -, enquanto na análise dos SDMS apenas *E. nordestinum* e *E. pungens* apresentaram potencial expansão de áreas adequadas nos cenários futuros (2040-2080, SSP370/585). Essa vulnerabilidade é agravada pelas respostas ecológicas diferenciadas às variáveis climáticas, com precipitação e temperatura emergindo como principais preditores de distribuição, porém com sensibilidades específicas para cada das nove espécies. Tal contexto explica, em parte, o status de conservação preocupante identificado, com sete espécies classificadas como vulneráveis (VU) e uma como Em Perigo (EN) segundo os critérios da IUCN (2024).

Essa variabilidade nas respostas climáticas entre as espécies é particularmente relevante. Os modelos gerados neste estudo indicam que, embora as espécies de *Erythroxylum* que ocorram em quase toda a totalidade do CD e ER e pertençam ao mesmo gênero, elas apresentam respostas distintas às variáveis climáticas, o que sugere a influência de fatores ambientais regionais em sua distribuição e potencial adequação a novos cenários climáticos. Segundo Dawson et al. (2011), os fatores regionais desempenham um papel crucial na definição de estratégias adaptativas, uma vez que diferentes condições ambientais, como o clima e temperatura, influenciam as características evolutivas dos organismos. Os resultados demonstram que a distribuição das espécies de *Erythroxylum* estudadas é influenciada pela precipitação e temperatura,

destacando a importância da consideração desses fatores climáticos nas avaliações de risco (Bai et al., 2024; Rodríguez Flores et al., 2024)."

Em particular, os principais padrões de precipitação exerceram forte influência sobre *E. loefgrenii*, *E. rosuliferum*, *E. pungens*, *E. caatingae*, *E. kanga* e *E. oxypetalum*, com destaque para as variáveis BIO12, BIO 13 e BIO14, BIO 19. Ao que indica, a disponibilidade hídrica é um fator limitante que molda a distribuição dessas espécies. Espécies que dependem fortemente de condições específicas de precipitação tendem a ser mais vulneráveis às mudanças nos regimes de chuva (Allen, 2007). Essa vulnerabilidade é ainda mais preocupante nas regiões do CD e CE, que já enfrentam um alto risco de desertificação amplamente conhecido (Marengo, 2006; Nascimento et al., 2023). No CD, a precipitação é um dos principais fatores reguladores da fenologia das plantas, influenciando processos essenciais, como a germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas, os quais ocorrem principalmente na estação chuvosa ou após chuvas esporádicas na estação seca (Albuquerque et al., 2012). Mudanças nos padrões de precipitação na América do Sul são amplamente documentadas (Ortega et al., 2021; Thaler et al., 2021; Sena & Magnusdottir, 2020), incluindo as regiões analisadas no presente estudo (veja Almazroui, 2021; Salviano et al., 2016; Martins et al., 2018). Essa vulnerabilidade ambiental pode representar uma ameaça significativa para manutenção das populações das espécies de *Erythroxylum* que ocorrem no CD e ER.

Por outro lado, as variáveis térmicas, como BIO3 e BIO9, foram mais relevantes para as espécies *E. nordestinum* e *E. vacciniifolium*, sugerindo que possuem maior sensibilidade às variações de temperatura. A influência dessas variáveis pode ser justificada pelo fato de *Erythroxylum nordestinum* ocorrer majoritariamente ao longo dos embasamentos cristalinos do Planalto da Borborema (400–600 m asl), no limite leste da CD, e *E. vacciniifolium* restrita às porções mais elevadas da Cadeia do Espinhaço (ca.

1.000 m asl), onde as temperaturas se apresentam mais constantes ao longo do ano. Por sua vez, os fatores de sazonalidade, representado pela variável BIO4, demonstraram maior influência na distribuição de *E. pyan*, indicando uma forte relação com a variação climática ao longo do ano. Para as espécies cuja distribuição é fortemente influenciada pela temperatura, os cenários futuros, especialmente o SSP585, indicam impactos negativos. Condições térmicas desfavoráveis podem prejudicar as plantas ao afetar processos essenciais, como fotossíntese, respiração e transpiração (Gao et al., 2024; Gusain et al., 2023; Allakhverdiev et al., 2008). De acordo com Mansour Almazroui et al. (2021), as projeções climáticas indicam que as mudanças de temperatura devem se intensificar no futuro, com aumentos variando de 1,0–2,4 °C até meados do século no cenário SSP370 e de 1,2–3,0 °C no SSP585, podendo atingir elevações de até 5,0 °C no final do século para SSP585.

Globalmente, o aumento térmico está diretamente associado à intensificação da queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás, que intensifica a concentração de CO₂ na atmosfera, contribuindo, assim, para mudanças de precipitações e temperatura (O'Neill et al., 2016; Mendonça & Danni-Oliveira, 2019). As mudanças climáticas representam uma ameaça significativa para todas as espécies do Espinhaço Mineiro, especialmente aquelas vulneráveis a extremos térmicos, como *Erythroxylum vacciniifolium*, que ocorre em campos rupestres e já apresenta redução expressiva em sua adequabilidade ambiental. Essa tendência é corroborada por Bitencourt et al. (2016), cujas projeções indicam uma perda de até 50% da área climaticamente adequada para campos rupestres até 2080, com consequente redução de 56% na riqueza de espécies vegetais até o final do século.

Nesse contexto, nossos resultados confirmam a vulnerabilidade das espécies de *Erythroxylum* às mudanças climáticas, impulsionadas pelo aumento da emissão de CO₂.

A redução da precipitação e o aumento da temperatura podem levar à perda de habitats e limitar capacidade de ocupação e dispersão das espécies, com impactos que devem se intensificar brevemente nas próximas décadas (Almazroui et al., 2021; Pereira et al., 2010). Além disso, o surgimento de novos padrões climáticos e o desaparecimento de condições ambientais anteriores (Dawson et al., 2011; Williams & Jackson, 2007) tais eventos agravam os desafios para a conservação da biodiversidade.

Das nove espécies analisadas nos cenários SSP 370 e 585, apenas *E. pungens* e *E. nordestinum* apresentaram aumento na adequabilidade ambiental no cenário extremo SSP 585, demonstrando um potencial capacidade de adequação às mudanças climáticas. Essa resiliência pode estar associada à alta dependência de variáveis, além da precipitação, como as térmicas (e.g., BIO3, BIO4, BIO7), que indicam maior tolerância a variações climáticas. Por outro lado, as demais espécies apresentaram uma redução drástica na adequabilidade ambiental. Para *E. pyan*, a perda de habitat foi relativamente pequena, sem mudanças extremas em sua adequabilidade ambiental, possivelmente devido a sua grande amplitude (EOO = 650,976.269 km²), a maior dentre as espécies estudadas, a qual ocorre ao longo as áreas sedimentares em todas as ecorregiões da CD.

4.2. Estado de Conservação

Compreender os padrões de distribuição e estado de proteção das espécies é uma etapa fundamental para elucidar suas condições de ocorrência e desenvolver estratégias eficazes de conservação da biodiversidade (Gaisberger et al., 2022). Nesse contexto, nosso estudo apresenta resultados relevantes sobre o estado de conservação das espécies de *Erythroxylum* endêmicas do DC e ER. A análise da distribuição geográfica para as 12 espécies indicou que 88,06% dos registros estão fora de áreas legalmente protegidas, evidenciando a insuficiência dessas áreas na salvaguarda dos parentes silvestres da coca.

Além disso, a avaliação do nível de ameaça revelou que todas as espécies até então sem classificação prévia ou desatualizada estão em alguma situação de risco, com sete delas categorizadas como Em Perigo (EN) e uma como vulnerável (VU).

Dentre as 12 espécies analisadas neste estudo, *E. angelicae* (Loiola, 2013), *E. pyan* (Costa-Lima e Chagas, 2018), *E. itan* e *E. kanga* (Costa-Lima e Chagas, 2020) já possuem indicações de categorização atualizadas quanto ao seu estado de conservação. No entanto, quatro espécies (*Erythroxylum loefgrenii*, *Erythroxylum oxypetalum*, *Erythroxylum rosuliferum*, *Erythroxylum vacciniifolium*) ainda não haviam sido avaliadas de acordo com os critérios e categorias da IUCN (2022) e tiveram indicações propostas aqui. Além disso, outras necessitarem ser reavaliadas, como foi o caso de *E. caatingae*. Essa espécie foi categorizada na Red List of Threatened Species (BGCI & IUCN, 2019) como Pouco Preocupante (LC), incluindo um registro equivocado no estado do Tocantins (no Domínio do Cerrado). Nossa análise, no entanto, indicou que essa espécie deve ser reclassificada como vulnerável (VU). Da mesma forma, *E. pungens* foi categorizada como Pouco Preocupante (LC) (BGCI & IUCN, 2019), mas nossos dados revelaram registros inconsistentes, como ocorrências no estado do Mato Grosso (Domínio do Cerrado) e litoral sul da Bahia (Domínio da Mata Atlântica).

Além dessas espécies, outras também exigiram reavaliação de estados de conservação, *E. longisetulosum* foi classificada como vulnerável (VU) por Loiola e Sales (2008), com registro apenas da coleção-tipo proveniente do município de Caetité, Bahia. No entanto, novos registros foram identificados para o município de Rio de Contas, também na Bahia, o qual é encontrado pouco mais de 100 km da localidade típica da espécie. Com esse novo registro dados, reavaliamos seu estado de conservação e a classificamos como Em Perigo (EN). Da mesma forma, *E. nordestinum* foi descrita e avaliada por Costa-Lima et al. (2014) como Pouco Preocupante (LC) baseado na ampla

distribuição, mas sem indicar EOO e AOO. No entanto, novos registros foram adicionados nesse estudo, incluindo ocorrências no estado de Alagoas (onde há o maior número de registros para a espécie), e reavaliamos seu estado de conservação como Em Perigo (EN).

Outro caso digno de destaque é o de *E. vacciniifolium*, que apresentou o maior número de registros com identificação incorreta nos herbários com dados analisados, com apenas 5,53% dos dados considerados válidos. Essa discrepância decorre da aplicação inadequada do nome *E. vacciniifolium*, tida na literatura (e.g., Plowman 1987, Plowman & Hensold 2004) como uma espécie amplamente distribuída desde o estado do Ceará até Santa Catarina (de 3°S a 28°S). No entanto, estudos mais recentes, como os de Costa-Lima e Amorim (2017), indicaram que muitos desses registros pertencem, na realidade, a distintas espécies. Ao longo das décadas, o nome *E. vacciniifolium* foi equivocadamente aplicada a espécimes de *Erythroxylum nummularium* Peyr., *E. pyan* Costa-Lima, *E. umbu* Costa-Lima e outras ainda não formalmente descritas para a ciência. Assim, corroboramos com a distribuição apresentada por Costa-Lima & Chagas (2019) para *E. vacciniifolium*, a qual ocorre nos estados da Bahia e Minas Gerais, atestando seus endemismos às áreas de campos rupestre nas mais elevadas quotas altitudinais.

A vulnerabilidade dessas espécies se agrava diante das ameaças ambientais que afetam os ecossistemas onde ocorrem. O CD, caracterizado por diferentes conjuntos de arbustais e florestas tropicais secas, está entre os ecossistemas mais ameaçados do mundo (Teixeira et al., 2021; Queiroz et al., 2017; Silva et al., 2017). Esse ambiente tem sido impactado por processos de desertificação (Nascimento et al., 2023; Marinho et al. 2016; Marengo, 2006), e também impulsionados pela expansão das atividades agrícolas, aumento das áreas de pastagem, criação de gados e, principalmente, queimadas (Barbosa e Filho, 2022; Silva et al., 2017). Entre os principais fatores de degradação ambiental

estão a exploração e a extração de produtos florestais (Silva et al., 2024) e a instalação de parques de energia eólica, especialmente em áreas de altíssima prioridade para a conservação da biodiversidade (Neri et al., 2019). Essas pressões já foram documentadas como ameaças iminentes a espécies de *Erythroxylum* aqui tratadas (e.g., Costa-Lima & Chagas 2018).

O CD abriga um alto nível de endemismo vegetal, mas, de modo proporcional, possui poucas áreas legalmente protegidas, o que intensifica a redução da cobertura vegetal e compromete a integridade desses ecossistemas (Queiroz et al., 2017; Dryflor et al., 2016; Beuchle et al., 2015). Situação semelhante ocorre no ER, notadamente conhecido por sua grande riqueza florística e elevado endemismo de plantas, também enfrenta severos impactos causados por ações antropogênicas (Giulietti et al., 1987; Harley, 1995; Zappi et al., 2003). Lessa et al. (2010) apontam que queimadas frequentes, muitas vezes associadas ao manejo inadequado de pastagens, comprometem ainda mais a conservação da região da ER. Além disso, Costa-Lima e Chagas (2020) destacam que a expansão agrícola, a exploração de produtos florestais e a substituição de áreas naturais por monoculturas de espécies exóticas, como as de eucaliptos (*Eucalyptus* spp., Myrtaceae), representam como um dos principais desafios para a conservação de *Erythroxylum* no ER.

Por fim, nossos resultados reforçam a importância da manutenção e ampliação das PAs, especialmente aquelas de categoria federal, que se mostram como os meios mais eficazes para a proteção da biodiversidade. Esses achados corroboram as conclusões de Oliveira et al. (2016), que destacam a relevância do estabelecimento e da expansão das PAs na CD e com os de Teixeira et al. (2021), que apontam que as áreas de proteção federal estão como as mais eficientes para a conservação. Nesse contexto, é fundamental desenvolver estratégias voltadas à proteção de espécies de plantas endêmicas e

ameaçadas, como é o caso das espécies de *Erythroxylum* aqui tratadas. Diante das mudanças climáticas impulsionadas principalmente por ações antrópicas, os SDMs evidenciam a perda de habitat para as espécies modeladas, tornando ainda mais urgente a implementação de medidas práticas de proteção, como a necessidade de ampliação e implementação de novas PAs.

5. CONCLUSÃO

Este estudo reforça a importância e a eficácia dos Modelos de Distribuição de Espécies, utilizando o algoritmo MaxENT, na identificação de áreas prioritárias para a conservação de *Erythroxylum*. Os resultados fornecem subsídios essenciais para a formulação de políticas de conservação, especialmente diante do aumento da vulnerabilidade ambiental. A análise da distribuição das espécies no CD e CE indicou uma significativa suscetibilidade à perda de adequabilidade ambiental. A alta vulnerabilidade à perda de adequabilidade ambiental, aliada à significativa parcela de registros fora de áreas protegidas (PAs), torna urgente a necessidade de ampliação e fortalecimento das PAs existentes, bem como da implementação novas áreas protegidas estrategicamente localizadas para abranger espécies e subpopulações vulneráveis.

2. REFERÊNCIAS

1. White, D.M.; Islam, M.B.; Mason-Gamer, R.J. Phylogenetic Inference in Section Archerythroxylum Informs Taxonomy, Biogeography, and the Domestication of Coca (*Erythroxylum* Species). *Am J Bot* **2019**, *106*, 154–165, doi:10.1002/ajb2.1224.
2. Plowman, T.; Hensold, N. Names, Types, and Distribution of Neotropical Species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae). *Brittonia* **2004**, *56*, 1–53, doi:10.1663/0007-196X.
3. Daly, D. Erythroxylaceae. In *Flowering Plants of Neotropics*, Smith, N.; Mori, S. A.; Henderson, A. et al., Eds.; The New York Botanical Garden, Princeton University Press: USA, **2004**; pp. 143–145.
4. POWO. *Erythroxylum* P. Browne. Available online: <<https://powo.science.kew.org/taxon/24933-1> (accessed on 30 June 2024).
5. Heywood, V. H. Erythroxylaceae. In *Flowering Plant Families of the World*, Heywood, V.H.; Brummitt, R.K.; Culham, A.; Seberg, O., Eds.; Firefly Books: Ontario, Canada, **2007**; p. 143.
6. Plowman, T.C.; Berry, P.E. Erythroxylaceae. In *Flora of the Venezuelan Guayana*, Steyermark, J.A.; Berry, P.E.; Holst, B.; Yatskievych, K., Eds.; Missouri Botanical Garden Press: St. Louis, USA, 1999; pp. 59–71.
7. Erythroxylaceae in Flora e Funga do Brasil.2024. Available online <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB111> (accessed on 01 February 2024).
8. Costa-Lima, J.L.; Chagas, E.C.O. Revisión taxonómica de *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) de Brasil. In *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, Proceedings of the XXXVIII Jornadas Argentinas de Botánica, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina, September **2021**; Sociedad Argentina de Botánica, 2021; *56* (Supl.), pp. 140–141. doi: [10.5281/zenodo.11324618](https://doi.org/10.5281/zenodo.11324618).
9. Cordeiro, L.S.; Araújo, F.S.D.; Koch, I.; Simões, A.O.; Martins, F.R.; Loiola, M.I.B. Paleodistribution of Neotropical Species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) in Humid and Dry Environments. *Acta Bot. Bras.* **2017**, *31*, 645–656, doi:10.1590/0102-33062017abb0053.
10. Costa-Lima, J.L.; Alves, M. A New Species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) from the Brazilian Atlantic Forest. *Phytotaxa* **2013**, *141*, 55–60, doi:10.11646/phytotaxa.141.1.4.
11. Costa-Lima, J.L.; Loiola, M.I.B.; Alves, M. A New Species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) from Northeastern Brazil. *Brittonia* **2014**, *66*, 60–64, doi:10.1007/s12228-013-9309-x.
12. Costa-Lima, J.L.; Loiola, M.I.B.; Jardim, J.G. *Erythroxylaceae* no Rio Grande do Norte, Brasil. *Rodriguésia* **2014**, *65*, 659–671. DOI: [10.1590/2175-7860201465306](https://doi.org/10.1590/2175-7860201465306).
13. Loiola, M.I.B. A New Species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) from the Brazilian Semiarid Region. *Phytotaxa* **2013**, *150*, 61, doi:10.11646/phytotaxa.150.1.5.
14. Loiola, M.I.B.; Cordeiro, L.S. *Erythroxylum Sobrleanum* (Erythroxylaceae): A New Species from Southeastern Brazil. *Phytotaxa* **2014**, *183*, 56, doi:10.11646/phytotaxa.183.1.7.
15. Costa-Lima, J.L.; Chagas, E.C.O. Two new species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) from the Espinhaço Range, Eastern Brazil. *Systematic Botany* **2020**, *45*(1), 96–101. doi: [10.1600/036364420X15801369352351](https://doi.org/10.1600/036364420X15801369352351).
16. Costa-Lima, J.L.D.; Chagas, E.C.D.O. *Erythroxylum Pyan* (Erythroxylaceae), a New Species from the Brazilian Semiarid Region. *Phytotaxa* **2018**, *383*, 225, doi:10.11646/phytotaxa.383.2.9.
17. Cordeiro, L.S.; Loiola, M.I.B. Flora do Ceará, Brasil: Erythroxylaceae. *Rodriguésia* **2018**, *69*, 881–903, doi:10.1590/2175-7860201869242.
18. Loiola, M.I.B.; Ferreira de Sales, M. Two New Species of *Erythroxylum* Sect. *Rhabdophyllum* (Erythroxylaceae) from North-Eastern Brazil. *Kew Bull* **2008**, *63*, 655–659, doi:10.1007/s12225-008-9077-z.
19. Loiola, M.I.B.; Agra, M.D.F.; Baracho, G.S.; Queiroz, R.T.D. Flora da Paraíba, Brasil: Erythroxylaceae Kunth. *Acta Bot. Bras.* **2007**, *21*, 473–487, doi:10.1590/S0102-33062007000200020.

20. IUCN. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version **2024-2**. Available online: <https://www.iucnredlist.org> (accessed on January 2025).
21. Pecl, G.T.; Araújo, M.B.; Bell, J.D.; Blanchard, J.; Bonebrake, T.C.; Chen, I.-C.; Clark, T.D.; Colwell, R.K.; Danielsen, F.; Evengård, B.; et al. Biodiversity Redistribution under Climate Change: Impacts on Ecosystems and Human Well-Being. *Science* **2017**, *355*, eaai9214, doi:10.1126/science.aai9214.
22. Ostad-Ali-Askar, K.; Su, R.; Liu, L. Water Resources and Climate Change. *Journal of Water and Climate Change* **2018**, *9*, 239, doi:10.2166/wcc.2018.999.
23. Almazroui, M.; Ashfaq, M.; Islam, M.N.; Rashid, I.U.; Kamil, S.; Abid, M.A.; O'Brien, E.; Ismail, M.; Reboita, M.S.; Sörensson, A.A.; et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Syst Environ* **2021**, *5*, 155–183, doi:10.1007/s41748-021-00233-6.
24. Salviano, M.F.; Groppo, J.D.; Pellegrino, G.Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Rev. bras. meteorol.* **2016**, *31*, 64–73, doi:10.1590/0102-778620150003.
25. Martins, E.S.P.R.; Coelho, C.A.S.; Haarsma, R.; Otto, F.E.L.; King, A.D.; Oldenborgh, G.J. van; Kew, S.; Philip, S.; Júnior, F.C.V.; Cullen, H. A Multimethod Attribution Analysis of the Prolonged Northeast Brazil Hydrometeorological Drought (2012–16). *Bulletin of the American Meteorological Society* **2018**, *99*, S65–S69, doi:10.1175/BAMS-D-17-0102.1.
26. IUCN – União Internacional para a Conservação da Natureza. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2020-1. Available online: <https://www.iucnredlist.org> (accessed on 19 July 2024).
27. Nic Lughadha, E.; Bachman, S.P.; Leão, T.C.C.; Forest, F.; Halley, J.M.; Moat, J.; Acedo, C.; Bacon, K.L.; Brewer, R.F.A.; Gâteblé, G.; et al. Extinction Risk and Threats to Plants and Fungi. *PLANTS, PEOPLE, PLANET* **2020**, *2*, 389–408, doi:10.1002/ppp3.10146.
28. Liu, D.; Yang, J.; Chen, S.; Sun, W. Potential Distribution of Threatened Maples in China under Climate Change: Implications for Conservation. *Global Ecology and Conservation* **2022**, *40*, e02337, doi:10.1016/j.gecco.2022.e02337.
29. Wardhaugh, C.W. The Spatial and Temporal Distributions of Arthropods in Forest Canopies: Uniting Disparate Patterns with Hypotheses for Specialisation. *Biological Reviews* **2014**, *89*, 1021–1041, doi:10.1111/brv.12094.
30. Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N.W.; Prentice, I.C. A Climate-Change Risk Analysis for World Ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2006**, *103*, 13116–13120, doi:10.1073/pnas.0601816103.
31. Heywood, V.H. Plant Conservation in the Anthropocene – Challenges and Future Prospects. *Plant Diversity* **2017**, *39*, 314–330, doi:10.1016/j.pld.2017.10.004.
32. Bingham, H.C.; Juffe Bignoli, D.; Lewis, E.; MacSharry, B.; Burgess, N.D.; Visconti, P.; Deguignet, M.; Misrachi, M.; Walpole, M.; Stewart, J.L.; et al. Sixty Years of Tracking Conservation Progress Using the World Database on Protected Areas. *Nat Ecol Evol* **2019**, *3*, 737–743, doi:10.1038/s41559-019-0869-3.
33. Silva, J.M.C. da; Barbosa, L.C.F.; Leal, I.R.; Tabarelli, M. The Caatinga: Understanding the Challenges. In *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*; Silva, J.M.C. da, Leal, I.R., Tabarelli, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 3–19 ISBN 978-3-319-68339-3.
34. Oliveira, A.P.C.; Bernard, E. The Financial Needs vs. the Realities of in Situ Conservation: An Analysis of Federal Funding for Protected Areas in Brazil's Caatinga. *Biotropica* **2017**, *49*, 745–752, doi:10.1111/btp.12456.
35. Silva, J.L.S. e; Cruz-Neto, O.; Peres, C.A.; Tabarelli, M.; Lopes, A.V. Climate Change Will Reduce Suitable Caatinga Dry Forest Habitat for Endemic Plants with Disproportionate Impacts on Specialized Reproductive Strategies. *PLOS ONE* **2019**, *14*, e0217028, doi:10.1371/journal.pone.0217028.
36. Vieira, R.R.S.; Pressey, R.L.; Loyola, R. The Residual Nature of Protected Areas in Brazil. *Biological Conservation* **2019**, *233*, 152–161, doi:10.1016/j.biocon.2019.02.010.
37. Cámara-Leret, R.; Raes, N.; Roehrdanz, P.; De Fretes, Y.; Heatubun, C.D.; Roebler, L.; Schuiteman, A.; Van Welzen, P.C.; Hannah, L. Climate change threatens New Guinea's biocultural heritage. *Science Advances* **2019**, *5*, eaaz1455. doi: [10.1126/sciadv.aaz1455](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1455).
38. Warren, R.; VanDerWal, J.; Price, J.; Welbergen, J.A.; Atkinson, I.; Ramirez-Villegas, J.; Osborn, T.J.; Jarvis, A.; Shoo, L.P.; Williams, S.E.; et al. Quantifying the Benefit of Early Climate Change Mitigation in Avoiding Biodiversity Loss. *Nature Clim Change* **2013**, *3*, 678–682, doi:10.1038/nclimate1887.

39. Gaisberger, H.; Fremout, T.; So, T.; Thammavong, B.; Bounithiphonh, C.; Hoa, T.T.; Yongqi, Z.; Kanchanarak, T.; Changtragoon, S.; Sreng, S.; et al. Range-Wide Priority Setting for the Conservation and Restoration of Asian Rosewood Species Accounting for Multiple Threats and Ecogeographic Diversity. *Biological Conservation* **2022**, *270*, 109560, doi:10.1016/j.biocon.2022.109560.
40. Yan, X.; Wang, S.; Duan, Y.; Han, J.; Huang, D.; Zhou, J. Current and Future Distribution of the Deciduous Shrub *Hydrangea Macrophylla* in China Estimated by MaxEnt. *Ecology and Evolution* **2021**, *11*, 16099–16112, doi:10.1002/ece3.8288.
41. Kougiumoutzis, K.; Kokkoris, I.P.; Panitsa, M.; Trigas, P.; Strid, A.; Dimopoulos, P. Plant Diversity Patterns and Conservation Implications under Climate-Change Scenarios in the Mediterranean: The Case of Crete (Aegean, Greece). *Diversity* **2020**, *12*, 270, doi:10.3390/d12070270.
42. Guisan, A.; Thuiller, W.; Zimmermann, N.E. *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*; Ecology, Biodiversity and Conservation; Cambridge University Press: Cambridge, 2017; ISBN 978-0-521-76513-8.
43. Cianfrani, C.; Broennimann, O.; Loy, A.; Guisan, A. More than Range Exposure: Global Otter Vulnerability to Climate Change. *Biological Conservation* **2018**, *221*, 103–113, doi:10.1016/j.biocon.2018.02.031.
44. Guisan, A.; Tingley, R.; Baumgartner, J.B.; Naujokaitis-Lewis, I.; Sutcliffe, P.R.; Tulloch, A.I.T.; Regan, T.J.; Brotons, L.; McDonald-Madden, E.; Mantyka-Pringle, C.; et al. Predicting Species Distributions for Conservation Decisions. *Ecology Letters* **2013**, *16*, 1424–1435, doi:10.1111/ele.12189.
45. Hussein, A.; Estifanos, S. Modeling Impacts of Climate Change on the Distribution of Invasive *Opuntia Ficus-Indica* (L.) Mill. in Ethiopia: Implications on Biodiversity Conservation. *Heliyon* **2023**, *9*, doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14927.
46. Urban, M.C. Accelerating Extinction Risk from Climate Change. *Science* **2015**, *348*, 571–573, doi:10.1126/science.aaa4984.
47. Garavito, N.T.; Newton, A.C.; Golicher, D.; Oldfield, S. The Relative Impact of Climate Change on the Extinction Risk of Tree Species in the Montane Tropical Andes. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0131388, doi:10.1371/journal.pone.0131388.
48. Elith, J.; Leathwick, J.R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **2009**, *40*, 677–697, doi:10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
49. McCune, J.L. Species Distribution Models Predict Rare Species Occurrences despite Significant Effects of Landscape Context. *Journal of Applied Ecology* **2016**, *53*, 1871–1879, doi:10.1111/1365-2664.12702.
50. West, A.M.; Kumar, S.; Brown, C.S.; Stohlgren, T.J.; Bromberg, J. Field Validation of an Invasive Species Maxent Model. *Ecological Informatics* **2016**, *36*, 126–134, doi:10.1016/j.ecoinf.2016.11.001.
51. Phillips, S.J.; Anderson, R.P.; Dudik, M.; Schapire, R.E.; Blair, M.E. Opening the Black Box: An Open-Source Release of Maxent. *Ecography* **2017**, *40*, 887–893, doi:10.1111/ecog.03049.
52. Le Lay, G.; Engler, R.; Franc, E.; Guisan, A. Prospective Sampling Based on Model Ensembles Improves the Detection of Rare Species. *Ecography* **2010**, *33*, 1015–1027, doi:10.1111/j.1600-0587.2010.06338.x.
53. Zhao, L.; Li, J.; Barrett, R.L.; Liu, B.; Hu, H.; Lu, L.; Chen, Z. Spatial Heterogeneity of Extinction Risk for Flowering Plants in China. *Nat Commun* **2024**, *15*, 6352, doi:10.1038/s41467-024-50704-3.
54. Robeck, P.; Essl, F.; van Kleunen, M.; Pyšek, P.; Pergl, J.; Weigelt, P.; Mesgaran, M.B. Invading Plants Remain Undetected in a Lag Phase While They Explore Suitable Climates. *Nat Ecol Evol* **2024**, *8*, 477–488, doi:10.1038/s41559-023-02313-4.
55. Hosseini, N.; Mostafavi, H.; Sadeghi, S.M.M. Impact of Climate Change on the Future Distribution of Three *Ferulago* Species in Iran Using the MaxEnt Model. *Integrated Environmental Assessment and Management* **2024**, *20*, 1046–1059, doi:10.1002/ieam.4898.

56. Gao, X.; Lin, F.; Li, M.; Mei, Y.; Li, Y.; Bai, Y.; He, X.; Zheng, Y. Prediction of the Potential Distribution of a Raspberry (*Rubus Idaeus*) in China Based on MaxEnt Model. *Sci Rep* **2024**, *14*, 1–11, doi:10.1038/s41598-024-75559-y.
57. Gaisberger, H.; Fremout, T.; So, T.; Thammavong, B.; Bounithiphonh, C.; Hoa, T.T.; Yongqi, Z.; Kanchanarak, T.; Changtragoon, S.; Sreng, S.; et al. Range-Wide Priority Setting for the Conservation and Restoration of Asian Rosewood Species Accounting for Multiple Threats and Ecogeographic Diversity. *Biological Conservation* **2022**, *270*, 109560, doi:10.1016/j.biocon.2022.109560.
58. Prado, D.E. The Caatingas of Brazil. In *Ecology and Conservation of the Caatinga*, Leal, I.R.; Tabarelli, M.; Silva, J.M.C., Eds.; Universidade Federal de Pernambuco: Recife, Brazil, **2003**; pp. 1–73.
59. Andrade-Lima, D. The Caatinga Dominion. *Revista Brasileira de Botânica* **1981**, *4*, 149–153.
60. Queiroz, L.P.D.; Cardoso, D.; Fernandes, M.F.; Moro, M.F. Diversity and Evolution of Flowering Plants of the Caatinga Domain. In *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*; Silva, J.M.C. da, Leal, I.R., Tabarelli, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 23–63, doi: org/10.1007/978-3-319-68339-3_2.
61. Andrade, E.M.; Aquino, D. do N.; Chaves, L.C.G.; Lopes, F.B. Water as Capital and Its Uses in the Caatinga. In *Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America*; Silva, J.M.C. da, Leal, I.R., Tabarelli, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 281–302, doi: org/10.1007/978-3-319-68339-3_10.
62. Fernandes, M.F.; Queiroz, L.P.D. Vegetação e flora da Caatinga. *Cienc. Cult.* **2018**, *70*, 51–56, doi:org/10.21800/2317-66602018000400014.
63. BFG- Brazilian Flora Group 2020: Leveraging the power of a collaborative scientific network. *TAXON*, *71*: 178–198. <https://doi.org/10.1002/tax.12640>.
64. Refflora. Herbário Virtual. Available online: <http://reflora.jbrj.gov.br/> (accessed on 24 July 2024).
65. SpeciesLink. Sistema de informação distribuído para coleções biológicas. Available online: <http://www.splink.cria.org.br/> (accessed on 24 October 2024).
66. RStudio Team. *RStudio: Integrated Development for R*; RStudio: Boston, MA, USA, 2024; Available online: <http://www.rstudio.com/> (accessed on 01 September 2024).
67. Wickham, H.; François, R.; Henry, L.; Müller, K. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*; R package version 1.1.4; 2023. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (accessed on 20 August 2024).
68. Google Earth Pro; Version 7.3.6; Google LLC: Mountain View, CA, USA, 2023; Available online: <https://www.google.com/earth/versions/> (accessed on 11 April 2024).
69. Phillips, S.J.; Dudík, M.; Schapire, R.E. *Maxent software for modeling species niches and distributions* (Version 3.4.4). Available online: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (accessed on 20 February 2025).
70. QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Available online: <http://qgis.osgeo.org> (accessed on 4 June 2024).
71. Bachman, S.; Moat, J.; Hill, A.; de la Torre, J.; Scott, B. Supporting Red List threat assessments with GeoCAT: geospatial conservation assessment tool. *ZooKeys* **2011**, *150*, 117–126. <https://doi.org/10.3897/zookeys.150.2109>.
72. Fick, S.E.; Hijmans, R.J. WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology* **2017**, *37*, 4302–4315, doi:10.1002/joc.5086.
73. Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc) *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; 1st ed.; Cambridge University Press, 2023; ISBN 978-1-009-15789-6.
74. Lee, D.H.; Park, C.Y.; Kim, J.H.; Kim, H.M.; Byeon, J.G.; Park, W.G.; Hong, S.H.; Na, C.S. Seed Conservation Methods According to the Prediction of Suitable Distribution of Endangered Conifer *Abies Nephrolepis* Maxim. *Forests* **2024**, *15*, 1067, doi:10.3390/f15061067.
75. Naimi, B.; Araújo, M.B. Sdm: A Reproducible and Extensible R Platform for Species Distribution Modelling. *Ecography* **2016**, *39*, 368–375, doi:10.1111/ecog.01881.
76. Hijmans, R.J.; Phillips, S.; Leathwick, J.; Elith, J. *dismo: Species Distribution Modeling*; R package version 1.3-14; 2023. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=dismo> (accessed on 02 September 2024).

77. Mathur, M.; Mathur, P. Habitat Suitability of *Opuntia Ficus-Indica* (L.) MILL. (CACTACEAE): A Comparative Temporal Evaluation Using Diverse Bio-Climatic Earth System Models and Ensemble Machine Learning Approach. *Environ Monit Assess* **2024**, *196*, 232, doi:10.1007/s10661-024-12406-7.
78. Jinga, P.; Liao, Z.; Nobis, M.P. Species Distribution Modeling That Overlooks Intraspecific Variation Is Inadequate for Proper Conservation of *Marula* (*Sclerocarya Birrea*, Anacardiaceae). *Global Ecology and Conservation* **2021**, *32*, e01908, doi:10.1016/j.gecco.2021.e01908.
79. Phillips, S.J.; Anderson, R.P.; Schapire, R.E. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological Modelling* **2006**, *190*, 231–259, doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
80. Bai, J.; Wang, H.; Hu, Y. Prediction of Potential Suitable Distribution of *Liriodendron Chinense* (Hemsl.) Sarg. in China Based on Future Climate Change Using the Optimized MaxEnt Model. *Forests* **2024**, *15*, 988, doi:10.3390/f15060988.
81. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).** *Limites oficiais de Unidades de Conservação Federais*. Available online: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/limites-oficiais-de-unidades-de-conservacao-federais> (accessed on 11 October 2024).
82. Zar, J.H. *Biostatistical Analysis*, 5th ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2010.
83. Dawson, T.P.; Jackson, S.T.; House, J.I.; Prentice, I.C.; Mace, G.M. Beyond Predictions: Biodiversity Conservation in a Changing Climate. *Science* **2011**, *332*, 53–58, doi:10.1126/science.1200303.
84. Rodríguez Flores, Z.E.; Moredia Rosete, Y.; Ruiz Valencia, J.A.; Fernández Pavía, Y.L. Prediction of Environmentally Suitable Areas for *Zephyranthes* (Amaryllidaceae) in Mexico. *Ecologies* **2024**, *5*, 571–584. <https://doi.org/10.3390/ecologies5040034>.
85. Allen, C.D.; Breshears, D.D. Climate-Induced Forest Dieback as an Emergent Global Phenomenon. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **2007**, *88*, 504–504, doi:10.1029/2007EO470008.
86. Marengo, J.A. *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*, 2nd ed.; Ministério do Meio Ambiente (MMA): Brasília, Brazil, 2007; pp. 1–212.
87. Nascimento, R.D.S.; Borges, V.P.; Melo, D.D.C.D. Implications of Climate Change on Water Availability in a Seasonally Dry Tropical Forest in the Northeast of Brazil. *Rev. Ceres* **2023**, *70*, 1–11, doi:10.1590/0034-737x202370030001
88. Albuquerque, U.P.; de Lima Araújo, E.; El-Deir, A.C.A.; de Lima, A.L.A.; Souto, A.; Bezerra, B.M.; Ferraz, E.M.N.; Maria Xavier Freire, E.; Sampaio, E.V. de S.B.; Las-Casas, F.M.G.; et al. Caatinga Revisited: Ecology and Conservation of an Important Seasonal Dry Forest. *The Scientific World Journal* **2012**, *2012*, 205182, doi:10.1100/2012/205182.
89. Ortega, G.; Arias, P.A.; Villegas, J.C.; Marquet, P.A.; Nobre, P. Present-Day and Future Climate over Central and South America According to CMIP5/CMIP6 Models. *International Journal of Climatology* **2021**, *41*, 6713–6735, doi:10.1002/joc.7221.
90. Thaler, V.; Loikith, P.C.; Mechoso, C.R.; Pampuch, L.A. A Multivariate Assessment of Climate Change Projections over South America Using the Fifth Phase of the Coupled Model Intercomparison Project. *International Journal of Climatology* **2021**, *41*, 4265–4282, doi:10.1002/joc.7072.
91. Sena, A.C.T.; Magnusdottir, G. Projected End-of-Century Changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble. *Journal of Climate* **2020**, *33*, 7859–7874, doi:10.1175/JCLI-D-19-0645.1.
92. Gusain, S.; Joshi, S.; Joshi, R. Sensing, Signalling, and Regulatory Mechanism of Cold-Stress Tolerance in Plants. *Plant Physiology and Biochemistry* **2023**, *197*, 107646, doi:10.1016/j.plaphy.2023.107646.
93. Allakhverdiev, S.I.; Kreslavski, V.D.; Klimov, V.V.; Los, D.A.; Carpentier, R.; Mohanty, P. Heat Stress: An Overview of Molecular Responses in Photosynthesis. *Photosynth Res* **2008**, *98*, 541–550, doi:10.1007/s11120-008-9331-0.
94. O'Neill, B.C.; Tebaldi, C.; van Vuuren, D.P.; Eyring, V.; Friedlingstein, P.; Hurtt, G.; Knutti, R.; Kriegler, E.; Lamarque, J.-F.; Lowe, J.; et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* **2016**, *9*, 3461–3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016.
95. Mendonça, F.; Danni-Oliveira, I.M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*; 1st ed.; Oficina de Textos: São Paulo, Brazil, 2019; pp. 1–208.

96. Bitencourt, C.; Rapini, A.; Santos Damascena, L.; De Marco Junior, P. The Worrying Future of the Endemic Flora of a Tropical Mountain Range under Climate Change. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* **2016**, *218*, 1–10, doi:10.1016/j.flora.2015.11.001.
97. Pereira, H.M.; Leadley, P.W.; Proença, V.; Alkemade, R.; Scharlemann, J.P.W.; Fernandez-Manjarrés, J.F.; Araújo, M.B.; Balvanera, P.; Biggs, R.; Cheung, W.W.L.; et al. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. *Science* **2010**, *330*, 1496–1501, doi:10.1126/science.1196624.
98. Williams, J.W.; Jackson, S.T. Novel Climates, No-Analog Communities, and Ecological Surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* **2007**, *5*, 475–482, doi:10.1890/070037.
99. Botanic Gardens Conservation International (BGCI); IUCN SSC Global Tree Specialist Group. *Erythroxylum caatingae*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019, e.T149215450A149215452. Available online: [https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T149215450A149215452.en] (accessed on 01 February 2025).
100. Botanic Gardens Conservation International (BGCI); IUCN SSC Global Tree Specialist Group. *Erythroxylum pungens*. The IUCN Red List of Threatened Species 2019, e.T149207484A149207486. Available online: [https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-2.RLTS.T149207484A149207486.en] (accessed on 01 February 2025).
101. Plowman, T.C. Ten new species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae) from Bahia, Brazil. *Fieldiana, Botany* **1987**, *19*, 1–41.
102. Plowman, T.C.; Hensold, N. Names, types, and distribution of neotropical species of *Erythroxylum* (Erythroxylaceae). *Brittonia* **2004**, *56*(1), 1–53.
103. Teixeira, L.P.; Lughadha, E.N.; Silva, M.V.C.D.; Moro, M.F. How Much of the Caatinga Is Legally Protected? An Analysis of Temporal and Geographical Coverage of Protected Areas in the Brazilian Semiarid Region. *Acta Bot. Bras.* **2021**, *35*, 473–485, doi:10.1590/0102-33062020abb0492.
104. Marinho, F.P.; Mazzochini, G.G.; Manhães, A.P.; Weisser, W.W.; Ganade, G. Effects of Past and Present Land Use on Vegetation Cover and Regeneration in a Tropical Dryland Forest. *Journal of Arid Environments* **2016**, *132*, 26–33, doi:10.1016/j.jaridenv.2016.04.006.
105. Barbosa, T.A.; Filho, R.R.G. Biodiversidade e conservação da Caatinga: revisão sistemática. *Journal of Environmental Analysis and Progress* **2022**, *7*, 177–189, doi:10.24221/jeap.7.4.2022.5228.177-189.
106. Silva, J.L.S.; Barros, M.F.; Rito, K.F.; Cruz-Neto, O.; Tabarelli, M.; Leal, I.R.; Albuquerque, U.P.; Wirth, R.; Lopes, A.V. Use of Woody Species in the Caatinga Dry Forest May Lead to Higher Vulnerability to Extirpation: An Assessment Based on Ethnobiological, Reproductive and Conservation Criteria. *Flora* **2024**, *317*, 152568, doi:10.1016/j.flora.2024.152568.
107. Neri, M.; Jameli, D.; Bernard, E.; Melo, F.P.L. Green versus Green? Adverting Potential Conflicts between Wind Power Generation and Biodiversity Conservation in Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation* **2019**, *17*, 131–135, doi:10.1016/j.pecon.2019.08.004.
108. DRYFLOR et al. Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science* **2016**, *353*, 1383–1387. doi :https://doi.org/10.1126/science.aaf5080.
109. Beuchle, R.; Grecchi, R.C.; Shimabukuro, Y.E.; Seliger, R.; Eva, H.D.; Sano, E.; Achard, F. Land Cover Changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga Biomes from 1990 to 2010 Based on a Systematic Remote Sensing Sampling Approach. *Applied Geography* **2015**, *58*, 116–127, doi:10.1016/j.apgeog.
110. Giulietti, A.M.; Menezes, N.L.; Pirani, J.R.; Meguro, M.; Wanderley, M.G.L. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: caracterização e lista das espécies. *Boletim de Botânica* **1987**, *9*, 1–151.
111. Harley, R.M. Flora of the Pico das Almas, Chapada Diamantina–Bahia, Brazil; *Kew, UK*, **1995**; 77–100.
112. Zappi, D.C.; Lucas, E.; Stannard, B.L.; Lughada, E.N.; Pirani, J.R.; Queiroz, L.P.; Atkins, S.; Hind, D.J.N.; Giulietti, A.M.; Harley, R.M.; Carvalho, A.M. Lista das plantas vasculares de Catolés, Chapada Diamantina, Bahia. *Boletim de Botânica* **2003**, *21*, 345–398.
113. Lessa, L.G.; Costa, B.M.A.; Rossoni, D.M.; Tavares, V.C.; Dias, L.G.; Moraes Júnior, E.A.; Silva, J.A. Mamíferos da Cadeia do Espinhaço: riqueza, ameaças e estratégias para conservação. In Megadiversidade, Silva, J.M.C., Ed.; *Conservação Internacional Brasil*: Belo Horizonte, MG, Brasil, 2008; *1*, 218–132.

114. Oliveira, G.F.; Lauer Garcia, A.C.; Montes, M.A.; De Araújo Jucá, J.C.L.; Da Silva Valente, V.L.; Rohde, C. Are Conservation Units in the Caatinga Biome, Brazil, Efficient in the Protection of Biodiversity? An Analysis Based on the Drosophilid Fauna. *Journal for Nature Conservation* **2016**, *34*, 145–150, doi:10.1016/j.jnc.2016.10.006.
115. Teixeira, L.P.; Lughadha, E.N.; Silva, M.V.C.D.; Moro, M.F. How Much of the Caatinga Is Legally Protected? An Analysis of Temporal and Geographical Coverage of Protected Areas in the Brazilian Semiarid Region. *Acta Bot. Bras.* **2021**, *35*, 473–485, doi:10.1590/0102-33062020abb0492.