

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Regivan Antonio de Saul

**ECOLOGIA INTEGRADA DE *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth.
NO CERRADO BRASILEIRO E ÁREAS DE CONTATO: RELAÇÕES SO-
LO-PLANTA, NICHOS ECOLÓGICOS E CONECTIVIDADE ESPACIAL.**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Regivan Antonio de Saul

**ECOLOGIA INTEGRADA DE *Pterodon Pubescens* (Benth.) Benth.
NO CERRADO BRASILEIRO E ÁREAS DE CONTATO: relações solo-
planta, nicho ecológico e conectividade espacial.**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Especialidade: Sistema de Produção.

Orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S256e Saul, Regivan Antonio de.
Ecologia integrada de *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth. no Cerrado brasileiro e áreas de contato: relações solo-planta, nicho ecológico e conectividade espacial / Regivan Antonio de Saul. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
160 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema de Produção, 2026

Orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes

Inclui bibliografia

1. Modelagem de nicho ecológico. 2. Índice de conectividade espacial. 3. Gradientes edáficos.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ECOLOGIA INTEGRADA DE *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth. NO CERRADO: RELAÇÕES SOLO-PLANTA, NICHOS ECOLÓGICO E CONECTIVIDADE ESPACIAL

AUTOR: REGIVAN ANTONIO DE SAUL

ORIENTADOR: MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES**
Data: 11/09/2026 08:35:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARIO LUIZ TEIXEIRA DE MORAES (Participação Virtual)

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio-Economia / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **PATRICIA FERREIRA ALVES**
Data: 22/09/2026 08:33:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. PATRÍCIA FERREIRA ALVES (Participação Virtual)

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
 **ANANDA VIRGÍNIA DE AGUIAR**
Data: 11/09/2026 09:02:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. ANANDA VIRGÍNIA DE AGUIAR (Participação Virtual)

Embrapa Florestas

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO BERTIN GANDARA MENDES**
Data: 21/09/2026 16:57:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FLÁVIO BERTIN GANDARA MENDES (Participação Virtual)

Departamento de Ciências Biológicas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP

Documento assinado digitalmente
 **MURILO DA SERRA SILVA**
Data: 10/09/2026 16:07:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MURILO DA SERRA SILVA (Participação Virtual)

Departamento de Ensino / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA

Ilha Solteira, 04 de setembro de 2026.

Impacto potencial desta pesquisa

O impacto potencial da pesquisa reside na integração inédita da modelagem de nicho ecológico ao desenvolvimento do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) para *Pterodon pubescens*. O trabalho antecipa retração de hábitat e perda de interligação sob mudanças climáticas, fornecendo uma ferramenta matemática de baixo custo para direcionar ações de conservação *in situ*, restauração e manejo florestal no Cerrado.

Potential impact of this research

The potential impact of the research lies in the novel integration of ecological niche modeling with the development of the Gene Flow Inferential Index (Ind_C) for *Pterodon pubescens*. The study anticipates habitat shrinkage and loss of connectivity under climate change, providing a low-cost mathematical tool to guide *in situ* conservation, restoration, and forest management efforts in the Cerrado.

Impacto potencial de esta investigación

El impacto potencial de la investigación radica en la integración inédita del modelado de nicho ecológico con el desarrollo del Índice Inferencial de Flujo Génico (Ind_C) para *Pterodon pubescens*. El estudio prevé la retracción del hábitat y la pérdida de conectividad bajo el cambio climático, proporcionando una herramienta matemática de bajo costo para guiar las acciones de conservación *in situ*, restauración y manejo forestal en el Cerrado.

Dedico este trabalho à minha filha Maya Alves Caldeira Saul e minha esposa Francieli Alves Caldeira Saul.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, a minha família, em especial minha esposa Francieli, que sempre me apoiou nas horas difíceis e nos bons momentos.

Ao professor Mario Luiz Teixeira de Moraes.

Aos amigos José Cambuim, Alexandre Marques da Silva e Manoel Fernando Rocha Bonfim, pelas lições no trabalho de campo, coleta de dados e no laboratório de análises de solos e tecido vegetal.

A Selma Maria Bozzite de Moraes coordenadora do Laboratório de Genética de Populações e Silvicultura I e II, pelo apoio nas análises de sementes.

Aos amigos: Selma Maria Bozzite de Moraes, Mariana Aparecida de Moraes, Witória de Oliveira Araujo, Rodrigo Baratiere Perim, Alan Rodrigo Panosso, André Thiago Cieslak Stuari, Daniele Fernanda Zulian, Darlin U. Gonzalez Zaruma, Jose Carlos de Oliveira Junior, Murilo da Serra Silva, Alonso Ângelo da Silva, Patrícia Ferreira Alves, Maria Teresa Gomes Lopes, Caroline de Souza Bezerra, Jennifer Souza Tomaz, Maria José Marques, Ananda Virginia de Aguiar, seja pelas horas de prosa, seja pelas ajudas com dados e análises dos mesmos.

Ao Senhor Damião Peres Florido, proprietário da Fazenda Vale Florido em Lagoa Santa – GO e dona Leda Garcia de Souza proprietária da Fazenda Colina em Selvíria – MS, que nos permitiram fazer o levantamento das matrizes de sucupira em suas propriedades.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

“O cerrado é o lugar onde a vida aprendeu a resistir antes mesmo de aprender a florescer.”

– João Guimarães Ros

RESUMO

Este estudo investiga a ecologia integrada de *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth., conhecida popularmente como sucupira-branca ou faveiro — espécie arbórea nativa do Cerrado com expressivo valor ecológico, econômico e medicinal. A pesquisa abrange a análise das relações solo-planta, a proposição de um Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) e a modelagem de nicho ecológico frente às mudanças climáticas globais. Relações Solo-Planta: Avaliaram-se 134 indivíduos adultos em três populações naturais (Lagoa Santa-GO, Selvíria-MS e Aparecida d'Oeste-SP), correlacionando variáveis dendrométricas aos atributos do solo. Os resultados evidenciaram marcante variabilidade fenotípica: enquanto a população de Selvíria destacou-se por maiores diâmetros e alturas comerciais em solos de maior fertilidade, as populações de Goiás e São Paulo apresentaram adaptações estruturais específicas (como cascas mais espessas e maior diâmetro de copa) associadas a solos mais ácidos e distróficos. Conectividade Paisagística: Desenvolveu-se o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), uma ferramenta matemática acessível voltada à priorização de áreas para conservação *in situ* e restauração ambiental. Modelagem de Nicho Ecológico: Com base em um banco de dados de 909 registros de ocorrência (2018–2024), utilizou-se o algoritmo MaxEnt sob cenários de mudanças climáticas do CMIP6 para os anos de 2050 e 2099. Identificou-se que as variáveis bioclimáticas ligadas às temperaturas máximas são as determinantes centrais da distribuição da espécie. Embora o núcleo atual de maior adequação ambiental concentre-se no Cerrado central e oriental, as projeções futuras indicam uma drástica redução de habitat adequado — variando de 20% no cenário moderado a 50% no cenário mais severo até o final do século. Em suma, embora a sucupira-branca demonstre expressiva plasticidade adaptativa a diferentes gradientes edáficos, a acentuada perda de habitat projetada evidencia a necessidade urgente de estratégias integradas de conservação, criação de corredores ecológicos e manejo sustentável para resguardar a diversidade genética da espécie.

Palavras-chave: modelagem de nicho ecológico; variabilidade e índice de conectividade espacial.

ABSTRACT

This study investigates the integrated ecology of *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth.—popularly known as sucupira-branca or faveiro — a native Cerrado tree species of significant ecological, economic, and medicinal value. The research encompasses the analysis of soil-plant relationships, the proposal of a Spatial Connectivity Index (Ind_C), and ecological niche modeling in the context of global climate change. Soil-Plant Relationships: 134 adult individuals across three natural populations (Lagoa Santa-GO, Selvíria-MS, and Aparecida d'Oeste-SP) were evaluated, correlating dendrometric variables with soil attributes. Results revealed marked phenotypic variability: while the Selvíria population stood out for larger diameters and commercial heights in more fertile soils, the Goiás and São Paulo populations exhibited specific structural adaptations (such as thicker bark and larger crown diameters) associated with more acidic and dystrophic soils. Landscape Connectivity: A Spatial Connectivity Index (Ind_C) was developed—an accessible mathematical tool aimed at prioritizing areas for in situ conservation and environmental restoration. Ecological Niche Modeling: Based on a dataset of 909 occurrence records (2018–2024), the MaxEnt algorithm was employed under CMIP6 climate change scenarios for the years 2050 and 2099. Bioclimatic variables related to maximum temperatures were identified as the primary determinants of the species' distribution. Although the current core area of greatest environmental suitability is concentrated in the central and eastern Cerrado, future projections indicate a drastic reduction in suitable habitat—ranging from 20% under a moderate scenario to 50% under the most severe scenario by the end of the century. In summary, while sucupira-branca demonstrates significant adaptive plasticity across varying soil gradients, the projected sharp loss of habitat highlights the urgent need for integrated conservation strategies, the establishment of ecological corridors, and sustainable management practices to safeguard the species' genetic diversity.

Keywords: ecological niche modeling; variability, and spatial connectivity index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Localização das populações naturais de <i>Pterodon pubescens</i> amostradas em Lagoa Santa, GO (POP-GO), Selvíria, MS (POP-MS) e Aparecida d'Oeste, SP (POP-SP).	21
Figura 2	- Perfil esquemático das fitofisionomias do cerrado.	26
Figura 3	- Componentes principais (PCA) dos atributos químicos do solo.	27
Figura 4	- Médias e desvios-padrão dos atributos dendrométricos nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	30
Figura 5	- Diferenciação Funcional e Ocupação do Espaço entre Populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	34
Figura 6	- Ordenação das Populações de <i>Pterodon pubescens</i> por PCA com Base nas Variáveis Edáficas.	36
Figura 7	- Regressão linear e correlação de Spearman entre o pH do solo e o alumínio trocável (Al^{3+}) nas populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	37
Figura 8	- Rede de correlações entre atributos químicos do solo e variáveis dendrométricas em populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	39
Figura 9	- <i>Biplot</i> da PCA evidenciando o gradiente de fertilidade do solo, acidez e crescimento vegetal em populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	42
Figura 10	- Tela inicial do programa <i>Spatial Analysis and Gene Flow</i> .	66
Figura 11	- A) <i>Boxplots</i> das distâncias euclidianas entre indivíduos nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> . B) Histogramas comparativos das distribuições de distâncias.	69
Figura 12	- Distribuição do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas populações de <i>Pterodon pubescens</i> das procedências de Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP).	71
Figura 13	- Gráficos de violino do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	72
Figura 14	- Relação entre a distância média individual e o Índice de Conectividade Espacial nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	73
Figura 15	- Linearização log-log da relação entre distância média e Ind_C nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	74
Figura 16	- Distribuição dos valores individuais do Índice de Conectividade Espacial nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	76
Figura 17	- <i>Pterodon pubescens</i> no campo	107
Figura 18	- Curva ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>) para o variável Temperatura máxima (Tmax).	113
Figura 19	- Curva ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>) para o elemento Relevo (Topografia).	114

Figura 20	- Curva ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>) para o elemento Precipitação (Prec.).	115
Figura 21	- Curva ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>) para o elemento Variáveis Bio-climáticas (Bio).	116
Figura 22	- Teste Jackknife para variáveis de temperatura máxima (Tmax), bioclimáticas (Bio) e Precipitação (Prec).	119
Figura 23	- Análise de omissão/comissão para Temperatura Máxima (Tmax).	120
Figura 24	- Análise de omissão/comissão para fator Bioclimático (Bio).	120
Figura 25	- Análise de omissão/comissão para Precipitação (Prec).	121
Figura 26	- Análise de omissão/comissão para Relevô.	121
Figura 27	- Áreas de alta propensão para ocorrência de <i>Pterodon pubescens</i> na atualidade	122
Figura 28	- Projeções usando o modelo RCP 4.5 para os anos de 2041-2060 e 2081-2100 com base nos cenários climáticos (CMIP6).	123
Figura 29	- Projeções usando o modelo RCP 8.5 para os anos de 2041-2060 e 2081-2100 com base nos cenários climáticos (CMIP6).	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Comparação dos caracteres dendrométricos entre as populações naturais de <i>Pterodon pubescens</i> . Média $\pm$ desvio padrão; letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).	29
Tabela 2	- Caracterização das populações naturais de <i>Pterodon pubescens</i> utilizadas nas análises espaciais e no cálculo do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C).	67
Tabela 3	- Estatísticas descritivas das distâncias euclidianas entre indivíduos das populações naturais de <i>Pterodon pubescens</i> .	68
Tabela 4	- Estatísticas descritivas do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	70
Tabela 5	- Verificação dos pressupostos estatísticos dos valores individuais de Ind_C nas três populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	75
Tabela 6	- Comparações pareadas dos valores de Ind_C entre as populações de <i>Pterodon pubescens</i> .	75
Tabela 7	- Síntese ecológica da Conectividade Espacial potencial nas populações naturais de <i>Pterodon pubescens</i> .	78
Tabela 8	- Variação entre as populações de <i>Pterodon pubescens</i> (D_{xy}) a partir da frequência relativa (FR) do índice de Fluxo Gênico (Ind_C).	79

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 - GRADIENTES EDÁFICOS E VARIAÇÃO DENDROMÉTRICA EM POPULAÇÕES NATURAIS DE <i>PTERODON PUBESCENS</i>(BENTH.) BENTH (FABACEAE) NO CERRADO BRASILEIRO E EM ÁREAS DE TRANSIÇÃO COM A MATA ATLÂNTICA.	15
1.1	INTRODUÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS E HIPÓTESES	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.2.3	Hipóteses	20
1.3	MATERIAL E MÉTODOS	21
1.3.1	Área de estudo	21
1.3.2	Delineamento amostral e seleção dos indivíduos	22
1.3.3	Mensurações dendrométricas e condição reprodutiva	22
1.3.4	Georreferenciamento e altitude	23
1.3.5	Amostragem, preparo e análise química do solo	23
1.3.6	Organização e controle de qualidade dos dados	24
1.3.7	Análises estatísticas	24
1.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
1.4.1	Caracterização das populações	25
1.4.2	Comparação entre populações (ANOVA, Tukey e Kruskal-Wallis)	39
1.4.3	Diferenciação estrutural e plasticidade entre populações.	33
1.4.4	Gradiente de fertilidade, acidez e desempenho arbóreo	35
1.4.5	Alumínio: tolerância, limitação e estratégias conservativas	38
1.4.6	Respostas diferenciadas do fuste, da copa e da casca	40
1.4.7	Integração das correlações, PCA e modelos explicativos	41
1.4.8	Heterogeneidade intra e inter populacional	43

1.4.9	Implicações ecológicas, conservacionistas e de restauração	44
1.4.10	Limitações do estudo e perspectivas	45
1.4.11	Síntese interpretativa	46
1.5	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS B	9

2	CAPITULO 2 - CONECTIVIDADE ESPACIAL POTENCIAL EM POPULAÇÕES NATURAIS DE <i>PTERODON PUBESCENS</i> (FABA-CEAE): DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE INFERENCIAL.	52
---	---	----

2.1	INTRODUÇÃO	54
2.2	MATERIAL E MÉTODOS	57
2.2.1	Área de estudo e delineamento amostral	57
2.2.2	Estrutura dos dados espaciais	58
2.2.3	Construção do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)	59
2.2.4	Justificativa ecológica do parâmetro de referência de 500 m	60
2.2.5	Formulação matemática do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)	61
2.2.6	Inferência da dinâmica espacial espacial do fluxo gênico	63
2.2.7	Fundamentação teórica das inferências	64
2.2.8	Variação entre e dentro de populações	64
2.2.9	Desenvolvimento de um protótipo de programa de computação de fluxo gênico	65
2.3	RESULTADOS	66
2.3.1	Caracterização geral das populações	66
2.3.2	Estrutura espacial das populações	68
2.3.3	Distribuição do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)	68
2.3.4	Relação entre a distância média e o Índice de Conectividade Espacial	73
2.3.5	Comparação estatística entre as populações	74

2.3.6	Escala ecológica da conectividade potencial	77
2.3.7	Variação entre e dentro de populações	78
2.4	DISCUSSÃO	80
2.4.1	A estrutura espacial como determinante da conectividade potencial	80
2.4.2	O Índice de Conectividade Espacial como medida de conectividade potencial	81
2.4.3	Ecologia reprodutiva de <i>Pterodon pubescense</i> implicações para o fluxo gênico	84
2.4.4	Conectividade potencial e genética da paisagem	87
2.4.5	Implicações para conservação	89
2.4.6	Limitações do estudo	92
2.4.7	Síntese da Discussão	95
2.5	CONCLUSÕES	97
	REFERÊNCIAS	100
 3	 CAPÍTULO 3 - MAPEAMENTO DO NICHOS ECOLÓGICO E DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE <i>PTERODON PUBESCENS</i> (BENTH.) BENTH. (FABACEAE) FRENTE ÀS PROJEÇÕES DO CLIMA FUTURO.	 105
3.1	INTRODUÇÃO	107
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	110
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	112
3.4	CONCLUSÕES	126
	REFERÊNCIAS	128
 4	 CONCLUSÃO GERAIS	 133
	 APÊNDICE – DADOS DAS POPULAÇÕES DE <i>Pterodon pubescens</i>	 135
	DADOS CURRICULARES	160

1) CAPÍTULO 1 - GRADIENTES EDÁFICOS E VARIAÇÃO DENDROMÉTRICA EM POPULAÇÕES NATURAIS DE *PTERODON PUBESCENS* (BENTH.) BENTH (FABACEAE) NO CERRADO BRASILEIRO E EM ÁREAS DE TRANSIÇÃO COM A MATA ATLÂNTICA.

RESUMO

Os atributos químicos do solo funcionam como filtros ambientais capazes de modificar o estabelecimento, o crescimento e a arquitetura das espécies lenhosas do Cerrado. Este estudo avaliou a relação entre gradientes edáficos e características dendrométricas de três populações naturais de *Pterodon pubescens*, localizadas em Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP). Foram mensurados altura comercial, altura total, diâmetro à altura do peito, diâmetro médio da copa, espessura da casca e condição reprodutiva. Para cada indivíduo, foram determinados matéria orgânica, pH, pH-SMP, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, enxofre e altitude de localização de cada indivíduo. As populações foram comparadas por análise de variância e teste de Tukey, e as relações entre os grupos de variáveis foram examinadas por correlações e análise de componentes principais. As populações diferiram significativamente em todos os atributos dendrométricos avaliados. Selvíria apresentou maior altura comercial e maior diâmetro à altura do peito, enquanto Aparecida d'Oeste apresentou maior diâmetro médio de copa e Lagoa Santa maior espessura de casca. Os solos também diferiram entre as localidades: Lagoa Santa apresentou maior matéria orgânica e alumínio, mas menores teores de cálcio e magnésio. O alumínio apresentou forte associação negativa com o pH, e a ordenação multivariada separou as populações principalmente ao longo de um gradiente entre acidez e fertilidade em bases. Os resultados indicam que *Pterodon pubescens* apresenta plasticidade estrutural e capacidade de persistir em ambientes distróficos, embora expresse maior desenvolvimento em condições de menor restrição química. Esses padrões ampliam a compreensão da ecologia da espécie e fornecem subsídios para conservação, restauração ecológica e seleção de áreas para o manejo de populações naturais.

Palavras-chave: Fertilidade do solo; alumínio trocável; dendrometria; variabilidade.

ABSTRACT

Soil chemical attributes act as environmental filters capable of influencing the establishment, growth, and architecture of woody species in the Brazilian Cerrado. This study evaluated the relationship between edaphic gradients and dendrometric characteristics of three natural populations of *Pterodon pubescens* located in Lagoa Santa (Goiás State), Selvíria (Mato Grosso do Sul State), and Aparecida d'Oeste (São Paulo State), Brazil. Commercial height, total height, diameter at breast height, mean crown diameter, bark thickness, and reproductive status were measured. For each individual, soil organic matter, pH, pH-SMP, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, aluminum, sulfur, and the altitude of each sampling location were determined. The populations were compared using analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test, and the relationships among groups of variables were examined through correlation analysis and principal component analysis (PCA). The populations differed significantly in all evaluated dendrometric attributes. Selvíria exhibited the greatest commercial height and diameter at breast height, whereas Aparecida d'Oeste showed the largest mean crown diameter and Lagoa Santa had the greatest bark thickness. Soil properties also differed among the study sites: Lagoa Santa presented higher organic matter and aluminum contents but lower calcium and magnesium concentrations. Aluminum showed a strong negative association with soil pH, and the multivariate ordination distinguished the populations primarily along a gradient ranging from soil acidity to base fertility. The results indicate that *Pterodon pubescens* exhibits considerable structural plasticity and the ability to persist in dystrophic environments, although it achieves greater growth under conditions of lower chemical constraint. These findings improve our understanding of the species' ecology and provide valuable information for conservation, ecological restoration, and the selection of suitable areas for the management of natural populations.

Keywords: soil fertility; exchangeable aluminum; dendrometry; phenotypic plasticity.

1.1 - INTRODUÇÃO

O Cerrado reúne elevada diversidade de formações vegetacionais distribuídas sobre uma matriz ambiental marcada por variações de clima, relevo, regime de perturbações e propriedades do solo. Em escala local, a heterogeneidade edáfica influencia o estabelecimento e a distribuição dos indivíduos arbóreos, contribuindo para padrões de agregação, de diferenciação diamétrica e de organização das comunidades (Lima-Ribeiro, 2007; Bernasol; Lima-Ribeiro, 2010). Em consequência, populações da mesma espécie podem apresentar estruturas contrastantes quando submetidas a diferentes condições de acidez, de disponibilidade de nutrientes e de retenção de água.

Os solos predominantes no Cerrado são, em geral, profundamente intemperizados, ácidos, com baixa disponibilidade de fósforo e reduzida saturação por bases. Nessas condições, o alumínio trocável e a limitação de nutrientes atuam como filtros ambientais, afetando a absorção radicular, os processos fisiológicos e a alocação de biomassa. As adaptações nutricionais das plantas nativas incluem o uso eficiente de nutrientes, modificações radiculares e estratégias de tolerância ou de acumulação de alumínio (Haridasan, 2008). Relações entre solo e vegetação também explicam as diferenças entre fitofisionomias savânicas e florestais, especialmente em zonas de transição, nas quais pequenas alterações na fertilidade podem produzir mudanças expressivas na estrutura lenhosa (Ruggiero et al., 2002; Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

A influência do solo, entretanto, não se resume à ação isolada de um único elemento, do pH, do fósforo, do potássio, do cálcio, do magnésio e do alumínio, mas resulta de processos pedogenéticos interdependentes e forma gradientes integrados de fertilidade. Estudos no domínio do Cerrado demonstram que as propriedades edáficas e os processos geomórficos controlam conjuntamente a composição, a estrutura e o funcionamento da vegetação (LIRA-Martins et al., 2022). Da mesma forma, comparações entre cerrado sensu stricto e cerradão evidenciam que diferenças de textura, retenção hídrica e fertilidade podem contribuir para a substituição de fisionomias mesmo em áreas adjacentes (Marimon; Haridasan, 2005).

A disponibilidade hídrica pode interagir com a baixa fertilidade e modificar a expressão fisionômica da vegetação, de modo que o crescimento observado em campo representa a resposta combinada a múltiplos recursos e estresses (ASSIS et al., 2011). Entre populações arbóreas, variações ambientais têm sido associadas a diferenças de altura, diâmetro, forma da copa e desempenho reprodutivo (Ferreira et al., 2019). Essas evidências justificam abordagens

que integrem atributos dendrométricos e químicos, em vez de interpretar cada variável de forma independente.

Pterodon pubescens, conhecida regionalmente como sucupira-branca ou simplesmente sucupira, é uma espécie arbórea nativa amplamente distribuída no Brasil Central. A espécie ocorre em formações savânicas, cerradões e áreas de transição com florestas estacionais, indicando capacidade de estabelecimento em ambientes com expressiva variação edáfica. Essa amplitude de ocorrência sugere plasticidade ecológica, entendida como a capacidade de ajustar características funcionais e estruturais em resposta às condições ambientais. Ainda assim, permanecem limitadas as análises quantitativas que relacionem a química do solo à variação dendrométrica em populações naturais da espécie.

A avaliação de atributos funcionais e estruturais pode revelar como espécies lenhosas conciliam a tolerância ao estresse e a resposta à disponibilidade de recursos. Em formações savânicas, esses atributos funcionam como indicadores das estratégias ecológicas adotadas diante da escassez de nutrientes, da toxicidade por alumínio e da sazonalidade hídrica (CAR-RIJO, 2020). Para árvores tropicais, fósforo, potássio e cálcio podem apresentar associações com o crescimento, embora a magnitude e a direção das respostas variem entre grupos taxonômicos e contextos ambientais (Baribault; Kobe; Finley, 2011).

No caso de *Pterodon pubescens*, a comparação entre populações geograficamente distintas oferece uma oportunidade de testar se as diferenças na arquitetura das árvores acompanham gradientes de fertilidade e de acidez. O diâmetro à altura do peito e o diâmetro da copa expressam o investimento em crescimento secundário e na expansão da superfície fotossintética, enquanto a altura total e a altura comercial refletem o desenvolvimento vertical e a organização do fuste. A espessura da casca, por sua vez, pode responder à idade, ao crescimento radial e às pressões ambientais. A análise conjunta desses atributos permite interpretar a arquitetura da espécie como uma resposta integrada ao ambiente.

Antes da exploração das regiões oeste do estado de São Paulo, Leste do Mato Grosso do Sul, Triângulo mineiro e o sul de Goiás, acreditava-se que havia um intenso fluxo gênico entre as populações naturais de *Pterodon pubescens* facilitada pela via fluvial dos grandes rios da região como o Rio Aporé, o Paranaíba, o Grande, o São José dos Dourados e o Paraná, como também pelo livre trânsito da fauna com destaque para os mamíferos e as aves entre estas regiões. No entanto, com a ocupação antrópica da região, que se intensifica em São Paulo, ocorre um isolamento entre as populações naturais de *Pterodon pubescens* nestes estados. Assim, este estudo foi desenvolvido em três populações naturais localizadas entre os municí-

pios de Paranaíba, Mato Grosso do Sul (POP-MS), e Lagoa Santa, Goiás (POP-GO), e entre Aparecida d'Oeste e Suzanópolis (POP-SP), ambas no Estado de São Paulo. As localidades representam diferentes contextos edáficos do Cerrado e de áreas de transição, possibilitando a comparação de populações estabelecidas sob distintas condições de pH, matéria orgânica, disponibilidade de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, concentração de alumínio e altitude. As análises dos atributos químicos do solo basearam-se em procedimentos consolidados para a avaliação da fertilidade de solos tropicais (Raij et al., 2001).

Diante disso, o objetivo foi avaliar a influência dos atributos químicos do solo sobre a estrutura dendrométrica de populações naturais de *Pterodon pubescens*. Especificamente, buscou-se: (i) verificar se as populações diferem quanto à altura comercial, altura total, diâmetro à altura do peito, diâmetro médio da copa e espessura da casca; (ii) identificar os atributos edáficos mais associados à variação estrutural; e (iii) determinar se um gradiente integrado de fertilidade e acidez explica a diferenciação entre as populações.

A hipótese central é que a arquitetura das árvores responde a um gradiente edáfico integrado: maiores disponibilidades de fósforo e de bases trocáveis, especialmente cálcio e magnésio, favorecem o crescimento diamétrico e o desenvolvimento da copa, enquanto a elevada acidez e o alumínio trocável restringem a expressão do potencial de crescimento, sem impedir o estabelecimento da espécie. Espera-se, adicionalmente, que atributos relacionados ao crescimento secundário sejam mais sensíveis às condições edáficas do que a altura total, o que evidencia ajustes na alocação de biomassa e na plasticidade estrutural.

1.2 - OBJETIVOS E HIPÓTESES

1.2.1 - Objetivo geral.

Avaliar de que maneira os atributos químicos do solo e a altitude estão associados à variação da estrutura dendrométrica de três populações naturais de *Pterodon pubescens* localizadas em Lagoa Santa (POP-GO), Selvíria (POP-MS) e Aparecida d'Oeste (POP-SP), que abrangem diferentes condições ambientais do Cerrado e de áreas de transição.

1.2.2 - Objetivos específicos.

Comparar as populações quanto à altura comercial, altura total, diâmetro à altura do peito, diâmetro médio da copa, espessura da casca e condição reprodutiva. Caracterizar e comparar os atributos edáficos matéria orgânica, pH, pH-SMP, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio e enxofre, bem como a altitude dos indivíduos amostrados.

Quantificar as associações entre as variáveis dendrométricas e os atributos químicos do solo por meio de correlações não paramétricas.

Identificar, por meio de análise multivariada, os principais gradientes ambientais responsáveis pela diferenciação das populações.

Avaliar os efeitos conjuntos dos atributos edáficos sobre o crescimento estrutural, considerando a colinearidade entre os preditores e a estrutura hierárquica dos dados.

Discutir a plasticidade estrutural da espécie e suas implicações para a conservação, a restauração ecológica e o manejo de populações naturais.

1.2.3 - Hipóteses.

A hipótese central é que o crescimento estrutural de *Pterodon pubescens* é determinado por um gradiente edáfico integrado, no qual o aumento do pH, do fósforo e das bases trocáveis, especialmente cálcio e magnésio, favorece o incremento diamétrico e o desenvolvimento da copa, enquanto a acidez elevada e o alumínio trocável restringem o crescimento sem impedir o estabelecimento da espécie. Essa formulação é coerente com o papel da fertilidade, da acidez e da disponibilidade de nutrientes na estruturação da vegetação do Cerrado (Ruggiero et al., 2002; Haridasan, 2008; Lira-Martins et al., 2022).

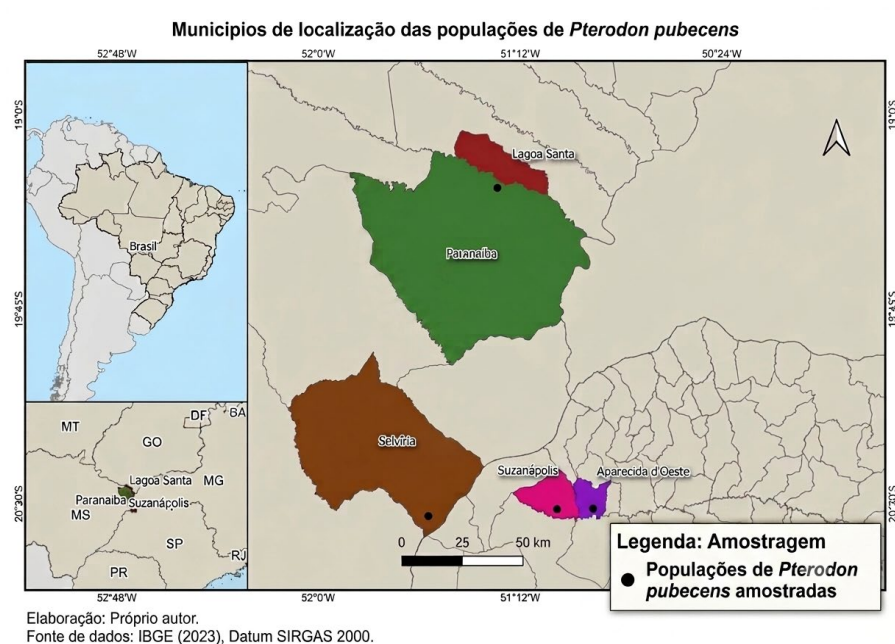
Como hipótese complementar, espera-se que atributos ligados ao crescimento secundário e à arquitetura da copa sejam mais sensíveis às condições edáficas do que a altura total. Assim, populações estabelecidas em ambientes relativamente mais férteis devem apresentar maior DAP e maior desenvolvimento da copa, enquanto populações em solos mais ácidos e ricos em alumínio devem apresentar ajustes arquiteturais associados à tolerância ao estresse químico. Esse padrão é interpretado como evidência de variabilidade e de diferentes estratégias de alocação de biomassa em ambientes heterogêneos (Assis et al., 2011; Carrijo, 2020; Scalón et al., 2022).

1.3 - MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1 - Área de estudo.

O estudo foi conduzido em três populações naturais de *Pterodon pubescens*: Lagoa Santa-GO (POP-GO), Selvíria-MS (POP-MS) e Aparecida d'Oeste-SP (POP-SP) (Figura 1). As áreas representam diferentes contextos ambientais do Cerrado brasileiro e de suas zonas de transição, permitindo avaliar as respostas estruturais da espécie ao longo de gradientes de fertilidade, acidez, disponibilidade de nutrientes e de altitude.

Figura 1 – Localização das populações naturais de *Pterodon pubescens* amostradas em Lagoa Santa, GO (POP-GO), Selvíria, MS (POP-MS) e Aparecida d'Oeste, SP (POP-SP).



Fonte: elaboração do autor, com base no IBGE (2023), datum SIRGAS 2000.

Antes da amostragem, realizou-se um caminhamento sistemático para o reconhecimento das áreas. Foram registrados a fitofisionomia predominante, o estado de conservação, a declividade, a exposição do terreno, a presença de sinais de fogo, de pastejo ou de outras perturbações e a classe de solo dominante. A classificação pedológica foi orientada pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018), e a interpretação ecológica conside-

rou as características usuais dos solos do Cerrado, geralmente ácidos, intemperizados e com reduzida disponibilidade de bases trocáveis (Haridasan, 2008; Sano; Almeida; Ribeiro, 2008).

1.3.2 - Delineamento amostral e seleção dos indivíduos.

Adotou-se delineamento observacional, comparativo e hierárquico, tendo o indivíduo arbóreo como unidade amostral e a população como nível de agrupamento. Foram avaliados 134 indivíduos, distribuídos entre Lagoa Santa ($n = 54$), Selvíria ($n = 40$) e Aparecida d'Oeste ($n = 40$), conforme as tabelas A1 a C2 que se encontram na aba apêndice. A seleção contemplou árvores vivas, enraizadas no interior das formações naturais e sem evidências de corte recente, de quebra severa do fuste ou de comprometimento fitossanitário que inviabilizasse as mensurações.

Buscou-se representar diferentes classes de tamanho, incluindo indivíduos jovens, intermediários e adultos. Cada árvore recebeu um código único, foi georreferenciada e teve suas informações registradas em uma ficha padronizada. Sempre que a densidade local permitiu, evitou-se concentrar a seleção em árvores imediatamente adjacentes, reduzindo a pseudorrepetição espacial e preservando a representatividade da heterogeneidade interna de cada população.

1.3.3 - Mensurações dendrométricas e condição reprodutiva.

A circunferência do fuste foi medida a 1,30 m do solo, com fita diamétrica ou fita métrica florestal, posicionada perpendicularmente ao eixo do tronco. Quando registrada como circunferência à altura do peito, o diâmetro à altura do peito (DAP) foi calculado pela razão entre a circunferência e π . Em terrenos inclinados, a altura de referência foi tomada do lado de montante; em indivíduos bifurcados com altura inferior a 1,30 m, os fustes foram registrados como componentes do mesmo indivíduo, conforme os procedimentos de mensuração florestal (Finger, 1992; Scolforo; Thiersch, 2004; Campos; Leite, 2017).

A altura total foi definida como a distância vertical entre a base e o ponto mais alto da copa, enquanto a altura comercial correspondeu à distância entre a base e o término do fuste aproveitável ou o início da bifurcação principal. As alturas foram obtidas com o hipsômetro eletrônico Vertex IV, associado ao Transponder T3, conforme as recomendações do fabricante (Haglöf Sweden, 2007).

O diâmetro da copa foi medido em duas direções aproximadamente perpendiculares: o primeiro eixo foi orientado pela maior expansão da copa e o segundo, a 90°. O diâmetro médio da copa foi obtido pela média dos dois eixos. A espessura da casca foi mensurada em posição padronizada do fuste, preferencialmente próxima à altura do peito e em região sem fissuras excessivas, protuberâncias ou danos. A presença de frutos foi verificada por inspeção visual da copa e registrada como variável binária, em que “0” corresponde à ausência e “1” à presença.

1.3.4 - Georreferenciamento e altitude.

As coordenadas geográficas e a altitude foram registradas junto ao tronco de cada árvore com um receptor GNSS/GPS. Os registros foram posteriormente revisados para identificar duplicidades, inversões de latitude e longitude e valores incompatíveis com os limites das áreas. Para análises métricas e representação cartográfica, as coordenadas foram transformadas para um sistema projetado compatível com a área de estudo, preservando o datum SIRGAS 2000.

1.3.5 - Amostragem, preparo e análise química do solo.

A amostragem do solo foi vinculada espacialmente a cada indivíduo. As subamostras foram coletadas sob a projeção da copa, na camada de 0–20 cm, após a remoção da serapilheira superficial. Utilizou-se trado holandês higienizado entre os pontos e, quando possível, foram retiradas subamostras em diferentes posições ao redor do tronco, que foram posteriormente reunidas para formar uma amostra composta representativa do microssítio de cada árvore (Marimon; Haridasan, 2005; Teixeira, 2017).

As amostras foram homogeneizadas, acondicionadas em recipientes identificados e transportadas ao laboratório. O solo foi seco ao ar, destorroado, homogeneizado e peneirado em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar, com remoção de materiais vegetais, fragmentos grosseiros e possíveis contaminantes (Teixeira, 2017).

As determinações laboratoriais seguiram os procedimentos consolidados para a avaliação da fertilidade de solos tropicais (Raij et al., 2001; Teixeira, 2017). Foram analisados matéria orgânica (MO), pH, pH-SMP, fósforo disponível (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio

(Mg), alumínio trocável (Al) e enxofre (S). As unidades foram mantidas de acordo com os laudos laboratoriais: MO, em g dm^{-3} ; P e S, em mg dm^{-3} ; K, Ca, Mg e Al, em mmolc dm^{-3} .

1.3.6 - Organização e controle de qualidade dos dados.

Os dados de campo e laboratório foram reunidos em uma matriz única, na qual cada linha correspondeu a um indivíduo e cada coluna a uma variável dendrométrica, reprodutiva, espacial ou edáfica. Foram verificadas duplicidades, campos vazios, erros de digitação, inconsistências de unidades, valores fisicamente improváveis e divergências entre as fichas de campo e as planilhas. As unidades foram padronizadas antes das análises, e os valores ausentes foram mantidos como ausentes, sem imputação automática.

1.3.7 - Análises estatísticas.

Inicialmente, calcularam-se o número de observações, a média, a mediana, os valores mínimo e máximo, os quartis, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada variável, considerando o conjunto total e cada população separadamente (ZAR, 2010). A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, complementada pela inspeção de histogramas, de gráficos quantil-quantil e dos resíduos dos modelos. A homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene.

As diferenças entre as populações foram testadas por meio de uma análise de variância de um fator, considerando a população como efeito fixo. Quando o teste global foi significativo, aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Para variáveis que não atenderam aos pressupostos, mesmo após transformações ecologicamente justificáveis, empregou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido de comparações múltiplas apropriadas e do ajuste do nível de significância (Kruskal; Wallis, 1952; Zar, 2010).

As associações monotônicas entre os atributos dendrométricos, as variáveis edáficas e a altitude foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Spearman. A magnitude e o sinal dos coeficientes foram interpretados conjuntamente, sem atribuição causal às correlações isoladas (Zar, 2010).

A estrutura multivariada foi examinada por meio de análise de componentes principais (PCA), após a padronização das variáveis para média zero e variância unitária. Foram inter-

pretados os componentes com maior proporção de variância explicada, as cargas de maior magnitude e a separação das populações no espaço de ordenação (Legendre; Legendre, 2012). A distância de Mahalanobis foi utilizada como diagnóstico complementar para identificar observações multivariadas extremas, cuja exclusão somente seria admitida diante de evidência de erro de medição ou de registro.

Antes das regressões múltiplas, a multicolinearidade entre os preditores foi avaliada pela matriz de correlação e pelo fator de inflação da variância (VIF). Variáveis redundantes foram excluídas ou sintetizadas em eixos de ordenação, priorizando a estabilidade estatística e a coerência ecológica. A influência conjunta dos atributos edáficos sobre DAP, altura total, altura comercial, diâmetro médio da copa e espessura da casca foi então avaliada por meio de regressão linear múltipla. A seleção de modelos considerou a parcimônia, o comportamento dos resíduos, a ausência de colinearidade excessiva e os critérios de informação de Akaike e Bayesiano (Zar, 2010).

Para reconhecer a estrutura hierárquica das observações, ajustaram-se modelos lineares mistos, considerando os atributos edáficos como efeitos fixos e a população como efeito aleatório no intercepto. Essa abordagem permitiu estimar a associação média entre o solo e os atributos dendrométricos, sem ignorar a dependência entre indivíduos da mesma população. Em todas as análises, adotou-se o nível de significância de 5%. Cabe destacar que os cálculos foram desenvolvidos utilizando-se do *software* R. As tabelas com os resultados, por serem longas, optou-se por colocá-las ao final do trabalho (Apêndice), constam como tabelas D1 a Tabela N.

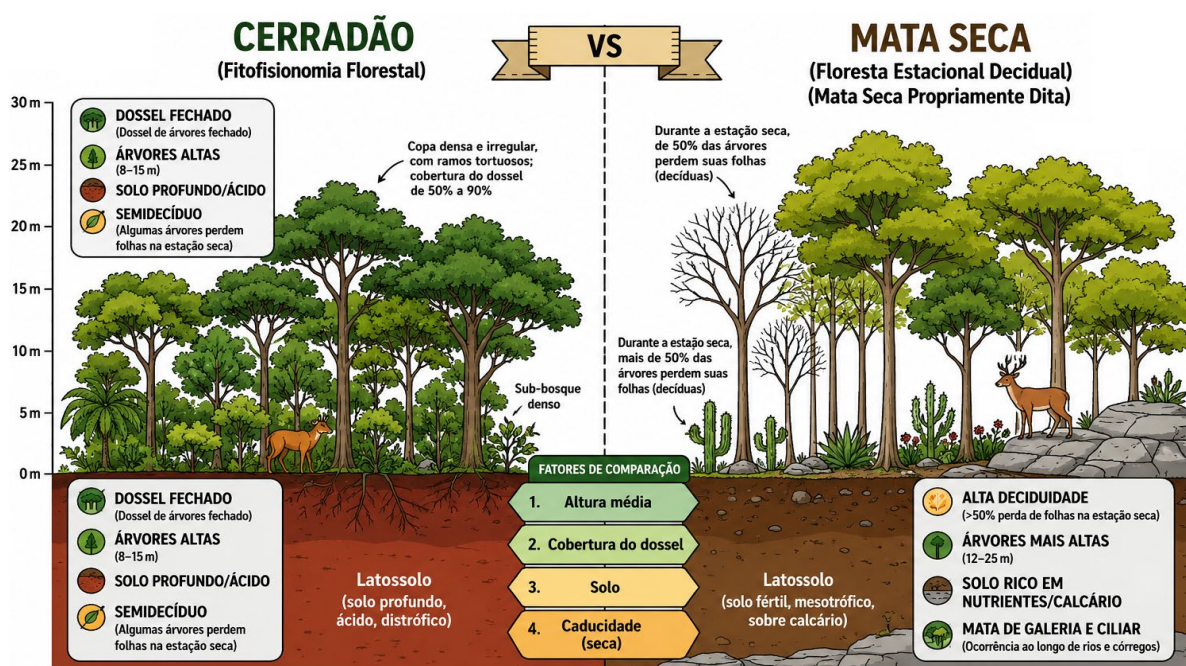
1.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.4.1 - Caracterização das populações

As três populações naturais de *Pterodon pubescens*, distribuídas em diferentes regiões do Cerrado brasileiro, além de compreenderem áreas de transição entre o Bioma Cerrado e Bioma Mata Atlântica, são representados pelo Cerradão na população de Lagoa Santa (POP-GO), Mata seca, na população Selvíria – MS (POP-MS), assim como na população Aparecida d'Oeste – SP (POP-SP) (Figura 2), sendo a primeira população localizada em área de Latossolo vermelho-amarelo distrófico e as outras duas populações em Latossolo vermelho-amarelo mesotrófico. Como dito, o conjunto amostral foi composto por 134 indivíduos adultos, sendo

54 em Lagoa Santa, 40 em Selvíria e 40 em Aparecida d'Oeste, distribuídos em áreas representativas da ocorrência natural da espécie. Essas localidades abrangem uma parte importante da distribuição geográfica de *Pterodon pubescens* e representam ambientes com diferentes condições climáticas, geomorfológicas e edáficas, o que possibilita avaliar como a heterogeneidade ambiental influencia o desenvolvimento estrutural da espécie.

Figura 2 – Perfil esquemático das fitofisionomias do cerrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A caracterização inicial do conjunto de dados evidenciou elevada variabilidade tanto nos atributos dendrométricos quanto nas características químicas dos solos. Essa ampla gama de valores demonstra que *Pterodon pubescens* apresenta considerável variabilidade, sendo capaz de estabelecer populações em ambientes que diferem significativamente quanto à disponibilidade de nutrientes, à acidez e às condições físicas do solo. Tal comportamento reforça o caráter generalista da espécie no domínio do Cerrado, embora seu desempenho estrutural varie em função das características locais do ambiente.

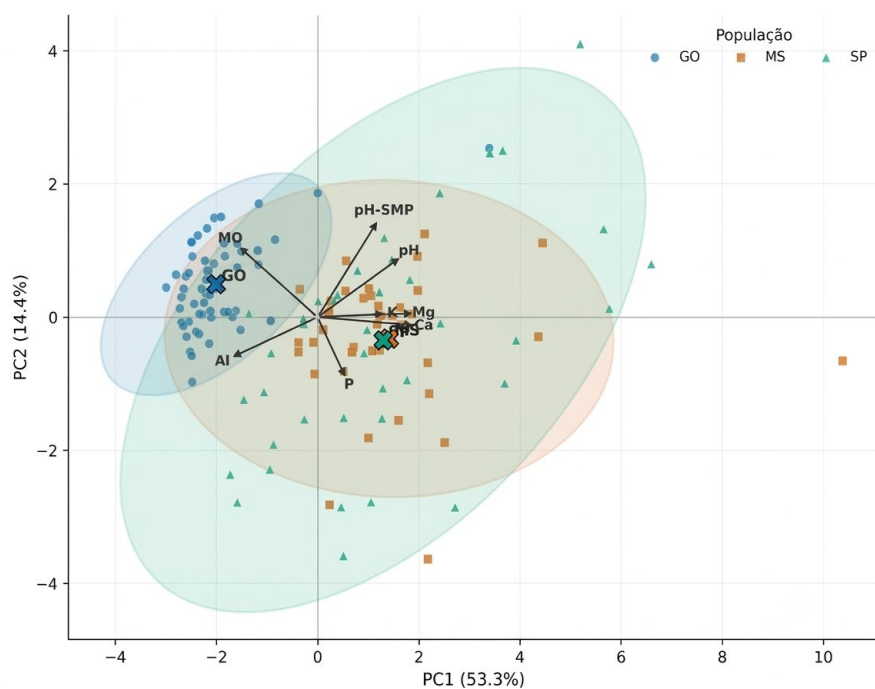
Entre os atributos dendrométricos avaliados, observaram-se diferenças marcantes no diâmetro à altura do peito (DAP), na altura total (HT), na altura comercial (HC), no diâmetro médio da copa (DMC) e na espessura da casca (EC). A distribuição dessas variáveis indicou elevada dispersão entre indivíduos da mesma população, evidenciando que o crescimento não

ocorre de forma homogênea, mesmo sob condições ambientais semelhantes. Essa heterogeneidade intraespecífica é característica frequente de espécies arbóreas do Cerrado, nas quais fatores como idade, histórico de distúrbios, disponibilidade hídrica, competição intraespecífica e pequenas variações edáficas contribuem para diferenças expressivas entre indivíduos.

A análise descritiva mostrou ainda que as populações diferem não apenas quanto aos valores médios das variáveis estruturais, mas também quanto à amplitude e à variabilidade observadas em cada característica. Enquanto algumas populações apresentaram distribuição relativamente homogênea dos indivíduos em relação ao porte arbóreo, outras apresentaram maior dispersão dos valores, indicando a coexistência de árvores jovens e de indivíduos de grande porte no mesmo ambiente. Esse padrão sugere diferentes históricos de recrutamento e de regeneração natural, além de possíveis diferenças na intensidade das perturbações ambientais ao longo do tempo.

Em relação aos atributos químicos do solo (Figura 3), verificou-se um amplo gradiente de fertilidade entre as áreas estudadas. As análises laboratoriais revelaram diferenças importantes nos teores de matéria orgânica, fósforo disponível, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e alumínio trocável, bem como nos valores de pH e pH-SMP, indicando que cada população está estabelecida em condições edáficas particulares.

Figura 3 – Componentes principais (PCA) dos atributos químicos do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que a POP-GO caracteriza-se por solos mais ácidos e distróficos, com maiores concentrações de alumínio trocável e menores valores de saturação por bases. Em contraste, a POP-MS apresentou solos relativamente mais férteis, com maiores concentrações de cálcio e magnésio e menor acidez potencial. Enquanto que a POP-SP apresentou condições intermediárias entre esses dois extremos, configurando um gradiente contínuo de fertilidade entre as localidades estudadas.

A variabilidade observada nos atributos químicos do solo foi acompanhada de diferenças igualmente expressivas na estrutura das árvores, sugerindo que a fertilidade edáfica influencia diretamente o crescimento vegetativo de *Pterodon pubescens*. Entretanto, a ausência de correspondência perfeita entre todas as variáveis dendrométricas e os atributos do solo indica que outros fatores ambientais, como a disponibilidade hídrica, a profundidade efetiva do solo, o regime de fogo, o histórico de uso da terra e fatores genéticos, também participam da determinação do porte arbóreo das populações.

Outro aspecto relevante observado durante a caracterização inicial foi a ampla sobreposição dos intervalos de variação entre indivíduos de diferentes populações. Embora diferenças estatísticas tenham sido detectadas nas análises posteriores, verificou-se que indivíduos de elevado desenvolvimento estrutural podem ocorrer mesmo em ambientes relativamente pobres em nutrientes, enquanto árvores de menor porte também foram registradas em solos mais férteis. Esse comportamento evidencia que o crescimento da espécie não depende exclusivamente da fertilidade química do solo, mas resulta da interação entre múltiplos fatores ambientais e das características intrínsecas de cada indivíduo.

A elevada variabilidade fenotípica observada neste estudo também se refletiu na distribuição espacial das árvores amostradas. A presença de indivíduos com arquiteturas contrastantes dentro de uma mesma população sugere elevada capacidade adaptativa da espécie às condições locais, característica frequentemente associada às espécies arbóreas do Cerrado, que evoluíram em ambientes altamente heterogêneos e sujeitos a fortes restrições nutricionais e hídricas. Essa plasticidade constitui um importante mecanismo ecológico para a manutenção das populações frente às oscilações ambientais e pode representar uma vantagem adaptativa diante das mudanças climáticas previstas para o bioma.

De maneira geral, a caracterização das populações demonstra que *Pterodon pubescens* apresenta ampla capacidade de estabelecimento em diferentes condições edáficas, porém responde estruturalmente às variações na fertilidade do solo. As diferenças observadas entre as três localidades justificam a aplicação de análises estatísticas multivariadas para compreender

como os diversos atributos ambientais atuam de forma integrada no crescimento da espécie. Dessa forma, os resultados descritivos constituem a base para as análises subsequentes de comparação entre populações, correlações, regressões, análise de componentes principais (PCA), distância de Mahalanobis e modelos lineares mistos, permitindo interpretar os mecanismos ecológicos responsáveis pela variação observada entre as populações naturais de *Pterodon pubescens*.

1.4.2 - Comparação entre populações (ANOVA, Tukey e Kruskal-Wallis).

A comparação entre as três populações naturais evidenciou uma diferenciação significativa na arquitetura de *Pterodon pubescens*. A análise de variância de um fator, complementada pelo teste de Tukey (Tabela 1), demonstrou efeito da população sobre todos os caracteres dendrométricos avaliados. Para as variáveis que não atenderam integralmente aos pressupostos de normalidade ou de homogeneidade das variâncias, a conclusão foi confrontada com o teste de Kruskal-Wallis e com comparações múltiplas ajustadas. A concordância geral entre as abordagens paramétricas e não paramétricas indica que os contrastes representam padrões populacionais consistentes, e não apenas oscilações amostrais (Figura 4).

Tabela 1 – Comparação dos caracteres dendrométricos entre as populações naturais de *Pterodon pubescens*. Média $\pm$ desvio padrão; letras diferentes indicam diferença pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Caracteres	POP-GO	POP-MS	POP-SP	F	p
HC (m)	4,32 $\pm$ 1,90 b	7,32 $\pm$ 2,25 a	4,39 $\pm$ 2,24 b	27,75	<0,001
HT (m)	18,78 $\pm$ 2,97 b	21,05 $\pm$ 4,24 a	19,99 $\pm$ 4,19 ab	4,24	0,016
DAP (cm)	45,13 $\pm$ 25,04 b	70,52 $\pm$ 19,49 a	45,92 $\pm$ 31,82 b	13,18	<0,001
DMC (m)	14,16 $\pm$ 3,00 b	15,54 $\pm$ 2,94 ab	16,89 $\pm$ 2,81 a	10,07	<0,001
EC (cm)	2,00 $\pm$ 0,45 a	1,82 $\pm$ 0,51 ab	1,56 $\pm$ 0,48 b	8,87	<0,001

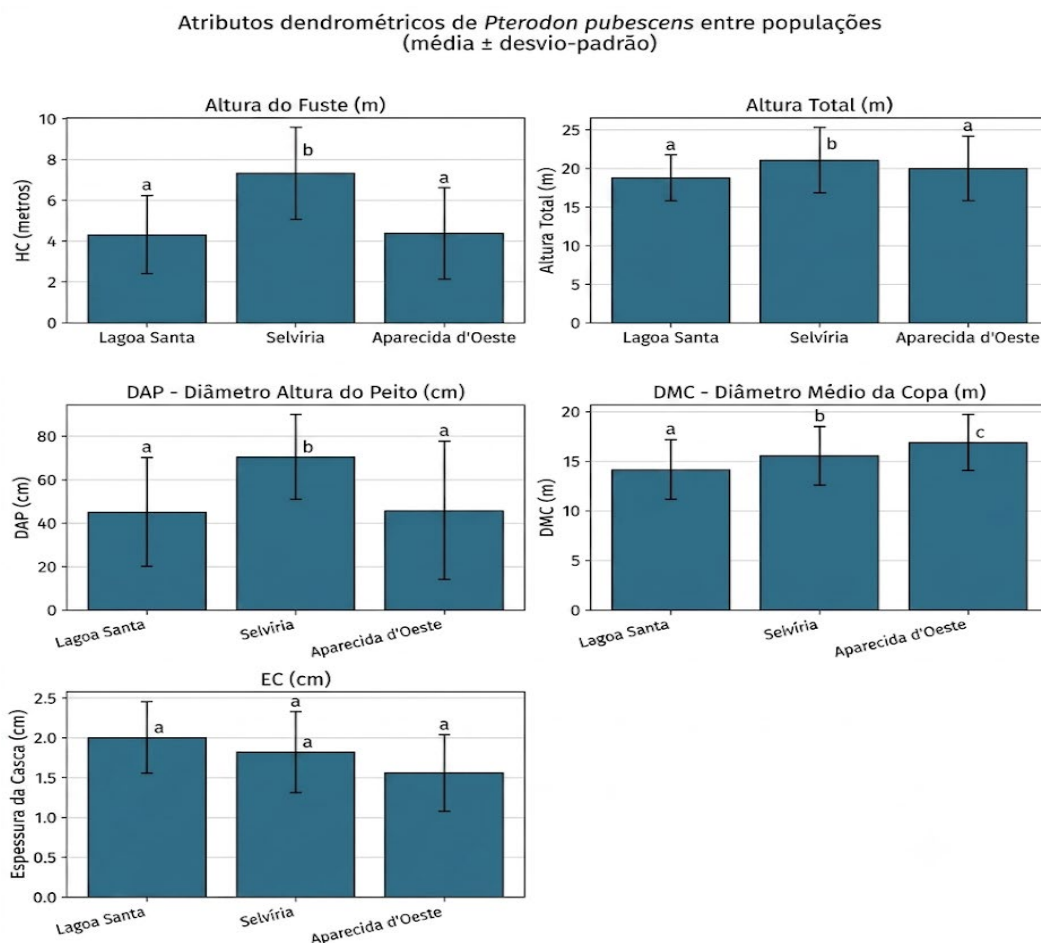
Fonte: Dados do autor.

A altura comercial foi a variável com maior separação entre as localidades ($F = 27,75$; $p < 0,001$). A POP-MS apresentou média de 7,32 $\pm$ 2,25 m, significativamente superior às médias de POP-GO (4,32 $\pm$ 1,90 m) e da POP-SP (4,39 $\pm$ 2,24 m), que não diferiram entre si.

Esse resultado demonstra que o desenvolvimento do fuste foi particularmente favorecido na POP-MS. A altura total apresentou contraste menos intenso ($F = 4,24$; $p = 0,016$): POP-MS atingiu $21,05 \pm 4,24$ m e diferiu de POP-GO ($18,78 \pm 2,97$ m), enquanto a POP-SP ocupou posição intermediária, com $19,99 \pm 4,19$ m. A menor discriminação da altura total sugere que a estatura máxima é relativamente conservada, enquanto a conformação do fuste permanece mais responsiva ao ambiente (Finger, 1992; Campos; Leite, 2017).

O diâmetro à altura do peito também distinguiu fortemente as populações ($F = 13,18$; $p < 0,001$). Assim, a POP-MS apresentou DAP médio de $70,52 \pm 19,49$ cm, superior aos valores de POP-GO ($45,13 \pm 25,04$ cm) e da POP-SP ($45,92 \pm 31,82$ cm). O maior DAP indica maior crescimento secundário e maior acúmulo de biomassa lenhosa. A elevada dispersão na POP-SP, por sua vez, indica uma estrutura mais heterogênea e a possível coexistência de indivíduos pertencentes a diferentes classes de desenvolvimento.

Figura 4 - Médias e desvios-padrão dos atributos dendrométricos nas três populações de *Pterodon pubescens*.



Fonte: Dados do autor.

O diâmetro médio da copa apresentou padrão distinto em relação ao observado no fuste ($F = 10,07$; $p < 0,001$). A POP-SP apresentou a maior média ($16,89 \pm 2,81$ m) e diferiu de POP-GO ($14,16 \pm 3,00$ m), enquanto Selvíria apresentou valor intermediário ($15,54 \pm 2,94$ m). Portanto, a população com maior crescimento diamétrico do tronco não foi necessariamente a que apresentou maior expansão lateral da copa. Esse desacoplamento demonstra que diferentes componentes da arquitetura respondem de forma específica às condições ambientais, à competição e ao espaço disponível.

A espessura da casca apresentou tendência inversa ao crescimento do fuste ($F = 8,87$; $p < 0,001$). A POP-GO apresentou a maior média ($2,00 \pm 0,45$ cm), diferindo da POP-SP ($1,56 \pm 0,48$ cm), enquanto a POP-MS apresentou média intermediária ($1,82 \pm 0,51$ cm). A maior espessura na POP-GO pode representar uma estratégia conservadora, com maior investimento na proteção dos tecidos e na resistência a distúrbios, em vez de um crescimento radial acelerado. Em ambientes sujeitos à limitação nutricional, à sazonalidade hídrica e ao fogo, a casca constitui um atributo funcional relevante para a persistência das espécies lenhosas (Nascimento, 2021; Jardim, 2023).

Os atributos dendrométricos evidenciam diferenças marcantes entre as populações de *Pterodon pubescens*, indicando que a espécie apresenta elevada variabilidade em resposta às condições ambientais locais. A população POP-MS apresentou os maiores valores médios de altura comercial (HC), altura total (HT) e diâmetro à altura do peito (DAP), diferindo estatisticamente das demais populações em pelo menos um desses atributos. Em contraste, a POP-GO e a POP-SP apresentaram valores semelhantes de HC e DAP, sugerindo limitações ambientais comuns ao crescimento em diâmetro e à formação do fuste (Figura 4).

A maior altura comercial observada na POP-MS indica indivíduos com troncos mais longos antes da inserção da copa. Essa característica é frequentemente associada à maior competição por luz em ambientes mais florestados ou de maior densidade arbórea, o que favorece o investimento no crescimento vertical. Além disso, os dados químicos do solo mostram que a POP-MS apresenta maiores teores médios de cálcio, magnésio e fósforo, bem como menor concentração de alumínio trocável, indicando um ambiente relativamente mais fértil em comparação às demais populações. Essas condições provavelmente aumentam a disponibilidade de recursos para o crescimento secundário e longitudinal, o que se reflete em maiores valores de HC, HT e DAP.

A altura total apresentou um comportamento semelhante. Embora a POP-SP tenha apresentado média intermediária, não diferiu estatisticamente de POP-GO, enquanto a POP-

MS apresentou crescimento superior. A altura é um atributo fortemente influenciado pela disponibilidade hídrica, pela fertilidade do solo e pela competição interespecífica, sendo normalmente menos plástica do que o diâmetro. Assim, a superioridade da POP-MS sugere que fatores edáficos e estruturais da vegetação proporcionam condições mais favoráveis ao desenvolvimento vertical.

O DAP apresentou um dos contrastes mais evidentes entre as populações. Os indivíduos da POP-MS apresentaram troncos significativamente mais espessos, enquanto, na POP-GO e na POP-SP, permaneceram estatisticamente semelhantes. O incremento diamétrico depende diretamente do balanço de carbono e da disponibilidade de nutrientes minerais, especialmente de fósforo, cálcio e magnésio. Em solos altamente distróficos, como os observados na POP-GO, uma parte importante da energia metabólica é direcionada para mecanismos de aquisição de nutrientes e de tolerância ao alumínio, o que reduz o investimento no crescimento radial.

O diâmetro médio da copa (DMC) apresentou um padrão distinto. As três populações diferiram estatisticamente entre si, formando um gradiente crescente de POP-GO < POP-MS < POP-SP. Esse resultado sugere diferenças na estratégia de ocupação do espaço. Enquanto a POP-MS investe simultaneamente em crescimento vertical e radial, a POP-SP parece favorecer maior expansão lateral da copa. Copas maiores aumentam a interceptação luminosa, ampliam a área fotossintética e podem representar uma estratégia adaptativa em ambientes mais abertos ou com maior disponibilidade de luz.

A espessura da casca (EC), por outro lado, não apresentou diferenças significativas entre as populações, indicando elevada conservação desse caráter. Esse resultado sugere que a proteção contra fogo, dessecação e danos mecânicos constitui uma característica relativamente estável em *Pterodon pubescens*, independentemente das diferenças ambientais observadas entre as áreas de estudo. A manutenção da espessura da casca reforça sua importância funcional como adaptação típica das espécies lenhosas do Cerrado.

Os desvios padrão relativamente elevados para DAP e DMC indicam elevada variabilidade intraespecífica, característica comum de populações naturais distribuídas em ambientes heterogêneos. Essa variabilidade provavelmente resulta da combinação de diferenças microambientais, da idade dos indivíduos, da disponibilidade local de recursos e de fatores genéticos.

Os resultados demonstram que *Pterodon pubescens* responde de forma distinta às condições ambientais das três regiões estudadas. Selvíria reúne as condições mais favoráveis ao

crescimento em altura e diâmetro, provavelmente devido à maior fertilidade do solo, menor restrição química e menor competição com espécies vizinhas, enquanto a POP-GO representa um ambiente mais restritivo, caracterizado por elevada acidez, maior disponibilidade de alumínio e menor fertilidade natural, a POP-SP apresenta condição intermediária, porém com maior investimento relativo na expansão da copa, indicando uma estratégia distinta de alocação de biomassa.

A convergência entre a ANOVA, o teste de Tukey e as verificações não paramétricas sustenta a rejeição da hipótese de igualdade estrutural entre as populações. A altura comercial e o DAP foram os atributos mais discriminantes, enquanto a altura total permaneceu relativamente conservada. Esses resultados confirmam a elevada plasticidade arquitetural de *Pterodon pubescens* e indicam que medidas do fuste, da copa e da casca são indicadores mais sensíveis do desempenho ecológico da espécie do que a estatura total, analisada isoladamente.

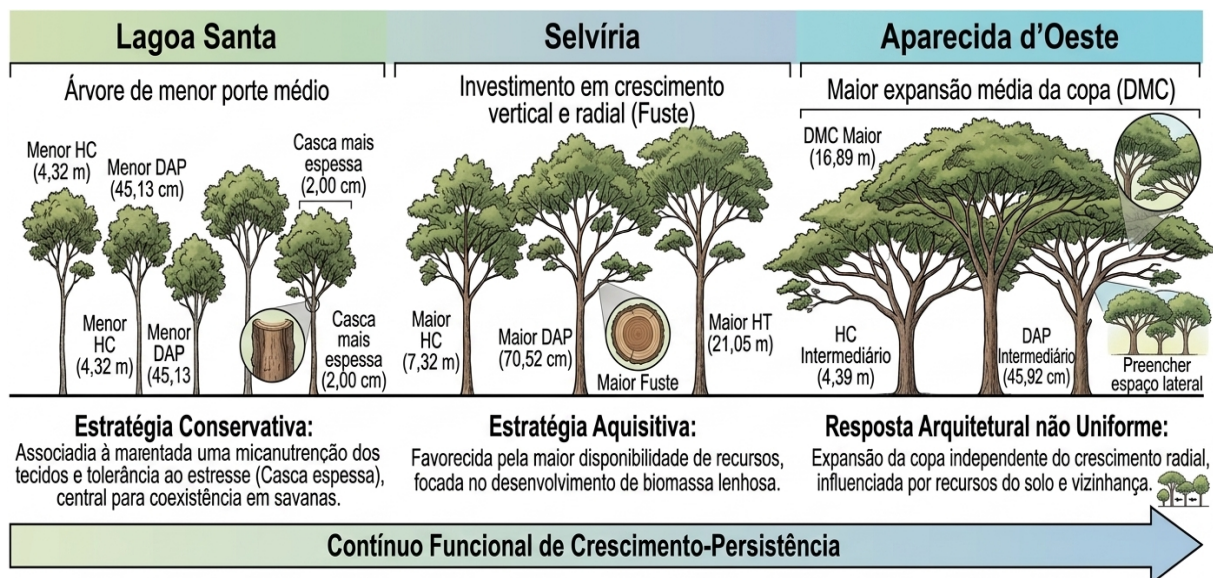
1.4.3 - Diferenciação estrutural e plasticidade entre populações.

As populações naturais de *Pterodon pubescens* não apresentam uma estrutura dendrométrica uniforme ao longo de sua distribuição regional. A diferenciação observada para altura comercial, diâmetro à altura do peito, diâmetro médio da copa e espessura da casca evidencia que a espécie ajusta componentes distintos de sua arquitetura em resposta às condições locais. Esse comportamento é compatível com a ampla distribuição de da espécie no Brasil Central e com sua ocorrência em formações savânicas, cerradões e áreas de transição, ambientes nos quais a disponibilidade de nutrientes, a retenção hídrica, a profundidade do solo e o histórico de distúrbios variam expressivamente (Marimon; Haridasan, 2005; Haridasan, 2008; Carrijo, 2020).

A maior diferenciação para altura comercial e DAP, em contraste com a menor variação da altura total, indica que o ambiente atua mais intensamente sobre o crescimento secundário e sobre a conformação do fuste do que sobre a estatura máxima. Em árvores adultas, a altura tende a ser parcialmente limitada pela estabilidade mecânica, pela eficiência hidráulica e pelo estágio ontogenético, enquanto o crescimento radial pode permanecer ativo por períodos mais longos. Assim, o DAP integra a história de disponibilidade de recursos, competição e perturbação experimentada pelo indivíduo, constituindo indicador sensível das condições de crescimento (Finger, 1992).

A POP-MS, que apresentou maior altura comercial e maior DAP, expressa uma estratégia de maior investimento em biomassa lenhosa e desenvolvimento do fuste. Em contraste, A POP-GO apresentou árvores de menor porte médio e casca mais espessa. Esse contraste sugere um contínuo funcional entre uma estratégia relativamente aquisitiva, favorecida pela maior disponibilidade de recursos, e uma estratégia conservativa, associada à manutenção dos tecidos e à tolerância ao estresse (Figura 5). Em savanas tropicais, essa alternância entre crescimento e persistência é central para explicar a coexistência de espécies e populações sob diferentes níveis de fertilidade e sazonalidade (Silva; Batalha, 2008; Carrijo, 2020).

Figura 5 – Diferenciação Funcional e Ocupação do Espaço entre Populações de *Pterodon pubescens*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A POP-SP apresentou comportamento intermediário para altura e DAP, porém maior expansão média da copa e elevada variabilidade diamétrica, o que evidencia uma resposta arquitetural, embora não ocorra de forma uniforme entre os órgãos das plantas desta população. A expansão lateral da copa pode ser favorecida por menor competição imediata, maior abertura do dossel ou diferenças na disponibilidade de luz, mesmo quando o crescimento radial do tronco não é máximo. Portanto, a arquitetura observada resulta da combinação entre recursos do solo e relações de vizinhança, e não apenas da fertilidade química considerada isoladamente.

1.4.4 - Gradiente de fertilidade, acidez e desempenho arbóreo.

A estrutura das populações acompanhou, em termos gerais, o gradiente químico dos solos (Figura 6). Assim, a POP-MS apresentou maiores concentrações de cálcio, magnésio e fósforo, além de menor teor de alumínio, enquanto a POP-GO apresentou maior acidez, maior teor de alumínio trocável e menores concentrações de bases. A POP-SP ocupou posição intermediária ou apresentou valores elevados para alguns nutrientes, embora com maior heterogeneidade. Esse arranjo confirma que os solos estudados não se diferenciam por um único elemento, mas por conjuntos correlacionados de atributos que formam um gradiente integrado de fertilidade (Ruggiero et al., 2002; Bernasol; Lima-Ribeiro, 2010).

O cálcio e o magnésio são componentes importantes da fertilidade dos solos tropicais. O cálcio contribui para a estabilidade das membranas e paredes celulares, para o crescimento radicular e para a sinalização celular, enquanto o magnésio integra a molécula de clorofila e participa de processos enzimáticos relacionados à assimilação de carbono. Em solos fortemente intemperizados, a baixa disponibilidade desses cátions pode restringir a expansão radicular, o crescimento cambial e a produção de biomassa. O maior porte da POP-MS, concomitante às maiores concentrações de Ca e Mg, é coerente com essa função e com estudos que associam a disponibilidade de bases ao desenvolvimento da vegetação lenhosa no Cerrado (Moreno; Schiavini; Haridasan, 2008; Assis et al., 2011).

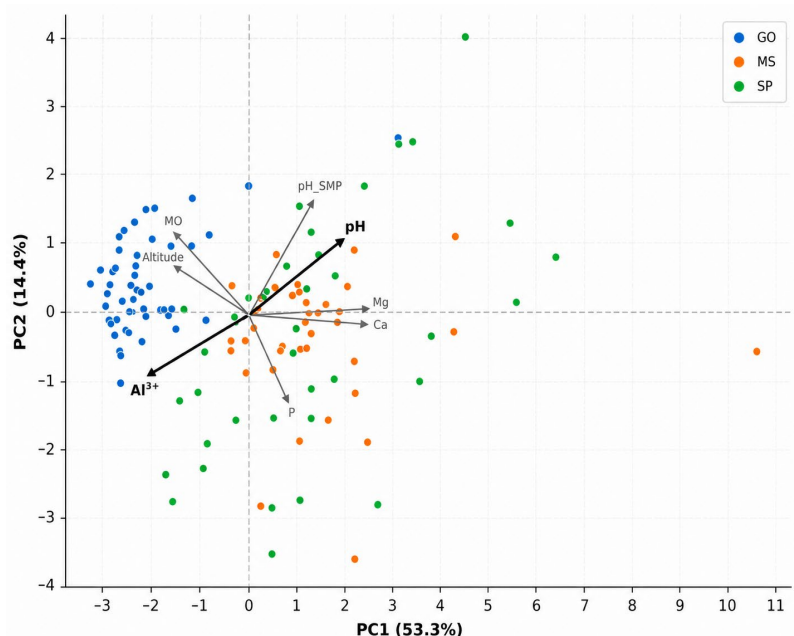
O fósforo também contribuiu para a distinção entre as áreas. A baixa disponibilidade desse nutriente constitui uma das limitações mais persistentes em solos tropicais antigos, pois grande parte do fósforo fica adsorvida a óxidos de ferro e alumínio. Como o fósforo participa da transferência de energia, da síntese de ácidos nucleicos e da formação de novos tecidos, sua escassez pode reduzir o crescimento secundário e a formação de raízes finas. A associação do maior crescimento com ambientes de maior disponibilidade de fósforo sustenta a interpretação de que *Pterodon pubescens*, embora tolerante a solos pobres, responde positivamente quando as restrições nutricionais são atenuadas (Raij et al., 2001; Baribault; Kobe; Finley, 2011).

A resposta positiva à fertilidade, entretanto, não implica dependência estrita de solos eutróficos. A ocorrência de indivíduos adultos na POP-GO, mesmo sob maior acidez e alumínio, demonstra que a espécie é capaz de completar seu desenvolvimento em condições químicas restritivas. Essa capacidade é típica de muitas espécies do Cerrado, que apresentam alta eficiência no uso de nutrientes, sistemas radiculares profundos, retranslocação foliar e cicla-

gem interna conservadora. Em *Pterodon pubescens*, tais mecanismos provavelmente permitem a manutenção da população em solos distróficos, ainda que com redução do crescimento médio (Haridasan, 2008; Parron; Bustamante; Markewitz, 2010).

A Análise de Componentes Principais (PCA), reteve 67,7% da variância total dos atributos edáficos nos dois primeiros eixos (PC1 = 53,3% e PC2 = 14,4%), revelando uma clara estruturação ambiental e segregação físico-química entre os habitats das populações estudadas (Figura 6).

Figura 6 – Ordenação das Populações de *Pterodon pubescens* por PCA com Base nas Variáveis Edáficas.



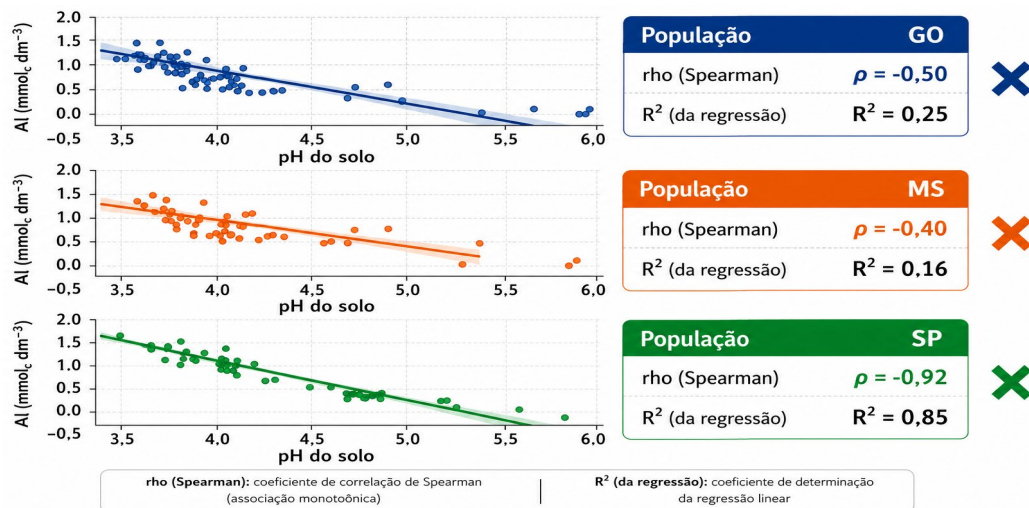
Fonte: Elaborado pelo autor.

O eixo principal (PC1) expressa um gradiente clássico de acidez e fertilidade, caracterizado pelo antagonismo geométrico e químico direto entre o alumínio trocável (Al^{3+}) e o pH, cujos vetores projetam-se em sentidos opostos (ângulo próximo de 180°). Esse padrão reflete o comportamento dinâmico do alumínio em solos tropicais, em que a elevação do pH favorece sua precipitação na forma de hidróxidos insolúveis, reduzindo sua fitotoxicidade trocável.

A força dessa relação variou regionalmente, conforme demonstrado pelas correlações de Spearman e pelos modelos de regressão (Figura 7): a população de POP-SP exibiu a associação negativa mais rigorosa ($\rho = -0,92$; $R^2 = 0,85$), evidenciando um forte controle do pH sobre a solubilidade do Al^{3+} , enquanto as populações de Lagoa Santa - GO ($\rho = -0,50$; $R^2 =$

0,25) e Selvíria - MS ($\rho = -0,40$; $R^2 = 0,16$) apresentaram relações de magnitude moderada a forte em seus respectivos envelopes edáficos. Alinhados ao vetor do pH no sentido positivo da PC1, os vetores de bases trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} e $\text{V\%}$ - queda na saturação por bases) confirmam a coocorrência de maior disponibilidade nutricional em ambientes de menor acidez. Em contrapartida, os vetores de matéria orgânica (MO) e altitude projetaram-se no quadrante negativo da PC1, acompanhando a tendência do Al^{3+} e sugerindo que áreas mais elevadas na amostragem tendem a reter maior acidez residual e teores orgânicos.

Figura 7 – Regressão linear e correlação de Spearman entre o pH do solo e o alumínio trocável (Al^{3+}) nas populações de *Pterodon pubescens*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa ordenação espacial resultou em uma clara separação amostral entre as regiões. A população da POP-GO ocupou predominantemente o quadrante de valores negativos da PC1, caracterizando-se por solos distróficos, altamente ácidos e com elevados teores de Al^{3+} . A POP-MS situou-se em uma zona intermediária, indicando uma transição edáfica para solos de menor acidez. Por fim, a POP-SP apresentou expressiva dispersão ao longo de ambos os eixos, abrangendo desde locais com maior fertilidade e pH até áreas com teores de fósforo (P) e de MO de amplitude distinta.

Conjuntamente, esses resultados ratificam que a acidez e a toxicidade por alumínio atuam como os principais filtros edáficos regionais, moldando a heterogeneidade do habitat e demandando respostas adaptativas ou de variabilidade diferenciadas entre as populações.

1.4.5 - Alumínio: tolerância, limitação e estratégias conservativas.

O alumínio trocável ocupou o extremo oposto do gradiente de fertilidade e apresentou associação negativa com os principais atributos de crescimento (Figura 6). Em solos ácidos, o aumento da solubilidade do Al pode afetar a elongação radicular, a absorção de cálcio, magnésio e fósforo, bem como a atividade dos meristemas. Esses efeitos ajudam a explicar o menor DAP e a menor altura comercial observados em ambientes com maior teor de alumínio. Contudo, os dados não indicam que o Al impeça a ocorrência da espécie, mas sim que limite seu desempenho estrutural.

Essa distinção entre tolerância e ausência de efeito é ecologicamente relevante. Uma espécie tolerante pode sobreviver e reproduzir-se em determinado ambiente sem necessariamente atingir o mesmo crescimento observado em condições mais favoráveis. Assim, a presença de *Pterodon pubescens* em solos ácidos não deve ser interpretada como evidência de neutralidade fisiológica ao alumínio. Os indivíduos podem suportar a restrição por meio de exclusão radicular, complexação orgânica, compartimentalização celular e maior investimento em tecidos duráveis; porém, essas estratégias acarretam custos energéticos que reduzem a alocação para o crescimento rápido.

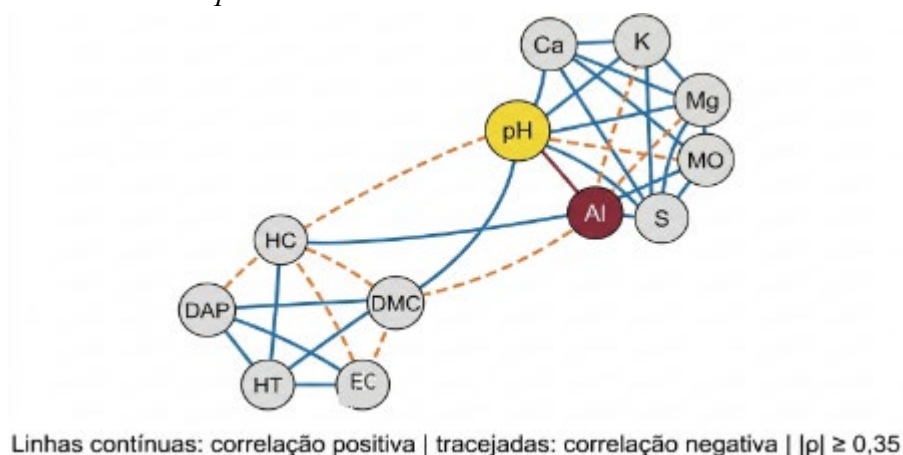
A maior espessura da casca na POP-GO é compatível com uma estratégia de persistência. A casca protege o câmbio contra altas temperaturas, fogo, perda de água e danos mecânicos, constituindo um atributo funcional relevante em ambientes savânicos. O investimento proporcionalmente maior em casca, associado a um menor crescimento diamétrico, sugere que os indivíduos alocam recursos à proteção e à longevidade quando a disponibilidade de nutrientes é restrita. Essa resposta se enquadra no balanço entre aquisição e conservação de recursos descrito para plantas lenhosas sob estresse ambiental (Nascimento, 2021; Jardim, 2023).

A relação entre acidez, alumínio e disponibilidade de bases também reforça a necessidade de interpretar o solo como um sistema integrado. O aumento do Al frequentemente acompanha a redução do pH e a diminuição da saturação por Ca e Mg. Portanto, seu efeito estatístico pode representar, simultaneamente, toxicidade potencial e baixa oferta de nutrientes essenciais. A PCA e as correlações observadas no estudo sintetizam esse contínuo, evitando atribuir toda a variação a um único componente químico.

A análise da rede de correlações (Figura 8) permitiu identificar a estrutura das interações entre os atributos químicos do solo e as variáveis estruturais da vegetação,

considerando apenas os coeficientes com magnitude $|\rho| \geq 0,35$. Os resultados revelam a formação de dois grandes módulos funcionais interconectados: a dinâmica química do solo e a alometria vegetal.

Figura 8 – Rede de correlações entre atributos químicos do solo e variáveis dendrométricas em populações de *Pterodon pubescens*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro agrupamento destaca a forte interdependência entre os atributos químicos do solo. Observa-se uma rede densa de correlações positivas entre o pH, a matéria orgânica (MO), o enxofre (S) e os cátions trocáveis — cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). Essa sinergia reflete a dinâmica clássica de fertilidade, em que o aumento do pH favorece a retenção e a disponibilidade dessas bases no complexo de troca.

Em contrapartida, o alumínio (Al) posiciona-se de forma antagônica a esse grupo, apresentando relação negativa direta com o pH. Essa configuração evidencia o comportamento típico de solos ácidos, nos quais a redução do pH solubiliza o Al^{3+} , tornando-o a espécie predominante em detrimento dos cátions nutricionais.

O segundo agrupamento reúne as variáveis dendrométricas da comunidade vegetal, incluindo o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura total (HT), a altura do dossel (HC) e o diâmetro médio da copa (DMC). Todas essas variáveis exibem fortes correlações positivas entre si, demonstrando o padrão de crescimento alométrico esperado, no qual o incremento de diâmetro é acompanhado pelo ganho vertical e pela expansão da copa.

O pH e o alumínio (Al) atuam como principais nós de ligação (*hubs*) entre os atributos do solo e as variáveis estruturais da vegetação. O alumínio apresentou correlação positiva com a altura do dossel (HC) e correlação negativa com o diâmetro médio da copa (DMC). Esse padrão sugere que a toxicidade por alumínio ou a acidez associada pode exercer um efeito restritivo sobre a expansão lateral da copa, enquanto espécies adaptadas a condições de acidez conseguem manter o crescimento em altura. As conexões entre o pH e variáveis como HC e DMC indicam que a reação do solo é um fator determinante na distribuição estrutural da vegetação, condicionando o desenvolvimento morfológico dos indivíduos na área avaliada.

1.4.6 - Respostas diferenciadas do fuste, da copa e da casca

Os caracteres dendrométricos avaliados responderam de forma desigual ao gradiente ambiental. A altura comercial (HC) e o diâmetro à altura do peito (DAP) foram mais discriminantes; a altura total (HT) foi relativamente conservada, o diâmetro de copa (DMC) apresentou padrão parcialmente independente e a espessura da casca (EC) mostrou tendência inversa ao crescimento do fuste. Esse resultado confirma que a planta não responde ao ambiente como uma unidade estrutural homogênea. Cada variável representa uma função distinta e está sujeita a limitações específicas.

O crescimento radial aumenta a capacidade de suporte mecânico, a área condutora do xilema e o estoque de carbono, mas exige elevado investimento em tecidos permanentes. A altura comercial, por sua vez, depende da forma do tronco, da dominância apical e da competição por luz. O diâmetro da copa expressa a ocupação horizontal do espaço e a capacidade de interceptação da luz. Já a casca está diretamente relacionada à proteção dos tecidos internos. A divergência entre esses atributos evidencia plasticidade na alocação de biomassa, permitindo que a espécie priorize diferentes funções conforme o ambiente.

A maior copa na POP-SP, sem aumento correspondente do DAP, pode refletir uma arquitetura mais ramificada ou maior disponibilidade lateral de espaço. Em ambientes mais abertos, a expansão da copa pode aumentar a interceptação de luz sem exigir crescimento acentuado em altura. Em contrapartida, em locais com maior competição vertical, o investimento pode ser direcionado ao fuste. Dessa forma, diferenças na densidade local de árvores e no histórico de abertura do dossel podem complementar a influência edáfica.

Esse desacoplamento também alerta para as limitações de estudos baseados em uma única medida de crescimento. A altura total isolada poderia sugerir diferenças modestas entre as populações, enquanto a análise conjunta de DAP, altura comercial, copa e casca revela estratégias estruturais contrastantes. Para a avaliação ecológica de *Pterodon pubescens*, recomenda-se, portanto, o emprego de múltiplas variáveis que contemplem o crescimento, a ocupação do espaço e a resistência a distúrbios.

1.4.7 - Integração das correlações, PCA e modelos explicativos

As correlações de Spearman indicaram associações positivas entre crescimento e atributos relacionados à fertilidade, especialmente cálcio, magnésio, fósforo e pH, enquanto o alumínio apresentou tendência negativa. Embora essas associações sejam biologicamente coerentes, não devem ser interpretadas como relações causais isoladas. Os nutrientes e a acidez são interdependentes e refletem processos pedogenéticos comuns, de modo que o efeito observado em uma variável pode incorporar a influência de outras variáveis.

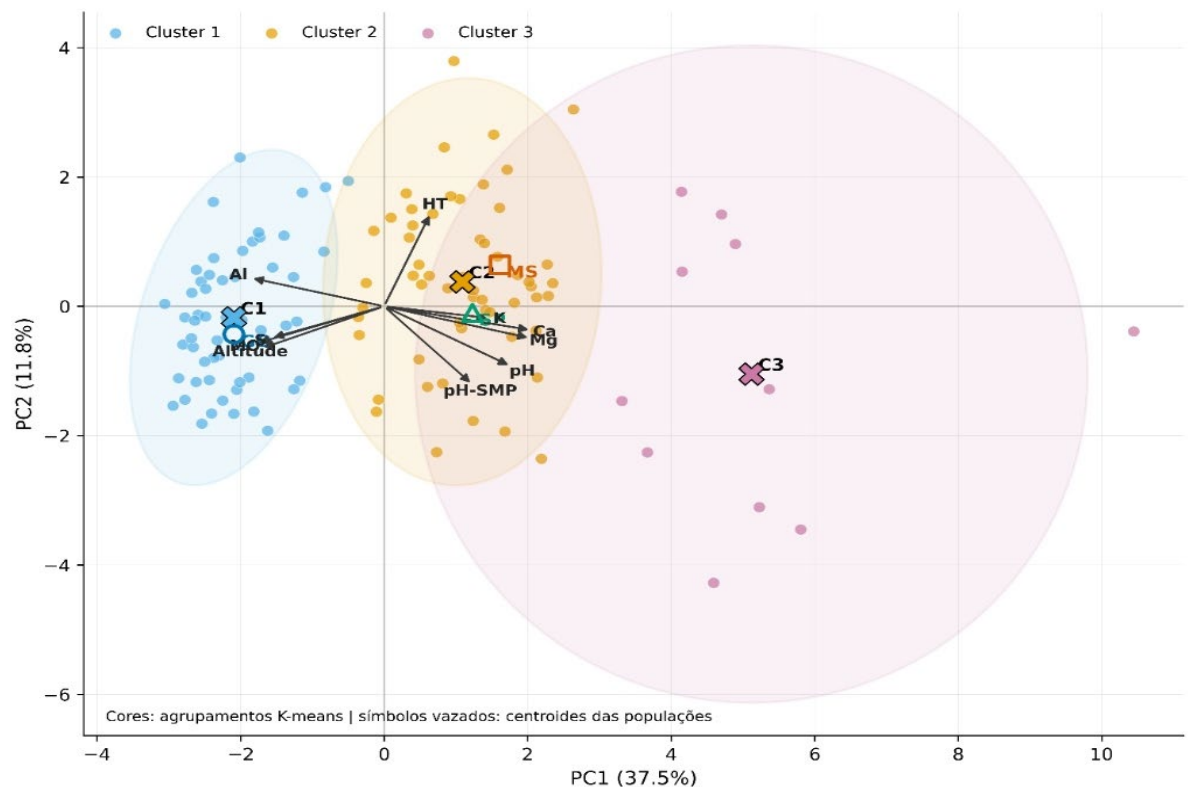
A Análise de Componentes Principais reforçou essa interpretação ao organizar as variáveis em um eixo que representa a transição entre solos ácidos, com maior teor de alumínio, e solos com maior disponibilidade de bases. A separação das populações nesse espaço multivariado indica que a diferenciação estrutural ocorre ao longo de um gradiente ambiental composto. O uso da PCA (Figura 9) foi particularmente adequado, pois reduziu a redundância entre os atributos químicos e permitiu visualizar a posição relativa das populações, sem supor independência absoluta entre os nutrientes (LEGENDRE; LEGENDRE, 2012). Assim, o primeiro componente principal (PC1), possui uma variação de 37,5%, captura a maior fatia da variabilidade dos dados e representa o gradiente edáfico de acidez versus fertilidade/bases. Do lado esquerdo (valores negativos de PC1), caracterizam-se pela presença de alumínio trocável (Al^{+3}), matéria orgânica (MO), enxofre (S) e maiores altitudes. Essa região concentra os indivíduos do Cluster 1 (azul), associados a solos tipicamente mais ácidos, intemperizados e com maior restrição química por Al^{+3} . Do lado direito (Valores Positivos de PC1), é dominado pelos vetores das bases trocáveis e da reação do solo: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Potássio (K), pH e pH-SMP. Esta região abriga os indivíduos dos Clusters 2 (amarelo) e 3 (rosa), o que reflete ambientes de maior fertilidade natural e de disponibilidade nutricional.

Quanto ao segundo componente principal (PC2), este está fortemente associado ao porte e ao crescimento vertical das plantas (Figura 9). O vetor da altura total (HT) aponta para

cima no quadrante superior do gráfico, formando um ângulo agudo com a transição para os nutrientes (Ca, Mg, K). Isso indica que as árvores de maior porte (HT) tendem a se concentrar em solos de transição, mais férteis (Cluster 2), o que apresenta um antagonismo claro em relação aos solos marcados pelo elevado teor de Al (Cluster 1).

Outro aspecto que chama a atenção é a distribuição no Cluster 3. A grande amplitude espacial reflete indivíduos com alta variação biológica real (como evidenciado pela distância de Mahalanobis), possivelmente associados a microssítios atípicos de baixíssima acidez ou a características estruturais ímpares.

Figura 9 – *Biplot* da PCA evidenciando o gradiente de fertilidade do solo, acidez e crescimento vegetal em populações de *Pterodon pubescens*.



Nota: Análise de Componentes Principais (PCA) e agrupamento k-means aplicados a atributos edáficos e biométricos. Os vetores representam as variáveis do solo (química e altitude) e dendrométricas (HT). As elipses delimitam os três agrupamentos (*Clusters* 1, 2 e 3) e os símbolos vazados representam os centroides das populações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A identificação de poucos indivíduos com elevada distância de Mahalanobis, sem evidência de erro de mensuração, confirma a existência de variação biológica real nas popula-

ções de *Pterodon pubescens*. Esses indivíduos extremos podem representar microssítios particulares, árvores de idade diferenciada, genótipos com respostas específicas ou histórias locais de competição e perturbação. A manutenção dessas observações nas análises foi importante para não eliminar justamente a parcela da variabilidade que caracteriza as populações naturais.

Os modelos de regressão e os modelos lineares mistos complementam essa interpretação ao mostrarem que a influência do solo persiste mesmo quando a população é considerada na estrutura do modelo. A inclusão da população como efeito aleatório reconhece que indivíduos de uma mesma localidade compartilham uma história ambiental e espacial e, possivelmente, genética. A permanência de Ca, Mg, P ou Al entre os preditores relevantes indica que parte do efeito edáfico é consistente entre áreas, enquanto a variância associada à população revela a atuação de fatores não medidos.

A comparação entre modelos também sustenta uma interpretação parcimoniosa: o crescimento não é explicado pela inclusão indiscriminada de todos os atributos do solo, mas por combinações ecologicamente coerentes que representam a fertilidade, a acidez e a disponibilidade de bases. Essa abordagem reduz problemas de multicolinearidade e evita conclusões artificiais decorrentes da alta correlação entre variáveis químicas.

1.4.8 - Heterogeneidade intra e inter populacional.

A ampla dispersão dos caracteres, especialmente do DAP, demonstra que a variação dentro das populações é tão relevante quanto a diferença entre suas médias. Assim, a POP-SP apresentou elevada heterogeneidade diamétrica, enquanto a POP-MS concentrou uma proporção maior de indivíduos de grande porte. A POP-GO apresentou porte médio menor, mas manteve indivíduos adultos sob condições restritivas. Esses padrões podem refletir diferenças na estrutura etária, no recrutamento, na mortalidade e na intensidade das perturbações anteriores.

Como o estudo possui delineamento observacional, não é possível separar integralmente os efeitos da idade, do ambiente e da genética. Árvores de maior DAP podem ser mais antigas, ter crescido em períodos climáticos favoráveis ou ocupar microssítios com maior capacidade de retenção de água. Além disso, a estrutura espacial das populações pode produzir grupos de indivíduos aparentados, capazes de responder de forma semelhante ao ambiente.

Essa possibilidade reforça a importância de integrar, futuramente, dados genéticos, históricos e edáficos.

A altitude também distinguiu fortemente as localidades e pode representar um conjunto de diferenças climáticas e geomorfológicas. Variações altitudinais relativamente moderadas alteram a temperatura, a drenagem, a profundidade do solo e a exposição ao vento. Portanto, parte das diferenças atribuídas à química do solo pode estar associada a processos ambientais correlatos. A interpretação mais robusta é que a estrutura de *Pterodon pubescens* resulta de múltiplos filtros que atuam conjuntamente.

A heterogeneidade local não reduz a importância do gradiente edáfico; ao contrário, evidencia que a resposta das árvores depende da interação entre as condições regionais e os microssítios. Mesmo em uma população considerada mais fértil, podem existir pontos pobres ou ácidos, e o inverso também é verdadeiro. Essa variação espacial explica a presença de indivíduos com desempenho distinto do padrão médio de sua localidade.

1.4.9 - Implicações ecológicas, conservacionistas e de restauração.

A capacidade de ocorrer tanto em solos distróficos quanto em ambientes relativamente mais férteis confere a *Pterodon pubescens* ampla utilidade ecológica. A espécie combina tolerância a condições restritivas com resposta positiva à melhoria da fertilidade, o que é uma característica desejável em programas de restauração do Cerrado e de áreas de transição. Entretanto, o desempenho esperado dependerá da correspondência entre a procedência das sementes, o solo do local de plantio e a intensidade dos estresses ambientais.

Populações estabelecidas em ambientes ácidos e com maior teor de alumínio podem constituir fontes importantes de material genético para a restauração de áreas degradadas e pobres em nutrientes. Por outro lado, populações de maior crescimento, como a POP-MS, podem conter genótipos ou combinações ambientais favoráveis ao aumento da biomassa. A utilização indiscriminada de sementes de uma única procedência pode reduzir a diversidade adaptativa e aumentar o risco de incompatibilidade entre genótipos e ambientes.

Para a conservação *in situ*, os resultados indicam que as três populações têm valor complementar. A POP-MS representa o extremo de maior desenvolvimento estrutural; a POP-GO evidencia tolerância e estratégia conservadora sob maior restrição química; a POP-SP reúne elevada variabilidade arquitetural. Preservar essa diversidade de respostas é essencial diante das mudanças climáticas, pois populações adaptadas a condições contrastantes podem

oferecer combinações distintas de tolerância à seca, eficiência nutricional e capacidade de crescimento.

Em projetos de manejo, a química do solo deve ser considerada um indicador do potencial de crescimento, mas não o único critério. A correção intensa da acidez em ambientes naturais pode alterar relações ecológicas e favorecer espécies competitivas, enquanto intervenções moderadas podem ser úteis em sistemas de produção ou de restauração ativa. A decisão deve respeitar o objetivo do projeto e a condição de referência do ecossistema.

1.4.10 - Limitações do estudo e perspectivas.

A associação entre atributos edáficos e o conjunto de caracteres dendrométricos deve ser interpretada à luz do delineamento observacional. A coleta em um único período descreve diferenças acumuladas ao longo da vida das árvores, sem permitir estimar diretamente as taxas anuais de crescimento. Monitoramentos permanentes, com remediações periódicas, seriam necessários para confirmar se os indivíduos em solos mais férteis apresentam incremento corrente superior.

A análise concentrou-se na camada superficial do solo, que representa uma região importante de ciclagem de nutrientes, mas espécies arbóreas do Cerrado exploram camadas profundas. A disponibilidade hídrica e química em profundidade pode explicar parte da variação residual. Estudos futuros devem incluir a textura, a densidade, a profundidade efetiva, a umidade, a capacidade de retenção de água e de nutrientes em diferentes camadas.

Também seria relevante integrar atributos foliares e fisiológicos, como a área foliar específica, a concentração de nutrientes nas folhas, o potencial hídrico, a eficiência fotossintética e a anatomia radicular. Essas variáveis permitiriam identificar os mecanismos que conectam a disponibilidade de nutrientes ao crescimento observado. A combinação com marcadores genéticos permitiria separar a variabilidade da diferenciação genética entre populações.

Apesar dessas limitações, a convergência entre comparação de médias, correlações, PCA, regressões e modelos mistos fortalece a interpretação central. Métodos estatísticos distintos apontaram para o mesmo gradiente ecológico e para a mesma diferenciação entre as populações. Essa consistência reduz a probabilidade de que os padrões sejam artefatos de uma única abordagem analítica.

1.4.11 - Síntese interpretativa.

Em síntese, *Pterodon pubescens* apresenta uma estratégia ecológica flexível. Em solos relativamente mais férteis, a espécie aumenta o investimento em crescimento radial e no desenvolvimento do fuste; em ambientes mais ácidos e ricos em alumínio, mantém indivíduos adultos por meio de uma estratégia mais conservadora, associada a menor crescimento e maior investimento em proteção. A expansão da copa responde parcialmente a outros componentes do ambiente, o que demonstra que a arquitetura é modular.

A hipótese de que o desempenho da espécie é determinado por um gradiente integrado de fertilidade, no qual cálcio, magnésio, fósforo, pH e alumínio atuam conjuntamente, é sustentada pelos resultados das análises. A fertilidade favorece o crescimento, mas a baixa disponibilidade de nutrientes não impede o estabelecimento. A arquitetura da planta, especialmente DAP, altura comercial, diâmetro da copa e espessura da casca, mostraram-se mais sensíveis ao gradiente edáfico do que a altura total.

Essa combinação de tolerância e responsividade ajuda a explicar a ampla distribuição geográfica de *Pterodon pubescens* no Cerrado e em suas áreas de contato. A espécie não é apenas tolerante a solos pobres, nem exclusivamente favorecida por solos mais férteis: ela ajusta sua alocação de recursos conforme o contexto ambiental. Essa plasticidade constitui elemento central para sua persistência, para a conservação de suas populações e para seu uso responsável em restauração ecológica.

1.5 - CONCLUSÕES

Pterodon pubescens apresenta elevada plasticidade ecológica e estrutural ao longo do gradiente ambiental representado pelas populações de Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP). As diferenças observadas entre as populações evidenciam que o crescimento da espécie é condicionado pela interação entre atributos químicos do solo, características locais do ambiente e fatores inerentes à própria população.

A hipótese central do estudo foi corroborada. O desempenho dendrométrico não foi determinado por um único atributo edáfico, mas por um gradiente integrado de fertilidade, no qual cálcio, magnésio, fósforo, pH e alumínio atuaram conjuntamente sobre a arquitetura das árvores. Solos relativamente mais férteis favoreceram maior desenvolvimento do fuste, en-

quanto ambientes mais ácidos e com maior teor de alumínio estiveram associados à redução do crescimento médio, sem impedir o estabelecimento da espécie.

Entre os atributos avaliados, o diâmetro à altura do peito, a altura comercial, o diâmetro médio da copa e a espessura da casca mostraram maior sensibilidade às diferenças ambientais do que a altura total. Esses resultados indicam que medidas relacionadas ao crescimento secundário e à alocação de biomassa constituem indicadores mais eficientes para avaliar a resposta ecológica de *Pterodon pubescens* do que a estatura isoladamente.

As análises de comparação entre populações, correlação, regressão, análise de componentes principais, distância de Mahalanobis e modelos lineares mistos apresentam resultados convergentes, reforçando a robustez das interpretações. Em conjunto, essas abordagens demonstram que a variabilidade observada representa uma resposta biológica consistente às condições ambientais, e não um artefato decorrente de um único procedimento estatístico.

A coexistência de indivíduos adultos em ambientes fortemente contrastantes confirma que a espécie possui elevada capacidade adaptativa, característica compatível com sua ampla distribuição no Cerrado. Entretanto, essa tolerância não implica ausência de resposta ao ambiente; ao contrário, a espécie ajusta sua arquitetura conforme a disponibilidade de recursos, evidenciando elevada variabilidade.

A constatação de que diferentes componentes da arquitetura respondem de forma independente aos gradientes ambientais contribui para compreender os mecanismos que permitem a persistência de *Pterodon pubescens* em ambientes naturalmente pobres em nutrientes. Assim, do ponto de vista ecológico fica o conhecimento da relação entre a fertilidade do solo e a sua estrutura populacional de *Pterodon pubescens* em diferentes ambientes.

A manutenção de populações distribuídas em diferentes condições edáficas é importante para preservar a diversidade adaptativa da espécie. Assim, em programas de restauração, a escolha da procedência das sementes deve considerar as características do solo e as condições ambientais do local de plantio, evitando a utilização indiscriminada de materiais provenientes de uma única população. Portanto, as contribuições deste trabalho têm implicações na conservação genética, na restauração ecológica e no manejo florestal.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros integrem análises ecofisiológicas, atributos funcionais, monitoramento do crescimento em longo prazo e marcadores genéticos para distinguir os efeitos da variabilidade daqueles decorrentes da diferenciação genética entre populações. A incorporação de variáveis relacionadas à disponibilidade hídrica, às propriedades físicas do solo e às mudanças climáticas permitirá compreender de forma mais abrangente os

mecanismos responsáveis pela distribuição e pelo desempenho ecológico de *Pterodon pubescens* no Cerrado brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. C. C. De; COELHO, R. M.; PINHEIRO, E. da S.; DURIGAN, G. Water availability determines physiognomic gradient in an area of low-fertility soils under Cerrado vegetation. **Plant Ecology**, [s. l.], v. 212, n. 7, p. 1135–1147, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11258-010-9893-8>>. Acesso em: abr. 2026.
- BARIBAULT, T. W.; KOBE, R. K.; FINLEY, A. O. Tropical tree growth is correlated with soil phosphorus, potassium, and calcium, though not for legumes. **Ecological Monographs**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 189–203, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/11-1013.1>>. Acesso em: nov. 2025.
- BERNASOL, W. P.; LIMA-RIBEIRO, M. S. Estrutura espacial e diamétrica de espécies arbóreas e seus condicionantes em um fragmento de cerrado sentido restrito no sudoeste goiano. **Hoehnea**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 181–198, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s2236-89062010000200001>>. Acesso em: maio.2024.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. atualizada e ampliada. Viçosa: Editora UFV, 2017.
- CARRIJO, J. N. **Atributos Funcionais como Indicadores de Estratégias Ecológicas de Plantas Lenhosas de Formações Savânicas do Cerrado**, 2020. Dissertação. (Ecologia e Conservação) Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT, Nova Xavantina – MT, 2020.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed. téc.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- FERREIRA, M. de S.; BARROS, B. C. D.; GONZAGA, A. P. D.; MACHADO, E. L. M.; OTONI, T. J. O. INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS NA ESTRUTURA DE CINCO POPULAÇÕES ARBÓREAS DO CERRADO NA REGIÃO CENTRAL DE MINAS GERAIS. **Nativa**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 460–468, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.31413/nativa.v7i4.6852>>. Acesso em: nov. 2025.
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992.
- HAGLÖF SWEDEN. **Vertex IV and Transponder T3: user guide**. Långsele: Haglöf Sweden, 2007.
- HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 183–195, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1677-04202008000300003>>. Acesso em: maio. 2024.
- JARDIM, R. I. L. **MUDANÇAS NA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E ESTRATÉGIAS ECOLÓGICAS: EVIDÊNCIAS DE UMA AVALIAÇÃO TEMPORAL DO ADENSAMENTO DE PLANTAS LENHOSAS SOBRE CAMPOS**, 2023. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba, 2023.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American Statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical ecology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.

LIMA-RIBEIRO, M. de S. **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ESPÉCIES ARBÓREAS EM FRAGMENTOS DE CERRADO SENTIDO RESTRITO NO PLANALTO CENTRAL BRASILEIRO – GO**, *BIOCIÊNCIAS*, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 160-165, jul. 2007. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/riserver/api/core/bitstreams/914122d3-9f17-472a-b012-a47c694e6298/content>> . Acesso em: maio. 2024.

LIRA-MARTINS, D.; NASCIMENTO, D. L.; ABRAHÃO, A.; COSTA, P. de B.; D'ANGIOLI, A. M.; VALEZIO, É. V.; ROWLAND, L.; OLIVEIRA, R. S. Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. **Plant Soil**, 476, 549–588, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05517-y>. Acesso em: nov. 2025.

MARIMON, B. H.; HARIDASAN, M. Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerradão e um cerrado sensu stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 913–926, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0102-33062005000400026>>. Acesso em: maio. 2025.

MORENO, M. I. C.; SCHIAVINI, I.; HARIDASAN, M. FATORES EDÁFICOS INFLUENCIANDO NA ESTRUTURA DE FITOFISIONOMIAS DO CERRADO. **Caminhos de Geografia**, [s. l.], v. 9, n. 25, p. 173–194, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/rcg92515733>>. Acesso em: maio. 2025.

NASCIMENTO, D. **Padrões de diversidade e composição funcional de espécies arbóreas no Cerrado: o papel do clima, fogo e adensamento arbóreo**. 2021. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Biodiversidade) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2021.424>>. Acesso em: abr. 2024.

PARRON, L. M.; BUSTAMANTE, M.; MARKEWITZ, D. Fluxes of nitrogen and phosphorus in a gallery forest in the Cerrado of central Brazil. **Biogeochemistry**, [s. l.], v. 105, p. 89–104, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10533-010-9537-z>>. Acesso em: nov. 2025.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

RUGGIERO, P.; BATALHA, M. A.; PIVELLO, V. R.; MEIRELLES, S. T. Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology**, [s. l.], v. 160, n. 1, p. 1–16, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/a:1015819219386>>. Acesso em: abr. 2024.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 2 v.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCALON, M. C.; MENOR, I. O.; FREITAG, R.; PEIXOTO, K. S.; RIFAI, S. W.; MARIMON, B. S.; MARIMON, B. H.; MALHI, Y. Contrasting strategies of nutrient demand and use between savanna and forest ecosystems in a neotropical transition zone. **Biogeosciences**,

[s. l.], v. 19, n. 15, p. 3649–3661, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/bg-19-3649-2022>>. Acesso em: maio. 2024.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.

SILVA, D. M. Da; BATALHA, M. A. Soil–vegetation relationships in cerrados under different fire frequencies. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 311, p. 87–96, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-008-9660-y>>. Acesso em: nov. 2025.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall/Pearson, 2010.

2) CAPÍTULO 2 - CONECTIVIDADE ESPACIAL POTENCIAL EM POPULAÇÕES NATURAIS DE *PTERODON PUBESCENS* (FABACEAE): DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE INFERENCIAL

RESUMO

A organização espacial das populações vegetais influencia a conectividade potencial entre indivíduos e pode afetar os processos reprodutivos e a manutenção da diversidade genética. Neste estudo foi proposta uma abordagem inferencial para avaliar a conectividade espacial potencial em três populações naturais de *Pterodon pubescens* (Fabaceae), localizadas em Lagoa Santa (POP-GO), Selvíria (POP-MS) e Aparecida d'Oeste (POP-SP). A análise baseou-se nas coordenadas geográficas de 134 indivíduos georreferenciados, utilizadas para calcular as matrizes de distância euclidiana e o Índice Inferencial de Conectividade Espacial (Ind_C), um indicador derivado exclusivamente da estrutura espacial das populações. Foram comparadas as distribuições das distâncias entre indivíduos, os valores do índice e sua variabilidade entre as três áreas, por meio de estatística descritiva e de testes não paramétricos. Observou-se um gradiente consistente de conectividade espacial potencial, com maiores valores médios do (Ind_C) na POP-GO (47,78), valores intermediários na POP-MS (12,95) e os menores na POP-SP (1,13), o que reflete o aumento progressivo do espaçamento entre indivíduos. As diferenças entre as populações foram estatisticamente significativas e acompanharam a estrutura espacial observada. Verificou-se utilizando o Ind_C como uma medida de distância entre populações que as maiores distâncias estão entre a POP-GO x POP-MS (0,16), POP-GO x POP-SP (0,15) e a menor entre a POP-MS e a POP-SP (0,05) em função de histórico de perturbação destas populações. Os resultados indicam que populações mais agregadas apresentam maior potencial inferencial de conectividade, enquanto populações mais dispersas exibem maior isolamento espacial relativo. Embora o Ind_C não represente uma medida direta de migração, dispersão de pólen ou fluxo gênico efetivo, a abordagem fornece uma métrica padronizada para comparar populações sob diferentes configurações espaciais e constitui uma ferramenta útil para subsidiar estudos ecológicos, o planejamento de conservação e a definição de prioridades de manejo em paisagens fragmentadas.

Palavras-chave: *Pterodon pubescens*; conectividade espacial; isolamento por distância; conservação genética.

ABSTRACT

The spatial organization of plant populations influences the potential connectivity between individuals and can affect reproductive processes as well as the maintenance of genetic diversity. In this study, an inferential approach was proposed to evaluate potential spatial connectivity in three natural populations of *Pterodon pubescens* (Fabaceae), located in Lagoa Santa (POP-GO), Selvíria (POP-MS), and Aparecida d'Oeste (POP-SP). The analysis was based on the geographic coordinates of 134 georeferenced individuals, which were used to calculate Euclidean distance matrices and the Inferential Gene Flow Index (Ind_C)—an indicator derived exclusively from the spatial structure of the populations. The distributions of distances between individuals, index values, and their variability among the three areas were compared using descriptive statistics and non-parametric tests. A consistent gradient of potential spatial connectivity was observed, with higher mean Ind_C values in POP-GO (47.78), intermediate values in POP-MS (12.95), and lower values in POP-SP (1.13), reflecting a progressive increase in spacing between individuals. Differences among populations were statistically significant and aligned with the observed spatial structure. Using the Ind_C as a distance measure between populations, the largest distances were found between POP-GO $\times$ POP-MS (0.16) and POP-GO $\times$ POP-SP (0.15), with the smallest distance between POP-MS and POP-SP (0.05), as a result of the disturbance history of these populations. The results indicate that more aggregated populations exhibit higher inferential connectivity potential, whereas more dispersed populations show greater relative spatial isolation. Although the Ind_C does not represent a direct measure of migration, pollen dispersal, or effective gene flow, this approach provides a standardized metric for comparing populations under different spatial configurations and constitutes a useful tool to support ecological studies, conservation planning, and the definition of management priorities in fragmented landscapes.

Keywords: *Pterodon pubescens*; spatial connectivity; isolation by distance; genetic conservation.

2.1 – INTRODUÇÃO

A manutenção da diversidade genética em populações naturais depende da interação entre processos ecológicos e evolutivos que determinam o movimento gênico na paisagem. Entre esses processos, a dispersão de sementes e o transporte de pólen desempenham um papel fundamental na conectividade entre indivíduos, influenciando a estrutura genética das populações, o recrutamento de novos indivíduos e a capacidade adaptativa frente às mudanças ambientais. A intensidade desse intercâmbio gênico está diretamente relacionada à organização espacial das populações e às limitações impostas pela distância entre indivíduos, princípio consolidado pela teoria do isolamento por distância (Isolation by Distance – IBD) (Wright, 1943). A premissa é direta: a probabilidade de troca gênica diminui à medida que a separação espacial entre organismos aumenta. Entretanto, em cenários de fragmentação antropogênica, essa correlação espacial é frequentemente agravada pela escassez de polinizadores, que limita a transferência eficaz de pólen a distâncias menores do que as observadas em fragmentos contínuos (Kwak; Velterop; Andel, 1998). Adicionalmente, a fragmentação do habitat pode desestabilizar os sistemas reprodutivos, reduzindo o tamanho efetivo das populações e aumentando os riscos de isolamento genético e de erosão alélica (Bittencourt; Sebbenn, 2007).

Em espécies arbóreas tropicais, a ligação genética resulta da interação de dois processos distintos: dispersão de sementes, que rege o estabelecimento espacial, e fluxo polínico, que medeia o intercâmbio de gametas entre reprodutores (Hamrick; Murawski; Nason, 1993). Esses processos moldam a distribuição espacial dos genótipos e influenciam a dinâmica evolutiva das populações ao longo do tempo (Savolainen; Pyhäjärvi; Knürr, 2007). No entanto, a fragmentação do habitat pode desestruturar esses processos ao alterar o comportamento dos vetores bióticos, reduzir a densidade de recursos alimentares e aumentar a distância entre indivíduos reprodutivos (Moraes et al., 2018).

Pterodon pubescens é uma espécie arbórea característica do Cerrado brasileiro, amplamente distribuída em formações savânicas e reconhecida por sua importância ecológica, econômica e farmacológica. Seus frutos são criptossâmaras secas e indeiscentes, providos de expansões aladas que favorecem a dispersão pelo vento, o que caracteriza a síndrome anemocórica predominante no gênero *Pterodon* (Pinto; Francisco; Mansano, 2014). Essa adaptação morfológica sugere potencial de dispersão aérea dos diásporos, o que contribui para o estabelecimento de novos indivíduos na paisagem. Todavia, a despeito da morfologia diaspórica

especializada, não há quantificações diretas da distância de dispersão em *Pterodon pubescens*. Não existem experimentos que utilizem armadilhas de sementes, medições aerodinâmicas ou análises genéticas de maternidade; consequentemente, o *kernel* de dispersão permanece indeterminado em condições naturais. Estudos sobre espécies arbóreas do Cerrado e de outras florestas neotropicais indicam que a maioria das sementes é dispersa nas proximidades da planta-mãe, geralmente dentro de algumas dezenas de metros $\approx 20\text{--}100$ m, enquanto eventos ocasionais de dispersão de longa distância (>100 m) ocorrem com menor frequência e raramente excedem algumas centenas de metros, dependendo da espécie e do agente dispersor (Howe; Smallwood, 1982; Nathan; Muller-Landau, 2000; SchupP; Jordano; Gómez, 2010; Peres; 2016). Esta lacuna de conhecimento é particularmente preocupante, dado que a fragmentação do habitat pode impor barreiras, comprometendo o fluxo gênico a distâncias que excedem a capacidade de dispersão primária (Manoel et al., 2021). Consequentemente, o isolamento genético imposto pela descontinuidade da paisagem favorece o aumento dos níveis de endogamia e da deriva genética, comprometendo a viabilidade evolutiva das populações a longo prazo (White; Boshier; Powell, 2002).

O fluxo gênico mediado por polinizadores modula a estrutura populacional. No entanto, além da dispersão de sementes, o transporte de pólen constitui um componente essencial da conexão genética em populações naturais.

Diversas espécies de abelhas são consideradas potenciais polinizadoras de *Pterodon pubescens*, apresentando amplitudes de forrageamento que variam desde algumas centenas de metros até vários quilômetros; com base em modelos alométricos, abelhas sem ferrão, como *Tetragonisca angustulae* e *Paratrigona lineata*, apresentam deslocamentos típicos estimados entre 0,3 e 0,8 km, enquanto espécies maiores, como *Apis mellifera*, *Trigona spinipes*, *Centris* spp. e *Scaptotrigona postica*, podem percorrer distâncias estimadas entre aproximadamente 1 e 3 km, com registros ainda maiores para *Apis mellifera* (Greenleaf et al., 2007). Entretanto, para diversas espécies neotropicais esses valores constituem estimativas indiretas baseadas em relações alométricas ou no porte corporal, devendo ser interpretados como referências ecológicas e não como medidas específicas para *Pterodon pubescens*. Nesse contexto, estudos comparativos entre espécies congêneras, como *P. emarginatus*, têm demonstrado que a ação de polinizadores eficientes, como as abelhas do gênero *Bombus*, pode promover níveis significativos de fluxo gênico, mitigando substancialmente os efeitos deletérios da deriva genética (Pinto, 2017).

A ausência de estimativas diretas tanto da dispersão de sementes quanto do transporte efetivo de pólen dificulta a quantificação do fluxo gênico em populações naturais da espécie. Estudos baseados em marcadores moleculares representam a abordagem mais robusta para estimar migração, parentesco e conectividade genética; entretanto, demandam elevado investimento financeiro e infraestrutura laboratorial especializada. Dados empíricos permanecem escassos. Em contraste, abordagens espaciais baseadas na distribuição dos indivíduos constituem ferramentas úteis para inferir padrões potenciais de conexão, especialmente em estudos ecológicos e de planejamento para conservação. Dessa forma, a incorporação de medidas de fluxo gênico pode elucidar como o comportamento dos polinizadores, frequentemente negligenciado nas estimativas alométricas, contribui para a conectividade genética das populações (Castilla et al., 2017).

O Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) foi desenvolvido como uma medida de conectividade espacial potencial, baseada exclusivamente na posição relativa dos indivíduos na paisagem. O cálculo baseia-se na distância média entre indivíduos. Árvores próximas maximizam o potencial de intercâmbio gênico; contudo, o isolamento restringe severamente esse fluxo. Ao incorporar parâmetros de distância média de dispersão de pólen e sementes específicos para o grupo taxonômico, esse modelo reflete como a agregação espacial modula a probabilidade de fertilização cruzada (Loveless; Hamrick, 1984). Assim, o Ind_C não estima diretamente migração, fluxo de pólen, dispersão de sementes ou parentesco genético, mas sintetiza uma condição espacial compatível com os pressupostos da teoria do isolamento por distância e fornece uma métrica padronizada para comparar populações submetidas a diferentes níveis de agregação espacial. Nesse contexto, *Pterodon pubescens* constitui um modelo particularmente interessante para investigações sobre dinâmica espacial do fluxo gênico em ambientes savânicos. Espécie arbórea característica do Cerrado, apresenta distribuição naturalmente descontínua, ocorrendo em populações submetidas a diferentes condições ambientais e graus de isolamento espacial (Saul, 2023; Lima et al., 2023). Sua fenologia reprodutiva é mediada por polinização entomófila; em contrapartida, seus diásporos alados (sâmaras) favorecem a dispersão anemocórica em escala local (Carvalho, 2014). Como consequência, a conectividade genética entre indivíduos depende da interação entre a disposição espacial das árvores, a movimentação dos polinizadores e a capacidade de dispersão das sementes, fatores que tornam a espécie particularmente sensível à estrutura espacial das populações. Essas características ecológicas aproximam *Pterodon pubescens* das premissas teóricas dos modelos de isolamento por distância e de limitação de pólen, nos quais alterações na disponibilidade de

pólen modificam o sucesso reprodutivo e, conseqüentemente, a distribuição espacial dos eventos de fecundação. Portanto, a análise da estrutura populacional de *Pterodon pubescens* sob a ótica da ecologia da paisagem torna-se indispensável para compreender como a configuração do hábitat rege a resiliência das populações diante dos atuais cenários de mudança no uso do ambiente.

Diante das dificuldades de estimar diretamente o fluxo gênico de *Pterodon pubescens*, este estudo investiga se a organização espacial dos indivíduos pode servir de base para um indicador padronizado de conexão espacial potencial. Assim, propõe-se o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), concebido como uma métrica espacial comparativa destinada a inferir diferenças relativas de ligação potencial entre populações naturais, sem substituir estimativas obtidas por marcadores moleculares. A inferência fundamenta-se na integração entre a estrutura espacial dos indivíduos, indicadores indiretos de conexão e os modelos teóricos desenvolvidos por Slatkin (1985, 1987, 1993), Olivieri et al. (1994), Nielsen e Slatkin (2000), reconhecendo que os resultados representam hipóteses ecológico-genéticas sobre a intensidade relativa do fluxo gênico potencial, e não estimativas diretas de migração ou parentesco. A análise é estritamente inferencial. Especificamente, buscou-se descrever a estrutura espacial das populações, calcular o Índice de conectividade utilizando uma formulação matemática única para todas as áreas de estudo, comparar os padrões espaciais observados entre as populações e discutir as implicações ecológicas desses padrões para a conservação e o manejo de populações naturais da espécie. Desta forma busca-se compreender de que maneira a fragmentação da vegetação, ao modificar a organização espacial dos indivíduos, pode influenciar a interligação espacial potencial entre as populações de *Pterodon pubescens*.

2.2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 - Área de estudo e delineamento amostral

O trabalho foi conduzido utilizando três populações naturais de *Pterodon pubescens* distribuídas em diferentes regiões do Cerrado brasileiro: Lagoa Santa-GO (POP-GO), Selvíria-MS (POP-MS), e Aparecida d'Oeste-SP (POP-SP). As populações representam diferentes contextos de organização espacial da espécie, permitindo comparar potenciais padrões de li-

gação entre indivíduos distribuídos em áreas com configurações paisagísticas distintas. Foram amostrados 54 indivíduos em Lagoa Santa (GO), 40 em Selvíria (MS) e 40 em Aparecida d'Oeste (SP), totalizando 134 árvores georreferenciadas. Para cada indivíduo foram registradas as coordenadas planas (UTM – Leste e Norte), utilizadas para calcular as distâncias euclidianas entre todos os pares de árvores e caracterizar a estrutura espacial de cada população. Adicionalmente, a análise dessa disposição espacial permite quantificar o índice de agregação e a densidade de indivíduos, variáveis fundamentais para a avaliação de processos de isolamento por distância e de estruturação genética da espécie (Soares et al., 2008; Oddou-Muratorio et al., 2010).

A arquitetura espacial dos espécimes arbóreos constituiu a base para todas as inferências realizadas neste estudo, postulando-se que a distância entre árvores representa um dos principais fatores que condicionam a probabilidade de dispersão de pólen; consequentemente, a conectividade genética potencial entre indivíduos. Para além da localização geográfica, a caracterização das áreas de coleta considerou variações edáficas na matriz de uso do solo; estas, por sua vez, influenciam diretamente a cinética de movimentação dos agentes polinizadores (dispersão zoocórica e anemocórica) (Cruzan; Hendrickson, 2020).

2.2.2 - Estrutura dos dados espaciais

As coordenadas geográficas foram organizadas em matrizes de distância independentes para cada população, nas quais cada elemento corresponde à distância euclidiana entre dois indivíduos amostrados. A partir dessas matrizes, foram obtidos os seguintes descritores espaciais: número de indivíduos amostrados (n); distância mínima entre pares de indivíduos; distância média; distância máxima; desvio padrão das distâncias; coeficiente de variação das distâncias; distribuição de frequência das distâncias em classes e Índice de Conectividade Espacial (Ind_C). Os valores calculados encontram-se na Tabela O do Apêndice.

Esses parâmetros, portanto, permitiram a caracterização quantitativa da estrutura espacial das populações; além disso, forneceram a base empírica para a comparação entre as três áreas geográficas estudadas.

2.2.3 - Construção do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)

Para sintetizar a organização espacial dos “genótipos” arbóreos em um único parâmetro comparativo, empregou-se o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), um indicador indireto da conectividade genética potencial. Contudo, diferentemente das estimativas obtidas via marcadores moleculares, o Ind_C não constitui uma medida direta de migração, de parentesco, ou da taxa contemporânea de fluxo gênico; ele é, antes, um índice derivado da arquitetura espacial da população, cuja aplicação visa inferir o potencial relativo de intercâmbio gênico entre espécimes distribuídos na paisagem.

A construção do Ind_C, por conseguinte, ancorou-se na integração das informações espaciais derivadas das coordenadas geográficas de cada espécime arbóreo amostrado. Inicialmente, determinaram-se as distâncias euclidianas entre todos os pares de genótipos de cada população; esse processo resultou em matrizes de distância independentes para as localidades de Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP). Consequentemente, essas matrizes não só constituíram a base para o cálculo do Ind_C, mas também para a comparação da ligação potencial entre as populações. O Ind_C de cada indivíduo é calculado com base na sua disposição espacial em relação aos demais membros da população. Esta métrica sintetiza o padrão de proximidade em um único valor quantitativo. Assim, indivíduos espacialmente inseridos em regiões com maior potencial de interação apresentaram valores mais elevados do índice, enquanto indivíduos relativamente isolados apresentaram valores inferiores. Dessa forma, o Ind_C expressa uma medida relativa da conexão espacial potencial, permitindo comparar indivíduos dentro de uma mesma população e avaliar diferenças entre populações submetidas a distintas configurações espaciais.

Após o cálculo individual, os valores do Ind_C foram organizados em nível populacional e foram obtidas estatísticas descritivas para cada área de estudo, incluindo média, desvio padrão, amplitude e coeficiente de variação. Essas estatísticas permitiram avaliar simultaneamente a intensidade média da conectividade potencial e sua heterogeneidade espacial entre os indivíduos. A interpretação do índice seguiu um critério comparativo, no qual valores relativamente elevados de Ind_C foram considerados indicativos de maior ligação espacial potencial entre indivíduos, enquanto valores reduzidos sugeriram menor probabilidade relativa de intercâmbio gênico decorrente do aumento das distâncias entre árvores. Ressalta-se, entretanto, que o índice não constitui uma estimativa direta de migração ou dispersão de pólen, de-

vendo ser interpretado como um descritor espacial compatível com diferentes cenários de comunicação previstos pela teoria do fluxo gênico.

Essa abordagem fundamenta-se nos modelos de estrutura espacial de populações propostos por Slatkin (que analisam as diferenças genéticas em função da dispersão) e integra modelos de inferência indireta baseados em padrões espaciais para avaliar processos demográficos e reprodutivos (Slatkin, 1987). Dessa forma, o Ind_C deve ser interpretado como um indicador inferencial de conexão espacial potencial. Sua finalidade é sintetizar, em uma única métrica, as diferenças na organização espacial entre populações, permitindo gerar hipóteses ecológico-genéticas que poderão ser posteriormente avaliadas por meio de abordagens independentes, como marcadores moleculares, análises de paternidade ou estudos de dispersão de pólen e sementes.

2.2.4 - Justificativa ecológica do parâmetro de referência de 500 m

O cálculo do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) utilizou uma distância potencial de dispersão (D_{disp}) fixada em 500 m para todas as populações analisadas. Esse valor não constitui uma estimativa direta do fluxo gênico efetivo, da dispersão de diásporos ou do transporte de pólen em *Pterodon pubescens*; trata-se, portanto, de um parâmetro de referência padronizado para viabilizar a comparação entre populações submetidas a diferentes configurações espaciais. A escolha desse valor fundamenta-se nas evidências ecológicas atualmente disponíveis sobre a espécie e seus potenciais polinizadores. Embora *Pterodon pubescens* produza frutos do tipo criptossâmara adaptados à dispersão anemocórica (Pinto; Francisco; Mansano, 2014), ainda não há estudos que tenham quantificado diretamente as distâncias de dispersão de seus diásporos. Não existem experimentos de campo, modelagens mecânicas ou análises genéticas específicas capazes de quantificar o fluxo de dispersão da espécie.

De forma semelhante, não há estimativas específicas da distância de transporte de pólen para *Pterodon pubescens*. Entretanto, estudos compilados para seus principais grupos de polinizadores indicam que diversas abelhas nativas apresentam amplitudes máximas de voo entre 621 e 951 m, incluindo *Tetragonisca angustula* (Araújo et al., 2004). Outras espécies de maior porte, como *Centris* spp., *Scaptotrigona postica*, *Trigona spinipes* e *Apis mellifera*, podem deslocar-se por distâncias entre 1 e 3 km, atingindo valores ainda superiores em condi-

ções favoráveis. Contudo, essas estimativas foram obtidas predominantemente por meio de relações alométricas ou de inferências para gêneros correlatos; portanto, devem ser interpretadas como referências ecológicas, e não como medidas diretas para *Pterodon pubescens*.

Dessa forma, o valor de 500 m foi adotado por representar uma escala espacial intermediária compatível com o intervalo de deslocamento relatado para diversos polinizadores potenciais da espécie, constituindo um parâmetro ecologicamente plausível para padronizar a comparação entre populações (Kwak; Velterop; Andel, 1998). A utilização de um único valor para todas as áreas evita que diferenças metodológicas influenciem os resultados do índice; isso permite que as variações observadas reflitam exclusivamente a organização espacial dos indivíduos. Assim, o parâmetro deve ser interpretado como uma escala de referência ecológica, empregada para normalizar o cálculo do Ind_C, e não como uma estimativa da distância efetiva de dispersão de pólen, da distância de voo dos polinizadores ou da magnitude real do fluxo gênico. A interpretação biológica do índice permanece, portanto, inferencial e fundamentada na hipótese de que a proximidade espacial aumenta o potencial de intercâmbio gênico entre indivíduos reprodutivos.

2.2.5 - Formulação matemática do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)

O Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) foi definido por uma única formulação baseada na distância média entre cada árvore e os demais indivíduos da população.

Expressões:

1- Distância euclidiana;

$$d_{ij} = \sqrt{(E_i - E_j)^2 + (N_i - N_j)^2}$$

2- Distância média;

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij}}{n-1}$$

3- Índice de Conectividade Espacial;

$$Ind_{Ci} = \frac{A_{ti} \times D_{disp}}{d_i}$$

4- Parâmetros adotados;

$$A_{lit} = 14 \text{ árvores } ha^{-1}; D_{disp} = 500 \text{ m}$$

5- Produto das constantes;

$$A_{lit} \times D_{disp} = 14 \times 500 = 7000$$

6- Forma operacional;

$$Ind_{Ci} = \frac{7000}{d_i}$$

Onde:

- d_{ij} : distância euclidiana entre as árvores i e j (m);
- E_i, E_j : coordenadas UTM Easting (m);

- N_i, N_j : coordenadas UTM Northing (m);
- d_i : distância média da árvore i para todas as demais (m);
- n : número total de indivíduos da população.
- A_{lit} : densidade arbórea de referência de 14 árvores ha^{-1} , (Mascaro; Teixeira; Gilbert, 2004).
- D_{disp} : distância potencial de dispersão (500 m).
- 7000: produto $A_{lit} \times D_{disp}$.
- Ind_C : índice inferencial de conectividade espacial potencial da árvore i .

Valores elevados do Ind_C indicam menor distância interindividual e maior ligação espacial; inversamente, valores reduzidos indicam isolamento espacial. Destaca-se que o índice permanece inferencial: ele não mensura diretamente fluxo gênico, migração, ou taxas de parentesco.

2.2.6 - Inferência da dinâmica espacial do fluxo gênico

A interpretação dos padrões observados apoia-se na premissa de que a configuração espacial dos indivíduos modula a probabilidade de dispersão polínica e a intensidade do fluxo gênico. Inicialmente, caracterizou-se a distribuição interindividual de cada população; subsequentemente, compararam-se tais métricas ao Ind_C e ao coeficiente de variação, o que permitiu quantificar a conectividade potencial. Todavia, esta abordagem não visa estimar taxas contemporâneas de migração, mas sim inferir padrões espaciais compatíveis com níveis distintos de conexão genética, dado que populações espacialmente agregadas exibem, presumivelmente, maior probabilidade de intercâmbio de gametas do que populações dispersas.

2.2.7 - Fundamentação teórica das inferências

A interpretação “ecológica-genética” dos resultados fundamentou-se em quatro modelos clássicos da genética de populações. O primeiro corresponde ao modelo de isolamento por distância (Wright, 1943), segundo o qual a probabilidade de intercâmbio gênico diminui progressivamente à medida que aumenta a distância geográfica entre indivíduos, o que produz gradientes espaciais de diferenciação genética. Esse conceito orientou a interpretação das distribuições de distância observadas nas três populações. O segundo modelo é a dispersão polínica: o principal mecanismo de ligação em espécies arbóreas neotropicais (Ward et al., 2005). Alterações na disposição espacial das árvores podem modificar a frequência de cruzamentos efetivos e, conseqüentemente, a conexão potencial entre indivíduos.

O terceiro fundamento corresponde ao conceito de fluxo gênico como força homogeneizadora da variabilidade genética entre populações (Slatkin, 1987). Nesse contexto, o Ind_C serviu como indicador comparativo da intensidade de interconexão; tal métrica constitui uma inferência baseada na estrutura espacial, não uma medida direta de migração.

Não obstante, as interpretações foram discutidas à luz da máxima verossimilhança (Nielsen; Slatkin, 2000). Nela, cenários de conexão são avaliados por meio da comparação entre padrões observados e expectativas populacionais teóricas. No presente estudo, essa abordagem foi empregada em nível conceitual para sustentar a inferência “ecológico-genética” dos padrões espaciais, sem a estimativa direta de parâmetros de migração.

2.2.8 - Variação entre e dentro de populações

A partir das inferências para o índice de fluxo gênico (Ind_C) em cada população de *Pterodon pubescens*, foi estimada a variação entre e dentro das populações, tomando-se por base a Distância Genética de Nei (1972), utilizando-se no lugar das frequências alélicas o Ind_C de cada uma das árvores matrizes nas suas respectivas populações:

$$D = -\ln I \quad I = \frac{J_{AB}}{\sqrt{J_A \cdot J_B}}$$

em que: D : distância ou variação entre populações, tomadas duas a duas; $\ln$: logaritmo neperiano; I : identidade ou variação dentro de uma população.

$$J_A = \sum p_{iA}^2 \quad J_B = \sum p_{iB}^2 \quad J_{AB} = \sum p_{iA} p_{iB}$$

em que: J_A : probabilidade (p) de escolha idêntica na população A; J_B : probabilidade (p) de escolha idêntica na população B; J_{AB} : probabilidade (p) de escolhas idênticas nas populações A e B.

2.2.9 - Desenvolvimento de um protótipo de programa de computação de fluxo gênico-Índice de Conectividade Espacial (Ind_C).

A equipe do Laboratório de Genética de Populações, Evolução e Silvicultura (LGPS) do Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Socioeconomia (DFTASE), da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP) desenvolveu um protótipo de um programa de computação denominado *Spatial Analysis and Gene Flow* (Figura 10), cuja finalidade principal é, a partir das coordenadas e altitudes de localização das árvores matrizes de uma população utilizada nos estudos, fazer inferências sobre o fluxo gênico entre e dentro de populações. Dessa forma, para se realizar as análises utilizando o programa é necessário:

1. informar os valores em UTM (*Universal Transverse Mercator*) de latitude e longitude das árvores matrizes e opcionalmente de altitude, utilizando uma planilha do Excel;
2. Distância de dispersão de pólen (m);
3. Número de árvores por hectare da espécie em estudo;
4. Distância de dispersão de sementes (m)

Obs.: Os itens 2, 3 e 4 podem ser obtidos na literatura ou diretamente na população.

A partir destas informações, o programa fornece, como primeira opção, o mapa de localização, as distâncias e a área da população; a estimativa do fluxo gênico, se estiver avaliando apenas uma população; e a comparação do fluxo gênico entre e dentro de populações, no caso de várias populações estarem sendo avaliadas.

Figura 10 - Tela inicial do programa *Spatial Analysis and Gene Flow*.

Fonte: Arquivo do autor.

2.3. - RESULTADOS

2.3.1 - Caracterização geral das populações

Três populações naturais de *Pterodon pubescens* foram avaliadas. No total, foram amostrados 134 indivíduos arbóreos reprodutivos, sendo 54 em Lagoa Santa e 40 em cada uma das populações de Selvíria e de Aparecida d'Oeste (Tabela 2). Todos os indivíduos foram georreferenciados em campo utilizando coordenadas UTM (Sirgas 2000), o que permitiu determinar as distâncias euclidianas entre todos os pares de árvores de cada população. Essas

informações serviram de base para a caracterização da estrutura espacial das populações e para o cálculo do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), utilizando a mesma metodologia em todas as três áreas de estudo.

Tabela 2: Caracterização das populações naturais de *Pterodon pubescens* utilizadas nas análises espaciais e no cálculo do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C).

População	Estado	n	Área amostrada (ha)	Amplitude espacial ¹ (m)	Distância média ² (m)	Ind_C médio	Densidade de referência (árvores ha ⁻¹)	Distância de referência (m)
Lagoa Santa	GO	54	11,42	446,89	155,62	47,779	14	500
Selvíria	MS	40	66,75	1.391,08	556,34	12,923	14	500
Aparecida d'Oeste	SP	40	4.714,54	17.193,66	6.531,19	1,127	14	500

Notas. n, número de indivíduos amostrados. ¹ Amplitude espacial: maior distância euclidiana observada entre dois indivíduos de uma mesma população. ² Distância média: média das distâncias euclidianas entre cada indivíduo e todos os demais indivíduos da população, utilizada como variável de entrada no cálculo do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C).

Adotou-se uma densidade arbórea de referência de 14 árvores ha⁻¹ (Mascaro; Teixeira; GILBERT, 2004) e uma distância potencial de referência de 500 m; esses parâmetros foram aplicados uniformemente para padronizar as comparações entre as populações. Conforme discutido na metodologia, esse valor representa uma escala ecológica de referência compatível com o intervalo de deslocamento reportado para polinizadores de leguminosas papilionóides neotropicais (Ward et al., 2005), não correspondendo a uma estimativa direta da distância efetiva de dispersão de sementes ou de fluxo gênico. Considerando que o objetivo do estudo é comparar o potencial de conectividade espacial entre populações, as diferenças observadas na disposição dos indivíduos constituem a base das inferências apresentadas nas seções seguintes. Assim, o Ind_C deve ser interpretado como uma síntese quantitativa dessa organização espacial.

A área amostrada é delimitada pelas coordenadas georreferenciadas dos indivíduos. A definição espacial é a premissa fundamental para a análise das populações. As diferenças observadas entre as populações refletem o delineamento amostral e a distribuição espacial dos indivíduos em cada área de estudo. A padronização dos parâmetros empregados no cálculo do Índice de Conectividade Espacial permitiu atribuir as diferenças observadas nas seções subse-

quentes exclusivamente às características da distribuição espacial dos indivíduos em cada população, mantendo constante a metodologia aplicada em todas as áreas.

2.3.2 - Estrutura espacial das populações

A estrutura espacial das populações naturais de *Pterodon pubescens* foi avaliada com base nas distâncias euclidianas entre todos os pares de indivíduos georreferenciados. Essa abordagem permitiu caracterizar o grau de agregação ou de dispersão espacial em cada população e fornecer uma base objetiva para a interpretação dos padrões de conexão que serão discutidos posteriormente por meio do índice de Conectividade Espacial (Ind_C). As estatísticas descritivas revelaram diferenças significativas entre as populações (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das distâncias euclidianas entre indivíduos das populações naturais de *Pterodon pubescens*.

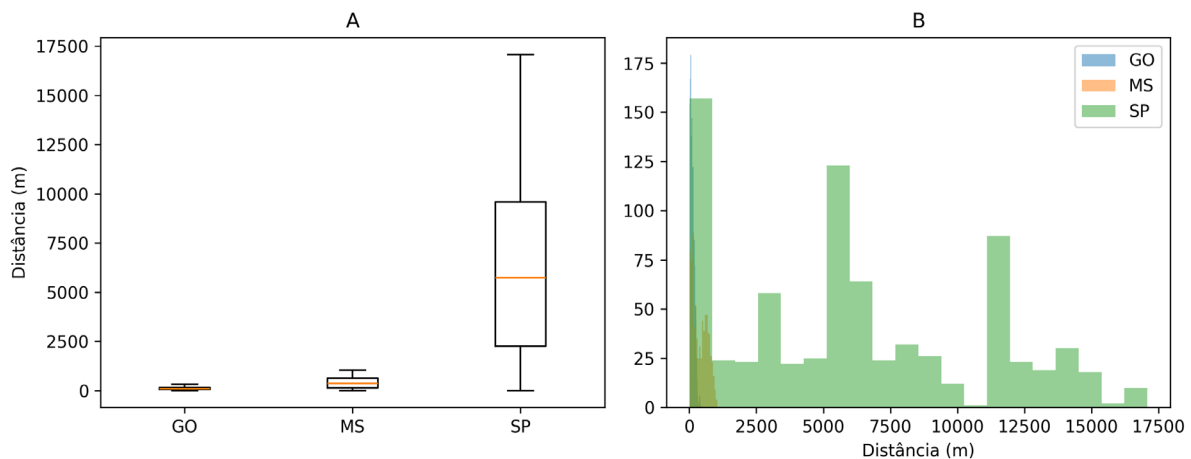
População	n	Mín.	Q1	Mediana	Média	Q3	Máx.	DP	CV (%)
Lagoa Santa (GO)	54	1,01	49,86	100,12	114,16	162,75	441,07	79,46	69,60
Selvíria (MS)	40	2,83	130,09	358,67	393,50	635,98	1042,88	280,08	71,18
Aparecida d'Oeste (SP)	40	1,05	2255,26	5735,68	6164,69	9584,76	17084,27	4631	75,12

A população de Lagoa Santa (GO) apresentou as menores distâncias euclidianas, indicando alta proximidade espacial; em contrapartida, a população de Aparecida d'Oeste (SP) exibiu uma ocupação espacial ampla, refletindo um padrão edáfico específico. A dispersão das distâncias variou entre as áreas. O coeficiente de variação evidencia a heterogeneidade da distribuição espacial dos indivíduos, indicando que populações mais extensas tendem a apresentar maior variabilidade nas distâncias entre as árvores. A análise destes resultados pode sugerir que a configuração espacial difere substancialmente entre as populações estudadas, aspecto que influencia diretamente o potencial de interligação ecológica.

A população de Lagoa Santa - GO concentra indivíduos em menores intervalos de distância, enquanto Selvíria – MS apresenta condição intermediária e Aparecida d'Oeste - SP

exibe ampla distribuição espacial (Figura 11). Esse padrão corrobora as diferenças observadas entre os indivíduos das populações e evidencia um gradiente crescente de dispersão espacial entre elas (Tabela 3). Essas diferenças estruturais constituem a base para a interpretação do Ind_C apresentada no item seguinte, uma vez que o espaçamento entre indivíduos influencia a conectividade potencial (Scheepens et al., 2012).

Figura 11 – A) *Boxplots* das distâncias euclidianas entre indivíduos nas três populações de *Pterodon pubescens*. B) Histogramas comparativos das distribuições de distâncias.



Fonte: Dados do autor.

2.3.3 - Distribuição do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C)

O Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) apresentou distribuições claramente distintas entre as três populações naturais de *Pterodon pubescens*. O índice foi interpretado como uma medida relativa de conectividade espacial: valores mais elevados correspondem a indivíduos inseridos em arranjos espacialmente mais próximos, enquanto valores mais baixos indicam maior isolamento dentro da população. Assim, a maior média foi registrada em Lagoa Santa – GO (47,779), seguida de Selvíria – MS (12,955) e, por fim, de Aparecida d'Oeste – SP (1,127) (Tabela 4). Desse modo, o valor médio observado em GO foi aproximadamente 3,69 vezes superior ao de MS e 42,40 vezes superior ao de SP. A população de MS, por sua vez, apresentou média cerca de 11,50 vezes maior do que a de SP. Esse gradiente acompanha

a redução da proximidade espacial descrita no item 3.3.2 e evidencia forte diferenciação na magnitude do índice entre as áreas estudadas.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas populações de *Pterodon pubescens*.

População	n	Média	Mediana	Q1	Q3	DP	CV(%)	Mín.	Máx.
Lagoa Santa (GO)	54	47,779	48,585	39,936	57,383	10,952	22,92	24,717	63,704
Selvíria (MS)	40	12,955	12,969	11,762	14,211	1,917	14,80	8,167	16,577
Aparecida d'Oeste (SP)	40	1,127	1,258	0,885	1,320	0,234	20,79	0,694	1,382

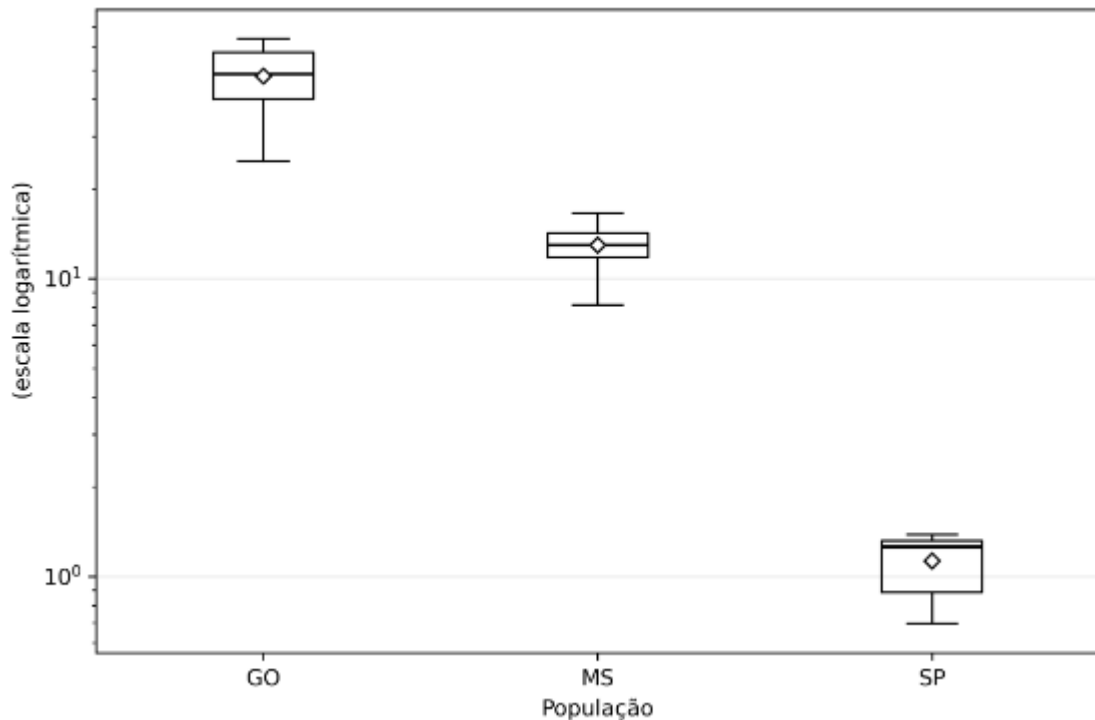
Nota: Q1 e Q3 correspondem ao primeiro e ao terceiro quartis; DP = desvio-padrão; CV = coeficiente de variação.

A distribuição dos valores individuais confirmou a segregação entre as populações; em Lagoa Santa (GO), o Ind_C variou de 24,717 a 63,704 (mediana 48,585). Todavia, em Selvíria (MS), os valores oscilaram entre 8,167 e 16,577 (mediana 12,969). Em Aparecida d'Oeste - SP, a amplitude foi de 0,694 a 1,382, com mediana de 1,258. Não houve sobreposição entre as amplitudes observadas: o maior valor de SP permaneceu abaixo do menor valor de MS, e o maior valor de MS foi inferior ao menor valor de GO.

O *boxplot* (Figura 12) utiliza escala logarítmica para permitir a visualização simultânea de ordens de grandeza distintas. Contudo, a posição das medianas e dos intervalos interquartis indica que a diferença populacional não decorre apenas de valores extremos, mas também de um deslocamento sistêmico da distribuição. A POP-GO manteve os valores mais altos ao longo de toda a amplitude amostral; POP-MS ocupou posição intermediária; e a POP-SP concentrou-se próxima de uma unidade do índice.

Não obstante, a variabilidade relativa permaneceu moderada; o coeficiente de variação (CV) foi de 22,92% em GO, 20,79% em SP e 14,84% em MS. A menor dispersão relativa em Selvíria - MS indica uma distribuição mais homogênea do índice entre os indivíduos, enquanto Lagoa Santa - GO apresentou maior heterogeneidade interna. Ainda assim, os valores de GO permaneceram integralmente superiores aos das demais populações, revelando que a variação intrapopulacional foi menor do que a diferenciação entre as populações.

Figura 12 - Distribuição do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas populações de *Pterodon pubescens* das procedências de Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP) .



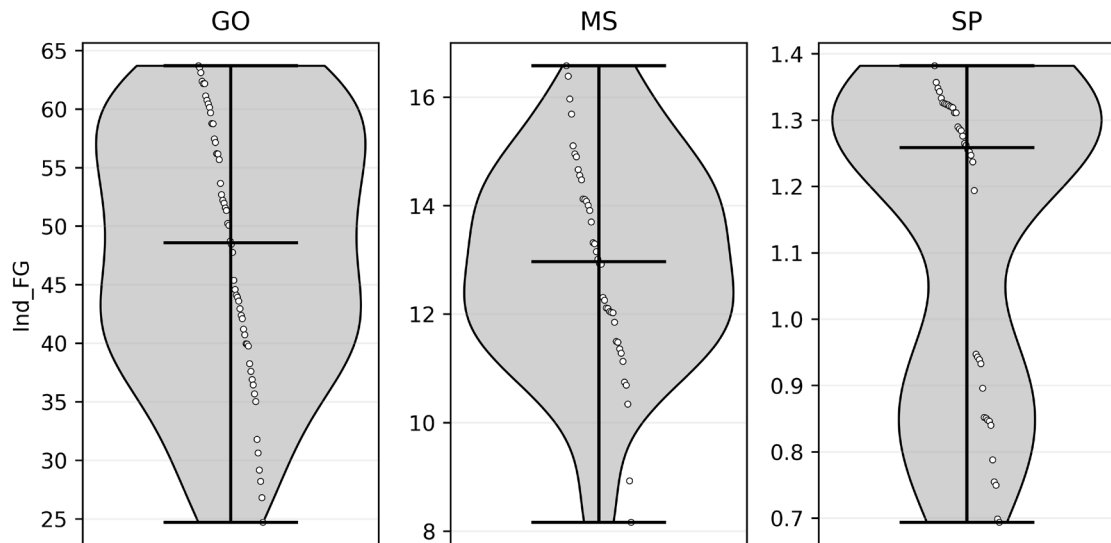
Notas: A escala logarítmica foi utilizada para representar adequadamente as diferenças de magnitude. Losangos indicam as médias e as linhas internas indicam as medianas. Fonte: Dados do autor.

Os gráficos de violino reforçam esse padrão ao evidenciar a forma das distribuições em suas escalas originais (Figura 13). Na POP-GO, os valores se distribuíram em um intervalo amplo, com concentração central próxima de 48. No que se refere a POP-MS, a distribuição foi mais estreita e relativamente simétrica em torno de 13,0. Para a POP-SP, observa-se uma concentração entre 0,8 e 1,35, com maior densidade na porção superior desse intervalo. A ausência de valores intermediários entre as populações indica um gradiente espacial bem definido.

Os resultados demonstram que o Ind_C sintetizou as diferenças observadas na configuração espacial das populações. A população de Lagoa Santa - GO apresentou o maior potencial inferencial de conexão espacial, Selvíria – MS ocupou condição intermediária e Aparecida d'Oeste apresentou o menor potencial. Essa ordenação constitui a base para o item

3.3.4, no qual será examinada diretamente a relação entre a distância média entre indivíduos e o Ind_C.

Figura 13 - Gráficos de violino do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) nas três populações de *Pterodon pubescens*.



Nota: Os pontos representam os valores individuais, as linhas centrais indicam as medianas e a largura dos violinos expressa a densidade dos dados.

2.3.4 - Relação entre a distância média e o Índice de Conectividade Espacial

A relação entre a distância média individual e o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) foi quantificada para avaliar o comportamento funcional do índice nas três populações. Como o Ind_C foi definido como a razão entre o produto dos parâmetros de referência e a distância média de cada árvore, sua relação com a estrutura espacial é inversa e não linear. Nesse contexto, o aumento da distância média reduz progressivamente o índice; indivíduos inseridos em agregações espacialmente compactas apresentam valores mais elevados.

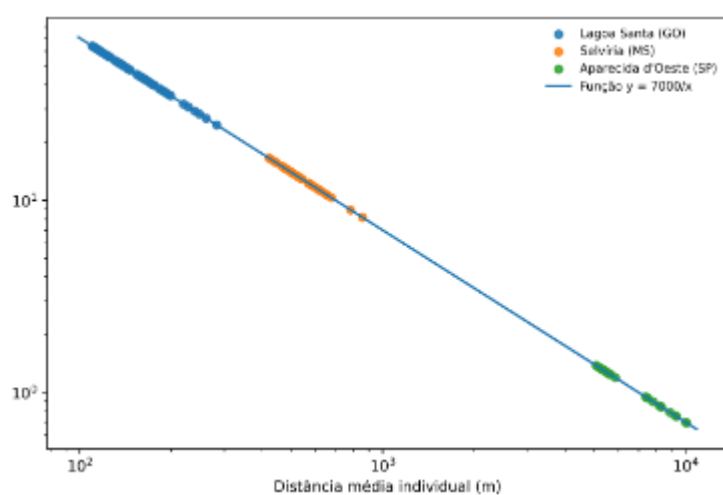
O comportamento observado reproduziu a expressão $Ind_{Ci} = 7000/\bar{d}_i$, em que $\bar{d}_i$ representa a distância média da árvore i em relação aos demais indivíduos da população. A relação monotônica foi perfeita. O coeficiente de Spearman foi igual a $-1,000$ em todas as áreas. As

correlações de Pearson também foram muito fortes e negativas, variando entre $-0,965$ e $-0,991$, embora não tenham alcançado -1 devido à forma hiperbólica da relação.

Os coeficientes de determinação do ajuste linear variaram de $0,931$ em Lagoa Santa - GO a $0,981$ em Aparecida d'Oeste - SP. Esses valores evidenciam que uma regressão linear simples descreve grande parte da variação do índice; todavia, o modelo não captura integralmente sua forma funcional. A transformação logarítmica linearizou a relação e produziu inclinação de $-1,000$ e R^2 de $1,000$ em todas as populações, confirmando a aplicação uniforme da expressão matemática.

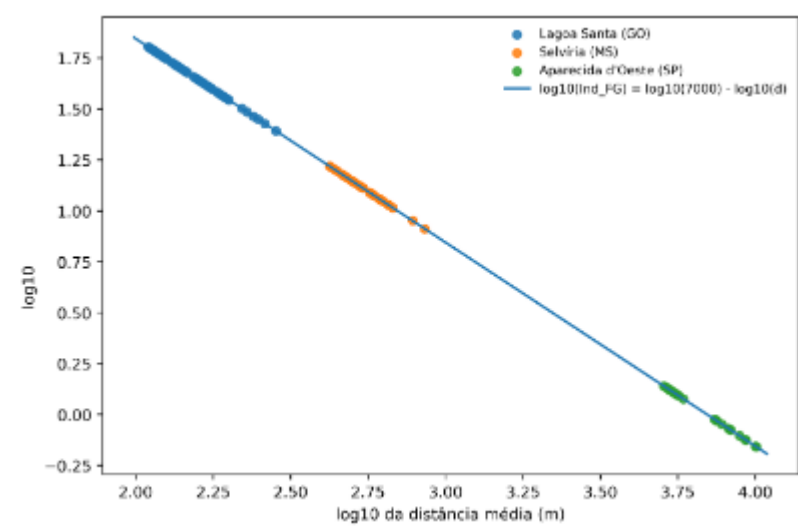
Verifica-se também que a função inversa implica uma resposta proporcional e previsível: quando a distância média dobra, o Ind_C é reduzido à metade; quando a distância aumenta dez vezes, o índice diminui para um décimo. Essa propriedade mantém as três populações em uma escala comum, apesar das grandes diferenças de extensão espacial (Figuras 14 e 15).

Figura 14 - Relação entre a distância média individual e o Índice de Conectividade Espacial nas três populações de *Pterodon pubescens*.



Nota: Os eixos estão em escala logarítmica para permitir a visualização conjunta das diferentes amplitudes espaciais; a linha representa a função $Ind_{Ci} = 7000/\bar{d}_i$.

Figura 15 - Linearização log-log da relação entre distância média e Ind_C nas três populações de *Pterodon pubescens*.



Nota: A reta teórica apresenta inclinação -1 e intercepto correspondente a $\log_{10}(7000)$, reproduzindo exatamente a formulação do índice.

Contudo, é imperativo ressaltar que as correlações elevadas não constituem validação biológica independente do Ind_C, dado que a distância média constitui um componente direto de sua formulação. Os resultados demonstram a coerência algébrica do cálculo e a aplicação da mesma equação às três populações, mas não comprovam dispersão efetiva de pólen, paternidade ou fluxo gênico realizado. A validação biológica exigirá variáveis independentes, como marcadores moleculares, análise de paternidade, observações de polinizadores ou medidas de sucesso reprodutivo.

Os resultados evidenciaram um gradiente inverso contínuo: POP-GO concentrou os menores valores de distância média e os maiores índices; POP-MS ocupou posição intermediária; e POP-SP apresentou as maiores distâncias médias e os menores valores de Ind_C. Esse comportamento fornece a base quantitativa para a comparação integrada entre as populações no subitem seguinte.

2.3.5 - Comparação estatística entre as populações.

A comparação formal dos valores individuais do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) foi realizada após a verificação dos pressupostos de normalidade e de homogeneidade

das variâncias. O teste de Shapiro–Wilk indicou desvio significativo da normalidade na POP-GO e POP-SP, enquanto os valores da POP-MS foram compatíveis com a distribuição normal. O teste de Levene, calculado em torno da mediana, também rejeitou a hipótese de homogeneidade das variâncias entre as três populações (Tabela 5).

Tabela 5 - Verificação dos pressupostos estatísticos dos valores individuais de Ind_C nas três populações de *Pterodon pubescens*.

População ou pressuposto	Estatística	p	Interpretação
Shapiro–Wilk — Lagoa Santa (GO)	W = 0,954	0,036	Desvio da normalidade
Shapiro–Wilk — Selvíria (MS)	W = 0,984	0,822	Compatível com normalidade
Shapiro–Wilk — Aparecida d'Oeste (SP)	W = 0,804	<0,001	Desvio da normalidade
Levene — variâncias	F = 88,338	<0,001	Variâncias heterogêneas

Notas: **p** indica se há evidência estatística para rejeitar o pressuposto avaliado. **W** é a estatística do teste de Shapiro–Wilk. O **F** é a estatística do teste de Levene.

Fonte:

Diante da combinação de distribuições não normais, amplitudes distintas e heterocedasticidade, adotou-se o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis para a comparação global. As comparações posteriores foram realizadas pelo teste de Mann–Whitney, com a correção de Holm aplicada aos valores de probabilidade (Tabela 6).

O teste de Kruskal–Wallis (H) evidenciou heterogeneidade global entre as populações ($H = 117,227$; $gl = 2$; $p < 0,001$); o tamanho de efeito estimado ($\epsilon^2 = 0,880$) sugere uma influência de magnitude substancial da variável categórica sobre a distribuição ordinal dos valores de Ind_C.

Tabela 6 - Comparações pareadas dos valores de Ind_C entre as populações de *Pterodon pubescens*.

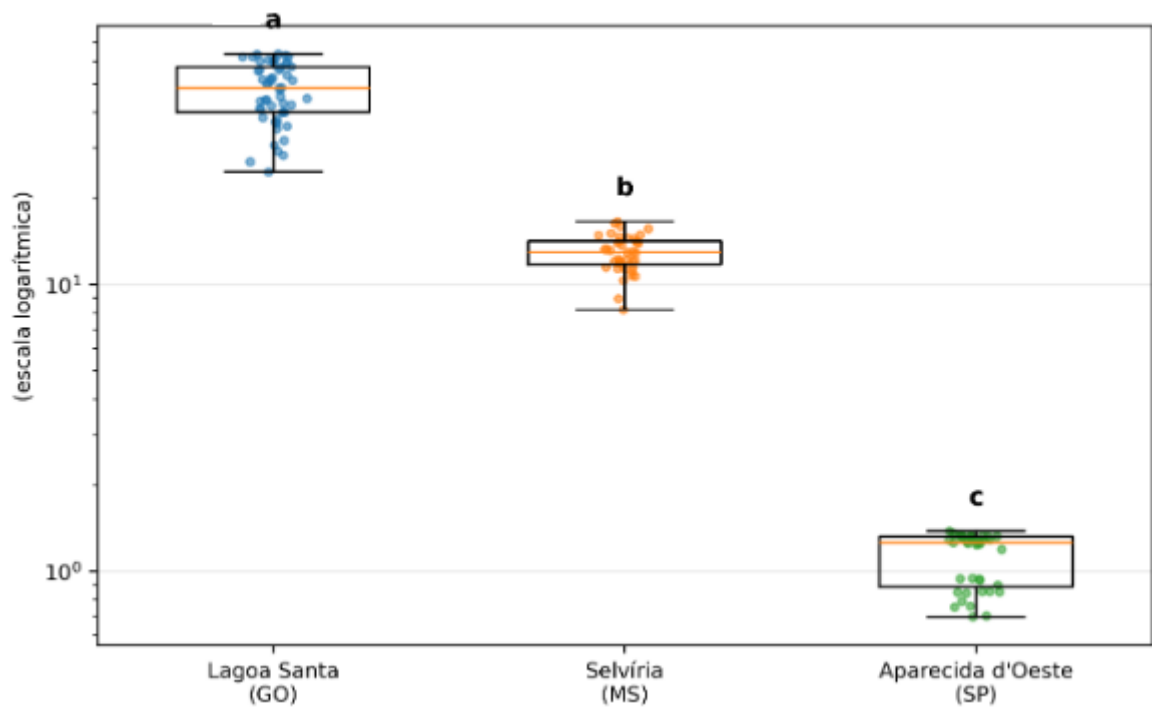
Comparação	U	p ajustado (Holm)	r bisserial	Ordenação
GO × MS	2160,0	<0,001	1,000	GO > MS
GO × SP	2160,0	<0,001	1,000	GO > SP
MS × SP	1600,0	<0,001	1,000	MS > SP

Nota: **U** representa a estatística do teste de Mann–Whitney, que quantifica o número de ordenações favoráveis após o ranqueamento conjunto dos dados; o **r bisserial**, por sua vez, mensura a magnitude da divergência.

As comparações pareadas confirmam heterogeneidade estatística entre todos os pares de populações; POP-GO apresentou valores superiores aos de POP-MS e POP-SP, enquanto POP-MS superou POP-SP (Figura 16). Os tamanhos de efeito bisseriais atingiram magnitude máxima; tal resultado reflete separação completa entre as distribuições individuais do índice.

A ordenação estatística revelou a hierarquia: POP-GO > POP-MS > POP-SP. As medianas observadas foram 48,585 em POP-GO, 12,969 em POP-MS e 1,258 em POP-SP. A ausência de sobreposição entre os intervalos observados reforça a ideia de que as populações apresentam configurações espaciais marcadamente distintas. Os testes confirmam diferenças nas distribuições do índice, mas não constituem evidência independente de diferenciação genética. Como o Ind_C deriva matematicamente da distância média individual, os resultados refletem, sobretudo, as configurações espaciais contrastantes das áreas amostradas. Assim, a interpretação deve permanecer restrita à relação espacial potencial, sem equivalência direta com taxas de migração, parentesco ou fluxo efetivo de pólen.

Figura 16 - Distribuição dos valores individuais do Índice de Conectividade Espacial nas três populações de *Pterodon pubescens*.



Nota: O eixo vertical foi apresentado em escala logarítmica devido à grande diferença de magnitude entre as populações. Letras distintas indicam diferenças significativas nas comparações de Mann–Whitney com ajuste de Holm ($p < 0,001$). Fonte: Dados do autor.

Em conjunto, as análises formais permitiram distinguir três grupos: POP-GO, com maior conectividade espacial potencial; POP-MS, com nível intermediário; e POP-SP, com conectividade espacial reduzida. Esse gradiente fornece a base quantitativa para a síntese ecológica integrada apresentada no item seguinte.

2.3.6 - Escala ecológica da conectividade potencial

Os resultados evidenciam padrões espaciais contrastantes em *Pterodon pubescens*. As métricas descritivas e o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) corroboram a divergência observada. Quando analisados em conjunto, esses resultados permitem reconhecer um gradiente contínuo de ligação espacial potencial entre as três populações: POP-GO, POP-MS e POP-SP, constituindo uma síntese ecológica dos padrões observados sem extrapolar para estimativas diretas de fluxo gênico efetivo.

A caracterização inicial revelou variações na configuração espacial entre os indivíduos. Assim, a POP-GO apresentou a menor área amostrada (11,42 ha), a menor amplitude espacial (446,89 m) e a menor distância média entre indivíduos (155,62 m), enquanto a POP-MS ocupou posição intermediária, com área de 66,75 ha, amplitude espacial de 1.391,08 m e distância média de 556,34 m. Em contraste, a POP-SP apresentou a maior área amostrada (4.714,54 ha), amplitude espacial de 17.193,66 m e distância média entre indivíduos de 6.531,19 m.

A estrutura espacial descrita no item 3.3.2 foi diretamente refletida nos valores do Índice de Conectividade Espacial. Desse modo, a POP-GO apresentou o maior valor médio do índice (47,779), seguida pela POP-MS (12,923), enquanto a POP-SP apresentou o menor (1,127). Essa ordenação reproduziu o gradiente de distância média; os dados são consistentes. A relação entre a distância média e o Ind_C é governada por uma função inversa. Isso permite padronizar populações com densidades distintas. Os testes estatísticos confirmaram que as diferenças entre as três populações foram consistentes e indicaram níveis distintos de ligação espacial potencial. A integração desses resultados permite propor uma escala ecológica de conexão potencial (Tabela 7).

Tabela 7 - Síntese ecológica da conectividade potencial nas populações naturais de *Pterodon pubescens*.

População	Estrutura espacial	Distância média	Ind_C médio	Conectividade potencial
Lagoa Santa (GO)	Agregada	155,62 m	47,779	Elevada
Selvíria (MS)	Intermediária	556,34 m	12,923	Moderada
Aparecida d'Oeste (SP)	Dispersa	6.531,19 m	1,127	Reduzida

A análise dos resultados indica que a POP-GO exibe elevada agregação espacial; enquanto que a POP-SP caracteriza-se por reduzida conectividade espacial potencial e a POP-MS mantém condição intermediária. O Ind_C é uma métrica de articulação espacial. Contudo, essa medida não constitui uma estimativa direta do fluxo gênico efetivo, pois sua validade se limita à organização espacial dos indivíduos. A confirmação desse processo depende de estudos complementares baseados em marcadores moleculares, análises de paternidade e ecologia da polinização. Em síntese, a integração das análises espaciais, do Ind_C e dos testes estatísticos evidencia um gradiente consistente de relação potencial entre as populações estudadas, fornecendo uma base quantitativa para a discussão ecológica e evolutiva apresentada no tópico seguinte.

2.3.7 - Variação entre e dentro de populações.

O índice de variação (Ind_C) na POP-GO variou de 24,717 (11 árvores matrizes) a 63,704 (29 árvores matrizes), com amplitude de 38,986, média de 47,78 e coeficiente de variação (CV) de 47,78%. Na POP-MS, o Ind_C variou de 8,167 (20 árvores matrizes) a 16,577 (13 árvores matrizes), com amplitude de 8,410 e média de 13,40, resultando em CV de 15,09%. A POP-SP apresentou uma média de 1,13 e um CV de 20,8%, com um intervalo de variação de 0,694 (29 árvores matrizes) a 1,382 (33 árvores matrizes), correspondendo a uma amplitude de 0,688 (Tabela 8).

As populações mais próximas são as de POP-MS e POP-SP que apresentaram as menores variações ($D_{ms} = 0,05$). As variações entre a POP-GO e a POP-MS ($D_{ms} = 0,16$) e entre

a POP-GO e a POP-SP ($D_{ms} = 0,15$) foram praticamente idênticas, o que pode estar relacionado à história evolutiva destas duas populações (Tabela 8).

Tabela 8 - Variação entre as populações de *Pterodon pubescens* (D_{xy}) a partir da frequência relativa (FR) do índice de Fluxo Gênico (Ind_C).

POP-GO	Ind_C	FR	POP-MS	Ind_C	FR	POP-SP	Ind_C	FR
1	63,563	0,025	1	12,104	0,023	1	1,325	0,029
2	63,116	0,024	2	11,850	0,022	2	1,321	0,029
3	62,181	0,024	3	10,747	0,020	3	0,755	0,017
4	60,155	0,023	4	12,309	0,023	4	0,750	0,017
5	60,766	0,024	5	12,027	0,022	5	0,852	0,019
6	51,983	0,020	6	13,318	0,025	6	1,290	0,029
7	37,594	0,015	7	13,699	0,026	7	1,255	0,028
8	30,635	0,012	8	13,911	0,026	8	0,943	0,021
9	26,812	0,010	9	14,006	0,026	9	0,947	0,021
10	36,901	0,014	10	14,114	0,026	10	0,939	0,021
11	24,717	0,010	11	14,899	0,028	11	0,933	0,021
12	40,735	0,016	12	15,103	0,028	12	0,896	0,020
13	42,953	0,017	13	16,577	0,031	13	1,194	0,026
14	44,101	0,017	14	16,384	0,031	14	1,247	0,028
15	42,098	0,016	15	14,556	0,027	15	1,252	0,028
16	43,930	0,017	16	14,123	0,026	16	1,262	0,028
17	47,758	0,019	17	13,012	0,024	17	1,265	0,028
18	48,459	0,019	18	10,345	0,019	18	1,333	0,030
19	50,075	0,019	19	8,930	0,017	19	1,326	0,029
20	51,561	0,020	20	8,167	0,015	20	1,324	0,029
21	53,667	0,021	21	14,081	0,026	21	1,320	0,029
22	55,679	0,022	22	13,154	0,025	22	1,319	0,029
23	57,152	0,022	23	14,953	0,028	23	1,311	0,029
24	59,690	0,023	24	14,474	0,027	24	1,311	0,029
25	58,744	0,023	25	12,256	0,023	25	0,840	0,019
26	56,168	0,022	26	12,049	0,023	26	0,846	0,019
27	57,460	0,022	27	12,033	0,023	27	0,848	0,019
28	58,766	0,023	28	12,116	0,023	28	0,851	0,019
29	63,704	0,025	29	11,497	0,022	29	0,694	0,015
30	29,175	0,011	30	11,282	0,021	30	0,699	0,016
31	28,205	0,011	31	10,692	0,020	31	0,788	0,017
32	60,462	0,023	32	11,129	0,021	32	1,237	0,027
33	62,168	0,024	33	11,363	0,021	33	1,382	0,031
34	62,381	0,024	34	11,485	0,021	34	1,343	0,030
35	61,138	0,024	35	12,925	0,024	35	1,348	0,030
36	52,691	0,020	36	12,920	0,024	36	1,276	0,028
37	50,232	0,019	37	13,298	0,025	37	1,284	0,028
38	41,210	0,016	38	14,662	0,027	38	1,287	0,029
39	39,960	0,015	39	15,685	0,029	39	1,357	0,030
40	39,928	0,015	40	15,963	0,030	40	1,323	0,029
41	35,679	0,014						
42	35,034	0,014						
43	31,797	0,012						
44	39,765	0,015						
45	44,585	0,017						
46	43,604	0,017						
47	42,387	0,016						
48	36,444	0,014						
49	38,264	0,015						
50	45,377	0,018						
51	48,710	0,019						
52	52,215	0,020						
53	51,337	0,020						
54	56,198	0,022						
Média - GO	I_{gm}	0,85	Média - MS	I_{gs}	0,86	Média - SP	I_{ms}	0,96
47,78	D_{gm}	0,16	13,40	D_{gs}	0,15	1,13	D_{ms}	0,05

2.4 - DISCUSSÃO

2.4.1 - A estrutura espacial como determinante da conectividade potencial.

A organização espacial dos indivíduos constitui um dos principais fatores que condicionam a relação entre plantas em populações naturais. Independentemente da capacidade de dispersão de pólen ou de sementes, a distribuição espacial dos indivíduos define a probabilidade inicial de ocorrência de eventos reprodutivos (Nathan; Muller-Landau; 2000), influenciando a frequência potencial de cruzamentos e a intensidade do intercâmbio gênico ao longo da paisagem. Os resultados obtidos para as populações naturais de *Pterodon pubescens* demonstraram um gradiente espacial consistente, caracterizado por elevada agregação na POP-GO, condição intermediária na POP-MS e ampla dispersão na POP-SP. Essa interpretação é compatível com o modelo clássico de isolamento por distância, originalmente proposto por Wright (1943) e revisitado por Slatkin (1985), segundo o qual a probabilidade de intercâmbio gênico diminui progressivamente à medida que aumenta a distância espacial entre indivíduos. Embora originalmente formulado para explicar padrões de estrutura genética, seu princípio fundamental é espacial: indivíduos adjacentes apresentam maior probabilidade de intercâmbio gênico do que indivíduos amplamente dispersos.

Os resultados deste estudo corroboram esse modelo. A POP-GO apresentou distância média entre indivíduos de aproximadamente 155,62 m e o maior valor médio de Ind_C (47,779); em contraste, POP-SP demonstrou distância média superior a 6,5 km e o menor valor médio do índice (1,127). Selvíria - MS ocupou uma posição intermediária, demonstrando um gradiente contínuo entre a proximidade espacial e a conexão potencial. Slatkin (1987) demonstrou que a intensidade do isolamento por distância também depende da escala espacial da população. Essa abordagem auxilia a compreender por que a POP-GO, com indivíduos mais próximos, apresenta maior potencial de conexão, enquanto Aparecida d'Oeste - SP, caracterizada por ampla dispersão espacial, apresenta menor potencial de interação entre árvores reprodutivas. Segundo Slatkin (1993), a estrutura genética de populações naturais resulta não apenas da densidade, mas também da distribuição espacial. A escala é, portanto, determinante.

Essa interpretação é particularmente relevante neste estudo, pois as populações diferem principalmente na configuração espacial e não apenas no tamanho amostral.

A ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens* reforça essa interpretação. A espécie depende predominantemente de polinizadores entomófilos, principalmente abelhas, cuja eficiência está relacionada à disponibilidade de indivíduos floridos em suas áreas usuais de forrageamento (O'Connell et al., 2018; Lima, 2019). Assim, populações agregadas tendem a oferecer maior potencial de interconexão espacial do que populações amplamente dispersas.

Em síntese, a estrutura espacial mostrou-se o principal determinante da conectividade potencial observada nas populações estudadas. O gradiente identificado entre POP-GO, POP-MS e POP-SP reproduz o comportamento esperado pelos modelos clássicos de isolamento por distância (Sexton; Hangartner; Hoffmann, 2013) e fornece a base conceitual para discutir, nas seções seguintes, o papel do Ind_C na interpretação ecológica e na conservação de *Pterodon pubescens*.

2.4.2 - O Índice de Conectividade Espacial como medida de conectividade potencial

A quantificação da ligação entre indivíduos é um desafio central na ecologia espacial. No entanto, as abordagens tradicionais — estimativas via marcadores moleculares, análises de paternidade ou modelos demográficos — enfrentam dificuldades decorrentes da alta complexidade biológica de espécies arbóreas tropicais, que impõem desafios amostrais e metodológicos significativos (Kageyama et al., 2003), além de obstáculos financeiros e logísticos. Em consequência, muitas espécies nativas permanecem sem informações quantitativas sobre seus padrões de conexão genética, o que dificulta a identificação de populações potencialmente vulneráveis à fragmentação ou ao isolamento espacial.

O Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) é uma medida de conectividade espacial que sintetiza o potencial de interação entre indivíduos a partir de variáveis estritamente geográficas. Contudo, diferentemente das estimativas clássicas de migração gênica, o índice não busca quantificar diretamente o número de migrantes, a taxa de fecundação cruzada ou a intensidade do fluxo de pólen. Seu objetivo é representar, de forma padronizada, a probabilidade relativa de interação espacial entre indivíduos, assumindo que a proximidade geográfica

constitui um dos principais condicionantes do intercâmbio gênico em populações vegetais. Essa distinção conceitual é fundamental para a interpretação dos resultados. O Ind_C é um indicador de interconexão potencial: não constitui uma estimativa direta de fluxo gênico efetivo. Enquanto marcadores moleculares descrevem eventos históricos ou contemporâneos de transmissão gênica, o índice proposto representa a configuração espacial que pode favorecer ou restringir esses eventos. Em outras palavras, ele descreve a estrutura da paisagem ocupada pelos indivíduos, permitindo inferir a existência de condições mais ou menos favoráveis ao intercâmbio gênico. Essa abordagem alinha-se à proposta de Olivieri et al. (1994), que destacaram a conectividade como um dos principais fatores responsáveis pela persistência de populações naturais em paisagens heterogêneas. Segundo esses autores, a manutenção da variabilidade genética e da estabilidade demográfica depende não apenas do tamanho populacional, mas também da capacidade de intercâmbio entre indivíduos e subpopulações. Nesse contexto, métricas capazes de descrever a configuração espacial tornam-se ferramentas importantes para compreender a vulnerabilidade de populações submetidas à fragmentação.

Os resultados obtidos neste estudo ilustram claramente essa relação. A POP-GO apresentou indivíduos distribuídos em uma pequena área, com distância média reduzida entre as árvores e elevado Ind_C, caracterizando uma condição de alta comunicação espacial potencial. Enquanto a POP-MS ocupou posição intermediária em todas essas métricas. No que se refere a POP-SP, apresentou ampla dispersão espacial e os menores valores do índice. Entretanto, os baixos valores de Ind_C observados na POP-SP indicam uma configuração espacial compatível com menor conexão potencial entre indivíduos. Sob os pressupostos da teoria do isolamento por distância, essa condição pode aumentar a probabilidade de restrição ao intercâmbio gênico. Contudo, essa interpretação permanece inferencial, pois o estudo não quantificou diretamente o fluxo de pólen, o parentesco ou a migração. Essas diferenças foram consistentes em todas as análises realizadas, indicando que o Ind_C responde sensivelmente às variações na estrutura espacial das populações. Uma das principais vantagens do índice é sua simplicidade operacional e baixo custo. O cálculo depende apenas das coordenadas geográficas dos indivíduos e de parâmetros de referência previamente definidos, dispensando análises laboratoriais complexas e caras. Essa característica amplia significativamente sua aplicabilidade em levantamentos ecológicos, inventários florestais e estudos preliminares de conexão, especialmente para espécies para as quais informações genéticas ainda não estejam disponíveis. Além disso, o uso de uma escala padronizada permite comparar populações distribuídas em diferentes regiões, favorecendo análises integradas em escala regional.

Outro aspecto relevante refere-se à interpretação ecológica do índice. Como sua formulação é inversamente proporcional à distância média entre indivíduos, o Ind_C responde continuamente às mudanças na organização espacial das populações. Assim, pequenas alterações no espaçamento entre árvores produzem modificações graduais na conectividade potencial, permitindo detectar diferenças que dificilmente seriam identificadas apenas por métricas descritivas convencionais. Essa propriedade foi evidenciada pelo gradiente observado entre as três populações, no qual a redução progressiva do índice acompanhou diretamente o aumento da distância média entre indivíduos. Entretanto, a simplicidade do índice também impõe limitações que devem ser explicitamente reconhecidas. A principal delas é que o Ind_C considera exclusivamente a estrutura espacial das populações, sem incorporar fatores biológicos capazes de modificar o fluxo gênico efetivo. Parâmetros biológicos — tais como o comportamento dos polinizadores, compatibilidade reprodutiva, fenologia, barreiras ambientais, dispersão de diásporos e recrutamento edáfico — permanecem significativamente omissos em sua formulação. Populações que exibem valores análogos de Ind_C podem divergir na intensidade do intercâmbio gênico; essa divergência é mediada pela interação complexa entre processos ecológicos, como a seleção densidade-dependente. Essa limitação, entretanto, não reduz a utilidade do índice. Pelo contrário, define claramente seu campo de aplicação. O Ind_C não substitui análises genéticas, mas atua como ferramenta complementar para identificar populações com maior ou menor potencial de ligação espacial. Sob essa perspectiva, ele pode orientar a seleção de áreas prioritárias para estudos moleculares, indicar populações potencialmente mais suscetíveis ao isolamento e subsidiar estratégias iniciais de monitoramento e conservação.

Essa interpretação aproxima-se da perspectiva apresentada por Nielsen e Slatkin (2000), que ressaltam a importância da inferência estatística na avaliação de processos evolutivos quando observações diretas não estão disponíveis. Embora os autores discutam principalmente métodos de inferência aplicados à genética de populações, o princípio é igualmente pertinente neste estudo: informações espaciais podem ser utilizadas para construir indicadores quantitativos que representem processos biológicos indiretamente, desde que suas limitações sejam claramente reconhecidas. Da mesma forma, Slatkin (1993) demonstra que a estrutura espacial constitui um componente essencial para compreender os padrões de diferenciação genética em paisagens heterogêneas. Segundo esse autor, a organização geográfica dos indivíduos frequentemente explica uma parte substancial da variação genética observada entre populações. O Ind_C segue essa lógica: utiliza a configuração espacial como elemento central

para sintetizar o potencial de conectividade; contudo, não pretende estimar diretamente parâmetros genéticos. A aplicação do índice às populações de *Pterodon pubescens* demonstrou que sua resposta é consistente tanto do ponto de vista matemático quanto do ecológico. A relação inversa entre distância média e Ind_C reproduziu fielmente o gradiente espacial observado entre as populações, enquanto os testes estatísticos confirmaram diferenças significativas entre todos os grupos avaliados. Em conjunto, esses resultados indicam que o índice apresenta elevada capacidade para sintetizar padrões de organização espacial em uma única métrica comparável, favorecendo interpretações ecológicas em diferentes escalas.

O Índice de Conectividade Espacial é uma métrica de elo espacial potencial. Ele se fundamenta na organização espacial das populações e na teoria do isolamento por distância. Sua principal contribuição consiste em transformar informações geográficas em um indicador quantitativo de fácil aplicação, capaz de apoiar estudos ecológicos, o planejamento amostral e a definição de prioridades para pesquisas genéticas. Sua utilização pode ampliar significativamente a compreensão dos padrões espaciais que condicionam o potencial de intercâmbio gênico em populações naturais de *Pterodon pubescens* e de outras espécies arbóreas do Cerrado.

2.4.3 - Ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens* e implicações para o Índice Inferencial de Conectividade Espacial.

A interpretação dos padrões de ligação espacial observados neste estudo depende da compreensão da ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens*, uma vez que o intercâmbio gênico em espécies arbóreas resulta da interação entre a distribuição espacial dos indivíduos, o sistema reprodutivo, o comportamento dos polinizadores e os mecanismos de dispersão de sementes. Embora o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) tenha sido construído exclusivamente com base na estrutura espacial das populações, sua interpretação ecológica torna-se mais consistente quando considerada à luz desses processos biológicos. *Pterodon pubescens* é uma espécie arbórea característica do Cerrado brasileiro, com floração sazonal concentrada durante a estação seca e início da estação chuvosa (Giarola, 2015; Lima, 2019). Este padrão fenológico impulsiona a sincronia reprodutiva: a disponibilidade simultânea de recursos florais maximiza a atratividade para os polinizadores. A sobreposição temporal da floração é um requisito importante para o fluxo de pólen, pois aumenta a probabilidade de deslocamentos sucessivos entre árvores reprodutivamente ativas.

A polinização é predominantemente entomófila; a dependência de vetores bióticos é absoluta (Damasceno, 1998; Oliveira; Gibbs, 2000). A interação ocorre principalmente por meio de abelhas de médio e grande porte (Damasceno, 1998). Estudos disponíveis para a espécie e para representantes da subfamília Papilionoideae indicam que gêneros como *Centris*, *Xylocopa*, *Bombus*, *Apis*, *Trigona* e *Scaptotrigona* atuam como visitantes frequentes das flores, contudo, a contribuição relativa de cada táxon varia conforme a heterogeneidade espacial e temporal (Damasceno, 1998). Esses polinizadores apresentam elevada capacidade de deslocamento quando comparados a insetos de pequeno porte, permitindo o transporte de pólen entre indivíduos separados por centenas de metros e, em alguns casos, por distâncias superiores a um quilômetro (Ward et al., 2005), (Araújo et al., 2004).

Sob essa perspectiva, a configuração espacial observada nas três populações estudadas trazem implicações ecológicas distintas. Na POP-GO, onde os indivíduos encontram-se distribuídos em menor área e separados por distâncias relativamente reduzidas, a maior proximidade espacial tende a ampliar o número de árvores potencialmente acessíveis durante um mesmo percurso de forrageamento; neste caso, todas as árvores seriam, hipoteticamente, doadoras umas para as outras, considerando a distância máxima de polinização pelos agentes de 3 km. Essa condição é compatível com maior interconexão espacial potencial, representada pelos elevados valores de Ind_C observados nessa população. Na POP-MS, a condição intermediária sugere uma redução gradual dessa conectividade potencial, porém todas as árvores, ainda hipoteticamente poderiam trocar pólen entre si, considerando a distância máxima percorridas pelos agentes polínicos, enquanto que na POP-SP a ampla dispersão espacial dos indivíduos implica que parte das árvores pode estar localizada além das distâncias normalmente percorridas durante um único evento de forrageamento por alguns polinizadores, os dados mostram que o indivíduo da população que possui o maior Ind_C, consegue relacionar-se com no máximo 18 e no mínimo 6 indivíduos da mesma população (Tabela O, Apêndice). Essa interpretação constitui uma inferência ecológica — fundamentada na literatura sobre o deslocamento de polinizadores — e não uma mensuração direta de movimentação.

Além da polinização, a dispersão de sementes também influencia a organização espacial das populações ao longo das gerações. Os frutos de *Pterodon pubescens* exibem estruturas aladas que favorecem a anemocoria; essa característica é amplamente reconhecida na espécie (Pinto; Francisco; Mansano, 2014). Entretanto, o alcance efetivo dessa dispersão é geralmente inferior às maiores distâncias observadas entre indivíduos na população de Aparecida d'Oeste. Contudo, a distribuição espacial observada resulta da interação entre a dispersão

de sementes, o estabelecimento diferencial e a mortalidade pós-germinação; a história de ocupação da área modula esse padrão. Esse conjunto de características reforça um aspecto central da interpretação do Ind_C: o índice não representa a intensidade do fluxo gênico efetivo, mas sim a configuração espacial em que esse processo ocorre. Em populações com elevada agregação espacial, como a POP-GO, a disposição dos indivíduos cria um cenário potencialmente favorável ao intercâmbio de pólen e de sementes. Em populações amplamente dispersas, como na POP-SP, a maior separação espacial pode reduzir essa probabilidade. Não obstante, a intensidade real do fluxo gênico dependerá da interação entre diversos fatores biológicos que não foram mensurados neste estudo, incluindo o comportamento dos polinizadores; a compatibilidade entre genótipos; o sucesso de fecundação; a produção de sementes viáveis; e a sobrevivência de plântulas. Essa interpretação é coerente com os modelos clássicos de isolamento por distância discutidos anteriormente. Slatkin (1985, 1987, 1993) demonstrou que a separação espacial constitui um dos principais fatores responsáveis pela redução da probabilidade de intercâmbio gênico entre indivíduos. Os resultados obtidos para *Pterodon pubescens* mostram um padrão compatível com essa previsão teórica, uma vez que a redução progressiva do Ind_C acompanhou o aumento da distância média entre indivíduos. Todavia, o presente estudo acrescenta uma importante perspectiva ecológica ao demonstrar que essa relação pode ser interpretada à luz das características reprodutivas da espécie, aproximando a teoria do isolamento por distância da realidade ecológica das populações do Cerrado.

Populações naturais de *Pterodon pubescens* frequentemente ocorrem em mosaicos de vegetação, nos quais diferenças de solo, relevo, disponibilidade hídrica e histórico de perturbações influenciam tanto a distribuição dos indivíduos quanto a atividade dos polinizadores (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008; Lira-Martins et al., 2022). Dessa forma, populações submetidas a contextos ambientais distintos podem apresentar níveis contrastantes de conexão potencial mesmo quando compartilham características reprodutivas semelhantes. Essa observação reforça a ideia de que a estrutura espacial e a ecologia reprodutiva devem ser interpretadas de forma integrada, e não como fatores independentes.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens* fornece um mecanismo biologicamente plausível para interpretar o gradiente de ligação potencial identificado entre a POP-GO, a POP-MS e a POP-SP. Contudo, essa interpretação deve ser entendida como uma hipótese ecológica sustentada pela literatura e pelos padrões espaciais observados, e não como uma demonstração direta do fluxo gênico efetivo. A confirmação desses mecanismos dependerá de estudos futuros que integrem marcadores

moleculares, análises de paternidade, monitoramento da atividade de polinizadores e estimativas da dispersão de sementes. A combinação entre a estrutura espacial, o sistema reprodutivo e a ecologia dos vetores de polinização e dispersão permite compreender o contexto biológico no qual o Índice de Conectividade Espacial foi aplicado. Significativamente, ele sintetiza a componente espacial que condiciona tais processos, oferecendo uma base quantitativa para a formulação de hipóteses sobre interligações em populações naturais.

2.4.4 - Conectividade potencial e genética da paisagem

A genética da paisagem (Manel et al., 2003) consolidou-se nas últimas décadas como uma das principais abordagens para compreender a interação entre processos ecológicos, estrutura espacial e variabilidade genética em populações naturais (Cruzan; Hendrickson, 2020). Diferentemente da genética de populações clássica, que frequentemente assume populações discretas, a genética da paisagem incorpora a heterogeneidade ambiental; reconhece que o relevo, a matriz de cobertura vegetal e a configuração espacial modulam o elo entre indivíduos (Cruzan; Hendrickson, 2020). Nesse contexto, a conexão deixa de ser interpretada apenas como uma propriedade biológica e passa a ser também uma característica emergente da paisagem. Essa perspectiva é particularmente relevante para espécies arbóreas do Cerrado, cujas populações frequentemente se distribuem em mosaicos ambientais compostos por diferentes fitofisionomias, áreas agrícolas, fragmentos florestais e formações savânicas (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008). Nessas condições, a distância geográfica é um componente secundário da ligação: a permeabilidade da matriz é a variável principal. (Cruzan; Hendrickson, 2020) A permeabilidade da paisagem, a disponibilidade de habitat, a movimentação dos polinizadores e a dispersão de sementes atuam conjuntamente, determinando a intensidade do intercâmbio gênico ao longo do tempo (Cruzan; Hendrickson, 2020).

Padrões espaciais aparentemente simples podem produzir estruturas genéticas complexas quando a paisagem apresenta heterogeneidade ambiental (Loveless; Hamrick, 1984). Processos de isolamento por distância frequentemente interagem com barreiras físicas, gradientes ambientais e diferenças na conexão funcional, produzindo padrões de diferenciação genética que dificilmente podem ser explicados apenas pela distância euclidiana entre indivíduos. Essa abordagem amplia significativamente a interpretação dos resultados deste estudo, pois indica que a estrutura espacial observada nas populações de *Pterodon pubescens* deve ser entendida como um componente da ligação, e não como sua representação completa. Sob essa perspec-

tiva, introduzimos o Índice de Conectividade Espacial (Ind_C). O Ind_C é uma métrica de relação espacial baseada na organização geométrica dos indivíduos. Sua principal contribuição consiste em sintetizar a componente geométrica da conexão, permitindo comparar populações distribuídas em diferentes contextos ambientais por meio de uma escala quantitativa padronizada. O índice não incorpora explicitamente variáveis ambientais nem parâmetros genéticos; contudo, descreve a estrutura espacial em que esses processos atuam.

Essa característica aproxima o Ind_C das abordagens empregadas em estudos de ligação estrutural da paisagem. Na ecologia da paisagem, distingue-se frequentemente a conectividade estrutural, definida pela disposição física dos elementos da paisagem, da conexão funcional, determinada pela capacidade efetiva dos organismos de se deslocarem entre esses elementos (Tischendorf; Fahrig, 2000). O índice proposto neste estudo situa-se claramente na primeira categoria: descreve a configuração espacial dos indivíduos e permite inferir o potencial relativo de interação, sem quantificar a dispersão de *diasporos* nem o fluxo polínico. Essa distinção tem implicações importantes para a interpretação ecológica dos resultados. As três populações apresentaram diferenças marcantes no Ind_C, o que reflete contrastes na estrutura espacial das áreas amostradas. Estas variações não implicam, necessariamente, níveis equivalentes de diferenciação genética. Em uma paisagem altamente permeável, polinizadores capazes de percorrer longas distâncias podem manter um fluxo gênico elevado mesmo entre indivíduos relativamente afastados. Em contrapartida, ambientes fragmentados por barreiras físicas ou alterações no uso do solo podem reduzir significativamente a ligação funcional, mesmo quando os indivíduos permanecem espacialmente próximos. Assim, a conectividade estrutural, representada pelo Ind_C, deve ser interpretada como um dos componentes da interconexão da paisagem, e não como sua expressão total. Essa interpretação é consistente com a abordagem de Nielsen e Slatkin (2000), que enfatizaram a importância de modelos inferenciais para representar processos biológicos complexos quando observações diretas não estão disponíveis. No presente estudo, a posição espacial dos indivíduos constitui a informação primária utilizada para construir um indicador quantitativo de junção potencial. Contudo, este indicador, fornece uma representação objetiva da organização espacial das populações para formular hipóteses de conexão testáveis *a posteriori*.

Os resultados obtidos reforçam essa possibilidade. O gradiente observado entre as populações: POP-GO, POP-MS e POP-SP permaneceu consistente em todas as análises realizadas; o Ind_C responde de forma sensível à configuração espacial (densidade e distribuição) das populações. Essa consistência sugere que o índice pode ser empregado como ferramenta

de triagem para identificar populações potencialmente mais conectadas ou mais suscetíveis ao isolamento espacial, orientando a seleção de áreas prioritárias para estudos de genética da paisagem e de conservação. O Ind_C integra-se a modelos espaciais complexos. Em estudos futuros, o índice poderá ser combinado com superfícies de resistência da paisagem, modelos de conectividade funcional, análises de custo de deslocamento (*least-cost path*), teoria dos circuitos (*Circuit Theory*), modelos de adequabilidade ambiental e informações derivadas de sensoriamento remoto. Essa integração permitirá avaliar não apenas a distância entre indivíduos, mas também a facilidade com que o pólen, as sementes ou os polinizadores podem atravessar diferentes tipos de habitat. Assim, o Ind_C poderá representar uma variável inicial em modelos hierárquicos de ligação, atuando como elo entre a estrutura espacial local e a dinâmica da paisagem.

Sob essa perspectiva, o índice apresenta potencial para aplicações que vão além da espécie estudada. Populações de outras espécies arbóreas de diversos biomas, especialmente aquelas para as quais não há informações genéticas detalhadas, poderão ser comparadas utilizando a mesma abordagem metodológica, desde que sejam respeitadas as características ecológicas de cada sistema. Essa possibilidade amplia significativamente o campo de aplicação do método, particularmente em programas de monitoramento ecológico, de restauração de paisagens e de planejamento da conservação. O Ind_C atua como uma métrica descritiva. Ele não substitui os princípios fundamentais da genética da paisagem. Os dados obtidos demonstram que a estrutura espacial das populações de *Pterodon pubescens* pode ser sintetizada por meio de uma métrica quantitativa que representa a ligação espacial potencial em diferentes escalas. À luz dos conceitos de genética da paisagem, o Ind_C constitui uma aproximação inicial entre a geometria das populações e os processos ecológicos que condicionam o fluxo gênico, oferecendo uma base objetiva para estudos futuros que integrem dados espaciais, ambientais e moleculares em programas de conservação e manejo.

2.4.5 - Implicações para conservação

A conservação *in situ* de espécies arbóreas nativas requer conhecimentos genéticos e ecológicos fundamentais sobre a distribuição e abundância das espécies, sua biologia reprodutiva e a estrutura genética de suas populações (Aragão, 2008). Em ecossistemas naturalmente heterogêneos, como o Cerrado, esses componentes são fortemente influenciados pela organização espacial das populações, o que torna a conexão um elemento central para a persistência

das espécies a longo prazo (Sano; Almeida; Ribeiro, 2008). Nesse contexto, os resultados deste estudo indicam que a estrutura espacial das populações de *Pterodon pubescens* constitui uma importante fonte de informação para orientar estratégias de conservação, especialmente quando integrada a indicadores quantitativos de conectividade potencial.

O gradiente observado entre a POP-GO, a POP-MS e a POP-SP evidencia que populações submetidas a diferentes configurações espaciais apresentam níveis distintos de conectividade potencial. A POP-GO exibiu elevada agregação espacial e os maiores valores do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), sugerindo uma configuração favorável à manutenção da interação entre indivíduos reprodutivos; em contraste, a POP-SP apresentou ampla dispersão espacial e os menores valores do índice, caracterizando uma população com reduzido potencial de conexão espacial. A POP-MS ocupou uma posição intermediária, representando uma condição de transição entre esses extremos. Os baixos valores de Ind_C observados na POP-SP indicam uma configuração espacial compatível com menor vinculação potencial entre indivíduos. Sob os pressupostos da teoria do isolamento por distância, essa condição pode aumentar a probabilidade de restrição ao intercâmbio gênico. Entretanto, essa interpretação permanece inferencial, pois o estudo não quantificou diretamente o fluxo de pólen, o parentesco ou a migração.

Esses resultados não significam, necessariamente, que populações com menores valores de Ind_C apresentem perda de diversidade genética ou comprometimento do fluxo gênico efetivo. Tais processos dependem de fatores adicionais, como a história demográfica, o tamanho efetivo da população e a dispersão de pólen e de sementes (Savolainen; Pyhäjärvi; Knürr, 2007). Entretanto, os padrões espaciais identificados permitem reconhecer populações potencialmente mais suscetíveis ao isolamento, constituindo uma base objetiva para o planejamento de estudos complementares.

Sob essa perspectiva, o Ind_C pode desempenhar um papel importante como ferramenta de avaliação preliminar da conectividade espacial. Por depender apenas das coordenadas geográficas dos indivíduos, sua aplicação é relativamente simples, o que permite identificar populações que merecem prioridade em programas de monitoramento genético ou ecológico. Em regiões sem informações moleculares, o índice pode orientar esforços amostrais, reduzindo custos e aumentando a eficiência na seleção de áreas de interesse para conservação.

A conexão espacial modula o sucesso da restauração ecológica. Programas de recuperação de áreas degradadas frequentemente utilizam indicadores como densidade, área basal,

cobertura vegetal, riqueza e diversidade de espécies para avaliar o sucesso da restauração (Guerin et al., 2021).

Os resultados deste estudo sugerem que a distribuição espacial pode influenciar significativamente a ligação potencial entre árvores matrizes. Dessa forma, além da composição florística e da diversidade genética das mudas utilizadas, a disposição espacial dos indivíduos pode representar um componente adicional a ser considerado em projetos de restauração, especialmente quando o objetivo inclui a manutenção de processos reprodutivos ao longo do tempo. Os resultados também têm implicações para a conservação *in situ* de populações naturais. Populações caracterizadas por elevada conectividade espacial potencial, como a observada em Lagoa Santa, podem representar importantes reservatórios para a manutenção de processos ecológicos relacionados à reprodução da espécie. Por outro lado, populações com conexão potencial reduzida podem requerer maior atenção em programas de monitoramento, uma vez que alterações adicionais na paisagem podem intensificar o isolamento espacial já existente. Essa interpretação não implica prioridade automática de conservação para uma determinada população, mas fornece um critério quantitativo adicional que pode ser integrado a outras informações ecológicas, genéticas e ambientais.

Em escala regional, o Ind_C apresenta potencial para apoiar o planejamento de redes de conservação. Ao sintetizar a componente espacial da conectividade, o índice pode ser combinado com mapas de uso e cobertura da terra, áreas prioritárias para conservação, modelos de adequabilidade ambiental e informações sobre corredores ecológicos. Essa integração permitirá identificar regiões nas quais a configuração espacial das populações é compatível com um maior potencial de comunicação, bem como áreas nas quais intervenções voltadas à manutenção da permeabilidade da paisagem poderão ser mais relevantes.

Todavia, decisões de manejo não devem ser fundamentadas em métricas isoladas; a ligação potencial é um descritor parcial da persistência das populações. A conectividade espacial potencial representa apenas um dos componentes envolvidos na persistência das populações naturais. Variáveis como diversidade genética, variabilidade adaptativa, regeneração natural, estrutura etária, qualidade do habitat e mudanças climáticas também devem ser incorporadas aos processos de planejamento. Assim, o Ind_C deve ser compreendido como uma ferramenta complementar, destinada a ampliar a capacidade de interpretação da organização espacial das populações, e não como um substituto das abordagens tradicionais de conservação.

No caso de *Pterodon pubescens*, os resultados ratificam a importância da integração de dados espaciais em programas de conservação; a ampla distribuição geográfica, aliada à transformação antrópica das paisagens, exige a identificação de populações que mantenham comunicação espacial favorável. Nesse sentido, o gradiente observado entre as populações POP-GO, POP-MS e POP-SP demonstra que populações pertencentes à mesma espécie podem apresentar contextos ecológicos bastante distintos, o que exige estratégias de monitoramento compatíveis com suas características locais. Além de sua aplicação em *Pterodon pubescens*, a abordagem desenvolvida neste estudo apresenta potencial para outras espécies arbóreas do Cerrado com distribuição naturalmente descontínua e para sistemas nos quais dados moleculares ainda não estejam disponíveis. Como o método utiliza apenas informações espaciais, pode ser incorporado a inventários florestais, programas de monitoramento de longo prazo e avaliações rápidas de conexão, servindo como etapa inicial para a definição de prioridades de pesquisa e conservação.

Os resultados indicam que a estrutura espacial das populações constitui um componente relevante no planejamento da conservação de *Pterodon pubescens*. O Índice de conectividade mostrou-se capaz de sintetizar diferenças no elo espacial potencial entre populações, fornecendo uma métrica objetiva que pode complementar informações ecológicas e genéticas em programas de manejo e conservação. Sua principal contribuição não consiste em substituir métodos tradicionais de genética da conservação, mas em oferecer uma ferramenta quantitativa adicional para apoiar a identificação de populações prioritárias, orientar o planejamento amostral e subsidiar estudos futuros sobre a conexão de espécies arbóreas do Cerrado.

2.4.6 - Limitações do estudo

As inferências aqui apresentadas demonstram que a organização espacial de *Pterodon pubescens* é sintetizável pelo Índice de Conectividade Espacial (Ind_C); tal métrica permite comparar o potencial de conexão e entre populações. Entretanto, como toda modelagem, o método possui limitações intrínsecas que devem ser explicitamente reconhecidas para garantir a interpretação adequada do escopo original.

A principal limitação do Ind_C decorre de sua própria concepção metodológica. O índice foi construído exclusivamente com base na posição espacial dos indivíduos e na distância média entre as árvores matriz, assumindo que populações espacialmente mais agregadas apre-

sentam maior potencial de ligação do que populações amplamente dispersas. Essa premissa encontra respaldo nos modelos clássicos de isolamento por distância e na ecologia da reprodução de espécies arbóreas (Wright, 1943; Savolainen; Pyhäjärvi; Knürr, 2007), porém não constitui uma medida direta do fluxo gênico efetivo. Consequentemente, o índice não permite estimar as taxas de migração, a intensidade de dispersão de pólen, a fecundação cruzada ou o parentesco genético entre indivíduos. Todavia, outra limitação crucial refere-se à ausência de informações genéticas independentes para validação do índice. Embora os resultados obtidos tenham demonstrado elevada consistência entre a estrutura espacial das populações, os valores do Ind_C e os testes estatísticos realizados, o presente estudo não incorporou marcadores moleculares, análises de paternidade ou estimativas de diferenciação genética capazes de verificar se populações com maior conectividade espacial potencial apresentam, de fato, maior intercâmbio gênico. Assim, os resultados devem ser interpretados como evidências da organização espacial das populações e não como demonstrações diretas da conexão genética. Contudo, o modelo ignora fatores ecológicos críticos. Processos estocásticos modificam significativamente a intensidade do fluxo gênico. A atividade dos polinizadores, a fenologia da floração, a compatibilidade reprodutiva entre indivíduos, a direção predominante dos ventos, o sucesso de estabelecimento das plântulas, a mortalidade diferencial e a história demográfica das populações representam componentes capazes de alterar a interconexão efetiva independentemente da distância entre árvores (Levin, 1981; Loveless; Hamrick, 1984). Em populações naturais, esses processos frequentemente interagem de forma complexa, produzindo padrões que não podem ser completamente descritos apenas pela geometria espacial.

De forma análoga, o índice utiliza a distância euclidiana como métrica de separação espacial. Embora essa abordagem seja adequada para representar a configuração geométrica das populações, ela não incorpora a heterogeneidade da paisagem. Barreiras naturais, diferenças de relevo, cursos d'água, áreas agrícolas, fragmentação do habitat e variações na permeabilidade ambiental podem influenciar o deslocamento de polinizadores e dispersores de sementes, alterando a ligação funcional sem modificar a distância geográfica (Kamm et al., 2010). Assim, populações com distâncias semelhantes podem apresentar diferentes níveis de fluxo gênico efetivo em função das características da paisagem.

A escala espacial utilizada na formulação do índice. O parâmetro de referência adotado para o desenvolvimento do Ind_C foi fundamentado em evidências ecológicas disponíveis para espécies arbóreas do Cerrado e para os principais grupos de polinizadores associados a *Pterodon pubescens*. Embora essa escolha tenha sido justificada teoricamente e tenha produ-

zido resultados coerentes entre as populações estudadas, diferentes espécies, biomas ou sistemas reprodutivos poderão demandar parâmetros distintos. Assim, a aplicação do índice em outros contextos ecológicos deverá considerar as características biológicas específicas da espécie analisada e, sempre que possível, utilizar valores de referência compatíveis com sua ecologia reprodutiva.

O presente estudo restringiu-se a três populações do Cerrado; embora representem condições contrastantes de organização espacial, estas não abrangem a totalidade da variabilidade ambiental e genética de *Pterodon pubescens*. Estudos futuros envolvendo um número maior de populações, diferentes fitofisionomias e gradientes ambientais mais amplos permitirão avaliar a robustez do índice em diferentes contextos ecológicos e verificar sua capacidade de discriminar padrões de conectividade em escalas espaciais mais abrangentes.

Essas limitações não invalidam a abordagem; elas circunscrevem seu campo de aplicação. O Ind_C foi concebido como uma ferramenta para representar a conexão espacial potencial, o índice atua como uma heurística preliminar para a investigação da dinâmica metapopulacional. Sua simplicidade metodológica, baseada exclusivamente em informações espaciais, permite sua aplicação em levantamentos ecológicos, inventários florestais e programas de monitoramento nos quais análises genéticas ainda não estejam disponíveis. Dessa forma, o índice pode orientar o planejamento amostral, indicar populações prioritárias para estudos moleculares e subsidiar hipóteses sobre padrões de conexão que posteriormente poderão ser testadas por abordagens independentes. Sob essa perspectiva, uma das principais contribuições desta tese consiste justamente em estabelecer uma ponte entre a ecologia espacial e a genética da paisagem. Em vez de substituir métodos tradicionais, o Ind_C complementa essas abordagens ao fornecer uma métrica quantitativa da organização espacial das populações. Essa integração amplia as possibilidades de investigação da conectividade em espécies arbóreas do Cerrado, especialmente em regiões onde informações genéticas ainda são escassas ou inexistentes.

Os resultados obtidos apontam para novas direções investigativas; o Ind_C é um modelo heurístico. Significativamente, a incorporação de marcadores moleculares permitirá avaliar a relação entre o Ind_C e parâmetros clássicos de estrutura genética, como diversidade alélica, heterozigosidade, diferenciação genética e fluxo gênico estimado por métodos populacionais. Da mesma forma, a integração do índice com modelos de ligação funcional, superfícies de resistência da paisagem, teoria dos circuitos (*Circuit Theory*), modelos de custo de

deslocamento (*least-cost path*) e análises de adequabilidade ambiental poderá ampliar significativamente sua capacidade interpretativa. Estudos envolvendo monitoramento de polinizadores, dispersão de sementes e análises de parentesco também contribuirão para validar biologicamente as inferências espaciais propostas nesta tese.

As limitações identificadas refletem a natureza inferencial do Índice de conectividade e delimitam o alcance de suas interpretações. O índice não substitui estimativas diretas de fluxo gênico; ele sintetiza, de forma quantitativa, a componente espacial da conexão potencial entre indivíduos. Reconhecer explicitamente esses limites fortalece a robustez metodológica do estudo, amplia a transparência das interpretações apresentadas e estabelece uma base consistente para o desenvolvimento de pesquisas futuras voltadas à integração entre ecologia espacial, genética da paisagem e conservação de espécies arbóreas do Cerrado.

2.4.7 - Síntese da Discussão

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a organização espacial das populações naturais de *Pterodon pubescens* constitui um elemento central para a compreensão de sua conectividade potencial. A análise integrada da estrutura espacial, da distância média entre indivíduos e do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) revelou um gradiente consistente entre as populações POP-GO, POP-MS e POP-SP; tal evidência indica que diferenças na distribuição espacial das árvores matriz são acompanhadas por variações sistemáticas na ligação espacial potencial. Esse padrão permaneceu consistente em todas as análises realizadas, desde a caracterização das populações até os testes estatísticos comparativos, demonstrando elevada coerência entre a formulação matemática do índice e os dados empíricos obtidos em campo.

A interpretação desses resultados à luz dos modelos clássicos de isolamento por distância propostos por Slatkin (1985, 1987, 1993) sugere que a proximidade é condição necessária para o intercâmbio gênico; a estrutura espacial dita a comunicação em populações naturais. Embora a distância geográfica não determine isoladamente o fluxo gênico efetivo, ela estabelece o contexto espacial no qual atuam processos ecológicos fundamentais, como a polinização, a dispersão de sementes e o recrutamento de novos indivíduos. Assim, o gradiente observado entre as populações estudadas é compatível com a teoria do isolamento por distân-

cia e reforça a importância da estrutura espacial como componente básico da conexão em espécies arbóreas do Cerrado.

O Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) constitui a principal contribuição metodológica deste trabalho. Diferentemente das abordagens tradicionais baseadas em marcadores moleculares, o Ind_C foi concebido para sintetizar quantitativamente a interligação espacial potencial utilizando exclusivamente informações derivadas da posição geográfica dos indivíduos. Essa característica confere ao índice elevada simplicidade operacional e ampla aplicabilidade em estudos ecológicos, inventários florestais e avaliações preliminares da conexão espacial. Ao mesmo tempo, a discussão desenvolvida ao longo deste capítulo demonstrou que o índice deve ser interpretado como uma medida da organização espacial das populações e não como uma estimativa direta do fluxo gênico efetivo. A integração entre os resultados obtidos e a ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens* reforça a plausibilidade biológica dessa interpretação. A dependência de polinizadores entomófilos, a dispersão anemocórica das sementes e a ocorrência da espécie em áreas abertas de Cerrado e em pastagem (LIMA, 2019) sugerem que alterações na configuração espacial das populações podem modificar o potencial de conectividade entre indivíduos. Embora essas relações não tenham sido diretamente mensuradas neste estudo, os padrões observados são compatíveis com a literatura disponível sobre a espécie e sobre outras árvores tropicais polinizadas por abelhas (JHA e DICK, 2010; LIMA, 2019), fornecendo uma base ecológica consistente para a interpretação do Ind_C.

A discussão elucidada que a conexão deve ser compreendida em diferentes níveis de organização; tal hierarquia (variando da dinâmica de diásporos à paisagem) regula a persistência populacional (Rayfield; Fortin; Fall, 2010). A estrutura espacial das populações representa a componente estrutural da ligação, enquanto processos ecológicos e evolutivos determinam sua expressão funcional ao longo da paisagem. (Rayfield; Fortin; Fall, 2010) Sob essa perspectiva, o Ind_C ocupa uma posição intermediária entre a descrição geométrica das populações e as abordagens clássicas da genética da paisagem, atuando como um indicador capaz de transformar informações espaciais em uma métrica quantitativa comparável entre diferentes populações e contextos ambientais. Essa característica amplia as possibilidades de integração entre levantamentos ecológicos e estudos genéticos, especialmente em espécies para as quais as informações moleculares ainda são limitadas.

As implicações para a conservação discutidas neste capítulo reforçam o potencial aplicado da abordagem proposta. A identificação de populações com diferentes níveis de comuni-

cação espacial potencial permite estabelecer prioridades para monitoramento, orientar o planejamento amostral e subsidiar programas de restauração e conservação. Contudo, decisões de manejo não devem ser fundamentadas exclusivamente no Ind_C; elas requerem a integração de dados (*e.g.*: fatores densidade - dependentes) para evitar extrapolações interpretativas. Essa interpretação preserva o caráter complementar do índice e evita extrapolações incompatíveis com seu escopo metodológico.

Por fim, a análise crítica das limitações do estudo demonstrou que a principal restrição da abordagem não reside em sua formulação matemática, mas na natureza inferencial do processo representado. O Índice de Conectividade Espacial descreve a ligação espacial potencial e, portanto, não substitui análises baseadas em marcadores moleculares, estudos de parentesco ou investigações sobre a ecologia dos polinizadores; atua estritamente como um modelo probabilístico. Ao reconhecer explicitamente essas limitações, a presente tese delimita o campo de aplicação do índice e estabelece uma agenda clara para pesquisas futuras voltadas à sua validação biológica e à integração com métodos de genética da paisagem. Em conjunto, os resultados apresentados ao longo desta discussão demonstram que a estrutura espacial constitui um componente fundamental da relação em populações naturais de *Pterodon pubescens* e que esse componente pode ser representado objetivamente pelo Índice de Conectividade Espacial. A consistência observada entre os padrões espaciais, os modelos teóricos de isolamento por distância e a ecologia reprodutiva da espécie fornece suporte à utilização do índice como ferramenta complementar em estudos de conexão espacial. Dessa forma, esta tese contribui não apenas para o conhecimento da ecologia de *Pterodon pubescens*, mas também para o desenvolvimento de uma abordagem quantitativa que poderá ser adaptada e testada em outras espécies arbóreas do Cerrado, ampliando as possibilidades de integração entre ecologia espacial, genética da paisagem e conservação biológica.

2.5 - CONCLUSÕES

A configuração espacial das populações naturais de *Pterodon pubescens* dita a conectividade potencial. Esta organização espacial é um determinante primário do fluxo gênico. A análise integrada da distribuição espacial das árvores matrizes, das distâncias entre indivíduos e do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) revela um gradiente consistente entre as popu-

lações de Lagoa Santa (GO), Selvíria (MS) e Aparecida d'Oeste (SP), evidenciando que diferenças na configuração espacial das populações são acompanhadas por alterações sistemáticas na conexão espacial potencial. Esses resultados confirmam a hipótese central deste trabalho de que a organização espacial representa um dos principais determinantes da ligação em populações naturais da espécie.

A formulação do Índice de Conectividade Espacial (Ind_C) constitui nossa principal contribuição metodológica. O Ind_C é uma métrica de ligação estrutural baseada estritamente na localização geográfica. O índice sintetiza quantitativamente a componente espacial da interconexão potencial utilizando exclusivamente informações derivadas da posição geográfica dos indivíduos, permitindo comparar populações submetidas a diferentes configurações espaciais por meio de uma métrica padronizada. Os resultados demonstram que o Ind_C responde de forma consistente às diferenças observadas entre as populações estudadas, reproduzindo o gradiente estabelecido pela distância média entre indivíduos e distinguindo claramente populações agregadas, intermediárias e dispersas.

A interpretação ecológica dos resultados mostra-se compatível com os modelos de isolamento por distância de Slatkin: a probabilidade de intercâmbio gênico decresce com a separação espacial dos indivíduos. Embora o presente estudo não estime diretamente o fluxo gênico efetivo, os padrões observados indicam que populações espacialmente agregadas apresentam maior potencial de conectividade do que populações amplamente dispersas, fornecendo uma interpretação ecológica coerente com a teoria e com a ecologia reprodutiva de *Pterodon pubescens*.

A integração com os conceitos de genética da paisagem demonstra que o Ind_C atua como ferramenta complementar. O índice não substitui dados moleculares, mas representa de forma objetiva a componente estrutural da conexão, permitindo identificar populações que potencialmente apresentam maior ou menor probabilidade de intercâmbio gênico. Dessa forma, o método amplia as possibilidades de investigação da interconexão em espécies arbóreas para as quais informações genéticas ainda são limitadas ou inexistentes. Do ponto de vista aplicado, os resultados evidenciam que a organização espacial das populações pode fornecer informações relevantes para programas de monitoramento, conservação e restauração ecológica. A utilização do Ind_C como indicador da conexão espacial potencial possibilita incorporar critérios quantitativos na avaliação de populações naturais, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias para estudos complementares e para o planejamento de estratégias de conservação fundamentadas em evidências espaciais.

O Índice de Conectividade Espacial constitui uma medida de ligação espacial potencial. O método sintetiza a configuração espacial; ele não estima o fluxo gênico efetivo. Consequentemente, suas interpretações devem ser complementadas por estudos envolvendo marcadores moleculares, análises de parentesco, monitoramento de polinizadores, dispersão de sementes e modelos de comunicação funcional da paisagem.

A integração do Ind_C com dados de genética da paisagem, modelos de resistência ambiental, análises de adequabilidade climática, teoria dos circuitos (Circuit Theory) e estudos de fluxo gênico baseados em marcadores moleculares permite avaliar a relação entre a conectividade espacial potencial e a conectividade genética efetiva. Da mesma forma, a aplicação do índice em outras espécies arbóreas do Cerrado contribui para verificar sua generalidade e ampliar sua utilização em programas de monitoramento ecológico e conservação.

A estrutura espacial constitui uma dimensão essencial para compreender a conexão potencial em populações naturais de *Pterodon pubescens*. A proposição do Índice de Conectividade Espacial representa uma contribuição metodológica original ao disponibilizar uma ferramenta quantitativa simples, barata, reproduzível e fundamentada em princípios ecológicos para sintetizar a componente espacial da conectividade. Embora sua validação biológica dependa de estudos complementares, os resultados obtidos evidenciam que o índice possui elevado potencial para apoiar pesquisas em ecologia espacial, genética da paisagem e conservação de espécies arbóreas do Cerrado.

O Índice de Conectividade Espacial mostra-se eficiente para sintetizar diferenças na organização espacial entre populações naturais de *Pterodon pubescens*, permitindo comparar seu potencial de conexão espacial. Embora o índice não represente uma medida direta de fluxo gênico, sua aplicação constitui uma ferramenta útil para gerar hipóteses ecológico-genéticas, subsidiar estudos de conservação e orientar futuras investigações baseadas em marcadores moleculares.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, S. F. **Conservação genética in situ de espécies arbóreas que ocorrem na transição da floresta estacional semidecidual e o cerrado em Selvíria – MS**. 2008. 130 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.
- ARAÚJO, E. D. De; COSTA, M. J. R. P. Da; CHAUD-NETTO, J.; FOWLER, H. G. Body size and flight distance in stingless bees (Hymenoptera: Meliponini): inference of flight range and possible ecological implications. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 64, p. 563–568, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1519-69842004000400003>>. Acesso em: jul. 2024.
- BITTENCOURT, J. V. M.; SEBBENN, A. M. Patterns of pollen and seed dispersal in a small, fragmented population of the wind-pollinated tree *Araucaria angustifolia* in southern Brazil. **Heredity**, [s. l.], v. 99, n. 6, p. 580–591, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6801019>>. Acesso em: jul. 2024.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília - DF. Embrapa, vol 5. 2014.
- CASTILLA, A. R.; POPE, N. S.; O’CONNELL, M. C.; RODRÍGUEZ, M. F.; TREVIÑO, L.; MURGAS, A. S.; JHA, S. Adding landscape genetics and individual traits to the ecosystem function paradigm reveals the importance of species functional breadth. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 114, n. 48, p. 12761–12766, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1619271114>>. Acesso em: jul. 2025.
- CRUZAN, M. B.; HENDRICKSON, E. C. Landscape Genetics of Plants: Challenges and Opportunities. **Plant Communications**, [s. l.], v. 1, n. 6, p. 100100–100100, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.xplc.2020.100100>>. Acesso em: jul. 2025.
- DAMASCENO, A. G. **Abelhas (Hymenoptera: Apoidea) visitantes das inflorescências da sucupira-branca, *Pterodon emarginatus* Vogel (Leguminosae: Papilionoideae) e do baru, *Dipteryx alata* Vogel (Leguminosae: Papilionoideae) em área de cerrado em Brasilândia de Minas-MG**. 1998. 71 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1998.
- GIAROLA, L. R. **Explorando a biodiversidade brasileira e os conhecimentos populares: desenvolvimento de formulação para uso tópico com extrato de *Pterodon pubescens* Benth. (Sucupira)**. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- GREENLEAF, S. S.; WILLIAMS, N. M.; WINFREE, R.; KREMEN, C. Bee foraging ranges and their relationship to body size. **Oecologia**, [s. l.], v. 153, n. 3, p. 589–596, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00442-007-0752-9>>. Acesso em: jul. 2024.
- GUERIN, N.; GANDARA, F. B.; CIANCIARUSO, M. V.; SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Pure or mixed plantings equally enhance the recovery of the Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 484, p. 118932–118932, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118932>>. Acesso em: jul. 2025.

HAMRICK, J. L.; MURAWSKI, D. A.; NASON, J. D. The influence of seed dispersal mechanisms on the genetic structure of tropical tree populations. **Vegetatio**, [s. l.], n. 1, p. 281–297, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/bf00052230>>. Acesso em: jun. 2025.

HOWE, H. F.; SMALLWOOD, J. A. Ecology of Seed Dispersal. **Annual Review of Ecology and Systematics**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 201–228, 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.es.13.110182.001221>>. Acesso em: maio. 2025.

JHA, S.; DICK, C. W. Native bees mediate long-distance pollen dispersal in a shade coffee landscape mosaic. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 107, n. 31, p. 13760–13764, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1002490107>>. Acesso em: jun. 2025.

KAGEYAMA, P. Y.; SEBBENN, A. M.; RIBAS, L. A.; GANDARA, F. B.; CASTELLEN, M.; PERECIM, M. B.; VENCOSKY, R. **Diversidade genética em espécies arbóreas tropicais de diferentes estágios sucessionais por marcadores genéticos**, 2003.

KAMM, U.; GUGERLI, F.; ROTACH, P.; EDWARDS, P. J.; HOLDEREGGER, R. Open areas in a landscape enhance pollen-mediated gene flow of a tree species: evidence from northern Switzerland. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 903–911, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10980-010-9468-z>>. Acesso em: jul. 2023.

KWAK, M. M.; VELTEROP, O.; ANDEL, J. Van. Pollen and gene flow in fragmented habitats. **Applied Vegetation Science**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 37–54, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/1479084>>. Acesso em: jul. 2025.

LEVIN, D. A. Dispersal Versus Gene Flow in Plants. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 233–233, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/2398797>>. Acesso em: jul. 2025.

LIMA, V. F. M. De; FRANCESCHINELLI, E. V.; ROCHA, D. M. S. Da; GONÇALVES, A. R.; ASSIS, I. M. De; MORAIS, J. M.; SOARES, T. N. Genetic and reproductive evidence of incomplete isolations barriers between *Pterodon emarginatus* and *Pterodon pubescens* (Leguminosae, Papilionoideae). **Acta Botanica Brasilica**, [s. l.], v. 37, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1677-941x-abb-2022-0253>>. Acesso em: maio. 2025.

LIMA, S. L. **Filogeografia de *Pterodon emarginatus* e *Pterodon pubescens* (Leguminosae)**. 2019. 119 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

LIRA-MARTINS, D.; NASCIMENTO, D. L.; ABRAHÃO, A.; COSTA, P. de B.; D'ANGIOLI, A. M.; VALEZIO, É. V.; ROWLAND, L.; OLIVEIRA, R. S. Soil properties and geomorphic processes influence vegetation composition, structure, and function in the Cerrado Domain. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 476, p. 549–588, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05517-y>>. Acesso em: maio. 2026.

LOVELESS, M. D.; HAMRICK, J. L. Ecological Determinants of Genetic Structure in Plant Populations. **Annual Review of Ecology and Systematics**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 65–95, 1984. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.es.15.110184.000433>>. Acesso em: jul. 2025.

MANEL, Stéphanie; SCHWARTZ, Michael K.; LUIKART, Gordon; TABERLET, Pierre. **Landscape genetics: combining landscape ecology and population genetics**. *Trends in*

Ecology & Evolution, v. 18, n. 4, p. 189–197, abr. 2003. DOI: 10.1016/S0169-5347(03)00008-9

MANOEL, R. O.; ROSSINI, B. C.; CORNACINI, M. R.; MORAES, M. L. T. De; CAMBUIM, J.; ALCANTARA, M. A. M.; SILVA, A. M. Da; SEBBENN, A. M.; MARINO, C. L.; ROSSINI, B. C.; CORNACINI, M. R.; MORAES, M. L. T.; ALCANTARA, M. A. M.; SILVA, A. M.; SEBBENN, A. M.; MARINO, C. L. Landscape barriers to pollen and seed flow in the dioecious tropical tree *Astronium fraxinifolium* in Brazilian savannah. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 16, n. 8, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255275>>. Acesso em: jul. 2025.

MASCARO, U. C. P.; TEIXEIRA, D. F.; GILBERT, B. Avaliação da sustentabilidade da coleta de frutos de “sucupira branca” (*Pterodon emarginatus* Vog.) após queda espontânea. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 23–25, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.70151/sh4vyr10>>. Acesso em: maio. 2023.

MORAES, M. A. De; MORAES, M. A.; KUBOTA, T. Y. K.; ROSSINI, B. C.; MARINO, C. L.; FREITAS, M. L. M.; MORAES, M. L. T.; MORAES, M. L. T.; SILVA, A. M. Da; CAMBUIM, J.; SEBBENN, A. M. Long-distance pollen and seed dispersal and inbreeding depression in *Hymenaea stigonocarpa* (Fabaceae: Caesalpinioideae) in the Brazilian savannah. **Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 8, n. 16, p. 7800–7816, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/ece3.4253>>. Acesso em: jul. 2025.

NATHAN, R.; MULLER-LANDAU, H. C. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. **Trends in Ecology & Evolution**, [s. l.], v. 15, n. 7, p. 278–285, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(00\)01874-7](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(00)01874-7)>. Acesso em: jul. 2024.

NIELSEN, R.; SLATKIN, M. LIKELIHOOD ANALYSIS OF ONGOING GENE FLOW AND HISTORICAL ASSOCIATION. **Evolution**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 44–50, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00006.x>>. Acesso em: jul. 2025.

O’CONNELL, M. C.; CASTILLA, A. R.; LEE, L. X.; JHA, S. Bee movement across heterogeneous tropical forests: multi-paternal analyses reveal the importance of neighborhood composition for pollen dispersal. **Biotropica**, [s. l.], v. 50, n. 6, p. 908–918, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/btp.12603>>. Acesso em: jul. 2025.

ODDOU-MURATORIO, S.; BONTEMPS, A.; KLEIN, E. K.; CHYBICKI, I. J.; VENDRAMIN, G. G.; SUYAMA, Y. Comparison of direct and indirect genetic methods for estimating seed and pollen dispersal in *Fagus sylvatica* and *Fagus crenata*. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 259, n. 11, p. 2151–2159, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.001>>. Acesso em: jun. 2025.

OLIVEIRA, P. E.; GIBBS, P. E. Reproductive biology of woody plants in a cerrado community of Central Brazil. **Flora**, [s. l.], v. 195, n. 4, p. 311–329, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0367-2530\(17\)30990-8](https://doi.org/10.1016/s0367-2530(17)30990-8)>. Acesso em: jul. 2023.

OLIVIERI, I.; COUVET, D.; SLATKIN, M. Allocation of Reproductive Effort in Perennial Plants Under Pollen Limitation. **The American Naturalist**, [s. l.], v. 144, n. 3, p. 373–394, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086/285682>>. Acesso em: jul. 2025.

PERES, M. K. **ESTRATÉGIAS DE DISPERSÃO DE SEMENTES NO BIOMA CERRADO: CONSIDERAÇÕES ECOLÓGICAS E FILOGENÉTICAS**. Tese (Doutorado em Botânica), Universidade de Brasília, Brasília DF, Brasil, 2016.

PINTO, M. V. P. **Diversidade e estrutura genética em populações naturais de *Pterodon emarginatus* Vogel (leguminosae)**. 2017. 50 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

PINTO, R. B.; FRANCISCO, V. M. da C. R.; MANSANO, V. de F. Morphological study of fruits, seeds and embryo in the tropical tribe Dipterygeae (Leguminosae-Papilionoideae). **Rodríguezia**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 89–97, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s2175-78602014000100007>>. Acesso em: maio. 2025.

RAYFIELD, B.; FORTIN, M.; FALL, A. Connectivity for conservation: a framework to classify network measures. **Ecology**, [s. l.], v. 92, n. 4, p. 847–858, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1890/09-2190.1>>. Acesso em: jul. 2024.

SANO, S.; ALMEIDA, S. P. De; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado: ecologia e flora** vol. 1 e 2. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.

SAUL, R. A. De. **Caracterização de remanescente florestal em uma região de ecótono entre o noroeste paulista e o bolsão Sul Mato grossense: o caso do faveiro (*Pterodon pubescens* (Benth.) Benth.) - Fabaceae**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira/UNESP, 2023.

SAVOLAINEN, O.; PYHÄJÄRVI, T.; KNÜRR, T. Gene Flow and Local Adaptation in Trees. **Annual Review of Ecology Evolution and Systematics**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 595–619, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095646>>. Acesso em: jul. 2025.

SCHEEPENS, J. F.; FREI, E. S.; ARMBRUSTER, G. F. J.; STÖCKLIN, J. Pollen dispersal and gene flow within and into a population of the alpine monocarpic plant *Campanula thyrsoides*. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 110, n. 7, p. 1479–1488, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/aob/mcs131>>. Acesso em: jun. 2025.

SCHUPP, E. W.; JORDANO, P.; GÓMEZ, J. M. Seed dispersal effectiveness revisited: a conceptual review. **New Phytologist**, [s. l.], v. 188, n. 2, p. 333–353, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03402.x>>. Acesso em: ago. 2024.

SEXTON, J. P.; HANGARTNER, S.; HOFFMANN, A. A. GENETIC ISOLATION BY ENVIRONMENT OR DISTANCE: WHICH PATTERN OF GENE FLOW IS MOST COMMON? **Evolution**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 1–15, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/evo.12258>>. Acesso em: jul. 2024.

SLATKIN, M. RARE ALLELES AS INDICATORS OF GENE FLOW. **Evolution**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 53–65, 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1985.tb04079.x>>. Acesso em: jul. 2024.

SLATKIN, M. Gene Flow and the Geographic Structure of Natural Populations. **Science**, [s. l.], v. 236, n. 4803, p. 787–792, 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1126/science.3576198>>. Acesso em: jul. 2024.

SLATKIN, M. Isolation by Distance in Equilibrium and Non-Equilibrium Populations. **Evolution**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 264–264, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.2307/2410134>>. Acesso em: nov. 2025.

SOARES, T. N.; CHAVES, L. J.; TELLES, M. P. de C.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; RESENDE, L. V. Distribuição espacial da variabilidade genética intrapopulacional de *Dipteryx alata*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 1151–1158, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2008000900008>>. Acesso em: maio. 2025.

TISCHENDORF, L.; FAHRIG, L. On the usage and measurement of landscape connectivity. **Oikos**, [s. l.], v. 90, n. 1, p. 7–19, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x>>. Acesso em: jul. 2025.

WARD, M.; DICK, C. W.; GRIBEL, R.; LOWE, A. J. To self, or not to self... A review of outcrossing and pollen-mediated gene flow in neotropical trees. **Heredity**, [s. l.], v. 95, n. 4, p. 246–254, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800712>>. Acesso em: jul. 2025.

WHITE, G. M.; BOSCHER, D.; POWELL, W. Increased pollen flow counteracts fragmentation in a tropical dry forest: An example from *Swietenia humilis* Zuccarini. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 99, n. 4, p. 2038–2042, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1073/pnas.0426499999>>. Acesso em: jun. 2025.

WRIGHT, S. ISOLATION BY DISTANCE. **Genetics**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 114–138, 1943. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/genetics/28.2.114>>. Acesso em: jul. 2024.

3) CAPÍTULO 3 - MAPEAMENTO DO NICHOS ECOLÓGICO E DA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE *PTERODON PUBESCENS* (BENTH.) BENTH. (FABACEAE) FRENTE ÀS PROJEÇÕES DO CLIMA FUTURO.

RESUMO

A presente investigação visou à modelagem do nicho ecológico de *Pterodon pubescens* no bioma Cerrado e nas áreas de transição com os demais biomas circundantes, com base exclusiva em variáveis climáticas, bioclimáticas e topográficas. Compilou-se uma base de 909 indivíduos de *Pterodon pubescens*, compreendendo registros de ocorrência provenientes de herbários virtuais, coletas de campo e da literatura científica, submetida a filtragem espacial e remoção de dados discrepantes (outliers). Selecionaram-se quatro variáveis ambientais, abordando aspectos bioclimáticos, temperatura máxima, relevo e precipitação. A modelagem foi realizada mediante a aplicação de algoritmos preditivos de distribuição de espécies, os quais integraram múltiplas variáveis ambientais, com validação cruzada espacial e replicações *bootstrap*, sendo o desempenho avaliado por meio de $AUC > 0,8$ (*Area Under the Curve*) e TSS (*True Skill Statistic*) máximo, o que pode sugerir uma alta acurácia preditiva. Projeções para os anos de 2050 e 2099, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways*), fundamentadas no CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), permitiram a análise da dinâmica potencial de distribuição futura da espécie. Por conseguinte, procedeu-se ao mapeamento de áreas prioritárias para a conservação *in situ* e a restauração, fundamentando-se na adequação de habitat e na conectividade. Os resultados obtidos podem contribuir para a orientação de estratégias de conservação e saneamento regulatório, o que, de certa forma, poderá assegurar a persistência genética da espécie diante das alterações climáticas.

Palavras-chave: modelagem preditiva; espécies nativas; mudanças climáticas.

ABSTRACT

This study aimed to model the ecological niche of *Pterodon pubescens* in the Cerrado biome and its transition zones with surrounding biomas, based exclusively on climatic, bioclimatic, and topographic variables. A database of 909 *Pterodon pubescens* individuals was compiled, comprising occurrence records from virtual herbaria, field collections, and scientific literature, which were subjected to spatial filtering and outlier removal. Four environmental variables were selected, covering bioclimatic aspects, maximum temperature, relief, and precipitation. Modeling was performed using predictive species distribution algorithms that integrated multiple environmental variables, with spatial cross-validation and bootstrap replications; model performance was evaluated using $AUC > 0.8$ (Area Under the Curve) and maximum TSS (True Skill Statistic), indicating high predictive accuracy. Projections for the years 2050 and 2099 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (Representative Concentration Pathways), based on CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), allowed for the analysis of the species' potential future distribution dynamics. Consequently, priority areas for *in situ* conservation and restoration were mapped, grounded in habitat suitability and connectivity. The results obtained may contribute to guiding conservation strategies and regulatory frameworks, thereby helping to ensure the genetic persistence of the species in the face of climate change.

Keywords: predictive modeling; native species; climate change.

3.1- INTRODUÇÃO

O gênero *Pterodon* (Fabaceae) compreende espécies endêmicas do Cerrado brasileiro, cujas populações estão sujeitas a pressões crescentes em virtude da alteração de uso do solo e da fragmentação de habitat (Klink; Machado, 2005). Dentre elas, *Pterodon pubescens* (Figura 17) possui, notavelmente, relevância em virtude das suas aplicações farmacológicas (Góes et al., 2020), uso madeireiro, além de ser utilizada em projetos de restauração.

Figura 17: *Pterodon pubescens* no campo.



Fonte: Arquivo do autor.

A elucidação dos determinantes ambientais de sua distribuição pode ser considerada fundamental para subsidiar políticas de conservação e manejo sustentável. A modelagem de

nicho ecológico, por sua vez, apresenta-se como um instrumento robusto capaz de prever a distribuição de espécies, de caracterizar os seus requisitos ambientais e de projetar respostas frente a cenários de mudanças climáticas; sua aplicabilidade é vasta na conservação da flora (Chevalier et al., 2022). Essa abordagem, a rigor, pode ser considerada crucial para a mitigação dos impactos das alterações climáticas na biodiversidade, uma vez que as modificações nos padrões climáticos, presumivelmente, influenciam diretamente os nichos ecológicos das espécies (Alves-de-Lima et al., 2025). Nesse contexto, modelos preditivos — a exemplo daqueles gerados pelo *software* MaxEnt, que, inclusive, tem demonstrado alta acurácia e notável tolerância a amostras de tamanho reduzido —, poderiam constituir uma ferramenta eficaz para a projeção da distribuição futura de espécies em distintos cenários climáticos (Hernández et al., 2006). Esta metodologia, por conseguinte, viabiliza a avaliação da adequação de habitat para as espécies vegetais ao longo de um continuum temporal, contemplando as condições pretéritas e as futuras, aspecto intrínseco para o desenvolvimento de estratégias de adaptação. A compreensão das interações complexas entre fatores climáticos e bioclimáticos assume particular relevância para o Cerrado, dada a função significativa que o solo exerce na formação da vegetação, a qual complementa a influência climática na determinação dos nichos ecológicos (BUENO et al., 2018). Adicionalmente, a devastação do bioma Cerrado, impulsionada por atividades antrópicas, notadamente a agricultura e o desmatamento, constitui uma ameaça suplementar às populações de espécies vegetais; este processo acarreta a alteração da composição das comunidades vegetais e animais e, consequentemente, impacta diretamente a polinização e a dispersão de sementes (Kuhlmann; Ribeiro, 2016).

A subfamília Papilionoideae, à qual pertence o gênero *Pterodon*, é composta por diversas tribos; nesse contexto, *Pterodon* configura-se como um dos táxons objeto de maior escrutínio taxonômico. Abrange quatro espécies nativas brasileiras: *Pterodon abruptus*, *Pterodon cipoensis*, *Pterodon emarginatus*, e *Pterodon pubescens* (Carvalho; Cardoso; Lima, 2025). Dada a relevância de seu potencial econômico, com usos medicinais e madeireiros, o estudo dessas espécies pode revestir-se de considerável interesse científico (LIMA, 2019). A fenologia dessas espécies, voltada à elucidação das respostas fisiológicas dos organismos a múltiplos fatores ambientais, notadamente os climáticos, é de vital importância para a compreensão das interações biológicas entre fauna e flora, tais como a polinização e a dispersão de sementes (Morellato et al., 2016). Ademais, estudos em fragmentos de cerrado sugerem que não há variações horizontais ou verticais significativas na distribuição dos sistemas de polinização, em virtude da fisionomia mais aberta da vegetação (Martins; Batalha, 2007). Aprofundar a compreensão do funcionamento biogeoquímico dos ecossistemas do Cerrado

pode revelar-se fundamental, visto que a alteração de regimes de fogo e a conversão de habitats para a agricultura impactam diretamente esses processos (Bustamante et al., 2012).

A conceituação de nicho ecológico reveste-se de fundamental importância; ao abranger as condições abióticas necessárias à sobrevivência de uma espécie, tal constructo pode ser abordado pela aplicação de modelos de distribuição de espécies (Maximum Entropy [MaxEnt], Bioclimatic [BIOCLIM], dentre outros) (Jiménez-Valverde; Lobo; Hortal, 2008). Esses modelos relacionam registros de ocorrência a variáveis ambientais como temperatura, precipitação e relevo para gerar mapas de adequação potencial, permitindo a distinção entre as distribuições “potencial” e “real” (Jiménez-Valverde; Lobo; Hortal, 2008). A modelagem de nicho pode viabilizar a identificação de áreas ideais para plantios, a delimitação de zonas prioritárias de conservação e a projeção de impactos decorrentes de mudanças climáticas sobre a biodiversidade (Briceño et al., 2020). Embora a metodologia em questão possa apresentar considerável relevância ao Cerrado um *hotspot* de biodiversidade ela também se mostra indispensável a áreas de ecótono, onde as alterações climáticas e a modificação do uso do solo representam ameaças significativas à flora nativa, podendo ensejar a redução da abundância e diversidade de espécies (Velazco et al., 2019). Para espécies como *Pterodon pubescens*, que possuem valor farmacológico e ecológico, a perda de habitat pode comprometer não apenas a diversidade genética, mas também o fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais (Rodrigues; Machado, 2012), (Saul, 2023). A conservação eficaz de *Pterodon pubescens*, no Cerrado e em áreas de Mata Atlântica, Caatinga e Amazônia onde sua ocorrência também é identificada (FORZZA et al., 2010), demanda uma compreensão aprofundada de seu nicho ecológico sob cenários de uso da terra e mudanças climáticas. Isso pode ser alcançado através de análises detalhadas de distribuição geográfica e fenologia (Velazco et al., 2019), (Ponti; Sannolo, 2022).

O emprego exclusivo, no presente estudo, de variáveis climáticas, topográficas e bioclimáticas visou: (i) a caracterização do nicho ecológico de *Pterodon pubescens*; (ii) a avaliação do desempenho dos modelos mediante métricas de AUC e TSS; e (iii) a projeção de potenciais alterações na distribuição espacial até 2100, sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 do CMIP6. Com isso, buscou-se o provimento de subsídios para a proteção de populações naturais, o reflorestamento dirigido e a mitigação de perdas genéticas em face do aquecimento global. A avaliação da eficácia de correlativos de nicho ecológico temporais afigura-se crucial para a compreensão de como esses modelos podem prever a distribuição de espécies ameaçadas em um contexto de rápidas alterações climáticas, especialmente aquelas com dados de

distribuição limitados (Dolci; Peruzzi, 2022; Brunton et al., 2023). Adicionalmente, uma compreensão aprofundada da história paleoclimática do Cerrado pode ser associada a esta questão, configurando-se como essencial para contextualizar a evolução desses nichos, dado que flutuações climáticas significativas, com aumento de temperatura e redução de umidade, foram registradas durante o Pleistoceno Superior e Holoceno, moldando a distribuição e adaptação da flora (Costa et al., 2022).

3.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo de modelagem de nicho ecológico foi conduzido para a *Pterodon pubescens*, abrangendo sua distribuição no bioma Cerrado e na faixa de transição com a Mata Atlântica, Caatinga e Amazônia.

Inicialmente, procedeu-se à compilação de um banco de dados de ocorrências a partir de quatro fontes, a saber: herbários virtuais (SpeciesLink, GBIF), levantamentos de campo (2018–2024) em Minas Gerais, Goiás e Bahia; registros extraídos de teses e artigos da Embrapa, ESALQ, UNESP e UFPR; e levantamentos efetuados in loco nos municípios de Selvíria (MS), Paranaíba (MS), Lagoa Santa (GO), Suzanápolis (SP) e Aparecida D'Oeste (SP). A subsequente submissão desses pontos a uma filtragem espacial, empregando o software QGIS 3.4.4, objetivou a remoção de duplicatas e de registros com distância inferior a um quilômetro (1 km), bem como a exclusão de pontos com incerteza superior a cinco quilômetros (5 km). Registros anômalos — concernentes a ocorrências isoladas em plantios fora da área nativa — foram identificados e, subsequentemente, suprimidos, culminando em 909 indivíduos de *Pterodon pubescens*.

A caracterização ambiental pautou-se na utilização de um conjunto de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), notadamente o banco de dados AMBDATA – Variáveis Ambientais para Modelagem de Distribuição de Espécies. Este conjunto compreendia: precipitação (mm), temperatura máxima (°C), variáveis bioclimáticas e elevação, com uma resolução espacial de um quilômetro (1 km).

A modelagem de distribuição foi realizada com o *software* MaxEnt (ELITH et al., 2010). Para a avaliação da qualidade e da confiabilidade de modelos preditivos, empregou-se a análise de Omissão e Comissão em Modelagem de Distribuição de Espécies (SDM) e Modelagem de Nicho Ecológico (ENM), na qual a Omissão, ou Erro de Omissão, ocorre quando o modelo falha em prever uma ocorrência real; por exemplo, a espécie está presente em um

ponto de campo, mas o modelo pode indicar “ausência”, o que sugere uma subestimação. A Comissão (Erro de Comissão) ocorre quando o modelo prediz presença onde não existe: o modelo mostra adequabilidade, mas não há ocorrência real registrada, indicando superestimação (Jiménez-Valverde; Lobo; Hortal, 2008). O desempenho de cada réplica foi avaliado pelo AUC (Área sob a Curva), o qual mensura a capacidade do modelo em distinguir presenças de ausências (ou presença de pseudo-ausência). Baseia-se na curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), que plota: Eixo Y = Sensibilidade (taxa de verdadeiros positivos), Eixo X = 1 – Especificidade (taxa de falsos positivos). O AUC corresponde à probabilidade de que o modelo atribua maior adequabilidade a uma presença verdadeira do que a uma ausência (ZHANG et al., 2023). Seus intervalos de valores são:

$AUC = 0,5 \rightarrow$ desempenho aleatório, equivalente a uma classificação estocástica sem poder preditivo.

$0,7-0,8 \rightarrow$ modelo aceitável.

$0,8-0,9 \rightarrow$ modelo bom.

$0,9 \rightarrow$ modelo excelente.

Adicionalmente, o *True Skill Statistic* (TSS) foi empregado, visto que, de forma análoga ao AUC, sua quantificação é gerada pelo MaxEnt v3.4.4; o TSS avalia o desempenho do modelo ao considerar tanto as presenças previstas corretamente (sensibilidade) quanto as ausências previstas corretamente (especificidade), podendo, em tese, ser expresso da seguinte forma: (Allouche; Tsoar; Kadmon, 2006)

$$TSS = \text{Sensibilidade} + \text{Especificidade} - 1$$

em que: o valor da sensibilidade representa a proporção de presenças observadas que foram corretamente classificadas, enquanto a especificidade indica a proporção de ausências corretamente identificadas, variando o TSS de -1 a +1 (Zhang et al., 2023).

$TSS = +1 \rightarrow$ predição perfeita.

$TSS = 0 \rightarrow$ desempenho aleatório.

$TSS < 0 \rightarrow$ pior que aleatório.

Com base nas análises do MaxEnt, realizou-se o teste Jackknife de importância de variáveis para a compreensão de cada variável ambiental, no qual o modelo testa cada variável da seguinte maneira:

1- Variável isolada

- O ajuste do modelo é realizado mediante a utilização exclusiva desta variável.
- Mede-se a capacidade desta variável, isoladamente, em elucidar a distribuição da espécie.

2- Exclusão da variável

- O modelo é ajustado mediante a exclusão deliberada desta variável.
- Avalia-se a magnitude da perda de informação decorrente da sua ausência, o que pode indicar sua contribuição única ao modelo.

3- Todas as variáveis

- O modelo é ajustado com o conjunto completo de variáveis.
- Esta configuração pode servir de referência comparativa frente às demais condições.

Para a elaboração de cenários futuros, empregaram-se as projeções climáticas do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) — referentes aos anos de 2041–2060 e 2081–2100 sob os cenários *Representative Concentration Pathways* (RCP) 4.5 e 8.5 — mantendo-se, presumivelmente, o mesmo conjunto de variáveis de entrada.

Por fim, os mapas de adequação atuais e futuros foram integrados a unidades de conservação e áreas de restauração potencial, aplicando-se análise de interligação em QGIS (via *plugin Circuitscape - Python 3*), o que pode facilitar a identificação de zonas prioritárias para conservação *in situ* e novos plantios de *Pterodon pubescens*. Todos os *scripts* e camadas ambientais estão disponíveis em repositório público para garantir a reprodutibilidade do estudo (INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

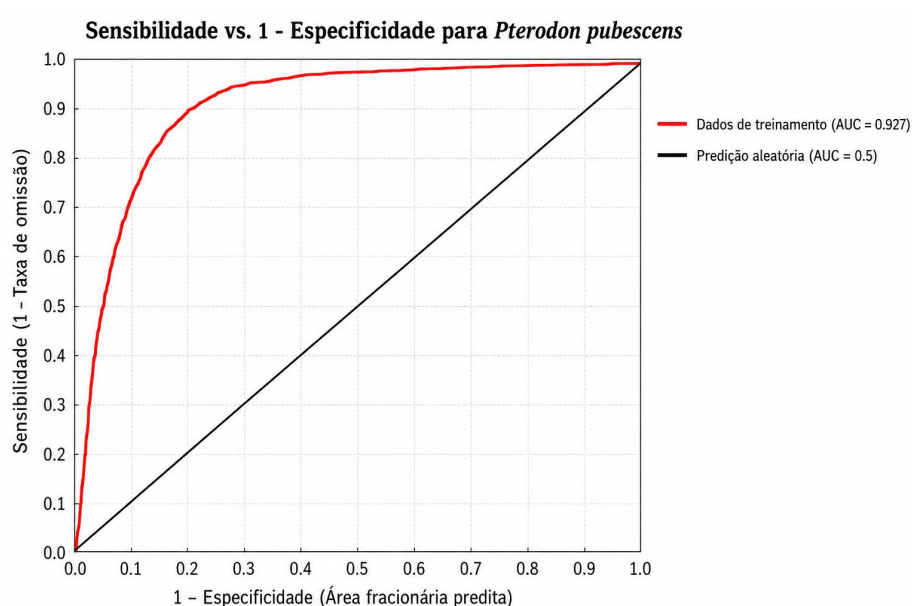
3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, adotou-se a modelagem de nicho ecológico por meio do *Maximum Entropy* (MaxEnt), ferramenta que pode auxiliar na previsão da distribuição de espécies com base em variáveis climáticas e registros de ocorrência, a fim de estimar as regiões de ocorrência natural de *Pterodon pubescens* no Cerrado brasileiro e em zonas de transição. O algoritmo delineou a correlação entre os registros de ocorrência conhecidos e as variáveis climáticas-

chave especificamente temperatura máxima, precipitação, relevo e condições bioclimáticas com o intuito de gerar mapas de adequação de habitat. A implementação de tais metodologias viabiliza a identificação de áreas que apresentam condições ambientais análogas às dos locais de ocorrência confirmada, o que permite inferir a distribuição potencial da espécie (Jiménez-Valverde; Lobo; Hortal, 2008). A validação desses modelos é crucial, empregando-se métricas de avaliação, tais como a Área Sob a Curva ROC e a análise em TSS para avaliar a capacidade preditiva e a robustez das projeções frente a dados independentes (Ali et al., 2023)

Na análise da temperatura máxima (Tmax), observa-se um valor de $AUC = 0.927$, permitindo inferir que a curva se distancia substancialmente da linha de aleatoriedade (diagonal). O modelo sugere, assim, um excelente desempenho preditivo, com elevada capacidade de diferenciação entre áreas adequadas e inadequadas. Este parâmetro climático constitui uma fundamentação robusta para a modelagem, elucidando a distribuição da espécie. A temperatura máxima correlaciona-se com o estresse térmico e com os processos de transpiração da espécie. Em regiões muito quentes, há aumento da evapotranspiração, o que pode limitar o estabelecimento de plântulas e afetar o balanço hídrico das árvores adultas (Will et al., 2013). Para *Pterodon pubescens*, a tolerância às altas temperaturas é importante, mas há um limite: temperaturas extremas reduzem a adequabilidade de habitats (Figura 18).

Figura 18: Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para o variável Temperatura máxima (Tmax).



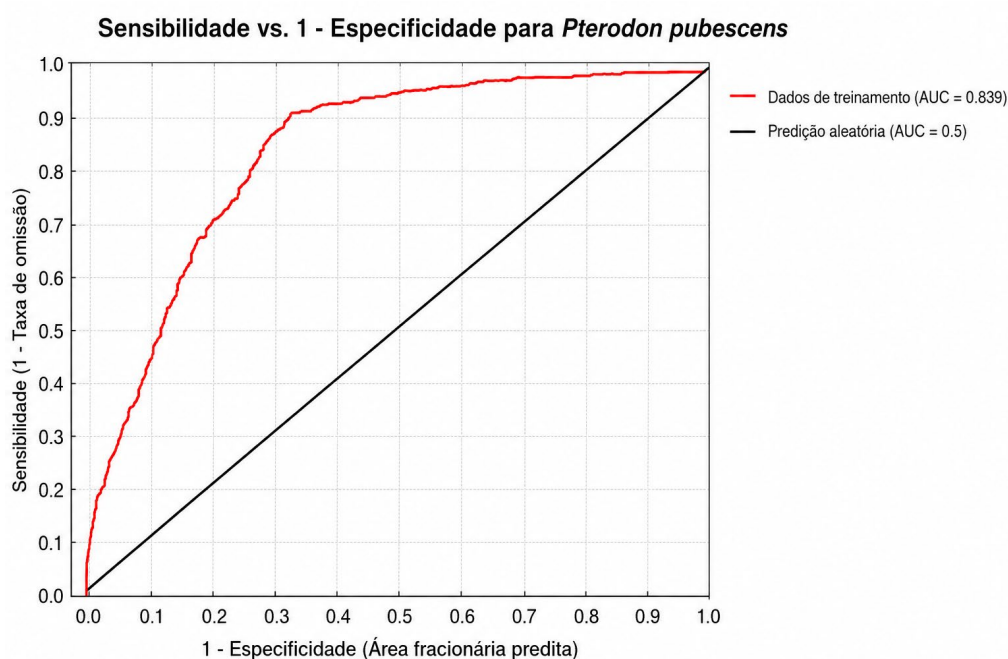
Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor de $AUC = 0.839$ (Figura 19) sugere que a altitude e o relevo exercem influência sobre a ocorrência, embora não aparentem constituir os determinantes primários. Tais resultados podem refletir efeitos indiretos como o microclima, a drenagem e a disponibilidade hídrica que, em condições extremas, mostram-se significativos para a manutenção de refúgios de sobrevivência para a espécie. O relevo modula a distribuição da espécie mediante os seguintes fatores:

- **Altitude:** condiciona a temperatura e a precipitação local.
- **Declividade:** influencia os processos de drenagem e erosão.
- **Exposição solar:** modula o microclima e a disponibilidade hídrica edáfica.

No bioma, *Pterodon pubescens* apresenta ocorrência em diversas fitofisionomias, nas quais o relevo aparenta atuar como modulador microambiental (Figura 19). Embora o relevo não pareça determinar a ocorrência em larga escala, ele contribui para a diferenciação de áreas adequadas em nível regional e local, refinando a distribuição observada.

Figura 19: Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para o elemento Relevo (Topografia).



Fonte: Elaborado pelo autor.

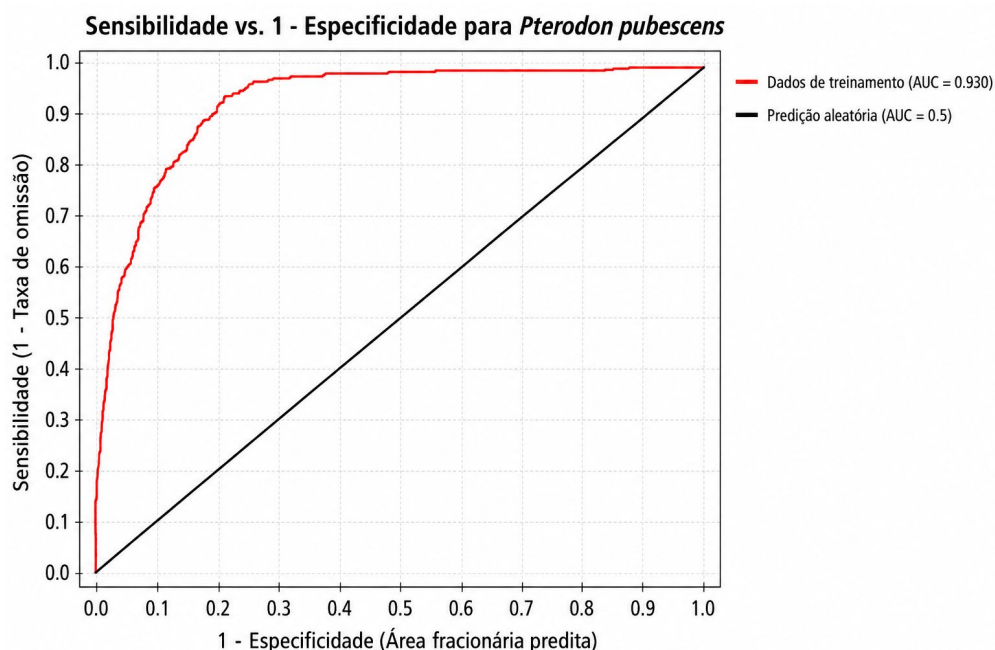
A variável precipitação (Figura 20), exibe um desempenho robusto ($AUC = 0.930$), assemelhando-se aos valores observados para a temperatura máxima; essa convergência sugere

re que o regime pluviométrico pode exercer influência significativa sobre a fenologia, o estabelecimento de plântulas e a disponibilidade hídrica, corroborando a relevância ecológica dessa variável para a espécie.

A precipitação parece regular a produção de flores e frutos (Oliveira; Marquis, 2002), o estabelecimento de plântulas, processo frequentemente limitado por períodos secos prolongados (Ramos et al., 2017), e a distribuição de polinizadores e dispersores, cuja ocorrência pode ser sensível ao regime pluviométrico (Hofmann, 2024).

Para *Pterodon pubescens*, a dependência da sazonalidade hídrica parece acentuada, tendo em vista a ocupação, pela espécie, de ambientes caracterizados pela alternância entre períodos de seca rigorosa e precipitação abundante. A precipitação pode exibir relevância comparável à temperatura, figurando como um elemento central na dinâmica reprodutiva e na regeneração natural da espécie (Figura 20).

Figura 20: Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para o elemento Precipitação (Prec.).



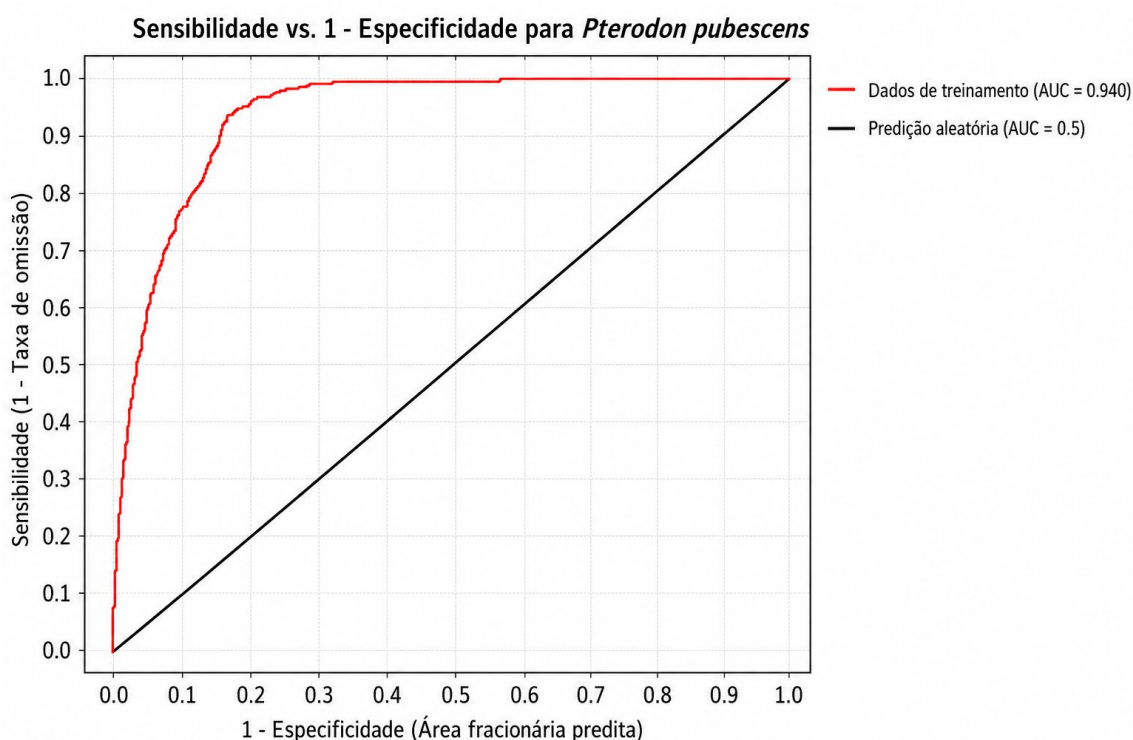
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação às variáveis bioclimáticas, o valor de AUC de 0,940 sugere um desempenho superior dentre os modelos analisados. A sensibilidade observada parece indicar que variáveis derivadas a exemplo da “média do trimestre mais frio” ou da “precipitação da estação

seca” podem fornecer informações biologicamente mais relevantes. Consequentemente, o conjunto Bioclimático aparenta ser o mais preditivo, capturando padrões-chave ecológicos da espécie (Figura 21).

As variáveis bioclimáticas parecem capturar a sazonalidade fator essencial no Cerrado, onde a alternância entre a estação seca e a estação chuvosa pode definir a dinâmica populacional das espécies (Bustamante et al., 2012). Adicionalmente, a temperatura do mês mais frio sugere atuar como um preditor relevante de limites altitudinais e latitudinais (Dambros et al., 2020).

Figura 21: Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para o elemento Variáveis Bioclimáticas (Bio).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Visto que tais variáveis sintetizam padrões climáticos críticos, a elucidação da distribuição parece ser mais robusta do que aquela baseada em temperaturas ou pluviosidade mensais isoladas. O conjunto Bioclimático aparenta possuir elevada capacidade explicativa, ao traduzir fatores ecológicos sazonais associados à fisiologia e fenologia da espécie (Pozo-Gómez et al., 2021).

A integração de informações históricas e preditivas é fundamental para a delimitação de estratégias de conservação mais eficazes, especialmente em um contexto de rápidas alterações climáticas globais (Chevalier et al., 2022). Além disso, a análise comparativa entre as projeções de cenários futuros e a distribuição atual permite antecipar os impactos das mudanças climáticas, indicando áreas de retração ou expansão do nicho ecológico de cada espécie e fornecendo subsídios para o planejamento de corredores ecológicos ou a realocação de populações (Chevalier et al., 2022). Modelos preditivos em ecologia, como aqueles utilizados neste estudo, parecem demonstrar um potencial significativo na previsão de habitats adequados, exibindo especificidades elevadas; tal desempenho corrobora observações prévias de aplicações análogas (Fernandes et al., 2020). Apesar da alta especificidade, a sensibilidade desses modelos pode ser limitada, especialmente para espécies com distribuições restritas ou dados esparsos, indicando a necessidade de abordagens complementares ou maior refinamento dos dados de ocorrência. Isso ressalta a importância de integrar dados de observação de campo com os modelos para melhorar a precisão, especialmente em regiões tropicais com alta riqueza de espécies e dados de inventário frequentemente esparsos (Moonlight et al., 2020).

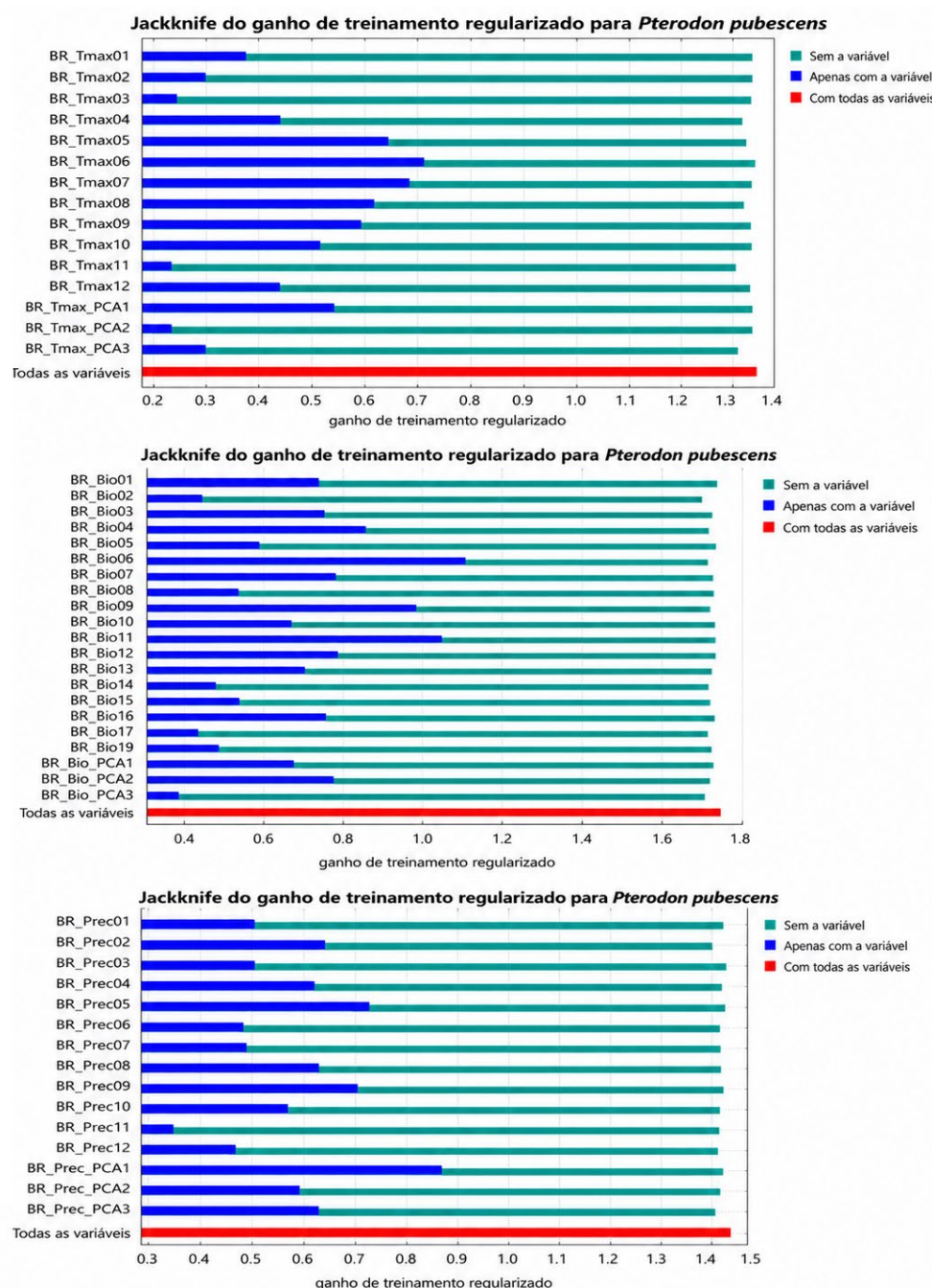
Adicionalmente, emprega-se a análise de Omissão/Comissão, representada graficamente; esta ferramenta parece elucidar a relação de equilíbrio entre sensibilidade e área prevista sob distintos limiares de corte, complementando, assim, a curva ROC (Jiménez-Valverde; Lobo; Hortal, 2008).

O teste Jackknife de ganho de treino regularizado para *Pterodon pubescens*, aplicado às variáveis temperatura máxima (Tmax), variáveis bioclimáticas (Bio) e precipitação (Prec), foi utilizado como procedimento estatístico para avaliar a importância das variáveis ambientais no modelo adotado (Elith et al., 2010). Sugere-se que a interpretação dos resultados derivados do MaxEnt proceda, de maneira criteriosa, conforme o delineado (Figura 22):

- “*With only variable*” (azul escuro): a execução do modelo restringe-se estritamente à variável em questão, procedimento que elucida a capacidade explicativa isolada dessa variável sobre a distribuição da espécie.
- “*Without variable*” (azul claro ou verde claro): o modelo é executado mediante a exclusão da variável, permitindo a verificação da magnitude da perda informacional resultante de sua ausência.
- “*With all variables*” (vermelho): esta configuração delineia o ganho de desempenho do modelo completo, mediante a utilização integrada de todas as variáveis, o que serve como parâmetro comparativo.

- O teste Jackknife para *Pterodon pubescens* indica que as variáveis bioclimáticas (Bio) podem apresentar maior relevância isolada, o que pode indicar um poder preditivo superior; contudo, embora as variáveis mensais de Temperatura máxima (Tmax) e Precipitação (Prec) demonstrem utilidade, a sobreposição informacional sugere que o emprego de componentes principais (PCA) oferece maior eficiência, de modo que a combinação de algumas variáveis bioclimáticas chave + PCAs de Tmax e Prec pode propiciar a geração de modelos parcimoniosos e robustos.
- Os três gráficos de Jackknife evidenciam a hierarquia de importância das variáveis no modelo de nicho de *Pterodon pubescens*. Assim como nos estudos de *Podocarpus falcatus* (Tesfamariam; Gessesse; Melgani, 2022), em trabalhos pioneiros em Minas Gerais (Coelho; Carvalho; Gomide, 2016) e *Peltogyne maranhensis* (Campos et al., 2023), o teste confirma que poucas variáveis concentram a maior parte da informação ecológica. A interpretação permite refinar o modelo, reduzir redundâncias e direcionar estratégias de conservação mais eficazes.
- Os gráficos de omissão/comissão em modelagens de nicho como aquelas empregadas na técnica de Máxima Entropia (MaxEnt) destinam-se à avaliação da qualidade preditiva, confrontando as previsões com os registros reais de ocorrência (Jayathilake; Costello, 2020).
- Tais representações elucidam a distribuição dos pontos observados da espécie em relação ao limiar de adequabilidade escolhido; neste contexto, os gráficos de omissão/comissão para os modelos de *Pterodon pubescens*, incorporando temperatura máxima (Tmax), bioclimáticas (Bio) e precipitação (Prec), podem revelar-se fundamentais ao complementarem a curva de Característica de Operação do Receptor (ROC), evidenciando o compromisso entre sensibilidade e área prevista em distintos limiares de corte. A calibração do modelo é confirmada quando a linha azul (*Omission on training samples*) aproxima-se da preta (*Predicted omission*), ao passo que a ascensão da linha azul acima da preta pode indicar sobreajuste ou excesso de omissão.

Figura 22: Teste Jackknife para variáveis de temperatura máxima (Tmax), bioclimáticas (Bio) e Precipitação (Prec).

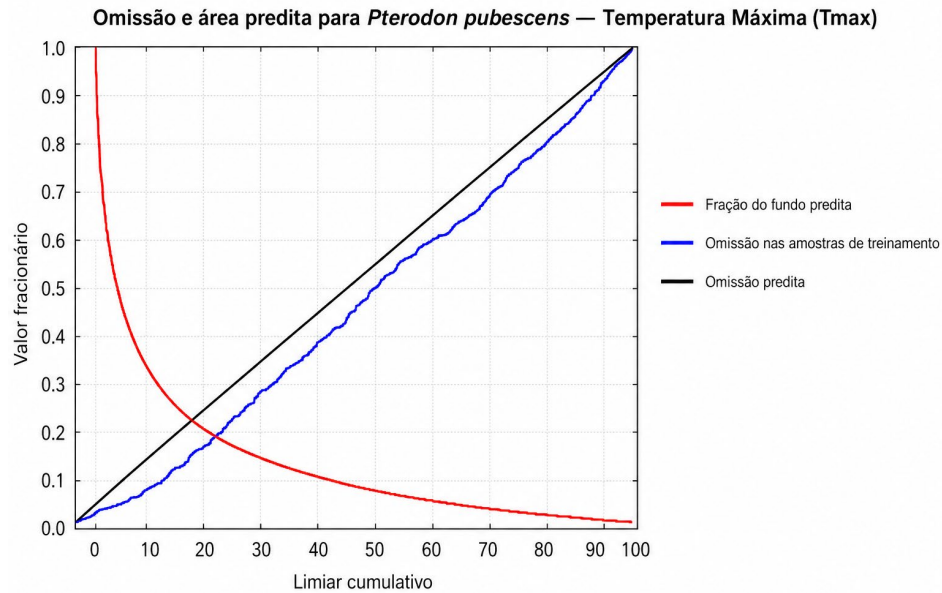


Fonte: Elaborado pelo autor.

No que concerne à Temperatura Máxima, a omissão real aproxima-se da esperada, o que sugere uma calibração adequada do modelo; tal comportamento observa-se também para as variáveis Bioclimáticas. Quando examinadas em conjunto, as análises de omissão/comissão ratificam o padrão delineado pelo teste Jackknife e pela curva ROC, nos quais se infere que as

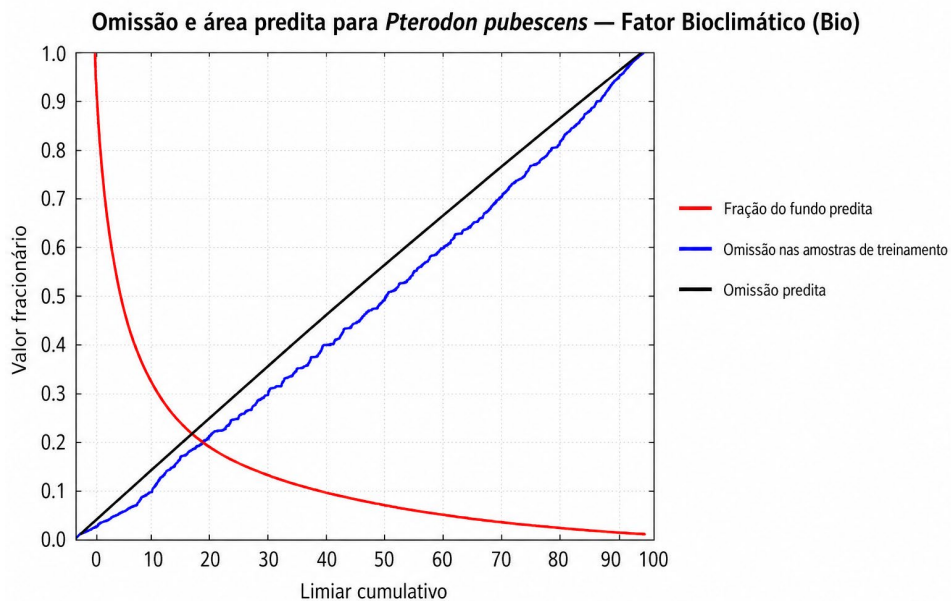
variáveis bioclimáticas (especificamente a sazonalidade climática) podem ser consideradas mais informativas e robustas para *Pterodon pubescens* (Figuras 23, 24 e 24).

Figura 23: Análise de omissão/comissão para Temperatura Máxima (Tmax).



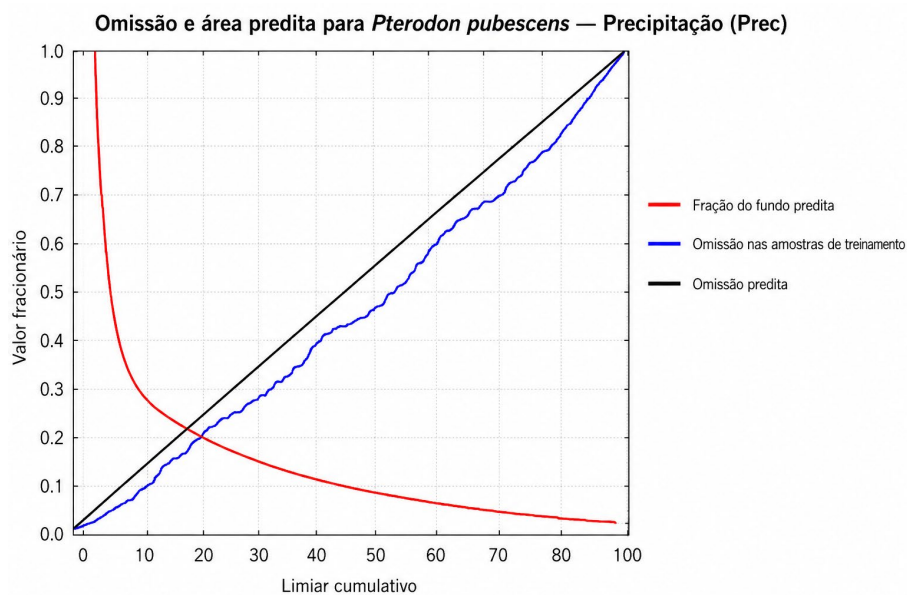
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24: Análise de omissão/comissão para fator Bioclimático (Bio).



Fonte: Elaborado pelo autor.

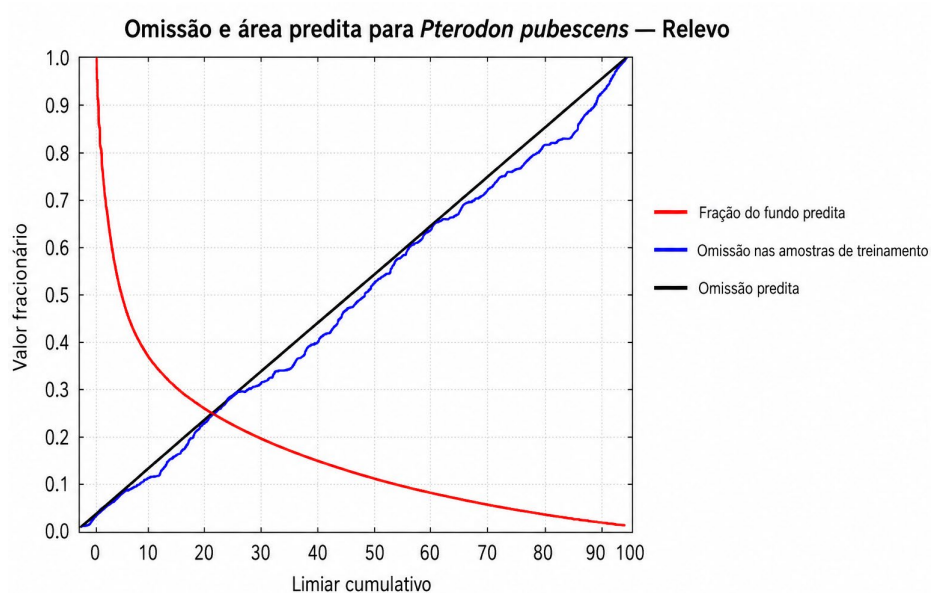
Figura 25: Análise de omissão/comissão para Precipitação (Prec)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto ao parâmetro Relevo, evidencia-se uma importância secundária para a modelagem da espécie; este exerce um papel mais modular em escala local (altitude, declividade, exposição solar), embora, isoladamente, não defina o padrão geral de distribuição. A otimização da predição manifesta-se quando o relevo é combinado com variáveis climáticas, aspecto que, possivelmente, auxilia no refinamento da distribuição em escala regional (Figura 26).

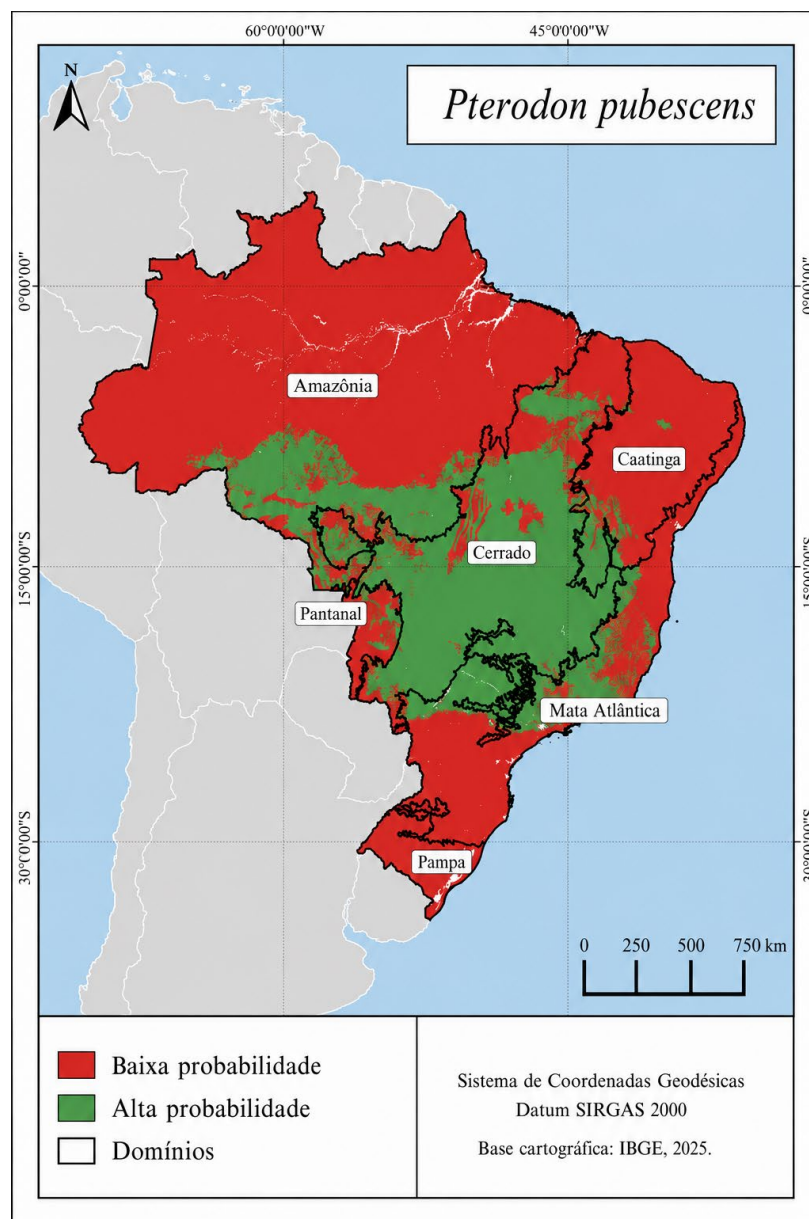
Figura 26: Análise de omissão/comissão para Relevo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise contemporânea da distribuição da espécie, considerando o cenário do Cerrado e adjacências, sugere a provável existência de um núcleo contínuo de alta adequabilidade no Cerrado centro-leste (Goiás–Minas–Bahia interior); observa-se, ainda, uma expansão em gradientes para as bordas da Mata Atlântica interior e manchas na Caatinga úmida de altitude. Por outro lado, as porções ocidentais do Cerrado e a região amazônica aparentam, majoritariamente, inadequação à ocorrência do táxon (Figura 27).

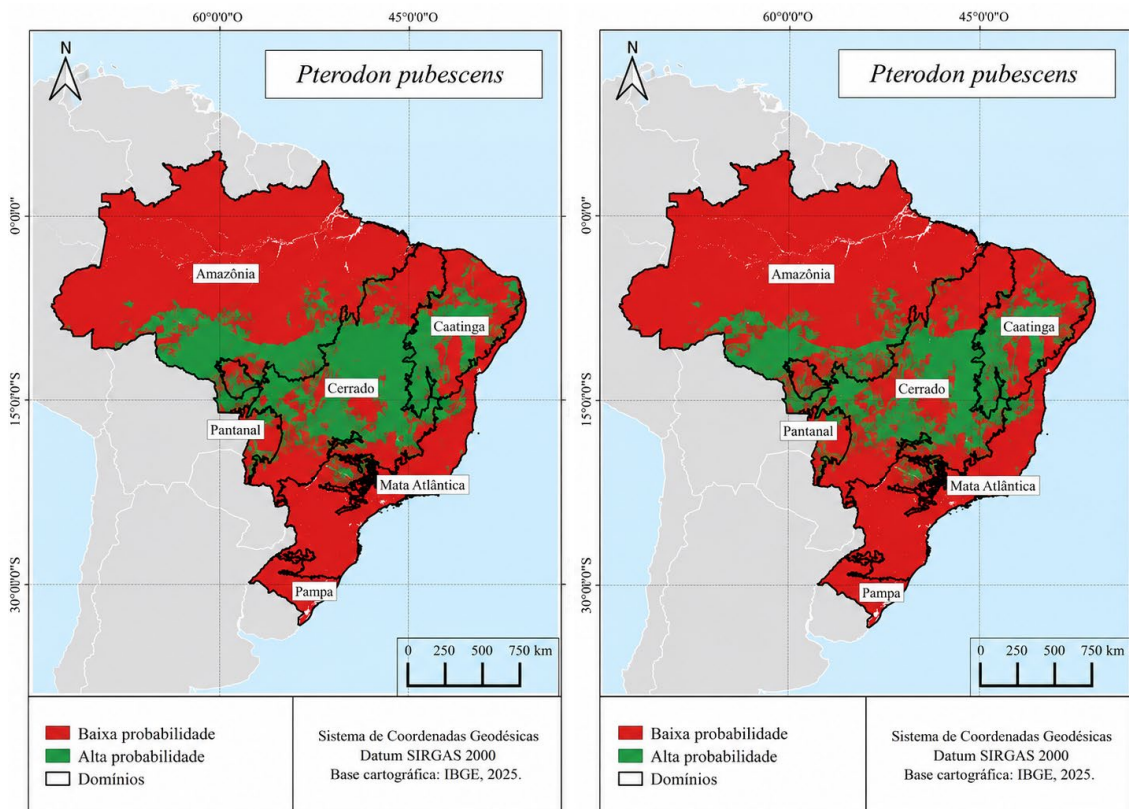
Figura 27: Áreas de alta propensão para ocorrência de *Pterodon pubescens* na atualidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga, as projeções de cenários futuros apresentam a adequação prevista para os anos 2041-2060 e 2081-2100, segundo dois cenários do IPCC: RCP 4.5 (emissões moderadas) e RCP 8.5 (emissões elevadas) (Chou et al., 2014). A seleção de tais cenários mostra-se estratégica para abranger uma gama de possíveis futuros climáticos, desde um cenário de mitigação moderada (RCP 4.5) até um de emissões elevadas (RCP 8.5), permitindo uma análise robusta dos potenciais impactos sobre a distribuição do gênero *Pterodon* (Silva et al., 2019). Esses cenários revelam-se fundamentais para a compreensão de como as projeções de aquecimento global e alterações nos regimes de precipitação podem remodelar a biogeografia dessas espécies, especialmente aquelas com nichos ecológicos mais restritos (Thuiller; Lavorel; Araújo, 2005), (Figuras 28 e 29).

Figura 28: Projeções usando o modelo RCP 4.5 para os anos de 2041-2060 e 2081-2100 com base nos cenários climáticos (CMIP6).

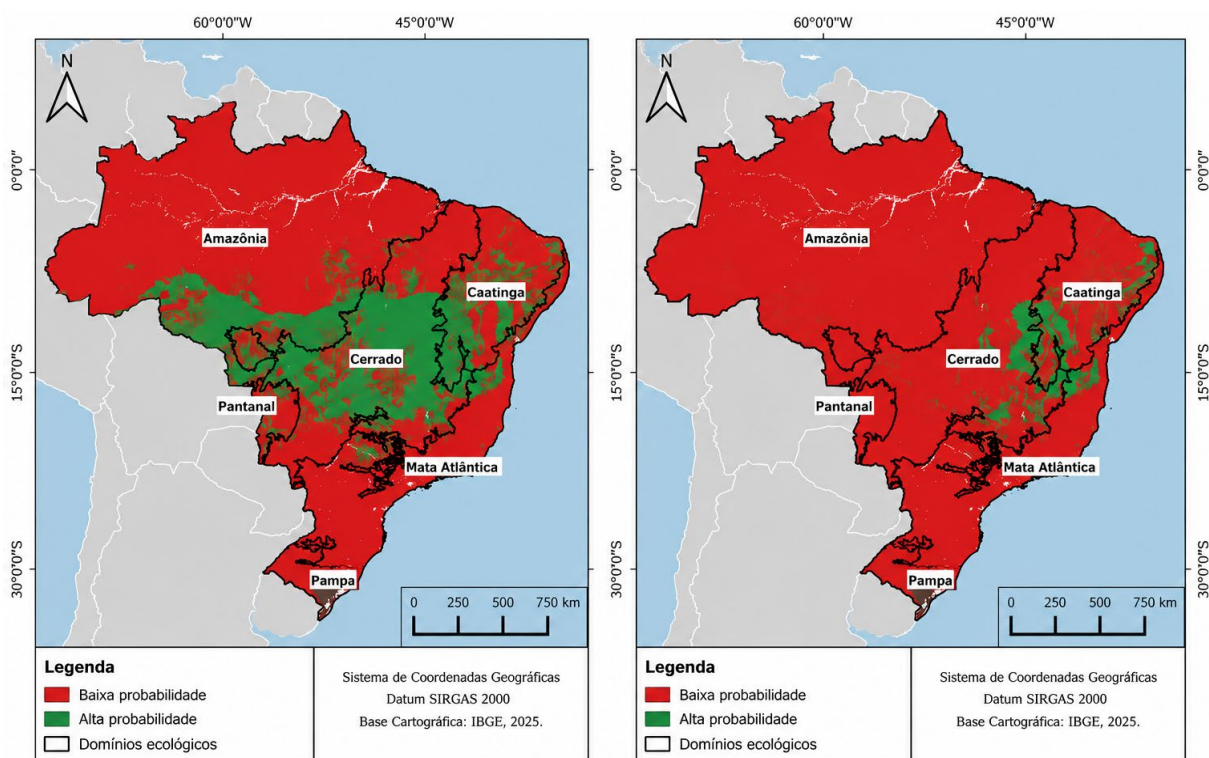


Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar da utilização de um conjunto relativamente reduzido de preditores bioclimáticos, tanto a análise realizada via modelagem de Máxima Entropia (MaxEnt) quanto a processada com base nos dados do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6

(CMIP6) no Sistema de Informação Geográfica (QGIS) permitiram delinear os limites potenciais de distribuição para *Pterodon pubescens*. Tais resultados sugerem que, mesmo para organismos com estratégias de vida distintas, como árvores do gênero *Pterodon*, a modelagem da distribuição potencial pode ser efetuada com êxito mediante a utilização de um subconjunto conciso de variáveis bioclimáticas (Ali et al., 2023).

Figura 29: Projeções usando o modelo RCP 8.5 para os anos de 2041-2060 e 2081-2100 com base nos cenários climáticos (CMIP6).



Para o período atual, ambos os modelos apresentaram significância estatística elevada ($p < 0,001$), com valores médios de AUC que excedem 0,90, acompanhada por uma ausência de erro de omissão. A área total prevista como adequada para *Pterodon pubescens* variou de aproximadamente 12 milhões de hectares (MaxEnt) a 15 milhões de hectares (CMIP6). A adequação máxima é observada nos planaltos centrais e ocidentais do Cerrado, tipicamente entre 400 e 800 m de altitude, com extremos de 200 m a 1.200 m. A temperatura mínima média no inverno nessas áreas gira em torno de 14 °C (com mínimas absolutas próximas de 0 °C), e as máximas médias no verão atingem 28 °C (com máximas absolutas de até 42 °C). A precipitação média anual nessas regiões varia de 1.400 a 1.600 mm, e apresenta um período

seco distintamente definido, intrínseco ao clima Aw de Köppen. Este padrão climático, portanto, parece exercer uma influência determinante sobre a fenologia da espécie, a qual se manifesta através do florescimento em setembro-outubro e da frutificação em junho-julho, período em que ocorre a abscisão foliar, antecedendo uma nova brotação em agosto.

Evidências paleoecológicas indicam que as distribuições de *Pterodon* se expandiram durante períodos mais frios e secos, encontrando refúgios em vales, e se retraíram em interglaciais mais quentes e úmidos (Ledru et al., 1996). Sob o aquecimento futuro, áreas adequadas tenderão a se deslocar para latitudes e altitudes mais elevadas, onde as condições permanecem mais amenas. O cenário RCP 4.5 projeta uma redução moderada (~ 20%) na área adequada até 2100, enquanto o RCP 8.5 prevê uma contração severa (~ 50%), podendo elevar preocupações acerca da persistência populacional sem migração assistida ou conservação *ex situ*. A variação interanual climática e a incorporação de extremos climáticos nos modelos podem, portanto, propiciar uma compreensão mais aprofundada da dinâmica do nicho, bem como da resposta demográfica da espécie a eventos de estresse ambiental (Pérez-Navarro et al., 2020).

A taxa sem precedentes de aquecimento do século XXI, de 1,8 °C a 6,3 °C em poucas décadas (Alves-de-Lima et al., 2025), é acelerada demais para que espécies arbóreas de ciclo longo como *Pterodon* possam se adaptar naturalmente, aumentando o risco de extinção e potencialmente intensificando as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. Os modelos apresentados, portanto, parecem corroborar a necessidade imperiosa de se implementarem estratégias direcionadas de conservação, plantios de restauração em refúgios climáticos estáveis e a preservação de recursos genéticos, visando à proteção dessas espécies endêmicas do Cerrado contra as rápidas mudanças climáticas.

A elucidação da variação genética intraespecífica e da capacidade de aclimação das populações a novas condições ambientais constitui um fator que pode ser mais aprofundado, visto que tais aspectos parecem ser críticos para uma previsão mais precisa da resiliência de *Pterodon pubescens* frente às mudanças climáticas (Lima et al., 2017). Adicionalmente, estudos sobre a fenologia reprodutiva e a interação com polinizadores e dispersores sob cenários de estresse climático seriam valiosos para entender a dinâmica populacional e a resiliência dessas espécies (Martén-Rodríguez et al., 2025). Esses modelos são amplamente empregados para abordar diversas questões de pesquisa e para orientar a conservação da biodiversidade em vários campos de investigação (Franklin, 2013). Tais modelos configuram-se como instrumentos analíticos robustos para o manejo e a preservação de espécies e seus habitats, tendo

demonstrado utilidade potencial para subsidiar medidas de gestão em escalas regionais e nacionais (Chevalier et al., 2022). A aplicação contínua e aprimorada desses modelos é, portanto, essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação eficazes, especialmente considerando o aumento da frequência de eventos extremos, como incêndios, que comprometem a vegetação nativa e a biodiversidade que ela abriga (Kelly et al., 2020), (Gonçalves et al., 2021).

3.4 - CONCLUSÕES

A modelagem de nicho ecológico aplicada neste estudo evidencia o potencial de ferramentas como o MaxEnt para compreender a distribuição atual e futura de espécies frente às mudanças ambientais. Os resultados sugerem que variáveis climáticas podem exercer papel determinante na delimitação das áreas de ocorrência de *Pterodon pubescens*, permitindo identificar zonas de maior adequabilidade ambiental e regiões suscetíveis a alterações em diferentes cenários climáticos.

Ao analisar a distribuição da espécie em cenários futuros (RCP4.5 e RCP8.5), observa-se a coexistência de tendências de expansão e retração regional, o que parece reforçar a premência do planejamento conservacionista frente às mudanças globais. Esses achados contribuem para subsidiar estratégias de conservação, manejo sustentável e políticas públicas voltadas à preservação de ecossistemas, além de indicar áreas prioritárias para estudos de campo e monitoramento populacional.

As áreas de maior adequabilidade e, conseqüentemente, prioritárias para fins de conservação parecem concentrar-se no Cerrado centro-leste, abrangendo: Goiás (região central e nordeste), Minas Gerais (norte e centro), Oeste da Bahia. Tal configuração contínua sugere apresentar condições otimizadas de temperatura, sazonalidade climática e regime de chuvas, o que pode qualificá-la como o principal refúgio climático e genético da espécie (Oliveira; Marquis, 2002). Adicionalmente, observam-se nas bordas de transição (áreas-chave de interligação) a expansão em “línguas” para a Mata Atlântica interior (sul de Minas e interior de São Paulo) e para manchas da Caatinga úmida de altitude (Chapada Diamantina e norte de Minas); sugere-se, portanto, que essas regiões funcionem como corredores ecológicos potenciais, essenciais para a conexão entre populações e a manutenção do fluxo gênico.

Embora o relevo isolado possa não constituir o determinante principal, áreas de chapadas, encostas e cerrado rupestre parecem atuar como refúgios locais em cenários de estresse climático (Hofmann, 2024). Nessas regiões, a altitude e a declividade exercem modulação

sobre microclimas, o que pode propiciar ambientes mais estáveis frente a extremos térmicos e hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALI, F.; KHAN, N.; KHAN, A. M.; ALI, K.; ABBAS, F. Species distribution modelling of *Monothea buxifolia* (Falc.) A. DC.: Present distribution and impacts of potential climate change. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13417>>. Acesso em: ago. 2024.
- 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**, [s. l.], v. 43, n. 6, p. 1223–1232, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>>. Acesso em: mar. 2025.
- ALVES-DE-LIMA, L.; ALVES, D. F. R.; ANJOS, D. V.; VALDIVIA, F. A.; TORE-ZAN-SILINGARDI, H. M. Predicting the Impact of Global Climate Change on the Geographic Distribution of Anemochoric Species in Protected Areas. **Atmosphere**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 453–453, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/atmos16040453>>. Acesso em: maio. 2026.
- BRICEÑO, N. B. R.; COTRINA-SÁNCHEZ, A.; BARBOZA, E.; GURBILLÓN, M. Á. B.; SARMIENTO, F. O.; SOTOMAYOR, D. A.; OLIVA, M.; LÓPEZ, R. S. Current and Future Distribution of Five Timber Forest Species in Amazonas, Northeast Peru: Contributions towards a Restoration Strategy. **Diversity**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 305–305, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/d12080305>>. Acesso em: maio. 2025.
- BRUNTON, A.; CONROY, G.; SCHOEMAN, D. S.; ROSSETTO, M.; OGBOURNE, S. M. Seeing the forest through the trees: Applications of species distribution models across an Australian biodiversity hotspot for threatened rainforest species of Fontainea. **Global Ecology and Conservation**, [s. l.], v. 42, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02376>>. Acesso em: maio. 2026.
- BUENO, M. L.; DEXTER, K. G.; PENNINGTON, R. T.; PONTARA, V.; NEVES, D. M.; RATTER, J. A.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. De. The environmental triangle of the Cerrado Domain: Ecological factors driving shifts in tree species composition between forests and savannas. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 106, n. 5, p. 2109–2120, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12969>>. Acesso em: nov. 2025.
- BUSTAMANTE, M.; NARDOTO, G. B.; PINTO, A.; RESENDE, J.; TAKAHASHI, F.; VIEIRA, LCG. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 72, p. 655–671, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1519-69842012000400005>>. Acesso em: ago. 2024.
- CAMPOS, J. R. dos P.; CRUZ, V. M. S. Da; SOUSA, F. C.; ALMEIDA, E. B. De. Modelagem preditiva de *Peltogyne maranhensis*, espécie ameaçada de extinção no Cerrado do Maranhão, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 2569–2578, 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2569-2578>>. Acesso em: jun. 2024.
- CARVALHO, C. S.; CARDOSO, D. B. O. S.; LIMA, H. C. **Pterodon in Flora e Funga do Brasil**. 2025. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB29840>>. Acesso em: 21 jan. 2025

CHEVALIER, M.; ZARZO-ARIAS, A.; GUÉLAT, J.; MATEO, R. G.; GUISAN, A. Accounting for niche truncation to improve spatial and temporal predictions of species distributions. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 10, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.944116>>. Acesso em: maio. 2025.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECHYNSKI, C. P.; PILOTTO, I. L.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D. C.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. A. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 512–527, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>>. Acesso em: nov. 2025.

COELHO, G. L. N.; CARVALHO, L. M. T. De; GOMIDE, L. R. Modelagem preditiva de distribuição de espécies pioneiras no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 207–214, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000300002>>. Acesso em: jul. 2024.

COSTA, C. R.; LUZ, C. F. P. Da; HORÁK-TERRA, I.; CAMARGO, P. B. De; BARRAL, U. M.; MENDONÇA-FILHO, C. V.; GONÇALVES, T. S.; SILVA, A. C. Paleoenvironmental dynamics in central-eastern Brazil during the last 23 000 years: tropical peatland record in the Cerrado biome. **Journal of Quaternary Science**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 61–75, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/jqs.3459>>. Acesso em: mar. 2025.

DAMBROS, C.; ZUQUIM, G.; MOULATLET, G. M.; COSTA, F. R. C.; TUOMISTO, H.; RIBAS, C. C.; AZEVEDO, R. A. De; BACCARO, F. B.; BOBROWIEC, P. E. D.; DIAS, M. S.; EMILIO, T.; ESPÍRITO-SANTO, H. M. V.; FIGUEIREDO, F. O. G.; FRANKLIN, E.; FREITAS, C. G.; GRAÇA, M. B.; D'HORTA, F. M.; LEITÃO, R. P.; MAXIMIANO, M.; MENDONÇA, F. P. De; MENDER, J.; MORAIS, J. W. De; SOUZA, A. H. N. De; SOUZA, J. L. P.; TAVARES, V. da C.; VALE, J. D. Do; VENTICINQUE, E. M.; ZUANON, J.; MAGNUSSON, W. E. The role of environmental filtering, geographic distance and dispersal barriers in shaping the turnover of plant and animal species in Amazonia. **Biodiversity and Conservation**, [s. l.], v. 29, n. 13, p. 3609–3634, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10531-020-02040-3>>. Acesso em: mar. 2025.

DOLCI, D.; PERUZZI, L. Assessing the Effectiveness of Correlative Ecological Niche Model Temporal Projection through Floristic Data. **Biology**, vol. 11, no. 8, p. 1219, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11081219>.

ELITH, J.; PHILLIPS, S. J.; HASTIE, T.; DUDÍK, M.; CHEE, Y. E.; YATES, C. J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 43–57, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>>. Acesso em: mar. 2025.

FERNANDES, A. C. M.; GONZALEZ, R. Q.; LENIHAN-CLARKE, M. A.; TROTTER, E. F. L.; ARSANJANI, J. J. Machine Learning for Conservation Planning in a Changing Climate. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 18, p. 7657–7657, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su12187657>>. Acesso em: ago. 2024.

FORZZA, R. C.; LEITMAN, P.; COSTA, A. F. Da; JÚNIOR, A. A. de C.; PEIXOTO, A. L.; WALTER, B. M. T.; BICUDO, C. E. de M.; ZAPPI, D. C.; COSTA, D. P. Da; LLERAS, E.; MARTINELLI, G.; LIMA, H. C. De; PRADO, J.; STEHMANN, J. R.; BAUMGRATZ, J. F. A.; PIRANI, J. R.; SYLVESTRE, L. da S.; MAIA, L. C.; LOHMANN, L. G.; PAGANUCCI, L.; SILVEIRA, M.; NADRUZ, M.; MAMEDE, M. C. H.; BASTOS, M. N. C.; MORIM, M.

P.; BARBOSA, M. R.; MENEZES, M.; HOPKINS, M.; SECCO, R. de S.; CAVALCANTI, T. B.; SOUZA, V. C. **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio: Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010. 828 p. Vol. 2. Disponível em: <<https://doi.org/10.7476/9788560035090>>. Acesso em: nov. 2025.

FRANKLIN, J. Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 19, n. 10, p. 1217–1223, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ddi.12125>>. Acesso em: mar. 2024.

GÓES, P. R. N. De; HOSCHIED, J.; SILVA-FILHO, S. E.; FROEHLICH, D. L.; PELEGRINI, B. L.; CANOFF, J. R. de A.; LIMA, M. M. de S.; CUMAN, R. K. N.; CARDOSO, M. L. C. Rheological behavior and antiarthritic activity of *Pterodon pubescens* nanoemulsion. **Research Society and Development**, [s. l.], v. 9, n. 10, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8119>>. Acesso em: mar. 2025.

GONÇALVES, C.; HONRADO, J. P.; CEREJEIRA, J.; SOUSA, R.; FERNANDES, P. M.; VAZ, A. S.; ALVES, M. F.; ARAÚJO, M. B.; CARVALHO-SANTOS, C.; FONSECA, A.; FRAGA, H.; GONÇALVES, J.; LOMBA, Â.; PINTO, E.; VICENTE, J. R.; SANTOS, J. A. On the development of a regional climate change adaptation plan: Integrating model-assisted projections and stakeholders' perceptions. **The Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 805, p. 150320–150320, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150320>>. Acesso em: jan. 2024.

HERNÁNDEZ, P. A. R.; GRAHAM, C. H.; MASTER, L. L.; ALBERT, D. L. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. **Ecography**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 773–785, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2006.04700.x>>. Acesso em: nov. 2025.

HOFMANN, G. S. **Mudanças climáticas no Cerrado brasileiro: suas origens e impactos para biodiversidade**. 2024. 191 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

JAYATHILAKE, D. R. M.; COSTELLO, M. J. A modelled global distribution of the kelp biome. **Biological Conservation**, [s. l.], v. 252, p. 108815–108815, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108815>>. Acesso em: nov. 2025.

JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; LOBO, J. M.; HORTAL, J. Not as good as they seem: the importance of concepts in species distribution modelling. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 885–890, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00496.x>>. Acesso em: maio. 2024.

KELLY, L. T.; GILJOHANN, K. M.; DUANE, A.; AQUILUÉ, N.; ARCHIBALD, S.; BATLLORI, E.; BENNETT, A. F.; BUCKLAND, S. T.; CANELLES, Q.; CLARKE, M. F.; FORTIN, M.; HERMOSO, V.; HERRANDO, S.; KEANE, R. E.; LAKE, F. K.; MCCARTHY, M. A.; MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; PARR, C. L.; PAUSAS, J. G.; PENMAN, T. D.; REGOS, A.; RUMPF, L.; SANTOS, J. L.; SMITH, A. L.; SYPHARD, A. D.; TINGLEY, M. W.; BROTONS, L. Fire and biodiversity in the Anthropocene. **Science**, v. 370, n. 6519, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10459.1/70684>>. Acesso em: mar. 2025.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00702.x>>. Acesso em: nov. 2025.

KUHLMANN, M.; RIBEIRO, J. F. Fruits and frugivores of the Brazilian Cerrado: ecological and phylogenetic considerations. **Acta Botanica Brasilica**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 495–507, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-33062016abb0192>>. Acesso em: jul. 2024.

LIMA, J. S.; BALLESTEROS-MEJIA, L.; LIMA-RIBEIRO, M. S.; COLLEVATTI, R. G. Climatic changes can drive the loss of genetic diversity in a Neotropical savanna tree species. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 23, n. 11, p. 4639–4650, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/gcb.13685>>. Acesso em: nov. 2025.

LIMA, S. L. **Filogeografia de *Pterodon emarginatus* e *Pterodon pubescens* (Leguminosae)**. 2019. 119 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.

MARTÉN-RODRÍGUEZ, S.; CRISTÓBAL-PÉREZ, E. J.; SANTIAGO-HERNÁNDEZ, M. H. De; HUERTA-RAMOS, G.; CLEMENTE-MARTÍNEZ, L.; KRUPNICK, G. A.; TAYLOR, O. R.; LOPEZARAIZA-MIKEL, M.; BALVINO-OLVERA, F. J.; SENTÍES-AGUILAR, E. M.; DÍAZ-INFANTE, S.; AGUIRRE-JAIMES, A.; NOVAIS, S.; CORTÉS-FLORES, J.; LOBO, J.; FUCHS, E. J.; DELGADO-CARRILLO, O.; RUIZ-MERCADO, I.; SÁYAGO-LORENZANA, R.; PÉREZ-ARROYO, K. D.; QUESADA, M. Untangling the Complexity of Climate Change Effects on Plant Reproductive Traits and Pollinators: A Systematic Global Synthesis. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 31, n. 2, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/gcb.70081>>. Acesso em: mar. 2026.

MARTINS, F. Q.; BATALLA, M. A. Vertical and horizontal distribution of pollination systems in cerrado fragments of central Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 503–514, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1516-89132007000300016>>. Acesso em: jul. 2024.

MOONLIGHT, P. W.; MIRANDA, P. L. S. De; CARDOSO, D.; DEXTER, K. G.; OLIVEIRA-FILHO, A. T. De; PENNINGTON, R. T.; RAMOS, G.; SÄRKINEN, T. The strengths and weaknesses of species distribution models in biome delimitation. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 1770–1784, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/geb.13149>>. Acesso em: ago. 2024.

MORELLATO, L. P. C.; ALBERTON, B.; ALVARADO, S. T.; BORGES, B.; BUISSON, É.; CAMARGO, M. G. G.; CANCIAN, L. F.; CARSTENSEN, D.; ESCOBAR, D. F. E.; LEITE, P. T. P.; MENDOZA, I.; ROCHA, N. M. W. B.; SOARES, N. C.; SILVA, T. S. F.; STAGGEMEIER, V. G.; STREHER, A. S.; VARGAS, B. P.; PERES, C. A. Linking plant phenology to conservation biology. **UEA Digital Repository (University of East Anglia)**, [s. l.], v. 195, p. 60–72, 2016. . Acesso em: nov. 2025.

OLIVEIRA, Paulo S.; MARQUIS, Robert J. (ed.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. New York: Columbia University Press, 2002.

PÉREZ-NAVARRO, M. Á.; BROENNIMANN, O.; SELMA, M. Á. E.; PÉREZ, J. M. M.; CARREÑO, F.; GUISAN, A.; LLORET, F. Temporal variability is key to modelling the climatic niche. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 473–484, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ddi.13207>>. Acesso em: ago. 2024.

PONTI, R.; SANNOLO, M. The importance of including phenology when modelling species ecological niche. **Ecography**, [s. l.], v. 2023, n. 4, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ecog.06143>>. Acesso em: nov. 2025.

POZO-GÓMEZ, D. M.; ORANTES-GARCÍA, C.; SÁNCHEZ-CORTÉS, M. S.; RIOJA-PARADELA, T.; CARRILLO-REYES, A. Potential distribution of *Croton guatemalensis*: a model with reproductive biology data. **Botanical Sciences**, [s. l.], v. 100, n. 2, p. 291–299, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.17129/botsci.2865>>. Acesso em: nov. 2025.

RAMOS, D. M.; DINIZ, P.; OOI, M. K. J.; BORGHETTI, F.; VALLS, J. F. M. Avoiding the dry season: dispersal time and syndrome mediate seed dormancy in grasses in Neotropical savanna and wet grasslands. **Journal of Vegetation Science**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 798–807, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/jvs.12531>>. Acesso em: nov. 2025.

RODRIGUES, T. M.; MACHADO, S. R. Oil Glands in *Pterodon pubescens* Benth. (Leguminosae-Papilionoideae): Distribution, Structure, and Secretion Mechanisms. **International Journal of Plant Sciences**, [s. l.], v. 173, n. 9, p. 984–992, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086/667609>>. Acesso em: jul. 2026.

SAUL, R. A. De. **Caracterização de remanescente florestal em uma região de ecótono entre o noroeste paulista e o bolsão Sul Mato grossense: o caso do faveiro (*Pterodon pubescens* (Benth.) Benth.) - Fabaceae**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira/UNESP, 2023.

SILVA, J. L. S.; CRUZ-NETO, O.; PERES, C. A.; TABARELLI, M.; LOPES, A. V. Climate change will reduce suitable Caatinga dry forest habitat for endemic plants with disproportionate impacts on specialized reproductive strategies. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 14, n. 5, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217028>>. Acesso em: jan. 2025.

TESFAMARIAM, B. G.; GESSESSE, B.; MELGANI, F. MaxEnt-based modeling of suitable habitat for rehabilitation of *Podocarpus* forest at landscape-scale. **ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40068-022-00248-6>>. Acesso em: jul. 2025.

THUILLER, W.; LAVOREL, S.; ARAÚJO, M. B. Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 347–357, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00162.x>>. Acesso em: ago. 2024.

VELAZCO, S. J. E.; VILLALOBOS, F.; GALVÃO, F.; JÚNIOR, P. de M. A dark scenario for Cerrado plant species: Effects of future climate, land use and protected areas ineffectiveness. **Diversity and Distributions**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 660–673, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/ddi.12886>>. Acesso em: nov. 2025.

WILL, R. E.; WILSON, S. M.; ZOU, C. B.; HENNESSEY, T. Increased vapor pressure deficit due to higher temperature leads to greater transpiration and faster mortality during drought for tree seedlings common to the forest–grassland ecotone. **New Phytologist**, [s. l.], v. 200, n. 2, p. 366–374, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/nph.12321>>. Acesso em: nov. 2025.

ZHANG, Y.; CHEN, S.; GAO, Y.; YANG, L.; YU, H. Prediction of global potential suitable habitats of *Nicotiana glauca* Link et Otto based on MaxEnt model. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 4851–4851, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-023-29678-7>>. Acesso em: jan. 2025.

4 – CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho estabelece uma compreensão sobre a ecologia integrada da espécie arbórea *Pterodon pubescens* (Benth.) Benth. (Fabaceae), popularmente conhecida como sucupira-branca ou faveiro, ao articular as relações solo-planta, a modelagem de nicho ecológico e o fluxo gênico no bioma Cerrado e em suas zonas de ecótono com a Mata Atlântica, Caatinga e Amazônia. A investigação demonstra que a sobrevivência e a perpetuação dessa espécie de elevado valor ecológico, farmacológico e madeireiro dependem de uma estreita interdependência entre a variabilidade estrutural e a preservação de seus núcleos de adequação ambiental e conectividade espacial frente às severas transformações do uso do solo e ao aquecimento global.

A integração metodológica proposta representa um modelo para a agronomia e a ecologia florestal neotropical. Ao vincular dados empíricos de campo com ferramentas computacionais avançadas de geoprocessamento e estatística multivariada, a pesquisa consolida um modelo preditivo robusto para diagnosticar o estado de conservação atual e futuro de populações arbóreas tropicais, oferecendo respostas concretas para a sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas e naturais do Brasil Central.

No âmbito da biogeografia e da modelagem de distribuição de espécies realizada por meio do programa MaxEnt (validada com $AUC > 0,90$ e métricas elevadas de TSS), constata-se que as variáveis bioclimáticas e a temperatura máxima constituem os principais fatores determinantes da distribuição geográfica de *Pterodon pubescens*. Atualmente, a espécie apresenta um núcleo contínuo de elevada adequabilidade ambiental concentrado no Cerrado centro-leste, abrangendo o centro-nordeste de Goiás, o norte e centro de Minas Gerais e o oeste da Bahia, com ramificações estratégicas em zonas de transição para a Mata Atlântica interiorana e enclaves de altitude na Caatinga.

As simulações de cenários climáticos futuros do CMIP6 (RCP 4.5 e RCP 8.5) projetam uma dramática e preocupante retração de habitat adequado para a espécie ao longo do século XXI. Em cenários de emissões moderadas (RCP 4.5), antecipa-se uma redução de aproximadamente 20% na área favorável até o ano de 2099, enquanto em cenários de emissões elevadas e aquecimento severo (RCP 8.5), a perda de habitat atinge patamares críticos de

até 50%. Essa retração acentuada compromete a viabilidade das populações naturais em seu domínio original, exigindo ações preventivas imediatas.

Como resposta direta ao risco de isolamento populacional e fragmentação hídrica e florestal, proõe-se um Índice de Conectividade Espacial (Ind_C), uma ferramenta matemática de baixo custo operada com base no geoprocessamento. Esse índice viabiliza a delimitação precisa de corredores ecológicos prioritários e direciona ações territoriais de conservação *in situ* e restauração florestal em refúgios climáticos estáveis.

A avaliação dendrométrica e físico-química edáfica em populações naturais geograficamente distintas (Lagoa Santa-GO, Selvíria-MS e Aparecida d'Oeste-SP) evidencia uma notável variabilidade e capacidade de adaptação estrutural de *Pterodon pubescens* frente aos filtros edáficos do Cerrado. Os atributos químicos do solo atuam como condicionadores diretos da arquitetura e do crescimento das árvores, estabelecendo um gradiente nítido entre acidez/toxicidade por alumínio e fertilidade em bases trocáveis.

Esses achados confirmam que, embora *Pterodon pubescens* apresente a capacidade biológica de se estabelecer e persistir em solos altamente ácidos e aluminicos, o seu pleno potencial de incremento volumétrico e biomassa expressa-se em condições de maior disponibilidade nutricional. A variação nos parâmetros secundários de crescimento, como diâmetro de copa e espessura de casca, reflete ajustes morfológicos essenciais para a alocação de recursos sob estresse químico e térmico. A conservação eficaz de *Pterodon pubescens* no Cerrado brasileiro exige uma abordagem integrada que contemple tanto o manejo do solo quanto a proteção do espaço geográfico regional. A acentuada perda de habitat prevista pelas modelagens preditivas indica que estratégias passivas de preservação são insuficientes para mitigar os impactos das mudanças climáticas globais e do desmatamento antrópico.

Recomenda-se, a criação de corredores ecológicos funcionais entre o Centro-Oeste e as áreas de transição paulista e mineira; o estabelecimento de programas de coleta de sementes e conservação *ex situ* direcionados às matrizes de populações geneticamente isoladas ou ameaçadas por retração climática; a seleção de genótipos plasticamente superiores (como os de Selvíria e Lagoa Santa) para programas de restauração florestal, agrossilvicultura e manejo sustentável da espécie; a inclusão de refúgios geográficos de altitude e áreas de ecótono nas políticas públicas territoriais de conservação ambiental.

APÊNDICE – DADOS DAS POPULAÇÕES DE *Pterodon pubescens*.

Tabela A.1 – Características dendrométricas e reprodutivas dos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Lagoa Santa (GO).

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
1	6,00	20,00	54,78	12,80	1,70	1
2	6,80	16,80	59,87	12,60	2,10	0
3	1,60	17,80	53,50	12,40	1,90	0
4	7,70	18,60	42,99	13,40	1,80	0
5	1,60	18,00	44,61	10,40	Morta	Morta
6	2,00	15,30	30,57	10,50	1,50	0
7	6,00	16,70	44,60	10,30	Morta	Morta
8	2,50	13,00	36,94	9,70	1,80	0
9	10,00	26,00	76,11	16,60	2,40	0
10	3,20	15,50	46,82	10,80	Morta	Morta
11	2,40	18,60	52,87	14,50	2,20	0
12	4,70	15,70	59,24	11,70	1,60	1
13	4,50	13,50	70,10	12,90	0,90	1
14	3,10	16,40	56,69	11,60	1,60	1
15	6,00	23,00	58,60	12,40	Morta	Morta
16	4,70	23,40	66,24	18,70	1,90	0
17	7,20	22,00	38,85	7,50	1,30	0
18	6,20	16,00	42,99	8,60	2,50	0
19	4,40	18,60	38,20	11,30	1,90	0
20	5,30	18,40	51,00	12,50	1,80	0
21	5,10	21,80	65,61	18,40	1,90	0
22	4,90	15,80	53,18	13,70	2,00	0
23	5,10	22,70	57,30	13,90	1,10	0
24	5,60	21,80	49,68	11,20	2,30	0
25	4,30	21,40	66,56	14,80	1,90	0
26	10,70	21,80	62,42	17,00	1,90	0
27	2,80	17,00	62,42	13,90	2,30	0
28	3,10	19,90	55,73	16,10	2,70	1
29	3,20	16,40	56,69	11,70	2,20	1
30	4,50	21,00	79,30	19,10	2,10	1
31	4,00	21,50	64,00	18,30	1,90	0
32	4,40	19,40	59,87	17,60	1,90	1
33	4,20	19,40	59,55	15,80	2,90	0
34	4,60	19,60	54,10	12,10	2,50	0
35	3,40	18,50	61,15	14,10	2,70	1
36	3,50	16,50	70,12	16,50	2,10	1
37	2,50	15,50	44,60	11,20	1,90	1
38	3,60	18,20	59,87	13,40	2,30	1
39	3,20	23,80	63,09	16,50	1,90	1
40	2,00	21,50	75,16	21,20	2,20	1
41	4,00	17,30	71,66	16,10	2,60	1

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
42	2,90	16,40	69,43	19,70	2,50	1
43	5,00	17,80	59,87	14,20	2,80	1
44	2,00	15,20	49,04	14,10	1,10	1
45	2,80	17,60	62,42	17,10	2,50	0
46	4,60	21,30	64,00	13,80	1,80	1
47	6,50	20,40	62,42	15,00	1,50	1
48	1,60	15,20	58,92	16,20	1,90	1
49	3,20	16,80	47,13	11,90	2,40	1
50	4,00	16,50	68,79	15,90	1,90	1
51	5,90	22,90	63,06	14,00	1,30	1
52	3,10	17,30	47,80	13,20	1,90	1
53	3,50	17,30	57,64	15,90	1,90	1
54	3,40	25,20	68,47	19,70	2,40	0

Nota: HC = altura comercial; HT = altura total; DAP = diâmetro à altura do peito; DMC = diâmetro médio da copa; EC = espessura da casca; Fruto: 0 = ausência e 1 = presença. “Morta” indica indivíduo morto no momento da avaliação.

Tabela A.2 – Atributos químicos do solo e altitude associados aos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Lagoa Santa (GO).

Árvore matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH-SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitude (m)
1	91,09	3,59	5,62	3	1,30	2	1,5	1,13	83,8	434,4
2	92,20	3,41	5,57	3	1,20	3	1,1	1,16	85,1	432,2
3	91,50	3,43	5,58	3	1,20	2	0,6	1,15	84,3	433,9
4	90,90	3,49	5,53	3	1,30	3	1,1	1,42	82,5	432,0
5	93,00	3,57	5,76	2	1,20	2	1	1,08	84,2	432,5
6	90,20	3,96	5,54	3	1,90	3	4	0,93	92	432,2
7	91,30	3,90	5,83	2	1,30	2	1,6	1,34	91,2	431,3
8	90,40	3,79	5,64	3	1,30	3	1,5	1,44	90,3	432,7
9	91,30	3,72	5,54	3	1,40	2	1,8	1,34	91	432,5
10	91,30	3,69	5,60	2	1,30	2	1,6	1,26	91,6	431,8
11	91,90	3,91	5,78	2	1,30	2	2,4	1,06	94,4	423,6
12	91,10	3,84	5,69	3	1,30	3	1,4	1,11	93,8	429,6
13	91,60	3,82	5,67	2	1,30	2	1,8	1,08	93,7	429,6
14	92,00	3,74	5,79	3	1,20	3	2	1,02	94,3	430,1
15	92,80	3,83	5,76	2	1,50	2	1,4	0,98	93,9	427,2
16	91,40	3,94	5,50	3	1,70	4	2,9	0,90	89	428,4
17	91,50	4,44	5,98	2	1,50	4	4,1	0,26	85,6	429,4
18	91,70	3,94	5,79	3	1,30	4	1,4	0,88	89,4	429,6
19	88,20	4,02	5,57	2	1,20	6	1,8	1,05	90,3	430,1
20	91,20	3,83	5,60	3	1,20	2	1,3	1,13	90,8	430,8
21	90,70	3,61	5,63	3	1,20	4	1,3	0,91	91	432,5
22	93,00	3,68	5,71	3	1,40	2	1,6	1,24	93,3	432,5
23	91,40	3,58	5,56	2	1,20	2	1,1	1,11	93,4	432,2
24	92,70	3,73	5,59	1	1,20	1	0,4	1,16	96,8	433,0
25	91,80	3,59	5,64	3	1,20	1	0,4	1,09	93,2	433,2
26	94,30	3,78	5,90	2	2,60	1	1,3	0,77	94	431,8
27	91,60	4,11	5,89	3	3,60	2	2	0,66	86,8	431,8
28	90,10	3,75	5,99	3	1,20	3	1,2	1,41	88,1	433,4
29	91,00	3,52	5,68	3	1,20	3	1,7	1,02	91,9	434,4
30	89,30	4,76	6,40	6	12,60	14	8	0,23	81,3	429,6
31	92,20	3,80	6,07	2	1,80	3	3,5	0,53	93,1	427,9
32	93,60	3,48	5,77	2	1,20	2	0,6	1,05	93,5	434,6
33	92,10	3,79	5,85	3	1,40	5	2,9	0,72	90,3	443,0
34	93,30	3,77	5,94	4	1,50	3	1,7	0,90	88,8	442,3
35	86,10	3,80	5,78	4	1,30	6	2,7	0,75	89,1	441,8
36	94,00	3,61	5,97	2	1,30	1	0,7	1,08	90	439,9
37	90,30	3,64	5,86	2	1,20	1	0,3	1,08	80,8	440,9
38	89,20	3,70	5,86	3	1,20	1	0,9	1,08	84,3	439,2
39	92,50	3,78	5,67	3	1,20	1	0,9	1,19	87,5	438,0
40	90,40	3,77	5,73	2	1,20	1	0,5	0,97	90	437,5
41	93,70	3,74	6,00	3	1,30	1	1,3	0,98	91	438,5

Árvore matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH-SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitude (m)
42	93,90	3,79	6,06	3	1,20	3	1	0,91	89,9	435,8
43	95,00	3,81	5,79	4	1,20	1	0,9	0,93	92,9	434,2
44	91,30	3,89	6,00	3	1,30	1	1,7	0,90	88,3	438,0
45	90,00	3,57	5,61	3	1,30	3	1	1,08	90,6	439,0
46	92,80	3,79	5,87	3	1,60	5	2,7	1,02	90,8	438,0
47	92,70	3,42	5,81	3	1,30	2	1,1	1,22	90,4	437,0
48	93,70	3,60	5,99	2	1,20	1	0,6	0,96	91,4	433,9
49	93,90	3,58	5,94	2	1,30	1	0,4	1,11	88,5	434,4
50	94,10	3,67	5,78	2	1,30	1	0,4	1,16	87,7	437,3
51	93,90	3,66	5,81	4	1,20	1	0,8	1,11	89,1	439,9
52	90,50	3,85	5,96	3	1,30	4	2,6	0,71	88,5	439,4
53	91,40	3,70	5,60	4	1,20	4	1,7	0,91	91	439,0
54	91,70	3,53	5,57	3	1,30	1	1	1,05	90,7	438,2

Nota: MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; S = enxofre. As unidades correspondem às adotadas nos laudos laboratoriais originais; altitude expressa em metros.

POPULAÇÃO DE SELVÍRIA (MS)

Tabela B.1 – Características dendrométricas e reprodutivas dos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Selvíria (MS).

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
1	9,00	17,20	67,83	17,00	1,90	0
2	4,50	18,10	78,03	16,90	1,40	1
3	6,40	19,30	56,69	13,40	1,30	1
4	6,50	23,90	75,48	19,30	1,50	1
5	5,30	19,50	61,78	14,50	1,40	1
6	5,20	16,80	85,35	14,60	2,10	1
7	6,30	18,90	62,42	14,00	1,20	1
8	6,30	19,90	83,44	21,40	1,70	1
9	6,70	28,30	105,73	21,70	2,10	0
10	5,50	27,30	77,07	16,60	Morta	Morta
11	8,20	25,40	63,38	13,40	1,50	1
12	9,20	25,20	69,43	16,40	1,30	1
13	10,70	19,60	56,69	8,20	0,80	0
14	4,70	13,10	85,67	14,50	2,10	1
15	7,80	19,00	62,42	10,50	2,10	0
16	13,20	26,20	62,10	13,70	1,40	1
17	7,30	25,20	78,66	16,30	1,90	1
18	5,70	19,10	84,39	18,50	1,90	1
19	8,60	17,70	86,62	16,10	1,90	0
20	8,40	25,80	84,39	14,80	3,50	1
21	4,80	21,60	78,98	15,40	1,20	1
22	5,90	14,80	45,86	11,70	1,30	0
23	9,00	21,00	69,75	14,10	2,80	1
24	9,00	24,10	77,07	14,40	1,80	1
25	4,90	15,50	83,76	13,50	1,40	1
26	10,00	24,60	75,16	13,00	2,40	0
27	8,80	13,80	80,25	14,60	2,00	1
28	7,50	23,40	84,08	18,40	1,70	1
29	10,40	23,30	70,10	15,90	1,80	1
30	14,00	25,70	80,57	15,20	2,10	1
31	7,80	13,60	58,60	9,70	2,40	0
32	7,00	20,40	65,92	17,50	1,70	0
33	4,20	26,20	96,00	19,40	2,10	0
34	7,10	25,80	90,45	17,80	1,90	1
35	6,90	17,60	66,56	15,40	1,90	1
36	7,50	26,60	89,81	19,90	2,20	1
37	5,00	17,10	68,15	14,50	2,40	1
38	4,50	18,10	78,03	16,90	0,90	1

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
39	6,40	19,30	56,69	13,40	2,20	1
40	6,50	23,90	75,48	19,30	1,90	1

Nota: HC = altura comercial; HT = altura total; DAP = diâmetro à altura do peito; DMC = diâmetro médio da copa; EC = espessura da casca; Fruto: 0 = ausência e 1 = presença. “Morta” indica indivíduo morto no momento da avaliação.

Tabela B.2 – Atributos químicos do solo e altitude associados aos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Selvíria (MS).

Árvore matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH-SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitude (m)
1	85,90	4,30	5,93	25	2,90	17	7,5	0,42	87	353,4
2	89,00	4,03	5,60	15	1,50	11	8,1	0,59	89,3	353,9
3	86,00	3,76	5,91	8	2,70	2	1,6	0,81	89,3	356,3
4	89,70	4,13	5,92	8	1,60	11	5,5	0,41	85,6	342,8
5	85,20	3,92	5,88	5	1,80	11	5,4	0,38	85,5	331,3
6	85,30	3,49	5,87	41	1,20	4	2	0,83	83,5	334,2
7	89,20	4,09	6,01	23	1,50	8	6,5	0,33	85,1	334,9
8	92,20	3,75	6,01	25	1,30	4	2,8	0,55	86,4	334,4
9	84,40	4,78	6,20	5	5,80	22	14,2	0,09	85,6	334,9
10	89,20	4,03	5,83	3	1,40	7	3,9	0,53	87,3	331,5
11	88,10	4,19	5,92	12	1,80	9	6,8	0,35	87,6	332,3
12	75,20	5,34	6,51	13	13,10	44	21,6	0,15	51,6	332,7
13	87,50	4,19	5,90	6	2,30	12	8,3	0,33	86,6	333,0
14	84,70	4,08	5,60	15	1,60	20	5,6	0,46	86,3	333,5
15	86,90	4,20	5,99	6	1,30	9	5,5	0,42	84,7	338,3
16	86,00	4,14	5,81	3	1,30	8	4,1	0,63	82,9	340,7
17	88,50	3,88	5,71	7	1,60	10	5,5	0,34	84,5	340,9
18	90,40	3,72	5,76	3	1,70	6	3,4	0,72	84,6	337,3
19	88,70	3,95	5,93	2	1,40	6	4	0,52	86,6	337,3
20	88,50	3,93	6,04	4	1,50	7	4,9	0,48	86,4	340,9
21	89,00	4,18	5,81	5	1,30	8	4,1	0,69	88,4	340,2
22	86,20	5,33	5,77	2	1,70	11	5,1	0,38	88,2	335,9
23	85,80	4,20	5,99	7	2,00	14	5,8	0,27	84,1	339,5
24	88,20	4,08	6,05	2	1,30	10	4,3	0,47	81	334,4
25	89,80	4,19	6,03	5	1,30	8	3,2	0,36	88,9	335,1
26	86,80	4,11	6,32	3	1,90	15	8,3	0,17	88,9	336,6
27	90,40	3,92	5,99	2	1,20	4	2,3	0,73	86,1	339,0
28	88,60	3,78	6,06	2	1,20	14	1,8	0,33	72,9	339,7
29	89,50	4,04	6,12	2	1,30	6	2,8	0,36	73,7	338,3
30	90,30	4,28	5,79	4	1,20	3	2	0,75	77	337,5
31	88,20	3,83	5,78	8	1,10	4	2,7	0,70	81,6	335,9
32	88,40	4,13	6,03	3	2,00	10	10,3	0,28	79,3	334,9
33	86,80	4,16	5,68	3	1,40	13	6,3	0,48	84,9	335,9

Árvo- re matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH- SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitu- de (m)
34	83,60	4,19	5,68	20	1,30	8	4,1	0,72	84,1	334,7
35	86,40	4,00	6,03	9	1,40	11	6,6	0,27	86,8	332,7
36	82,90	4,46	5,95	4	8,50	21	12,1	0,25	77,6	332,7
37	80,50	3,84	5,83	9	3,00	14	5,6	0,31	73,9	330,6
38	87,80	4,08	5,91	2	1,50	13	5,8	0,27	76	334,7
39	85,30	4,18	5,70	7	2,90	15	8,2	0,46	76,4	332,0
40	82,30	3,91	5,55	42	1,80	16	6,7	0,55	79	333,7

Nota: MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; S = enxofre. As unidades correspondem às adotadas nos laudos laboratoriais originais; altitude expressa em metros.

POPULAÇÃO DE APARECIDA D'OESTE (SP)

Tabela C.1 – Características dendrométricas e reprodutivas dos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Aparecida d'Oeste (SP).

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
1	8,50	18,40	75,48	19,10	1,50	1
2	3,90	18,70	73,20	15,40	1,10	1
3	5,10	17,00	55,10	13,00	1,30	1
4	6,60	25,00	79,60	18,20	1,10	1
5	2,00	22,00	66,56	17,00	1,50	1
6	2,40	16,80	47,80	15,30	1,80	1
7	4,60	18,60	73,20	14,50	0,80	1
8	1,69	17,70	78,34	18,90	1,90	1
9	4,80	19,70	51,00	17,00	2,10	1
10	8,90	29,80	80,57	16,50	1,10	0
11	3,50	17,00	35,00	21,20	Morta	Morta
12	6,60	19,50	36,94	17,30	Morta	Morta
13	5,40	15,20	59,55	13,00	1,40	1
14	3,80	21,60	64,97	16,00	Morta	Morta
15	8,00	24,40	70,70	16,30	Morta	Morta
16	7,00	11,30	64,01	8,70	1,90	0
17	7,30	16,40	71,02	16,70	1,10	1
18	1,60	16,40	62,74	17,30	2,10	1
19	2,00	24,70	51,91	15,60	1,50	1
20	3,30	25,10	39,81	19,90	1,10	1
21	4,00	12,00	26,43	15,00	1,80	1
22	3,90	15,30	34,08	19,20	1,40	0
23	8,70	29,80	75,80	12,50	2,10	1
24	2,90	23,00	66,56	17,50	1,40	1
25	4,40	22,00	93,95	18,40	0,90	1
26	3,80	22,00	73,20	13,30	1,10	1
27	1,40	22,30	78,34	19,90	1,10	1
28	4,00	17,80	86,31	25,20	1,80	1
29	5,00	20,30	102,55	19,70	1,80	1
30	2,60	18,40	51,59	20,10	1,90	1
31	1,80	19,30	70,09	18,60	1,90	1
32	3,50	20,50	60,50	16,20	1,00	1
33	2,00	16,00	36,62	15,60	1,30	1
34	6,50	25,00	79,60	18,20	Morta	Morta
35	2,20	22,00	66,56	17,00	Morta	Morta
36	2,40	17,00	47,80	15,30	2,90	1
37	4,50	18,00	73,20	14,50	1,30	1
38	1,70	17,50	78,34	18,90	2,10	1

Árvore matriz	HC (m)	HT (m)	DAP (cm)	DMC (m)	EC (cm)	Fruto
39	4,70	19,30	51,00	17,00	2,40	1
40	8,50	27,00	80,57	16,50	1,40	1

Nota: HC = altura comercial; HT = altura total; DAP = diâmetro à altura do peito; DMC = diâmetro médio da copa; EC = espessura da casca; Fruto: 0 = ausência e 1 = presença. “Morta” indica indivíduo morto no momento da avaliação.

Tabela C.2 – Atributos químicos do solo e altitude associados aos indivíduos de *Pterodon pubescens* amostrados em Aparecida d'Oeste (SP).

Árvore matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH-SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitude (m)
1	84,50	3,77	5,65	3	1,80	11	4,5	0,81	80,1	351,7
2	89,10	4,17	6,16	3	2,40	15	5,3	0,47	82,6	349,6
3	89,20	4,14	5,78	2	2,10	4	3,6	0,95	83	364,2
4	86,30	3,57	5,61	3	2,00	10	2,5	0,91	80,5	361,6
5	86,10	3,36	5,47	4	1,80	5	3	1,16	80,8	351,2
6	84,00	5,02	6,43	5	2,80	39	20,9	0,35	65,9	343,3
7	84,30	4,81	6,24	3	12,60	23	17,4	0,14	82,3	351,7
8	83,80	4,20	6,21	2	9,60	29	19,4	0,18	71,2	345,2
9	84,90	4,07	5,99	11	3,40	13	13,4	0,30	89,7	342,1
10	86,90	4,02	5,87	3	2,00	9	5,7	0,48	82,8	345,0
11	83,50	3,85	5,68	3	3,30	21	8,4	0,42	89,5	345,0
12	90,80	3,83	6,09	53	2,30	10	5,3	0,51	87,5	330,1
13	88,50	3,84	6,24	4	2,60	11	4,2	0,60	83,3	366,4
14	89,20	4,22	6,12	4	2,10	13	5,8	0,25	86,8	362,5
15	89,90	3,75	5,88	2	2,00	5	3,8	0,73	83	360,9
16	89,20	4,04	5,85	3	1,40	6	5,8	0,49	86,7	348,8
17	89,20	4,95	6,50	9	2,00	24	12,7	0,15	89,7	344,3
18	90,70	3,53	5,65	4	2,50	4	3,4	1,19	80	360,6
19	90,60	3,72	5,82	3	2,00	2	1,6	1,09	79,7	353,2
20	85,50	3,65	5,49	3	2,00	4	3,1	1,23	84,2	352,0
21	86,10	3,83	5,65	3	3,00	15	9,8	0,68	82,2	351,7
22	92,80	3,55	5,86	3	1,30	3	1,5	0,88	86,3	351,2
23	81,40	3,65	5,19	3	1,70	11	6,2	1,13	71,9	348,6
24	91,20	3,94	5,96	2	1,20	9	4,5	0,58	79	349,8
25	84,00	4,33	5,86	2	11,60	17	8,4	0,21	75,3	343,3
26	91,60	3,44	5,36	3	2,30	2	1,8	1,60	72,4	344,0
27	91,00	3,46	5,63	3	1,40	2	1,8	1,18	79,9	346,7
28	91,20	3,80	6,01	3	1,30	5	3,5	0,64	79,8	342,1
29	90,80	4,02	5,95	3	1,60	18	12,6	0,36	79,1	371,9
30	85,60	3,67	5,18	2	2,60	24	10,5	1,48	78,6	374,8

Árvore matriz	MO (g dm ⁻³)	pH	pH- SMP	P (mg dm ⁻³)	K (mmolc dm ⁻³)	Ca (mmolc dm ⁻³)	Mg (mmolc dm ⁻³)	Al (mmolc dm ⁻³)	S (mg dm ⁻³)	Altitude (m)
31	87,80	3,32	5,31	2	2,20	6	3,3	1,67	77,3	361,3
32	91,60	4,39	6,39	6	1,30	12	12	0,19	77,9	360,1
33	88,80	4,25	6,16	3	1,50	9	7	0,17	93	358,5
34	86,30	3,92	5,81	3	2,60	9	5,9	0,56	83,3	340,7
35	91,70	4,90	6,47	2	2,70	17	9,5	0,10	74,2	343,6
36	84,70	4,07	5,65	48	1,80	24	10,6	0,48	86,7	340,9
37	85,10	3,64	5,47	20	2,20	19	6,2	0,82	81,4	339,0
38	87,40	4,00	6,16	3	2,60	7	4,7	0,48	80	340,4
39	90,70	5,95	6,78	4	1,60	32	11,6	0,10	80,3	355,3
40	84,50	4,40	5,68	5	11,90	13	7,6	0,30	67	364,0

Nota: MO = matéria orgânica; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; S = enxofre. As unidades correspondem às adotadas nos laudos laboratoriais originais; altitude expressa em metros.

Tabela D1 – Estatística descritiva das variáveis dendrométricas de *Pterodon pubescens*

Variável	População	n	Média	Mediana	Mínimo	Q1	Q3	Máximo	DP	CV (%)
HC (m)	Total	134	5,23	4,75	1,40	3,40	6,67	14,00	2,50	47,81
HC (m)	Lagoa Santa (GO)	54	4,32	4,10	1,60	3,10	5,10	10,70	1,90	44,08
HC (m)	Selvíria (MS)	40	7,32	6,95	4,20	5,65	8,65	14,00	2,25	30,79
HC (m)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	4,39	3,95	1,40	2,40	5,68	8,90	2,24	50,96
HT (m)	Total	134	19,82	19,30	11,30	17,00	22,23	29,80	3,85	19,44
HT (m)	Lagoa Santa (GO)	54	18,78	18,30	13,00	16,50	21,38	26,00	2,97	15,83
HT (m)	Selvíria (MS)	40	21,05	20,15	13,10	18,00	25,20	28,30	4,24	20,13
HT (m)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	19,99	19,30	11,30	17,00	22,07	29,80	4,19	20,98
DAP (cm)	Total	134	64,52	64,00	26,43	55,26	75,48	105,73	15,12	23,43
DAP (cm)	Lagoa Santa (GO)	54	57,34	59,08	30,57	50,01	63,77	79,30	10,56	18,42
DAP (cm)	Selvíria (MS)	40	74,47	76,28	45,86	65,28	83,84	105,73	12,36	16,60
DAP (cm)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	64,26	66,56	26,43	51,44	76,44	102,55	17,38	27,05
DMC (m)	Total	134	15,39	15,40	7,50	13,40	17,30	25,20	3,12	20,29
DMC (m)	Lagoa Santa (GO)	54	14,16	13,90	7,50	11,95	16,18	21,20	3,00	21,22
DMC (m)	Selvíria (MS)	40	15,54	15,30	8,20	13,93	17,12	21,70	2,94	18,89
DMC (m)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	16,89	17,00	8,70	15,38	18,68	25,20	2,81	16,66
EC (cm)	Total	123	1,82	1,90	0,80	1,40	2,10	3,50	0,51	27,79
EC (cm)	Lagoa Santa (GO)	50	2,00	1,90	0,90	1,80	2,30	2,90	0,45	22,24
EC (cm)	Selvíria (MS)	39	1,82	1,90	0,80	1,40	2,10	3,50	0,51	28,21
EC (cm)	Aparecida d'Oeste (SP)	34	1,56	1,45	0,80	1,10	1,90	2,90	0,48	30,61

Nota: DP = desvio-padrão amostral; CV = (DP/média) × 100; Q1 e Q3 correspondem aos percentis 25 e 75. Registros “Morta” foram tratados como ausentes.

Tabela D2 – Estatística descritiva das variáveis edáficas e da altitude associadas a *Pterodon pubescens*

Variável	População	n	Média	Mediana	Mínimo	Q1	Q3	Máximo	DP	CV (%)
MO (g dm⁻³)	Total	134	89,12	89,85	75,20	86,50	91,50	95,00	3,36	3,77
MO (g dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	91,76	91,60	86,10	91,02	92,80	95,00	1,63	1,78
MO (g dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	86,94	87,65	75,20	85,67	89,00	92,20	3,10	3,57
MO (g dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	87,76	88,15	81,40	85,05	90,70	92,80	2,98	3,39
pH	Total	134	3,94	3,84	3,32	3,70	4,11	5,95	0,41	10,30
pH	Lagoa Santa (GO)	54	3,75	3,75	3,41	3,60	3,83	4,76	0,23	6,10
pH	Selvíria (MS)	40	4,12	4,08	3,49	3,92	4,19	5,34	0,36	8,69
pH	Aparecida d'Oeste (SP)	40	4,03	3,93	3,32	3,67	4,21	5,95	0,52	13,03
pH-SMP	Total	134	5,85	5,83	5,18	5,66	5,99	6,78	0,26	4,45
pH-SMP	Lagoa Santa (GO)	54	5,77	5,78	5,50	5,61	5,88	6,40	0,18	3,12
pH-SMP	Selvíria (MS)	40	5,91	5,92	5,55	5,79	6,01	6,51	0,19	3,23
pH-SMP	Aparecida d'Oeste (SP)	40	5,88	5,86	5,18	5,65	6,16	6,78	0,37	6,30
P (mg dm⁻³)	Total	134	5,75	3,00	1,00	2,25	4,00	53,00	8,36	145,52
P (mg dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	2,78	3,00	1,00	2,00	3,00	6,00	0,79	28,55
P (mg dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	9,25	5,50	2,00	3,00	9,75	42,00	9,83	106,26
P (mg dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	6,25	3,00	2,00	3,00	4,00	53,00	10,77	172,28
K (mmolc dm⁻³)	Total	134	2,20	1,45	1,10	1,30	2,00	13,10	2,30	104,15
K (mmolc dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	1,59	1,30	1,20	1,20	1,30	12,60	1,58	99,37
K (mmolc dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	2,21	1,50	1,10	1,30	1,92	13,10	2,22	100,11
K (mmolc dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	3,03	2,10	1,20	1,77	2,60	12,60	2,91	96,02
Ca (mmolc dm⁻³)	Total	134	8,21	5,50	1,00	2,00	11,00	44,00	7,83	95,44
Ca (mmolc dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	2,63	2,00	1,00	1,00	3,00	14,00	2,06	78,28
Ca (mmolc dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	11,15	10,00	2,00	7,00	14,00	44,00	7,20	64,60
Ca (mmolc dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	12,80	11,00	2,00	5,75	17,25	39,00	8,84	69,05
Mg (mmolc dm⁻³)	Total	134	4,56	3,35	0,30	1,60	5,88	21,60	4,21	92,33
Mg (mmolc dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	1,61	1,35	0,30	0,93	1,80	8,00	1,25	77,11

Variável	População	n	Média	Mediana	Mínimo	Q1	Q3	Máximo	DP	CV (%)
Mg (mmolc dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	5,88	5,50	1,60	3,77	6,72	21,60	3,73	63,49
Mg (mmolc dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	7,22	5,80	1,50	3,58	9,98	20,90	4,84	66,97
Al (mmolc dm⁻³)	Total	134	0,74	0,72	0,09	0,41	1,08	1,67	0,38	51,67
Al (mmolc dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	1,01	1,06	0,23	0,91	1,13	1,44	0,24	23,66
Al (mmolc dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	0,45	0,42	0,09	0,33	0,56	0,83	0,19	41,36
Al (mmolc dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	0,65	0,54	0,10	0,30	0,92	1,67	0,43	66,42
S (mg dm⁻³)	Total	134	85,07	86,35	51,60	81,33	89,85	96,80	6,70	7,88
S (mg dm⁻³)	Lagoa Santa (GO)	54	89,80	90,35	80,80	88,35	91,97	96,80	3,53	3,93
S (mg dm⁻³)	Selvíria (MS)	40	82,88	85,00	51,60	80,58	86,65	89,30	6,86	8,27
S (mg dm⁻³)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	80,87	80,65	65,90	78,90	83,53	93,00	5,94	7,34
Altitude (m)	Total	134	380,54	355,80	330,10	339,82	432,43	443,00	45,09	11,85
Altitude (m)	Lagoa Santa (GO)	54	434,19	433,30	423,60	431,80	438,00	443,00	4,27	0,98
Altitude (m)	Selvíria (MS)	40	337,21	335,50	330,60	333,65	339,12	356,30	5,85	1,73
Altitude (m)	Aparecida d'Oeste (SP)	40	351,43	350,50	330,10	343,90	360,23	374,80	9,80	2,79

Nota: DP = desvio-padrão amostral; CV = (DP/média) × 100; Q1 e Q3 correspondem aos percentis 25 e 75. Registros “Morta” foram tratados como ausentes.

Tabela E – Teste de Shapiro-Wilk para todas as variáveis

Variável	População	n	W	p-valor	Interpretação
HC (m)	Total	134	0.9537	0.0002	Não normal
HC (m)	GO	54	0.9196	0.0014	Não normal
HC (m)	MS	40	0.9259	0.0118	Não normal
HC (m)	SP	40	0.9217	0.0087	Não normal
HT (m)	Total	134	0.9767	0.0214	Não normal
HT (m)	GO	54	0.9683	0.1613	Normal
HT (m)	MS	40	0.949	0.0703	Normal
HT (m)	SP	40	0.9675	0.298	Normal
DAP (cm)	Total	134	0.9951	0.9312	Normal
DAP (cm)	GO	54	0.9849	0.7277	Normal
DAP (cm)	MS	40	0.9834	0.8128	Normal
DAP (cm)	SP	40	0.9675	0.2982	Normal
DMC (m)	Total	134	0.9949	0.9176	Normal
DMC (m)	GO	54	0.9876	0.8478	Normal
DMC (m)	MS	40	0.9798	0.6832	Normal
DMC (m)	SP	40	0.9667	0.2822	Normal
EC (cm)	Total	123	0.977	0.0339	Não normal

Variável	População	n	W	p-valor	Interpretação
EC (cm)	GO	50	0.9681	0.193	Normal
EC (cm)	MS	39	0.9505	0.0853	Normal
EC (cm)	SP	34	0.941	0.0661	Normal
Fruto	Total	123	0.5759	0.0	Não normal
Fruto	GO	50	0.6362	0.0	Não normal
Fruto	MS	39	0.5448	0.0	Não normal
Fruto	SP	34	0.3224	0.0	Não normal
MO (g dm ⁻³)	Total	134	0.9477	0.0001	Não normal
MO (g dm ⁻³)	GO	54	0.9577	0.0545	Normal
MO (g dm ⁻³)	MS	40	0.8936	0.0013	Não normal
MO (g dm ⁻³)	SP	40	0.9415	0.0387	Não normal
pH	Total	134	0.8544	0.0	Não normal
pH	GO	54	0.8442	0.0	Não normal
pH	MS	40	0.7938	0.0	Não normal
pH	SP	40	0.8776	0.0005	Não normal
pH-SMP	Total	134	0.9727	0.0085	Não normal
pH-SMP	GO	54	0.9378	0.0076	Não normal
pH-SMP	MS	40	0.9583	0.146	Normal
pH-SMP	SP	40	0.9857	0.8863	Normal
P (mg dm ⁻³)	Total	134	0.4578	0.0	Não normal
P (mg dm ⁻³)	GO	54	0.7942	0.0	Não normal
P (mg dm ⁻³)	MS	40	0.7159	0.0	Não normal
P (mg dm ⁻³)	SP	40	0.3889	0.0	Não normal
K (mmolc dm ⁻³)	Total	134	0.4377	0.0	Não normal
K (mmolc dm ⁻³)	GO	54	0.2287	0.0	Não normal
K (mmolc dm ⁻³)	MS	40	0.4633	0.0	Não normal
K (mmolc dm ⁻³)	SP	40	0.5287	0.0	Não normal
Ca (mmolc dm ⁻³)	Total	134	0.8151	0.0	Não normal
Ca (mmolc dm ⁻³)	GO	54	0.6718	0.0	Não normal
Ca (mmolc dm ⁻³)	MS	40	0.7906	0.0	Não normal
Ca (mmolc dm ⁻³)	SP	40	0.9158	0.0057	Não normal
Mg (mmolc dm ⁻³)	Total	134	0.8164	0.0	Não normal
Mg (mmolc dm ⁻³)	GO	54	0.7435	0.0	Não normal
Mg (mmolc dm ⁻³)	MS	40	0.8049	0.0	Não normal
Mg (mmolc dm ⁻³)	SP	40	0.889	0.0009	Não normal
Al (mmolc dm ⁻³)	Total	134	0.9628	0.001	Não normal
Al (mmolc dm ⁻³)	GO	54	0.9103	0.0007	Não normal
Al (mmolc dm ⁻³)	MS	40	0.9652	0.2511	Normal
Al (mmolc dm ⁻³)	SP	40	0.9274	0.0133	Não normal
S (mg dm ⁻³)	Total	134	0.9172	0.0	Não normal
S (mg dm ⁻³)	GO	54	0.948	0.0204	Não normal
S (mg dm ⁻³)	MS	40	0.7373	0.0	Não normal
S (mg dm ⁻³)	SP	40	0.9637	0.2237	Normal
Altitude (m)	Total	134	0.765	0.0	Não normal
Altitude (m)	GO	54	0.9723	0.2429	Normal
Altitude (m)	MS	40	0.7831	0.0	Não normal

Variável	População	n	W	p-valor	Interpretação
Altitude (m)	SP	40	0.9638	0.2253	Normal

Tabela F – Teste de Levene para homogeneidade das variâncias

Teste aplicado entre as três populações (GO, MS e SP). Valores de $p \geq 0,05$ indicam homogeneidade das variâncias.

Variável	n GO	n MS	n SP	F (Levene)	p-valor	Interpretação
HC (m)	54	40	40	0.8696	0.4215	Homogêneas
HT (m)	54	40	40	3.76	0.0258	Heterogêneas
DAP (cm)	54	40	40	5.2167	0.0066	Heterogêneas
DMC (m)	54	40	40	0.4256	0.6543	Homogêneas
EC (cm)	50	39	34	0.3438	0.7097	Homogêneas
Fruto	50	39	34	8.526	0.0003	Heterogêneas
MO (g dm ⁻³)	54	40	40	10.1546	0.0001	Heterogêneas
pH	54	40	40	6.9361	0.0014	Heterogêneas
pH-SMP	54	40	40	12.8628	0.0	Heterogêneas
P (mg dm ⁻³)	54	40	40	6.4621	0.0021	Heterogêneas
K (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2.4	0.0947	Homogêneas
Ca (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	16.9984	0.0	Heterogêneas
Mg (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	14.3155	0.0	Heterogêneas
Al (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	12.0148	0.0	Heterogêneas
S (mg dm ⁻³)	54	40	40	2.6334	0.0756	Homogêneas
Altitude (m)	54	40	40	12.7046	0.0	Heterogêneas

Tabela G – ANOVA entre populações

Variável	n GO	n MS	n SP	gl1	gl2	F	p-valor	Conclusão
HC (m)	54	40	40	2	131	27.7477	0.0	Diferença significativa
HT (m)	54	40	40	2	131	4.2448	0.0164	Diferença significativa
DAP (cm)	54	40	40	2	131	18.6708	0.0	Diferença significativa
DMC (m)	54	40	40	2	131	10.0703	0.0001	Diferença significativa
EC (cm)	50	39	34	2	131	8.871	0.0003	Diferença significativa
Fruto	50	39	34	2	131	8.526	0.0003	Diferença significativa
MO (g dm ⁻³)	54	40	40	2	131	48.6203	0.0	Diferença significativa
pH	54	40	40	2	131	12.2291	0.0	Diferença significativa
pH-SMP	54	40	40	2	131	4.0127	0.0204	Diferença significativa
P (mg dm ⁻³)	54	40	40	2	131	7.6897	0.0007	Diferença significativa
K (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2	131	4.7966	0.0098	Diferença significativa
Ca (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2	131	35.5091	0.0	Diferença significativa
Mg (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2	131	34.9808	0.0	Diferença significativa
Al (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2	131	42.761	0.0	Diferença significativa
S (mg dm ⁻³)	54	40	40	2	131	35.663	0.0	Diferença significativa
Altitude (m)	54	40	40	2	131	2864.9156	0.0	Diferença significativa

Tabela H – Teste de Tukey (HSD) para comparações múltiplas entre populações

Comparações par-a-par entre GO, MS e SP após ANOVA. A coluna 'Diferença significativa' indica rejeição de H₀ ($\alpha=0,05$).

Variável	Grupo 1	Grupo 2	Diferença média	p-ajustado	IC inf.	IC sup.	Diferença significativa
HC (m)	GO	MS	3.001	0.0	1.956	4.046	Sim
HC (m)	GO	SP	0.071	0.986	-0.974	1.115	Não
HC (m)	MS	SP	-2.93	0.0	-4.05	-1.81	Sim
HT (m)	GO	MS	2.27	0.0124	0.409	4.13	Sim
HT (m)	GO	SP	1.217	0.2707	-0.643	3.078	Não
HT (m)	MS	SP	-1.052	0.4254	-3.047	0.942	Não
DAP (cm)	GO	MS	17.126	0.0	10.48	23.772	Sim
DAP (cm)	GO	SP	6.92	0.0392	0.274	13.566	Sim
DAP (cm)	MS	SP	-10.206	0.0026	-17.33	-3.083	Sim
DMC (m)	GO	MS	1.388	0.0634	-0.061	2.836	Não
DMC (m)	GO	SP	2.73	0.0	1.282	4.178	Sim
DMC (m)	MS	SP	1.343	0.1044	-0.21	2.895	Não
EC (cm)	GO	MS	-0.179	0.1884	-0.42	0.063	Não
EC (cm)	GO	SP	-0.446	0.0001	-0.698	-0.195	Sim
EC (cm)	MS	SP	-0.267	0.048	-0.532	-0.002	Sim
Fruto	GO	MS	0.224	0.0458	0.003	0.444	Sim
Fruto	GO	SP	0.392	0.0003	0.163	0.621	Sim
Fruto	MS	SP	0.168	0.229	-0.074	0.41	Não
MO (g dm ⁻³)	GO	MS	-4.82	0.0	-6.089	-3.552	Sim
MO (g dm ⁻³)	GO	SP	-3.993	0.0	-5.261	-2.724	Sim
MO (g dm ⁻³)	MS	SP	0.828	0.3221	-0.532	2.187	Não
pH	GO	MS	0.366	0.0	0.18	0.552	Sim

Variável	Grupo 1	Grupo 2	Diferença média	p-ajustado	IC inf.	IC sup.	Diferença significativa
pH	GO	SP	0.272	0.002	0.086	0.458	Sim
pH	MS	SP	-0.094	0.5064	-0.293	0.105	Não
pH-SMP	GO	MS	0.139	0.0263	0.013	0.265	Sim
pH-SMP	GO	SP	0.111	0.0967	-0.015	0.237	Não
pH-SMP	MS	SP	-0.029	0.8711	-0.163	0.106	Não
P (mg dm ⁻³)	GO	MS	6.472	0.0005	2.53	10.414	Sim
P (mg dm ⁻³)	GO	SP	3.472	0.0962	-0.47	7.414	Não
P (mg dm ⁻³)	MS	SP	-3.0	0.2154	-7.225	1.225	Não
K (mmolc dm ⁻³)	GO	MS	0.63	0.369	-0.474	1.734	Não
K (mmolc dm ⁻³)	GO	SP	1.442	0.0067	0.338	2.546	Sim
K (mmolc dm ⁻³)	MS	SP	0.812	0.2377	-0.371	1.996	Não
Ca (mmolc dm ⁻³)	GO	MS	8.52	0.0	5.377	11.664	Sim
Ca (mmolc dm ⁻³)	GO	SP	10.17	0.0	7.027	13.314	Sim
Ca (mmolc dm ⁻³)	MS	SP	1.65	0.4787	-1.72	5.02	Não
Mg (mmolc dm ⁻³)	GO	MS	4.268	0.0	2.573	5.962	Sim
Mg (mmolc dm ⁻³)	GO	SP	5.605	0.0	3.911	7.3	Sim
Mg (mmolc dm ⁻³)	MS	SP	1.337	0.1923	-0.479	3.154	Não
Al (mmolc dm ⁻³)	GO	MS	-0.56	0.0	-0.708	-0.412	Sim
Al (mmolc dm ⁻³)	GO	SP	-0.363	0.0	-0.511	-0.215	Sim
Al (mmolc dm ⁻³)	MS	SP	0.197	0.0105	0.039	0.355	Sim
S (mg dm ⁻³)	GO	MS	-6.92	0.0	-9.607	-4.234	Sim
S (mg dm ⁻³)	GO	SP	-8.928	0.0	-11.614	-6.241	Sim
S (mg dm ⁻³)	MS	SP	-2.007	0.2275	-4.887	0.872	Não
Altitude (m)	GO	MS	-96.973	0.0	-100.332	-93.613	Sim
Altitude (m)	GO	SP	-82.753	0.0	-86.112	-79.393	Sim
Altitude (m)	MS	SP	14.22	0.0	10.619	17.821	Sim

Tabela I – Teste de Kruskal–Wallis entre populações

Aplicado às variáveis para comparação entre GO, MS e SP. gl = 2. Valores de p < 0,05 indicam diferenças significativas entre as populações.

Variável	n GO	n MS	n SP	gl	H	p-valor	Conclusão
HC (m)	54	40	40	2	41.3002	<0,001	Diferença significativa
HT (m)	54	40	40	2	8.1241	0,0172	Diferença significativa
DAP (cm)	54	40	40	2	32.0931	<0,001	Diferença significativa
DMC (m)	54	40	40	2	19.3379	<0,001	Diferença significativa
EC (cm)	50	39	34	2	17.2019	<0,001	Diferença significativa
Fruto	50	39	34	2	15.1792	<0,001	Diferença significativa
MO (g dm ⁻³)	54	40	40	2	68.1724	<0,001	Diferença significativa
pH	54	40	40	2	34.1968	<0,001	Diferença significativa
pH-SMP	54	40	40	2	11.0994	0,0039	Diferença significativa
P (mg dm ⁻³)	54	40	40	2	27.1803	<0,001	Diferença significativa
K (mmolc dm ⁻³)	54	40	40	2	47.7406	<0,001	Diferença significativa

Variável	n GO	n MS	n SP	gl	H	p-valor	Conclusão
Ca (mmolc dm⁻³)	54	40	40	2	74.1274	<0,001	Diferença significativa
Mg (mmolc dm⁻³)	54	40	40	2	76.3682	<0,001	Diferença significativa
Al (mmolc dm⁻³)	54	40	40	2	53.3928	<0,001	Diferença significativa
S (mg dm⁻³)	54	40	40	2	62.2478	<0,001	Diferença significativa
Altitude (m)	54	40	40	2	110.5548	<0,001	Diferença significativa

Tabela J – Cargas fatoriais (loadings) da Análise de Componentes Principais (PCA)

As cargas fatoriais representam a correlação entre cada variável e os componentes principais retidos pelo critério de Kaiser (autovalor > 1). Valores absolutos elevados indicam maior contribuição da variável para o componente.

Variável	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
HC (m)	0.129	0.188	0.603	0.248	-0.082	-0.158
HT (m)	0.130	0.466	0.308	-0.132	-0.183	0.119
DAP (cm)	0.183	0.454	0.132	-0.285	0.126	-0.075
DMC (m)	0.150	0.371	-0.215	-0.402	0.251	0.111
EC (cm)	-0.088	-0.001	0.171	-0.085	0.519	0.625
Fruto	0.125	0.156	-0.486	-0.106	0.146	-0.386
MO (g dm ⁻³)	-0.312	-0.099	0.110	-0.382	0.100	-0.231
pH	0.307	-0.331	0.195	-0.131	-0.031	-0.019
pH-SMP	0.223	-0.348	0.162	-0.400	0.219	-0.249
P (mg dm ⁻³)	0.110	0.057	-0.091	0.478	0.565	-0.026
K (mmolc dm ⁻³)	0.265	-0.058	-0.127	-0.155	-0.313	0.329
Ca (mmolc dm ⁻³)	0.366	-0.151	-0.114	0.070	0.020	0.192
Mg (mmolc dm ⁻³)	0.364	-0.184	-0.086	0.014	-0.036	0.171
Al (mmolc dm ⁻³)	-0.335	0.169	-0.226	0.087	-0.183	0.169
S (mg dm ⁻³)	-0.290	-0.141	0.202	-0.066	0.259	-0.076
Altitude (m)	-0.317	-0.164	-0.013	-0.258	-0.105	0.280

Nota: Valores em negrito ($|\text{loading}| \geq 0,50$) indicam as variáveis com maior contribuição para cada componente principal.

Regressões lineares simples por caráter dendrométrico

As tabelas a seguir apresentam as regressões lineares simples entre cada caráter dendrométrico e os atributos do solo/ambiente. Para cada modelo são apresentados a equação da reta, R², o p-valor e a interpretação da significância estatística.

Tabela K1 – Regressões lineares simples para HC (m)

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
HC (m)	MO (g dm ⁻³)	$y = -0.1862x + 21.8244$	0.0625	0,0036	Significativa
HC (m)	pH	$y = 1.4064x - 0.3140$	0.0522	0,0079	Significativa
HC (m)	pH-SMP	$y = 1.0350x - 0.8164$	0.0116	0,2157	Não significativa
HC (m)	P (mg dm ⁻³)	$y = 0.0313x + 5.0539$	0.0109	0,2297	Não significativa
HC (m)	K (mmolc dm ⁻³)	$y = 0.0678x + 5.0840$	0.0039	0,4751	Não significativa
HC (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	$y = 0.0386x + 4.9168$	0.0146	0,1644	Não significativa
HC (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	$y = 0.0630x + 4.9461$	0.0112	0,2227	Não significativa
HC (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	$y = -2.0732x + 6.7633$	0.0998	<0,001	Significativa
HC (m)	Altitude (m)	$y = -0.0197x + 12.7376$	0.1263	<0,001	Significativa
HC (m)	S (mg dm ⁻³)	$y = -0.0569x + 10.0764$	0.0232	0,0787	Não significativa

Tabela K2 – Regressões lineares simples para HT (m)

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
HT (m)	MO (g dm ⁻³)	y = -0.2624x + 43.2068	0.0524	0,0078	Significativa
HT (m)	pH	y = 1.0287x + 15.7613	0.0118	0,2120	Não significativa
HT (m)	pH-SMP	y = -0.4949x + 22.7115	0.0011	0,7014	Não significativa
HT (m)	P (mg dm ⁻³)	y = -0.0095x + 19.8732	0.0004	0,8132	Não significativa
HT (m)	K (mmolc dm ⁻³)	y = 0.3111x + 19.1330	0.0344	0,0320	Significativa
HT (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	y = 0.0534x + 19.3801	0.0118	0,2114	Não significativa
HT (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	y = 0.1126x + 19.3051	0.0151	0,1566	Não significativa
HT (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	y = -1.5956x + 20.9961	0.0249	0,0684	Não significativa
HT (m)	Altitude (m)	y = -0.0201x + 27.4600	0.0552	0,0063	Significativa
HT (m)	S (mg dm ⁻³)	y = -0.1595x + 33.3860	0.0769	0,0012	Significativa

Tabela K3 – Regressões lineares simples para DAP (cm)

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
DAP (cm)	MO (g dm ⁻³)	y = -1.1011x + 162.6570	0.0599	0,0044	Significativa
DAP (cm)	pH	y = 4.5988x + 46.3835	0.0153	0,1547	Não significativa
DAP (cm)	pH-SMP	y = 7.5408x + 20.4438	0.0169	0,1349	Não significativa
DAP (cm)	P (mg dm ⁻³)	y = 0.0878x + 64.0180	0.0024	0,5772	Não significativa
DAP (cm)	K (mmolc dm ⁻³)	y = 1.5983x + 61.0005	0.0589	0,0047	Significativa
DAP (cm)	Ca (mmolc dm ⁻³)	y = 0.3964x + 61.2690	0.0422	0,0173	Significativa
DAP (cm)	Mg (mmolc dm ⁻³)	y = 0.6849x + 61.3985	0.0364	0,0272	Significativa
DAP (cm)	Al (mmolc dm ⁻³)	y = -13.0387x + 74.1442	0.1081	<0,001	Significativa
DAP (cm)	Altitude (m)	y = -0.1374x + 116.8120	0.168	<0,001	Significativa
DAP (cm)	S (mg dm ⁻³)	y = -0.6782x + 122.2131	0.0903	<0,001	Significativa

Tabela K4 – Regressões lineares simples para DMC (m)

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
DMC (m)	MO (g dm ⁻³)	y = -0.1526x + 28.9874	0.027	0,0579	Não significativa
DMC (m)	pH	y = 0.3030x + 14.1915	0.0016	0,6509	Não significativa
DMC (m)	pH-SMP	y = 1.2961x + 7.8103	0.0117	0,2139	Não significativa
DMC (m)	P (mg dm ⁻³)	y = 0.0401x + 15.1560	0.0116	0,2164	Não significativa
DMC (m)	K (mmolc dm ⁻³)	y = 0.2934x + 14.7400	0.0465	0,0123	Significativa
DMC (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	y = 0.1061x + 14.5156	0.0709	0,0019	Significativa

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
DMC (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	y = 0.1813x + 14.5597	0.0598	0,0044	Significativa
DMC (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	y = -1.6032x + 16.5696	0.0383	0,0234	Significativa
DMC (m)	Altitude (m)	y = -0.0202x + 23.0647	0.085	<0,001	Significativa
DMC (m)	S (mg dm ⁻³)	y = -0.1104x + 24.7811	0.0562	0,0058	Significativa

Tabela K5 – Regressões lineares simples para EC (cm)

Resposta	Preditor	Equação	R ²	p-valor	Conclusão
EC (cm)	MO (g dm ⁻³)	y = 0.0181x + 0.2067	0.0149	0,1791	Não significativa
EC (cm)	pH	y = -0.1634x + 2.4664	0.0177	0,1427	Não significativa
EC (cm)	pH-SMP	y = -0.0365x + 2.0352	0.0004	0,8356	Não significativa
EC (cm)	P (mg dm ⁻³)	y = 0.0053x + 1.7920	0.0063	0,3829	Não significativa
EC (cm)	K (mmolc dm ⁻³)	y = -0.0377x + 1.9059	0.0317	0,0489	Significativa
EC (cm)	Ca (mmolc dm ⁻³)	y = -0.0070x + 1.8797	0.0122	0,2234	Não significativa
EC (cm)	Mg (mmolc dm ⁻³)	y = -0.0191x + 1.9093	0.0265	0,0722	Não significativa
EC (cm)	Al (mmolc dm ⁻³)	y = 0.1599x + 1.7035	0.0144	0,1856	Não significativa
EC (cm)	Altitude (m)	y = 0.0030x + 0.6786	0.0721	0,0027	Significativa
EC (cm)	S (mg dm ⁻³)	y = 0.0149x + 0.5591	0.0399	0,0267	Significativa

Tabela L – Regressões lineares múltiplas

Resumo dos modelos de regressão linear múltipla ajustados para cada caráter dendrométrico utilizando simultaneamente os atributos do solo e altitude como variáveis preditoras.

Resposta	n	R ²	R ² ajustado	F	p(modelo)	AIC	BIC
HC (m)	134	0.2281	0.1653	3.634	<0,001	612.37	644.24
HT (m)	134	0.1558	0.0871	2.269	0,0179	740.05	771.93
DAP (cm)	134	0.2775	0.2188	4.725	<0,001	1085.58	1117.46
DMC (m)	134	0.2241	0.161	3.552	<0,001	672.35	704.23
EC (cm)	123	0.1658	0.0914	2.227	0,0210	180.31	211.24

Coefficientes dos modelos

Resposta	Parâmetro	Coefficiente	p-valor
HC (m)	const	26.9428	0,0048
HC (m)	MO (g dm ⁻³)	-0.1512	0,1950
HC (m)	P (mg dm ⁻³)	0.0022	0,9331
HC (m)	pH	1.8507	0,0400
HC (m)	pH-SMP	-1.0087	0,4564
HC (m)	K (mmolc dm ⁻³)	-0.0144	0,9099
HC (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	-0.0893	0,2361
HC (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	-0.1714	0,1921
HC (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	-1.8926	0,0918
HC (m)	Altitude (m)	-0.0133	0,1012
HC (m)	S (mg dm ⁻³)	-0.0192	0,6768
HT (m)	const	61.4106	<0,001
HT (m)	MO (g dm ⁻³)	-0.0443	0,8131
HT (m)	P (mg dm ⁻³)	-0.0277	0,5198
HT (m)	pH	1.3416	0,3520
HT (m)	pH-SMP	-4.0294	0,0662
HT (m)	K (mmolc dm ⁻³)	0.1702	0,4072
HT (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	-0.1526	0,2090
HT (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	-0.0185	0,9302
HT (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	-2.6589	0,1408
HT (m)	Altitude (m)	-0.0079	0,5470
HT (m)	S (mg dm ⁻³)	-0.1565	0,0361
DAP (cm)	const	129.8164	0,0193
DAP (cm)	MO (g dm ⁻³)	0.8705	0,2019
DAP (cm)	P (mg dm ⁻³)	-0.1653	0,2908
DAP (cm)	pH	-8.6388	0,1000
DAP (cm)	pH-SMP	-4.4265	0,5759
DAP (cm)	K (mmolc dm ⁻³)	2.029	0,0072
DAP (cm)	Ca (mmolc dm ⁻³)	0.3721	0,3979
DAP (cm)	Mg (mmolc dm ⁻³)	-1.3289	0,0844
DAP (cm)	Al (mmolc dm ⁻³)	-14.2087	0,0310
DAP (cm)	Altitude (m)	-0.1471	0,0023
DAP (cm)	S (mg dm ⁻³)	-0.1997	0,4579
DMC (m)	const	2.7609	0,8142
DMC (m)	MO (g dm ⁻³)	0.362	0,0140
DMC (m)	P (mg dm ⁻³)	-0.0075	0,8215
DMC (m)	pH	-3.6689	0,0013
DMC (m)	pH-SMP	0.3293	0,8457
DMC (m)	K (mmolc dm ⁻³)	0.3982	0,0136
DMC (m)	Ca (mmolc dm ⁻³)	0.2376	0,0126
DMC (m)	Mg (mmolc dm ⁻³)	-0.1082	0,5093
DMC (m)	Al (mmolc dm ⁻³)	-0.5663	0,6851
DMC (m)	Altitude (m)	-0.0273	0,0079
DMC (m)	S (mg dm ⁻³)	0.0166	0,7723
EC (cm)	const	1.7548	0,4033
EC (cm)	MO (g dm ⁻³)	-0.0362	0,1602
EC (cm)	P (mg dm ⁻³)	0.0084	0,2117
EC (cm)	pH	-0.2042	0,2989
EC (cm)	pH-SMP	0.3359	0,2475

Resposta	Parâmetro	Coefficiente	p-valor
EC (cm)	K (mmolc dm ⁻³)	-0.046	0,0939
EC (cm)	Ca (mmolc dm ⁻³)	0.0163	0,3270
EC (cm)	Mg (mmolc dm ⁻³)	-0.0235	0,4032
EC (cm)	Al (mmolc dm ⁻³)	-0.134	0,5839
EC (cm)	Altitude (m)	0.0054	0,0026
EC (cm)	S (mg dm ⁻³)	0.0026	0,8009

Tabela M – Fator de Inflação da Variância (VIF)

Avaliação da multicolinearidade entre os atributos ambientais utilizados como variáveis preditoras nos modelos de regressão. Valores de VIF inferiores a 5 indicam baixa multicolinearidade; entre 5 e 10 indicam multicolinearidade moderada; e superiores a 10 indicam alta multicolinearidade.

Variável	VIF	Interpretação
MO (g dm ⁻³)	1835.941	Alta multicolinearidade
pH-SMP	1439.125	Alta multicolinearidade
S (mg dm ⁻³)	354.676	Alta multicolinearidade
pH	319.217	Alta multicolinearidade
Altitude (m)	212.271	Alta multicolinearidade
Al (mmolc dm ⁻³)	18.095	Alta multicolinearidade
Ca (mmolc dm ⁻³)	16.911	Alta multicolinearidade
Mg (mmolc dm ⁻³)	16.726	Alta multicolinearidade
K (mmolc dm ⁻³)	3.764	Baixa multicolinearidade
P (mg dm ⁻³)	1.836	Baixa multicolinearidade

Tabela N – Critérios AIC e BIC dos modelos de regressão múltipla

Os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) foram utilizados para comparar os modelos ajustados para cada caráter dendrométrico. Valores menores de AIC e BIC indicam melhor equilíbrio entre qualidade de ajuste e parcimônia do modelo.

Variável resposta	n	R ²	R ² ajustado	AIC	BIC	p(modelo)
HC (m)	134	0.2281	0.1653	612.37	644.24	<0,001
HT (m)	134	0.1558	0.0871	740.05	771.93	0,0179
DAP (cm)	134	0.2775	0.2188	1085.58	1117.46	<0,001
DMC (m)	134	0.2241	0.161	672.35	704.23	<0,001
EC (cm)	123	0.1658	0.0914	180.31	211.24	0,0210

Nota: Entre modelos candidatos ajustados para a mesma variável resposta, os menores valores de AIC e BIC indicam maior suporte relativo ao modelo.

Tabela O - Distâncias entre indivíduos com inferência de fluxo gênico (Ind_C) e o número de árvores com potencial hipotético de serem polinizadas, estimadas a partir dos cálculos das distâncias entre indivíduos dentro de cada população.

Selvária MS				Aparecida d'Oeste SP				Lagoa Santa GO			
Matrizes MS	Ind_C_Lit	CV	N_ARV POLINIZADAS	Matrizes SP	Ind_C	CV	N_ARV POLINIZADAS	Matrizes GO	Ind_C	CV	N_ARV POLINIZADAS
13	16,577	42,4	40	33	1,382	50,706	10	29	63,704	55,36	54
14	16,384	45,1	40	39	1,357	49,451	10	1	63,563	57,09	54
40	15,963	48	40	35	1,348	52,093	10	2	63,116	56,87	54
39	15,685	50,2	40	34	1,343	100,343	10	34	62,381	56,98	54
12	15,103	50	40	18	1,333	86,782	13	3	62,181	54,17	54
23	14,953	53,3	40	19	1,326	89,003	13	33	62,168	56,99	54
11	14,899	49,4	40	1	1,325	89,127	13	35	61,138	55,6	54
38	14,662	55,7	40	20	1,324	89,061	13	5	60,766	53,29	54
15	14,556	51,7	40	40	1,323	48,532	10	32	60,462	52,61	54
24	14,474	51,2	40	2	1,321	89,062	13	4	60,155	52,81	54
16	14,123	49,7	40	21	1,32	88,997	13	24	59,69	53,2	54
10	14,114	47,1	40	22	1,319	89,196	13	28	58,766	50,3	54
21	14,081	51,6	40	24	1,311	88,323	13	25	58,744	53,87	54
9	14,006	54,7	40	23	1,311	88,838	14	27	57,46	50,73	54
8	13,911	54,6	40	6	1,29	51,222	10	23	57,152	55,1	54
7	13,699	54,3	40	38	1,287	46,734	10	54	56,198	55,77	54
6	13,318	53,3	40	37	1,284	50,96	10	26	56,168	51,4	54
37	13,298	53,7	40	36	1,276	89,007	10	22	55,679	55,57	54
22	13,154	53,8	40	17	1,265	87,739	17	21	53,667	53,73	54
17	13,012	51,7	40	16	1,262	87,836	17	36	52,691	49,98	54
35	12,925	57,5	40	7	1,255	47,897	10	52	52,215	54,61	54
36	12,92	56,6	40	15	1,252	82,653	17	6	51,983	44,95	54
4	12,309	42,6	40	14	1,247	82,127	17	20	51,561	53,86	54
25	12,256	42,4	40	32	1,237	92,399	10	53	51,337	55,37	54
28	12,116	48	40	13	1,194	78,015	18	37	50,232	46,99	54
1	12,104	42,2	40	9	0,947	73,72	10	19	50,075	54,44	54
26	12,049	44,4	40	8	0,943	73,565	9	51	48,71	52,11	54
27	12,033	47,6	40	10	0,939	73,342	9	18	48,459	53,85	54
5	12,027	51	40	11	0,933	72,673	9	17	47,758	53,43	54
2	11,85	41,1	40	12	0,896	69,77	5	50	45,377	51,82	54
29	11,497	51,1	40	5	0,852	58,186	9	45	44,585	53,56	54
34	11,485	55,7	40	28	0,851	60,051	9	14	44,101	49,58	54
33	11,363	56,3	40	27	0,848	58,491	9	16	43,93	50,76	54
30	11,282	51,9	40	26	0,846	58,471	9	46	43,604	53,36	54
32	11,129	55,5	40	25	0,84	58,294	9	13	42,953	48,96	54

3	10,747	39,5	40	31	0,788	54,996	7	47	42,387	52,56	54
31	10,692	53,8	40	3	0,755	50,16	6	15	42,098	49,02	54
18	10,345	48,3	40	4	0,75	50,171	6	38	41,21	47,88	54
19	8,93	44	40	30	0,699	47,959	7	12	40,735	46,11	54
20	8,167	40	40	29	0,694	51,877	7	39	39,96	47,12	54
M	12,95	49,78	40	M	1,13	70,2	11	40	39,928	47,53	54
DP	1,9172	5,0793	0	DP	0,2342	17,38	3,2	44	39,765	50,25	54
CVdp	14,8	10,2	0	CVdp	20,8	24,8	29,9	49	38,264	45,95	54
								7	37,594	35,37	54
								10	36,901	36,77	54
								48	36,444	46,19	54
								41	35,679	43,75	54
								42	35,034	44,16	54
								43	31,797	40,71	54
								8	30,635	31,83	54
								30	29,175	30,96	54
								31	28,205	28,9	54
								9	26,812	29,52	54
								11	24,717	30,56	54
								M	47,78	48,97	54
								DP	10,95	7,66	0
								CVdp	22,92	15,6385	0

DADOS CURRICULARES

Regivan Antonio de Saul é casado com Francieli Alves Caldeira Saul e pai de Maya Alves Caldeira Saul. Graduado em História pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS, 2004–2007), especializou-se em História Social do Trabalho pela mesma instituição (2008–2009), com pesquisas voltadas ao processo de ocupação do Oeste Paulista na primeira metade do século XX. Trabalhou como professor na rede pública do Estado de São Paulo (2008–2009) e, em agosto de 2009, ingressou no quadro efetivo do Banco do Brasil, onde atua como gerente e especialista na aplicação de políticas de crédito para a Agricultura Familiar.

Em sua segunda trajetória acadêmica, graduou-se em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp, 2016–2021). Concluiu o mestrado em Agronomia na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (Unesp/FEIS, 2021–2023) na área de Sistemas de Produção, apresentando a dissertação: Caracterização de remanescente florestal em uma região de ecótono entre o Noroeste Paulista e o Bolsão Sul Mato grossense: o caso do faveiro (*Pterodon pubescens* (Benth.) Benth.) - Fabaceae, com bolsa de pesquisa financiada pelo Banco do Brasil, e atualmente cursa o doutorado pelo mesmo programa e instituição.