

**PADRÕES DA VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA: INSIGHTS  
PARA FLORESTAS ESTACIONAIS EM UM HOTSPOT DE  
BIODIVERSIDADE NO SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA**

**LEANDRO JOSÉ DA SILVA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO – 2024

**PADRÕES DA VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA: INSIGHTS  
PARA FLORESTAS ESTACIONAIS EM UM HOTSPOT DE  
BIODIVERSIDADE NO SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA**

**LEANDRO JOSÉ DA SILVA**

Tese apresentada ao Centro de Biociências e Biotecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais.

**Orientador: Prof. Dr. Marcelo Trindade Nascimento**

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

**Coorientador: Prof. Dr. Pedro Vasconcellos Eisenlohr**

Universidade do Estado de Mato Grosso Carlos Alberto Reyes Maldonado

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO – 2024

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S586

Silva, Leandro José da.

Padrões da variação na composição florística : insights para florestas estacionais em um hotspot de biodiversidade no sudeste da Mata Atlântica brasileira / Leandro José da Silva. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

130 f. : il.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2024.

Orientador: Marcelo Trindade Nascimento.

1. Fitogeografia. 2. Preditores Ambientais. 3. Ambiente Espacialmente Estruturado. 4. Adequabilidade Ambiental. 5. Modelagem de Nicho Ecológico. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 577

# PADRÕES DA VARIAÇÃO NA COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA: INSIGHTS PARA FLORESTAS ESTACIONAIS EM UM HOTSPOT DE BIODIVERSIDADE NO SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA

**LEANDRO JOSÉ DA SILVA**

Tese apresentada ao Centro de Biociências e Biotecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ecologia e Recursos Naturais.

Aprovada em 08 de março de 2024

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **PABLO JOSE FRANCISCO PENA RODRIGUES**  
Data: 04/06/2024 10:18:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Pablo José F. Pena Rodrigues (Doutor, Biociências e Biotecnologia) - JBRJ

Documento assinado digitalmente  
 **CLAUDIO BELMONTE DE ATHAYDE BOHRER**  
Data: 03/06/2024 12:02:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Cláudio Belmonte de Athayde Bohrer (Doutor, Geografia) - UFF

Documento assinado digitalmente  
 **ANGELA PIERRE VITORIA**  
Data: 30/05/2024 12:04:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Angela Pierre Vitória (Doutora, Biologia Vegetal) - UENF

Documento assinado digitalmente  
 **MARCELO TRINDADE NASCIMENTO**  
Data: 29/05/2024 15:38:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Marcelo Trindade Nascimento (Doutor, Ecologia) - UENF - Orientador

*♪... Oh, take your time, don't live too fast*

*Troubles will come and they will pass ...*

*Simple Man*

## DEDICATÓRIA

*À Katia e Helena*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder forças em todos os momentos da vida.

À minha amada família, em particular à minha esposa, Katia Schmitt, e à minha filha, Helena Schmitt da Silva, bem como aos meus pais, Izabel e Joel. Agradeço por serem a base sólida que sustenta minha vida. Seja nos momentos de dificuldades ou nas vitórias, a presença de vocês dá mais sentido a cada jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Trindade Nascimento, obrigado por aceitar o desafio de ser meu orientador. Agradeço imensamente por compartilhar seu conhecimento, por suas cobranças e compreensão ao longo de todo o processo, e por todas as suas contribuições não só para minha formação profissional, mas também para meu crescimento pessoal. Muito obrigado pela generosidade e parceria ao longo desta jornada.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Pedro Vasconcellos Eisenlohr, agradeço imensamente por todo o ensinamento que começou na minha iniciação científica.

A todos os professores da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), agradeço por todos os ensinamentos.

À equipe do Laboratório de Ecologia da UNEMAT, em especial João Carlos, Islândia, Loana, e à professora Mônica. Agradeço pela colaboração e dedicação de todos.

Aos meus amigos do LCA, principalmente aqueles da equipe Ecoveg, Bianca, Igor, Mariana, Patrícia, Nilson, Gabriel, Carol, Roberto, Izabela, Flávia, Vitor e a equipe de campo (Herick, João Mário e Anatoly).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo, pela bolsa de doutorado

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	XI
RESUMO.....	XIV
ABSTRACT .....	XVI
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	3
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	6
CAPÍTULO 1 .....	8
RESUMO.....	10
ABSTRACT .....	11
1. INTRODUÇÃO .....	12
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
<b>3.1 PRINCIPAIS FATORES AMBIENTAIS QUE INFLUENCIAM A VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA NA MATA ATLÂNTICA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 FATORES PURAMENTE ESPACIAIS ATUANDO NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 INTERAÇÃO ENTRE FATORES AMBIENTAIS E ESPACIAIS NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA.....</b>	<b>19</b>
<b>3.4 FRAÇÃO NÃO EXPLICADA NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA .....</b>	<b>21</b>
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24
CAPÍTULO 2 .....	31
RESUMO.....	32
ABSTRACT .....	33
1. INTRODUÇÃO .....	34
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	35
<b>2.1 ÁREA DE ESTUDO, BASE DE DADOS E VARIÁVEIS AMBIENTAIS.....</b>	<b>36</b>

<b>2.2</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS</b>	<b>38</b>
2.2.1	<i>Análise de Agrupamento</i>	38
2.2.2	<i>Análise de Espécies Indicadoras</i>	40
2.2.3	<i>Análise de Redundância e Partição da Variação Florística</i>	40
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>GRUPOS FLORÍSTICOS</b>	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>ESPÉCIES INDICADORAS</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>VARIAÇÃO FLORÍSTICA E SEUS DETERMINANTES</b>	<b>53</b>
<b>4.</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>GRUPOS FLORÍSTICOS</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>DETERMINANTES DA VARIAÇÃO FLORÍSTICA</b>	<b>58</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>61</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>63</b>
	<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>69</b>
	<b>RESUMO</b>	<b>70</b>
	<b>ABSTRACT</b>	<b>71</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>72</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>74</b>
<b>2.1</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>74</b>
<b>2.2</b>	<b>BANCO DE DADOS</b>	<b>75</b>
2.2.1	<i>Obtenção dos Registros de Ocorrência</i>	76
2.2.2	<i>Seleção e Composição dos Preditores Ambientais</i>	79
<b>2.3</b>	<b>MODELOS DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL</b>	<b>82</b>
2.3.1	<i>Construção dos modelos</i>	82
2.3.2	<i>Avaliação dos modelos</i>	82
2.3.3	<i>Mapas de consenso</i>	83
<b>2.4</b>	<b>LACUNAS DE CONSERVAÇÃO E EFICIÊNCIA DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO</b>	<b>83</b>
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>86</b>
<b>3.1</b>	<b>ESPÉCIES VULNERÁVEIS E PERDA DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL</b>	<b>86</b>

<b>3.2</b>	<b>IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ÁREA DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL DAS ESPÉCIES ARBÓREAS INDICADORAS DAS FALHA ESTACIONAIS DA FALHA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES .....</b>	<b>92</b>
<b>3.3</b>	<b>EFICÁCIA DA REDE DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA FALHA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES DM FACE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....</b>	<b>103</b>
4.	CONCLUSÃO .....	107
5.	REFERÊNCIAS .....	109
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
	MATERIAL SUPLEMENTAR.....	122

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 1

Tabela 1. Combinações de palavras-chave para pesquisar literaturas revisadas por pares em bases de dados. .... 14

Tabela 2. Tipo de busca e nome dos autores selecionados para análise completa sobre os determinantes da variação da flora arbórea da Mata Atlântica..... 15

### Capítulo 2

Tabela 1. Conjunto de variáveis ambientais obtidas para 134 sítios no sudeste da Mata Atlântica brasileira. ....37

Tabela 2. Matrizes de Ponderação Espacial (SWM) candidatas para seleção de variáveis espaciais a partir do método de seleção progressiva (Blanchet et al. 2008).....41

Tabela 3. Análise de agrupamento K-means aplicada à composição de espécies arbóreas em 134 sítios no sudeste da Mata Atlântica brasileira. São mostrados os códigos dos sítios, os tipos principais e específicos de vegetação e a altitude média que compõem cada cluster. ....47

Tabela 4. A = Espécies indicadoras do cluster 4, formado por sítios de espécies arbóreas da Falha de Campos dos Goytacazes e sítios da região norte do Espírito Santo. B = Espécies indicadoras somente da Falha de Campos (sítios do norte do Espírito Santo foram removidos). Stat = média da componente especificidade com a fidelidade. P valores com níveis de significância = 5%. ....49

Tabela 5. Conjunto de variáveis preditoras selecionadas pelo procedimento de seleção progressiva.....53

Tabela 6. Correlação entre conjuntos de variáveis ambientais e espaciais com eixos canônicos da Análise Canônica de Redundância (RDA). Em negrito, as variáveis que apresentaram maiores coeficientes de correlação com os eixos canônicos. ....54

### Capítulo 3

Tabela 1. Registros de Ocorrência e Status de Conservação das Espécies arbóreas indicadoras das Floresta Estacionais Semidecíduas da Falha de Campos dos Goytacazes, utilizadas na modelagem de adequabilidade ambiental. NE = Não Avaliado, LC = Menos Preocupante, NT = Quase Ameaçada, VU = Vulnerável, EN = Em Perigo, CR = Criticamente em Perigo.....77

Tabela 2. Conjunto de 29 variáveis preditoras usadas na construção dos modelos de adequabilidade ambiental de espécies indicadoras da falha de Campos dos Goytacazes. ....79

Tabela 3. Valores de TSS e Threshold para Modelos de Adequabilidade Ambiental de 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, com Projeções para o período de 2061-2080 em toda a região neotropical. Inclui Números de Pixels de Presença e Ausência para os Cenários Atual e Futuro, além do Percentual de Perda (representados pelos valores negativos) e Ganho (valores positivos) de Área de Adequabilidade.....84

Tabela 4. Número de Pixels de Presença e Ausência para os Cenários Atual e Futuro dos Modelos de Adequabilidade Ambiental de 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, com Projeções para o período de 2061-2080. O Percentual de Perda (representados pelos valores negativos) e Ganho (valores positivos) de Área de Adequabilidade é referente aos pixels dentro da área de estudo (limites das bacias hidrográfica Paraíba do Sul e as sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo). ....92

## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 1. Distribuição dos 134 sítios e delimitação das bacias hidrográficas no sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor) .....36

Figura 2. Números de clusters candidatos selecionados com base nos valores de R Anosim (Análise de Similaridade) (a) e índice Calinski-Harabasz (b) na análise de agrupamento k-means de 134 sítios de espécies arbóreas na região sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor). .....43

Figura 3. Agrupamentos e distribuição geográfica dos 134 sítios de espécies arbóreas de parte da Região Sudeste do Brasil. (Fonte: Elaborada pelo autor). .....44

Figura 4. Dissimilaridade de Simpson entre os clusters formados pela análise de agrupamento k-means de 134 sítios de espécies arbóreas de parte da Região Sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor) .....45

Figura 5. Diagrama da tb-RDA para 134 sítios de espécies arbóreas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....54

### Capítulo 3

Figura 1 Área de estudo delimitada pelas bacias Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Litorâneas do Espírito Santo. Em destaque a área delimitadas para a Falha de Campos dos Goytacazes no sul do Espírito Santo e no norte-noroeste do Rio de Janeiro. (Fonte: Elaborada pelo autor). .....75

Figura 2. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Myroxylon peruiferum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B). (Fonte: Elaborada pelo autor).....87

Figura 3. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Myroxylon peruiferum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor). .....89

Figura 4. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Balfourodendron riedelianum</i> (pau-marfim) para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B). (Fonte: Elaborada pelo autor).....	90
Figura 5. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Balfourodendron riedelianum</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	91
Figura 6. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Erythroxylum passerinum</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	95
Figura 7. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Coccoloba alnifolia</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	96
Figura 8. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Zygia latifolia</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	97
Figura 9. Mapa de Consenso da Adequabilidade Ambiental para 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes no Clima Atual, delimitado pela bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Inclui a sobreposição das unidades de conservação, como a Estação Ecológica Estadual Guaxindiba (EEEG) e o Parque Estadua do Desengano (PED). As cores mais quentes indicam Alta Adequabilidade Ambiental, enquanto as mais frias representam Baixa Adequabilidade Ambiental. (Fonte: Elaborada pelo autor). ....	98
Figura 10. Mapa de Consenso da Adequabilidade Ambiental para 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes no cenário futuro (SSP5-8.5), delimitado pela bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Inclui a sobreposição das unidades de conservação, como a Estação Ecológica Estadual Guaxindiba (EEEG) e o Parque Estadual do Desengano (PED). As cores mais quentes indicam Alta Adequabilidade Ambiental, enquanto as mais frias representam Baixa Adequabilidade Ambiental. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	99

Figura 11. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Acanthocladus pulcherrimus</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	101
Figura 12. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Crateva tapia</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	101
Figura 13. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de <i>Amburana cearensis</i> para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).....	102
Figura 14. Representação das unidades de conservação localizadas na Falha de Campos dos Goytacazes, com sobreposição da Área de Alta Adequabilidade Ambiental para 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da região, considerando as condições climáticas atuais. ....	104
Figura 15. Representação das unidades de conservação localizadas na Falha de Campos dos Goytacazes, com sobreposição da Área de Alta Adequabilidade Ambiental para 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da região, considerando as projeções climáticas futuras. ....	104
Figura 16. Áreas de Alta Adequabilidade indicadas para implantação de Unidades de Conservação para preservação das espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes em resposta às mudanças climáticas futuras. ....	106

## RESUMO

Esta tese busca contribuir para a compreensão da complexidade ecológica do componente arbóreo da Mata Atlântica, com foco nas Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes (FES-FCG). Nessa região, as Florestas Ombrófilas (FO) são substituídas pelas Florestas Estacionais Semidecíduas (FES), que se estendem até a costa atlântica. O objetivo central desta tese é compreender as relações florísticas das FES-FCG com as florestas vizinhas, além de abordar os desafios que essas florestas enfrentarão diante das mudanças climáticas. Os resultados obtidos não apenas contribuem para um melhor entendimento da ecologia complexa da Falha de Campos, mas também fornecem uma nova perspectiva para a gestão e conservação dessa importante região da Mata Atlântica. O Capítulo 1 desta pesquisa visa traçar o estado atual da arte sobre os determinantes da variação florística, considerando toda a extensão da Mata Atlântica por meio de uma revisão abrangente da literatura. Os resultados indicam que a distribuição das espécies arbóreas na Mata Atlântica é influenciada por fatores ambientais e espaciais, como clima, topografia, solo e processos de dispersão e uso da terra. Além disso, observa-se que ainda há uma parte significativa da variação na composição de espécies sem explicação, possivelmente devido a fatores não identificados ou mal compreendidos. Nos Capítulos 2 e 3, a atenção se volta para a Falha de Campos dos Goytacazes. O Capítulo 2 explora a variação na composição arbórea das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes em comparação com as florestas adjacentes e investiga os principais determinantes dessa variação. A partir de 2096 espécies distribuídas em 134 sítios ao longo da Bacia Hidrográfica Paraíba do Sul e Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo, os resultados indicam que as FES-FCG formam um grupo florístico distinto em relação às florestas vizinhas. No entanto, observa-se uma forte conexão florística entre as Florestas Estacionais da Falha de Campos e as Florestas Estacionais Semidecíduas a Perenifólias do norte do Espírito Santo. Além disso, os resultados mostram que, apesar de serem grupos distintos, as FES-FCG são mais similares em composição de espécies às Florestas Ombrófilas vizinhas do que às Florestas Estacionais das regiões adjacentes. As análises revelam que a variação florística é influenciada por fatores ambientais, espaciais e pela interação entre eles, destacando-se o pH do solo e o conteúdo de argila como importantes preditores

ambientais. O Capítulo 3 aborda os desafios que 44 espécies arbóreas indicadoras das FES-FCG enfrentarão devido às alterações climáticas globais prevista para o período de 2070-2080. Por meio de algoritmos avançados, este capítulo projeta o impacto das mudanças climáticas na adequabilidade ambiental das espécies, destacando que haverá alterações, com 30 espécies perdendo mais de 50% de sua área de adequabilidade ambiental, enquanto outras 14 espécies ganharão mais de 50%. Os resultados também sugerem que as poucas unidades de conservação existentes na Falha de Campos dos Goytacazes estão bem localizadas para proteger as áreas de alta adequabilidade ambiental das espécies, mas é evidente a necessidade de criação de novas unidades de conservação, principalmente em áreas estáveis climaticamente, como nas áreas mais próximas ao oceano.

**Palavras-Chave:** Fitogeografia; Preditores Ambientais; Ambiente Espacialmente Estruturado; Adequabilidade Ambiental; Modelagem de Nicho Ecológico.

## ABSTRACT

This thesis seeks to contribute to the understanding of the ecological complexity of the arboreal component of the Atlantic Forest, focusing on the Campos dos Goytacazes Gap Seasonal Forests (FES-FCG). In this region, the Ombrophylous Forests (FO) are replaced by the Semideciduous Seasonal Forests (FES), which extend to the Atlantic coast. The central objective of this thesis is to understand the floristic relationships between FES-FCG and neighboring forests, in addition to addressing the challenges that these forests will face in the face of climate change. The results obtained not only contribute to a better understanding of the complex ecology of the Campos Gap, but also provide a new perspective for the management and conservation of this important region of the Atlantic Forest. Chapter 1 of this research aims to outline the current state of the art on the determinants of floristic variation, considering the entire extent of the Atlantic Forest through a comprehensive literature review. The results indicate that the distribution of tree species in the Atlantic Forest is influenced by environmental and spatial factors, such as climate, topography, soil and processes of dispersal and land use. Furthermore, it is observed that there is still a significant part of the variation in species composition unexplained, possibly due to unidentified or poorly understood factors. In Chapters 2 and 3, attention turns to the Campos dos Goytacazes Gap. Chapter 2 explores the variation in tree composition of the Campos dos Goytacazes Gap Seasonal Forests compared to adjacent forests and investigates the main determinants of this variation. From 2096 species distributed in 134 sites along the Paraíba do Sul Hydrographic Basin and Coastal areas of Rio de Janeiro and Espírito Santo, the results indicate that the FES-FCG form a distinct floristic group in relation to the neighboring forests. However, a strong floristic connection is observed between the Campos dos Goytacazes Gap Seasonal Forests and the Semideciduous to Evergreen Seasonal Forests of northern Espírito Santo. Furthermore, the results show that, despite being distinct groups, the FES-FCG are more similar in species composition to neighboring Ombrophylous Forests than to Seasonal Forests in adjacent regions. The analyzes reveal that floristic variation is influenced by environmental and spatial factors and the interaction between them, highlighting soil pH and clay content as important environmental predictors. Chapter 3 addresses the challenges that 44 FES-FCG indicator tree species will face due to global climate change

predicted for the period 2070-2080. Using advanced algorithms, this chapter projects the impact of climate change on the environmental suitability of species, highlighting that there will be changes, with 30 species losing more than 50% of their area of environmental suitability, while another 14 species will gain more than 50%. The results also suggest that the few existing conservation units in the Campos dos Goytacazes Gap are well located to protect areas of high environmental suitability for the species, but the need to create new conservation units is evident, mainly in climatically stable areas, as in areas closest to the ocean.

**Keywords:** Phytogeography; Environmental Predictors; Spatially Structured Environment; Environmental Suitability; Ecological Niche Modeling.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A Mata Atlântica é uma das florestas mais ricas em diversidade de espécies e também uma das mais ameaçadas do planeta, restando apenas entre 11% e 28% de sua cobertura vegetal original (RIBEIRO et al. 2009; REZENDE et al. 2018). Ao longo de 500 anos, o histórico de degradação resultou na predominância de pequenos fragmentos, frequentemente inferiores a 50 ha, isolados entre si e compostos principalmente por florestas secundárias (RIBEIRO et al., 2009; RIBEIRO et al., 2011). Esses fragmentos encontram-se cercados por uma matriz de pastagens e áreas agrícolas (SCARANO; CEOTTO, 2015). Os poucos fragmentos grandes existem em áreas onde a topografia dificulta a ocupação antrópica (SILVA et al., 2007). Apesar do cenário adverso, a Mata Atlântica abriga aproximadamente 2.500 vertebrados e 20 mil espécies de plantas, muitas das quais exibem um alto grau de endemismo (SOUZA; BUENO; SALINO, 2021). Este bioma, marcado por eventos de degradação ao longo do tempo, é considerado um dos ecossistemas mais ameaçados do mundo, sendo reconhecido como um dos principais *hotspots* de biodiversidade prioritários para a conservação global (MYERS et al., 2000; MITTERMEIER et al., 2004).

O território ocupado pela Mata Atlântica estende-se ao longo da costa brasileira, nordeste da Argentina e leste do Paraguai (MARQUES et al., 2021). Este ecossistema diversificado compreende diferentes tipos de vegetação, tais como a Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista com Araucária, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decídua e Florestas de Planície Costeira, também conhecidas como restingas (IBGE, 2012). A manutenção da riqueza biológica dessa região está intrinsecamente ligada a fatores ambientais e antrópicos que moldam a composição florística dessas diversas fitofisionomias (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Uma questão central em ecologia tem sido compreender esses processos que determinam a distribuição geográfica das espécies e a formação de comunidades biológicas (GASTON, 2000). Perguntas sobre os principais determinantes da riqueza, distribuição e coexistência de espécies têm intrigado os pesquisadores por mais de um século (WALLACE, 1878).

No contexto da Mata Atlântica, diversos estudos em diferentes escalas têm proporcionado importantes contribuições acerca dos determinantes da variação florística (JOSÉ-SILVA; NASCIMENTO, 2024). A busca por respostas a essas perguntas tornou-se cada vez mais necessária para antecipar e mitigar os prováveis efeitos das mudanças ambientais globais na biodiversidade e no funcionamento dos ecossistemas (ZWIENER et al., 2018). Um local específico que demanda estudos sobre a resposta das espécies às mudanças ambientais, sejam elas provenientes do uso do solo ou das alterações climáticas, é a região da Falha de Campos dos Goytacazes. Esta região, situada no sudeste da Mata Atlântica, no norte e noroeste fluminense, é um ponto de interesse devido à sua singularidade. Apesar de importantes trabalhos já terem sido realizados na região sudeste da Mata Atlântica (veja, OLIVEIRA-FILHO; Fontes, 2000), ainda existem lacunas que precisam ser preenchidas para um entendimento mais detalhado da diversa e complexa região da Falha de Campos dos Goytacazes.

Parte dessas lacunas consiste em compreender as relações florísticas entre a vegetação estacional semidecidual da Falha de Campos e suas vizinhas estacionais e ombrófilas, bem como os fatores que moldam sua distribuição. Além disso, em uma época de intensificação das mudanças climáticas, é fundamental investigar se as espécies que compõem a Falha de Campos já atingiram seus limites de adequabilidade climática ao enfrentar os filtros ambientais específicos da região. Também é essencial entender o impacto das mudanças climáticas na distribuição dessas espécies. A compreensão desses aspectos é de extrema relevância para o manejo e conservação desses ecossistemas, especialmente por se tratar de um ambiente com histórico de crescente degradação e ameaças à biodiversidade (NASCIMENTO; LIMA, 2008; RIBEIRO et al., 2009).

A Falha de Campos dos Goytacazes é uma área caracterizada por uma interrupção biogeográfica natural na distribuição das florestas ombrófilas litorâneas, que cedem espaço para a ocorrência das Florestas estacionais semidecíduas, que atingem o litoral (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000; OLIVEIRA-FILHO, et al., 2005). A Falha de Campos é influenciada pelo fenômeno oceanográfico de ressurgência, que ocorre regularmente na região de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro (ARAÚJO, 1997). Esse fenômeno traz à superfície oceânica águas mais frias das correntes das Malvinas, reduzindo a temperatura atmosférica e, conseqüentemente, a evaporação no oceano e a umidade

atmosférica local (CASTELAO; BARTH, 2006). Isso resulta em clima costeiro mais seco, que, em um contexto de mudanças climáticas, tende a se intensificar (veja, MARENGO; TORRES; ALVES, 2017). Além dessa peculiaridade, a região enfrenta desafios significativos relacionados à fragmentação causada pela predominância de pastagens e agricultura. Nessa região os fragmentos se tornam mais vulneráveis ecologicamente, devido serem pequenos e cercados por áreas alteradas. (ABREU, 2013; SANTOS; BOHRER; NASCIMENTO, 2024).

Esses desafios, relacionados tanto ao clima quanto a fragmentação, destacam a complexidade e a importância de estratégias de manejo e conservação para garantir a sustentabilidade das comunidades vegetais na região da Falha de Campos dos Goytacazes. Nesse contexto, esta tese propõe-se a preencher lacunas de conhecimento, concentrando-se em compreender as relações florísticas das florestas estacionais semidecíduas da Falha de Campos dos Goytacazes com suas florestas vizinhas (ombrófilas e estacionais). Além disso, busca entender os desafios que essas florestas enfrentam diante das mudanças ambientais.

A meta central desta tese consiste em contribuir não apenas para o entendimento científico, mas também para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação e manejo sustentável desse ecossistema.

## **2. ORGANIZAÇÃO DA TESE**

A presente tese é estruturada em três capítulos, cada um focando em investigar aspectos distintos da distribuição das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes. No entanto, destaca-se que a abordagem adotada no primeiro capítulo difere dos capítulos subsequentes. Enquanto nos capítulos 2 e 3, as análises são concentradas na região da Falha de Campos dos Goytacazes e nas áreas adjacentes, no primeiro capítulo opta-se por uma análise mais ampla, abordando a Mata Atlântica em sua totalidade. Esta escolha é justificada pela necessidade de estabelecer um contexto amplo e compreender os padrões gerais que influenciam a distribuição e composição das espécies arbóreas neste *hotspot* de biodiversidade. Ao investigar os fatores que influenciam a variabilidade florística em toda a Mata Atlântica, podem ser identificadas

tendências que permitem compreender as particularidades da região da Falha de Campos dos Goytacazes nos capítulos subsequentes. Portanto, o primeiro capítulo serve como uma base para as investigações mais específicas realizadas nos capítulos posteriores.

Capítulo 1: Fatores que Atuam na Variabilidade Florística do Estrato Arbóreo: Uma Revisão para o *Hotspot* de Biodiversidade Mata Atlântica.

Por meio de uma revisão sistemática da literatura, este capítulo investiga os principais fatores que influenciam a distribuição e composição das espécies arbóreas na Mata Atlântica, incluindo aspectos climáticos, edáficos, topográficos, e outros elementos ambientais e espaciais que moldam sua estrutura e dinâmica.

Capítulo 2: Singularidade da Floresta Estacional da Falha de Campos dos Goytacazes e Fatores que explicam a variação florística no Sudeste da Mata Atlântica Brasileira.

Este capítulo busca verificar a singularidade das florestas estacionais semidecíduas na Falha de Campos dos Goytacazes, analisando se elas apresentam uma composição florística única em comparação com áreas vizinhas. Além disso, identifica se os fatores ambientais e espaciais influenciam a composição florística.

Perguntas-chave:

- i) As florestas estacionais semidecíduas na Falha de Campos dos Goytacazes formam um grupo florístico distinto das florestas estacionais e ombrófilas adjacentes?
- ii) Quais componentes explicam a variação da composição de espécies arbóreas entre as florestas da Falha de Campos dos Goytacazes e as florestas adjacentes?

- iii) Quais são as espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes?

Capítulo 3: Impactos das Mudanças Climáticas na Flora Arbórea da Floresta Estacional da Falha de Campos dos Goytacazes: Cenários para Definição de Áreas Prioritárias para Conservação.

Este capítulo avalia os impactos das mudanças climáticas sobre o componente arbóreo indicador da Floresta Estacional da Falha de Campos dos Goytacazes. Investigando cenários futuros de mudanças climáticas, busca compreender onde as espécies encontrarão adequabilidade para enfrentar as alterações previstas para ocorrer ao longo deste século.

Perguntas-chave:

- i) As mudanças climáticas provocam alterações sobre a área de adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes?
- ii) Quais espécies arbóreas são mais suscetíveis a alterações em sua área de adequabilidade ambiental?
- iii) A rede de unidades de conservação na Falha de Campos dos Goytacazes está adequada para preservar as áreas de alta adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras, tanto para clima atual quanto considerando cenários futuros de mudanças climáticas?
- iv) Onde é estrategicamente indicado estabelecer novas unidades de conservação para contribuir para a preservação das espécies arbóreas indicadoras na Falha de Campos dos Goytacazes, considerando as projeções de mudanças climáticas?

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, K. M. P. **Estrutura, florística e diversidade de fragmentos de floresta estacional semidecidual no Norte-Noroeste fluminense**. 2013. 214 f. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) - Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.
- ARAUJO, D. S. D. Mata Atlântica: CPD site SA14, Cabo Frio Region, south-eastern Brazil. **Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservation**, p. 373-375, 1997.
- CASTELAO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 3, p. L03602, 2006.
- GASTON, K. J. Global patterns in biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 220-227, 2000.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira. **Série manuais técnicos em Geociências** 1. 2ª ed. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, p. 275, 2012.
- JOSÉ-SILVA, L.; NASCIMENTO, M. T. Factors acting on the floristic variability of the arboreal stratum: a review for the atlantic forest biodiversity hotspot. **Contribuciones a las ciencias sociales**, v. 17, n. 2, p. e5226-e5226, 2024.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v.129, n. 3, p.1189-1200, 2017.
- MARQUES, M. C. M. et al. The Atlantic Forest: an introduction to the megadiverse forest of South America. *In*: MARQUES, M.C.M.; GRELE, C.E.V. (ed.). **The Atlantic Forest: history, biodiversity, threats and opportunities of the mega-diverse forest**. 1 ed. Cham: Springer, p. 3-23, 2021.
- MITTERMEIER, R. A. et al. Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. *In*: ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (ed.). **Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas**. 1 ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 3-22, 2011.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.
- NASCIMENTO, M. T.; LIMA, H. C. Floristic and structural relationships of a tabuleiro forest in northeastern Rio de Janeiro, Brazil. *In*: THOMAS, W. (ed.). **The Atlantic Coastal Forest of Northeastern Brazil**. 1 ed. New York: Memoirs of the New York Botanical Garden, v. 100, cap. 12, p. 390-410, 2008.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das Bacias do Leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**, v. 56, n. 87, p. 185-235, 2005.

OLIVEIRA-FILHO, Ary T.; FONTES, Marco Aurélio L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.

REZENDE, Camila Linhares et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: a shrinking biodiversity hotspot. In: ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (ed.). **Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas**. 1 ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 405-434, 2011.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

SANTOS, P. M.; BOHRER, C. B. A.; NASCIMENTO, M. T. Impactos das mudanças de uso e cobertura da terra em fitofisionomias da Mata Atlântica. **Ambiente & sociedade**, v. 27, 2024.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, n. 9, p. 2319-2331, 2015.

SILVA, W. G. et al. Relief influence on the spatial distribution of the Atlantic Forest cover on the Ibiúna Plateau, SP. **Brazilian Journal of Biology**, v. 67, n. 3, p. 403-411, 2007.

SOUZA, J. F.; BUENO, M. L.; SALINO, A. Atlantic Forest: centres of diversity and endemism for ferns and lycophytes and conservation status. **Biodiversity and Conservation**, v. 30, n. 7, p. 2207-2222, 2021.

WALLACE, A. R. **Tropical nature, and other essays**. London: Macmillan and Company, p. 356, 1878.

ZWIENER, V. P. et al. Climate change as a driver of biotic homogenization of woody plants in the Atlantic Forest. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 3, p. 298-309, 2018.

## CAPÍTULO 1

**FATORES QUE ATUAM NA VARIABILIDADE FLORÍSTICA DO ESTRATO  
ARBÓREO: UMA REVISÃO PARA O *HOTSPOT* DE BIODIVERSIDADE MATA  
ATLÂNTICA**

Capítulo publicado em forma de artigo:

DA SILVA, Leandro José; NASCIMENTO, Marcelo Trindade. Factors acting on the floristic variability of the arboreal stratum: a review for the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, v. 17, n. 2, p. e5226-e5226, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.2-169

**Fatores que atuam na variabilidade florística do estrato arbóreo: uma revisão para o hotspot de biodiversidade Mata Atlântica**

**Leandro José da Silva**

Mestre em Biodiversidade e Agroecossistemas Amazônicos

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Endereço: Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: [leandro\\_af1@hotmail.com](mailto:leandro_af1@hotmail.com)

**Marcelo Trindade Nascimento**

Doutor em Ecologia

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Endereço: Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: [mtn@uenf.br](mailto:mtn@uenf.br)

## RESUMO

Este estudo destaca os principais fatores que influenciam a distribuição e composição das espécies arbóreas na Mata Atlântica. Tem como objetivo compreender a influência dos fatores climáticos na formação de padrões de composição, bem como a influência do solo, topografia e de outros fatores ambientais na estrutura e dinâmica deste hotspot de biodiversidade. Os resultados desta revisão sistemática revelam a importante contribuição dos fatores climáticos, como precipitação e temperatura, na diferenciação florística em diferentes regiões da Mata Atlântica. Fatores edáficos e topográficos, como o pH do solo, o estresse hídrico do solo e a altitude, também têm importantes contribuições na distribuição das espécies arbóreas, tanto localmente quanto em escalas maiores. Outro componente identificado na pesquisa é a complexa interação de fatores ambientais e espaciais nos padrões de composição. Este é um componente bastante recorrente na Mata Atlântica, devido aos gradientes latitudinais e longitudinais, onde condições ecológicas específicas criam diferentes nichos para as espécies. Apesar dos avanços, grande parte da variação na composição das espécies arbóreas ainda permanece inexplicada, sugerindo a existência de fatores desconhecidos ou limitações nos métodos analíticos atuais. Assim, este estudo destaca a necessidade de explorar ainda mais o conhecimento sobre o impacto das mudanças climáticas e das atividades antrópicas em fragmentos florestais da Mata Atlântica. Além disso, sugere a identificação de novos determinantes e a compreensão das interações intrínsecas entre vegetação e preditores bióticos para auxiliar estratégias eficazes de gestão e conservação deste único e ameaçado ecossistema.

**Palavras-Chave:** Fitogeografia; Preditores Ambientais; Ambiente Espacialmente Estruturado.

## ABSTRACT

His study highlights the main factors influencing the distribution and composition of tree species in the Atlantic Forest. Its goal is to understand the influence of climatic factors on the formation of composition patterns, as well as the influence of soil, topography, and other environmental factors on the structure and dynamics of this biodiversity hotspot. The results of this systematic review reveal the significant contribution of climatic factors such as precipitation and temperature to floristic differentiation in different regions of the Atlantic Forest. Edaphic and topographic factors, such as soil pH, soil water stress, and altitude, also have significant contributions to the distribution of tree species, both locally and on larger scales. Another component identified in the research is the complex interaction of environmental and spatial factors in composition patterns. This is a recurring component in the Atlantic Forest, due to latitudinal and longitudinal gradients, where specific ecological conditions create different niches for species. Despite advances, a large part of the variation in tree species composition still remains unexplained, suggesting the existence of unknown factors or limitations in current analytical methods. Thus, this study emphasizes the need to further explore knowledge on the impact of climate change and anthropogenic activities in forest fragments of the Atlantic Forest. Additionally, it suggests the identification of new determinants and understanding the intrinsic interactions between vegetation and biotic predictors to assist effective management and conservation strategies for this unique and threatened ecosystem.

**Keywords:** Phytogeography; Environmental Predictors; Spatially Structured Environment

## 1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é um dos domínios fitogeográficos mais ricos do mundo e um dos 35 hotspots de extrema relevância para a conservação da biodiversidade (MYERS et al., 2000; MITTERMEIER et al., 2011). Ela se estende ao longo da costa brasileira, nordeste da Argentina e leste do Paraguai (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Estima-se que essa região abriga aproximadamente 20 mil espécies vegetais, sendo 40% delas endêmicas (MITTERMEIER et al., 2011; FORZZA et al., 2012).

Dentro da vasta diversidade biológica da Mata Atlântica, encontram-se diversos tipos de vegetação, como a floresta ombrófila densa, a floresta ombrófila mista com araucária, a floresta estacional semidecidual, a floresta estacional decidual, e ecossistemas associados, como restingas e manguezais (RIZZINI, 1979; SCARANO, 2009). No entanto, este incrível ecossistema enfrenta grandes desafios. A maioria dos fragmentos florestais da Mata Atlântica é composta por áreas pequenas, muitas vezes com menos de 50 hectares, isoladas entre si e inseridas em uma matriz dominada por atividades antrópicas, como agricultura, pastagens, urbanização e exploração madeireira (RIBEIRO et al., 2009; RIBEIRO et al., 2011; JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014). Estima-se que apenas entre 11% e 16% da cobertura florestal original da Mata Atlântica ainda permanece preservada (RIBEIRO et al., 2009; Rezende et al., 2018), o que torna evidente a urgência de esforços para conservação e restauração deste importante domínio.

Em meio aos crescentes desafios de preservação em um mundo cada vez mais ameaçado por mudanças ambientais e atividades humanas, entender os fatores ecológicos que impulsionam a diversidade de plantas é essencial para direcionar estratégias de conservação (NEVES et al., 2017). Estudos em diferentes escalas, conduzidos em regiões tropicais, têm proporcionado valiosos insights sobre os determinantes da variação florística (GAVIRIA; TURNER; ENGELBRECHT, 2017; SILVA-SOUZA; SOUZA, 2020; SOUZA; EISENLOHR, 2020; ZWIENER; PADIAL; MARQUES, 2020; JAKOVAC et al., 2022), destacando a influência significativa das variáveis ambientais e espaciais como fortes preditores dos padrões de diversidade das comunidades vegetais.

Em nível global e regional, os fatores climáticos têm sido identificados como importantes determinantes da variação florística (KREFT; JETz, 2007; TAMME et al., 2010; PRATA et al., 2018; NEVES et al., 2020). No entanto, em escalas locais, os preditores edáficos emergem como os principais determinantes da distribuição das espécies arbóreas (SIEFERT et al., 2012; SANCHEZ et al., 2013; REZENDE et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2017). Compreender o papel dos preditores ambientais na organização da comunidade é crucial para antever como as comunidades poderão estar estruturadas em cenários futuros de mudanças ambientais, seja em decorrência das mudanças climáticas ou em resposta às atividades antrópicas, sendo, portanto, uma importante ferramenta para as práticas de manejo e conservação (ANJOS et al., 2004; THOMPSON; TOWNSEND, 2006; KEMBEL, 2009).

Neste contexto, por meio de uma revisão sistemática da literatura, este estudo investiga os principais fatores que atuam na distribuição e composição das espécies arbóreas na Mata Atlântica. Examina os efeitos dos fatores climáticos na configuração dos padrões de composição, bem como a influência dos fatores edáficos, topográficos e outros fatores ambientais e espaciais que influenciam a estrutura e a dinâmica dessa floresta única.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

Este artigo seguiu uma abordagem sistemática para identificar e selecionar estudos, realizados entre 1945 e 2022, sobre fatores que influenciam a variação da flora arbórea na Mata Atlântica. Para garantir a seleção de estudos relevantes para o conhecimento atual sobre os principais fatores que influenciam a variação da flora arbórea na Mata Atlântica, a metodologia adotada consistiu em etapas bem definidas com base em critérios previamente estabelecidos.

Primeiro, foram priorizados estudos que investigaram espécies nativas do estrato arbóreo e arbustivo-arbóreo. Os organismos desse estrato são fundamentais para a estrutura e dinâmica da floresta, além de serem os principais contribuintes para a

biomassa viva na Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO et al., 2005), tornando-os centrais para análises da variação florística.

Da mesma forma, foram selecionados artigos que abordaram diretamente a relação entre a variação florística da Mata Atlântica e fatores ecológicos, tais como fatores ambientais (por exemplo, clima, solo, topografia) e fatores espaciais (por exemplo, distância do oceano, conectividade, filtros espaciais). Essa abordagem permitiu identificar os principais fatores que influenciam a distribuição das espécies arbóreas na região.

A fim de assegurar a relevância dos estudos para a Mata Atlântica, foram consideradas apenas pesquisas conduzidas diretamente na região ou em escalas maiores que incluíram informações específicas sobre a Mata Atlântica. Essa abordagem permitiu obter dados direcionados e aplicáveis ao contexto deste importante domínio fitogeográfico.

A busca dos estudos foi conduzida nas bases de dados *Web of Science* (acesso: <https://apps.webofknowledge.com>) e *Scopus* (acesso: <https://www.scopus.com>), utilizando as combinações de palavras-chave disponíveis na tabela 1. A busca incluiu o título, palavras-chave e resumo de artigos publicados de 1945 até setembro de 2022.

Tabela 1. Combinações de palavras-chave para pesquisar literaturas revisadas por pares em bases de dados.

BASE DE DADOS	ESTRATÉGIA DE BUSCA
<b>WEB OF SCIENCE</b>	(floristic* OR "structure" OR "floristic variation" OR "floristic gradient" OR "species composition" OR "Forest structure") (Topic) AND (tree* OR "arboreal" OR "arboreal vegetation" OR "tree communities") (Topic) AND ("Tropical forest" OR "tropical rainforest" OR "rain forest" OR "rain-forest") (Topic) AND ("Atlantic Forest" OR " Mata Atlântica") (Topic)
<b>SCOPUS</b>	(TITLE-ABS-KEY ((floristic* OR "structure" OR "floristic variation" OR "floristic gradient" OR "species composition" OR "Forest structure"))) AND TITLE-ABS-KEY ((tree* OR "arboreal" OR "arboreal vegetation" OR "tree communities")) AND TITLE-ABS-KEY (("Tropical forest" OR "tropical rainforest" OR "rain forest" OR "rain-forest")) AND TITLE-ABS-KEY (("Atlantic Forest" OR "Mata Atlântica"))

Fonte: Elaborada pelos autores

Após a busca nas bases de dados, foram identificados 671 artigos. No entanto, apenas 21 deles atenderam a todos os critérios de inclusão estabelecidos (tabela 2). Adicionalmente, a fim de encontrar o maior número possível de artigos relevantes, rastreamos as referências citadas nos artigos selecionados pela estratégia de busca inicial. Essa abordagem de busca secundária teve como objetivo identificar estudos adicionais que, por algum motivo, não foram encontrados na busca inicial. Nesta etapa, foram adicionados 15 novos artigos, totalizando 36 artigos para análise completa (tabela 2).

Tabela 2. Tipo de busca e nome dos autores selecionados para análise completa sobre os determinantes da variação da flora arbórea da Mata Atlântica.

<b>BUSCA</b>	<b>AUTORES</b>
Complementar	Andrade-Wagne et al. (2022)
Sistemática	Anjos et al. (2018)
Sistemática	Bergamin et al. (2012)
Complementar	Cantidio e Souza (2019)
Complementar	Cielo-Filho e Martins (2015)
Sistemática	Cordeiro et al. (2020)
Sistemática	Cupertino-Eisenlohr et al. (2021)
Sistemática	Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015)
Sistemática	Eisenlohr et al. (2013)
Complementar	Ferraz et al. (2004)
Complementar	Gonçalves e Souza (2014)
Complementar	Kamino et al. (2008)
Complementar	Liebsch et al. (2008)
Complementar	Maçaneiro et al. (2016)
Complementar	Marcilio-Silva et al. (2017)
Complementar	Marques et al. (2011)
Complementar	Meixeles et al. (2008)
Sistemática	Morelli et al. (2021)
Sistemática	Nettesheim et al. (2010)
Sistemática	Nettesheim et al. (2018a)
Sistemática	Nettesheim et al. (2018b)
Sistemática	Nettesheim et al. (2019)
Sistemática	Neves et al. (2017)
Sistemática	Oliveira-Filho e Fontes (2000)
Complementar	Oliveira-Filho et al. (1994)
Complementar	Oliveira-Filho et al. (2005)
Complementar	Oliveira-Filho et al. (2015)

Sistemática	Prata et al. (2018)
Sistemática	Rezende et al. (2015)
Sistemática	Rezende et al. (2018)
Sistemática	Saiter et al. (2015)
Sistemática	Saiter et al. (2016)
Sistemática	Sanchez et al. (2013)
Sistemática	Scudeller et al. (2001)
Complementar	Torres et al. (1997)
Sistemática	Zwiener et al. (2020)

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 PRINCIPAIS FATORES AMBIENTAIS QUE INFLUENCIAM A VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA NA MATA ATLÂNTICA

Nesta seção, foram analisados estudos que investigaram os principais fatores ambientais que influenciam a variação florística na Mata Atlântica. Diversos estudos ressaltaram a importância dos fatores climáticos, como precipitação e temperatura, na distribuição das espécies arbóreas. Por exemplo, Oliveira-Filho et al. (2005), Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015) e Rezende et al. (2018) demonstraram que as variáveis derivadas da precipitação (como precipitação anual, sazonalidade da precipitação) desempenham um papel importante na explicação dos padrões florísticos da Mata Atlântica. Esses fatores são considerados cruciais na diferenciação florística entre as florestas ombrófilas e florestas estacionais na parte tropical do domínio atlântico.

Além disso, estudos realizados por Oliveira-Filho et al. (2015), Neves et al. (2017), Rezende et al. (2015) e Rezende et al. (2018) apontaram que, para a parte subtropical do domínio atlântico, as variáveis relacionadas à temperatura (como a sazonalidade da temperatura e a temperatura média no trimestre mais frio) exercem a maior influência sobre a composição de espécies arbóreas. As variações na quantidade e na periodicidade da precipitação, bem como nas oscilações de temperatura, podem criar gradientes ambientais que favorecem o estabelecimento e a persistência de espécies adaptadas a diferentes condições (WRIGHT, 2010). Por exemplo, a floresta ombrófila,

caracterizada por ocorrer em locais com chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo do ano, exibe uma composição florística distinta daquelas observadas em floresta estacional, que, por sua vez, enfrenta períodos de seca e chuvas mais irregulares (veja GENTRY, 1995; OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000; PENNINGTON; LAVIN; OLIVEIRA-FILHO, 2009).

Outros fatores ambientais, como a altitude, também foram abordados nos estudos. A altitude é considerada uma variável proxy para muitas outras variáveis ambientais ecologicamente relevantes para a distribuição das espécies, como temperatura, umidade, precipitação, cobertura de nuvens, radiação solar, velocidade do vento e características do solo (ARNTZEN; THEMUDO, 2008; GASTAUER et al., 2020). Sua relação com as variações florísticas é bem documentada para a Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000; SCUDELLER et al., 2001; MORENO; NASCIMENTO; KURTZ, 2003; EISENLOHR et al., 2013; SANCHEZ et al., 2013). A altitude foi relatada por Oliveira-Filho e Fontes (2000) como um dos principais fatores que influenciam a diferenciação florística na região sudeste da Mata Atlântica e confirmada por Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015). Além disso, outros estudos em diferentes escalas na Mata Atlântica também encontraram ligações florísticas consistentes em relação a esse preditor (i.e., SCUDELLER; MARTINS; SHEPHERD, 2001; FERRAZ; ARAÚJO, 2004; MORENO; NASCIMENTO; KURTZ, 2003; EISENLOHR et al., 2013; SANCHEZ et al., 2013).

Variáveis derivadas do solo também apresentam contribuições significativas para a variação florística na Mata Atlântica, tanto em larga escala quanto em escalas locais. Por exemplo, o trabalho de Cupertino-Eisenlohr et al. (2021) considerando toda a região neotropical mostrou que variáveis topográficas e edáficas (como o índice de umidade topográfica e o pH) são os principais preditores para a variação florística das florestas perenes não inundadas. Outros estudos, como o de Neves et al. (2017), para todo o domínio Atlântico, concluíram que a distribuição dos habitats marginais está associada a extremos de baixa temperatura, salinidade do solo, estresse hídrico do solo e encharcamento do solo. Em escalas locais, Sanchez et al. (2013) concluíram que a composição e estrutura da Mata Atlântica podem mudar acompanhando as variações de solo e altitude em curtas distâncias. Da mesma forma, Morelli et al. (2021) argumentaram que os solos e os gradientes de altitude levaram aos padrões estruturais e filogenéticos observados na comunidade arbórea da Mata Atlântica, e que pequenas variações de

altitude e solos determinam as condições e recursos que influenciam diretamente na seleção de espécies adaptadas a cada habitat.

Os estudos acima mencionados oferecem valiosos insights sobre o importante papel do determinismo ambiental nas comunidades arbóreas da Mata Atlântica. No entanto, além de enfatizar a relevância do determinismo ambiental para as comunidades vegetais, é muito importante que pesquisas futuras busquem aprofundar a exploração desses descritores ambientais. As variáveis climáticas, topográficas e edáficas têm demonstrado serem fatores significativos na explicação dos padrões da distribuição das espécies arbóreas dentro deste ecossistema megadiverso. No entanto, são necessários mais detalhes para compreender o real papel de cada uma dessas variáveis no contexto das mudanças climáticas e no bioma Mata Atlântica.

### **3.2 FATORES PURAMENTE ESPACIAIS ATUANDO NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA**

Além dos fatores ambientais, os estudos revelaram que os processos espaciais também exercem influência na variação da composição das espécies arbóreas na Mata Atlântica. As pesquisas conduzidas por Cielo-Filho e Martins (2015), Rezende et al. (2018), Nettesheim et al. (2018) e Zwiener et al. (2020) destacaram a relevância de fatores espaciais "puros", ou seja, aqueles que operam independentemente das variáveis ambientais, na explicação da variação florística. Os processos biogeográficos históricos desempenham um papel importante na formação dos padrões de composição de espécies (HUBBELL, 2001). Limitações de dispersão, fragmentação de habitat surgem como atores importantes na determinação da distribuição das espécies. Estes mecanismos estocásticos, moldados ao longo do tempo, têm o potencial de deixar uma marca duradoura nos padrões de variação florística (HUBBELL, 2001).

A grande extensão geográfica do domínio Atlântico intensifica a complexidade desses fatores espaciais. As distintas regiões geográficas da Mata Atlântica podem ter experimentado restrições ambientais específicas ao longo do tempo, moldando os atuais padrões de composição das espécies arbóreas (REZENDE et al., 2018; CANTÍDIO; SOUZA, 2019). Nesse contexto, os impactos dos distúrbios antropogênicos atuam como

uma importante força, contribuindo para a estrutura espacial da comunidade arbórea na Mata Atlântica. A ocupação humana ao longo de sucessivos ciclos econômicos e transformações na paisagem deixou um legado que influenciou a distribuição das espécies e a configuração do habitat na Mata Atlântica (RIBEIRO et al., 2009; REZENDE et al., 2018). Áreas que antes eram contínuas foram fragmentadas, resultando no isolamento de populações e na alteração dos padrões de distribuição das espécies (BUSTAMANTE et al., 2019). A fragmentação do habitat e a presença de barreiras físicas, como estradas e zonas urbanas, podem impor restrições adicionais ao deslocamento das espécies, diminuindo a diversidade de espécies dentro das comunidades (ARROYO-RODRÍGUEZ et al., 2009; SILVA-JUNIOR et al., 2018).

Dessa forma, os padrões espaciais observados na riqueza e composição de espécies na Mata Atlântica podem estar influenciados pelo estado de conservação do fragmento e estágio sucessional das florestas. Além disso, os processos espaciais, como limitações de dispersão e fragmentação de habitat, não apenas moldam as composições locais de espécies, mas também influenciam as trocas genéticas entre populações, afetando a diversidade genética e a adaptabilidade das espécies (ROBUCHON et al., 2019).

### **3.3 INTERAÇÃO ENTRE FATORES AMBIENTAIS E ESPACIAIS NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA**

A Mata Atlântica, além de ser influenciada por fatores ambientais e pelos fatores espaciais puros, também recebe uma contribuição significativa da influência do ambiente espacialmente estruturado. Este último é caracterizado pela variação compartilhada, explicada tanto por preditores ambientais quanto espaciais (PERES-NETO et al., 2006). Onde, os processos ambientais, responsáveis pela estruturação das comunidades, organizam-se espacialmente, impondo uma estrutura espacial conhecida como dependência espacial induzida (PERES-NETO; LEGENDRE, 2010). Essa dinâmica complexa, que emerge de uma interação intrínseca entre processos ambientais e espaciais, ocorre em diversas escalas espaciais, como demonstrados por estudos

recentes (EISENLOHR et al., 2013, EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015; REZENDE et al., 2015; NEVES et al., 2017; ANJOS et al., 2018).

Os gradientes latitudinais e altitudinais da Mata Atlântica destacam-se como importantes fatores na compreensão dessa estrutura complexa. As variações dos preditores ambientais como, por exemplo, a temperatura e precipitação ao longo desses gradientes criam condições particulares que moldam nichos específicos, como evidenciado por Oliveira-Filho et al. (2015), que demonstraram um declínio consistente na riqueza de espécies de árvores conforme o aumento da latitude. A clara influência do ambiente espacialmente estruturado nas variações na composição e riqueza de espécies compreende um padrão bem conhecido na Mata Atlântica, como bem descrito por Eisenlohr et al. (2013), onde destacaram a predominância dos fatores ambientais espacialmente estruturados nos padrões florísticos ao longo de um gradiente altitudinal em São Paulo. O estudo realizado por Rezende et al. (2015) em Santa Catarina também corrobora esse padrão, e sugere que as variações de altitude da região geram alta variabilidade espacial nas variáveis ambientais que podem servir como barreiras físicas ou climáticas à dispersão das espécies. De mesmo modo, estudos em escala abrangente como os de Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015) e Neves et al. (2017) reforçam que as variações na composição de espécies arbórea estão relacionadas tanto ao ambiente quanto ao espaço, sendo a fração compartilhada entre eles mais significativa.

Estes estudos representam um importante avanço no entendimento da interação entre os processos ambientais e espaciais na formação dos padrões florísticos da Mata Atlântica. Contribuem consideravelmente para a compreensão da complexidade desse ecossistema singular. No entanto, ainda há lacunas que precisam ser exploradas. Dentre as principais lacunas destaca-se a necessidade de pesquisas que abordem a influência das mudanças climáticas sobre a dinâmica vegetal na Mata Atlântica. A crescente pressão dessas alterações exige uma compreensão mais precisa de como os padrões de distribuição das espécies podem ser afetados, bem como quais espécies podem ser mais vulneráveis a essas transformações.

Outro ponto crucial a ser abordado refere-se à inclusão de variáveis preditoras relacionadas aos impactos das atividades humanas nos fragmentos florestais da Mata Atlântica. Estudos que investigam os efeitos das variáveis relacionadas à expansão urbana, à agricultura e ao desmatamento são essenciais para propor medidas de manejo

sustentável e mitigação de impactos negativos das comunidades vegetais diante das pressões ambientais. Além disso, a compreensão das interações entre a vegetação e outros componentes bióticos, como a fauna e os microrganismos do solo, é um campo que ainda aguarda a devida exploração. Essas relações simbióticas desempenham um papel fundamental na dinâmica e funcionamento dos ecossistemas da Mata Atlântica (ELITH; LEATHWICK, 2009; BEALE; BREWER; LENNON, 2014), mas a obtenção de variáveis bióticas, neste contexto, ainda é um problema a ser resolvido.

Desta forma, ao se preencher essas lacunas, não apenas permitirá expandir o conhecimento sobre a fitogeografia da Mata Atlântica, mas também fornecerá subsídios fundamentais para a implementação de estratégias mais eficazes de conservação e gestão deste ecossistema extraordinário e ameaçado.

### **3.4 FRAÇÃO NÃO EXPLICADA NA VARIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES ARBÓREAS NA MATA ATLÂNTICA**

Com bem evidenciado por esta revisão, os processos ambientais e espaciais e a interação entre eles são fortemente indicados como os principais impulsionadores da composição florística da Mata Atlântica. A distribuição das espécies é moldada significativamente por fatores como temperatura, precipitação e características do solo, que operam em padrões espaciais específicos. Entretanto, esses fatores não podem explicar completamente a vasta gama de variação observada na composição de espécies (veja TER BRAAK, 1986; NEVES et al., 2017).

A grande maioria dos estudos aqui levantados mostra que uma amplitude entre 65 e 80% da variação permanece inexplicável (i.e., BERGAMIN; MÜLLER; MELLO, 2012; SAITER et al., 2016; ZWIENER; PADIAL; MARQUES, 2020). A ausência de resposta completa por parte dos processos ambientais e espaciais indica a presença de outros elementos significativos subjacentes aos padrões observados. Essa variação inexplicável nos padrões de distribuição das espécies pode ser devido a fatores ambientais desconhecidos, os quais ainda não foram identificados e quantificados (NEVES et al., 2017). Os fatores históricos também podem desempenhar um papel substancial,

representando legados do passado que influenciam as composições atuais (SVENNING et al., 2010).

Além disso, conforme destacado por Cielo-filho e Martins (2015), a variação na distribuição das espécies arbóreas pode estar influenciada por fatores operando em escalas espaciais mais finas do que aquelas consideradas nos modelos, resultando em uma variação não explicada nos níveis de paisagem ou local. Limitações nos métodos de coleta de dados, amostragem ou modelagem também podem contribuir para a fração não explicada, reduzindo a capacidade de capturar a complexidade da distribuição das espécies (GILBERT; BENNETT, 2010).

A fração não explicada na distribuição das espécies arbóreas da Mata Atlântica destaca a complexidade subjacente à dinâmica de biodiversidade nesta região megadiversa. Embora os esforços para quantificar e modelar os determinantes da variação florística sejam essenciais, é importante reconhecer que a complexidade e diversidade dos ecossistemas muitas vezes resultam em uma porção substancial de variação que permanece sem explicação. Para a conservação bem-sucedida da Mata Atlântica, é crucial não apenas continuar a explorar e refinar os modelos, mas também abraçar as incertezas e a complexidade inerente à biodiversidade.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Considerando todos os aspectos evidenciados ao longo desta revisão, conclui-se que a distribuição e variação das espécies arbóreas da Mata Atlântica é influenciada por uma combinação de fatores ambientais e espaciais. Fatores ambientais, como variáveis climáticas, topográficas e solos, apresentaram-se como importantes preditores da biodiversidade nesta região megadiversa. Além disso, processos espaciais, muitas vezes ligados a limitações de dispersão, distúrbios antropogênicos, como mudanças no uso da terra e dependência espacial induzida, também demonstraram ser cruciais para a compreensão da distribuição das espécies arbóreas na Mata Atlântica.

Embora os estudos levantados por esta revisão tenham fornecido uma compreensão dos padrões florísticos da região, ainda há uma grande porcentagem de

variação na composição de espécies que permanece inexplicada. Essa variação pode ser devida a fatores ambientais ou bióticos desconhecidos ou com informações insuficientes, que desta forma não são inseridas nos modelos (REZENDE et al., 2015).

Assim sendo, esta revisão ressalta a importância de pesquisas futuras voltadas para identificar novas variáveis importantes na moldagem da comunidade arbórea da Mata Atlântica. Além disso, destaca a necessidade de unir esforços na organização e disponibilização de dados em repositórios de redes de pesquisas ecológicas. Tais iniciativas podem contribuir significativamente para explicar essa variação florística não compreendida, especialmente em uma região tão rica em biodiversidade e ameaçada como a Mata Atlântica.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE WAGNER, Mariana; BOGONI, Juliano A.; FIASCHI, Pedro. Myrtaceae richness and distribution across the Atlantic Forest Domain are constrained by geoclimatic variables. **Plant Ecology**, v. 223, n. 9, p. 1079-1092, 2022.

ANJOS, Adilson *et al.* Análise do padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas no Estado do Paraná, utilizando a função K de Ripley Spatial point pattern analysis of araucaria (*Araucaria angustifolia*) in some areas in the State of Paraná, using Ripley's K function. **Análise**, n. 66, p. 38-45, 2004.

ANJOS, Luiz *et al.* Distributions of birds and plants in ecoregions: Implications for the conservation of a neotropical biodiversity hotspot. **Austral Ecology**, v. 43, n. 7, p. 839-849, 2018.

ARNTZEN, J. W.; THEMUDO, Gonçalo Espregueira. Environmental parameters that determine species geographical range limits as a matter of time and space. **Journal of Biogeography**, v. 35, n. 7, p. 1177-1186, 2008.

ARROYO-RODRÍGUEZ, VÍCTOR *et al.* Value of small patches in the conservation of plant-species diversity in highly fragmented rainforest. **Conservation Biology**, v. 23, n. 3, p. 729-739, 2009.

BEALE, Colin M.; BREWER, Mark J.; LENNON, Jack J. A new statistical framework for the quantification of covariate associations with species distributions. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 5, p. 421-432, 2014.

BERGAMIN, R.; MÜLLER, S.; MELLO, R. Indicator species and floristic patterns in different forest formations in southern Atlantic rainforests of Brazil. **Community Ecology**, v. 13, n. 2, p. 162-170, 2012.

BUSTAMANTE, Maria MC *et al.* Tendências e impactos dos vetores de degradação e restauração da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos. 2019.

CANTIDIO, Luiza S.; SOUZA, Alexandre F. Aridity, soil and biome stability influence plant ecoregions in the Atlantic Forest, a biodiversity hotspot in South America. **Ecography**, v. 42, n. 11, p. 1887-1898, 2019.

CIELO-FILHO, Roque; MARTINS, Fernando Roberto. Detection of fine scale niche assembly in a tropical forest through analysis of indirect environmental variables. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 215, p. 60-66, 2015.

CORDEIRO, Juliano *et al.* Edaphic Drivers of Community Structure and Composition in a Mixed Ombrophilous Forest. **Floresta e Ambiente**, v. 27, 2020.

CUPERTINO-EISENLOHR, Mônica A. *et al.* Environmental variables and dispersal barriers explain broad-scale variation in tree species composition across Neotropical non-flooded evergreen forests. **Journal of Vegetation Science**, v. 32, n. 3, p. e13026, 2021.

EISENLOHR, Pedro V.; OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira. Revisiting patterns of tree species composition and their driving forces in the Atlantic Forests of Southeastern Brazil. **Biotropica**, v. 47, n. 6, p. 689-701, 2015.

EISENLOHR, Pedro V. *et al.* Disturbances, elevation, topography and spatial proximity drive vegetation patterns along an altitudinal gradient of a top biodiversity hotspot. **Biodiversity and conservation**, v. 22, p. 2767-2783, 2013.

ELITH, Jane; LEATHWICK, John R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. **Annual review of ecology, evolution, and systematics**, v. 40, p. 677-697, 2009.

FERRAZ, Elba Maria Nogueira; ARAÚJO, Elcida de Lima; SILVA, Suzene Izídio. Floristic similarities between lowland and montane areas of Atlantic Coastal Forest in Northeastern Brazil. **Plant Ecology**, v. 174, p. 59-70, 2004.

FORZZA, Rafaela C. *et al.* New Brazilian floristic list highlights conservation challenges. **BioScience**, v. 62, n. 1, p. 39-45, 2012.

GASTAUER, Markus *et al.* How do altitude and soil properties influence the taxonomic and phylogenetic structure and diversity of Brazilian páramo vegetation?. **Journal of Mountain Science**, v. 17, n. 5, p. 1045-1057, 2020.

GAVIRIA, Julian; TURNER, Benjamin L.; ENGELBRECHT, Bettina MJ. Drivers of tree species distribution across a tropical rainfall gradient. **Ecosphere**, v. 8, n. 2, p. e01712, 2017.

GENTRY, Alwyn H. Diversity and floristic composition of neotropical dry forests. **Seasonally dry tropical forests**, v. 1, p. 146-194, 1995.

GILBERT, Benjamin; BENNETT, Joseph R. Partitioning variation in ecological communities: do the numbers add up?. **Journal of applied ecology**, v. 47, n. 5, p. 1071-1082, 2010.

GONÇALVES, Erivelton Tomazzoni; SOUZA, Alexandre F. Floristic variation in ecotonal areas: Patterns, determinants and biogeographic origins of subtropical forests in South America. **Austral Ecology**, v. 39, n. 1, p. 122-134, 2014.

HUBBELL, Stephen P. **The unified neutral theory of biodiversity and biogeography (MPB-32)**. Princeton University Press, 2011.

JAKOVAC, Catarina C. *et al.* Strong floristic distinctiveness across Neotropical successional forests. **Science advances**, v. 8, n. 26, p. eabn1767, 2022.

JOLY, Carlos A.; METZGER, Jean Paul; TABARELLI, Marcelo. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New phytologist**, v. 204, n. 3, p. 459-473, 2014.

KAMINO, L. H. Y.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. de; STEHMANN, J. R. Relações florísticas entre as fitofisionomias florestais da Cadeia do Espinhaço, Brasil. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1-2, p. 39-49, 2008.

KEMBEL, Steven W. Disentangling niche and neutral influences on community assembly: assessing the performance of community phylogenetic structure tests. **Ecology letters**, v. 12, n. 9, p. 949-960, 2009.

KREFT, Holger; JETZ, Walter. Global patterns and determinants of vascular plant diversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 14, p. 5925-5930, 2007.

LIEBSCH, Dieter; MARQUES, Marcia CM; GOLDENBERG, Renato. How long does the Atlantic Rain Forest take to recover after a disturbance? Changes in species composition and ecological features during secondary succession. **Biological Conservation**, v. 141, n. 6, p. 1717-1725, 2008.

MAÇANEIRO, João Paulo de *et al.* More than environmental control at local scales: do spatial processes play an important role in floristic variation in subtropical forests?. **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, p. 183-192, 2016.

MARCILIO-SILVA, Vinicius; ZWIENER, Victor P.; MARQUES, Márcia CM. Metacommunity structure, additive partitioning and environmental drivers of woody plants diversity in the Brazilian Atlantic Forest. **Diversity and Distributions**, v. 23, n. 10, p. 1110-1119, 2017.

MARQUES, Marcia CM; SWAINE, Mike D.; LIEBSCH, Dieter. Diversity distribution and floristic differentiation of the coastal lowland vegetation: implications for the conservation of the Brazilian Atlantic Forest. **Biodiversity and conservation**, v. 20, p. 153-168, 2011.

MEIRELES, Leonardo Dias; SHEPHERD, George John; KINOSHITA, Luiza Sumiko. Variações na composição florística e na estrutura fitossociológica de uma floresta ombrófila densa alto-montana na Serra da Mantiqueira, Monte Verde, MG. **Brazilian Journal of Botany**, v. 31, p. 559-574, 2008.

MITTERMEIER, Russell A. *et al.* Global biodiversity conservation: the critical role of hotspots. In: **Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 3-22.

MORENO, Marcel R.; NASCIMENTO, Marcelo T.; KURTZ, Bruno C. Estrutura e composição florística do estrato arbóreo em duas zonas altitudinais na Mata Atlântica de encosta da região do Imbé, RJ. **Acta Botanica Brasilica**, v. 17, p. 371-386, 2003.

- MORELLI, Mariana Caroline Moreira *et al.* Can small-scale altitudinal gradients predict spatial and temporal patterns in tropical forests?. **Journal of Forestry Research**, v. 32, p. 1855-1865, 2021.
- MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.
- NASCIMENTO, Marcelo Trindade *et al.* Is the *Peltogyne gracilipes* monodominant forest characterised by distinct soils?. **Acta Oecologica**, v. 85, p. 104-107, 2017.
- NETTESHEIM, Felipe Cito *et al.* Influence of environmental variation on Atlantic Forest tree-shrub-layer phytogeography in southeast Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, p. 369-377, 2010.
- NETTESHEIM, Felipe Cito *et al.* Environment is more relevant than spatial structure as a driver of regional variation in tropical tree community richness and composition. **Plant Ecology & Diversity**, v. 11, n. 1, p. 27-40, 2018a.
- NETTESHEIM, Felipe Cito *et al.* Local environmental controls of Atlantic Forest tree community assembly on a coastal continental island in southeastern Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, p. 88-96, 2019.
- NETTESHEIM, Felipe Cito *et al.* Local-scale elevation patterns of Atlantic Forest tree community variation and assembly drivers in a conservation hotspot in southeastern Brazil. **Flora**, v. 248, p. 61-69, 2018b.
- NEVES, Danilo M. *et al.* Evolutionary diversity in tropical tree communities peaks at intermediate precipitation. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1188, 2020.
- NEVES, Danilo M. *et al.* Dissecting a biodiversity hotspot: The importance of environmentally marginal habitats in the Atlantic Forest Domain of South America. **Diversity and Distributions**, v. 23, n. 8, p. 898-909, 2017.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T. *et al.* Delving into the variations in tree species composition and richness across South American subtropical Atlantic and Pampean forests. **Journal of plant ecology**, v. 8, n. 3, p. 242-260, 2015.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T.; FONTES, Marco Aurélio L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T. *et al.* Comparison of the woody flora and soils of six areas of montane semideciduous forest in southern Minas Gerais, Brazil. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 51, n. 3, p. 355-389, 1994.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T. *et al.* Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das Bacias do Leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**, v. 56, p. 185-235, 2005.

PENNINGTON, R. Toby; LAVIN, Matt; OLIVEIRA-FILHO, Ary. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, p. 437-457, 2009.

PERES-NETO, Pedro R. *et al.* Variation partitioning of species data matrices: estimation and comparison of fractions. **Ecology**, v. 87, n. 10, p. 2614-2625, 2006.

PERES-NETO, Pedro R.; LEGENDRE, Pierre. Estimating and controlling for spatial structure in the study of ecological communities. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 2, p. 174-184, 2010.

PRATA, Eduardo Magalhães Borges *et al.* The role of climate on floristic composition in a latitudinal gradient in the Brazilian Atlantic Forest. **Plant Ecology and Evolution**, v. 151, n. 3, p. 303-313, 2018.

REZENDE, Camila Linhares *et al.* From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

REZENDE, Vanessa Leite *et al.* Patterns of tree species variation across southern South America are shaped by environmental factors and historical processes. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 34, p. 10-16, 2018.

REZENDE, Vanessa Leite *et al.* Humidity, low temperature extremes, and space influence floristic variation across an insightful gradient in the Subtropical Atlantic Forest. **Plant Ecology**, v. 216, p. 759-774, 2015.

RIBEIRO, Milton Cezar *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: a shrinking biodiversity hotspot. **Biodiversity hotspots: distribution and protection of conservation priority areas**, p. 405-434, 2011.

RIBEIRO, Milton Cezar *et al.* The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RIZZINI, Carlos Toledo. Tratado de fitogeografia do Brasil. v. 2. **Aspectos ecológicos. Hucitec/Edusp, São Paulo**, 1979.

ROBUCHON, Marine *et al.* Correlations between broad-scale taxonomic and genetic differentiations suggest a dominant imprint of historical processes on beta diversities. **Journal of Biogeography**, v. 46, n. 5, p. 1083-1095, 2019.

SAITER, Felipe Z. *et al.* Floristic units and their predictors unveiled in part of the Atlantic Forest hotspot: implications for conservation planning. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, p. 2031-2046, 2015.

SAITER, Felipe Z. *et al.* From evergreen to deciduous tropical forests: how energy–water balance, temperature, and space influence the tree species composition in a high diversity region. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 1, p. 45-54, 2016.

SANCHEZ, Maryland *et al.* Changes in tree community composition and structure of Atlantic rain forest on a slope of the Serra do Mar range, southeastern Brazil, from near sea level to 1000 m of altitude. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 208, n. 3, p. 184-196, 2013.

SCARANO, Fabio Rubio. Plant communities at the periphery of the Atlantic rain forest: rare-species bias and its risks for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1201-1208, 2009.

SCUDELLER, Veridiana Vizoni; MARTINS, Fernando Roberto; SHEPHERD, George John. Distribution and abundance of arboreal species in the atlantic ombrophilous dense forest in Southeastern Brazil. **Plant ecology**, v. 152, p. 185-199, 2001.

SIEFERT, Andrew *et al.* Scale dependence of vegetation–environment relationships: a meta-analysis of multivariate data. **Journal of Vegetation Science**, v. 23, n. 5, p. 942-951, 2012.

SILVA-JUNIOR, Valdecir *et al.* Landscape urbanization threatens plant phylogenetic diversity in the Brazilian Atlantic Forest. **Urban Ecosystems**, v. 21, p. 625-634, 2018.

SILVA-SOUZA, Karla JP; SOUZA, Alexandre F. Woody plant subregions of the Amazon forest. **Journal of Ecology**, v. 108, n. 6, p. 2321-2335, 2020.

SOUZA, Loana Araújo Silva; EISENLOHR, Pedro V. Drivers of floristic variation in biogeographic transitions: insights from the ecotone between the largest biogeographic domains of South America. **Acta Botanica Brasilica**, v. 34, p. 155-166, 2020.

SVENNING, Jens-Christian, *et al.* Geography, topography, and history affect realized-to-potential tree species richness patterns in Europe. **Ecography**, v. 33, p. 1070-1080, 2010.

TAMME, Riin *et al.* Environmental heterogeneity, species diversity and co-existence at different spatial scales. **Journal of Vegetation Science**, v. 21, n. 4, p. 796-801, 2010.

TER BRAAK, Cajo JF. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. **Ecology** 67, n. 5, p. 1167-1179, 1986.

THOMPSON, Ross; TOWNSEND, Colin. A truce with neutral theory: local deterministic factors, species traits and dispersal limitation together determine patterns of diversity in stream invertebrates. **Journal of Animal Ecology**, v. 75, n. 2, p. 476-484, 2006.

TORRES, Roseli Buzanelli; MARTINS, Fernando Roberto; KINOSHITA, Luiza Sumiko. Climate, soil and tree flora relationships in forests in the state of São Paulo, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 20, p. 41-49, 1997.

WRIGHT, S. Joseph. The future of tropical forests. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1195, n. 1, p. 1-27, 2010.

ZWIENER, Victor P.; PADIAL, Andre A.; MARQUES, Márcia CM. The mechanisms explaining tree species richness and composition are convergent in a megadiverse hotspot. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 3, p. 799-815, 2020.

## **CAPÍTULO 2**

**SINGULARIDADE DA FLORESTA ESTACIONAL DA FALHA DE CAMPOS DOS  
GOYTACAZES E FATORES QUE EXPLICAM A VARIAÇÃO FLORÍSTICA NO  
SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA**

## RESUMO

Na região norte-noroeste fluminense, as Florestas Ombrófilas (FO) sofrem uma descontinuidade na sua distribuição, onde as Florestas Estacionais Semidecíduas (FES) chegam até a costa, região denominada "Falha de Campos dos Goytacazes". Este estudo avaliou se a Floresta Estacional na Falha de Campos dos Goytacazes (FES-FCG) apresenta uma composição florística distinta em relação às FES e FO das regiões adjacentes (São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo). Também identificou os preditores que podem influenciar essa variação. Foram selecionados 134 sítios ao longo da Bacia Hidrográfica Paraíba do Sul e Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo, totalizando 2096 espécies, utilizando a base de dados NeoTropTree. As análises incluíram agrupamento K-means, teste de significância dos grupos por Análise de Similaridade com distância de Simpson e avaliação da qualidade dos grupos com o índice Calinski-Harabasz. Além disso, foram realizadas uma Análise de Espécies Indicadoras e uma Análise de Redundância (tb-RDA) com Mapas de Autovetores de Moran como preditores espaciais e variáveis bioclimáticas e edafotopográficas como preditores ambientais. Os resultados revelaram que as FES-FCG formam um grupo florístico distinto em relação às FES e FO adjacentes. Apesar de sua distinção, as FES-FCG são mais similares às FO vizinhas do que às FES das regiões adjacentes. Na análise de partição da variação, os preditores ambientais explicaram 14% da variação florística total. Dentro desse contexto, 2% foram identificados como independentes da autocorrelação espacial. Adicionalmente, 11% da variação foi explicada por uma estrutura espacial, enquanto 72% da variação permaneceu sem explicação. O pH do solo e a sazonalidade da evapotranspiração foram identificados como variáveis que melhor explicaram os padrões fitogeográficos na região. *Parapiptadenia pterosperma*, *Trigoniodendron spiritusanctense* e *Brasiliopuntia brasiliensis* foram consideradas espécies indicadoras dessa formação.

**Palavras-Chave:** Fitogeografia; Gradientes ambientais; Composição de espécies.

## ABSTRACT

In the north-northwest region of Rio de Janeiro, the Ombrophylous Forests (FO) suffer a discontinuity in their distribution, where the Semideciduous Seasonal Forests (FES) reach the coast, a region called "Campos dos Goytacazes Gap". This study evaluated whether the Seasonal Forest in the Campos dos Goytacazes Gap (FES-FCG) presents a different floristic composition in relation to the FES and FO of the adjacent regions (São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais and Espírito Santo). It also identified the predictors that may influence this variation. 134 sites were selected along the Paraíba do Sul Hydrographic Basin and Coastal areas of Rio de Janeiro and Espírito Santo, totaling 2096 species, using the NeoTropTree database. Analyzes included K-means clustering, group significance testing using Similarity Analysis with Simpson's distance and evaluation of the quality of groups using the Calinski-Harabasz index. Furthermore, an Indicator Species Analysis and a Redundancy Analysis (tb-RDA) were carried out with Moran Eigenvector Maps as spatial predictors and bioclimatic and edaphotopographic variables as environmental predictors. The results revealed that the FES-FCG form a distinct floristic group in relation to the adjacent FES and FO. Despite their distinction, FES-FCG are more similar to neighboring FO than to FES from adjacent regions. In the variation partition analysis, environmental predictors explained 14% of the total floristic variation. Within this context, 2% were identified as independent of spatial autocorrelation. Additionally, 11% of the variance was explained by spatial structure, while 72% of the variance remained unexplained. Soil pH and evapotranspiration seasonality were identified as variables that best explained phytogeographic patterns in the region. *Parapiptadenia pterosperma*, *Trigoniodendron spiritusanctense* and *Brasiliopuntia brasiliensis* were considered indicator species of this formation.

**Keywords:** Phytogeography; Environmental Gradients; Species Composition.

## 1. INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é reconhecida como um dos biomas mais ricos e ameaçados do mundo. Devido à sua grande diversidade biológica e grau de degradação foi considerada um dos *hotspots* de biodiversidade mundial para conservação da natureza (MYERS et al., 2000; MITTERMEIER et al., 2004). Dentro dessa extensa região, as Florestas Estacionais Semidecíduas e Florestas Ombrófilas se destacam por suas características ecológicas e por sua relevância na conservação da biodiversidade (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000).

Um local de particular interesse para o estudo dessas florestas é a região da Falha de Campos dos Goytacazes, localizada no sudeste da Mata Atlântica, no norte e noroeste fluminense. A Falha de Campos dos Goytacazes é uma área caracterizada por uma interrupção biogeográfica natural na distribuição das florestas ombrófilas litorâneas, que cedem espaço para a ocorrência das Florestas Estacionais Semidecíduas, que atingem o litoral (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000; OLIVEIRA-FILHO, et al., 2005). Sua paisagem abriga uma extensa planície deltaica, composta por diversos ambientes deposicionais, como áreas flúvio-lagunares, que se separam da costa por cristas de cordões arenosos. Estes terrenos possuem solos com elevados teores de sais e enxofre (DANTAS et al., 2005).

Adentrando o interior dessa região, a baixada flúvio-deltaica conformada pelo rio Paraíba do Sul apresenta solos mais drenados, como os Neossolos e Cambissolos Flúvicos. Além disso, nas proximidades da baixada Campista, os tabuleiros, que são constituídos por sedimentos terciários do Grupo Barreiras, ocupam porções do Norte Fluminense, caracterizando-se por terrenos planos ou suavemente ondulados e solos profundos e bem drenados (CONCEIÇÃO, 1989).

A região também se destaca por suas temperaturas mais elevadas, variando entre 24 e 26°C, e pelas baixas precipitações anuais, situando-se entre 1.000 e 1.200 mm, em comparação com outras áreas do estado do Rio de Janeiro (BOHN et al., 2021). Essas condições climáticas são em parte influenciadas pelo fenômeno oceanográfico de ressurgência da Corrente das Malvinas, resultando em períodos prolongados e intensos de seca na região (ARAÚJO, 1997; OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Como resultado, a vegetação predominante na região consiste principalmente de Floresta Estacional

Semidecidual, com uma pequena porção de Floresta Ombrófila Densa ao sul (BERGALLO et al., 2009).

Apesar de existirem na literatura científica importantes trabalhos realizados na região sudeste da Mata Atlântica, como, por exemplo, os estudos de Oliveira-Filho e Fontes (2000) e Oliveira-Filho et al. (2005) e os avanços trazidos por Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015), ainda existem lacunas que precisam ser preenchidas para um entendimento mais detalhado da diversa e complexa região da Falha de Campos dos Goytacazes. Parte dessas lacunas consiste em entender as relações entre a vegetação Estacional Semidecidual da Falha de Campos com suas vizinhas Estacionais e Ombrófilas, bem como os fatores que moldam sua distribuição. A compreensão desses aspectos é de extrema importância para o manejo e conservação desses ecossistemas, especialmente por se tratar de um ambiente com histórico de crescente degradação e ameaças à biodiversidade (NASCIMENTO; LIMA, 2008; RIBEIRO et al., 2009).

Nesse contexto, o presente estudo examina a variação da composição de espécies arbóreas na região sudeste da Mata Atlântica, com ênfase na Floresta Estacional Semidecídua na Falha de Campos dos Goytacazes. Busca especificamente verificar se essa floresta possui uma identidade florística distinta em relação às florestas estacionais vizinhas, bem como identificar os componentes ambientais e espaciais que podem estar influenciando essa variação.

Para isso, busca responder às seguintes perguntas: (i) As florestas estacionais semidecíduais na Falha de Campos dos Goytacazes formam um grupo florístico distinto das florestas estacionais e ombrófilas adjacentes? (ii) Quais componentes explicam a variação da composição de espécies arbóreas entre as florestas da Falha de Campos dos Goytacazes e as florestas adjacentes? (iii) Quais são as espécies arbóreas indicadoras da região da Falha de Campos dos Goytacazes?

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

## 2.1 ÁREA DE ESTUDO, BASE DE DADOS E VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Foi construído um banco de dados florísticos abrangendo 134 sítios na região sudeste da Mata Atlântica brasileira, situados entre as latitudes 19° e 24°S e longitudes 40° a 47°O. A área de estudo foi delimitada pelos limites da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e as sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, contemplando os estados Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Essa delimitação permitiu abranger toda a variação florística da Falha de Campos dos Goytacazes e áreas adjacentes (Figura 1).

A Falha de Campos dos Goytacazes não apresenta um limite geográfico definido, sendo sua descrição essencialmente teórica (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Nesse sentido, para elaboração da presente tese, optou-se por uma abordagem pragmática na delimitação da área da Falha de Campos dos Goytacazes. Para isso, foram considerados os limites políticos das regiões Norte e Noroeste fluminense e sítios de florestas estacionais do Espírito Santo nas proximidades dessas delimitações políticas (Figura 1).

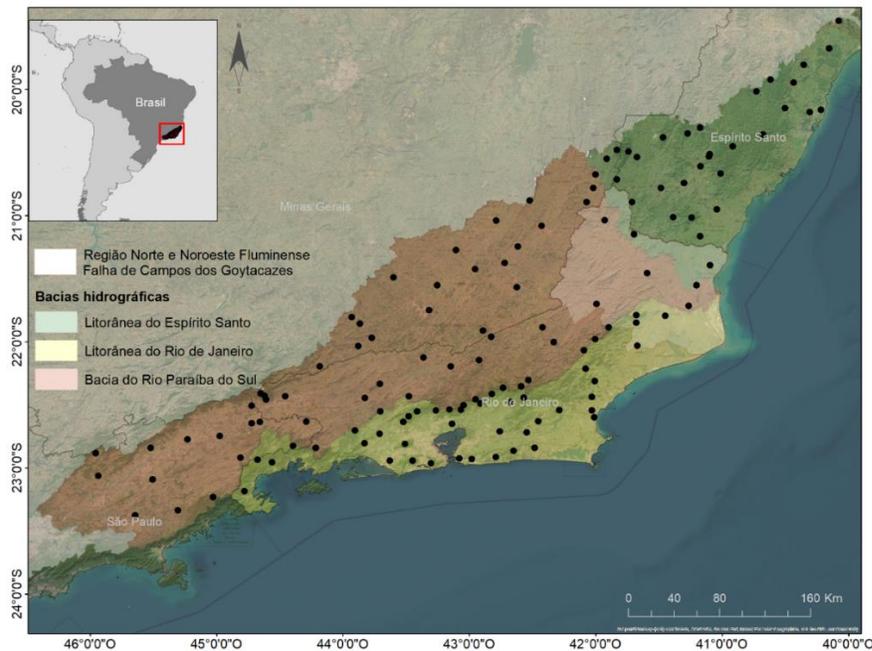


Figura 1. Distribuição dos 134 sítios e delimitação das bacias hidrográficas no sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor)

Para a construção do banco de dados florísticos, foram selecionados cerca de 45.000 registros de 2.096 espécies de árvores, utilizando o banco de dados NeoTropTree (NTT) (OLIVEIRA-FILHO, 2017). Esse banco de dados é uma compilação de registros de presença e ausência de espécies arbóreas para sítios georreferenciados em toda a região neotropical (OLIVEIRA-FILHO, 2017; EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015). Cada sítio corresponde a uma área circular com raio de 5 km (OLIVEIRA-FILHO, 2017; EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015).

A grafia e o status taxonômico de todas as espécies do banco de dados florístico foram verificados por meio do PlantMiner (<http://plantminer.com/>), Flora do Brasil 2020 (<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>) e The Plant List (<http://www.theplantlist.org/>), resultando em 3.856 registros com nomenclatura atualizada. Para as variáveis ambientais, foi utilizado um conjunto de 59 variáveis preditoras, composto por 39 variáveis bioclimáticas, 13 variáveis edáficas e sete variáveis topográficas, com resolução espacial de 10 km (Tabela 1).

Tabela 1. Conjunto de variáveis ambientais obtidas para 134 sítios no sudeste da Mata Atlântica brasileira.

<b>Variáveis Ambientais</b>	<b>Fonte</b>
Temperatura Média Anual	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Amplitude Térmica Diária Média	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Isotermalidade	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Sazonalidade da Temperatura	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Máxima do Mês mais Quente	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Mínima do Mês mais Frio	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Amplitude Térmica Anual	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Média do Trimestre mais Chuvoso	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Média do Trimestre mais Seco	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Média do Trimestre mais Quente	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Temperatura Média do Trimestre mais Frio	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação Anual	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Mês mais Chuvoso	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Mês mais Seco	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Sazonalidade da Precipitação	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Trimestre mais Chuvoso	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Trimestre mais Seco	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Trimestre mais Quente	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Precipitação do Trimestre mais Frio	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Pressão de Vapor de Água (Mínima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Pressão de Vapor de Água (Máxima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Pressão de Vapor de Água (Média)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Velocidade do Vento (Mínima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)

---

Velocidade do Vento (Máxima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Velocidade do Vento (Média)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Radiação Solar (Mínima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Radiação Solar (Média)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Radiação Solar (Máxima)	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Cobertura de Nuvens (Mínima)	Earthenv (Wilson, 2016)
Cobertura de Nuvens (Média)	Earthenv (Wilson, 2016)
Cobertura de Nuvens (Máxima)	Earthenv (Wilson, 2016)
Índice de Aridez Anual	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Potencial Média Anual	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Potencial do Trimestre Mais Frio	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Potencial do Trimestre Mais Quente	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Potencial do Trimestre Mais Úmido	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Potencial do Trimestre Mais Seco	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Sazonalidade da Evapotranspiração Potencial	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Evapotranspiração Real Média Anual	Cgiar-Csi (Trabucco; Zomer, 2019)
Estresse Hídrico do Solo (Média Anual)	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Estresse Hídrico do Solo (Máximo)	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Estresse Hídrico do Solo (Mínimo)	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Densidade Aparente de Solo	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Conteúdo de Argila	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Conteúdo de Areia	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Conteúdo de Silte	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Profundidade de Rocha (Até 200m)	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Fragmentos Grosseiros Volumétricos Em%	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Probabilidade de Ocorrência do Horizonte R	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Teor de Carbono Orgânico no Solo	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Capacidade de Troca de Cátions do Solo	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Índice de Ph (Solução de H <sub>2</sub> O)	Soil Grids (Hengl et al., 2014)
Elevação	Worldclim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017)
Orientação De Vertente (Leste)	Earthenv (Amatulli et al., 2018)
Orientação De Vertente (Norte)	Earthenv (Amatulli et al., 2018)
Inclinação do Terreno	Pacote "Raster" (Hijmans et al., 2017)
Índice de Umidade Topográfica	Envirem (Title; Bemmels, 2018)
Modelo de Relevo Global	UNEP ( <a href="http://geodata.grid.unep.ch/">http://geodata.grid.unep.ch/</a> )
Índice de Rochosidade do Terreno	Envirem (Title; Bemmels, 2018)

---

(Fonte: Elaborada pelo autor)

## 2.2 ANÁLISE DE DADOS

### 2.2.1 *Análise de Agrupamento*

Primeiro, foi avaliado se os sítios localizados na floresta estacional da Falha de Campos dos Goytacazes formam um grupo florístico coeso, distinto dos sítios localizados nas florestas estacionais e ombrófilas adjacentes. Uma das análises utilizadas para esta etapa foi análise de cluster não hierárquica k-means, usando a função "kmeans" do

pacote *stats* (TEAM et al., 2018) em ambiente R, versão 4.3.0 (TEAM, 2023). Existem vários métodos de agrupamento disponíveis, e o k-means tem demonstrado bons resultados em estudos biogeográficos (TICHÝ; CHYTRÝ; SMARDA, 2011; VAVREK, 2016; FRANCOSE et al., 2020). O k-means divide os pontos de dados em clusters com base na proximidade. Ele escolhe k pontos como centroides e atribui os pontos ao centroide mais próximo usando a distância euclidiana. Os centroides são atualizados usando a média dos pontos no grupo e o processo é repetido até que os centroides parem de se mover ou o número máximo de iterações seja atingido (MACQUEEN, 1967).

Para determinar o número ideal de clusters para o algoritmo k-means, foram testados diversos valores de k, variando de 2 a 20 (referidos daqui em diante como "números de clusters candidatos"). Em seguida, foi utilizado o teste ANOSIM (Análise de Similaridades), usando a função "anosim" do pacote *vegan* (OKSANEN et al., 2022), com 999 permutações e o coeficiente de distância de Simpson, para avaliar a significância estatística de cada número de cluster candidato. O teste ANOSIM compara as similaridades entre grupos através de permutações e identifica diferenças estatisticamente significativas. O valor R Anosim varia de -1 a 1, sendo que valores próximos a 1 indicam que as amostras dentro dos clusters são mais semelhantes entre si do que as amostras entre os clusters (CLARKE; GREEN, 1988). Optou-se pelo uso do coeficiente de distância de Simpson porque ele é menos afetado pela variação na riqueza de espécies em comunidades com grandes diferenças na abundância de espécies entre as unidades amostrais (BASELGA; JIMÉNEZ-VALVERDE; NICCOLINI, 2007).

Para avaliar a qualidade dos números de clusters candidatos, foi utilizado o índice Calinski-Harabasz (CALIŃSKI; HARABASZ, 1974; LEGENDRE; LEGENDRE, 2012). Esse índice calcula a razão entre a soma das dispersões entre os grupos e a soma das dispersões dentro dos grupos. Quanto maior o valor do índice Calinski-Harabasz, melhor é a qualidade do agrupamento (ZHAO et al., 2023).

Por fim, para determinar o número ideal de clusters, foi calculada a média dos valores R Anosim ( $\mu = 0.585$ ) e selecionados apenas os números de clusters candidatos que resultaram em valores R Anosim maiores do que 0,6. Essa abordagem permitiu identificar e separar os potenciais número de clusters que apresentaram valores R Anosim maiores do que a média, indicando uma separação mais distinta entre os grupos. A partir dos números de clusters candidatos selecionados pelo limiar, foi selecionado

aquele que apresentou o maior valor do índice Calinski-Harabasz como o número ideal de clusters.

### 2.2.2 *Análise de Espécies Indicadoras*

Para identificar as espécies arbóreas mais associadas à Falha de Campos dos Goytacazes em relação às vegetações adjacentes, foi conduzida uma Análise de Espécies Indicadoras (ISA) utilizando a função “multipatt” do pacote *IndicSpecies* (CÁCERES; LEGENDRE, 2009), com um total de 9999 iterações. O ISA calcula um valor de associação para cada espécie em relação a cada cluster, levando em consideração tanto a especificidade quanto a fidelidade da espécie ao cluster. O valor da espécie indicadora é maior quando todas as ocorrências da espécie estão restritas a um único cluster e quando a espécie ocorre em todos os sítios desse cluster. Os valores de associação significativos indicam que a espécie é fortemente associada ao cluster (CÁCERES; LEGENDRE, 2009).

Na literatura científica ainda não existe um consenso quanto ao valor específico para definir o limite em que uma espécie pode ser considerada indicadora. Portanto, foi adotado um limiar pouco restritivo (0,4), levando em consideração possíveis déficits de conhecimento sobre a distribuição das espécies deste estudo. Assim, foi possível selecionar espécies com valores indicadores elevados, bem como aquelas que possuem alguma relevância indicativa, garantindo, assim, uma maior diversidade de espécies em cada cluster.

### 2.2.3 *Análise de Redundância e Partição da Variação Florística*

Para modelar a distribuição das espécies em relação às variáveis ambientais e espaciais, foi realizada uma Análise Canônica de Redundância baseada em transformação (tb-RDA) (LEGENDRE; GALLAGHER, 2001; BORCARD et al., 2011). Primeiro, foram removidas da matriz binária (presença-ausência) as espécies com ocorrência única (385 espécies removidas) e, em seguida, essa matriz foi submetida à transformação de Hellinger (LEGENDRE; GALLAGHER, 2001). Foi construído um

modelo ambiental usando a matriz contendo as variáveis ambientais mais as coordenadas geográficas de longitude e latitude de cada sítio. Foi utilizada a função “decostand” do pacote *vegan* (OKSANEN et al., 2022) para padronizar as escalas dessas variáveis. Em seguida, as multicolinearidades das variáveis foram reduzidas a partir do cálculo do Fator de Inflação da Variância (VIF) (BORCARD et al., 2011). Dessa forma, as variáveis com valor de VIF superior a 10 foram removidas progressivamente utilizando a função “vifcor” do pacote *usdm* (NAIMI, 2014).

Para obter um conjunto de variáveis mais ajustado aos dados da matriz florística, foi realizada uma seleção progressiva no conjunto de variáveis preditoras selecionadas pelo VIF, utilizando a função “forward.sel” do pacote *adespatial* (DRAY et al. 2020). A seleção progressiva foi executada somente quando o modelo global, realizado através de uma Análise de Redundância (RDA) contendo todas as variáveis selecionadas pelo VIF, foi significativo (BLANCHET; LEGENDRE; BORCARD, 2008).

Para obter os preditores espaciais, foram selecionadas 21 Matrizes de Ponderação Espacial (SWM) (BAUMAN et al. 2018) (tabela 2). Para cada SWM, foram extraídas 133 variáveis espaciais (número de sítios menos 1), a partir da longitude e latitude dos sítios. A construção das variáveis espaciais se deu pelo método MEM (Mapas de Autovetores de Moran) (DRAY; LEGENDRE; PERES-NETO, 2006). Logo, a seleção das variáveis espaciais (MEMs) foi efetuada em procedimentos independentes de seleção progressiva (uma seleção progressiva para cada SWM dentre 21 candidatos). A seleção do SWM foi efetuada pela função “listw.select” do pacote *adespatial* (DRAY et al. 2018). Assim como para as variáveis ambientais, a seleção progressiva para variáveis espaciais somente foi realizada quando o modelo global foi significativo (BAUMAN et al. 2018).

Tabela 2. Matrizes de Ponderação Espacial (SWM) candidatas para seleção de variáveis espaciais a partir do método de seleção progressiva (Blanchet et al. 2008).

<b>Matrizes de Ponderação Espacial - (SWM) (candidatos)</b>			
"DBEM_PCNM"	"Delaunay_Binary"	"Delaunay_Linear"	"Delaunay_Down_5"
"Delaunay_Up_0.5"	"Gabriel_Binary"	"Gabriel_Linear"	"Gabriel_Down_5"
"Gabriel_Up_0.5"	"Relative_Binary"	"Relative_Linear"	"Relative_Down_5"
"Relative_Up_0.5"	"MST_Binary"	"MST_Linear"	"MST_Down_5"
"MST_Up_0.5"	"Dnear0.43_Binary"	"Dnear0.43_Linear"	"Dnear0.43_Down_5"
"Dnear0.43_Up_0.5"			

(Fonte: Elaborada pelo autor)

Por fim, para verificar a influência dos fatores ambientais e espaciais sobre a variação florística, foram construídos três modelos canônicos com base na composição das espécies arbóreas (matriz florística) e nas variáveis ambientais e espaciais selecionadas. O primeiro modelo correspondeu ao ambiente descontando o efeito do espaço; o segundo correspondeu ao espaço descontando o efeito do ambiente; o terceiro correspondeu ao modelo ambiental-espacial, considerando tanto as variáveis ambientais quanto as variáveis espaciais.

Assim, foi possível particionar a variância florística dos sítios em função de três frações preditoras: [a] ambiente puro, [b] fração compartilhada entre ambiente e espaço e [c] espaço puro. Foi obtida ainda a fração [d], que é a porção indeterminada do modelo (resíduos). Na partição da variância foram utilizadas as funções “varipart” do pacote *ade4* (DRAY; DUFOUR, 2007) e “msr.varipart” do pacote *adespatial* (DRAY et al. 2018). A significância estatística das frações [a] e [c] foram testadas por análises de variância (ANOVA) baseadas em permutações. A fração [b] foi testada pela função “envspace.test” do pacote *adespatial* (DRAY et al. 2018).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 GRUPOS FLORÍSTICOS

A aplicação da técnica de análise de cluster k-means revelou a identificação de clusters distintos em parte do sudeste da Mata Atlântica, conforme evidenciado pelos resultados do teste ANOSIM. A análise indicou que todos os números de clusters candidatos ( $k = 2$  a 20) diferiram significativamente do esperado pelo acaso ( $p = 0,001$ ). Os valores de R Anosim variaram de 0,402 ( $k=4$ ) a 0,684 ( $k=17$ ), sugerindo um aumento geral do valor R Anosim à medida que o número de clusters aumenta, com algumas flutuações. Os números de clusters candidatos selecionados com base nos limiares dos valores de R Anosim foram 8, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 (Figura 2a).

A avaliação da qualidade dos agrupamentos utilizando o índice Calinski-Harabasz revelou que  $k = 8$  apresentou o maior valor do índice (13,29), como representado na Figura 2b. Portanto, com base na significância estatística do teste ANOSIM (ANOSIM R = 0,601,  $p = 0,001$ ) e no maior valor do índice Calinski-Harabasz, o número ideal de clusters foi escolhido como  $k = 8$ . Essa escolha considerou também a possibilidade de que um número elevado de clusters poderia fragmentar os dados, comprometendo a compreensão geral da estrutura dos agrupamentos.

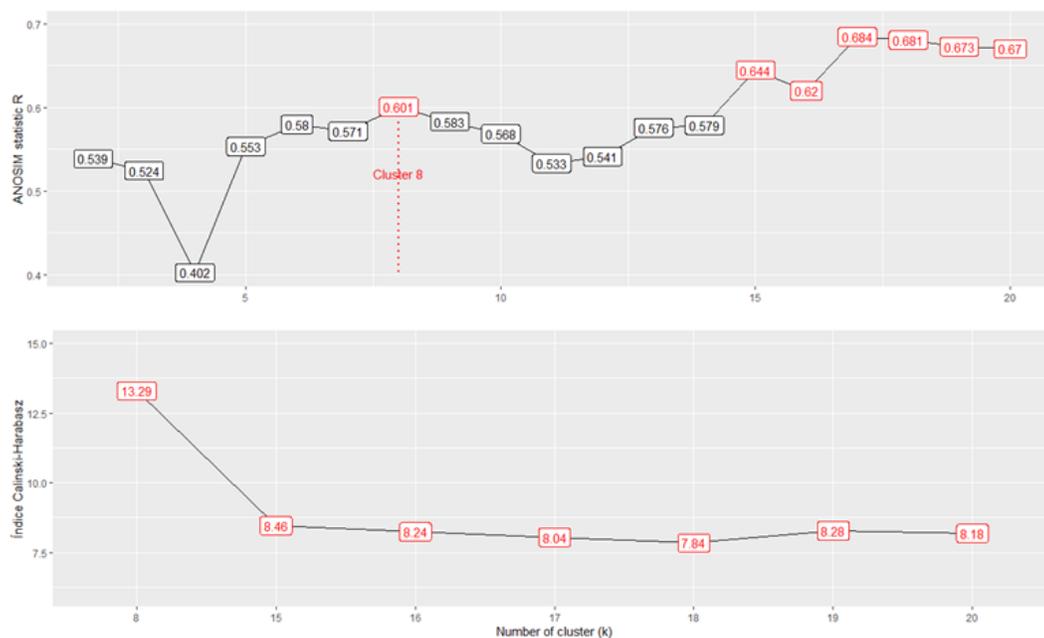


Figura 2. Números de clusters candidatos selecionados com base nos valores de R Anosim (Análise de Similaridade) (a) e índice Calinski-Harabasz (b) na análise de agrupamento k-means de 134 sítios de espécies arbóreas na região sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor).

Os oito clusters resultantes da análise k-means foram identificados geograficamente (Figura 3). O cluster 1 (roxo) e o cluster 5 (amarelo) foram formados por sítios de Florestas Ombrófilas Submontanas e Terras Baixas, respectivamente, distribuídos na região metropolitana do Rio de Janeiro e baixada fluminense (Figura 3b, Tabela 3). O cluster 2 (azul) foi formado por Florestas Ombrófilas Alto-Montanas, com sítios distribuídos na região sul fluminense, região metropolitana do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo. Os clusters 3 e 7 (verde claro e verde escuro) foram formados exclusivamente por Florestas

Estacionais Semidecíduas Submontana e Montana, respectivamente, distribuídos na região central e sul da bacia do Paraíba do Sul.

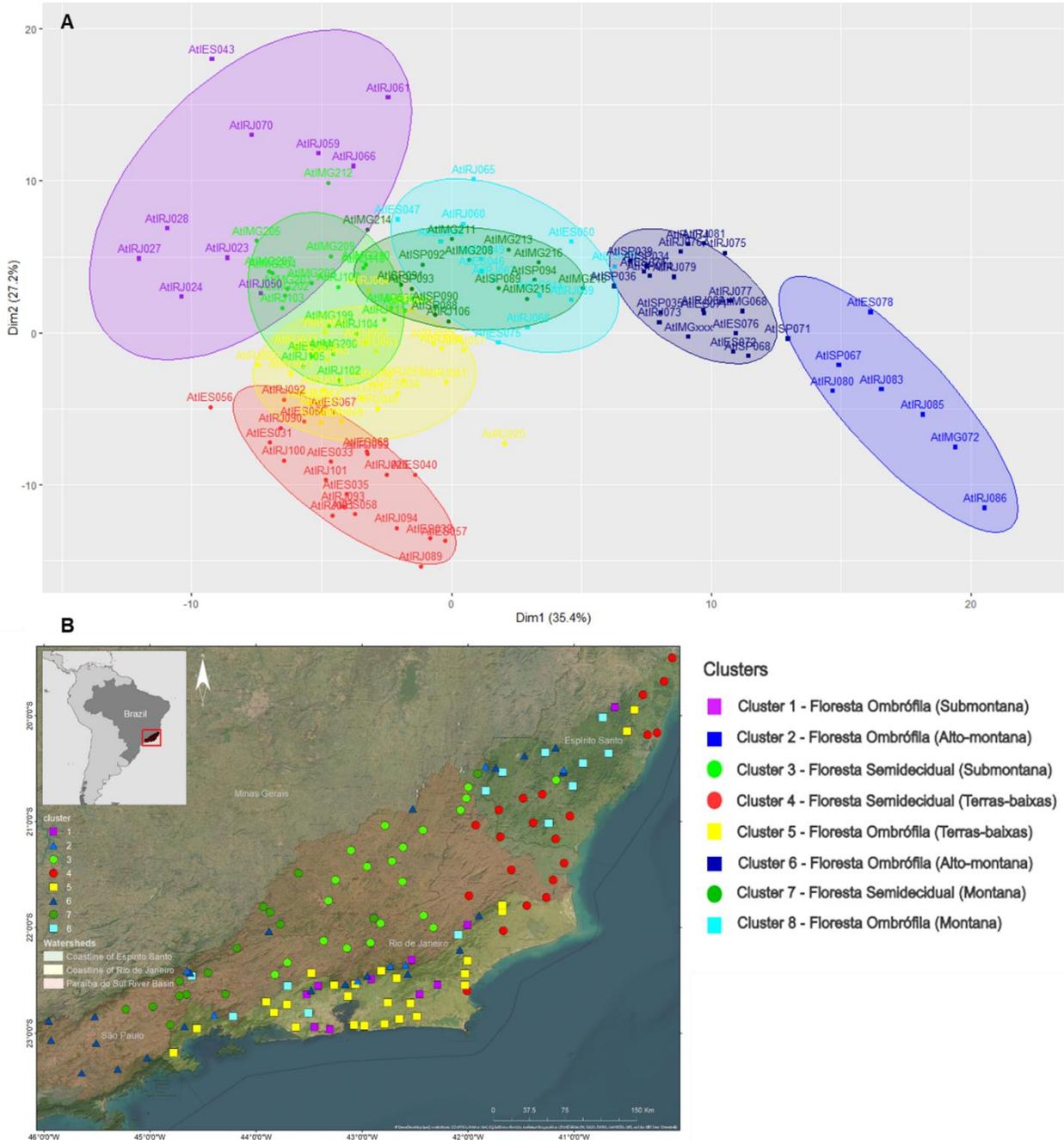


Figura 3. Agrupamentos e distribuição geográfica dos 134 sítios de espécies arbóreas de parte da Região Sudeste do Brasil. (Fonte: Elaborada pelo autor).

O cluster 6 (azul-marinho) foi formado pelas Florestas Ombrófilas alto-montanas, e o cluster 8 (azul-claro) formado por Florestas Ombrófilas Montanas, distribuídos na região sul do Espírito Santo, região metropolitana do Rio de Janeiro e região norte do Estado de São Paulo (Figura 3B, Tabela 3). O cluster 4 (vermelho) foi formado por sítios de Florestas Estacionais Semidecíduas de Terras baixas na região norte e noroeste fluminense, área conhecida como “Falha de Campos dos Goytacazes”, e por sítios de Florestas Estacionais Semidecíduas a Perenifólias do norte do Espírito Santo (Figura 3B, Tabela 3).

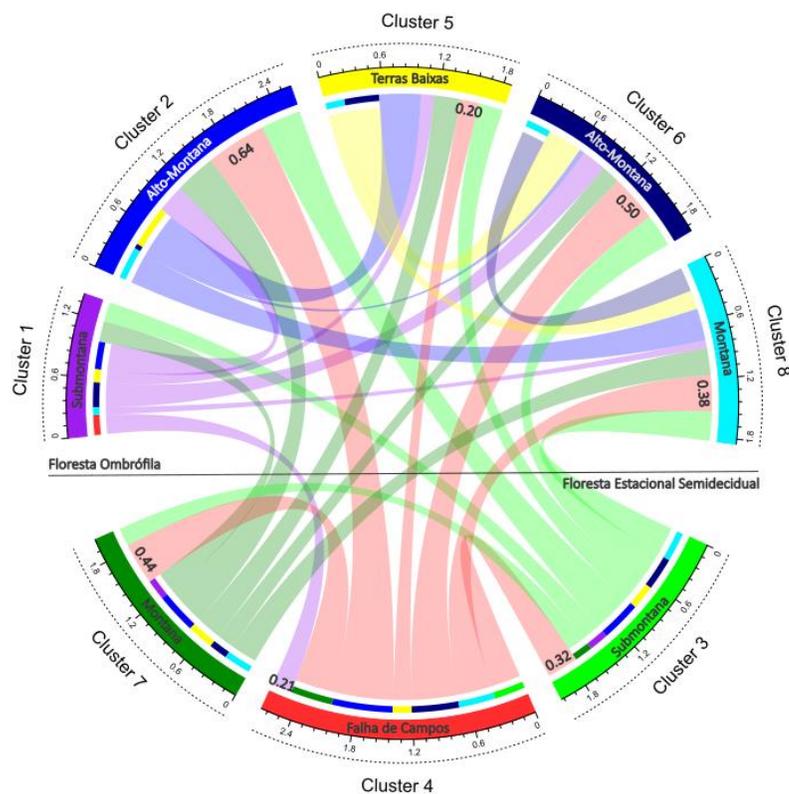


Figura 4. Dissimilaridade de Simpson entre os clusters formados pela análise de agrupamento k-means de 134 sítios de espécies arbóreas de parte da Região Sudeste da Mata Atlântica brasileira. (Fonte: Elaborada pelo autor)

Quanto à dissimilaridade interclusters, o Cluster 4, representando Florestas Estacionais da Falha de Campos, apresentou maior dissimilaridades com o Cluster 2 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,64, Cluster 7 (Floresta Estacional Montana) 0,44 e

Cluster 6 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,50. Em contrapartida, a menor dissimilaridade foi observada em relação ao Cluster 1 (Floresta Ombrófila Submontana): 0,21 e Cluster 5 (Floresta Ombrófila de Terras Baixas): 0,20 (Figura 4, Tabela 3).

No que diz respeito aos clusters das florestas Estacionais adjacentes à Falha de Campos, o Cluster 7 apresentou maior dissimilaridade com o Cluster 4 (Estacional de Terras Baixas) 0,44 e Cluster 2 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,43. As menores dissimilaridades foram observadas com Cluster 3 (Floresta Estacional Submontana) 0,19 e Cluster 6 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,20. No entanto, para o Cluster 3, as maiores dissimilaridades foram entre o Cluster 2 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,42 e Cluster 6 (Floresta Ombrófila Altomontana) 0,35. Já as menores foram com o Cluster 7 (Floresta Estacional Montana) 0,19 e o Cluster 1 (Floresta Ombrófila Submontana) 0,21 (figura 4).

Tabela 3. Análise de agrupamento K-means aplicada à composição de espécies arbóreas em 134 sítios no sudeste da Mata Atlântica brasileira. São mostrados os códigos dos sítios, os tipos principais e específicos de vegetação e a altitude média que compõem cada cluster.

Cluster	Principal tipo de vegetação (IBGE)	Códigos dos sítios	Altitude Média
1	Floresta Ombrófila (Submontana)	AtIES043, AtIRJ023, AtIRJ024, AtIRJ027, AtIRJ028, AtIRJ050, AtIRJ059, AtIRJ061, AtIRJ066, AtIRJ070.	506.9
2	Floresta Ombrófila (Alto-Montana)	AtIES078, AtIMG072, AtIRJ080, AtIRJ083, AtIRJ085, AtIRJ086, AtISP067.	1698.3
3	Floresta Estacional Semidecidual (Submontana)	AtIES055, AtIMG199, AtIMG200, AtIMG201, AtIMG202, AtIMG203, AtIMG204, AtIMG205, AtIMG206, AtIMG207, AtIMG209, AtIMG210, AtIMG212, AtIRJ102, AtIRJ103, AtIRJ104, AtIRJ105, AtIRJ107, AtIRJ109, AtIRJ110, AtIRJ111.	539.1
4	Floresta Estacional Semidecidual (Terras Baixas)	AtIES031, AtIES032, AtIES033, AtIES035, AtIES040, AtIES056, AtIES057, AtIES058, AtIES066, AtIES067, AtIES068, AtIRJ026, AtIRJ089, AtIRJ090, AtIRJ091, AtIRJ092, AtIRJ093, AtIRJ094, AtIRJ099, AtIRJ100, AtIRJ101.	178.8
5	Floresta Ombrófila (Terras Baixas)	AtIES034, AtIES039, AtIRJ021, AtIRJ022, AtIRJ025, AtIRJ029, AtIRJ030, AtIRJ031, AtIRJ032, AtIRJ033, AtIRJ034, AtIRJ036, AtIRJ040, AtIRJ041, AtIRJ042, AtIRJ043, AtIRJ044, AtIRJ045, AtIRJ046, AtIRJ047, AtIRJ048, AtIRJ049, AtIRJ057, AtIRJ058, AtIRJ063, AtIRJ064.	294.8
6	Floresta Ombrófila (Alto-Montana)	AtIES071, AtIES072, AtIES074, AtIES076, AtIMG068, AtIMGxxx, AtIRJ073, AtIRJ074, AtIRJ075, AtIRJ076, AtIRJ077, AtIRJ079, AtIRJ081, AtIRJ082, AtISP034, AtISP035, AtISP036, AtISP039, AtISP068, AtISP071, AtISP074.	1187.9
7	Floresta Estacional Semidecidual (Montana)	AtIMG208, AtIMG211, AtIMG213, AtIMG214, AtIMG215, AtIMG216, AtIMG218, AtIRJ106, AtISP088, AtISP089, AtISP090, AtISP091, AtISP092, AtISP093, AtISP094.	772.9
8	Floresta Ombrófila (Montana)	AtIES044, AtIES046, AtIES047, AtIES048, AtIES049, AtIES050, AtIES073, AtIES075, AtIRJ060, AtIRJ065, AtIRJ067, AtIRJ068, AtIRJ069.	816.3

. (Fonte: Elaborada pelo autor)

### 3.2 ESPÉCIES INDICADORAS

Na análise de Espécies Indicadoras, o cluster 4 (que abrange os sítios da Falha de Campos e os sítios do norte do Espírito Santo) apresentou 39 espécies indicadoras pertencentes a 22 famílias distintas (Tabela 4A). As famílias Fabaceae (9), Rutaceae (5) e Myrtaceae (3) apresentaram o maior número de espécies indicadoras para esse cluster. Para focar exclusivamente nas espécies indicadoras da região da Falha de Campos, para esta etapa, foram considerados apenas os sítios dentro da área delimitada como Falha de Campos, resultando na seleção de 50 espécies indicadoras, distribuídas em 27 famílias (Tabela 4B). Novamente, as famílias mais representativas foram Fabaceae (11), Myrtaceae (7) e Rutaceae (3), o que reforça a relevância dessas famílias na identificação das espécies indicadoras para a Falha de Campos.

As espécies *Parapiptadenia pterosperma*, *Trigoniodendron spiritusanctense*, *Brasiliopuntia brasiliensis*, *Alseis pickelii* e *Centrolobium sclerophyllum* apresentaram os valores mais elevados, posicionando-se no topo do ranking de espécies indicadoras independentemente da remoção dos sítios do norte do Espírito Santo. Entretanto, após a exclusão dos sítios do norte do Espírito Santo, as espécies *Tabebuia roseoalba*, *Poeppigia procera*, *Andradea floribunda*, entre outras, ganharam destaque no ranking de indicadoras da região da Falha de Campos dos Goytacazes.

Tabela 4. A = Espécies indicadoras do cluster 4, formado por sítios de espécies arbóreas da Falha de Campos dos Goytacazes e sítios da região norte do Espírito Santo. B = Espécies indicadoras somente da Falha de Campos (sítios do norte do Espírito Santo foram removidos). Stat = média da componente especificidade com a fidelidade. P valores com níveis de significância = 5%.

**(A) Espécies Indicadoras do Cluster 4**

<b>Família</b>	<b>Espécie</b>	<b>Stat</b>	<b>P valor</b>
Fabaceae	<i>Parapiptadenia pterosperma</i> (Benth.) Brenan	0.82	0.005
Trigoniaceae	<i>Trigoniodendron spiritusanctense</i> E.F.Guim. & Miguel	0.79	0.005
Cactaceae	<i>Brasilopuntia brasiliensis</i> (Willd.) A.Berger	0.79	0.005
Capparaceae	<i>Crateva tapia</i> L.	0.78	0.005
Fabaceae	<i>Centrolobium sclerophyllum</i> H.C.Lima	0.76	0.005
Rhamnaceae	<i>Sarcomphalus platyphyllus</i> (Reissek) Hauenschild	0.72	0.005
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum passerinum</i> Mart.	0.64	0.005
Annonaceae	<i>Oxandra espintana</i> (Spruce ex Benth.) Baill.	0.64	0.005
Myrtaceae	<i>Psidium brownianum</i> Mart. ex DC.	0.63	0.005
Rubiaceae	<i>Alseis pickelii</i> Pilg. & Schmale	0.63	0.005
Capparaceae	<i>Monilicarpa brasiliiana</i> (Banks ex DC.) Cornejo & Iltis	0.6	0.005
Violaceae	<i>Rinorea bahiensis</i> (Moric.) Kuntze	0.6	0.005
Lauraceae	<i>Ocotea confertiflora</i> (Meisn.) Mez	0.59	0.005
Fabaceae	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	0.59	0.005
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana salzmännii</i> A.DC.	0.58	0.005
Fabaceae	<i>Grazilodendron rio-docensis</i> H.C.Lima	0.56	0.005
Fabaceae	<i>Andira nitida</i> Mart. ex Benth.	0.55	0.005
Sapindaceae	<i>Cupania rugosa</i> Radlk.	0.55	0.005
Rutaceae	<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	0.54	0.005
Celastraceae	<i>Monteverdia obtusifolia</i> (Mart.) Biral	0.53	0.005
Achatocarpaceae	<i>Achatocarpus praecox</i> Griseb.	0.49	0.005
Moraceae	<i>Brosimum glaucum</i> Taub.	0.49	0.005
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i> L.	0.49	0.005
Fabaceae	<i>Zollernia modesta</i> A.M.Carvalho & Barneby	0.49	0.005

Annonaceae	<i>Xylopia ochrantha</i> Mart.	0.46	0.02
Polygalaceae	<i>Acanthocladus pulcherrimus</i> (Kuhl.) J.Pastore & D.Cardoso	0.45	0.005
Salicaceae	<i>Casearia souzae</i> R. Marquete & Mansano	0.44	0.01
Myrtaceae	<i>Campomanesia espiritosantensis</i> Landrum	0.44	0.01
Euphorbiaceae	<i>Cnidocolus oligandrus</i> (Müll.Arg.) Pax	0.44	0.025
Rutaceae	<i>Conchocarpus albiflorus</i> (Bruniera & Groppo) Bruniera & Groppo	0.44	0.025
Fabaceae	<i>Dalbergia elegans</i> A.M.Carvalho	0.44	0.015
Ebenaceae	<i>Diospyros capreifolia</i> Mart. ex Hiern	0.44	0.015
Myrtaceae	<i>Eugenia selloi</i> (O. Berg) B.D. Jacks.	0.44	0.025
Rutaceae	<i>Pilocarpus grandiflorus</i> Engl.	0.44	0.015
Rutaceae	<i>Ravenia infelix</i> Vell.	0.44	0.02
Fabaceae	<i>Swartzia linharensis</i> Mansano	0.44	0.015
Fabaceae	<i>Zygia latifolia</i> (L.) Fawc. & Rendle	0.43	0.02
Solanaceae	<i>Solanum sycocarpum</i> Mart. & Sendtn.	0.4	0.03
Rutaceae	<i>Zanthoxylum acuminatum</i> (Sw.) Sw.	0.4	0.025

**(B) Espécies Indicadoras da Falha de Campos (Exclusivas)**

<b>Família</b>	<b>Espécie</b>	<b>Stat</b>	<b>P valor</b>
Fabaceae	<i>Parapiptadenia pterosperma</i> (Benth.) Brenan	0.85	0.005
Rubiaceae	<i>Alseis pickelii</i> Pilg. & Schmale	0.83	0.005
Cactaceae	<i>Brasiliopuntia brasiliensis</i> (Willd.) A.Berger	0.82	0.005
Fabaceae	<i>Centrolobium sclerophyllum</i> H.C.Lima	0.79	0.005
Trigoniaceae	<i>Trigoniadendron spiritusanctense</i> E.F.Guim. & Miguel	0.79	0.005
Capparaceae	<i>Monilicarpa brasiliiana</i> (Banks ex DC.) Cornejo & Iltis	0.77	0.005
Capparaceae	<i>Crateva tapia</i> L.	0.77	0.005
Fabaceae	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	0.74	0.005
Annonaceae	<i>Oxandra espintana</i> (Spruce ex Benth.) Baill.	0.73	0.005
Rhamnaceae	<i>Sarcomphalus platyphyllus</i> (Reissek) Hauenschild	0.72	0.005
Bignoniaceae	<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	0.7	0.005
Fabaceae	<i>Poeppigia procera</i> (Poepp. ex Spreng.) C. Presl	0.69	0.005

Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum passerinum</i> Mart.	0.68	0.005
Nyctaginaceae	<i>Andradea floribunda</i> Allemão	0.66	0.005
Fabaceae	<i>Grazilodendron rio-docensis</i> H.C.Lima	0.66	0.005
Fabaceae	<i>Acosmium lentiscifolium</i> Schott	0.64	0.005
Rutaceae	<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	0.64	0.005
Fabaceae	<i>Sweetia fruticosa</i> Spreng.	0.63	0.005
Polygonaceae	<i>Coccoloba alnifolia</i> Casar.	0.62	0.01
Meliaceae	<i>Trichilia pseudostipularis</i> (A.Juss.) C.DC.	0.61	0.005
Myrtaceae	<i>Eugenia astringens</i> Cambess.	0.6	0.005
Myrtaceae	<i>Psidium brownianum</i> Mart. ex DC.	0.59	0.005
Fabaceae	<i>Zollernia glabra</i> (Spreng.) Yakovlev	0.58	0.005
Myrtaceae	<i>Eugenia selloi</i> (O. Berg) B.D. Jacks.	0.58	0.005
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i> L.	0.58	0.005
Euphorbiaceae	<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng.	0.57	0.015
Myrtaceae	<i>Eugenia guanabarina</i> (Mattos & D.Legrand) Giaretta & M.C.Souza	0.57	0.005
Anacardiaceae	<i>Spondias macrocarpa</i> Engl.	0.56	0.005
Salicaceae	<i>Casearia souzae</i> R. Marquete & Mansano	0.54	0.005
Boraginaceae	<i>Cordia aberrans</i> I.M.Johnst.	0.52	0.01
Violaceae	<i>Rinorea bahiensis</i> (Moric.) Kuntze	0.51	0.01
Lauraceae	<i>Ocotea confertiflora</i> (Meisn.) Mez	0.5	0.01
Rutaceae	<i>Conchocarpus albiflorus</i> (Bruniera & Groppo) Bruniera & Groppo	0.5	0.005
Meliaceae	<i>Trichilia ramalhoi</i> Rizzini	0.48	0.005
Fabaceae	<i>Myroxylon peruiferum</i> L.f.	0.48	0.005
Myrtaceae	<i>Myrciaria guaquia</i> (Kiaersk.) Mattos & D.Legrand	0.47	0.025
Polygalaceae	<i>Acanthocladus pulcherrimus</i> (Kuhl.) J.Pastore & D.Cardoso	0.46	0.005
Fabaceae	<i>Andira nitida</i> Mart. ex Benth.	0.46	0.005
Lecythidaceae	<i>Lecythis schwackei</i> (R.Knuth) S.A.Mori	0.46	0.005
Solanaceae	<i>Solanum sycocarpum</i> Mart. & Sendtn.	0.46	0.015
Combretaceae	<i>Terminalia mameluco</i> Pickel	0.43	0.01
Cactaceae	<i>Pereskia grandifolia</i> Haw.	0.42	0.04
Achatocarpaceae	<i>Achatocarpus praecox</i> Griseb.	0.4	0.02
Myrtaceae	<i>Campomanesia dichotoma</i> (O.Berg) Mattos	0.4	0.035

Salicaceae	<i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.	0.4	0.035
Myrtaceae	<i>Eugenia gracillima</i> Kiaersk.	0.4	0.015
Celastraceae	<i>Monteverdia obtusifolia</i> (Mart.) Biral	0.4	0.025
Euphorbiaceae	<i>Philyra brasiliensis</i> Klotzsch	0.4	0.015
Rutaceae	<i>Ravenia infelix</i> Vell.	0.4	0.015
Fabaceae	<i>Zygia latifolia</i> (L.) Fawc. & Rendle	0.4	0.03

. (Fonte: Elaborada pelo autor)

### 3.3 VARIAÇÃO FLORÍSTICA E SEUS DETERMINANTES

Após o processo de seleção de variáveis ambientais pelo VIF, 17 das 59 variáveis preditoras foram mantidas. Dentre as 17 variáveis, o procedimento de seleção progressiva foi interrompido após o R2 cumulativo selecionar cinco variáveis preditoras (tabela 5). Para as variáveis espaciais, o SWM selecionado foi "Delaunay\_Up\_0.5" por ser o candidato que forneceu um conjunto de autovetores com melhor ajuste para explicar os padrões de variação na composição de espécies.

Tabela 5. Conjunto de variáveis preditoras selecionadas pelo procedimento de seleção progressiva.

<b>Variáveis</b>	<b>R2</b>	<b>R2Cum</b>	<b>AdjR2Cum</b>	<b>F</b>	<b>pValor</b>
<i>pH do Solo</i>	0.067619	0.06761	0.060556	9.5731	0.001
<i>Conteúdo de Argila</i>	0.036882	0.10450	0.090830	5.3954	0.001
<i>Cobertura de Nuvens (Mínima)</i>	0.030019	0.13452	0.114548	4.5090	0.001
<i>Sazonalidade da Evapotranspiração</i>	0.023519	0.15804	0.131933	3.6035	0.001
<i>Precipitação do Mês mais Chuvoso</i>	0.016962	0.17500	0.142777	2.6317	0.001

. (Fonte: Elaborada pelo autor)

A partição da variação apontou a contribuição significativa dos preditores ambientais considerados (frações [a + b]), responsáveis por explicar 14% da variação total na composição florística ( $p = 0,001$ ). Dentro deste conjunto, 2% foram independentes da autocorrelação espacial ( $p = 0,001$ ) (fração [a]). Além disso, foi observado que 11% da variação apresentou uma estrutura espacial não explicada pelos fatores ambientais ( $p = 0,001$ ) (fração [c]), enquanto 72% da variação permaneceu sem explicação (fração [d]).

O diagrama da tb-RDA demonstra, para o primeiro eixo, uma explicação de 9,2% da variação total na distribuição das espécies e 5,4% de variação para o segundo eixo (Fig. 5). Os preditores ambientais "pH do solo" e "Precipitação do Mês mais Chuvoso (Bio 13)" são os mais correlacionados com o primeiro eixo da tb-RDA; para o segundo eixo, as maiores correlações são dos preditores "conteúdo de argila" e um representante das variáveis espaciais, o autovetor espacial "MEM7" (tabela 6).

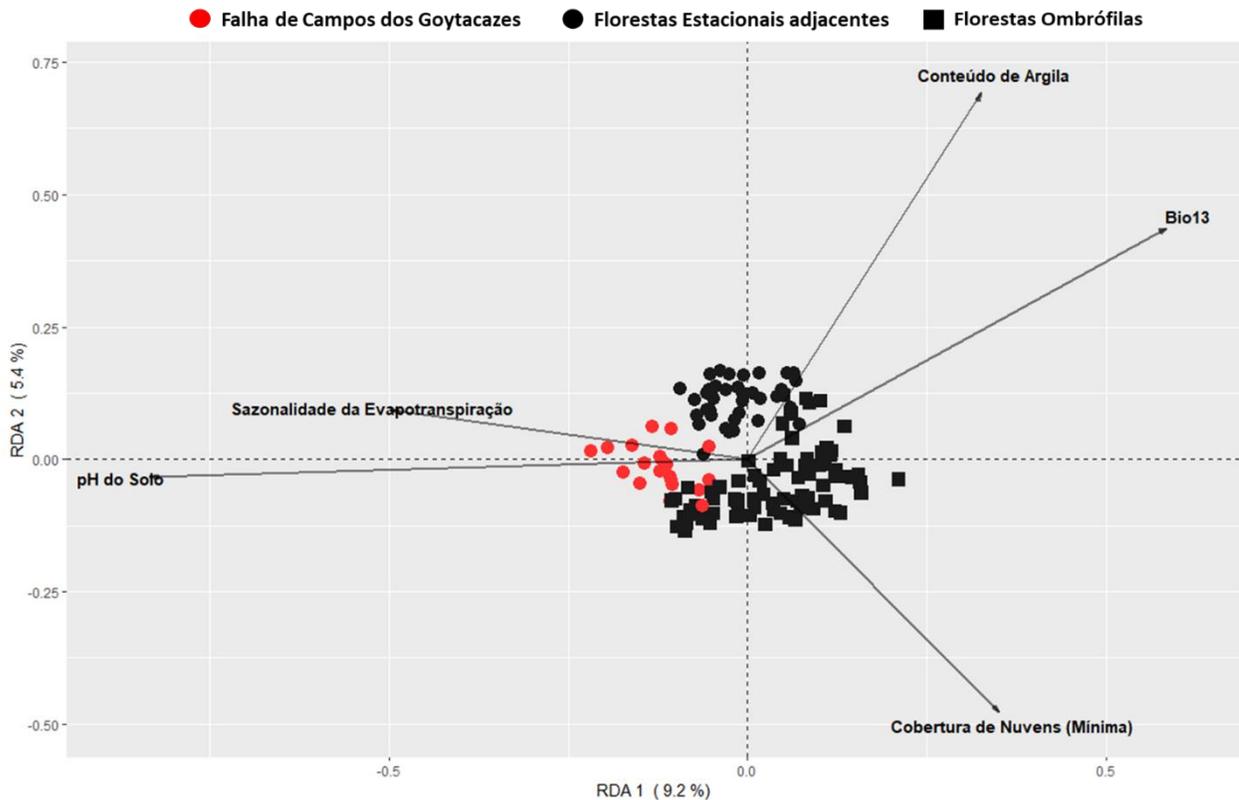


Figura 5. Diagrama da tb-RDA para 134 sítios de espécies arbóreas na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

Tabela 6. Correlação entre conjuntos de variáveis ambientais e espaciais com eixos canônicos da Análise Canônica de Redundância (RDA). Em negrito, as variáveis que apresentaram maiores coeficientes de correlação com os eixos canônicos.

Variáveis	RDA1	RDA2
Precipitação do Mês mais Chuvoso	<b>0.584929</b>	0.437192
Cobertura de nuvens (mínima)	0.351437	-0.47789
Sazonalidade da Evapotranspiração	-0.49747	0.092407
Conteúdo de Argila	0.32667	<b>0.692318</b>
pH do Solo	<b>-0.83358</b>	-0.0338
MEM7	0.117971	<b>0.544502</b>
MEM10	-0.16357	-0.32651
MEM2	-0.12537	0.123603
MEM4	-0.34607	0.094757
MEM9	0.264027	0.123287
MEM1	-0.13666	-0.3667

MEM11	-0.27346	0.131644
MEM5	-0.10889	0.369605
MEM23	0.249785	-0.16166
MEM19	-0.26255	-0.02506
MEM8	-0.13357	0.145339
MEM14	0.250727	0.087295
MEM6	-0.22754	-0.2032
MEM25	0.172907	0.029634
MEM13	-0.19695	0.119157
MEM17	0.148572	0.0796
MEM12	-0.10829	0.00791
MEM24	0.088127	0.023365
MEM15	-0.20194	-0.02506
MEM3	0.014258	-0.04481
MEM20	-0.00331	0.047991
MEM27	-0.00545	-0.18791
MEM22	0.137317	-0.03782
MEM21	-0.00461	0.052186
MEM18	0.037767	0.053381
MEM51	0.129959	-0.01271
MEM44	-0.0458	0.008956
MEM41	0.132578	-0.00116
MEM28	-0.09305	0.108082
MEM39	0.074611	-0.02849
MEM16	0.017119	0.055464
MEM29	-0.08966	0.081616
MEM43	-0.06726	0.178439
MEM33	0.093653	-0.09073

. (Fonte: Elaborada pelo autor)

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 GRUPOS FLORÍSTICOS

Os resultados aqui apresentados corroboram estudos anteriores, como os de Oliveira-Filho e Fontes (2000), Oliveira-Filho et al. (2005), Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015), Neves et al. (2017) e Anjos et al. (2018), que discutiram a distinção entre as

Florestas Ombrófilas e as Florestas Estacionais da Mata Atlântica ao longo das últimas duas décadas.

Na análise intracluster do cluster 4 (Figura 3), observa-se que a distinção entre florestas estacionais e florestas ombrófilas não fica tão evidente, considerando a classificação da vegetação disponibilizada pelo IBGE (2019). Nesse cluster, verifica-se um agrupamento dos sítios de florestas estacionais semidecíduas da região da Falha de Campos, juntamente com os sítios de floresta ombrófila densa de tabuleiros, localizados na região norte do estado do Espírito Santo.

Esse resultado levanta uma questão ainda em debate na literatura científica sobre qual o termo mais apropriado para representar a fitofisionomia das Florestas do norte do Espírito Santo, considerando as diversas terminologias utilizadas por diferentes autores (veja ENGEL, 2001; VÍNCENS; AGAREZ; GARAY, 2004; ROLIM; IVANAUSKAS; ENGEL, 2016; SAITER et al., 2017). Saiter et al. (2017), em um artigo de revisão, abordaram essa questão e propuseram um termo mais flexível, reconhecendo que não há suporte definitivo para a denominação “Floresta Estacional Semidecidual” para as florestas de Linhares (norte do Espírito Santo). No entanto, os autores afirmam que o regime climático estacional da Floresta de Linhares também não se encaixa na denominação “Floresta Ombrófila”. Diante disso, eles sugerem que essas florestas sejam classificadas como “Floresta Estacional Semidecidual a Perenifólia”. A divergência na classificação dessas florestas sugere a importância de considerar a complexidade das comunidades da flora arbórea da Mata Atlântica, representada pelos padrões de agrupamento encontrados neste estudo. Além disso, destaca a necessidade de revisão e aprimoramento dos mapas de classificação da vegetação brasileira.

Apesar das distintas classificações entre as regiões, o fato é que existe uma relação florística entre as florestas da Falha de Campos com as florestas do norte do Espírito Santo. A análise de espécies indicadoras também dá suporte para essa relação florística, o que sugere uma possível conexão histórica entre essas duas regiões. Essa observação é consistente com a hipótese de uma antiga ligação entre as áreas de tabuleiro, a qual pode ter sido afetada pela fragmentação florestal atual (NASCIMENTO; LIMA, 2008).

Estudos anteriores também relataram a similaridade entre a região norte do Espírito Santo e as florestas estacionais da Falha de Campos (NASCIMENTO; LIMA, 2008). Por exemplo, Silva e Nascimento (2001) identificaram que 62% das espécies presentes na

Mata do Carvão, uma floresta semidecídua localizada no norte do Rio de Janeiro, também ocorrem na região de floresta de tabuleiro em Linhares. Além disso, Saiter et al. (2016) também apontaram para uma similaridade florística entre a Falha de Campos dos Goytacazes e o bloco remanescente de Floresta de Tabuleiro, constituído pela Reserva Natural Vale, Reserva Biológica de Sooretama e Reserva Particular do Patrimônio Natural Recanto das Antas e Mutum Preto, localizados no estado do Espírito Santo. Contudo, os autores sugerem cautela na interpretação das relações florísticas para as florestas de Linhares, devido ao coeficiente de correlação cofenética ter apresentado valor inferior a 0,80, o que pode indicar uma possível falsa hierarquia entre grupos.

Os resultados aqui apresentados corroboram o padrão identificado por diversos autores como Silva e Nascimento (2001), Oliveira-Filho et al (2005) e Nascimento e Lima (2008). Ainda que Saiter et al. (2016) não tenham encontrado suporte estatístico relevante para validar as similaridades entre as florestas de Linhares e a Falha de Campos dos Goytacazes, os dados obtidos neste estudo fortalecem essa relação, oferecendo novas evidências que respaldam a ideia de uma relação florística entre essas regiões.

No que diz respeito à dissimilaridade interclusters, os resultados para o cluster da Falha corroboram a ideia de que a existência de diferentes grupos de vegetação não implica necessariamente na exclusão de possíveis conexões entre eles (EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015). Contrariando as expectativas, apesar do cluster da Falha pertencer ao grupo de cluster de florestas estacionais, ele compartilha mais espécies com os clusters 5 (composto em sua maioria por sítios de florestas ombrófilas de terras baixas) e cluster 1 (formado por sítios de floresta ombrófila submontana) do que com os clusters 3 e 7, que também pertencem às florestas estacionais (figura 4). Este resultado sugere que a composição arbórea das florestas semidecíduas da Falha de Campos se assemelha mais a um subconjunto da flora das florestas ombrófilas do que a um contínuo da extensão das florestas estacionais semidecíduas do Médio e Alto Paraíba. Isto pode ser explicado pela presença de espécies que, independentemente da deciduidade, possivelmente apresentam maior eficiência em resistir e competir em condições de seca prolongada (OLIVEIRA-FILHO et al., 2005; EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015).

Entretanto, esse padrão ainda vem sendo discutido na literatura. Inicialmente, Oliveira-Filho e Fontes (2000) lançaram a hipótese de que as florestas estacionais da

Mata Atlântica representam uma parcela empobrecida em número de espécies em comparação com as florestas ombrófila do domínio. No entanto, Eisenlohr e Oliveira-Filho (2015) apresentaram perspectivas diferentes. Os autores trazem que a flora arbórea das florestas estacionais não deveria mais ser considerada um simples subconjunto da flora da floresta ombrófila, mas sim, uma unidade fitogeográfica com alta diversidade  $\beta$ .

Os resultados desta tese acrescentam uma nova perspectiva a essa discussão. Apesar da identidade florística de cada grupo, as florestas estacionais da Falha de Campos parecem se comportar como um subconjunto das florestas ombrófilas. Este resultado sugere que as florestas estacionais da Falha de Campos possuem características singulares, não devendo ser consideradas meramente uma extensão das florestas estacionais adjacentes. Surgem, no entanto, duas questões cruciais: as espécies que compõem a Falha de Campos já atingiram seus limites de adequabilidade climática ao enfrentar os filtros ambientais específicos dessa região? Além disso, como as mudanças climáticas em curso poderão impactar a distribuição dessas espécies?

Estas questões não apenas ampliam o conhecimento e compreensão da ecologia das florestas estacionais na região da Falha de Campos, mas também oferecem insights valiosos para a conservação e manejo dessas áreas em um contexto de mudanças ambientais. A resposta a essas perguntas pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a preservação da biodiversidade da Mata Atlântica. No entanto, essas são questões que serão abordadas no próximo capítulo desta tese.

## 4.2 DETERMINANTES DA VARIAÇÃO FLORÍSTICA

As variáveis consideradas neste estudo foram incapazes de explicar 72% da variação na composição florística. Entretanto, note que é comum que as variáveis consideradas nos estudos não expliquem integralmente a ampla gama de variação observada na composição de espécies (TER BRAAK, 1986). Em uma revisão de estudos para a Mata Atlântica, conduzida por José-Silva e Nascimento (2024), constatou-se que a maioria dos estudos que adotaram a partição da variação não conseguiram explicar entre 65 e 80% da variação florística. Esse fato pode ser atribuído à ausência de preditores importantes ou até mesmo a ruídos estatísticos (TER BRAAK, 1986).

Para as frações explicativas, os resultados deste estudo evidenciam a detecção significativa do componente ambiental puro [a] ao explicar a variação na composição de espécies arbóreas na região sudeste da Mata Atlântica. Conforme destacado por Cielo-Filho e Martins (2015), esse resultado possibilita a interpretação da soma dos componentes ambiente puro e ambiente espacialmente estruturado [a + b] como uma representação da força da influência dos processos de nicho (PERES-NETO; LEGENDRE, 2010).

É relevante observar, no entanto, que a fração ambiental independente da autocorrelação espacial apresentou uma contribuição relativamente baixa, explicando apenas 2% da variação. Essa contribuição limitada pode ser atribuída à ausência de alguns preditores que não foram incluídos no modelo (veja NEVES et al., 2017). Ao analisar a contribuição das frações que representam o efeito do ambiente puro e do ambiente espacialmente estruturado, verifica-se que, juntas, elas explicaram 14% da variação total na composição de espécies arbóreas. Corroborando estudos que sugerem que os fatores ambientais distribuídos espacialmente contribuem mais que os fatores espaciais isolados (EISENLOHR et al., 2013, EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO, 2015; REZENDE et al., 2015; NEVES et al., 2017; ANJOS et al., 2018).

Dentro das frações ambientais consideradas, variáveis climáticas como temperatura e precipitação desempenham um papel importante na explicação dos padrões florísticos da Mata Atlântica, sendo reconhecidas como os principais fatores que explicam a diferença entre as florestas estacionais e ombrófilas (OLIVEIRA-FILHO et al., 2005; Eisenlohr; Oliveira-Filho, 2015; NEVES et al., 2017; REZENDE et al., 2018; ANJOS et al., 2018). No entanto, os resultados deste trabalho acrescentam informações importantes relacionadas a outros preditores.

Por exemplo, considerando todos os preditores ambientais, identificou-se que as variáveis edáficas foram os preditores que melhor explicaram a variação florística. Os resultados mostram que a distinção entre florestas estacionais e ombrófilas foi evidenciada por meio de uma disjunção diagonal entre o eixo 1 e o eixo 2 da tb-RDA, sendo principalmente influenciada pelo Índice de pH do solo e pelo Conteúdo de Argila (preditor com maior contribuição no eixo 2 da RDA). Esses preditores também foram importantes para explicar a separação entre os sítios de florestas estacionais da falha de Campos dos e os sítios de florestas estacionais adjacentes.

Estes resultados corroboram estudos recentes, indicando que além das variáveis climáticas, as variáveis edáficas também são preditores importantes na determinação da composição da comunidade em diferentes escalas espaciais, não se limitando apenas às escalas locais (NEVES et al., 2017; OLIVEIRA-FILHO et al., 2021; CUPERTINO-EISENLOHR et al., 2021).

Além dessas variáveis que representam o componente ambiental, outro componente que desempenha um papel importante na explicação da variação florística é o “espaço puro” (fração [c]). Quando comparada de forma isolada, a contribuição das variáveis espaciais (11%) foi maior do que o “ambiente puro”. Esse resultado está de acordo com outras pesquisas que demonstraram a importância da estrutura espacial na determinação dos padrões florísticos na Mata Atlântica (EISENLOHR; OLIVEIRA-FILHO 2015; NEVES et al 2017; REZENDE et al 2018a, b).

Essa fração puramente espacial tem sido interpretada como um efeito da limitação de dispersão (por exemplo, CIELO-FILHO; MARTINS 2015; CANTÍDIO; SOUZA, 2019). Entretanto, a Mata Atlântica é um domínio muito amplo e sua extensa área geográfica intensifica a complexidade dos fatores espaciais (ZWIENER et al. 2020). O fato de encontrar uma estrutura espacial relacionada à composição de espécies sugere que as regiões da Mata Atlântica sofreram diferentes restrições ambientais que determinaram os padrões atuais de biodiversidade (REZENDE et al., 2018b; CANTÍDIO; SOUZA, 2019).

Além disso, os distúrbios antropogênicos também podem influenciar esses padrões espaciais (ZWIENER et al. 2020). A Mata Atlântica foi sistematicamente alterada pela ocupação humana ao longo de sucessivos ciclos econômicos e, atualmente, sua cobertura original permanece majoritariamente em pequenos fragmentos e florestas secundárias (veja, NASCIMENTO; LIMA., 2008; RIBEIRO et al., 2009; REZENDE et al., 2018a; SANTOS; BOHRER; NASCIMENTO, 2024). Essa transformação significativa na paisagem florestal, marcada pela fragmentação, tem implicações diretas nos padrões espaciais observados na composição de espécies arbóreas na região sudeste da Mata Atlântica. Os diferentes modos de ocupação do solo e intensidades de uso têm desempenhado um papel crucial nesse processo (SANTOS; BOHRER; NASCIMENTO, 2024). O estado de conservação e o estágio sucessional das florestas, influenciados por décadas de atividade humana, podem estar contribuindo para a redução das relações espécie-ambiente (KARP et al., 2012).

Dessa forma, torna-se cada vez mais evidente a necessidade de estratégias eficazes para a restauração das Florestas da Mata Atlântica (RODRIGUES et al., 2009). Nesse processo, é importante reconhecer as diferenças na composição das florestas, como por exemplo, a singularidade das florestas estacionais presentes na Falha de Campos. As distintas características devem ser cuidadosamente consideradas nos projetos de restauração, demandando uma abordagem especializada (BUCHAROVA et al., 2017). A diversidade florística única da região enfatiza a importância de selecionar cuidadosamente as espécies para os plantios, de modo a refletir essa diferenciação, mesmo no contexto mais amplo das florestas estacionais.

Os esforços de restauração devem ser cuidadosamente guiados, priorizando espécies endêmicas e adaptadas às condições específicas dessa região de terras baixas. Em vez de adotar uma abordagem genérica para plantio de espécies comuns da Mata Atlântica, é imperativo direcionar a restauração com base na composição florística única dessa área (MCKAY et al., 2005).

Além disso, ao incorporar espécies nas iniciativas de restauração, é vital considerar não apenas sua adequação às condições atuais, mas também avaliar sua resiliência diante das mudanças climáticas em curso. Dessa forma, os projetos de restauração não apenas respeitarão a singularidade da Floresta da Falha de Campos, mas também contribuirão para a construção de ecossistemas mais adaptáveis diante dos intensos desafios ambientais.

## **5. CONCLUSÃO**

Os resultados indicaram que as florestas estacionais semidecíduas na Falha de Campos dos Goytacazes formam um grupo florístico distinto em relação às florestas estacionais e ombrófilas adjacentes. Além disso, foi observado uma conexão florística entre as florestas estacionais da Falha de Campos e as florestas do norte do Espírito Santo, classificadas como estacionais a perenifólias. Outro ponto a destacar é que apesar de formarem grupos distintos as florestas estacionais na Falha de Campos estão mais próximas floristicamente das florestas ombrófilas de terras baixas e submontanas

vizinhas do que das florestas estacionais das áreas adjacentes à Falha de Campos dos Goytacazes.

A variação florística observada neste estudo foi influenciada pelos fatores ambientais estruturados espacialmente e também por fatores espaciais. Além dos fatores climáticos associados aos gradientes latitudinais, longitudinais e altitudinais, os resultados desta tese reforçam a ideia de que os fatores edáficos, como o pH do Solo e Conteúdo de Argila, também podem explicar os padrões de distribuição de espécies arbóreas em escala regional. Os resultados também sugerem que fatores ligados a limitação de dispersão, por exemplo, a fragmentação do habitat também podem estar atuando nos padrões florísticos, ressaltando a influência da estrutura espacial na biodiversidade da Mata Atlântica.

A lista de espécies indicadoras identificadas neste estudo pode servir como ponto de partida para futuras pesquisas, especialmente no que diz respeito às ações de restauração ecológica na região da Falha de Campos dos Goytacazes.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMATULLI, Giuseppe et al. A suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. **Scientific data**, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2018.
- ANJOS, Luiz et al. Distributions of birds and plants in ecoregions: Implications for the conservation of a neotropical biodiversity hotspot. **Austral Ecology**, v. 43, n. 7, p. 839-849, 2018.
- ARAUJO, D. S. D. Mata Atlântica: CPD site SA14, Cabo Frio Region, south-eastern Brazil. **Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservation**, p. 373-375, 1997.
- BASELGA, Andrés; JIMÉNEZ-VALVERDE, Alberto; NICCOLINI, Gilles. A multiple-site similarity measure independent of richness. **Biology Letters**, v. 3, n. 6, p. 642-645, 2007.
- BAUMAN, David et al. Optimizing the choice of a spatial weighting matrix in eigenvector-based methods. **Ecology**, v. 99, n. 10, p. 2159-2166, 2018.
- BERGALLO, H. G., et al. Região Agropecuária dos Rios Pomba, Muriaé e Itabapoana. *Estratégias e ações para a conservação da biodiversidade no Estado do Rio de Janeiro*. Instituto Biomas, Rio de Janeiro (2009).
- BLANCHET, F. Guillaume; LEGENDRE, Pierre; BORCARD, Daniel. Forward selection of explanatory variables. **Ecology**, v. 89, n. 9, p. 2623-2632, 2008.
- BOHN, Leonardo, et al. Desertification susceptibility over Rio de Janeiro, Brazil, based on aridity indices and geoprocessing. **International journal of climatology** v. 41, p. E2600-E2614, 2021.
- BORCARD, Daniel et al. Numerical ecology with R. **New York: springer**, 2011.
- BUCHAROVA, Anna, Stefan Michalski, et al. Genetic differentiation and regional adaptation among seed origins used for grassland restoration: lessons from a multispecies transplant experiment. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 1, p. 127-136, 2017.
- CÁCERES, Miquel De; LEGENDRE, Pierre. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. **Ecology**, v. 90, n. 12, p. 3566-3574, 2009.
- CALIŃSKI, Tadeusz; HARABASZ, Jerzy. A dendrite method for cluster analysis. **Communications in Statistics-theory and Methods**, v. 3, n. 1, p. 1-27, 1974.

CANTIDIO, Luiza S.; SOUZA, Alexandre F. Aridity, soil and biome stability influence plant ecoregions in the Atlantic Forest, a biodiversity hotspot in South America. **Ecography**, v. 42, n. 11, p. 1887-1898, 2019.

CIELO-FILHO, Roque; MARTINS, Fernando Roberto. Detection of fine scale niche assembly in a tropical forest through analysis of indirect environmental variables. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 215, p. 60-66, 2015.

CLARKE, K. R.; GREEN, R. H. Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. **Marine Ecology Progress Series**, p. 213-226, 1988.

CONCEIÇÃO, M. da. Natureza do húmus e caracterização de solos com elevado teor de matéria orgânica da região de Itaguaí-Santa Cruz, RJ. 1989. 169 f. **Dissertação** (Mestrado em solos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

CUPERTINO-EISENLOHR, Mônica A. et al. Environmental variables and dispersal barriers explain broad-scale variation in tree species composition across Neotropical non-flooded evergreen forests. **Journal of Vegetation Science**, v. 32, n. 3, p. e13026, 2021.

DANTAS, Marcelo Eduardo, et al. Diagnóstico geoambiental do estado do Rio de Janeiro. 2005.

DRAY, S.; LEGENDRE, P.,; PERES-NETO, P. R. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM). **Ecological modelling**, v. 196, n. 3-4, p. 483-493. 2006.

DRAY, S. et al. adespatial: multivariate multiscale spatial analysis. R package ver. 0.3-8. 2020.

DRAY, Stéphane et al. Package 'adespatial'. R package, v. 2018, p. 3-8, 2018.

DRAY, Stéphane; DUFOUR, Anne-Béatrice. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. **Journal of statistical software**, v. 22, p. 1-20, 2007.

EISENLOHR, P. V. *et al.* Disturbances, elevation, topography and spatial proximity drive vegetation patterns along an altitudinal gradient of a top biodiversity hotspot. **Biodiversity and conservation**, v. 22, p. 2767-2783, 2013.

EISENLOHR, P. V.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. Revisiting patterns of tree species composition and their driving forces in the Atlantic Forests of Southeastern Brazil. **Biotropica**, v.47, n. 6, 689-701. 2015.

ENGEL, Vera Lex. Estudo fenológico de espécies arbóreas de uma floresta tropical em Linhares, ES. 2001. **Tese de Doutorado**. [sn].

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J.. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FRANCOSO, Renata D. et al. Delimiting floristic biogeographic districts in the Cerrado and assessing their conservation status. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1477-1500, 2020.

HENLE, K., Bauch, B., Auliya, M., Klvik, M., Pe'er, G., Schmeller, D. S., & Framstad, E. (2013). Priorities for biodiversity monitoring in Europe: A review of supranational policies and a novel scheme for integrative prioritization. **Ecological Indicators**, 33, 5- 18.

HIJMANS, Robert J. et al. dismo: Species distribution modeling. R package version, v. 1, n. 4, p. 1-1, 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000. Rio de Janeiro, **IBGE - Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. 168 p.

JOSÉ-SILVA, Leandro; NASCIMENTO, Marcelo Trindade. Factors acting on the floristic variability of the arboreal stratum: a review for the atlantic forest biodiversity hotspot. **Contribuciones a las ciencias sociales**, v. 17, n. 2, p. e5226-e5226, 2024.

KARP, Daniel S. et al. Intensive agriculture erodes  $\beta$ -diversity at large scales. **Ecology letters**, v. 15, n. 9, p. 963-970, 2012.

LEGENDRE, Pierre; GALLAGHER, Eugene D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. **Oecologia**, v. 129, p. 271-280, 2001.

LEGENDRE, Pierre; LEGENDRE, Louis. **Numerical ecology**. Elsevier, 2012.

MACQUEEN, James et al. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. 1967. p. 281-297.

MCKAY, John K. et al. "How local is local?"—a review of practical and conceptual issues in the genetics of restoration. **Restoration Ecology**, v. 13, n. 3, p. 432-440, 2005.

MITTERMEIER, R. A., P. R. Gil, M. Hoffmann, J. Pilgrim, J. Brooks, C. G. Miitermeier, J. Lamourux & G. A. B. Fonseca. (2004). Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. **Cemex**. Washington, DC.

MYERS, Norman, et al. "Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature** v.403, n.6772, p.853-858, 2000.

- NAIMI, Babak et al. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. **Ecography**, v. 37, n. 2, p. 191-203, 2014.
- NASCIMENTO, M. T.; LIMA, H. C. Floristic and structural relationships of a tabuleiro forest in northeastern Rio de Janeiro, Brazil. *The Atlantic Coastal Forest-Northeastern Brazil. Memoirs of the New York Botanical Garden*, v. 100, p. 395-416, 2008.
- NEVES, Danilo M. et al. Dissecting a biodiversity hotspot: The importance of environmentally marginal habitats in the Atlantic Forest Domain of South America. **Diversity and Distributions**, v. 23, n. 8, p. 898-909, 2017.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T. et al. On the floristic identity of Amazonian vegetation types. **Biotropica**, v. 53, n. 3, p. 767-777, 2021.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T.; FONTES, Marco Aurélio L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T. et al. Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das Bacias do Leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**, v. 56, p. 185-235, 2005.
- OLIVEIRA-FILHO, Ary T. NeoTropTree, Flora arbórea da Região Neotropical: Um banco de dados envolvendo biogeografia, diversidade e conservação. Univ. Fed. Minas Gerais. Available online at: <http://www.neotropree.info> (Accessed October 1, 2017), 2017.
- OKSANEN, J. et al. Vegan: Community Ecology Package (R Package Version 2.6-2). 2022. Google Scholar There is no corresponding record for this reference, 2022.
- PERES-NETO, Pedro R.; LEGENDRE, Pierre. Estimating and controlling for spatial structure in the study of ecological communities. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 2, p. 174-184, 2010.
- REZENDE, Camila Linhares et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018a.
- REZENDE, Vanessa Leite et al. Patterns of tree species variation across southern South America are shaped by environmental factors and historical processes. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 34, p. 10-16, 2018b.
- RIBEIRO, Milton Cezar et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RODRIGUES, Ricardo R. et al. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009.

ROLIM, S.G; IVANAUSKAS, N.M; ENGEL, V.L., As florestas de tabuleiro do norte do Espírito Santo são ombrófilas ou estacionais? In: Rolim SG, Menezes LFT & Srbe-Araujo AC (eds.) Floresta Atlântica de Tabuleiro: diversidade e endemismos na Reserva Natural Vale. Ed. Rupestre, Belo Horizonte. Pp. 47-60, 2016.

SAITER, Felipe Zamborlini et al. Uma revisão sobre a controversa classificação fisionômica da Floresta de Linhares, norte do Espírito Santo. **Rodriguésia**, v. 68, p. 1987-1999, 2017.

SAITER, Felipe Zamborlini; ROLIM, Samir Gonçalves; OLIVEIRA-FILHO, A. T. A floresta de Linhares no contexto fitogeográfico do leste do Brasil. Floresta Atlântica de Tabuleiro: diversidade e endemismos na Reserva Natural Vale (SG Rolim, LFT Menezes & AC Srbe-Araujo, eds.). Editora Rupestre, Belo Horizonte, p. 61-69, 2016.

SANTOS, Patrícia Marques; BOHRER, Claudio Belmonte de Athayde; NASCIMENTO, Marcelo Trindade. Impactos das mudanças de uso e cobertura da terra em fitofisionomias da Mata Atlântica. **Ambiente & sociedade**, v. 27, 2024.

SILVA, Guilherme C.; NASCIMENTO, Marcelo T. Fitossociologia de um remanescente de mata sobre tabuleiros no norte do estado do Rio de Janeiro (Mata do Carvão). **Brazilian Journal of Botany**, v. 24, p. 51-62, 2001.

TEAM, R. Core *et al.* Package stats. The R Stats Package, 2018.

TEAM, R. Core. A language and environment for statistical computing. (No Title), 2023. <https://cran-r.c3sl.ufpr.br/src/base/R-4/R-4.3.0.tar.gz>

TER BRAAK, Cajo JF. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. **Ecology**, v. 67, n. 5, p. 1167-1179, 1986.

TICHÝ, Lubomír; CHYTRÝ, Milan; SMARDA, Petr. Evaluating the stability of the classification of community data. **Ecography**, v. 34, n. 5, p. 807-813, 2011.

TITTELL, Pascal O.; BEMMELS, Jordan B. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. **Ecography**, v. 41, n. 2, p. 291-307, 2018.

TRABUCCO, A.; ZOMER, R. J. Global high-resolution soil-water balance. Figshare. 2019.

VAVREK, Matthew J. A comparison of clustering methods for biogeography with fossil datasets. **PeerJ**, v. 4, p. e1720, 2016.

VÍNCENS, R. S.; AGAREZ, F. V.; GARAY, I. A região da REBIO Sooretama e da Reserva de Linhares e seu entorno: das características físico-geográficas ao uso da terra. A Floresta Atlântica de Tabuleiros: diversidade funcional da cobertura arbórea. Editora Vozes, Petrópolis, Rio de, p. 7-15, 2004.

WILSON, Adam M.; JETZ, Walter. Remotely sensed high-resolution global cloud dynamics for predicting ecosystem and biodiversity distributions. **PLoS biology**, v. 14, n. 3, p. e1002415, 2016.

ZWIENER, Victor P.; PADIAL, Andre A.; MARQUES, Márcia CM. The mechanisms explaining tree species richness and composition are convergent in a megadiverse hotspot. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 3, p. 799-815, 2020.

ZHAO, Wenhao et al. Comparison and application of SOFM, fuzzy c-means and k-means clustering algorithms for natural soil environment regionalization in China. **Environmental Research**, v. 216, p. 114519, 2023.

## **CAPÍTULO 3**

### **IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA FLORA ARBÓREA DA FLORESTA ESTACIONAL DA FALHA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES: CENÁRIOS PARA DEFINIÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO**

## RESUMO

As Florestas Estacionais Semidecíduas na Falha de Campos dos Goytacazes enfrentam desafios devido às mudanças no uso da terra e às alterações climáticas globais. Este capítulo investiga o impacto das mudanças climáticas na adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras dessa região. Para isso, foram desenvolvidos modelos de Adequabilidade Ambiental considerando cenários de mudanças climáticas projetados para 2061 a 2080. Os resultados revelaram que, das 44 espécies avaliadas, 30 enfrentarão redução em suas áreas de adequabilidade ambiental na área de estudo, que compreende a Bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Espécies como *Balfourodendron riedelianum*, *Erythroxylum passerinum*, *Coccoloba alnifolia* e *Zygia latifolia* estão previstas para sofrer perdas de mais de 50% na área de estudo. Por outro lado, 14 espécies apresentaram projeções de aumento de mais de 50% em suas áreas de adequabilidade, incluindo *Zollernia glabra*, *Crateva tapia* e *Acanthocladus pulcherrimus*. Para o clima atual, o mapa de consenso mostrou uma alta adequabilidade ambiental ao longo do litoral, desde a região metropolitana do Rio de Janeiro, passando pela baixada fluminense e o norte fluminense (Falha de Campos dos Goytacazes), até o litoral norte do Espírito Santo. Contudo, as projeções futuras indicam um padrão de perda no sentido interior-litoral. Para este cenário as áreas consideradas climaticamente estáveis concentram-se mais próximas ao oceano, com alta adequabilidade ambiental distribuída na região da baixada fluminense e áreas no litoral da Falha de Campos dos Goytacazes e litoral da região central do Espírito Santo. Os modelos indicaram que as Unidades de Conservação (UCs) existentes na região da Falha de Campos dos Goytacazes abrangem as áreas de adequabilidade atual e futura para a maioria das espécies estudadas. No entanto, a cobertura de UCs revelou-se insuficiente para proteger áreas de alta adequabilidade ambiental, deixando-as em grande parte desprotegidas. Isso evidencia a necessidade urgente de estabelecer novas UCs.

**Palavras-Chave:** Adequabilidade climática, Modelagem de nicho ecológico, Vulnerabilidade;

## ABSTRACT

Semideciduous Seasonal Forests in the Campos dos Goytacazes Gap face challenges due to changes in land use and global climate change. This chapter investigates the impact of climate change on the environmental suitability of indicator tree species in this region. To this end, Environmental Suitability models were developed considering climate change scenarios projected for 2061 to 2080. The results revealed that, of the 44 species evaluated, 30 will face a reduction in their areas of environmental suitability in the study area, which comprises the Paraíba do Sul River Basin and coastal sub-basins of Rio de Janeiro and Espírito Santo. Species such as *Balfourodendron riedelianum*, *Erythroxylum passerinum*, *Coccoloba alnifolia*, and *Zygia latifolia* are predicted to suffer losses of more than 50% in the study area. On the other hand, 14 species presented projections of an increase of more than 50% in their areas of suitability, including *Zollernia glabra*, *Crateva tapia*, and *Acanthocladus pulcherrimus*. For the current climate, the consensus map showed high environmental suitability along the coast, from the metropolitan region of Rio de Janeiro, through the Baixada Fluminense and the north of Rio de Janeiro (Campos dos Goytacazes Gap), to the northern coast of Espírito Santo. However, future projections indicate a pattern of loss in the interior-coastal direction. For this scenario, the areas considered climatically stable are concentrated closer to the ocean, with high environmental suitability distributed in the Baixada Fluminense region and areas along the coast of the Campos dos Goytacazes Gap and the central region of Espírito Santo. The models indicated that the existing Conservation Units (UCs) in the Campos dos Goytacazes Gap region cover areas of current and future suitability for most of the species studied. However, the coverage of UCs proved to be insufficient to protect areas of high environmental suitability, leaving them largely unprotected. This highlights the urgent need to establish new UCs.

**Keywords:** Climate suitability, Ecological niche modeling, Vulnerability

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas estacionais semidecíduas (FES) são reconhecidas pela sua peculiaridade sazonal, evidenciada pela perda parcial de folhas, que pode variar entre 20% a 50% de indivíduos caducifólios (IBGE 2012). Esse fenômeno é uma resposta ao déficit hídrico ou à queda de temperatura nos meses mais frios e secos (VELOSO; RANGEL-FILHO; LIMA, 1991). Ao longo da história, esse ecossistema tem enfrentado desafios persistentes, ocasionando impactos significativos em sua extensão e ecologia (DURIGAN et al. 2000; NETTO, 2011). A pressão sobre ambientes sazonais tem crescido devido ao aumento na densidade populacional humana e às mudanças no uso da terra, incluindo a intensificação da agricultura e a conversão de florestas para pastagens destinadas à pecuária (MILES et al. 2006; DIRZO et al. 2011; SANTOS; BOHRER; NASCIMENTO, 2024).

Entretanto, essa problemática não se restringe apenas às FES, sendo um desafio global para as florestas tropicais. Entre 1980 e 2012, mais de 100 milhões de hectares de vegetações tropicais e subtropicais foram degradados e desmatados, refletindo um aumento expressivo na perda de áreas vegetadas (LEWIS; EDWARDS; GALBRAITH, 2015). Um exemplo marcante desse impacto é o domínio atlântico na América do Sul, lar da Mata Atlântica brasileira. Originalmente, essa região ocupava cerca de 13% do território brasileiro, restando hoje apenas entre 11% e 28% de sua cobertura vegetal original (RIBEIRO et al. 2009; REZENDE et al. 2018).

Além dos impactos decorrentes das mudanças no uso da terra, outro fator importante que ameaça a biodiversidade das florestas tropicais são as mudanças climáticas (ALLEN et al. 2017; AGUIRRE-GUTIÉRREZ et al. 2019), impulsionadas principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa decorrentes do consumo excessivo de combustíveis fósseis (IPCC, 2022). As projeções sugerem que, para os biomas tropicais, haverá aumento da temperatura e dos períodos de seca ainda neste século (GREVE 2014; FIELD et al. 2014).

Essas projeções são especialmente preocupantes considerando a alta vulnerabilidade das plantas tropicais às mudanças climáticas. Estudos em diferentes regiões na América do Sul apontam para potenciais reduções no tamanho das áreas de distribuição de diversas espécies (SIQUEIRA; PETERSON 2003; COLOMBO; JOLY

2010; VELAZCO et al., 2019; MACIEL et al. 2021; EVANGELISTA-VALE et al. 2021). Por exemplo, projeções para árvores da Mata Atlântica sugerem reduções de área de adequabilidade climática variando de 20% a 50% até o ano de 2050 (COLOMBO; JOLY 2010).

Para as florestas estacionais da Mata Atlântica, a situação é ainda mais preocupante. As projeções apontam uma tendência de redução na precipitação e aumento da temperatura do ar em algumas áreas onde esse tipo de floresta ocorre (DERECZYNSKI; SILVA; MARENGO 2013; SILVA; DERECZYNSKI, 2014; SOBRAL et al. 2018, SOBRAL et al. 2019), especialmente na região conhecida como Falha de Campos dos Goytacazes, podendo levar essa região a um processo de desertificação (BOHN et al. 2021).

Localizada em um contexto particularmente sensível, a Falha de Campos dos Goytacazes é uma região caracterizada por uma interrupção biogeográfica natural na distribuição das florestas ombrófilas litorâneas. Nesse local, as florestas ombrófilas dão lugar às florestas estacionais semidecíduas, que se estendem até o litoral (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). Essa mudança de fitofisionomia é parcialmente atribuída às mudanças climáticas relacionadas aos fenômenos de ressurgência da Corrente das Malvinas e ao deslocamento das cadeias de montanhas na costa atlântica, do Norte Fluminense em direção ao Espírito Santo (ARAUJO 1997; OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000; OLIVEIRA-FILHO et al. 2005).

Nesse contexto, as alterações no clima ocupam um status cada vez mais preocupante na conservação das florestas estacionais da Mata Atlântica, sendo necessário identificar ambientes com adequabilidade climática e, assim, designar áreas prioritárias para conservação (GIOVANNINI et al., 2014). As áreas protegidas, por exemplo Unidades de Conservação (UCs) são uma das estratégias essenciais para a conservação da biodiversidade a longo prazo (CHAPE et al. 2005). Para a realidade atual, é um meio que permite conservar áreas naturais da forma menos alterada possível e constitui um importante agente de continuidade da evolução natural e manutenção de futura restauração ecológica (BRUNER et al. 2001).

A modelagem de nicho ecológico (doravante Modelagem de Adequabilidade Ambiental) surgiu como um aliado importante para os estudos com foco em conservação ambiental. É uma ferramenta que pode ser utilizada para prever os impactos das

mudanças climáticas na biodiversidade (CARNAVAL; MORITZ 2008; MACIEL et al. 2021; EVANGELISTA-VALE et al. 2021), auxiliar no processo de definição de áreas prioritárias para conservação (DE MARCO JÚNIOR; SIQUEIRA, 2009; MACIEL; OLIVEIRA-FILHO; EISENLOHR, 2016; MORADI et al., 2019), prever áreas de ocorrência de espécies raras (GIOVANELLI et al. 2008; DA SILVA SAMPAIO et al. 2019) e até mesmo prever potenciais espécies invasoras (PETERSON; VIEGLAIS 2001). É uma técnica fundamentada na teoria do nicho ecológico, em que, utilizando dados de ocorrência das espécies e seus requisitos ecológicos em cada ponto, é possível identificar locais com condições ambientais semelhantes às daquelas das áreas onde essas espécies foram registradas (SOBERON; PETERSON 2005; PEARSON et al., 206).

Com base no exposto, este estudo teve como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas na adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras da Floresta Estacional da Falha de Campos dos Goytacazes e determinar os locais onde as espécies encontrarão adequabilidade para enfrentar as alterações previstas para este século. O estudo buscou responder às seguintes questões: As mudanças climáticas provocarão alterações sobre a área de adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras das Floresta Estacional da Falha de Campos dos Goytacazes? Quais espécies arbóreas são mais suscetíveis a alterações em sua área de adequabilidade ambiental? A rede de unidades de conservação estadual e federal na Falha de Campos dos Goytacazes está adequada para preservar as áreas de alta adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras, tanto para clima atual quanto considerando cenários futuros de mudanças climáticas? Onde seria estrategicamente indicado estabelecer novas unidades de conservação com o propósito de contribuir para a preservação das espécies arbóreas indicadoras na Falha de Campos dos Goytacazes, considerando as projeções de mudanças climáticas?

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

Este estudo abrange parte do sudeste da Mata Atlântica no sudeste do Brasil, estendendo-se entre os Estados: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo. Os limites da área de estudo foram definidos seguindo os limites das bacias hidrográficas Paraíba do Sul e as sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e litorâneas do Espírito Santo. Assim como para o segundo capítulo desta tese, os limites da Falha de Campos dos Goytacazes foram definidos por uma abordagem pragmática, considerando os limites políticos das regiões Norte e Noroeste fluminense (Figura 1).

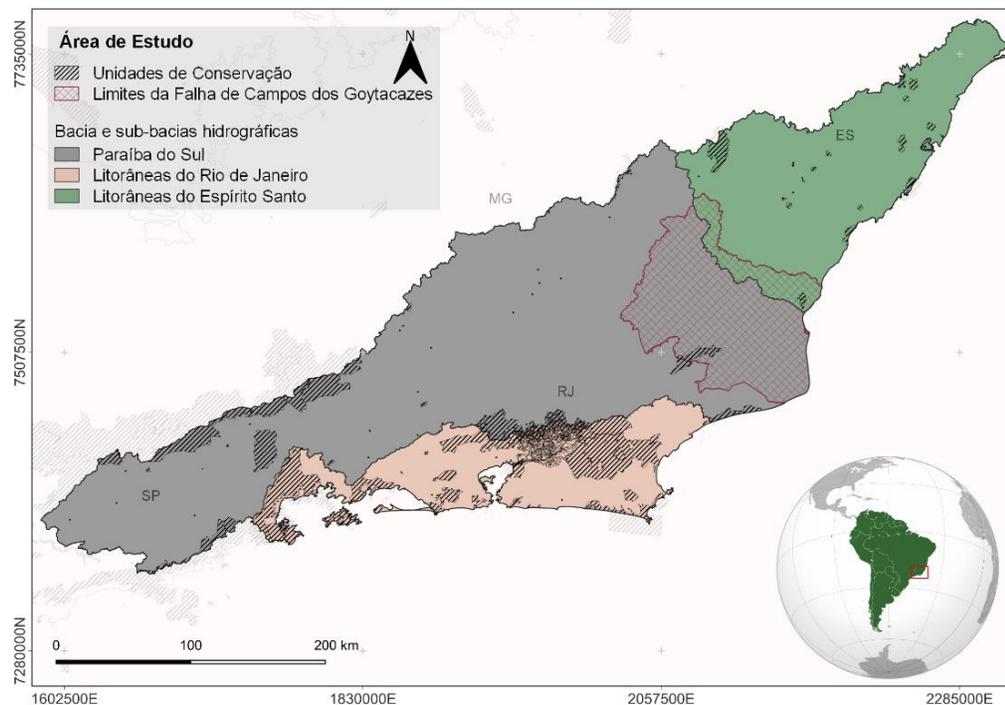


Figura 1 Área de estudo delimitada pelas bacias Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Litorâneas do Espírito Santo. Em destaque a área delimitadas para a Falha de Campos dos Goytacazes no sul do Espírito Santo e no norte-noroeste do Rio de Janeiro. (Fonte: Elaborada pelo autor).

## 2.2 BANCO DE DADOS

### 2.2.1 *Obtenção dos Registros de Ocorrência*

Neste estudo, foram utilizados os registros de ocorrência de 50 espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, previamente selecionadas no segundo capítulo desta tese. Entretanto, para atender aos pressupostos dos métodos de modelagem, apenas as espécies que apresentavam mais de 25 registros espacialmente únicos foram consideradas nos modelos (VAN PROOSDIJ et al. 2016). Assim, seis espécies foram excluídas, resultando em um conjunto de 44 espécies com registros de ocorrência suficientes para a modelagem (Tabela 1).

O banco de dados foi construído a partir dos registros de ocorrência das espécies disponíveis nas bases de dados NeoTropTree (<http://www.neotropree.info/>), bases de dados de herbários virtuais: speciesLink (<http://www.splink.org.br/>) e GBIF (<http://www.gbif.org>). Neste processo, foram excluídos os registros duplicados, bem como aqueles desprovidos de informações cruciais, tais como latitude, longitude e município/estado, uma vez que essas informações são indispensáveis para a validação dos registros de ocorrência. A estratégia adotada neste estudo foi baseada no modo de modelagem convencional descrita por Pires-Oliveira et al. (2019).

Tabela 1. Registros de Ocorrência e Status de Conservação das Espécies arbóreas indicadoras das Floresta Estacionais Semidecíduas da Falha de Campos dos Goytacazes, utilizadas na modelagem de adequabilidade ambiental. NE = Não Avaliado, LC = Menos Preocupante, NT = Quase Ameaçada, VU = Vulnerável, EN = Em Perigo, CR = Criticamente em Perigo.

Família	Espécie	Registros de Ocorrência >25	Categoria da Lista Vermelha	
			CNCFlora	IUCN
<b>Fabaceae</b>	<i>Parapiptadenia pterosperma</i> (Benth.) Brenan	149	LC	LC
<b>Rubiaceae</b>	<i>Alseis pickelii</i> Pilg. & Schmale	167	LC	LC
<b>Cactaceae</b>	<i>Brasiliopuntia brasiliensis</i> (Willd.) A.Berger	427	LC	LC
<b>Fabaceae</b>	<i>Centrolobium sclerophyllum</i> H.C.Lima	45	LC	NE
<b>Capparaceae</b>	<i>Monilicarpa brasiliiana</i> (Banks ex DC.) Cornejo & Iltis	45	NE	NE
<b>Capparaceae</b>	<i>Crateva tapia</i> L.	895	NE	LC
<b>Fabaceae</b>	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	394	NT	NE
<b>Annonaceae</b>	<i>Oxandra espihana</i> (Spruce ex Benth.) Baill.	119	NE	LC
<b>Rhamnaceae</b>	<i>Sarcomphalus platyphyllus</i> (Reissek) Hauenschild	41	LC	LC
<b>Bignoniaceae</b>	<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	783	NE	NT
<b>Fabaceae</b>	<i>Poeppigia procera</i> (Poepp. ex Spreng.) C. Presl	568	NE	LC
<b>Erythroxylaceae</b>	<i>Erythroxylum passerinum</i> Mart.	172	LC	LC
<b>Fabaceae</b>	<i>Grazilodendron rio-docensis</i> H.C.Lima	34	EN	NE
<b>Fabaceae</b>	<i>Acosmium lentiscifolium</i> Schott	94	LC	LC
<b>Rutaceae</b>	<i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.	476	NT	EN
<b>Fabaceae</b>	<i>Sweetia fruticosa</i> Spreng.	431	NE	LC
<b>Polygonaceae</b>	<i>Coccoloba alnifolia</i> Casar.	288	NE	LC
<b>Meliaceae</b>	<i>Trichilia pseudostipularis</i> (A.Juss.) C.DC.	132	LC	NT
<b>Myrtaceae</b>	<i>Eugenia astringens</i> Cambess.	382	LC	LC
<b>Myrtaceae</b>	<i>Psidium brownianum</i> Mart. ex DC.	299	NE	LC
<b>Fabaceae</b>	<i>Zollernia glabra</i> (Spreng.) Yakovlev	94	LC	LC
<b>Myrtaceae</b>	<i>Eugenia selloi</i> (O. Berg) B.D. Jacks.	33	NE	LC
<b>Sapindaceae</b>	<i>Sapindus saponaria</i> L.	1155	NE	LC
<b>Euphorbiaceae</b>	<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng.	1504	NE	LC
<b>Myrtaceae</b>	<i>Eugenia guanabarina</i> (Mattos & D.Legrand) Giaretta & M.C.Souza	35	CR	LC
<b>Anacardiaceae</b>	<i>Spondias macrocarpa</i> Engl.	81	NE	LC

<b>Salicaceae</b>	<i>Casearia souzae</i> R. Marquete & Mansano	26	NE	NE
<b>Boraginaceae</b>	<i>Cordia aberrans</i> I.M.Johnst.	57	LC	LC
<b>Violaceae</b>	<i>Rinorea bahiensis</i> (Moric.) Kuntze	79	LC	LC
<b>Meliaceae</b>	<i>Trichilia ramalhoi</i> Rizzini	64	LC	LC
<b>Fabaceae</b>	<i>Myroxylon peruiferum</i> L.f.	416	LC	LC
<b>Polygalaceae</b>	<i>Acanthocladus pulcherrimus</i> (Kuhlm.) J.Pastore & D.Cardoso	33	NT	NE
<b>Fabaceae</b>	<i>Andira nitida</i> Mart. ex Benth.	232	LC	LC
<b>Solanaceae</b>	<i>Solanum sycocarpum</i> Mart. & Sendtn.	88	LC	LC
<b>Combretaceae</b>	<i>Terminalia mameluco</i> Pickel	94	LC	LC
<b>Cactaceae</b>	<i>Pereskia grandifolia</i> Haw.	292	LC	LC
<b>Achatocarpaceae</b>	<i>Achatocarpus praecox</i> Griseb.	296	LC	LC
<b>Myrtaceae</b>	<i>Campomanesia dichotoma</i> (O.Berg) Mattos	318	NE	LC
<b>Salicaceae</b>	<i>Casearia gossypiosperma</i> Briq.	755	LC	NE
<b>Myrtaceae</b>	<i>Eugenia gracillima</i> Kiaersk.	84	LC	NE
<b>Celastraceae</b>	<i>Monteverdia obtusifolia</i> (Mart.) Biral	292	LC	LC
<b>Euphorbiaceae</b>	<i>Philyra brasiliensis</i> Klotzsch	111	NE	LC
<b>Rutaceae</b>	<i>Ravenia infelix</i> Vell.	33	NT	NT
<b>Fabaceae</b>	<i>Zygia latifolia</i> (L.) Fawc. & Rendle	1060	NE	LC

(Fonte: Elaborada pelo autor).

## 2.2.2 Seleção e Composição dos Preditores Ambientais

Todos os modelos foram produzidos utilizando um conjunto de preditores ambientais composto por 19 variáveis bioclimáticas e 10 variáveis edatopográficas (Tabela 2). As variáveis bioclimáticas, representativas do clima atual (presente) e das projeções para o clima futuro, foram adquiridas a partir do banco de dados WorldClim 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017). As variáveis edatopográficas foram extraídas do banco de dados SoilGrids (HENGL et al. 2014) e também da função “terrain” do pacote *raster* em ambiente R (HIJMANS, 2018). Todas as variáveis foram obtidas na resolução de 5 arcos-min (~ 10 km) e recortadas para os limites da região Neotropical.

Tabela 2. Conjunto de 29 variáveis predictoras usadas na construção dos modelos de adequabilidade ambiental de espécies indicadoras da falha de Campos dos Goytacazes.

<b>Variáveis Ambientais</b>	<b>Fonte</b>
Temperatura média anual	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Amplitude térmica diurna média	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Isotermalidade	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Sazonalidade de temperatura	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura máxima do mês mais quente	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura mínima do mês mais frio	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Faixa anual de temperatura	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura Média do Trimestre Mais Molhado	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura Média do Trimestre Seco	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura Média do Trimestre Mais Quente	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Temperatura Média do Trimestre Mais Frio	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação anual	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do mês mais úmido	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do mês mais seco	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Sazonalidade precipitação	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do trimestre mais chuvoso	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do trimestre mais seco	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do trimestre mais quente	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Precipitação do trimestre mais frio	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Densidade Aparente de Solo	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Conteúdo de Argila	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Conteúdo de Areia	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Conteúdo de Silte	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Profundidade de rocha (até 200m)	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Fragmentos grosseiros volumétricos em%	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Probabilidade de ocorrência do horizonte R	SOIL GRIDS (HENGL et al., 2014)
Elevação	WORLDCLIM 2.1 (FICK; HIJMANS, 2017)
Aspecto	EarthEnv (AMATULLI et al., 2018)
Inclinação do terreno	Pacote ‘raster’ (HIJMANS et al., 2018)

(Fonte: Elaborada pelo autor).

Para as projeções dos cenários futuros, foram selecionados os seguintes GCMs (Modelos de Circulação Global): CanESM5 (SWART et al. 2019), CNRM-CM6-1 (VOLDOIRE et al. 2019) e MIROC-ES2L (HAJIMA et al. 2020). Com base no Caminho Socioeconômico Compartilhado (SSP5-8.5) do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) para o período de 2061-2080. Os GCMs foram escolhidos com a premissa de maximizar a diversidade entre eles, visando atingir uma maior variabilidade. Essa abordagem foi adotada para evitar a inclusão de informações redundantes nas projeções futuras, assegurando que cada GCM contribua de maneira única e representativa no conjunto de dados (GOMIDES et al., 2021).

Quanto à escolha do cenário SSP5-8.5, ela foi baseada no contínuo aumento das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) (KEMP et al., 2022). As projeções indicam que a trajetória atual das emissões está direcionando o planeta para um aumento de temperatura estimado entre 2,1°C e 3,9°C até o ano de 2100 (LIU; RAFTERY, 2021), podendo atingir 4,4°C (IPCC, 2022). Apesar dos esforços de adaptação já empreendidos nas políticas climáticas de cerca de 170 países, as respostas a esses esforços são fragmentadas, setoriais e distribuídas de forma desigual. Barreiras como baixo senso de urgência, recursos limitados e falta de envolvimento dos setores público e privado persistem como desafios principais. Consequentemente, os riscos climáticos e não climáticos estão interagindo cada vez mais, originando riscos compostos e em cascata, que se tornam progressivamente mais complexos e difíceis de gerenciar (IPCC, 2022).

O SSP5-8.5 representa um cenário de elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE), projetando um futuro em que as emissões persistem sem alterações nas políticas de reduções, e o crescimento econômico continua dependendo de combustíveis fósseis, mantendo uma demanda elevada por energia (O'NEILL et al., 2017; MEINSHAUSEN et al., 2020). Embora seja considerado por alguns como irrealista (RITCHIE; DOWLATABADI, 2017; HAUSFATHER; PETERS, 2020), esse cenário desempenha um papel crucial na avaliação dos potenciais impactos das mudanças climáticas. Ao adotar o SSP5-8.5 como ponto de referência, opta-se por uma abordagem cautelosa que reconhece a necessidade de preparação para cenários extremos. Ao

preparar-se para o pior caso, assegura-se que qualquer cenário abaixo desse limite crítico seja abordado eficientemente, fortalecendo a capacidade de resposta diante das incertezas climáticas.

Para lidar com a possível colinearidade entre as variáveis e evitar o sobreajuste nos modelos, as variáveis foram submetidas à Análise de Componentes Principais (PCA) (DORMANN et al. 2013). No caso das variáveis bioclimáticas do presente, foram selecionados os seis principais eixos da PCA, responsáveis por capturar aproximadamente 95% da variação nos dados (DE MARCO-JÚNIOR; NÓBREGA 2018). Quanto às variáveis edafotopográficas, optou-se pelos dois primeiros eixos, que correspondem a aproximadamente 66% da variação (GOMIDES et al., 2021). O peso reduzido atribuído aos preditores edafotopográficos se justifica pelo fato de que as variáveis climáticas constituem as questões centrais investigadas neste estudo. No entanto, reconhece-se a relevância dos preditores edáficos e topográficos na explicação da distribuição geográfica das plantas, sendo, por esse motivo, incorporados nos modelos (VELAZCO et al., 2017).

As variáveis edafotopográficas não possuem projeções para cenários futuros específicos, portanto espera-se que essas variáveis não sofram grandes mudanças até o período do intervalo entre 2061-2080, porque os processos físicos relacionados a elas geralmente permanecem estáveis (GOMIDES et al., 2021). Considerado que essas variáveis permanecerão iguais, foram utilizados os mesmos eixos tanto no presente quanto no futuro.

Para as projeções das variáveis bioclimáticas futuras, foram utilizados os coeficientes lineares dos componentes principais dos preditores bioclimáticos do presente. Esses coeficientes foram projetados nos preditores dos cenários futuros, criando uma correspondência entre o clima atual e o clima futuro. Em seguida, foi aplicado a PCA para extrair os componentes principais de cada cenário futuro (ZWIENER et al., 2018). As análises foram realizadas através da função "PCAProjection" do pacote ENMGadgets (BARVE; BARVE, 2018).

## 2.3 MODELOS DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL

### 2.3.1 *Construção dos modelos*

Os Modelos de Adequabilidade Ambiental foram construídos utilizando os seguintes algoritmos de modelagem em ambiente R (R CORE TEAM, 2023): Bioclim, disponível na função “bioclim()” do pacote *dismo* (HIJMANS et al., 2023); ENFA (Ecological Niche Factor Analysis), por meio da função “madifa()” do pacote *adehabitats* (CALENGE; CALENGE, 2018); GLM (Generalized Linear Models), implementado pela função “glm()” do pacote *stats* (R CORE TEAM, 2018); MARS (Multivariate Adaptive Regression Splines) utilizando a função “earth()” do pacote *earth* (MILBORROW et al., 2023); MaxEnt (Maximum Entropy), disponível na função “maxent()” do pacote *dismo* (HIJMANS et al., 2023); SVM (Support Vector Machines), por meio da função “ksvm()” do pacote *kernlab* (KARATZOGLOU et al., 2019); NNET (Neural Networks) utilizando a função “nnet()” do pacote *nnet* (RIPLEY; VENABLES, 2023); e o RF (Random Forest) com a função “randomForest()” do pacote *randomForest* (RCOLORBREWER; LIAW 2018).

Todos os algoritmos foram calibrados de forma que 70% dos dados aleatórios foram destinados para treino e 30% para testes. Cada algoritmo executou 5 repetições, e para cada repetição 5 conjuntos de 10.000 pseudoausências, totalizando 25 modelos para cada algoritmo. (ELITH; FRANKLIN 2013; GUISAN et al. 2017). Para auxiliar a interpretação dos modelos foram construídos mapas binários a partir do limiar (maxSpecSens) que maximiza a soma da sensibilidade (taxa de verdadeiro positivo) e especificidade (taxa de verdadeiro negativo) reduzindo os erros de comissão (LIU; WHITE; NEWELL, 2013).

### 2.3.2 *Avaliação dos modelos*

Avaliou-se o desempenho dos algoritmos a partir do True Skill Statistic (TSS) (ALLOUCHE; TSOAR; KADMON, 2006) onde valores menores que 0,4 foram indicativos de baixo poder de predição do modelo; valores entre 0,4 e 0,8 indicaram bom poder de

predição; valores de 0,8 a 1 indicaram excelente poder de predição; valores iguais ou menores que zero indicaram desempenho não melhor do que explicado pelo acaso (ZHANG et al. 2015). Os modelos com TSS inferior a 0,4 foram descartados.

### 2.3.3 Mapas de consenso

Para obter previsões com baixo nível de incerteza, foram produzidos modelos de consenso médio para o clima atual e futuro (conhecido como ensemble) (ARAUJO; NEW, 2007). Essa técnica implica em somar todos os mapas de adequabilidade dos modelos selecionados e dar ênfase à área com maior sobreposição. Nesse mapa, foram classificadas as áreas com maior sobreposição de modelos como “alta adequabilidade ambiental” e áreas com menor sobreposição como “baixa adequabilidade ambiental”.

## 2.4 LACUNAS DE CONSERVAÇÃO E EFICIÊNCIA DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

Foram identificadas as UCs federais e estaduais que apresentaram ou não sobreposição com áreas de alta adequabilidade. Para realizar essa análise, utilizou-se um arquivo em formato *shapefile* disponível em [www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net) (UNEP-WCMC; IUCN, 2024), que continha informações sobre a localização de cada Unidade de Conservação na região sudeste da Mata Atlântica.

Desta forma, realizou-se a sobreposição do mapa de consenso do clima atual e do clima futuro com o arquivo *shapefile*. Cada UC que sobrepôs à área de alta adequabilidade do mapa de consenso foi considerada como eficiente para adequabilidade ambiental. Assim, somente foram indicadas como áreas com maior prioridade para conservação o local que apresentou adequabilidade ambiental para o maior número de espécies, e não sobrepôs Unidades de Conservação.

Tabela 3. Valores de TSS e Threshold para Modelos de Adequabilidade Ambiental de 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, com Projeções para o período de 2061-2080 em toda a região neotropical. Inclui Números de Pixels de Presença e Ausência para os Cenários Atual e Futuro, além do Percentual de Perda (representados pelos valores negativos) e Ganho (valores positivos) de Área de Adequabilidade.

Espécie	TSS	LIMIAR TH (MAXSPECSENS)	NÚMERO DE PIXELS NA REGIÃO NEOTROPICAL				
			Clima Atual		Futuro Projetado		Perda e Ganho de Adequabilidade (%)
			Presença	Ausência	Presença	Ausência	
<i>Parapiptadenia pterosperma</i>	0.74 ± 0.12	0.48	27309	212709	14851	225167	-45.62
<i>Alseis pickelii</i>	0.73 ± 0.11	0.39	77399	162619	77585	162433	0.24
<i>Brasiliopuntia brasiliensis</i>	0.63 ± 0.1	0.51	40541	199477	11541	228477	-71.53
<i>Centrolobium sclerophyllum</i>	0.59 ± 0.12	0.46	32415	207603	11499	228519	-64.53
<i>Monilcarpa brasiliana</i>	0.68 ± 0.13	0.45	31198	208820	16700	223318	-46.47
<i>Crateva tapia</i>	0.53 ± 0.05	0.45	70522	169496	145139	94879	105.81
<i>Amburana cearensis</i>	0.66 ± 0.07	0.46	42214	197804	36915	203103	-12.55
<i>Oxandra espintana</i>	0.58 ± 0.09	0.50	53059	186959	51446	188572	-3.04
<i>Sarcomphalus platyphyllus</i>	0.77 ± 0.17	0.27	184177	55841	183087	56931	-0.59
<i>Tabebuia roseoalba</i>	0.6 ± 0.08	0.53	54267	185751	17677	222341	-67.43
<i>Poeppigia procera</i>	0.57 ± 0.08	0.49	56258	183760	32103	207915	-42.94
<i>Erythroxylum passerinum</i>	0.75 ± 0.15	0.43	37236	202782	27235	212783	-26.86
<i>Grazilodendron rio-docensis</i>	0.65 ± 0.11	0.50	13783	226235	20411	219607	48.09
<i>Acosmium lentiscifolium</i>	0.64 ± 0.11	0.42	56879	183139	23344	216674	-58.96
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	0.71 ± 0.08	0.42	30872	209146	5948	234070	-80.73
<i>Sweetia fruticosa</i>	0.58 ± 0.09	0.51	36146	203872	10558	229460	-70.79
<i>Coccoloba alnifolia</i>	0.75 ± 0.12	0.41	30685	209333	19380	220638	-36.84
<i>Trichilia pseudostipularis</i>	0.75 ± 0.1	0.39	61680	178338	76704	163314	24.36
<i>Eugenia astringens</i>	0.79 ± 0.12	0.36	76194	163824	34638	205380	-54.54
<i>Psidium brownianum</i>	0.77 ± 0.1	0.42	42565	197453	26902	213116	-36.8
<i>Zollernia glabra</i>	0.77 ± 0.12	0.45	26624	213394	73589	166429	176.4
<i>Eugenia selloi</i>	0.75 ± 0.13	0.52	4416	235602	5082	234936	15.08
<i>Sapindus saponaria</i>	0.5 ± 0.06	0.50	59398	180620	71191	168827	19.85
<i>Sebastiania brasiliensis</i>	0.61 ± 0.08	0.47	46724	193294	16934	223084	-63.76
<i>Eugenia guanabarina</i>	0.77 ± 0.14	0.45	53853	186165	65659	174359	21.92

<i>Spondias macrocarpa</i>	0.66 ± 0.12	0.50	35986	204032	10573	229445	-70.62
<i>Casearia souzae</i>	0.75 ± 0.15	0.54	63591	176427	60726	179292	-4.51
<i>Cordia aberrans</i>	0.67 ± 0.14	0.45	80958	159060	126084	113934	55.74
<i>Rinorea bahiensis</i>	0.79 ± 0.14	0.43	59940	180078	90665	149353	51.26
<i>Trichilia ramalhoi</i>	0.71 ± 0.14	0.45	42135	197883	27348	212670	-35.09
<i>Myroxylon peruiferum</i>	0.65 ± 0.11	0.52	34128	205890	6115	233903	-82.08
<i>Acanthocladus pulcherrimus</i>	0.77 ± 0.14	0.48	59522	180496	121586	118432	104.27
<i>Andira nitida</i>	0.86 ± 0.06	0.36	53783	186235	56020	183998	4.16
<i>Solanum sycocarpum</i>	0.74 ± 0.15	0.43	66695	173323	57346	182672	-14.02
<i>Terminalia mameluco</i>	0.7 ± 0.15	0.47	29575	210443	11412	228606	-61.41
<i>Pereskia grandifolia</i>	0.57 ± 0.12	0.53	52229	187789	15931	224087	-69.5
<i>Achatocarpus praecox</i>	0.64 ± 0.09	0.50	39579	200439	40900	199118	3.34
<i>Campomanesia dichotoma</i>	0.78 ± 0.08	0.37	68859	171159	68523	171495	-0.49
<i>Casearia gossypiosperma</i>	0.54 ± 0.07	0.52	38097	201921	10471	229547	-72.51
<i>Eugenia gracillima</i>	0.58 ± 0.09	0.48	54870	185148	11770	228248	-78.55
<i>Monteverdia obtusifolia</i>	0.72 ± 0.12	0.40	37270	202748	30256	209762	-18.82
<i>Philyra brasiliensis</i>	0.63 ± 0.1	0.48	36722	203296	9738	230280	-73.48
<i>Ravenia infelix</i>	0.76 ± 0.13	0.55	21164	218854	26318	213700	24.35
<i>Zygia latifolia</i>	0.44 ± 0.33	0.52	76789	163229	60978	179040	-20.59

(Fonte: Elaborada pelo autor).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo investigou a resposta de 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes aos impactos das mudanças climáticas em um cenário de contínuo aumento nas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa. Os resultados, obtidos por meio da Modelagem de Adequabilidade Ambiental (ESM), proporcionaram importantes insights sobre a vulnerabilidade dessas espécies diante das alterações no clima e identificaram lacunas para conservação.

A análise abrangente dos modelos indicou que as mudanças climáticas em curso terão implicações tanto em termos de perdas quanto de ganhos nas áreas de adequabilidade ambiental das espécies. Os resultados foram fundamentados a partir da avaliação dos modelos, que revelou um desempenho superior ao esperado pelo acaso, com valores médios de TSS variando entre 0,54 e 0,82, e pouca variação entre as médias (Tabela 3). Resultado que sustenta a eficácia preditiva dos algoritmos, classificando seu desempenho como bom a excelente poder de predição (ZHANG et al. 2015).

#### 3.1 ESPÉCIES VULNERÁVEIS E PERDA DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL

Os resultados dos modelos mostraram que, das 44 espécies avaliadas, 30 enfrentarão reduções em suas áreas de adequabilidade ambiental. Destacam-se entre elas as espécies *Myroxylon peruiferum* e *Balfourodendron riedelianum*, apresentando perdas substanciais de áreas de adequabilidade, estimadas em 82,1% e 80,7%, respectivamente (Tabela 3). É fundamental destacar, que este resultado é referente a adequabilidade ambiental em toda a extensão da região neotropical, que compreende desde a parte sul do México, América Central, todas as ilhas do Caribe e América do Sul (ANTONELLI; SANMARTÍN, 2011). Embora a discussão sobre a adequabilidade ambiental de regiões externas à área de estudo não esteja dentro do escopo deste trabalho, a constatação de uma redução de área superior a 80% para espécies

importantes como *Myroxylon peruiferum* e *Balfourodendron riedelianum* é algo que não pode ser ignorado.

A espécie *Myroxylon peruiferum*, conhecida popularmente como Cabreúva ou bálsamo, pertence à família Fabaceae (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2024). É uma espécie considerada como de final de sucessão, caracterizada por hábito foliar decíduo, com ocorrência tanto no interior de matas primárias densas quanto em formações secundárias (KAGEYAMA, 1992; LORENZI 1992; FIGLIOLIA et al. 2006). Segundo os modelos, sua área de adequabilidade ambiental para o clima atual está predominantemente localizada na parte norte e noroeste da América do Sul, ilhas do Caribe, Bolívia e Brasil. Especificamente no Brasil, os modelos apontam adequabilidade nas regiões mais ao sul do Centro-Oeste, parte do Nordeste e toda a região Sudeste (Figura 2A).

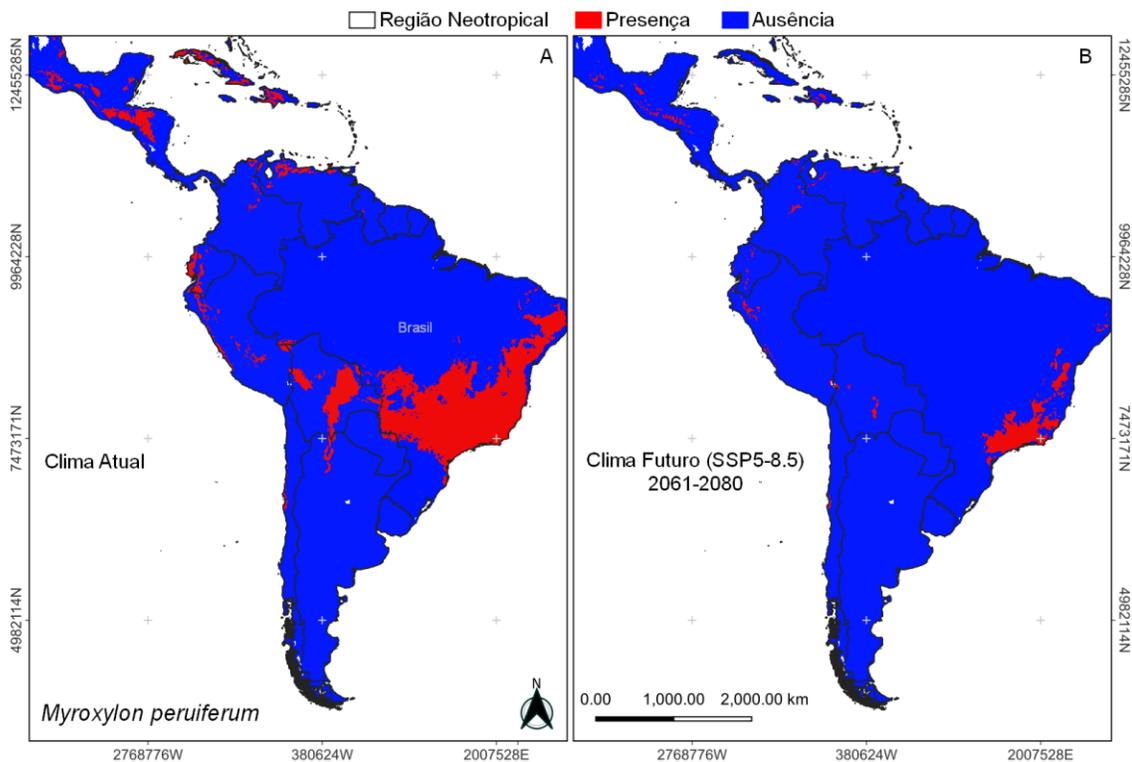


Figura 2. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Myroxylon peruiferum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B). (Fonte: Elaborada pelo autor).

Apesar de possuir relevância econômica, sendo explorada tanto para fins madeireiros quanto farmacológicos (SEBBENN et al., 1998; LORENZI 1992), *Myroxylon peruiferum* está classificada como “Menos Preocupante” (LC - *Least Concern*) pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) e pelo Centro Nacional de Conservação da Flora (CNCFlora) (Tabela 1). Entretanto, em um cenário em que não há perspectivas de alterações nas políticas de emissões de gases de efeito estufa, e o crescimento econômico mantém sua dependência dos combustíveis fósseis (O’NEILL et al., 2017), os resultados das projeções indicam que tal classificação precisará de revisões.

O problema, é que nesse cenário, a área de adequabilidade ambiental de *M. peruiferum* enfrentará uma considerável redução em toda a extensão da região neotropical. As áreas no norte e noroeste do Neotrópico, assim como na Bolívia, enfrentarão a perda total de quase toda a área antes considerada adequada para a ocorrência da espécie. No Brasil, a situação é ainda mais preocupante, especialmente na região mais ao sul do Centro-Oeste, onde a espécie encontrará quase nenhuma área de adequabilidade, assim como na maior parte da região Nordeste. Contudo, a disponibilidade de áreas adequadas para a ocorrência de *M. peruiferum* fica bastante restrita, estando presente apenas em algumas partes da região Sudeste, conforme ilustrado na Figura 2B.

Para a escala regional (levando em conta apenas os limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo), as projeções para *M. peruiferum* indicam uma redução de 28% na área de adequabilidade. Com perdas significativas no norte do Espírito Santo, em parte da região Metropolitana do Rio de Janeiro e, principalmente, ao longo da Falha de Campos dos Goytacazes, onde a redução será mais acentuada, restando apenas algumas pequenas manchas dispersas de área de adequabilidade (Figura 3B).

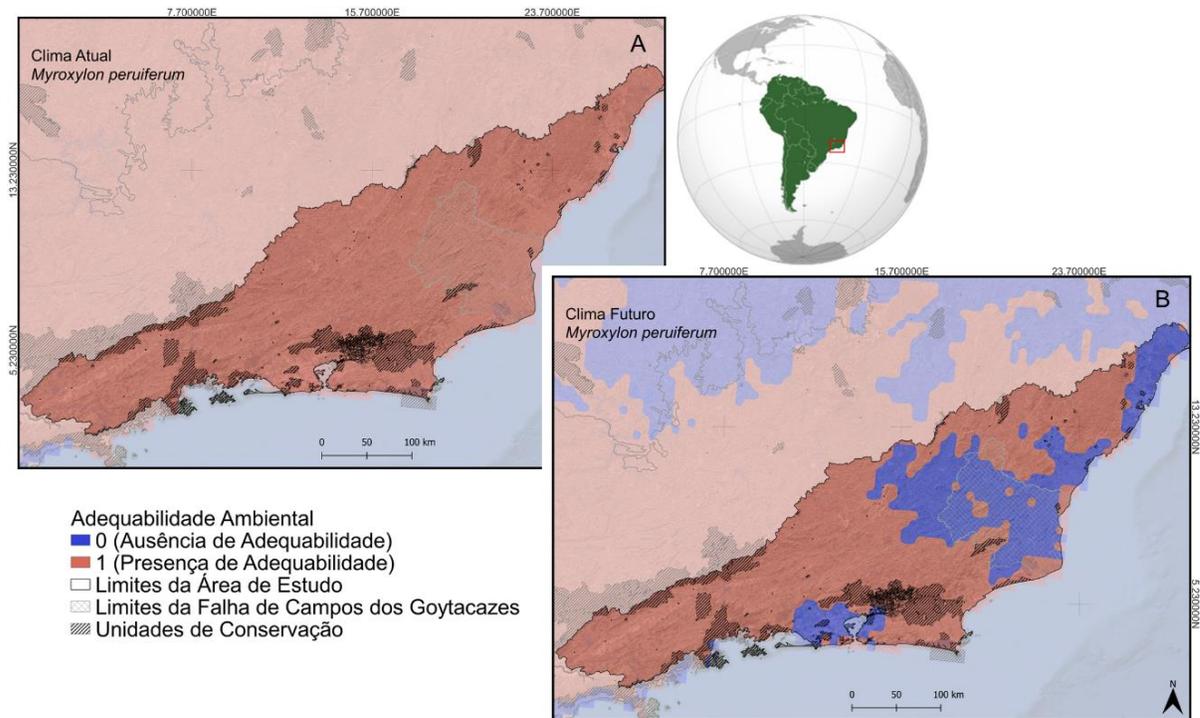


Figura 3. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Myroxylon peruiferum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

A espécie *Balfourodendron riedelianum*, popularmente conhecida como pau-marfim, apresenta resultados semelhantes. Pertencente à família Rutaceae, é classificada como secundária tardia, é frequentemente utilizada como planta ornamental e também utilizada em programas de reflorestamento de matas ciliares. Reconhecida por sua madeira nobre, amplamente empregada na marcenaria (CARVALHO, 2004), a espécie enfrenta desafios significativos devido à exploração e à redução de sua área de ocupação (IUCN, 2024).

Em decorrência das ameaças, a *Balfourodendron riedelianum* foi categorizada como “Em Perigo” (EN - *Endangered*) pela lista vermelha da IUCN. Na avaliação do CNCFlora ela está classificada como “Quase Ameaçada” (NT - *Near Threatened*) (Tabela 1), além de ser reconhecida como uma espécie “rara” na lista de plantas ameaçadas de extinção no estado do Paraná (HATSCHBACH; ZILLER, 1995).

Os modelos para o clima atual indicaram que as principais áreas de adequabilidade ambiental para *Balfourodendron riedelianum* estão localizadas na região

noroeste da América do Sul, bem como nas regiões sul, sudeste e nordeste do Brasil (Figura 4A). No entanto, considerando as projeções para o cenário futuro, com exceção de pequenas áreas na borda noroeste da América do Sul, os resultados indicaram a perda total de área de adequabilidade na parte tropical do continente. Para o Brasil, as projeções sugerem que restarão apenas algumas áreas pontuais de adequabilidade nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul. Destacando-se especialmente as áreas com a maior extensão de área de adequabilidade, os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e o estado de São Paulo (Figura 4B).

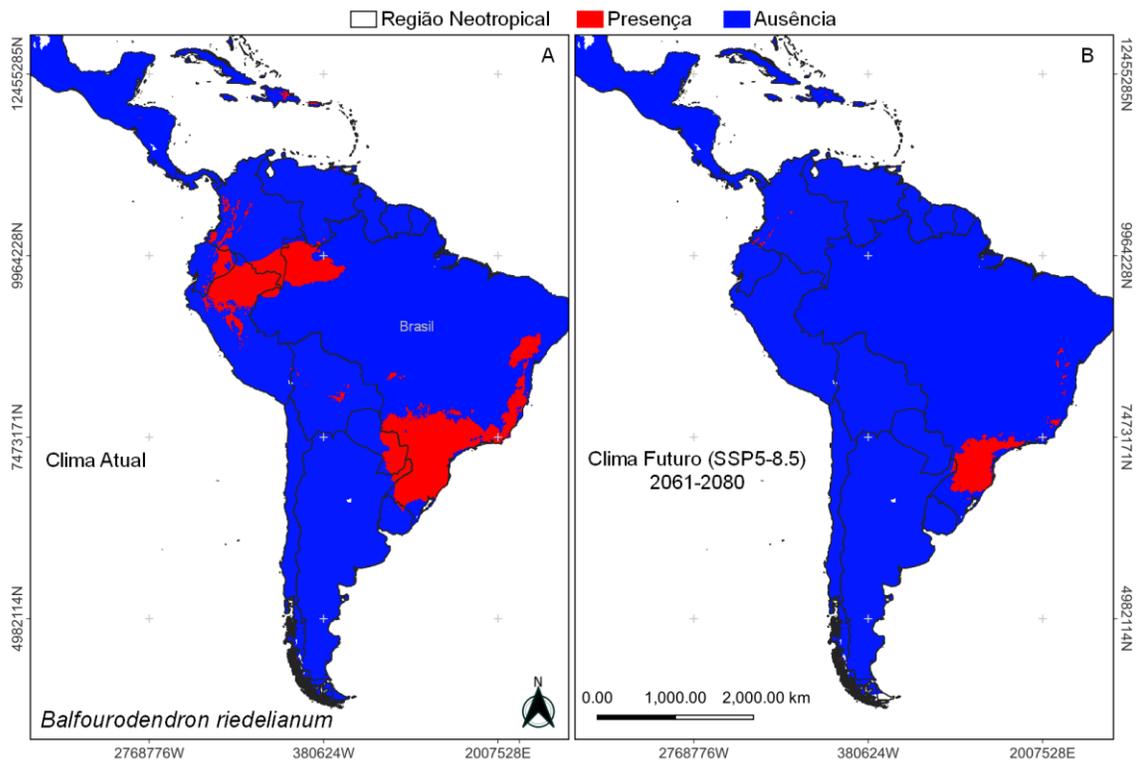


Figura 4. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Balfourodendron riedelianum* (pau-marfim) para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B). (Fonte: Elaborada pelo autor).

Na escala regional, entre todas as espécies avaliadas, *Balfourodendron riedelianum* destacou-se como aquela que apresentou o maior percentual de perda de

área de adequabilidade, com uma estimativa de 79% de redução. Conforme as projeções para o cenário futuro, a área de adequabilidade da espécie ficará restrita ao centro Sul do Espírito Santo e à região da Serra do Mar no estado do Rio de Janeiro. A área que corresponde a falha de Campos perderá toda a adequabilidade, exceto por uma pequena área que sobrepõe o Parque Estadual do Desengano (Figura 5B).

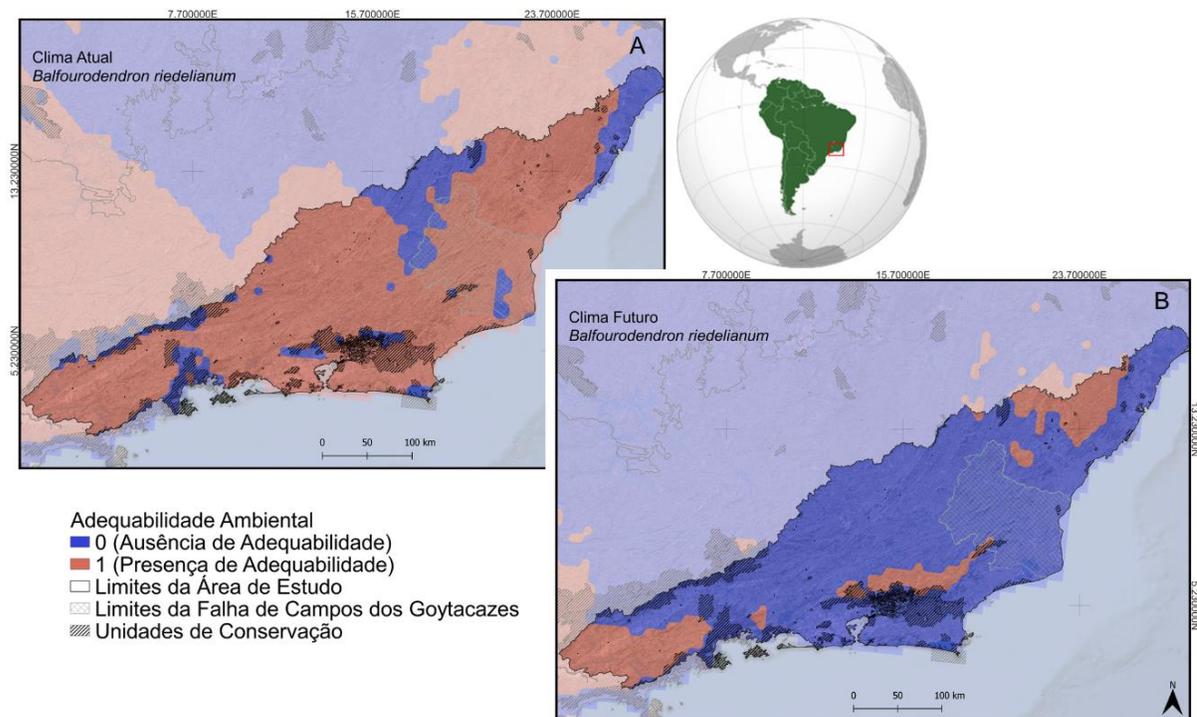


Figura 5. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Balfourodendron riedelianum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

Estes são exemplos de reduções projetadas nas áreas de adequabilidade ambiental de apenas duas espécies, no entanto, oferecem uma visão representativa de um panorama muito mais amplo e preocupante. A análise abrangente da adequabilidade em toda a região neotropical revelou que outros 28 resultados também evidenciam padrões semelhantes de perda de adequabilidade. Além das duas espécies já mencionadas, outras 13 espécies enfrentam a perspectiva de uma perda de mais de 50% de sua área de adequabilidade (Tabela 2).

Corroborando os resultados obtidos, estudos anteriores (COLOMBO; JOLY, 2010; RAGHUNATHAN et al., 2019; ESSER; NEVES; JARENKOW, 2019) indicam que muitas outras espécies não avaliadas neste trabalho também correm o risco de perder mais da metade de sua distribuição no futuro, ampliando assim as preocupações sobre a redução iminente da área de adequabilidade ambiental disponível para as espécies. Décadas de exploração em ecossistemas como a Mata Atlântica já resultaram na degradação da maior parte do habitat original (RIBEIRO et al., 2009), comprometendo a sobrevivência de diversas espécies e acumulando uma considerável dívida de extinção (JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014). Essas perdas adicionais na adequabilidade do habitat para espécies já vulneráveis podem aumentar substancialmente seu risco de extinção (MOAT; GOLE; DAVIS, 2019), alertando para ações imediatas visando a conservação e restauração desses habitats.

### 3.2 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ÁREA DE ADEQUABILIDADE AMBIENTAL DAS ESPÉCIES ARBÓREAS INDICADORAS DAS FALHA ESTACIONAIS DA FALHA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES

Ao delimitar os resultados para o contexto da área de estudo, os modelos indicaram uma redução na área de adequabilidade climática para 30 espécies (ver Tabela 4 e Figura S1). Dentre essas espécies, a *Balfourodendron riedelianum*, já mencionada, destaca-se com maior percentual de perda (79%). Outras três espécies também merecem atenção, pois apresentam perdas expressivas de área de adequabilidade, todas superiores a 50% no cenário futuro. Estas são *Erythroxylum passerinum* (54,8%), *Coccoloba alnifolia* (54,7%) e *Zygia latifolia* (52,6%) (ver Tabela 4).

Tabela 4. Número de Pixels de Presença e Ausência para os Cenários Atual e Futuro dos Modelos de Adequabilidade Ambiental de 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, com Projeções para o período de 2061-2080. O Percentual de Perda (representados pelos valores negativos) e Ganho (valores positivos) de Área de Adequabilidade é referente aos pixels dentro da área de estudo (limites das bacias hidrográfica Paraíba do Sul e as sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo).

Espécie	Número de Pixels na Área de Estudo
---------	------------------------------------

	Clima Atual		Futuro Projetado		Perda e Ganho de Adequabilidade (%)
	Presença	Ausência	Presença	Ausência	
<i>Parapiptadenia pterosperma</i>	1009	186	592	603	-41.33
<i>Alseis pickelii</i>	318	877	224	971	-29.56
<i>Brasiliopuntia brasiliensis</i>	1180	15	761	434	-35.51
<i>Centrolobium sclerophyllum</i>	400	795	388	807	-3
<i>Monilicarpa brasiliiana</i>	496	699	302	893	-39.11
<i>Crateva tapia</i>	339	856	625	570	84.37
<i>Amburana cearensis</i>	447	748	731	464	63.53
<i>Oxandra espihana</i>	941	254	856	339	-9.03
<i>Sarcomphalus platyphyllus</i>	914	281	919	276	0.55
<i>Tabebuia roseoalba</i>	1108	87	1052	143	-5.05
<i>Poeppigia procera</i>	774	421	715	480	-7.62
<i>Erythroxylum passerinum</i>	526	669	238	957	-54.75
<i>Grazilodendron rio-docensis</i>	364	831	413	782	13.46
<i>Acosmium lentiscifolium</i>	577	618	514	681	-10.92
<i>Balfourodendron riedelianum</i>	994	201	208	987	-79.07
<i>Sweetia fruticosa</i>	1130	65	1108	87	-1.95
<i>Coccoloba alnifolia</i>	885	310	401	794	-54.69
<i>Trichilia pseudostipularis</i>	963	232	962	233	-0.1
<i>Eugenia astringens</i>	846	349	480	715	-43.26
<i>Psidium brownianum</i>	376	819	209	986	-44.41
<i>Zollernia glabra</i>	572	623	788	407	37.76
<i>Eugenia selloi</i>	292	903	298	897	2.05
<i>Sapindus saponaria</i>	712	483	975	220	36.94
<i>Sebastiania brasiliensis</i>	1195	0	1076	119	-9.96
<i>Eugenia guanabarina</i>	351	844	496	699	41.31
<i>Spondias macrocarpa</i>	894	301	511	684	-42.84
<i>Casearia souzae</i>	596	599	638	557	7.05
<i>Cordia aberrans</i>	602	593	956	239	58.8
<i>Rinorea bahiensis</i>	439	756	559	636	27.33
<i>Trichilia ramalhoi</i>	663	532	442	753	-33.33
<i>Myroxylon peruiferum</i>	1195	0	860	335	-28.03
<i>Acanthocladus pulcherrimus</i>	424	771	851	344	100.71
<i>Andira nitida</i>	286	909	255	940	-10.84
<i>Solanum sycocarpum</i>	362	833	288	907	-20.44
<i>Terminalia mameluco</i>	413	782	262	933	-36.56
<i>Pereskia grandifolia</i>	1149	46	895	300	-22.11
<i>Achatocarpus praecox</i>	654	541	960	235	46.79
<i>Campomanesia dichotoma</i>	292	903	284	911	-2.74
<i>Casearia gossypiosperma</i>	1148	47	1024	171	-10.8
<i>Eugenia gracillima</i>	685	510	544	651	-20.58
<i>Monteverdia obtusifolia</i>	419	776	327	868	-21.96
<i>Philyra brasiliensis</i>	824	371	464	731	-43.69
<i>Ravenia infelix</i>	309	886	323	872	4.53

<i>Zygia latifolia</i>	346	849	164	1031	-52.6
------------------------	-----	-----	-----	------	-------

(Fonte: Elaborada pelo autor)

A espécie *Erythroxylum passerinum*, popularmente conhecida como bom-nome, pertence à família Erythroxylaceae. É uma espécie considerada endêmica do Brasil, com ocorrências confirmada na Mata Atlântica. Principalmente na Floresta Estacional Semidecidual, Manguezal, Restinga e Vegetação Sobre Afloramentos Rochosos (COSTA-LIMA; LOIOLA, 2014; FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2024). Apesar de apresentar potencial para descoberta de novos antioxidantes naturais, ela é uma espécie cientificamente pouco explorada (MELO et al., 2017). A falta de dados populacionais que confirmem possíveis reduções no seu número de indivíduos maduros, aliada à ausência de descrições específicas sobre usos que possam comprometer sua perpetuação na natureza, levou à classificação da espécie como LC pela lista vermelha da IUCN e CNCFlora (AMORIM; BICALHO, 2021; IUCN, 2024) (Tabela 2).

Os modelos para o clima atual destacam que a área de adequabilidade da espécie se distribui principalmente nas regiões costeiras, estendendo-se do litoral norte de São Paulo até o litoral norte do Espírito Santo. Contudo, é observada uma lacuna de adequabilidade no extremo norte de São Paulo até a região metropolitana do Rio de Janeiro (Figura 6A). As projeções futuras indicam reduções ao longo de toda a faixa litorânea, caracterizando perdas no sentido longitudinal à medida que se afasta do oceano (Figura 6B).

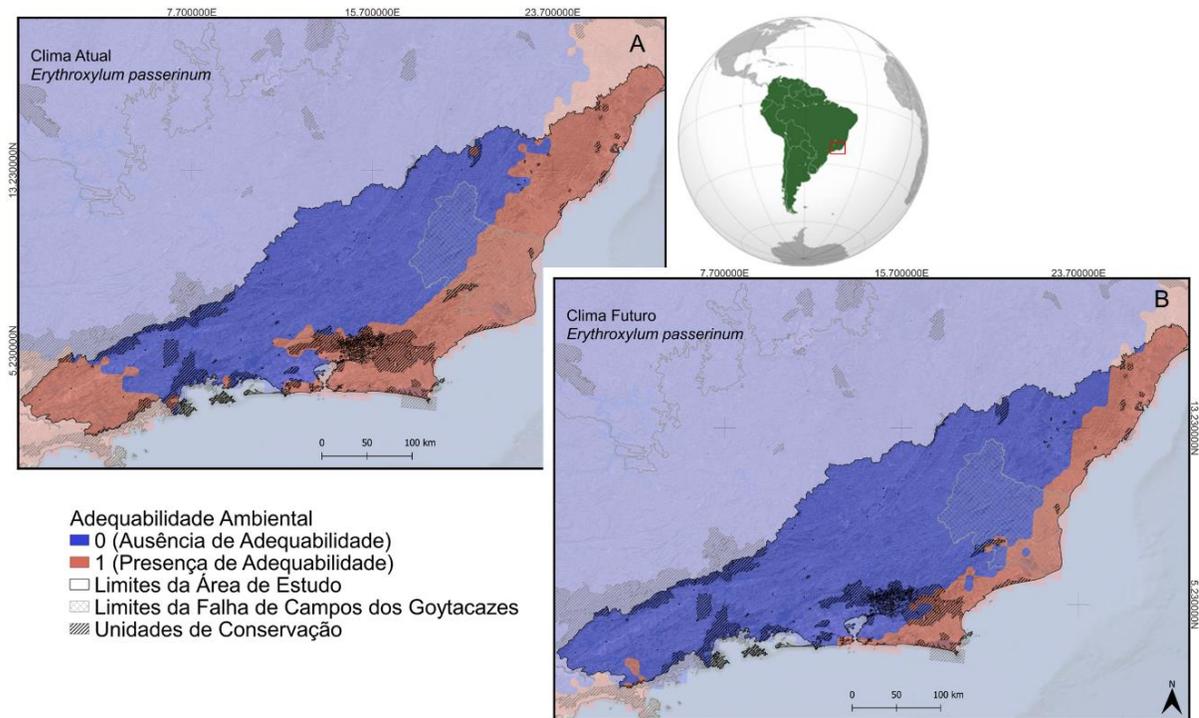


Figura 6. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Erythroxylum passerinum* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

As outras duas espécies, *Coccoloba alnifolia* e *Zygia latifolia*, classificadas como LC pela Lista Vermelha da IUCN, mas ainda não avaliadas pela CNCFlora, exibem padrões longitudinais semelhantes de perda de área de adequabilidade (Figura 7B e 8B, respectivamente). Esse padrão também foi identificado em outras 17 espécies deste estudo (consulte os mapas na Figura S1). Este resultado pode ser melhor visualizado a partir da sobreposição da adequabilidade ambiental entre as 44 espécies no mapa de consenso.

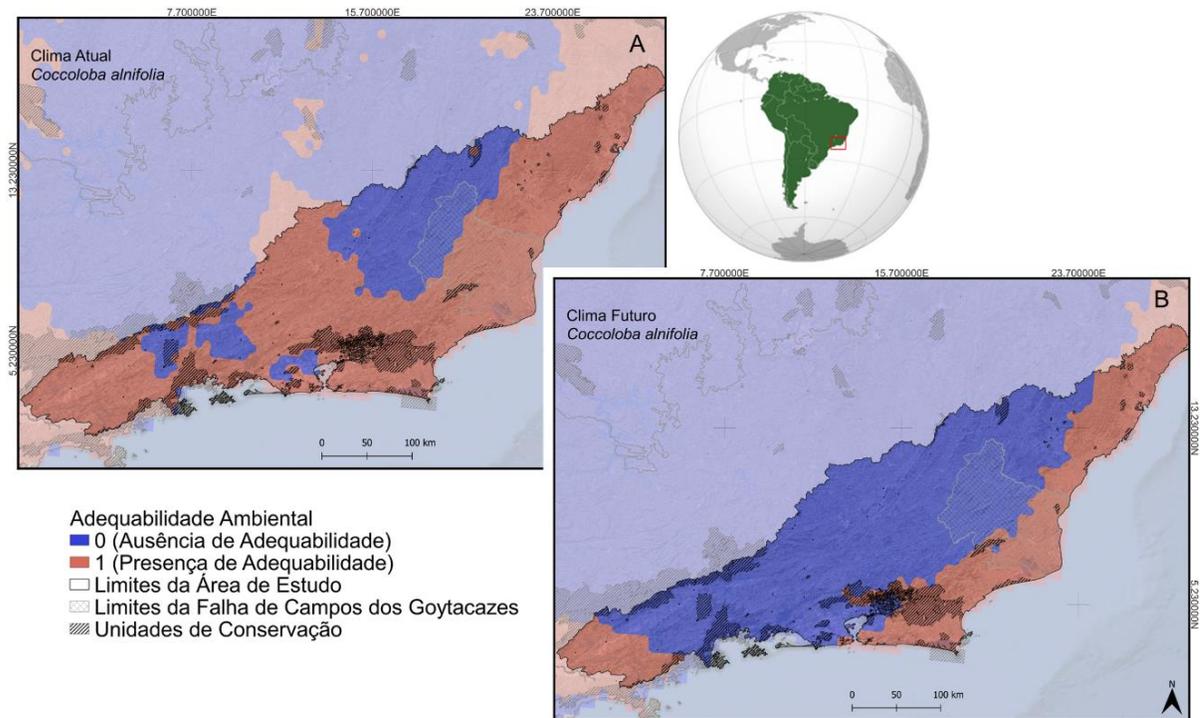


Figura 7. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Cocoloba alnifolia* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

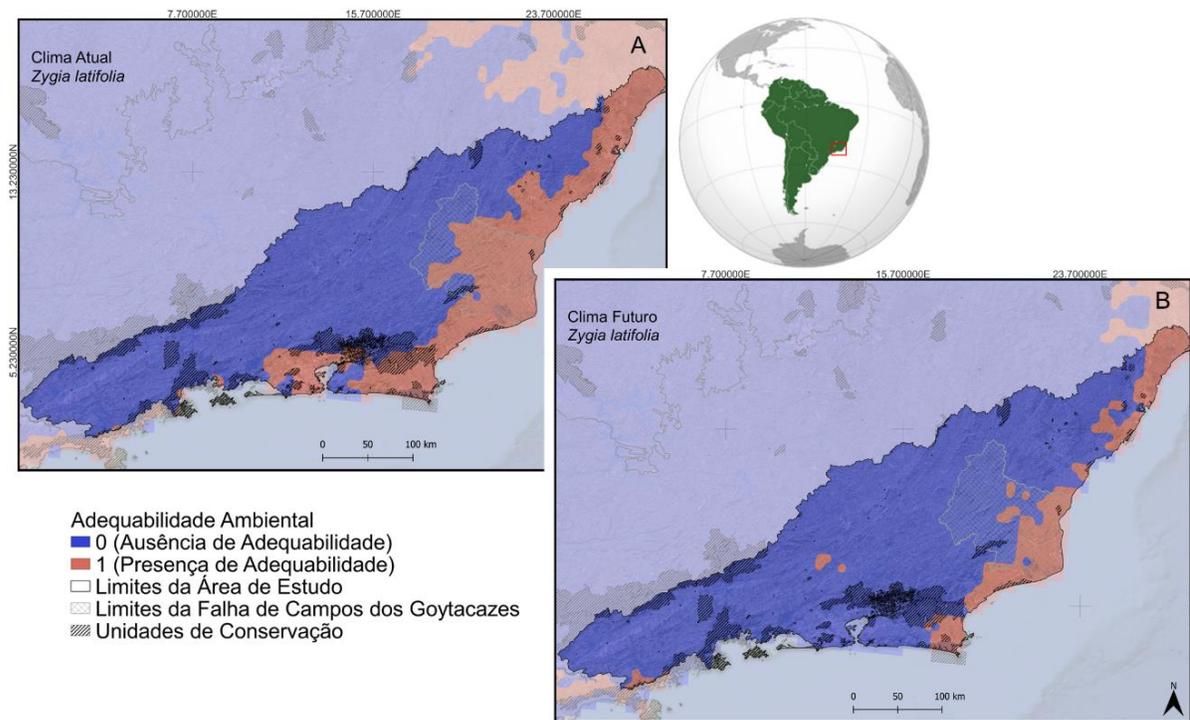


Figura 8. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Zygia latifolia* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

Para o clima atual, o mapa de consenso revela uma alta adequabilidade ambiental ao longo do litoral, desde a região metropolitana do Rio de Janeiro, baixada fluminense, norte fluminense (Falha de Campos) até o litoral norte do Espírito Santo (Figura 9). No entanto, para as projeções futuras, o mapa de consenso aponta que as áreas que se manterão estáveis ao longo do tempo tendem a se concentrar mais próximas ao oceano, com alta adequabilidade ambiental distribuída na região da baixada fluminense e áreas próximas à costa na Falha de Campos e no litoral da região central do Espírito Santo (Figura 10).

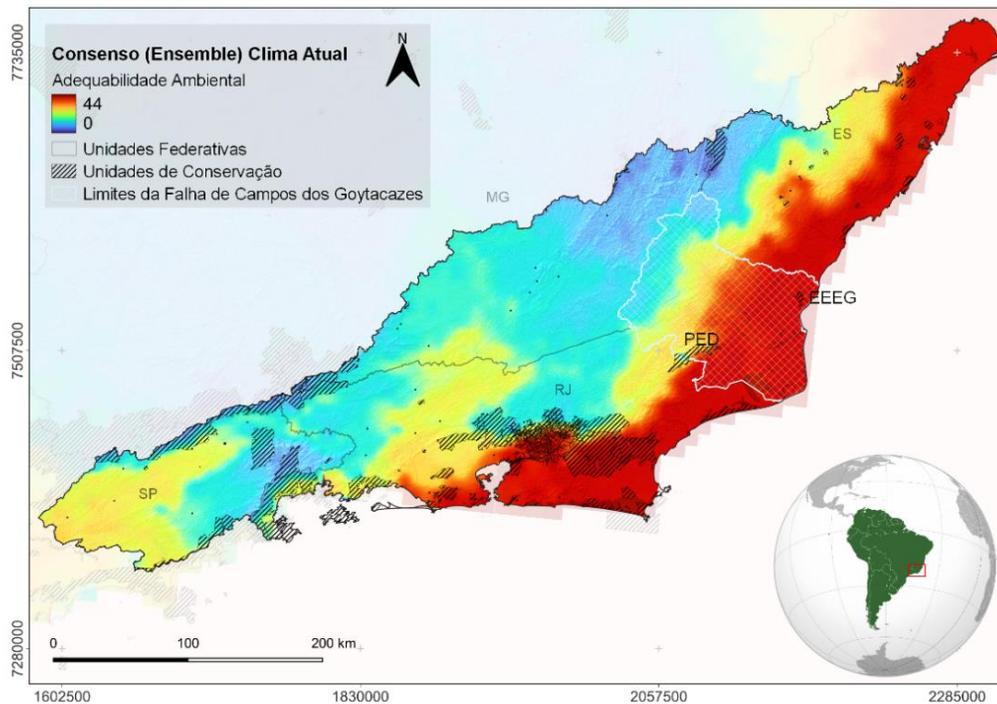


Figura 9. Mapa de Consenso da Adequabilidade Ambiental para 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes no Clima Atual, delimitado pela bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Inclui a sobreposição das unidades de conservação, como a Estação Ecológica Estadual Guaxindiba (EEEG) e o Parque Estadual do Desengano (PED). As cores mais quentes indicam Alta Adequabilidade Ambiental, enquanto as mais frias representam Baixa Adequabilidade Ambiental. (Fonte: Elaborada pelo autor).

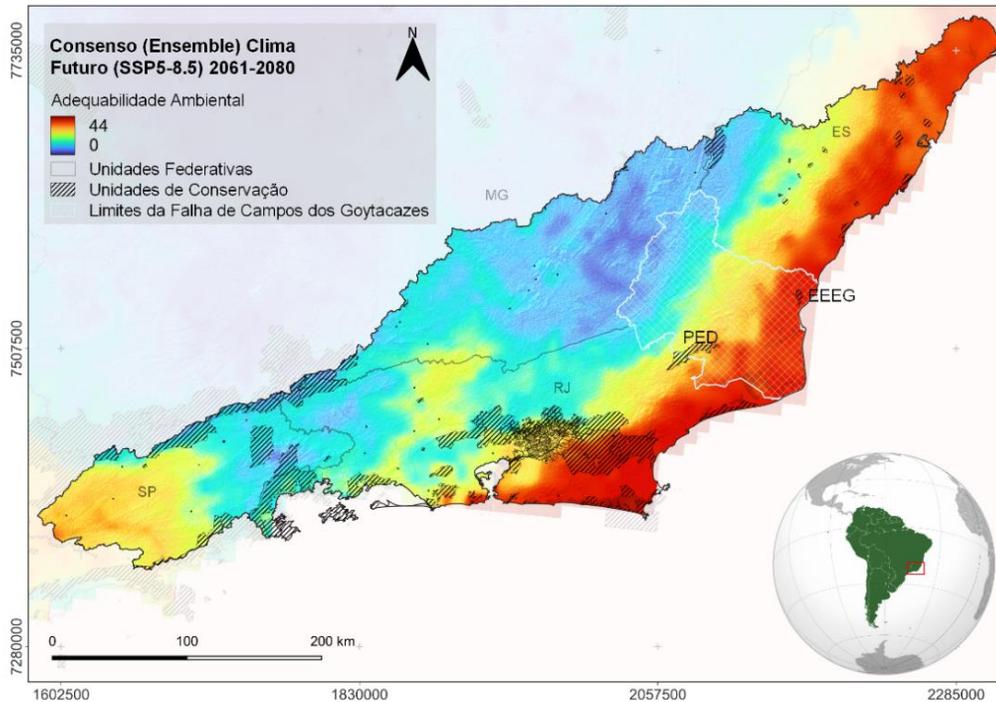


Figura 10. Mapa de Consenso da Adequabilidade Ambiental para 44 Espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes no cenário futuro (SSP5-8.5), delimitado pela bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias Litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Inclui a sobreposição das unidades de conservação, como a Estação Ecológica Estadual Guaxindiba (EEEG) e o Parque Estadual do Desengano (PED). As cores mais quentes indicam Alta Adequabilidade Ambiental, enquanto as mais frias representam Baixa Adequabilidade Ambiental. (Fonte: Elaborada pelo autor).

Com as projeções indicando um aumento nos níveis de aridez, intensificado pelas mudanças climáticas (MARENGO; TORRES; ALVES, 2016), não surpreende que as áreas de alta adequabilidade ambiental se concentrem próximo ao oceano. Uma nota técnica recente, divulgada pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), revelou uma tendência de aumento da aridez em todo o país, exceto na região sul e no litoral dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. Essas variações são principalmente atribuídas ao aumento da evapotranspiração, associado ao aumento da temperatura, observado em grande parte do país. No caso das reduções, estas estão relacionadas ao aumento da precipitação (CEMADEN, 2023).

Em geral, as regiões costeiras são menos suscetíveis às flutuações de temperatura em comparação com o interior dos continentes (BRUNT, 1924). Uma característica importante é que se tornam mais nubladas à medida que as temperaturas aumentam (BAKUN, 1990), sugerindo uma possível compensação dos efeitos do

aquecimento global pelo aumento da cobertura de nuvens (TREW; MACLEAN, 2021). Portanto, a capacidade dessas regiões de manter taxas mais lentas de mudança de temperatura permite uma relativa resistência aos impactos diretos das mudanças climáticas (TREW; MACLEAN, 2021), favorecendo a preservação da adequabilidade ambiental das espécies. Este padrão é consistente com estudos em outros grupos que também apresentaram padrões de adequabilidade em regiões costeiras (LEMES; LOYOLA, 2013; VASCONCELOS; PRADO, 2019; DE OLIVEIRA et al., 2023).

Entretanto, observa-se um padrão de perda mais acentuado dentro dos limites estabelecidos para Falha de Campos dos Goytacazes (Figura 10). Ao contrário das regiões costeiras adjacentes, a Falha de Campos é influenciada pelo fenômeno oceanográfico de ressurgência, que ocorre regularmente na região de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro (ARAÚJO, 1997). Esse fenômeno traz à superfície oceânica águas mais frias das correntes das Malvinas, reduzindo a temperatura atmosférica e, conseqüentemente, a evaporação no oceano e a umidade atmosférica local (CASTELAO; BARTH, 2006). Isso resulta em clima costeiro mais seco, que, em um contexto de mudanças climáticas, tende a se intensificar (veja, MARENGO; TORRES; ALVES, 2016).

Considerando a perda de área mais acentuada na Falha de Campos, é possível afirmar que algumas espécies dessa região já estão próximas de seus limites climáticos, destacando a urgência de medidas de conservação para garantir a preservação dessas espécies. No entanto, além desses resultados negativos, referentes à perda de áreas de adequabilidade, é otimista notar que 14 espécies demonstram grande resiliência, apresentando ganhos em suas áreas de adequabilidade ambiental (Tabela 4). Algumas delas mostraram aumento superior a 50% no cenário futuro. Dentre elas, destacam-se *Acanthocladus pulcherrimus* (100,7%), *Crateva tapia* (84,4%), *Amburana cearensis* (63,5%), e *Cordia aberrans* (58,8%) (Figuras 11B, 12B e 13B, respectivamente).

Esses resultados sugerem que, apesar das ameaças substanciais que as alterações climáticas representam para muitas espécies, algumas apresentam uma maior plasticidade climática, permitindo-lhes tolerar uma faixa mais ampla de condições climáticas e, conseqüentemente, expandir suas distribuições (CHEVIN; LANDE; MACE, 2010). A identificação e compreensão dessas espécies mais resilientes podem auxiliar os tomadores de decisões na elaboração de estratégias de conservação mais direcionadas.

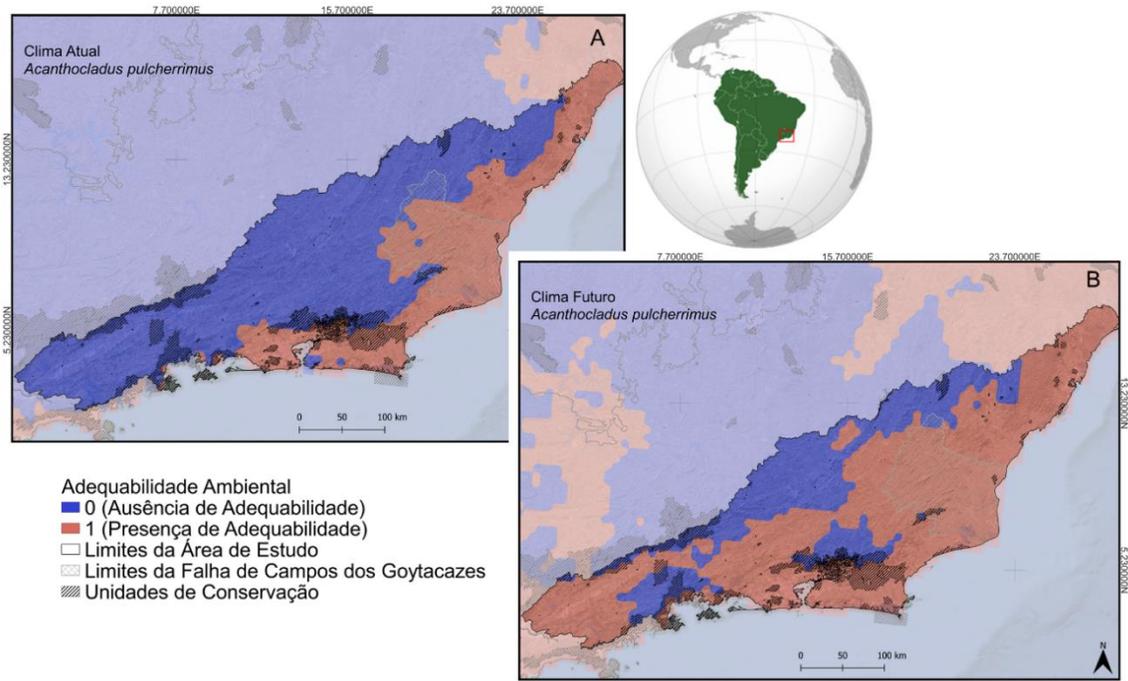


Figura 11. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Acanthocladus pulcherrimus* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

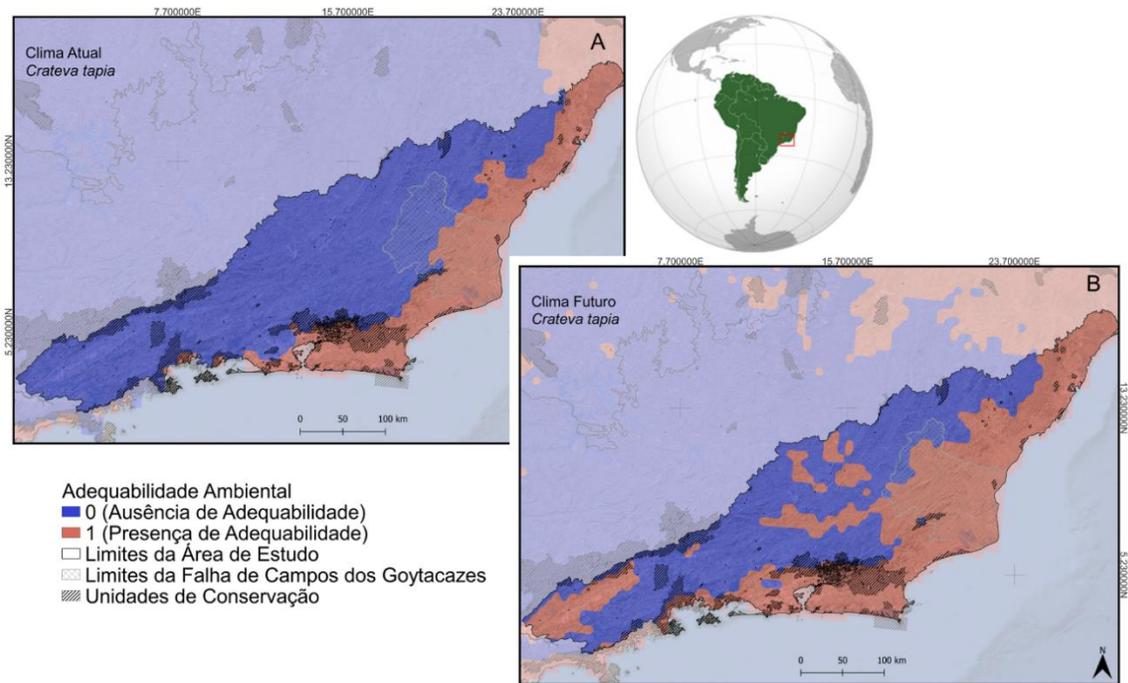


Figura 12. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Crateva tapia* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

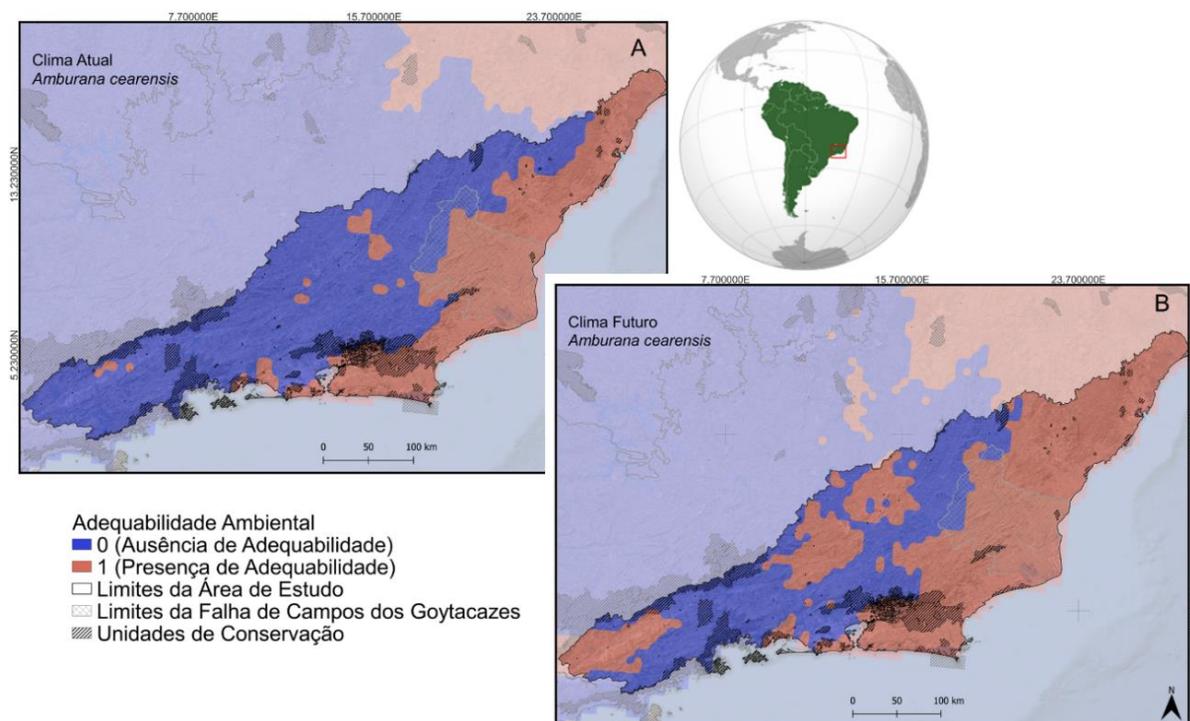


Figura 13. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *Amburana cearensis* para o clima atual (A) e projeção para o clima futuro (B) dentro dos limites da bacia hidrográfica Paraíba do Sul e sub-bacias litorâneas do Rio de Janeiro e Espírito Santo. (Fonte: Elaborada pelo autor).

No entanto, vale ressaltar que, embora certas espécies demonstrem uma maior resiliência climática e possam se beneficiar do aumento das temperaturas globais, as ações antrópicas, como o uso e ocupação do solo, representam sérios riscos para essas espécies (OLIVEIRA et al., 2023). A fragmentação e degradação do habitat destacam-se como os principais contribuintes para o atual declínio da biodiversidade (LEWIS; EDWARDS; GALBRAITH, 2015; POTAPOV et al., 2017). Estudos recentes na Mata Atlântica indicam que, nas próximas décadas, é provável que o uso e ocupação do solo sejam responsáveis por perdas totais de habitat das plantas superiores às causadas pelas mudanças climáticas (SILVA et al., 2019; LEÃO et al., 2021).

Neste cenário, é importante observar que entre as espécies que demonstraram maior resiliência climática, as espécies *Acanthocladus pulcherrimus* e *Amburana cearensis* estão classificadas como "Quase Ameaçadas" (NT) pela Lista Vermelha do

CNCFlora. Contudo, a situação da *Amburana cearensis* é ainda mais preocupante, sendo categorizada como 'Em perigo' (EN) na Lista Vermelha da IUCN, apontando para um risco de extinção (IUCN, 2024) (Tabela 1).

Assim, as espécies respondem de diferentes maneiras às mudanças no clima e no uso da terra (ZHANG et al., 2017). Portanto, as estratégias de conservação devem ser mais abrangentes, abordando em conjunto tanto os desafios associados aos impactos das mudanças climáticas quanto aqueles relacionados ao uso da terra.

### **3.3 EFICÁCIA DA REDE DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA FALHA DE CAMPOS DOS GOYTACAZES DM FACE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Uma abordagem fundamental para garantir a conservação das espécies é a criação de Unidades de Conservação (BRUNER et al. 2001; CHAPE et al. 2005; LEMES; MELO; LOYOLA, 2013). A Mata Atlântica, por exemplo, possui o maior número de UCs entre todos os Biomas brasileiros (VIEIRA; PRESSEY; LOYOLA, 2019). Entretanto, a nível federal e estadual, na região da Falha de Campos, observa-se a existência de apenas duas unidades de conservação, classificadas como de proteção integral (Figura 14). Essa categoria de UC tem como principal objetivo a preservação da natureza, limitando a utilização dos recursos naturais a atividades indiretas, como pesquisa, turismo planejado e atividades educacionais ambientais (BRASIL, 2000).

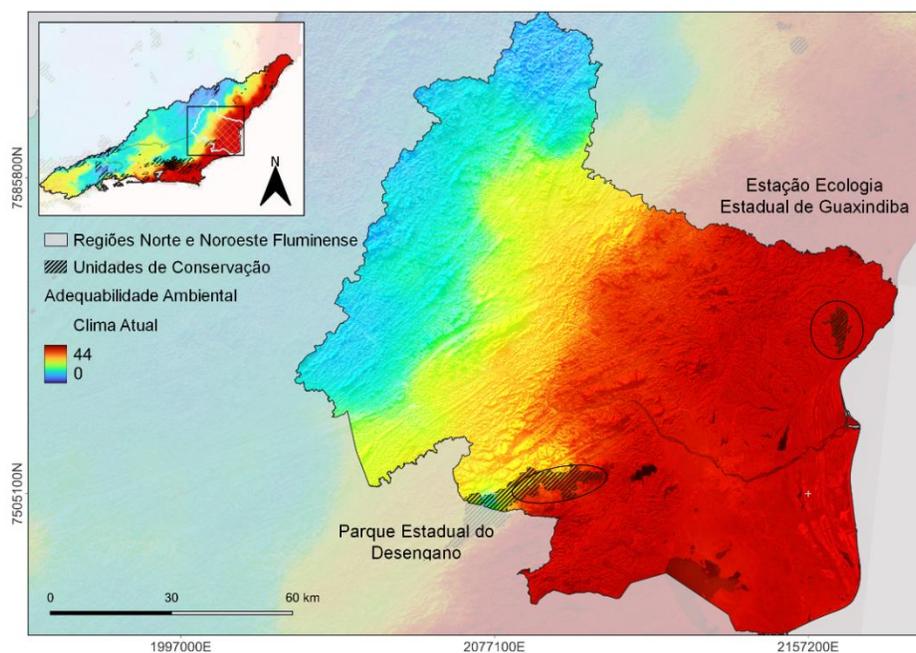


Figura 14. Representação das unidades de conservação localizadas na Falha de Campos dos Goytacazes, com sobreposição da Área de Alta Adequabilidade Ambiental para 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da região, considerando as condições climáticas atuais.

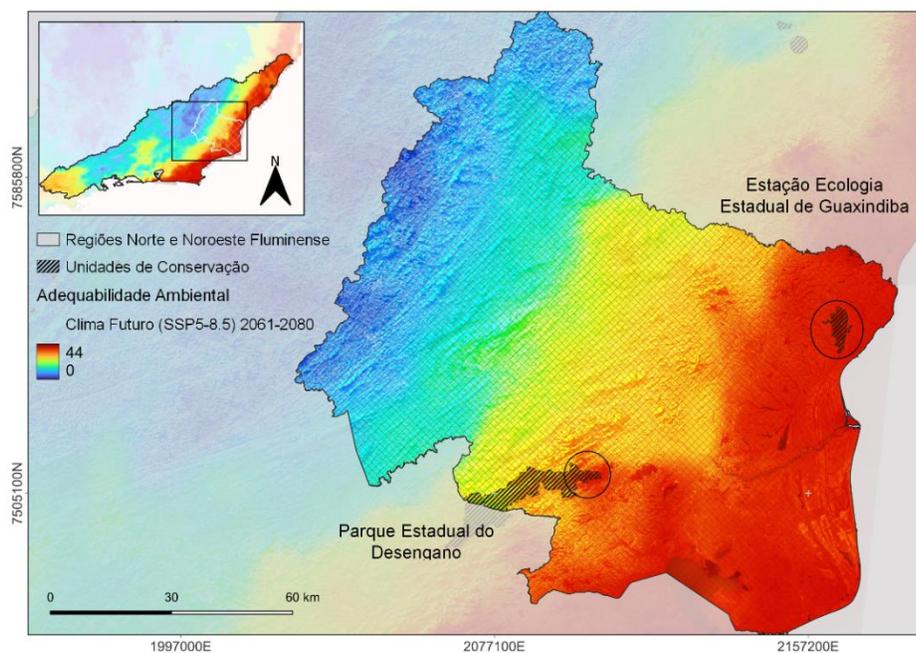


Figura 15. Representação das unidades de conservação localizadas na Falha de Campos dos Goytacazes, com sobreposição da Área de Alta Adequabilidade Ambiental para 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da região, considerando as projeções climáticas futuras.

A primeira delas é a Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba (EEEG), estabelecida em 30 de dezembro de 2002, por meio do Decreto Estadual nº 32.576. Esta UC protege um dos últimos e mais expressivo remanescente de floresta estacional semidecidual de Tabuleiros no Estado do Rio de Janeiro (SILVA; NASCIMENTO, 2001). A segunda é o Parque Estadual do Desengano (PED), instituído pelo Decreto-lei Estadual nº 250 de 13 de abril de 1970. Esta UC protege áreas de Floresta Ombrófila Densa Montana, Submontanas e Campos de Altitude (VELOSO; RANGEL-FILHO; LIMA, 1991; SOFFIATI, 2009; INEA, 2021).

A sobreposição do mapa de consenso revela a importância dessas UCs para a região. No cenário atual, ambas demonstram adequabilidade ambiental para todas as espécies avaliadas neste estudo, sugerindo eficácia na preservação dessas espécies. No Parque Estadual do Desengano, a concentração da alta adequabilidade ambiental ocorre predominantemente na porção mais na borda do parque, enquanto para a EEEG, a adequabilidade contempla toda a extensão da UC (Figura 14).

No cenário futuro, ambas as UCs conseguirão manter a área de alta adequabilidade (Figura 15). Sugerindo que a eficácia na preservação da área de alta adequabilidade dessas espécies permanecerá mesmo em um cenário pessimista de mudanças climáticas. No entanto, as projeções indicam desafios para certas espécies em ambas as UCs, destacando a necessidade de estratégias adaptativas para sua conservação (ESSER; NEVES; JARENKOW, 2019). Na EEEG, das 44 espécies avaliadas, apenas as espécies *Balfourodendron riedelianum* e *Casearia gossypiosperma* perderão adequabilidade em toda a extensão da UC. No PED, quatro espécies não encontrarão área de adequabilidade ambiental, sendo elas: *Alseis pickellii*, *Psidium brownianum*, *Andira nitida* e *Zygia latifolia*.

Assim, as UCs na região da Falha de Campos dos Goytacazes desempenham um papel importante ao sobrepor as áreas de alta adequabilidade ambiental, tanto no cenário climático atual quanto nas projeções para o futuro de mudanças climáticas. No entanto, a cobertura de UCs na região é insuficiente, deixando as áreas mais estáveis em termos de adequabilidade ambiental majoritariamente desprotegidas. É fundamental, portanto, incluir essas áreas no desenvolvimento de estratégias sistemáticas de preservação e

iniciativas de restauração, visando à conservação das espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes e, conseqüentemente, da biodiversidade da Mata Atlântica (ESSER; NEVES; JARENKOW, 2019).

Os resultados indicam que os municípios de Campos dos Goytacazes e São Francisco de Itabapoana possuem as áreas mais estáveis em termos de adequabilidade ambiental para um total de 41 espécies, sendo potenciais alvos para a instalação de novas unidades de conservação. Essas áreas de alta adequabilidade estão distribuídas especificamente nas regiões ao sul de Campos dos Goytacazes e nas regiões centro-norte e sul de São Francisco de Itabapoana (Figura 16).

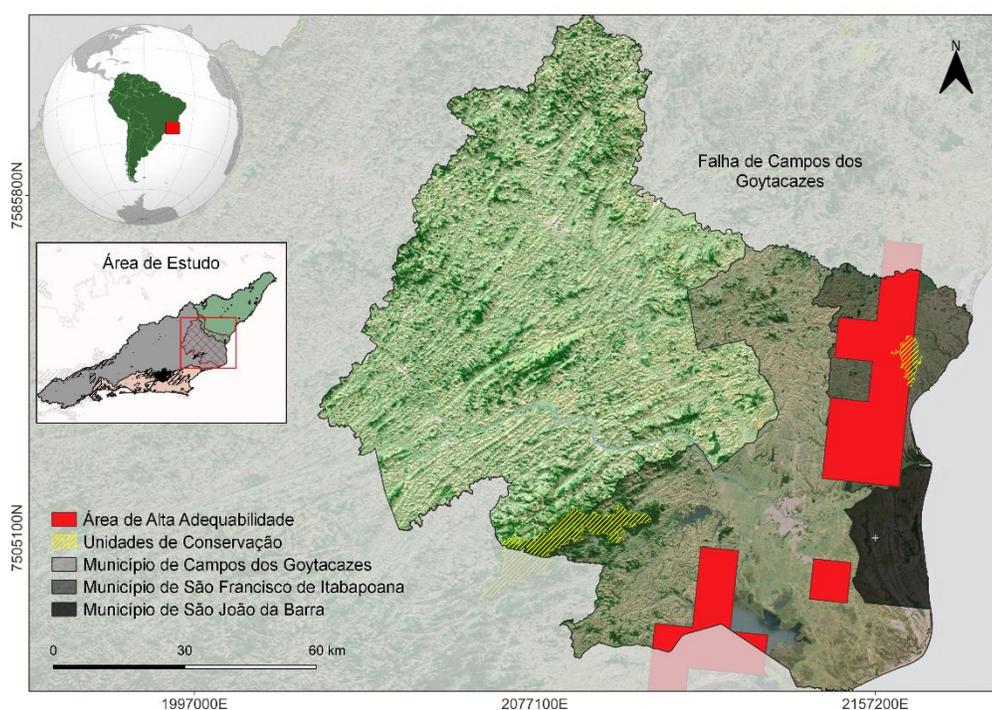


Figura 16. Áreas de Alta Adequabilidade indicadas para implantação de Unidades de Conservação para preservação das espécies indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes em resposta às mudanças climáticas futuras.

A inclusão desses locais como unidades de conservação é importante para garantir a proteção efetiva dos ecossistemas remanescentes da região. Além de

preservar a área de adequabilidade das espécies indicadoras, essas áreas podem abrigar uma variedade de espécies vegetais e animais, muitas vezes endêmicos e até mesmo ameaçados, além de desempenharem papéis fundamentais na manutenção dos serviços ecossistêmicos (BRASIL, 2008).

Portanto, a implementação de unidades de conservação nestes locais representa não apenas um passo importante para a proteção do patrimônio natural da região, mas também uma medida essencial para garantir a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças ambientais globais e para promover o bem-estar das gerações presentes e futuras.

#### 4. CONCLUSÃO

Conclui-se com esta pesquisa que as mudanças climáticas provocarão alterações na área de adequabilidade ambiental das 44 espécies arbóreas indicadoras das Florestas Estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes. Através da Modelagem de Adequabilidade Ambiental, foi constatado alterações tanto em perdas quanto em ganho de área de adequabilidade ambiental, ultrapassando 50% em alguns casos. No mapa de consenso das espécies, os modelos indicam perdas no sentido do continente para o oceano.

As espécies arbóreas mais suscetíveis a alterações considerando a adequabilidade em toda a extensão da região neotropical foram *Myroxylon peruiferum* e *Balfourodendron riedelianum*, com perdas superiores a 80%. Quanto às perdas na área de estudo, *Balfourodendron riedelianum*, *Erythroxylum passerinum*, *Coccoloba alnifolia* e *Zygia latifolia* projetam perdas superiores a 50%. Em relação às espécies que ganharam área de adequabilidade, destacaram-se *Acanthocladus pulcherrimus*, *Crateva tapia*, *Amburana cearensis* e *Cordia aberrans*, com ganho de área superior a 50%.

Foi também constatado que a rede de unidades de conservação estadual e federal na Falha de Campos dos Goytacazes está posicionada de maneira adequada para preservar as áreas de alta adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras, tanto para o clima atual quanto considerando cenários futuros de mudanças climáticas. No entanto, a cobertura de área é muito baixa, necessitando a instalação de novas UCs.

Os locais adequados para instalação de novas UCs devem seguir as áreas de alta adequabilidade estáveis, mais próximas às regiões costeiras da Falha de Campos.

É importante reconhecer, no entanto, que existem limitações associadas aos modelos (LINDNER et al., 2014). Contudo, é crucial ressaltar que em termos metodológicos foram tomadas todas as medidas possíveis para minimizar as incertezas. Assim, ao concluir este estudo, destaca-se a dinâmica complexa das mudanças climáticas e seu potencial impacto na adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras das florestas estacionais da Falha de Campos dos Goytacazes, evidenciando a necessidade urgente de medidas mitigadoras das emissões dos Gases de Efeito Estufa.

## 5. REFERÊNCIAS

- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J. et al. Drier tropical forests are susceptible to functional changes in response to a long-term drought. **Ecology Letters**, v. 22, n. 5, p. 855-865, 2019.
- ALLEN, K. et al. Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes?. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 023001, 2017.
- ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of applied ecology**, v. 43, n. 6, p. 1223-1232, 2006.
- AMORIM, E.; BICALHO, M. 2021. *Erythroxylum passerinum* (Erythroxylaceae). Lista Vermelha da Flora Brasileira: Centro Nacional de Conservação da Flora/ Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro.
- ANTONELLI, A.; SANMARTÍN, I. Why are there so many plant species in the Neotropics?. **Taxon**, v. 60, n. 2, p. 403-414, 2011.
- ARAUJO, D. S. D. Mata Atlântica: CPD site SA14, Cabo Frio Region, south-eastern Brazil. **Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservation**, p. 373-375, 1997.
- ARAÚJO, M. B.; NEW, M. Ensemble forecasting of species distributions. **Trends in ecology & evolution**, v. 22, n. 1, p. 42-47, 2007.
- BARVE, N.; BARVE, V. ENMGadgets: tools for pre and post processing in ENM workflows. (2018). Disponível em: <https://github.com/vijaybarve/ENMGadgets>
- BAKUN, A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. **Science**, v. 247, n. 4939, p. 198-201, 1990.
- BOHN, L. et al. Desertification susceptibility over Rio de Janeiro, Brazil, based on aridity indices and geoprocessing. **International journal of climatology**, v. 41, p. E2600-E2614, 2021.

BRASIL. Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza: Lei n. ° 9.985, de 18 de julho de 2000. Brasília, DF: Diário Oficial da União. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm). Acesso em: 18 fev. de 2024.

BRASIL, W. W. F. Unidades de conservação: conservando a vida, os bens e os serviços ambientais. **São Paulo**, 2008. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?11320/>. Acesso em: 19 fev. de 2024.

BRUNER, A. G. et al. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. **Science**, v. 291, n. 5501, p. 125-128, 2001.

BRUNT, D. Climatic continentality and oceanity. **The Geographical Journal**, v. 64, n. 1, p. 43-49, 1924.

CALENGE, C.; CALENGE, M. C. Package 'adehabitat'. Analysis of Habitat Selection by Animals, Version 1.8.20, 2018.

CARNAVAL, A. C.; MORITZ, C. Historical climate modelling predicts patterns of current biodiversity in the Brazilian Atlantic forest. **Journal of Biogeography**, v. 35, n. 7, p. 1187-1201, 2008.

CARVALHO, P. E. R. Pau-Marfim: *Balfourodendron riedelianum*. 2004.

CASTELAO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 3, 2006.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). **Nota técnica. Estudo do CEMADEN e do INPE identifica pela primeira vez a ocorrência de uma região árida no país**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/>

CHAPE, S., et al. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 360, p. 443-455, 2005.

CHEVIN, L; LANDE, R; MACE, G. M. Adaptation, plasticity, and extinction in a changing environment: towards a predictive theory. **PLoS biology**, v. 8, n. 4, p. e1000357, 2010.

COLOMBO, A. F.; JOLY, C. A. Brazilian Atlantic Forest lato sensu: the most ancient Brazilian forest, and a biodiversity hotspot, is highly threatened by climate change. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, p. 697-708, 2010.

COSTA-LIMA, J. L.; LOIOLA, M. I. B.; JARDIM, J. G. Erythroxyloaceae no Rio Grande do Norte, Brasil. **Rodriguésia**, v. 65, p. 659-671, 2014.

DA SILVA SAMPAIO, V. et al. Description of a new species of spiny Solanum (Solanaceae) from rocky outcrops of Northeastern Brazil, with modeling of its environmental suitability. **Systematic Botany**, v. 44, n. 2, p. 415-423, 2019.

DE MARCO JÚNIOR P.; NÓBREGA, C. C. Evaluating collinearity effects on species distribution models: An approach based on virtual species simulation. **PloS one**, v.13, n. 9, e0202403, 2018.

DE MARCO JÚNIOR, P.; SIQUEIRA, M. F. Como determinar a distribuição potencial de espécies sob uma abordagem conservacionista. **Megadiversidade**, v.5, n.1-2, p. 65-76, 2009.

DE OLIVEIRA, M. E. et al. Modeling responses of Brazilian Atlantic Forest mammals assemble to climate change. **Biodiversity and Conservation**, p. 1-21, 2023.

DERECZYNSKI, C; SILVA, W. L; MARENGO, J. Detection and projections of climate change in Rio de Janeiro, Brazil. 2013.

DIRZO, R. **Seasonally dry tropical forests: ecology and conservation**. Island Press, 2011.

DORMANN, C. F. et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. **Ecography**, v. 36, n.1, p. 27-46, 2013.

DURIGAN, G. et al. Estrutura e diversidade do componente arbóreo da floresta na Estação Ecológica dos Caetetus, Gália, SP. **Brazilian Journal of Botany**, v. 23, p. 371-383, 2000.

ELITH, J; FRANKLIN, J. Species distribution modeling. In: **Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition**. Elsevier Inc., 2013. p. 692-705.

ESSER, L. F; NEVES, D. M.; JARENKOW, J. A. Habitat-specific impacts of climate change in the Mata Atlântica biodiversity hotspot. **Diversity and Distributions**, v. 25, n. 12, p. 1846-1856, 2019.

EVANGELISTA-VALE, J. C. et al. Climate change may affect the future of extractivism in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 257, p.109093, 2021.

FIGLIOLIA, M. B.; DE AGUIAR, I. B; DA SILVA, A. Germinação de sementes de *Lafoensia glyptocarpa* Koehne (mirindiba-rosa), *Myroxylon peruiferum* L. f.(cabreúva-vermelha) e *Cedrela fissilis* Vell.(cedro-rosa). Seed germination of *Lafoensia glyptocarpa* Koehne (mirindiba-rosa), *Myroxylon peruiferum* L. f.(cabreúva-vermelha) and *Cedrela fissilis* Vell.(cedro-rosa). 2006.

FIELD, C. B. et al. Alterações climáticas 2014: impactos, adaptação e vulnerabilidade: contribuição do grupo de trabalho II para o quinto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre alterações climáticas. 2014.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International journal of climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br>. Acesso em: 6 fev. 2024.

GIOVANELLI, J. G. R. et al. Modelagem do nicho ecológico de *Phyllomedusa ayeaye* (Anura: Hylidae): previsão de novas áreas de ocorrência para uma espécie rara. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 3, n. 2, p. 59-65, 2008.

GIOVANNINI, A., SEGLIE, D. and GIACOMA, C. Identifying priority areas for conservation of spadefoot toad, *Pelobates fuscus insubricus* using a maximum entropy approach. **Biodiversity and Conservation**, v. 23, p.1427-1439, 2014.

GOMIDES, S. C., et al. Assessing species reintroduction sites based on future climate suitability for food resources. **Conservation Biology**, v. 35, n. 6, p. 1821-1832, 2021.

GREVE, P. et al. Global assessment of trends in wetting and drying over land. **Nature geoscience**, v. 7, n. 10, p. 716-721, 2014.

GUISAN, A. et al. Predicting species distributions for conservation decisions. **Ecology letters**, v. 16, n. 12, p. 1424-1435, 2013.

GUISAN, A; THUILLER, W; ZIMMERMANN, N. E. **Habitat suitability and distribution models: with applications in R**. Cambridge University Press, 2017.

HANNAH, L. et al. Protected area needs in a changing climate. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 3, p. 131-138, 2007.

HATSCHBACH, G; ZILLER, S. R. Lista vermelha de plantas ameaçadas de extinção no estado do Paraná. 1995.

HENGL, T. et al. SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. **PloS one**, v. 9, n. 8, p. e105992, 2014.

HAJIMA, T. et al. Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 5, p. 2197-2244, 2020.

HIJMANS, R. J. et al. dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.3-14. 2023.

HIJMANS, R. J. raster: Geographic data analysis and modeling. **R package version**, v. 2, p. 8, 2018.

HAUSFATHER, Z; PETERS, G. P. Emissions—the ‘business as usual’ story is misleading. **Nature**, v. 577, n. 7792, p. 618-620, 2020.

IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira - Série manuais técnicos em geociências. 2. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; Rio de Janeiro, p.275, 2012.

INEA - Instituto Estadual do Ambiente. Revisão do Plano de Manejo Parque Estadual do Desengano. **Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente–Inea**, 2021. Disponível em <https://www.inea.rj.gov.br>. Acesso em: 17 fev. 2024.

IPCC, Climate Change. Synthesis Report. Contribution of working groups I. **II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, v. 151, n. 10.1017, 2014.

IPCC, Climate Change. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

IUCN 2024. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2023-1. Disponível em: <https://www.iucnredlist.org>. Acessado em 7 fev. 2024.

JOLY, C. A.; METZGER, J. P; TABARELLI M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New phytologist**, v. 204, n. 3, p. 459-473, 2014.

KAGEYAMA, P. Y. Recomposição da vegetação com espécies arbóreas nativas em reservatórios de usinas hidrelétricas da CESP. **Série técnica IPEF**, v. 8, n. 25, p. 1-43, 1992.

KARATZOGLOU, A. et al. Package 'kernlab'. **CRAN R Project**, 2019.

KEITH, D. A. et al. Detecting extinction risk from climate change by IUCN Red List criteria. **Conservation Biology**, v. 28, n. 3, p. 810-819, 2014.

KEMP, L. et al. Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 34, p. e2108146119, 2022.

LEÃO, T. C. C. et al. Projected impacts of climate and land use changes on the habitat of Atlantic Forest plants in Brazil. **Global Ecology and Biogeography**, v. 30, n. 10, p. 2016-2028, 2021.

LEMES, P; LOYOLA, R. D. Accommodating species climate-forced dispersal and uncertainties in spatial conservation planning. **PloS one**, v. 8, n. 1, p. e54323, 2013.

LEMES, P; MELO, A. S; LOYOLA, R. D. Climate change threatens protected areas of the Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 23, p. 357-368, 2013.

LEWIS, S. L.; EDWARDS, D. P.; GALBRAITH, D. Increasing human dominance of tropical forests. **Science**, v. 349, n. 6250, p. 827-832, 2015.

LINDNER, M. et al. Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management?. **Journal of environmental management**, v. 146, p. 69-83, 2014.

LIU, C; WHITE, M; NEWELL, G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. **Journal of biogeography**, v. 40, n. 4, p. 778-789, 2013.

LIU, P. R.; RAFTERY, A. E. Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 C target. **Communications earth & environment**, v. 2, n. 1, p. 29, 2021.

LOYOLA, R. D. et al. A straightforward conceptual approach for evaluating spatial conservation priorities under climate change. **Biodiversity and Conservation**, v. 22, p. 483-495, 2013.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

MACIEL, E. A. et al. Climate change forecasts suggest that the conservation area network in the Cerrado-Amazon transition zone needs to be expanded. **Acta Oecologica**, v. 112, p. 103764, 2021.

MACIEL, E. A.; OLIVEIRA-FILHO, Ary T.; EISENLOHR, Pedro V. Prioritizing rare tree species of the Cerrado-Amazon ecotone: warnings and insights emerging from a comprehensive transitional zone of South America. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 74-82, 2016.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v.129, p.1189-1200, 2017.

MEINSHAUSEN, M. et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 8, p. 3571-3605, 2020.

MELO, A. J. O. et al. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO EFEITO ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO DE *Erythroxylum passerinum* Mart. In: **Congresso Internacional de Atividade Física, Nutrição e Saúde**. 2017.

MILBORROW, S. Derived from mda: mars by Trevor Hastie and Rob Tibshirani. Uses Alan Miller's Fortran utilities with Thomas Lumley's leaps wrapper. earth: Multivariate Adaptive Regression Splines, Version 5.3.2, 2023.

MILES, L. et al. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. **Journal of biogeography**, v. 33, n. 3, p. 491-505, 2006.

MOAT, J; GOLE, T. W.; DAVIS, A. P. Least concern to endangered: Applying climate change projections profoundly influences the extinction risk assessment for wild Arabica coffee. **Global change biology**, v. 25, n. 2, p. 390-403, 2019.

MORADI, S. et al. Identifying high-priority conservation areas for avian biodiversity using species distribution modeling. **Ecological Indicators**, v. 97, p. 159-164, 2019.

NETTO, A. A. S. Breve estudo de eco-história sobre a utilização humana das florestas estacionais do norte-noroeste entre os períodos colonial e republicano. **Revista Vértices**, v. 13, n. 2, p. 7-30, 2011.

SANTOS, P. M; BOHRER, C. B. A; NASCIMENTO, M. T. Impactos das mudanças de uso e cobertura da terra em fitofisionomias da Mata Atlântica. **Ambiente & sociedade**, v. 27, 2024.

SILVA, J. M. C, et al. Extinction risk of narrowly distributed species of seed plants in Brazil due to habitat loss and climate change. **PeerJ** v. 7, p. e7333, 2019.

O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global environmental change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das Bacias do Leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**, v. 56, p. 185-235, 2005.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.

OLIVEIRA, M. E. et al. Modeling responses of Brazilian Atlantic Forest mammals assemble to climate change. **Biodiversity and Conservation**, p. 1-21, 2023.

PEARSON, Richard G. et al. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. **Journal of biogeography**, v. 34, n. 1, p. 102-117, 2006.

PETERSON, A. T; VIEGLAIS, D. A. Predicting Species Invasions Using Ecological Niche Modeling: New Approaches from Bioinformatics Attack a Pressing Problem: A new approach to ecological niche modeling, based on new tools drawn from biodiversity informatics, is applied to the challenge of predicting potential species' invasions. **BioScience**, v. 51, n. 5, p. 363-371, 2001.

PIRES-OLIVEIRA, J. C. et al. Concepts and methods in environmental suitability modelling, an important tool for forest conservation. **Forest Conservation: Methods, Management and Challenges**, 1st ed. New York: Nova Publishers LTDA, p. 269-290, 2019.

POTAPOV, P. et al. The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. **Science advances**, v. 3, n. 1, p. e1600821, 2017.

RAGHUNATHAN, N. et al. Contrasting climate risks predicted by dynamic vegetation and ecological niche-based models applied to tree species in the Brazilian Atlantic Forest. **Regional Environmental Change**, v. 19, p. 219-232, 2019.

RCOLORBREWER, Suggests; LIAW, Maintainer Andy. Package 'randomforest'. **University of California, Berkeley: Berkeley, CA, USA**, 2018.

R CORE TEAM. Package stats. **The R Stats Package**, 2018.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. URL: <https://www.R-project.org/>

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

RIPLEY, B; VENABLES, W. Package 'nnet': Feed-forward neural networks and multinomial log-linear models. R package version, v. 7.3-19, 2023.

RITCHIE, J; DOWLATABADI, H. Why do climate change scenarios return to coal?. **Energy**, v. 140, p. 1276-1291, 2017.

SEBBENN, A. M. et al. Genetic parameters for the conservation of cabreuva *Myroxylon peruiferum* LF Allemão. **Scientia Forestalis**, n. 53, p. 31-38, 1998.

SIQUEIRA, M.F.D. and PETERSON, A.T. Consequences of global climate change for geographic distributions of cerrado tree species. **Biota Neotropica**, v. 3, p.1-14, 2003.

SILVA, G. C.; NASCIMENTO, M. T. Fitossociologia de um remanescente de mata sobre tabuleiros no norte do estado do Rio de Janeiro (Mata do Carvão). **Brazilian Journal of Botany**, v. 24, p. 51-62, 2001.

SILVA, J. M. C. Et al. Extinction risk of narrowly distributed species of seed plants in Brazil due to habitat loss and climate change. **PeerJ**, v.7, p. e7333, 2019.

SILVA, W. L.; DERECZYNSKI, Claudine P. Climatological characterization and observed trends in climatic extremes in the state of Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.37, n.2, p. 123-138, 2014.

SOBERON, J; PETERSON, A. Townsend. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. 2005.

SOBRAL, B. S, et al. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. **Atmospheric research**, v. 220, p. 141-154, 2019.

SOBRAL, B. S, et al. Spatial variability of SPI and RDIst drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 10, p. 3896-3916, 2018.

SOFFIATI, A. Parque Estadual do Desengano: História, economia e sociedade. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 3, n. 1, p. 51-106, 2009.

SWART, N. C. et al. The Canadian earth system model version 5 (CanESM5.0.3). **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 11, p. 4823-4873, 2019.

TREW, B. T.; MACLEAN, Ilya MD. Vulnerability of global biodiversity hotspots to climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 30, n. 4, p. 768-783, 2021.

UNEP-WCMC and IUCN (2024), Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA) and World Database on Other Effective Area-based Conservation Measures (WD-OECM) [Online], February 2024, Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN. Available at: [www.protectedplanet.net](http://www.protectedplanet.net).

VAN PROOSDIJ, A. S. J. et al. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. **Ecography**, v. 39, n. 6, p. 542-552, 2016.

VASCONCELOS, T. S; PRADO, V. H. M. Climate change and opposing spatial conservation priorities for anuran protection in the Brazilian hotspots. **Journal for Nature Conservation**, v. 49, p. 118-124, 2019.

VELAZCO, S. J. E. et al. A dark scenario for Cerrado plant species: Effects of future climate, land use and protected areas ineffectiveness. **Diversity and Distributions**, v. 25, n.4, p.660-673, 2019.

VELAZCO, S. J. E. et al. Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent. **PLoS One**, v.12, n.10, p.e0186025, 2017.

VELOSO, H. P; RANGEL-FILHO, A. L. R; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Ibge, 1991.

VIEIRA, R. R. S; PRESSEY, R. L.; LOYOLA, R. The residual nature of protected areas in Brazil. **Biological Conservation**, v. 233, p. 152-161, 2019.

VOLDOIRE, A. et al. Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 7, p. 2177-2213, 2019.

ZWIENER, V. P., et al. Climate change as a driver of biotic homogenization of woody plants in the Atlantic Forest. **Global Ecology and Biogeography**, v.27, n.3, p.298-309, 2018.

ZHANG, J. et al. Extinction risk of North American seed plants elevated by climate and land-use change. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 1, p. 303-312, 2017.

ZHANG, L. et al. Consensus forecasting of species distributions: The effects of niche model performance and niche properties. **PloS one**, v. 10, n. 3, p. e0120056, 2015.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta tese revelaram a singularidade das florestas estacionais da Falha de Campos do Goytacazes em relação às formações florestais adjacentes. A influência dos fatores ambientais e espaciais na variação florística destaca a importância não apenas dos fatores climáticos, mas também dos edáficos e da fragmentação do habitat na configuração das comunidades.

Foram evidenciados também os possíveis impactos sobre a área de adequabilidade ambiental das espécies arbóreas indicadoras, ressaltando tanto as perdas significativas quanto os ganhos potenciais em suas áreas de adequabilidade ambiental. A análise dos modelos de adequabilidade ambiental sugere a necessidade de medidas de conservação adaptativas, incluindo o estabelecimento de novas unidades de conservação, especialmente em áreas mais próximas ao litoral, onde há lacunas de proteção nas áreas de alta adequabilidade ambiental das espécies indicadoras.

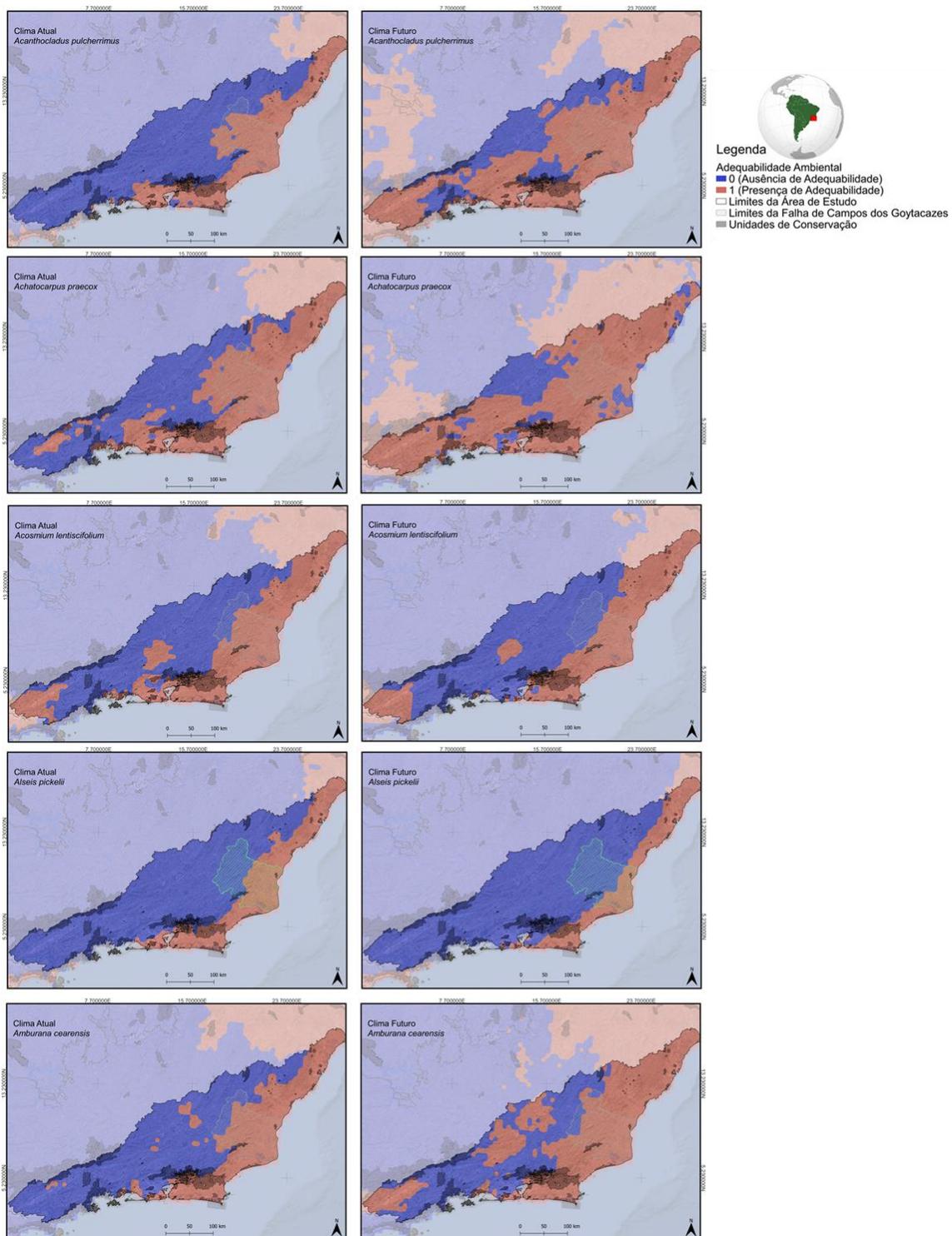
Neste contexto, este estudo propõe considerações fundamentais que podem servir como diretrizes para o planejamento de conservação nesta região única. A primeira consideração é o senso de urgência em reconhecer a iminente possibilidade de perdas substanciais na área de adequabilidade ambiental das espécies no futuro, incorporando cenários climáticos futuros nas avaliações do status de conservação dessas espécies. A maioria das espécies com potencial de perdas significativas na área de adequabilidade está atualmente classificada como "Menos Preocupante" (LC) nas listas vermelhas. A confiança excessiva nessas categorias pode resultar na subestimação dos reais riscos enfrentados pelas espécies em um cenário de mudanças climáticas rápidas e intensas. Incorporar cenários climáticos futuros nas avaliações do status de conservação dessas espécies pode ser uma estratégia eficaz para antecipar os potenciais impactos das mudanças climáticas, prevenindo perdas nos locais de alta adequabilidade e evitando danos irreparáveis às populações e ecossistemas.

A segunda consideração reside na ampliação das Unidades de Conservação. A escassez dessas áreas destaca a necessidade urgente de expandir a cobertura das UCs para abranger regiões reconhecidas como de alta adequabilidade ambiental. Isso proporcionará uma rede mais robusta de proteção aos ecossistemas estáveis em termos de adequabilidade climática. Dentro desse contexto, o ponto chave é reconhecer a

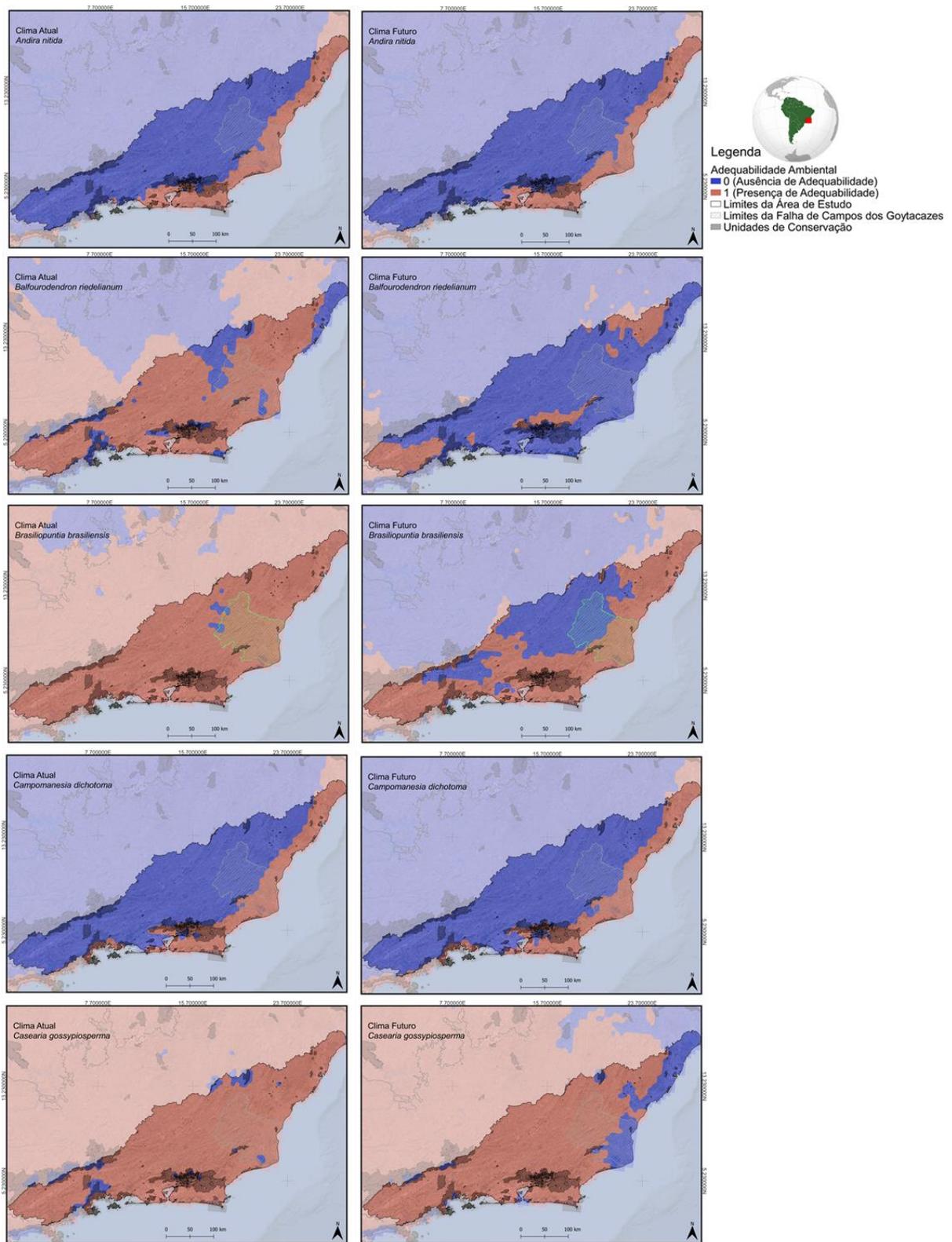
interconexão entre as áreas protegidas e a dinâmica das mudanças climáticas. Uma vez que a expansão das UCs não só resguardará as espécies, mas também fortalecerá a resiliência dos ecossistemas diante dos desafios ambientais em constantes mudanças.

A terceira consideração é em relação às atividades antrópicas. O impacto das atividades humanas no ambiente é uma preocupação significativa para a conservação da biodiversidade. O desmatamento, expansão urbana não planejada e outras práticas que comprometem a integridade dos ecossistemas aumentam a vulnerabilidade das espécies, intensificando os desafios enfrentados em um cenário de mudanças climáticas. Portanto, ao planejar estratégias de conservação, é essencial abordar as causas subjacentes das ameaças às espécies. A promoção de práticas sustentáveis de uso da terra, a implementação de políticas de manejo sustentável e a conscientização sobre os impactos das atividades antrópicas são passos cruciais para mitigar os riscos associados a essas influências antrópicas.

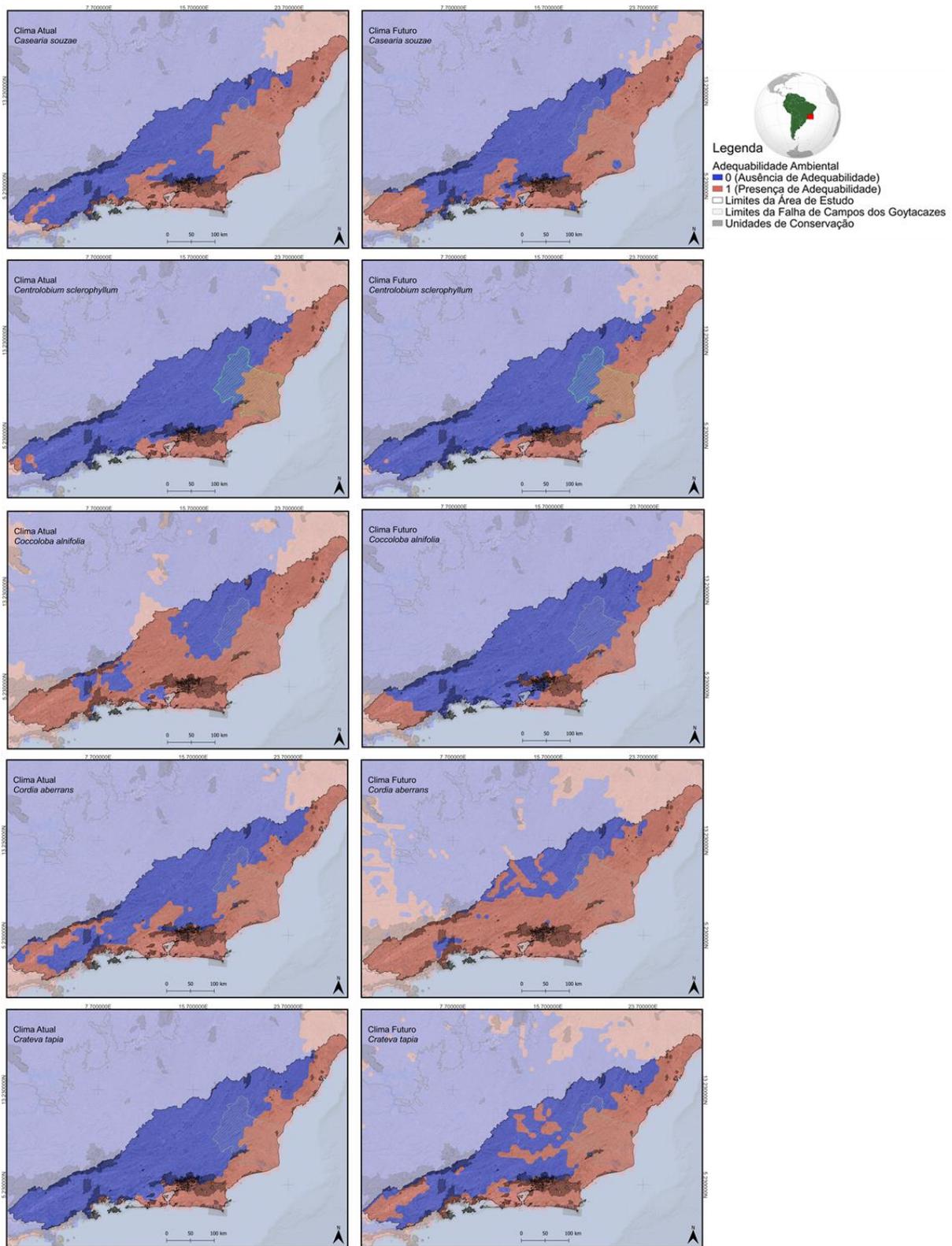
## MATERIAL SUPLEMENTAR



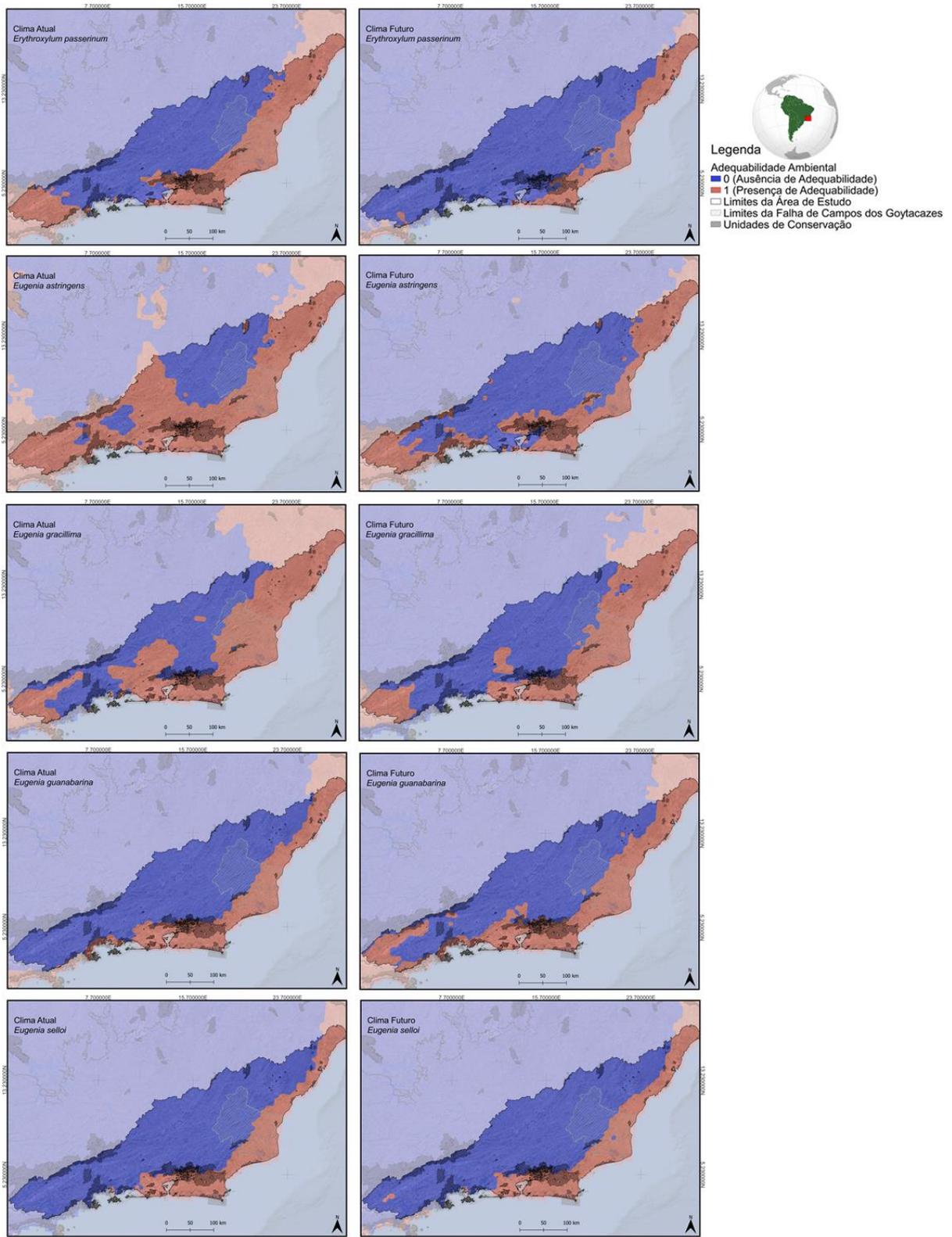
**Figura S1.** Parte 1. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



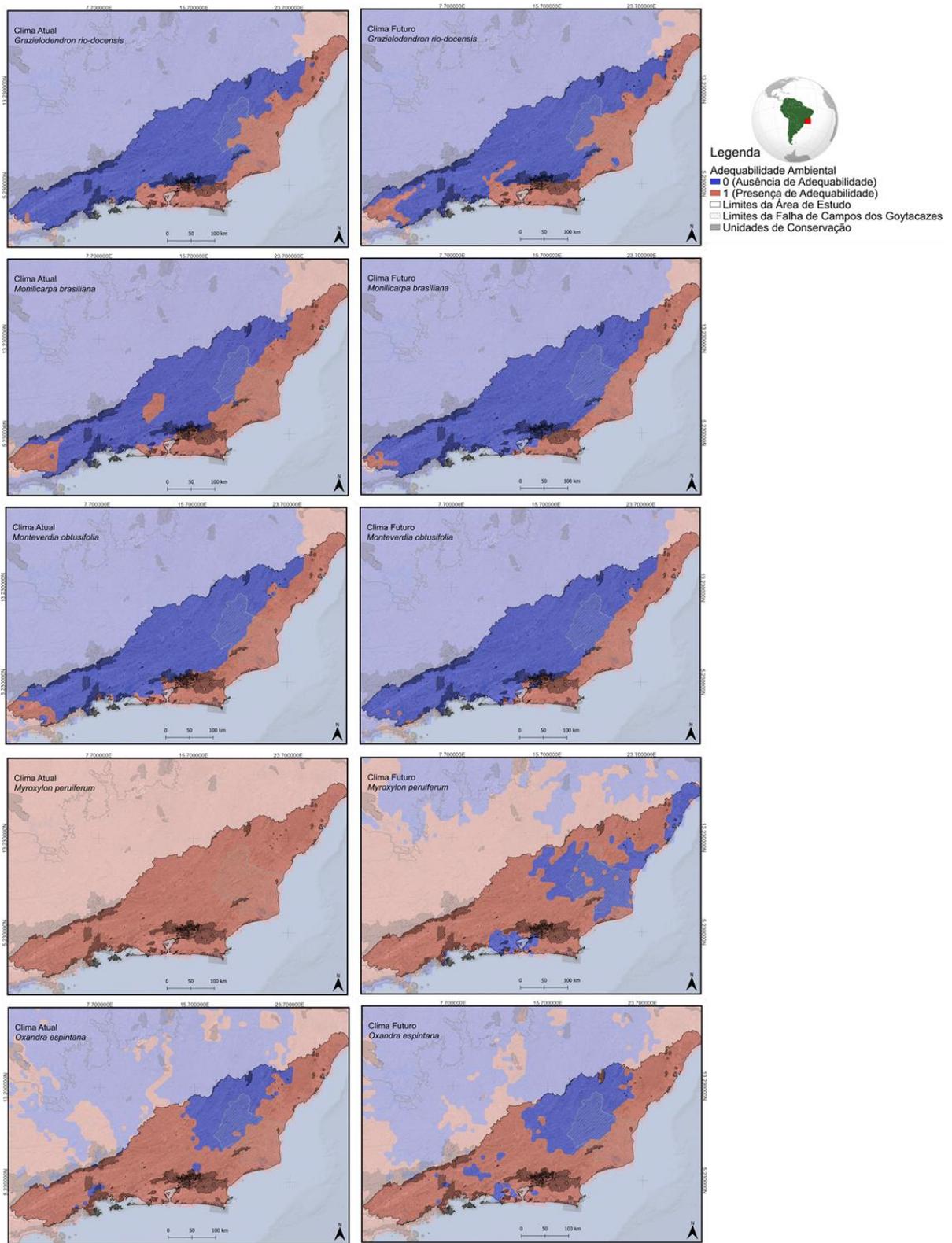
**Figura S1.** Parte 2. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



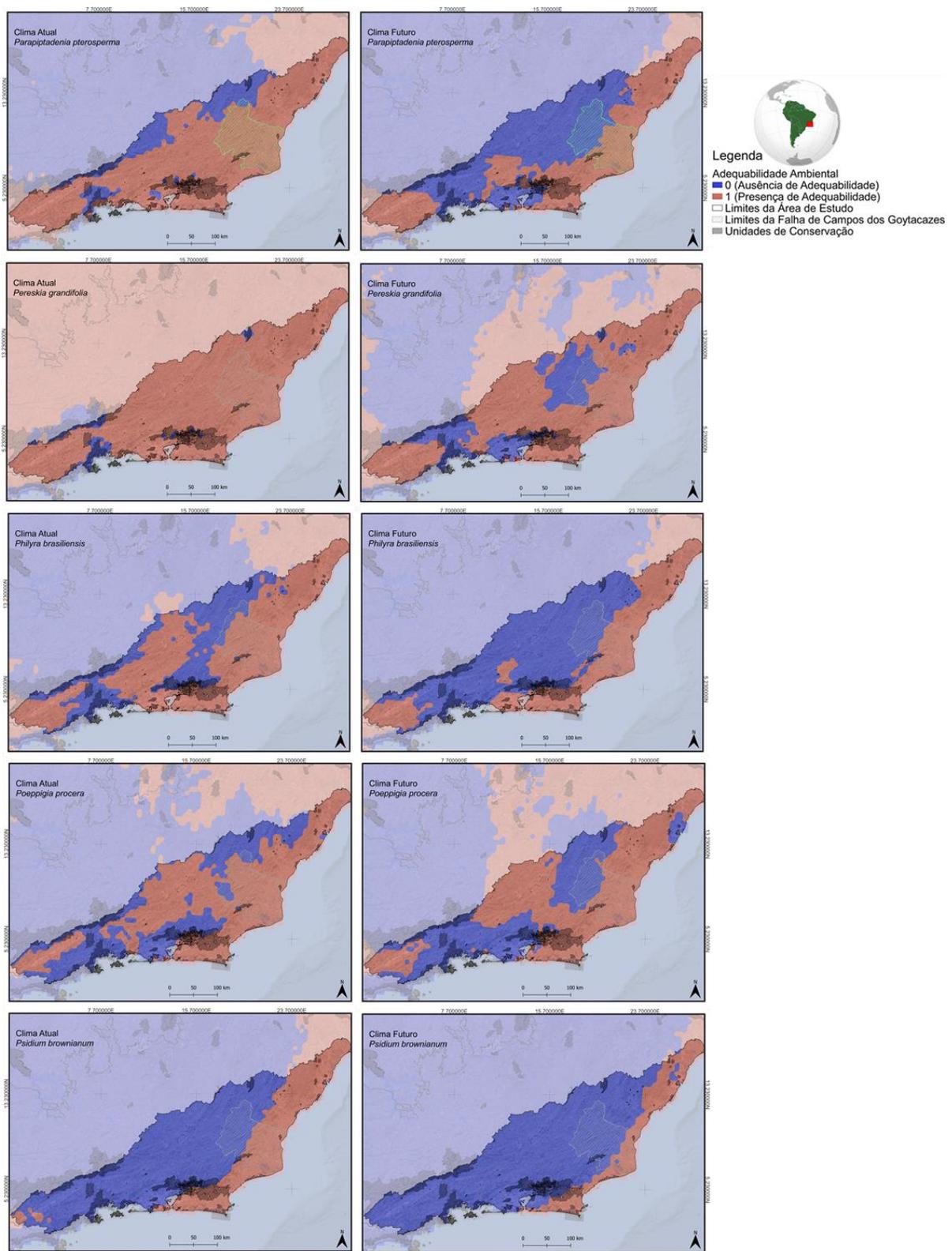
**Figura S1.** Parte 3. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



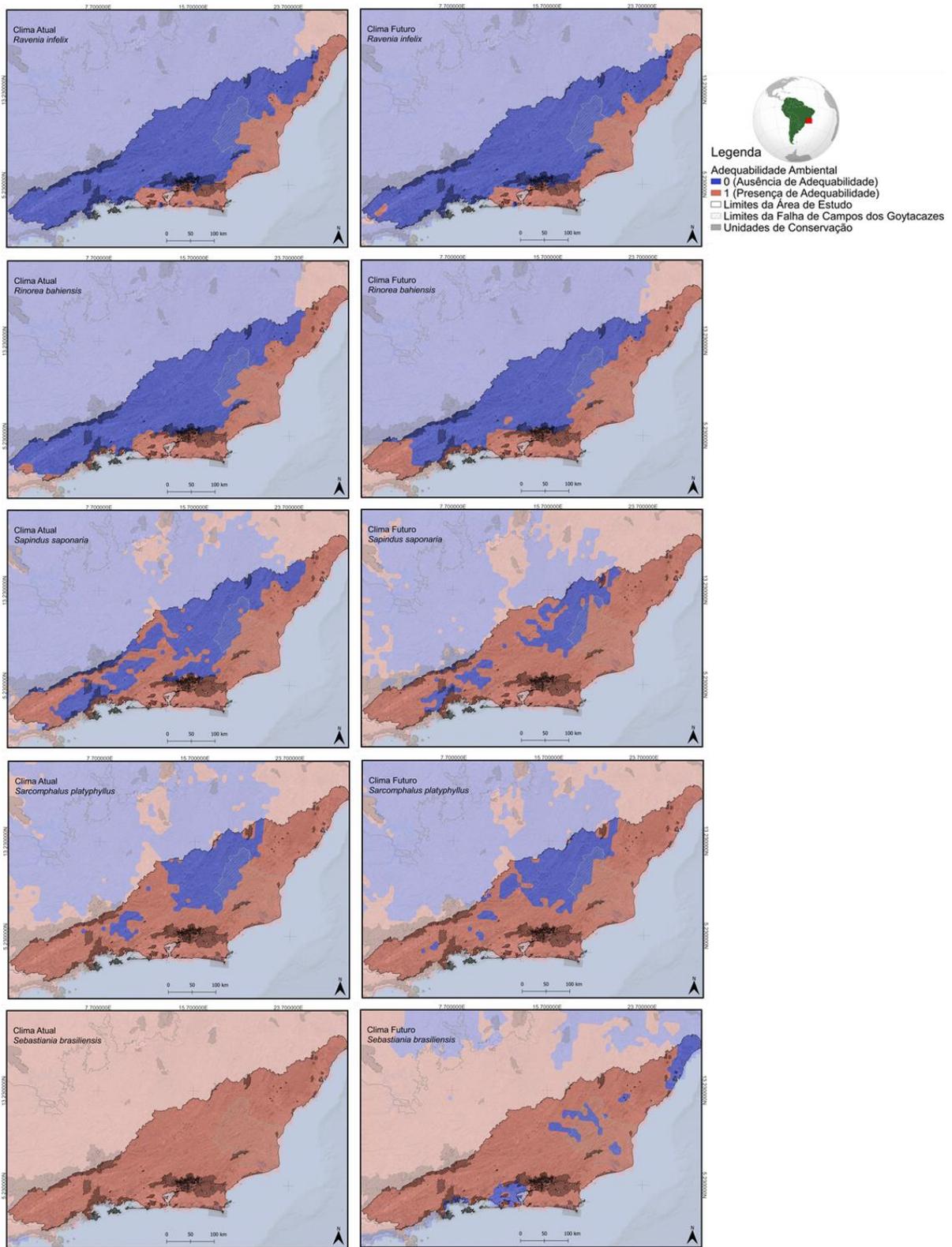
**Figura S1.** Parte 4. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



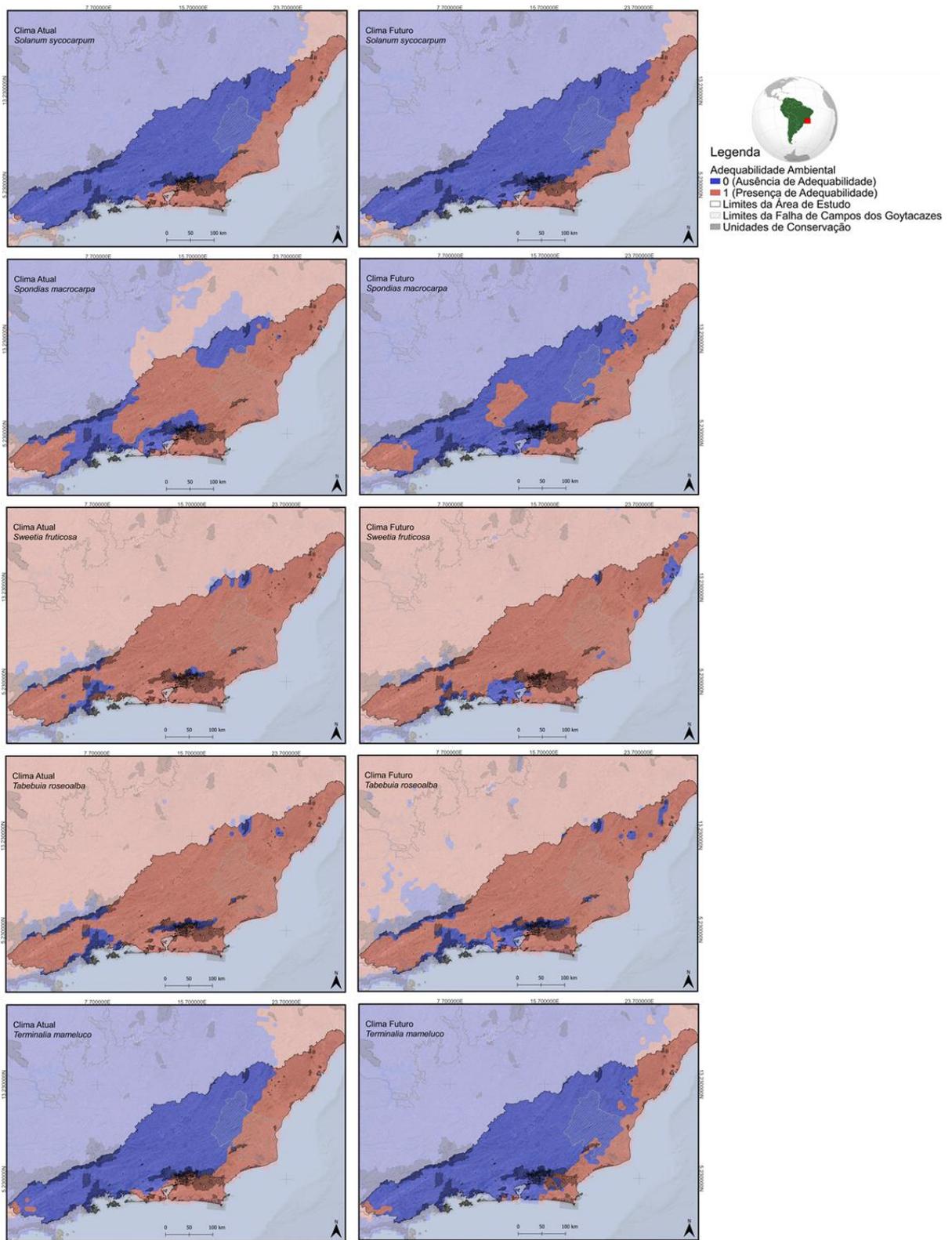
**Figura S1.** Parte 5. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



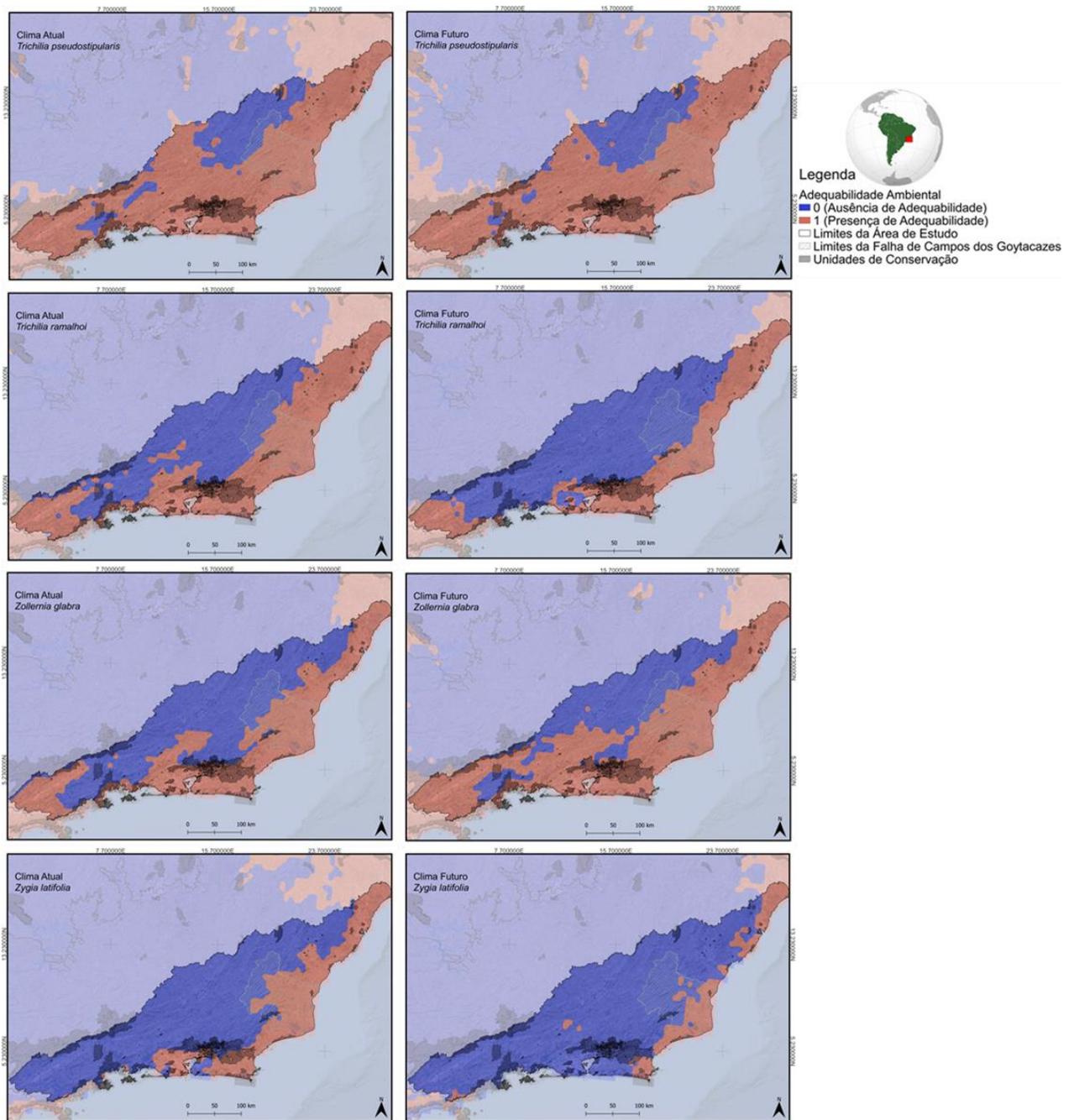
**Figura S1.** Parte 6. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



**Figura S1.** Parte 7. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



**Figura S1.** Parte 8. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).



**Figura S1.** Parte 9. Mapa binário da Adequabilidade Ambiental de *espécies indicadoras da Falha de Campos dos Goytacazes* para o clima atual (lado esquerdo) e projeção para o clima futuro (lado direito). (Fonte: Elaborada pelo autor).