



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

**ARQUÉTIPOS AERODINÂMICOS E MORFOLOGIA FUNCIONAL PARA
APLICAÇÃO EM BIOMIMÉTICA: ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE DIÁSPOROS
ANEMOCÓRICOS DO CERRADO**

Brasília – DF

2026



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

**ARQUÉTIPOS AERODINÂMICOS E MORFOLOGIA FUNCIONAL PARA
APLICAÇÃO EM BIOMIMÉTICA: ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE DIÁSPOROS
ANEMOCÓRICOS DO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Botânica do Instituto de Biologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Botânica.

Aluna: Lyzza Dawellyng Lima Pereira

Orientadora: Dra. Cristiane da Silva
Ferreira

Brasília – DF

2026

LYZZA DAWELLYNG LIMA PEREIRA

Arquétipos aerodinâmicos e morfologia funcional para aplicação em Biomimética:
estudos integrados sobre diásporos anemocóricos do Cerrado

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Cristiane da Silva Ferreira
Universidade de Brasília – UnB
(Orientadora, Presidente da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Davi Rodrigo Rossatto
Universidade Estadual Paulista – Unesp
(Membro externo)

Prof.^a. Dr.^a. Erondina Azevedo de Lima
Universidade de Brasília – UnB
(Membro interno)

Prof. Dr. Christopher William Fagg
Universidade de Brasília – UnB
(Membro suplente)

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo recurso do Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP).

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, por meio do Projeto Diversiflex, que possibilitou a adequação e a divulgação internacional do artigo decorrente desta dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade de Brasília, pela infraestrutura e pelo apoio institucional.

À minha orientadora, Prof.^a Dra. Cristiane da Silva Ferreira, pela recepção entusiasmada ao meu tema de pesquisa, pela paciência durante meu processo de familiarização com a Botânica, pela generosa troca de conhecimentos e pelas oportunidades e pontes construídas ao longo da minha trajetória acadêmica.

À Prof.^a Dra. Regina Célia, pelo auxílio na identificação taxonômica.

À Prof.^a Sueli Maria, pela troca de conhecimentos em Anatomia Vegetal.

Ao Prof. Dr. Marcos Ferraz, pela inspiração artístico-científica e pela mentoria em Ilustração Científica Botânica.

Ao técnico Eduardo Severo, pela parceria nas saídas de campo.

À técnica Ingrid Gracielle, pelo auxílio nas análises em Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao Grupo de Estudo em Sementes da UnB, pela doação de diásporos.

Ao projeto de extensão Meninas Cientistas na Fisiologia Vegetal, por ter me acolhido tão generosamente e por receber a coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado resultante deste estudo.

Aos amigos que a ciência me trouxe e que tornaram essa jornada mais leve e entusiasmante – Mariana, Thamilles, Maria Luísa, Bianca, Grazielle, Henrique, Severo, Isa, Raiane, Lucas, Camila, Rosa, Rafaela, Tawane, Rafael, Edimara, Ananda e William. A ciência se faz coletivamente, e nós somos um time.

À minha mãe, Luzia, e a minha irmã, Jhullyanny, pelo incentivo, apoio e compreensão diante da rotina desafiadora da pós-graduação.

Ao Gustavo, pelo amor, companheirismo e incentivo constantes, desdobrando-se para me acompanhar em saídas de campo, laboratório e conversas intermináveis sobre frutos que voam. Nada disso teria sido possível sem você.

*Ao Gustavo, por estar ao meu lado dando asas
aos frutos deste trabalho.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
RESUMO.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO GERAL	13
REFERÊNCIAS.....	15
CAPÍTULO I.....	16
Resumo	17
1. Introdução	18
2. Material e métodos	19
2.1 Área de estudo	19
2.2 Coleta de diásporos.....	20
2.3 Identificação taxonômica e categorização funcional.....	20
2.4 Construção da chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos e glossário funcional botânico-aerodinâmico	21
2.5 Destinação da coleção	22
3. Resultados.....	22
3.1 Diversidade anemocórica do Cerrado.....	22
3.2 Chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos e glossário funcional botânico-aerodinâmico	25
3.3 Coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado.....	34
4. Discussão.....	36
Referências	40
CAPÍTULO II.....	42
Resumo	43
1. Introdução	44
2. Material e métodos	45
2.1 Áreas de estudo.....	45
2.2 Espécies estudadas.....	46
2.3 Análise morfométrica	47
2.4 Análise alométrica	49
2.5 Análise aerodinâmica	50

2.6	Análise morfológica	50
2.7	Análise anatômica.....	51
3.	Resultados.....	51
3.1	Análise morfométrica	51
3.2	Análise alométrica	53
3.3	Análise aerodinâmica	55
3.4	Análise morfológica	57
3.5	Análise anatômica.....	60
3.5.1.	Micromorfologia.....	60
3.5.2.	Secção transversal.....	62
4.	Discussão.....	65
5.	Conclusão	74
	Referências	75
	ANEXOS.....	77
	ANEXO A.....	78
	ANEXO B.....	81
	ANEXO C.....	82
	ANEXO D.....	96
	ANEXO E.....	102

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Mapa de localização das áreas de coleta no Distrito Federal, Brasil. À esquerda, destaca-se a distribuição do bioma Cerrado no território brasileiro. À direita, ampliação do Distrito Federal mostrando as áreas de coleta, todos inseridos no bioma Cerrado. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000..... 20

Figura 2. Diversidade morfofuncional de diásporos anemocóricos do Cerrado. **a)** *Terminalia argentea*, fruto com ala simétrica. **b)** *Tachigali rubiginosa*, fruto com ala simétrica. **c)** *Machaerium hirtum*, fruto com ala assimétrica. **d)** *Banisteriopsis* sp., fruto com ala assimétrica. **e)** *Astronium urundeuva*, fruto com ala assimétrica não-coplanar. **f)** *Terminalia glabrescens*, fruto com ala assimétrica em geometria helicoidal. **g)** *Encyclia linearifolioides*, fruto cápsula aberto expondo sementes em escala submilimétrica. **h)** *Aspidosperma subincanum*, semente com membrana simétrica curta com geometria aproximadamente circular. **i)** *Amphilophium crucigerum*, semente com membrana simétrica alongada. **j)** *Loudetiopsis chrysothrix*, espiguetas aristadas. **k)** *Ceiba speciosa*, paina sedosa que envolve sementes. **l)** *Jacaranda ulei*, semente com membrana simétrica curta. **m)** *Eremanthus erythropappus*, aquênio com pápus aristado. Barras de escala: 1 cm. 24

Figura 3. Divulgação científica da coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado no âmbito do projeto Meninas Cientistas na Fisiologia Vegetal. **a)** Coleção de diásporos. **b-h)** Exposições da coleção para diferentes públicos: **b)** alunos do ensino médio; **c)** ensino fundamental (Alexânia-GO, com o projeto Botânica Sociológica Itinerante); **f)** graduandos em Biologia (Universidade Federal do Oeste da Bahia); **h)** público geral (25ª Semana Universitária da UnB); **i)** participantes do minicurso "Bioativos do Cerrado". **d)** Equipe do projeto. **e, g)** Ilustrações científicas expostas pelo Núcleo de Ilustração Científica da UnB (NICBio): **e)** frutos com alas assimétricas (ilustração da autora); **g)** *Encyclia linearifolioides* (ilustração da autora). 35

CAPÍTULO II

Figura 1. Frutos alados assimétricos do Cerrado. **a)** *Banisteriopsis megaphylla*. **b)** *Banisteriopsis variabilis*. **c)** *Banisteriopsis* sp. 2. **d)** *Heteropterys eglandulosa*. **e)** *Serjania lethalis*. **f)** *Heteropterys umbellata*. **g)** *Banisteriopsis* sp. 1. **h)** *Peixotoa goiana*. **i)** *Banisteriopsis argyrophylla*. **j)** *Heteropterys byrsonimifolia*. **k)** *Diplopterys pubipetala*. **l)** *Pterogyne nitens*. **m)** *Luetzelburgia auriculata*. **n)** *Vatairea macrocarpa*.

..... 47

Figura 2. Esquema conceitual simplificado da geometria, cinemática e aspectos aerodinâmicos de frutos alados assimétricos. **a)** Geometria em planta (*planform*) segmentada em linhas de corda. O vão, ou envergadura, representa o comprimento máximo do fruto, enquanto a corda corresponde à distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga em uma dada seção, indicando a largura local da ala. O centro de massa, representado pelo círculo vazado, está localizado na região proximal, onde a ala se ancora ao núcleo seminífero. A região distal corresponde à ponta da ala. **b)** Cinemática da autorrotação. O ângulo de cone (θ) expressa a inclinação do fruto em relação ao plano horizontal. A velocidade angular (ω) representa a taxa de rotação em torno do eixo vertical. **c)** Estrutura vortical tridimensional associada ao aerofólio. Os sinais opostos representam o gradiente de pressão entre as faces do perfil: menor pressão no extradorso (-) e maior no intradorso (+). No bordo de ataque do extradorso é formado o vórtice de bordo de ataque (LEV, do inglês *Leading-Edge Vortex*), cuja vorticidade é transportada e liberada em vórtices de bordo de fuga, contribuindo para a esteira vortical descendente. **d)** Camada limite de um aerofólio. O ponto de estagnação (\star) marca a região onde a velocidade do escoamento é nula e a pressão é máxima. O ponto de separação da camada limite (\blacksquare) indica o início do desprendimento do fluxo. A linha tracejada representa a camada limite, indicada também por δ . A partir dos pontos de separação (\blacksquare) seguem-se as linhas de separação (SL, do inglês *separation lines*), que delimitam a transição entre as regiões de fluxo aderente e separado. As SL organizam o fluxo desprendido e guiam sua evolução a jusante em estruturas vorticais coerentes. Elas contribuem para a formação de vórtices de ponta, que são posteriormente liberados na esteira descendente, ilustrada no painel anterior. 48

Figura 3. Análise alométrica dos frutos alados assimétricos utilizando regressão de Eixo Maior Padronizado (*Standardized Major Axis – SMA*). Os gráficos apresentam os ajustes empíricos em escala \log_{10} entre **a)** $A \sim m_{diaspore}^{2/3}$, **b)** $A \sim S^2$, **c)** $A \sim c^2$ e **d)** $A \sim cS$. Cada espécie é representada por uma cor e um símbolo, conforme indicado na figura. 54

Figura 4. Morfologia de frutos alados assimétricos. **a)** Esquizocarpo samarídeo bi-alar de *Heteropterys byrsonimifolia*. **b)** Esquizocarpo samarídeo tri-alar de *Banisteriopsis argyrophylla*. **c)** Esquizocarpo samarídeo tri-alar de *Banisteriopsis variabilis*. **d)** Sâmara cultriforme de *Vatairea macrocarpa*, com extensão falcada no ápice da ala. **e)** Sâmara cultriforme e de aspecto velutino de *Luetzelburgia auriculata*. **f)** Sâmara cultriforme e glabra de *Pterogyne nitens*, com ápice da ala acuminado. **g)** Núcleo seminífero reniforme, muricado e com indumento tomentoso seríceo em *Banisteriopsis* sp. (2). **h)** Núcleo seminífero oblongo e com indumento tomentoso seríceo em *Heteropterys byrsonimifolia*. **i)** Núcleo seminífero orbicular e com indumento tomentoso seríceo em *Serjania lethalis*. **j)** Núcleo seminífero trapezoidal e com indumento tomentoso seríceo em *Heteropterys umbellata*. **k)** Conjunto de alélulas conspícuas em *Diplopterys pubipetala*. **l)** Conjunto de alélulas conspícuas em *Luetzelburgia auriculata*. **m)**

Conjunto de alélulas conspícuas em *Peixotoa goiana*. **n)** Samarídeo cultriforme de *Banisteriopsis* sp. (1). **o)** Samarídeo cristiforme de *Heteropterys umbellata*. **p)** Samarídeo cristiforme de *Serjania lethalis*. 59

Figura 5. Padrão de nervação das alas de frutos alados assimétricos. **a)** *Banisteriopsis megaphylla*. **b)** *Banisteriopsis variabilis*. **c)** *Banisteriopsis* sp. (2). **d)** *Heteropterys eglandulosa*. **e)** *Serjania lethalis*, com nervuras curvilíneas a reticuladas, partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque. **f)** *Heteropterys umbellata*. **g)** *Banisteriopsis* sp. (1). **h)** *Peixotoa goiana*. **i)** *Heteropterys byrsonimifolia*. **j)** *Banisteriopsis argyrophylla*. **k)** *Diplopterys pubipetala*. **l)** *Pterogyne nitens*. **m)** *Luetzelburgia auriculata*, com nervuras partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque. **n)** *Vatairea macrocarpa*, com nervuras partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque. 60

Figura 6. Micromorfologia das alas de frutos alados assimétricos. **a)** Epiderme alveolada composta por células poligonais com paredes anticlinais sinuosas e espessadas e paredes periclinais côncavas, em *Banisteriopsis variabilis*. **b)** Epiderme com células alongadas, estreitas e justapostas, com paredes anticlinais levemente sinuosas e periclinais levemente convexas, em *Serjania lethalis*. **c)** Epiderme com sulcos nos limites intercelulares e células com protuberância irregular, em *Heteropterys umbellata*. **d)** Tricomas simples, filiformes e afilados, dispostos em diferentes direções, em *Banisteriopsis argyrophylla*. **e)** Tricomas simples, filiformes e afilados, dispostos na mesma direção, em *Heteropterys eglandulosa*. **f)** Tricomas justapostos em faixas longitudinais, alternando com regiões glabras, em *Banisteriopsis megaphylla*. **g)** Tricomas ramificados em forma de Y, dispostos em diferentes direções, em *Peixotoa goiana*. **h)** Cicatriz de tricoma em *Banisteriopsis megaphylla*. **i)** Estômato em *Pterogyne nitens*. 62

Figura 7. Secções transversais das alas de frutos alados assimétricos. **a)** Estrutura anatômica da ala de *Heteropterys byrsonimifolia*, expondo nervuras reforçadas e tecido internerval complacente. **b)** Nervuras da ala de *Heteropterys byrsonimifolia*, compostas por células tubulares compactas, de paredes espessas e lignificadas, dispostas longitudinalmente. **c)** Tecido internerval em *Banisteriopsis variabilis*, composto por aerênquima com células parenquimáticas tubulares e ocas, de paredes finas, muito ramificadas, com orientação aleatória e câmaras aeríferas de pequena dimensão. **d)** Mesofilo da ala de *Pterogyne nitens*, composto por colênquima angular. **e)** Mesofilo da ala de *Luetzelburgia auriculata*, composto por camadas de colênquima que delimitam uma camada central de aerênquima. **f)** Câmaras aeríferas de grande dimensão no aerênquima de *Luetzelburgia auriculata*. 64

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1. Espécies do Cerrado com frutos alados assimétricos, suas famílias e hábito 47

Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão de dados morfométricos dos frutos alados assimétricos. Inferência de 200 reamostragens *bootstrap* de $n = 20$ para cada espécie, onde, $m_{diaspore}$ é a massa do fruto e m_{seed} é a massa do núcleo seminífero, ambas expressas em miligramas; S , c e \varnothing são vão, corda e espessura, respectivamente, expressas em centímetros, e A é a área projetada do fruto, em centímetros quadrados. 53

Tabela 3. Propriedades aerodinâmicas dos frutos alados assimétricos. Valores empíricos de razão de aspecto (AR), adimensional, e da carga alar (W/S), expressa em newtons por metro quadrado, obtidos a partir de médias morfométricas..... 56

RESUMO

Este estudo avança na organização e compreensão da diversidade de diásporos anemocóricos, com o Cerrado como sítio empírico, por meio de dois estudos interligados. O Capítulo I analisa 63 espécies e, a partir dessa amostragem, propõe uma nova classificação funcional baseada em sete arquétipos aerodinâmicos, os quais agrupam diásporos por similaridade de forma e tipo de voo. Como produto principal, é apresentada uma chave de identificação funcional que operacionaliza essa classificação. O Capítulo II realiza uma investigação aprofundada de um arquétipo aerodinâmico, os frutos alados assimétricos com autorrotação estável. Através de análises morfométricas, alométricas, morfoanatômicas e de princípios aerodinâmicos, o estudo revela um espectro de soluções estruturais que otimizam a dispersão passiva, identificando padrões convergentes e um *trade-off* específico. Além disso, apresenta conexões entre essas soluções biológicas em plantas e oportunidades no *design* biomimético. Em conjunto, os capítulos demonstram que a articulação entre a classificação abrangente e a análise mecânica focalizada oferece um caminho para transformar a diversidade vegetal observada em conhecimento organizado e em *insights* transferíveis para a inovação inspirada na natureza.

Palavras-chave: anemocoria, arquétipo aerodinâmico, Biomimética, Cerrado, diásporo, morfologia funcional

ABSTRACT

This study advances the organisation and understanding of anemochorous diaspore diversity in the Cerrado through two interlinked studies. Chapter I analyses 63 species and proposes a new functional classification based on seven aerodynamic archetypes, which group diaspores by similarity of form and flight type. A functional identification key is presented as the primary tool to operationalise this classification. Chapter II undertakes an in-depth investigation of one aerodynamic archetype: asymmetrical winged fruits exhibiting stable autorotation. Employing morphometric, allometric, morphoanatomical, and aerodynamic analyses, the study reveals a spectrum of structural solutions that optimise passive dispersal, identifying convergent patterns and a specific trade-off. Furthermore, it elucidates connections between these biological solutions in plants and their potential for biomimetic design. Collectively, the chapters demonstrate that integrating broad-scale classification with focused mechanistic analysis provides a pathway to transform observed plant diversity into structured knowledge and transferable insights for nature-inspired innovation.

Keywords: anemochory, aerodynamic archetype, Biomimetics, Cerrado, diaspore, functional morphology

INTRODUÇÃO GERAL

Este estudo parte do reconhecimento de que a dispersão anemocórica é, antes de tudo, um fenômeno morfofuncional, no qual o desempenho dispersivo decorre dos atributos de forma dos diásporos e de sua interação aerodinâmica com o ambiente [1–4]. Assim, compreender a diversidade anemocórica requer tanto um olhar abrangente, capaz de organizar a multiplicidade de estratégias observadas em campo, quanto análises aprofundadas que explorem os mecanismos físicos subjacentes a tipos específicos de voo.

Para operacionalizar essa dupla perspectiva, o estudo está estruturado em dois capítulos, articulados por uma progressão lógica que vai do panorama geral ao aprofundamento mecanístico. O Capítulo I apresenta a diversidade morfofuncional de diásporos anemocóricos do Cerrado observada durante coletas em campo no período seco, documentando a variedade de formas associadas à dispersão pelo vento em diferentes famílias e fitofisionomias. A partir dessa diversidade, propõe-se uma organização funcional baseada na forma do diásporo e no tipo de voo a ela relacionado [5], culminando na elaboração de uma chave de identificação funcional. Nesse contexto, introduz-se e fundamenta-se o conceito de arquétipos aerodinâmicos, entendido como um instrumento conceitual para reconhecer padrões recorrentes de interação entre forma e tipos de voo, independentemente da filiação taxonômica. Assim, o capítulo cumpre uma função essencialmente sintética e classificatória, fornecendo um sistema de referência que organiza a diversidade observada de maneira operacional e metodologicamente útil.

O Capítulo II aprofunda um ponto específico dessa sistematização ao selecionar um arquétipo aerodinâmico como estudo de caso: os frutos alados assimétricos. A partir dessa escolha, desenvolve-se uma análise detalhada da morfologia funcional [6] e da aerodinâmica associada ao voo autorrotacional [7,8], explorando aspectos como geometria da ala, distribuição de massa, estabilidade do movimento e modulação do escoamento. Esse aprofundamento permite não apenas discutir o desempenho dispersivo dessas estruturas, mas demonstrar como princípios aerodinâmicos observados em diásporos naturais podem informar soluções biomiméticas [9,10]. Assim, o segundo capítulo explora em profundidade este arquétipo aerodinâmico, exemplificando como a organização funcional proposta no capítulo anterior orienta decisões de pesquisa e recortes analíticos.

Em conjunto, os dois capítulos constroem uma narrativa coerente que progressivamente articula diversidade, organização e mecanismo. Tendo o Cerrado como

sítio empírico, este estudo propõe, desse modo, uma abordagem integrada da anemocoria nesse e em outros biomas, na qual a observação em campo, a categorização funcional e a análise aerodinâmica convergem para a compreensão do voo vegetal como um fenômeno morfofuncional complexo, com desdobramentos tanto teóricos quanto metodológicos e aplicados.

REFERÊNCIAS

1. Pijl L. 1982 *Principles of Dispersal in Higher Plants*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (doi:10.1007/978-3-642-87925-8)
2. Howe F, Smallwood J. 1982 Ecology of seed dispersal. *Annual review of ecology and systematics*. Volume 13 , 201–228. (doi:10.1146/annurev.es.13.110182.001221)
3. Niklas KJ. 1992 *Plant biomechanics : an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago Press.
4. Vogel S. 1994 *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow - Revised and Expanded Second Edition*. Princeton University Press. (doi:10.2307/j.ctvzsmfc6)
5. Augspurger CK. 1986 Morphology and dispersal potential of wind-dispersed diaspores of Neotropical trees. *Am J Bot* 73, 353–363. (doi:10.1002/J.1537-2197.1986.TB12048.X)
6. Speck O, Speck T. 2021 Functional morphology of plants – a key to biomimetic applications. *New Phytologist* 231, 950–956. (doi:10.1111/nph.17396)
7. Lentink D, Dickson WB, Van Leeuwen JL, Dickinson MH. 2009 Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. *Science (1979)* 324. (doi:10.1126/science.1174196)
8. Norberg RÅ. 1973 Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. *Biological Reviews* 48, 561–596. (doi:10.1111/j.1469-185X.1973.tb01569.x)
9. Benyus JM. 2016 *Biomimética: Inovação inspirada pela natureza*. 13th edn. São Paulo: Cultrix.
10. Pandolfi C, Izzo D. 2013 Biomimetics on seed dispersal: survey and insights for space exploration. *Bioinspir Biomim* 8, 025003. (doi:10.1088/1748-3182/8/2/025003)

CAPÍTULO I

Classificação funcional de diásporos anemocóricos: uma chave de identificação baseada em arquétipos aerodinâmicos e sua diversidade no Cerrado

Resumo

Em ambientes abertos e sazonais como o Cerrado, a dispersão pelo vento favorece a evolução de ampla diversidade de diásporos anemocóricos, cujas soluções morfofuncionais permanecem pouco organizadas sob uma perspectiva integrada da forma e do tipo de voo. Este estudo teve como objetivo sintetizar essa diversidade e organizá-la funcionalmente, propondo uma chave de identificação funcional acompanhada de um glossário botânico-aerodinâmico. As coletas foram realizadas no Distrito Federal, em diferentes fitofisionomias do Cerrado, durante os períodos secos de 2024 e 2025, por meio de busca ativa em campo e doação institucional. Os diásporos foram identificados taxonomicamente e classificados funcionalmente com base na morfologia e no comportamento aerodinâmico esperado. Foram analisadas 63 espécies, distribuídas em 17 famílias e 42 gêneros, com predominância de Malpighiaceae. A estratégia funcional mais frequente foi a autorrotação estável, associada a diásporos com alas assimétricas. A partir dessa diversidade, a chave funcional distingue sete arquétipos aerodinâmicos, categoria proposta para agrupar diásporos com morfologia similar e comportamento de voo convergente. Os resultados validam a chave como instrumento metodológico interdisciplinar para a categorização e compreensão da diversidade anemocórica no Cerrado e em outros contextos ecológicos.

Palavras-chave: anemocoria, arquétipo aerodinâmico, Cerrado, chave de identificação funcional, diásporos anemocóricos, diversidade morfofuncional

1. Introdução

A estrutura da vegetação condiciona a disponibilidade e a eficácia dos vetores de dispersão. Em ambientes abertos e sazonalmente secos, copas descontínuas e menor rugosidade do dossel favorecem a atuação do vento como agente dispersivo, tornando a anemocoria uma síndrome predominante. Nesse contexto, a heterogeneidade ambiental atua como pressão seletiva positiva, favorecendo espécies cujos diásporos apresentam características morfológicas que ampliam seu desempenho dispersivo [1,2].

O Cerrado, segundo maior bioma do Brasil, abriga uma flora adaptada a um clima marcadamente sazonal, caracterizado por inverno seco e verão chuvoso [3]. Estruturalmente, o bioma se organiza como um mosaico heterogêneo de fitofisionomias [4], no qual formações savânicas e campestres ocupam cerca de 35% da área, enquanto formações florestais correspondem a aproximadamente 16% [5]. A combinação entre sazonalidade climática, estrutura da vegetação e predominância de ambientes abertos cria condições particularmente favoráveis tanto à evolução quanto à observação de uma ampla diversidade de diásporos anemocóricos [1,2].

Essa diversidade manifesta-se na coexistência de diásporos com arquiteturas morfológicas contrastantes, incluindo alas, estruturas pilosas, expansões membranosas e formas extremamente leves [6], que podem derivar do tegumento das sementes, da parede do ovário dos frutos ou, ainda, de verticilos florais persistentes, como o cálice [7]. Tais estruturas expressam múltiplas soluções funcionais para a interação com o vento, resultando em diferentes tipos de voo, trajetórias e regimes aerodinâmicos [8,9].

Reconhecido como um *hotspot* de biodiversidade [10], o Cerrado abriga cerca de 12 250 espécies de angiospermas, distribuídas entre árvores, arbustos, lianas e herbáceas, das quais aproximadamente 5 260 são endêmicas [11]. Embora essa expressiva riqueza inclua ampla diversidade de formas anemocóricas, sua organização tem sido predominantemente conduzida pela sistemática, com ênfase em categorias taxonômicas que registram a ocorrência desse tipo de diásporo, mas sem uma sistematização orientada por critérios funcionais. Abordagens que privilegiam a forma e o tipo de voo como eixos de organização permanecem relativamente escassas, sobretudo aquelas voltadas à aplicação direta em campo e ao diálogo interdisciplinar com a aerodinâmica e a biomimética no âmbito de soluções baseadas na natureza.

À vista disso, este estudo tem como objetivo sintetizar a diversidade de diásporos anemocóricos do Cerrado e organizá-la funcionalmente com base na forma e no tipo de

voo. Adicionalmente, propõe-se uma chave de identificação funcional, acompanhada de um glossário de apoio, como instrumento metodológico para a categorização de diásporos anemocóricos, integrando perspectivas botânicas e aerodinâmicas.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no Distrito Federal, Brasil, em populações naturais do bioma Cerrado. A região ocupa posição central nesse domínio fitogeográfico, representando adequadamente sua diversidade florística [6]. O clima é tropical sazonal (Aw, Köppen), com temperatura média anual de 22 °C e 1 700 mm de pluviosidade média anual, concentrada no período chuvoso (outubro a abril), seguida por uma estação seca bem definida (maio a setembro) [12].

A amostragem ocorreu durante as estações secas de 2024 e 2025, entre os meses de julho e o início de outubro, em sete localidades (Fig. 1):

- Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RECOR–IBGE) (15°56'54"S, 47°52'43"W);
- Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL-UnB) (15°56'26"S, 47°56'25"W);
- Região Administrativa do Jardim Botânico (15°59'14"S, 47°49'14"W);
- Áreas verdes e jardins do Campus Darcy Ribeiro da UnB (15°46'11"S, 47°52'02"W);
- Região Administrativa da Fercal (15°35'09"S, 47°50'48"W); e
- Coletas isoladas em áreas antrópicas (15°50'48.70"S, 48°3'54.87"W; 15°51'26.47"S, 48°0'21.95"W).

Os locais de estudo abrangem fitofisionomias savânicas e florestais do Cerrado, com cerrado *stricto sensu*, Floresta Estacional Sempre-verde e Floresta Estacional Decidual e Semidecidual.

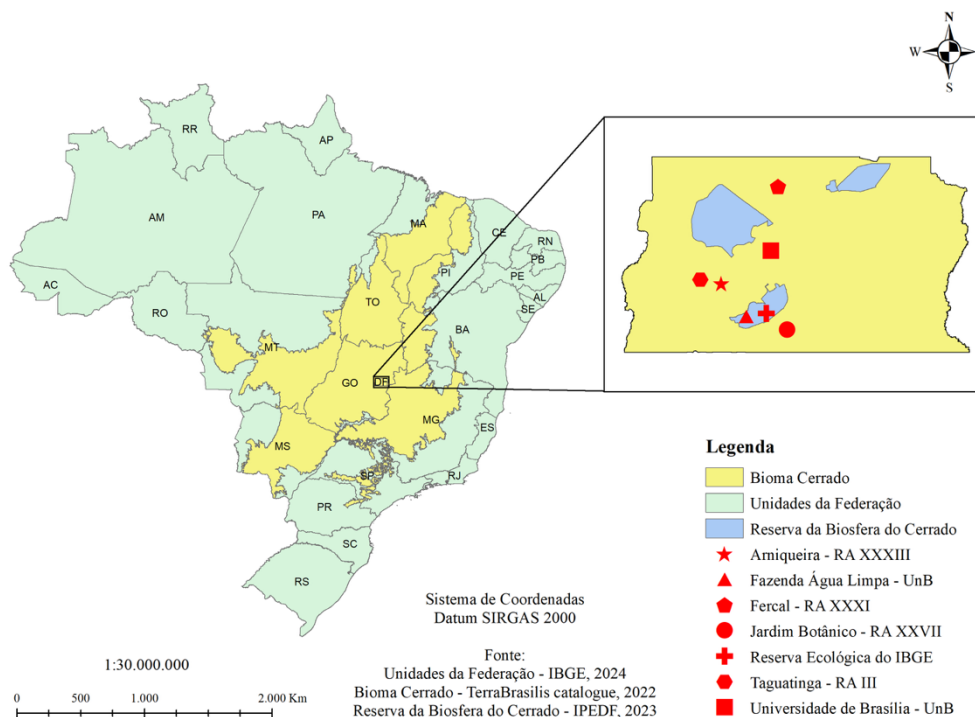


Figura 1. Mapa de localização das áreas de coleta no Distrito Federal, Brasil. À esquerda, destaca-se a distribuição do bioma Cerrado no território brasileiro. À direita, ampliação do Distrito Federal mostrando as áreas de coleta, todos inseridos no bioma Cerrado. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000..

2.2 Coleta de diásporos

A amostragem partiu da busca ativa por espécies anemocóricas em fase de dispersão, priorizando a observação direta de diásporos em voo ou recém-dispersos. Para a maioria das espécies, os diásporos foram coletados a partir de um único indivíduo, com tamanho amostral variável entre espécies. A coleta foi realizada manualmente, com mínimo manuseio, a fim de preservar a integridade morfológica e geométrica das estruturas.

Adicionalmente, este estudo contou com a doação de diásporos anemocóricos pelo Grupo de Estudo em Sementes da UnB (Gesem), os quais foram incorporados à amostra total e analisados segundo os mesmos critérios adotados para os diásporos coletados em campo, garantindo a homogeneidade da base de dados.

2.3 Identificação taxonômica e categorização funcional

A identificação taxonômica seguiu a circunscrição de famílias proposta pelo APG IV [13]. A descrição morfológica das espécies baseou-se em Barroso *et al.* [7]. A nomenclatura específica e a autoria dos nomes foram verificadas e atualizadas por meio de consulta à plataforma oficial Flora e Funga do Brasil [11].

A classificação funcional foi baseada em dois eixos principais, (i) a morfologia do diásporo e (ii) o comportamento aerodinâmico esperado durante a dispersão. A categorização das formas dos diásporos fundamentou-se nos princípios gerais da síndrome anemocórica descritos por Pijl [1], com a aplicação prática e a terminologia específica para a flora brasileira conforme estabelecida por Barroso *et al.* [7].

Já a classificação dos tipos de voo partiu das categorias aerodinâmicas propostas por Augspurger [9], validadas por revisões e estudos experimentais subsequentes [14–18]. A associação entre a morfologia de cada espécie e um tipo de voo foi feita por inferência a partir da comparação com os modelos morfofuncionais descritos nesses estudos.

Os dados morfofuncionais dos diásporos foram sistematizados em uma tabela contendo os seguintes atributos por espécie: família, nome científico (com autor), fitofisionomia de ocorrência no bioma Cerrado, hábito, estrutura de voo e o tipo de voo inferido. Os dois últimos atributos seguiram classificação funcional

2.4 Construção da chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos e glossário funcional botânico-aerodinâmico

Com base nas observações de campo e na categorização morfofuncional previamente descrita, foi elaborada uma chave de identificação dicotômica para a diversidade anemocórica, concebida como instrumento de organização, reconhecimento e comparação de diásporos em contexto aplicado [19,20]. A estrutura da chave segue o princípio de caracteres observáveis e mutuamente exclusivos, assegurando sua operabilidade em campo, e adota uma abordagem inovadora ao priorizar critérios funcionais. Assim, a chave não se restringe a abordagens sistemáticas baseadas em categorias taxonômicas.

Os principais caracteres utilizados são a forma do diásporo, especificamente a estrutura de voo, e o tipo de voo inferido, fundamentados em interpretações biomecânicas e aerodinâmicas da dispersão pelo vento [8,21]. A classificação cinemática clássica de Augspurger [9] foi aqui adaptada e refinada para capturar diferenças

morfológicas cruciais entre diásporos que, embora possam apresentar comportamentos de voo similares, possuem morfologias distintas.

Um glossário foi elaborado a partir dos termos empregados na chave, definidos em sentido funcional, visando descrever princípios gerais associados às formas e aos tipos de voo de diásporos anemocóricos, independentemente de sua filiação taxonômica. A terminologia adotada articula a morfologia de frutos e sementes anemocóricos [7] com conceitos de ecologia da dispersão [1,2] e aerodinâmica [21,22], assegurando consistência conceitual entre áreas do conhecimento e transparência no uso da chave.

2.5 Destinação da coleção

Os diásporos coletados foram organizados em uma coleção didática-científica e doados ao projeto de extensão “Meninas Cientistas na Fisiologia Vegetal”, do Departamento de Botânica da UnB.

Os diásporos foram acondicionados por espécie em recipientes de acrílico transparente com tampa, garantindo proteção física e visualização do material. Cada unidade foi etiquetada com o nome científico atualizado e, quando disponível, o nome popular. A coleção é acompanhada por uma listagem curatorial contendo, para cada espécie, família, nome científico com autoria, nome popular, coordenadas geográficas de coleta, fitofisionomia de ocorrência no Cerrado e hábito.

Os recipientes foram dispostos em caixa organizadora com tampa, assegurando condições adequadas de armazenamento, manuseio e transporte, de modo a viabilizar sua utilização em contextos expositivos e didáticos.

3. Resultados

3.1 Diversidade anemocórica do Cerrado

O estudo analisou 63 espécies anemocóricas, das quais 54 foram coletadas em campo e 9 provenientes do Gesem. A lista completa com todos os dados das espécies está disponível no Anexo A.

As espécies representam 17 famílias e 42 gêneros. As famílias mais representativas foram Malpighiaceae, Bignoniaceae e Fabaceae, com 14, 11 e 10 registros, respectivamente, correspondendo a 55.6% da amostra. A razão gêneros:família

foi de 2.5, enquanto a razão espécies:gênero foi de 1.5. Entre os gêneros, 31 tiveram apenas um registro de espécie, equivalendo a 73.8% dos gêneros.

Em relação às fitofisionomias de ocorrência, 29 espécies provêm de savana, 22 de floresta e 12 de área antrópica. Considerando apenas espécies com mais de um registro em ambientes naturais, Asteraceae, Calophyllaceae e Vochysiaceae ocorreram em savana, enquanto Combretaceae ocorreu em floresta. As demais famílias apresentaram espécies tanto em ambientes savânicos quanto florestais.

O hábito das espécies incluiu herbáceo, arbustivo, arbóreo, liana e um grupo intermediário de arbustos com ramos férteis lianescentes. Das 63 espécies, 40 são árvores, 9 arbustos, 7 lianas, 4 herbáceas e 3 arbustos com ramos férteis lianescentes. Considerando apenas ambientes naturais, espécies arbóreas e lianas ocorrem predominantemente em florestas, enquanto espécies arbustivas, arbustos com ramos férteis lianescentes e herbáceas predominam em savana.

Foram identificadas diferentes estruturas de voo (Fig. 2), das quais ala assimétrica e membrana simétrica curta foram as mais frequentes, com 30 e 17 ocorrências, respectivamente. Associados a essas estruturas, os tipos de voo predominantes foram autorrotação estável e oscilação instável por membrana.

Em síntese, a amostra revelou Malpighiaceae como a família mais representativa, com predominância do gênero *Banisteriopsis*, e a savana como a fitofisionomia mais comum. Do ponto de vista funcional, a autorrotação estável, associada a diásporos com alas assimétricas, é o tipo de voo mais frequente nesta comunidade. A coexistência dos diferentes tipos de estrutura de voo identificados evidencia a ampla diversidade morfofuncional que a chave a seguir se propõe a organizar.

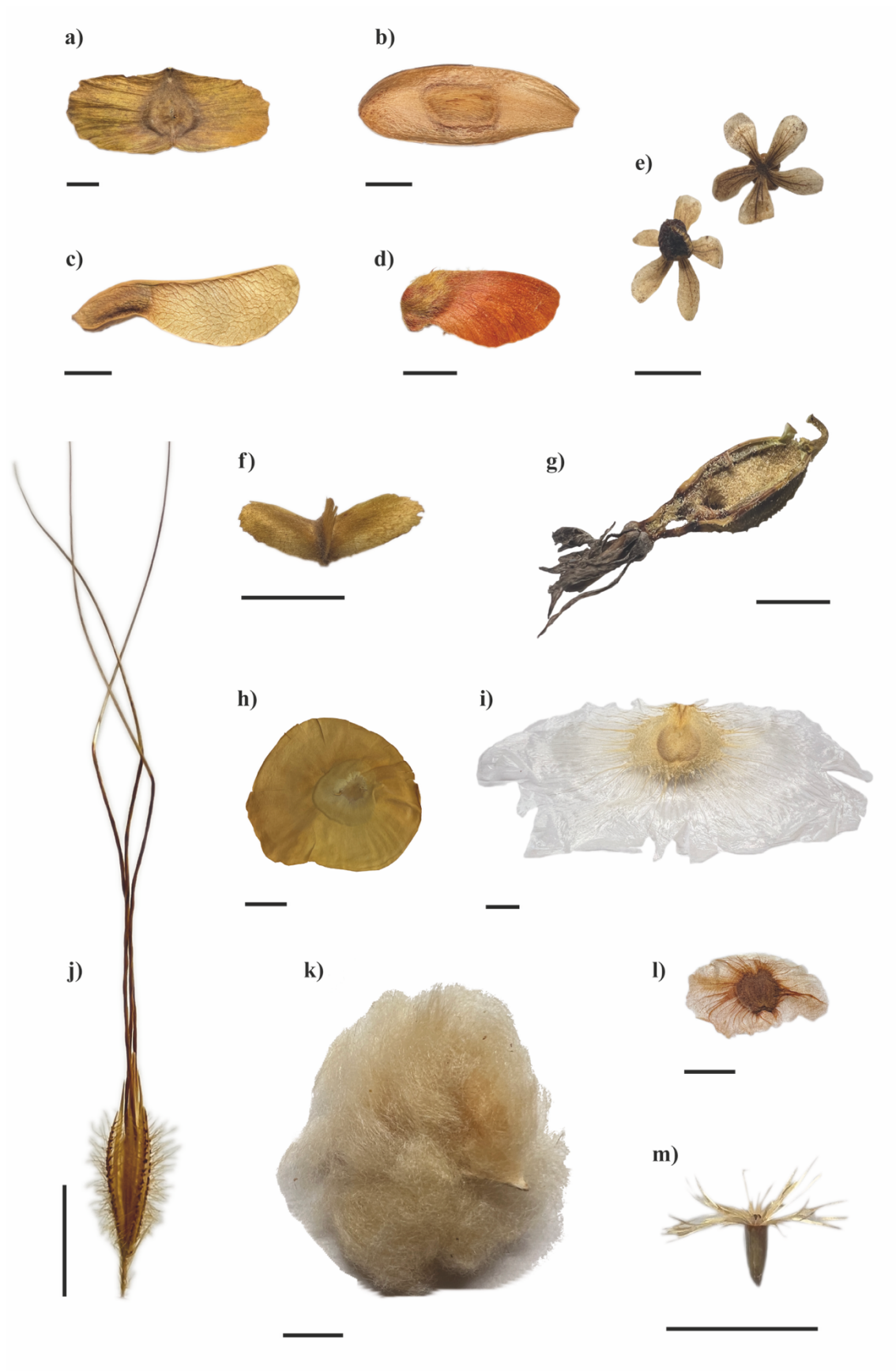


Figura 2. Diversidade morfofuncional de diásporos anemocóricos do Cerrado. **a)** *Terminalia argentea*, fruto com ala simétrica. **b)** *Tachigali rubiginosa*, fruto com ala simétrica. **c)** *Machaerium hirtum*, fruto com ala assimétrica. **d)**

Banisteriopsis sp., fruto com ala assimétrica. e) *Astronium urundeuva*, fruto com ala assimétrica não-coplanar. f) *Terminalia glabrescens*, fruto com ala assimétrica em geometria helicoidal. g) *Encyclia linearifolioides*, fruto cápsula aberto expondo sementes em escala submilimétrica. h) *Aspidosperma subincanum*, semente com membrana simétrica curta com geometria aproximadamente circular. i) *Amphilophium crucigerum*, semente com membrana simétrica alongada. j) *Loudetiopsis chrysothrix*, espiguetta aristada. k) *Ceiba speciosa*, paina sedosa que envolve sementes. l) *Jacaranda ulei*, semente com membrana simétrica curta. m) *Eremanthus erythropappus*, aquênio com pápus aristado. Barras de escala: 1 cm.

3.2 Chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos e glossário funcional botânico-aerodinâmico

A partir da análise morfofuncional das 63 espécies, a chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos é apresentada, acompanhada de um glossário funcional de apoio. A chave organiza os diásporos segundo características morfofuncionais diretamente associadas à cinemática e às forças aerodinâmicas atuantes, ou seja, ao regime de movimento durante a dispersão, permitindo reconhecer sete arquétipos aerodinâmicos, designados de A-G.

Chave de identificação funcional de diásporos anemocóricos

1. Diásporos com estruturas acessórias evidentes associadas à dispersão pelo vento (alas, estruturas filamentosas ou membranas)2
- 1'. Diásporos sem estruturas acessórias evidentes7

Diásporos com estruturas acessórias evidentes

2. Presença de ala laminar portante, contínua ao corpo do diásporo3
- 2'. Ausência de ala laminar portante4

Diásporos alados

3. Ala simétrica ou equilibrada em relação ao eixo longitudinal do diásporo, com o núcleo seminífero aproximadamente centralizado na área alar; estrutura predominantemente coplanar, sem torção significativa.

Arquétipo aerodinâmico A: diásporos alados simétricos.

Tipo de voo: rotação oscilatória em dois eixos ou rolante.

Princípio aerodinâmico dominante: arrasto por aumento de área projetada.

Exemplos: *Terminalia argentea* (Combretaceae) (Fig. 2a) e *Tachigali rubiginosa* (Fabaceae) (Fig. 2b).

3'. Ala ou conjunto de alas assimétricas em relação ao eixo do diásporo, com núcleo seminífero deslocado na área alar, estando em uma das extremidades da ala, ou, ainda, com quebra de coplanaridade ou disposição helicoidal das alas.

Arquétipo aerodinâmico B: diásporos alados assimétricos.

Tipo de voo: autorrotação estável em um eixo.

Princípio aerodinâmico dominante: sustentação rotacional e arrasto.

Exemplos: *Banisteriopsis* sp. (Malpighiaceae) (Fig. 2d), *Astronium urundeuva* (Anacardiaceae) (Fig. 2e) e *Terminalia glabrescens* (Combretaceae) (Fig. 2f).

Diásporos não alados

4. Presença de estruturas filamentosas (tricomias, aristas, pápus ou coma)5
 4'. Presença de expansões membranosas laminares e finas, não configuradas como alas portantes6

Diásporos com estruturas filamentosas

5. Estruturas filamentosas organizadas em uma superfície aerodinâmica coesa e radial, em forma de disco ou coroa, concentrada em apenas uma extremidade do diásporo (pápus ou coma).

Arquétipo aerodinâmico C: diásporos com pápus ou coma.

Tipo de voo: regime de paraquedas.

Princípio dominante: aumento de arrasto com orientação previsível.

Exemplos: *Eremanthus erythropappus* (Asteraceae) (Fig. 2m) e *Ditassa burchellii* (Apocynaceae).

5'. Estruturas filamentosas não organizadas em uma superfície aerodinâmica coesa, com pilosidade distribuída ao longo da superfície do diásporo (tricomias, aristas ou outras estruturas análogas).

Arquétipo aerodinâmico D: diásporos com pilosidade distribuída.

Tipo de voo: oscilação instável por pilosidade, flutuação.

Princípio dominante: amplificação da interação com a turbulência do escoamento.

Exemplos: *Loudetiopsis chrysothrix* (Poaceae) (Fig. 2j) e *Ceiba speciosa* (Malvaceae) (Fig. 2k).

Diásporos com expansões membranosas

6. Expansões membranosas laminares e finas, simétricas, curtas em relação ao núcleo seminífero, relativamente flexíveis, com nervuras evidentes e sem formação de região periférica estruturalmente reforçada ao redor do núcleo seminífero.

Arquétipo aerodinâmico E: diásporos com membranas simétricas curtas (não especializados).

Tipo de voo: oscilação instável por membrana, com trajetória errática e combinação de movimentos como autorrotação, rolagem, ondulação e planeio.

Princípio dominante: dominância do arrasto e alta sensibilidade à turbulência.

Exemplos: *Aspidosperma subincanum* (Apocynaceae) (Fig. 2h) e *Jacaranda ulei* (Bignoniaceae) (Fig. 2l).

6'. Expansões membranosas laminares e finas, simétricas, amplas em relação ao núcleo seminífero, com alongamento longitudinal expressivo da membrana, relativamente robustas, com nervuras evidentes e espessamento ao redor do núcleo seminífero, formando região periférica estruturalmente reforçada.

Arquétipo aerodinâmico F: diásporos com membranas simétricas alongadas (planadores).

Tipo de voo: planagem sustentada com trajetória horizontal suave e estável.

Princípio dominante: geração contínua de sustentação aerodinâmica.

Exemplos: *Amphilophium crucigerum* (Bignoniaceae) (Fig. 2i).

Diásporos sem estruturas acessórias evidentes

7. Diásporo com dimensão e massa aparente muito reduzidas e sem estruturas acessórias evidentes visíveis a olho nu; análogo a partículas leves.

Arquétipo aerodinâmico G: diásporos leves.

Tipo de voo: suspensão atmosférica.

Princípio dominante: miniaturização extrema, favorecendo o acoplamento com o escoamento (baixo regime de Reynolds).

Exemplos: *Encyclia linearifolioides* (Orchidaceae) (Fig. 2g) e *Coracoralina chiquitensis* (Eriocaulaceae).

O glossário complementa a chave ao definir, em sentido funcional, os termos botânicos e aerodinâmicos nela empregados, assegurando consistência conceitual e clareza na interpretação dos arquétipos aerodinâmicos. Os termos são apresentados na ordem em que aparecem na chave, com acréscimo de termos adicionais pertinentes.

Glossário funcional botânico-aerodinâmico

Anemocoria

Modo de dispersão no qual o deslocamento do diásporo é mediado pelo vento, incluindo regimes como queda dominada por arrasto, autorrotação estável, regime de paraquedas, oscilação instável, planagem sustentada e suspensão atmosférica.

Diásporo

Unidade de dispersão vegetal considerada funcionalmente como o corpo que interage com o meio físico durante o processo dispersivo. Pode corresponder à semente isolada ou à semente associada a estruturas acessórias do fruto ou da flor, ou, ainda, o fruto inteiro. Neste estudo, o diásporo é tratado como uma entidade aerodinâmica.

Estruturas acessórias

Estruturas morfológicas associadas ao diásporo que modificam sua interação com o ar, como alas, estruturas filamentosas ou expansões membranosas.

Ala

Expansão laminar associada ao diásporo, geralmente derivada do pericarpo ou de tecidos florais persistentes, que atua como elemento portante estrutural, contribuindo para a geração de sustentação aerodinâmica ou de torque rotacional. No contexto desta chave, o termo ala implica algum grau de rigidez, espessura diferencial (carenagem) ou organização geométrica, distinguindo-se de expansões membranosas.

Ala simétrica

Ala cuja área está distribuída de forma aproximadamente equilibrada em torno do eixo longitudinal do diásporo, com centro de massa próximo ao plano médio e configuração predominantemente coplanar. Essa geometria tende a resultar em um regime de rotação

oscilatória ou rolante, frequentemente em mais de um eixo, que gera sustentação rotacional intermitente e instável.

Ala assimétrica

Ala ou conjunto de alas cuja distribuição espacial da área é desigual em relação ao eixo do diásporo, resultando em deslocamento do centro de massa, quebra de coplanaridade ou disposição helicoidal suficientes para induzir rotação durante a queda. Está associada a regimes de autorrotação passiva estável.

Coplanar

Configuração geométrica na qual a ala ou expansão laminar do diásporo se encontra aproximadamente no mesmo plano do corpo principal, sem torção, inclinação helicoidal ou desnível significativo entre suas partes.

Elemento portante estrutural

Componente do diásporo que apresenta rigidez relativa, continuidade geométrica e orientação espacial capazes de sustentar cargas aerodinâmicas, como sustentação ou torque rotacional, a exemplo de alas verdadeiras ou conjuntos alares organizados. Distingue-se de expansões membranosas, cuja função principal é o aumento do arrasto.

Rotação oscilatória ou rolante

Regime de voo passivo no qual o diásporo apresenta rotações complexas e oscilatórias, muitas vezes em torno de mais de um eixo, induzidas por sua geometria simétrica, resultando em trajetórias curtas e helicoidais.

Autorrotação

Rotação contínua e passiva do diásporo induzida por assimetrias geométricas, disposição helicoidal ou não coplanar das estruturas portantes e pela interação com o fluxo de ar, sem aporte de energia interna. Esse regime reduz a velocidade terminal e aumenta o tempo de residência do diásporo no ar.

Expansão membranosa

Expansão fina, laminar e geralmente flexível associada ao diásporo, sem diferenciação estrutural clara em relação ao corpo seminífero e sem função portante definida. Atua predominantemente pelo aumento da área projetada e do arrasto aerodinâmico.

Região periférica estruturalmente reforçada

Região da membrana ao redor do núcleo seminífero caracterizada por espessamento, maior densidade de nervuras ou reforço estrutural, conferindo maior rigidez local e contribuindo para a estabilidade aerodinâmica do diásporo durante a queda.

Expansão membranosa não especializada

Expansão membranosa com geometria pouco definida, baixa rigidez e razão de aspecto, com pequena extensão da membrana em relação ao núcleo seminífero (centro de massa), tornando-o pouco estabilizado e incapaz de sustentar planagem estável. Está associada a regimes de oscilação instável, fortemente influenciados pela turbulência atmosférica.

Expansão membranosa especializada (planadora)

Expansão membranosa geometricamente organizada, longitudinalmente ampla, com alta razão de aspecto, relativamente robustas devido à presença de nervuras que ancoram a membrana ao núcleo seminífero e do espessamento ao redor do núcleo seminífero, o que reforça a estrutura da membrana. Caracteriza diásporos com planagem sustentada.

Planagem sustentada

Regime de movimento no qual o diásporo mantém componente horizontal de deslocamento devido à geração contínua de sustentação aerodinâmica, com redução pronunciada da taxa de queda vertical.

Oscilação instável

Regime de queda caracterizado por reorientações frequentes, flutuações e trajetórias imprevisíveis, fortemente dependente da turbulência e da flexibilidade das estruturas acessórias.

Pápus (*pappus*)

Conjunto de apêndices filiformes, plumosos ou escamiformes, geralmente derivados do cálice, organizados radialmente em disco ou coroa concentrada em uma extremidade do diásporo. Atua como uma estrutura aerodinamicamente coerente, promovendo regime de paraquedas.

Coma

Tufo de tricomas longos, finos e geralmente sedosos, concentrados em uma extremidade da semente, funcionalmente equivalente ao pápus. O termo é tradicionalmente aplicado a diásporos de Apocynaceae e Asclepiadoideae e é tratado nesta chave como variante morfofuncional do mesmo arquétipo aerodinâmico que enquadra o pápus.

Diásporos com estruturas filiformes organizadas

Categoria funcional que engloba diásporos providos de pápus ou coma, nos quais os apêndices filiformes formam uma estrutura aerodinâmica coerente responsável pelo aumento previsível do arrasto e pela ocorrência de regime de paraquedas.

Pilosidade distribuída

Presença de tricomas, fibras ou aristas distribuídos ao longo do corpo do diásporo, sem organização radial nem coesão estrutural comparável à do pápus ou coma. Resulta em aumento irregular do arrasto e em oscilação instável altamente sensível à turbulência.

Tricomas

Projeções epidérmicas filiformes ou ramificadas que, quando presentes em diásporos, podem contribuir para o aumento do arrasto aerodinâmico e para a interação com microturbulências atmosféricas.

Espiguetas pilosas

Unidade dispersiva funcional típica de Poaceae, composta pela cariopse associada às lemas e páleas persistentes portadoras de tricomas longos e flexíveis. Esses tricomas atuam como estrutura de voo, promovendo oscilação instável por pilosidade.

Miniaturização

Característica observada em diásporos extremamente pequenos e leves, desprovidos de estruturas acessórias evidentes, cujo comportamento aerodinâmico se aproxima ao de partículas atmosféricas, como a poeira.

Suspensão atmosférica

Regime no qual o diásporo, devido à massa extremamente reduzida e às dimensões diminutas, é transportado predominantemente por convecção térmica, turbulência e rajadas episódicas, com deposição imprevisível.

Centro de massa

Ponto do diásporo no qual sua massa pode ser considerada concentrada para fins dinâmicos. Sua posição relativa em relação às estruturas acessórias é determinante para o regime de movimento.

Área projetada

Área efetiva apresentada pelo diásporo perpendicularmente à velocidade relativa do escoamento. É um dos principais determinantes do arrasto aerodinâmico e da velocidade terminal.

Arrasto aerodinâmico

Força aerodinâmica resultante da interação entre a superfície do diásporo e o fluxo de ar, atuando predominantemente na direção oposta à velocidade relativa do escoamento. O aumento do arrasto está associado à redução da velocidade terminal.

Sustentação aerodinâmica

Força aerodinâmica gerada pela interação entre o fluxo de ar e a geometria do diásporo, atuando predominantemente perpendicular à velocidade relativa do escoamento. Em diásporos anemocóricos, a sustentação pode ser contínua, como na planagem sustentada, ou intermitente e acoplada à rotação, como na autorrotação.

Queda dominada por arrasto

Movimento descendente com velocidade terminal reduzida em relação a um corpo compacto de mesma massa, resultante principalmente do aumento da área projetada e do

arrasto aerodinâmico, sem geração contínua de sustentação. Este regime engloba desde quedas com deslizamento simples até movimentos de rotação oscilatória complexa, característico de diásporos sem estruturas portantes eficientes ou com estruturas que atuam predominantemente no aumento do arrasto, como pápus, pilosidade ou membranas não especializadas.

Velocidade terminal

Velocidade constante que um diásporo atinge durante a queda quando as forças que se opõem ao seu movimento pelo ar (como arrasto ou sustentação) equilibram seu peso. Determina o tempo que o diásporo permanece no ar e influencia diretamente o alcance e a eficiência da dispersão pelo vento, sendo um parâmetro funcional importante na avaliação de diásporos anemocóricos.

Número de Reynolds (Re)

Descreve como o ar flui em torno de um objeto em movimento, comparando a importância das forças de inércia, que tendem a perturbar o fluxo, com as forças viscosas, que tendem a suavizá-lo. Em alto Re o ar flui de maneira turbulenta, favorecendo diásporos maiores e rápidos. Já em baixo Re, o ar flui suave e altamente aderente à superfície, favorecendo diásporos menores e lentos.

Tipo de voo

Classificação funcional do movimento passivo do diásporo durante a dispersão pelo vento, incluindo regimes como queda dominada por arrasto, rotação oscilatória ou rolante, autorrotação estável, regime de paraquedas, oscilação instável, planagem sustentada e suspensão atmosférica. Na chave proposta, o tipo de voo é tratado como consequência direta da forma.

Arquétipo aerodinâmico

Unidade classificatória composta por diásporos com configurações morfológicas similares que convergem em tipo de voo e compartilham princípios aerodinâmicos comuns, independentemente de sua filiação taxonômica. Neste estudo, o termo é proposto como categorização funcional.

3.3 Coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado

A coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado tem se constituído como um recurso central nas atividades do projeto de extensão *Meninas Cientistas na Fisiologia Vegetal*, sendo mobilizada em diferentes contextos de divulgação científica (Fig. 3), como oficinas, atividades educativas, mostras e exposições, alcançando públicos diversos quanto à faixa etária, contexto social e nível de escolaridade. Por meio dela, temas como impercepção botânica, diversidade vegetal, biomimética e soluções baseadas na natureza são explorados de forma acessível e interativa, tendo como eixo a riqueza morfofuncional dos diásporos do Cerrado e suas estratégias de dispersão pelo vento. Nesse processo, a coleção também se torna um instrumento de sensibilização para a conservação do bioma, ao mesmo tempo em que fortalece o diálogo entre universidade e sociedade e dá visibilidade à atuação feminina na ciência.

Além das ações extensionistas, a coleção desempenha um papel formativo contínuo, servindo como material de apoio à formação acadêmica e técnica de alunas de diferentes cursos da UnB. Seu uso em atividades práticas contribui para o desenvolvimento de habilidades em observação, descrição e interpretação funcional de estruturas vegetais, especialmente no contexto da Fisiologia Vegetal.



Figura 3. Divulgação científica da coleção de diásporos anemocóricos do Cerrado no âmbito do projeto Meninas Cientistas na Fisiologia Vegetal. a) Coleção de diásporos. b-h) Exposições da coleção para diferentes públicos: b)

alunos do ensino médio; c) ensino fundamental (Alexânia-GO, com o projeto Botânica Sociológica Itinerante); f) graduandos em Biologia (Universidade Federal do Oeste da Bahia); h) público geral (25ª Semana Universitária da UnB); i) participantes do minicurso "Bioativos do Cerrado". d) Equipe do projeto. e, g) Ilustrações científicas expostas pelo Núcleo de Ilustração Científica da UnB (NICBio): e) frutos com alas assimétricas (ilustração da autora); g) *Encyclia linearifolioides* (ilustração da autora).

4. Discussão

As espécies que compõem este estudo constituem evidências empíricas da diversidade morfofuncional que fundamenta a chave de identificação proposta, ao exemplificarem arquétipos aerodinâmicos recorrentes expressos na diversidade anemocórica reunida no Cerrado. Esses arquétipos foram definidos a partir de diásporos com pápus ou coma, pilosidade distribuída, expansões membranosas especializadas e não especializadas, alas simétricas e assimétricas e estruturas extremamente leves, cada qual associado a regimes de voo distintos e a princípios aerodinâmicos dominantes. Portanto, o termo arquétipo aerodinâmico é empregado neste estudo em sentido estritamente operacional, designando categorias observáveis, reconhecíveis e classificáveis de diásporos anemocóricos. Diferentemente de usos abstratos do conceito de arquétipo, ele é aqui proposto como unidade classificatória, por meio da qual a diversidade é organizada funcionalmente.

Entre os diásporos alados, a diversidade morfofuncional se manifesta em configurações simétricas e assimétricas, com implicações diretas no tipo de voo. Alas simétricas apresentam o núcleo seminífero centralizado no corpo do diásporo, enquanto alas assimétricas apresentam o núcleo deslocado para uma extremidade, a partir da qual se desenvolve a ala apical. Diásporos com alas simétricas foram observados em *Terminalia fagifolia* e *T. argentea*, ambas Combretaceae, bem como em *Pterodon pubescens* e *Dalbergia miscolobium*, ambas Fabaceae, dentre outras espécies. Esses diásporos exemplificam o arquétipo aerodinâmico A, cujo voo é caracterizado por rotação oscilatória, podendo apresentar rotação simultânea em torno do eixo longitudinal e de uma extremidade, o que confere ao movimento caráter de rolamento e trajetória helicoidal curta e irregular [9]. Do ponto de vista aerodinâmico, embora a rotação esteja presente, esse regime não estabelece sustentação rotacional estável. O efeito dominante é o aumento da área projetada ao escoamento, configurando, portanto, uma queda retardada dominada por arrasto, o que distingue de forma clara diásporos alados simétricos e assimétricos [8,14].

Diásporos com alas assimétricas, por sua vez, realizam autorrotação em um único eixo, com sustentação rotacional estável e arrasto [15], definindo o arquétipo aerodinâmico B. A assimetria pode emergir de diferentes configurações morfológicas, como a presença de uma ala única evidentemente assimétrica, a exemplo das sâmaras clássicas observadas em *Centrolobium tomentosum* e *Platypodium elegans*, ambas Fabaceae; dos samarídeos provenientes de cápsulas esquizocárpicas, como em *Banisteriopsis argyrophylla* e *Diplopterys pubipetala*, ambas Malpighiaceae; e de sementes aladas carenadas, como em *Cedrela fissilis* (Meliaceae) e *Qualea grandiflora* (Vochysiaceae). Configurações assimétricas também podem resultar da presença de múltiplas alas morfológicamente semelhantes que, em um primeiro momento, podem parecer simétricas, porém, sua disposição tridimensional ocorre em diferentes alturas ao longo do eixo longitudinal, rompendo a coplanaridade, como observado em *Astronium fraxinifolium* e *A. urundeuva*, ambas Anacardiaceae, e em *Triplaris gardneriana* (Polygonaceae). Alas organizadas em geometria helicoidal, atuando como hélice passiva, como em *Terminalia glabrescens* (Combretaceae) e *Cavanillesia umbellata* (Malvaceae), completam as configurações assimétricas observadas neste estudo. Em todos os casos, a autorrotação estável decorre da interação entre elementos portantes e o fluxo de ar, confirmando que a chave identifica, por meio da morfologia, a assimetria funcional subjacente ao comportamento aerodinâmico [8,9].

Outro conjunto recorrente de soluções morfofuncionais envolve diásporos com expansões membranáceas especializadas ou não, ambas com geometria predominantemente simétrica [14,18]. As membranas não especializadas foram observadas em famílias como Bignoniaceae e Apocynaceae. Em Bignoniaceae, frutos do tipo cápsula de gêneros como *Jacaranda*, *Handroanthus*, *Tabebuia* e *Cybistax* liberam sementes providas de extensões membranáceas hialinas de baixa razão de aspecto, isto é, relativamente curtas. Em Apocynaceae, os folículos deiscentes do gênero *Aspidosperma* dispersam sementes com expansões de geometria aproximadamente circular, igualmente curtas em relação à porção ocupada pelo núcleo seminífero e ao que, de fato, constitui a estrutura de voo, ou seja, a membrana. Em ambas as famílias, esses diásporos exemplificam o arquétipo aerodinâmico E, caracterizado por voo marcado por oscilação instável da membrana, dominância do arrasto e elevada sensibilidade à turbulência [14]. A trajetória é errática e imprevisível, podendo incluir flutuação, ondulação, tombamento, curtas fases de planagem instável e até rotação em dois eixos com rolagem. Esse

movimento multifásico assemelha-se, em sua instabilidade, à rotação oscilatória observada em diásporos alados simétricos [9].

Estrutura de voo semelhante, porém com alta razão de aspecto, isto é, uma membrana simétrica alongada, é observada em *Amphilophium crucigerum* (Bignoniaceae). Essa espécie apresenta membrana ancorada ao núcleo seminífero por nervuras dispostas radialmente, além de região periférica ao núcleo seminífero mais espessa, conferindo ao diásporo maior robustez estrutural, apesar da delicadeza da membrana hialina. Neste estudo, *Amphilophium crucigerum* é o único exemplo do arquétipo aerodinâmico F, correspondente a diásporos membranosos especializados do tipo planador. O voo é marcado por planagem sustentada, com geração contínua de sustentação aerodinâmica, resultando em trajetória descendente suave, retilínea ou com manobras curvilíneas, e deslocamento horizontal significativo [16]. A distinção entre membranas não especializadas e especializadas decorre, portanto, das características morfológicas da membrana, que determinam a cinemática do voo [14,18]. Assim, diásporos do arquétipo E, devido à sua morfologia, apresentam apenas episódios breves e instáveis de planagem, enquanto a morfologia especializada do arquétipo F permite uma planagem sustentada, fazendo deste o ápice da eficiência funcional entre diásporos membranosos [16].

Estruturas plumosas organizadas em torno do eixo central do diásporo constituem outro arquétipo aerodinâmico recorrente, representado pelo pápus, uma superfície funcional relativamente coesa e radialmente simétrica [17]. Essa configuração resulta em um tipo de voo conhecido como regime de paraquedas, caracterizado pelo aumento de arrasto com orientação previsível [14], e corresponde ao arquétipo aerodinâmico C, que reúne diásporos com estruturas filiformes organizadas, como pápus ou coma. Esse arquétipo é amplamente representado em Asteraceae, família cujo fruto típico, o aquênio, apresenta pápus como adaptação anemocórica. *Eremanthus erythropappus* e *Lepidaploa aurea* são exemplos dessa família analisados neste estudo. Estruturas funcionalmente equivalentes também ocorrem fora de Asteraceae, como a coma observada em Apocynaceae, exemplificada por *Ditassa burchellii*.

Em contraste, diásporos com pilosidade distribuída, como aqueles envoltos por fibras sedosas em Malvaceae, formam um envoltório tridimensional poroso, sem bordos ou eixos aerodinâmicos bem definidos. Essa arquitetura é altamente permeável ao ar, acoplada à turbulência ambiental, e atua como um volume de arrasto difuso, resultando em queda lenta [9,21], característica do arquétipo aerodinâmico D. A paina de *Eriotheca*

pubescens ilustra esse arquétipo, associado a oscilação instável marcada por flutuação prolongada e elevada dependência de correntes ascendentes [9]. A presença de tricomas como estruturas acessórias que conferem comportamento aerodinâmico às espiguetas de Poaceae, como em *Loudetiopsis chrysothrix*, também exemplifica esse arquétipo.

Além dos arquétipos aerodinâmicos baseados no aumento da área projetada ou na presença de elementos portantes estruturais, a diversidade anemocórica do Cerrado inclui um conjunto funcional distinto de diásporos cuja estratégia de dispersão se fundamenta na minimização extrema da massa. Esses diásporos leves, enquadrados no arquétipo aerodinâmico G, caracterizam-se por dimensões muito reduzidas e pela ausência de expansões alares, membranosas ou plumosas. Do ponto de vista aerodinâmico, operam em regimes de Re baixos, nos quais as forças viscosas do escoamento predominam sobre as forças inerciais, e o conceito clássico de voo baseado em sustentação ou arrasto associados a superfícies aerodinâmicas é pouco aplicável. Nesse regime, o comportamento dominante é o de uma partícula em suspensão atmosférica passiva, com velocidade terminal extremamente baixa [21,22]. No Cerrado, o arquétipo G é exemplificado por *Encyclia linearifolioides* (Orchidaceae) e *Coracoralina chiquitensis* (Eriocaulaceae), cujas sementes apresentam dimensões submilimétricas e massa extremamente reduzida. Em ambos os casos, a dispersão não depende de estruturas acessórias especializadas, mas da própria escala do diásporo, que o insere diretamente na dinâmica do fluxo de ar.

A inclusão do arquétipo G na chave de identificação funcional reforça que a anemocoria não se organiza apenas em torno de soluções baseadas no aumento de área ou na modulação da geometria, mas também em estratégias que exploram limites físicos associados à miniaturização. Esse arquétipo evidencia que, em determinados contextos ecológicos, a redução extrema da massa constitui uma solução aerodinâmica tão eficaz quanto a presença de estruturas dispersivas complexas, ampliando o espectro funcional da anemocoria.

A heterogeneidade morfológica registrada em campo evidencia que a filiação taxonômica, isoladamente, é insuficiente para organizar a diversidade anemocórica em termos funcionais [1,2]. Embora a classificação taxonômica reflita relações evolutivas entre espécies, ela raramente considera padrões associados ao comportamento aerodinâmico dos diásporos durante a dispersão. No contexto da anemocoria, configurações morfológicas semelhantes podem emergir em linhagens filogeneticamente distantes [13] por convergência funcional, como exemplificado pelas alas assimétricas

observadas em espécies de Anacardiaceae, Combretaceae, Fabaceae, Malpighiaceae, Meliaceae, Polygonaceae, Sapindaceae e Vochysiaceae analisadas neste estudo. Por outro lado, espécies pertencentes a uma mesma família podem apresentar estruturas e tipos de voo contrastantes, como em Fabaceae, com alas simétricas e assimétricas, em Bignoniaceae, com membranas não especializadas e especializadas, e em Sapindaceae, com membranas não especializadas e alas assimétricas. A diversidade anemocórica do Cerrado ilustra, assim, de forma clara, o caráter transversal da anemocoria, que emerge da convergência entre forma e interação com o vento sob pressões ambientais comuns [1,2,8]. Nesse sentido, a adoção do conceito de arquétipo aerodinâmico permitiu reconhecer conjuntos morfofuncionais recorrentes que transcendem limites taxonômicos.

A chave de identificação funcional proposta neste estudo deve ser compreendida como um instrumento metodológico, e não como uma ferramenta taxonômica tradicional, voltado à organização inicial da diversidade anemocórica em uma interface botânica-aerodinâmica. Seu principal mérito reside na possibilidade de realizar a categorização funcional ainda em campo, a partir de caracteres morfológicos facilmente observáveis, reduzindo o manuseio dos diásporos após a coleta e preservando a integridade geométrica das estruturas dispersivas. Além disso, a chave pode orientar análises morfológicas, ecológicas, aerodinâmicas e biomiméticas, contudo, não substitui abordagens quali-quantitativas mais abrangentes.

Embora construída a partir da observação da anemocoria no Cerrado, a chave de identificação funcional não se restringe a esse bioma, uma vez que se fundamenta em princípios morfoaerodinâmicos gerais associados à dispersão pelo vento. O Cerrado foi adotado como sítio empírico por reunir condições particularmente favoráveis à expressão dessa síndrome de dispersão, configurando um contexto privilegiado para a observação de uma ampla diversidade de soluções anemocóricas.

Referências

1. Pijl L. 1982 *Principles of Dispersal in Higher Plants*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (doi:10.1007/978-3-642-87925-8)
2. Howe F, Smallwood J. 1982 Ecology of seed dispersal. *Annual review of ecology and systematics*. Volume 13 , 201–228. (doi:10.1146/annurev.es.13.110182.001221)
3. Klink CA, Machado RB. 2005 A conservação do Cerrado brasileiro. *Megadiversidade* 1.

4. Ribeiro JF, Walter BMT. 1998 As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In *Cerrado: ambiente e flora*, pp. 89–166. EMBRAPA-CPAC.
5. MapBiomas. 2025 Coverage and transitions statistics by biomes and states - MapBiomas Brasil Collection 10. (doi:doi/10.58053/MapBiomas/SL8TCR)
6. Kuhlmann M, Ribeiro JF. 2016 Evolution of seed dispersal in the Cerrado biome: ecological and phylogenetic considerations. *Acta Bot. Brasilica* **30**, 271–282. (doi:10.1590/0102-33062015ABB0331)
7. Barroso GM, Morim MP, Peixoto AL, Ichaso CLF. 1999 *Frutos e sementes: morfologia aplicada à sistemática de dicotiledôneas*. Viçosa: UFV.
8. Niklas KJ. 1992 *Plant biomechanics : an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago Press.
9. Augspurger CK. 1986 Morphology and dispersal potential of wind-dispersed diaspores of Neotropical trees. *Am. J. Bot.* **73**, 353–363. (doi:10.1002/J.1537-2197.1986.TB12048.X)
10. Mittermeier. 2004 Hotspots revisitados.
11. Flora e Funga do Brasil. 2026 Flora e Funga do Brasil. See <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/consulta/> (accessed on 6 January 2026).
12. INPE. 2025 Estação de Brasília: Climatologia Local. See https://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/brasilgia_clima.html (accessed on 18 March 2025).
13. APG IV. 2016 An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* **181**, 1–20. (doi:10.1111/boj.12385)
14. Minami S, Azuma A. 2003 Various flying modes of wind-dispersal seeds. *J. Theor. Biol.* **225**, 1–14. (doi:10.1016/S0022-5193(03)00216-9)
15. Lentink D, Dickson WB, Van Leeuwen JL, Dickinson MH. 2009 Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. *Science (1979)*. **324**. (doi:10.1126/science.1174196)
16. Azuma A, Okuno Y. 1987 Flight of a samara, *Alsomitra macrocarpa*. *J. Theor. Biol.* **129**, 263–274. (doi:10.1016/S0022-5193(87)80001-2)
17. Viola IM, Nakayama N. 2022 Flying seeds. *Current Biology* **32**, R204–R205. (doi:10.1016/J.CUB.2022.02.029)
18. Drisya V V, C. P, Pradeep AK, T.P. S. 2024 Winged Diaspores in Flowering Plants: A Means of Plant Movement with Enigmatic Flight Mechanisms. In *Glimpses of Diversity: Fungi and Plants*, pp. 137–159. Malappuram.
19. Winston JE. 1999 *Describing species : practical taxonomic procedure for biologists*. Columbia University Press.
20. Radford AE. 1974 *Vascular plant systematics*. Harper & Row.
21. Vogel S. 1994 *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow - Revised and Expanded Second Edition*. Princeton University Press. (doi:10.2307/j.ctvzsmfc6)
22. Fox RW., McDonald AT., Pritchard PJ. 2006 *Introdução à mecânica dos fluidos*. LTC.

CAPÍTULO II

Frutos alados assimétricos do Cerrado: a morfologia funcional por trás da autorrotação e suas implicações para o *design* biomimético

Resumo

A morfologia funcional de frutos alados assimétricos do Cerrado amplia o repertório biomimético ao oferecer modelos aerodinâmicos complementares ao padrão de *Acer* spp.. Quatorze espécies foram analisadas por meio de métricas morfométricas e alométricas, interpretação aerodinâmica e caracterização morfoanatômica integradas. Observou-se ampla diversidade intra e interespecífica, refletindo plasticidade fenotípica e a ação de regimes aerodinâmicos contrastantes frente à heterogeneidade fitofisionômica do Cerrado, que favorece morfologias distintas segundo o hábito. A alometria revelou que a área escala positivamente com a massa dos frutos, enquanto sua variação é explicada predominantemente por ajustes bidimensionais, evidenciados pela forte associação e quase proporcionalidade com a combinação geométrica que caracteriza a *planform*. Parâmetros aerodinâmicos reforçam a interpretação funcional dessa escala, evidenciando otimizações que evitam extremos inviáveis. A caracterização morfoanatômica dos frutos revelou padrões convergentes concomitantes a combinações específicas por espécie, com destaque ao sistema multiescalar de rugosidade que modula a camada limite. Internamente, as alas apresentam regiões de densidades e organizações distintas que equilibram leveza e resistência. Assim, os frutos alados assimétricos não revelam uma solução única, mas um espectro de estratégias que articulam ajustes alométricos, *trade-off* estrutural e assimetrias tridimensionais para maximizar a sustentação em escoamentos de baixo número de Reynolds sem mecanismos ativos.

Palavras-chave: aerodinâmica, biomimética, Cerrado, diásporo, frutos alados assimétricos, morfologia funcional, voo autorrotativo

1. Introdução

A relação entre morfologia e desempenho aerodinâmico em frutos alados assimétricos tem se consolidado como um campo promissor para aplicações biomiméticas, especialmente no contexto do voo autorrotacional, cuja estabilidade e desempenho aerodinâmicos inspiram soluções tecnológicas inovadoras [1]. A Biomimética, enquanto abordagem que traduz estratégias evolutivas em princípios de engenharia e *design* funcional [2], encontra nesses frutos exemplo notável de integração entre forma, estrutura e função, características intrínsecas ao conceito de morfologia funcional [3].

Apesar desse potencial, permanece uma lacuna relevante na literatura. O repertório biomimético disponível é majoritariamente derivado de frutos do gênero *Acer* [4,5], que, embora amplamente investigados, representam apenas uma fração da diversidade funcional presente entre frutos alados assimétricos [6,7]. Essa predominância limita a compreensão das múltiplas soluções evolutivas possíveis, subexplora variações morfológicas e estruturais potencialmente relevantes para aplicações tecnológicas e restringe o desenvolvimento de modelos biomiméticos capazes de incorporar novos regimes aerodinâmicos, escalas e arquiteturas naturais associadas a formas e estruturas ainda pouco documentadas.

A ampliação desse repertório requer a consideração de novos sistemas biológicos e contextos ecológicos. Nesse sentido, o Cerrado brasileiro, um bioma savânico reconhecido como *hotspot* de biodiversidade [8], se destaca como sítio de observação particularmente promissor. Caracterizado por marcada sazonalidade climática e pela predominância de fitofisionomias abertas [9], condições que facilitam e favorecem a diversificação de estratégias de dispersão aerodinamicamente eficientes [10–12], o Cerrado abriga uma flora diversa, composta por numerosas espécies com diásporos anemocóricos [13,14]. Assim, a elevada diversidade de frutos alados assimétricos nesse bioma permite investigar estratégias aerodinâmicas complementares àquelas já consolidadas por *Acer* spp., expandindo o repertório biomimético disponível.

Além disso, a literatura apresenta outra limitação recorrente, a escassez de abordagens integradas que relacionem descrições morfoanatômicas detalhadas ao desempenho aerodinâmico [15,16] dos frutos alados assimétricos. Estudos aerodinâmicos costumam focar em experimentos físicos e modelagens [4,5,17–20], enquanto abordagens botânicas tradicionalmente se concentram na descrição estrutural dos frutos sem conectá-

la à dinâmica do escoamento e ao comportamento em voo [13,14,21,22]. Essa dissociação resulta em uma fragmentação do conhecimento, dificultando a tradução efetiva de princípios biológicos em soluções tecnológicas consistentes e transferíveis.

Para que modelos inspirados em frutos alados assimétricos sejam reprodutíveis e funcionalmente robustos [2], é essencial caracterizar de maneira integrada os atributos de forma e estrutura [3] que sustentam seu voo autorrotacional. No contexto tecnológico, frutos que lidam com superfícies rugosas, formação de vórtices e eficiência em baixos números de Reynolds (Re) frente a desafios como separação de fluxo e estol, têm inspirado inovações em drones, sensores ambientais e turbinas eólicas, além de aplicações em Ciências dos Materiais [1,7,20,23–25].

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo investigar a morfologia funcional de frutos alados assimétricos em uma variedade de espécies nativas do Cerrado, buscando elucidar como suas geometrias, proporções e arquiteturas internas se ajustam ao voo autorrotativo. A investigação integra análises morfométricas e alométricas, interpretação aerodinâmica e caracterização morfoanatômica. Partindo dessa abordagem, três hipóteses foram testadas: (i) frutos alados assimétricos apresentam alometria predominantemente bidimensional, de modo que relações geométricas planas, e não o volume, determinam sua variação de tamanho, conforme esperado para formas laminares; (ii) a morfologia é espécie-específica, com cada espécie apresentando um conjunto próprio de características, ainda que todas compartilhem o princípio funcional da assimetria; e (iii) as alas dispõem de estrutura interna hierárquica, constituída por regiões com diferentes densidades e orientações de tecidos, que, em conjunto, produzem gradientes de rigidez e flexibilidade capazes de modular tanto o comportamento mecânico quanto a estabilidade aerodinâmica durante o voo autorrotacional.

2. Material e métodos

2.1 Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em quatro áreas do Distrito Federal, Brasil, região central do bioma Cerrado, nos remanescentes de vegetação natural (cerrado *lato sensu*): a Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RECOR-IBGE) ($15^{\circ}56'53.9''S$, $47^{\circ}52'43.4''W$) e a Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília (FAL-UnB) ($15^{\circ}56'25.81''S$, $47^{\circ}56'25.38''W$), ambas integradas à Área de Proteção

Ambiental Gama e Cabeça de Veado e à Zona Núcleo da Reserva da Biosfera do Cerrado; a Região Administrativa Jardim Botânico (15°59'14.06"S, 47°49'13.77"W); e o *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB) (15°46'10.64"S, 47°52'1.6"W). O clima é tropical sazonal (Aw, Köppen), com temperatura média anual de 22 °C, pluviosidade média anual de 1 700 mm, concentrada entre outubro e abril, e estação seca de maio a setembro [26].

2.2 Espécies estudadas

Quatorze espécies (Tabela 1, Fig. 1) dentre as famílias Fabaceae, Malpighiaceae e Sapindaceae [27], que ocupam estratos arbóreo-arbustivo e lianas, tiveram seus frutos alados assimétricos coletados durante a estação seca de 2024, entre julho e o início de outubro, período correspondente à fase de dispersão (Anexo B). Para cada espécie, os frutos foram amostrados de três indivíduos distintos, visando contemplar variação intraespecífica.

Após a coleta, os frutos de cada espécie foram homogeneizados em um único lote e submetidos à triagem, sendo excluídas unidades com danos estruturais ou deformações que pudessem comprometer sua geometria. Em seguida, os frutos íntegros foram numerados sequencialmente, e uma amostra de vinte unidades por espécie ($n = 20$) foi selecionada por sorteio, utilizando um gerador de números aleatórios [4,5].

Tabela 1. Espécies do Cerrado com frutos alados assimétricos, suas famílias e hábito

Família	Espécie	Hábito
Fabaceae	<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	Árvore
Fabaceae	<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	Árvore
Fabaceae	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	Árvore
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	Arbusto
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	Arbusto
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis</i> sp. 1 C.B.Rob. ex Small	Liana
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis</i> sp. 2 C.B.Rob. ex Small	Liana
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	Arbusto
Malpighiaceae	<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	Liana
Malpighiaceae	<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	Árvore
Malpighiaceae	<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	Árvore
Malpighiaceae	<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	Arbusto
Malpighiaceae	<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	Liana
Sapindaceae	<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	Liana

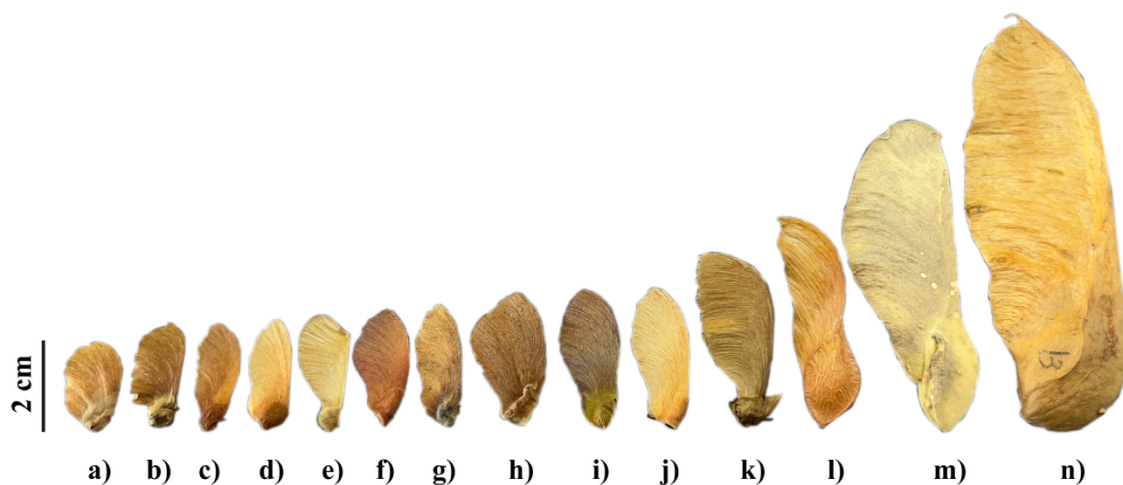


Figura 1. Frutos alados assimétricos do Cerrado. **a)** *Banisteriopsis megaphylla*. **b)** *Banisteriopsis variabilis*. **c)** *Banisteriopsis* sp. 2. **d)** *Heteropterys eglandulosa*. **e)** *Serjania lethalis*. **f)** *Heteropterys umbellata*. **g)** *Banisteriopsis* sp. 1. **h)** *Peixotoa goiana*. **i)** *Banisteriopsis argyrophylla*. **j)** *Heteropterys byrsonimifolia*. **k)** *Diplopterys pubipetala*. **l)** *Pterogyne nitens*. **m)** *Luetzelburgia auriculata*. **n)** *Vatairea macrocarpa*.

2.3 Análise morfométrica

Os frutos alados assimétricos foram fotografados utilizando a câmera grande angular de um *smartphone* Apple iPhone 13 Pro Max (lente 26 mm, abertura f/1.5), com inclusão de uma escala de referência em cada imagem. A câmera foi posicionada a uma

altura fixa de 20 cm, em um miniestúdio fotográfico do tipo caixa, sob iluminação difusa, com fonte de luz branca em posição zenital.

A partir das imagens obtidas, a área projetada (A) foi mensurada utilizando o *software* ImageJ (versão 1.54g), após calibração da escala com base na referência presente em cada fotografia. Desse mesmo conjunto de imagens, também foram obtidas as dimensões lineares vão (S) e corda (c) (Fig. 2a).

A espessura (\varnothing) foi obtida com o uso de paquímetro digital (± 0.01 mm), posicionado na metade do vão, no bordo de ataque de cada fruto (Fig. 2c) [19]. A massa fresca do fruto ($m_{diaspore}$) foi determinada em balança de precisão (± 0.0001 g). Em seguida, cada fruto foi seccionado transversalmente na região proximal (Fig. 2a), dividindo-o em ala e núcleo seminífero. O núcleo seminífero foi pesado para obtenção da massa fresca (m_{seed}). As massas frescas foram mensuradas nos mesmos dias das coletas.

A distribuição dos dados morfométricos foi analisada no *software IBM SPSS Statistics 25*, no qual também foram estimados os valores médios e desvios-padrão por *bootstrap* ($p \geq 0.05$).

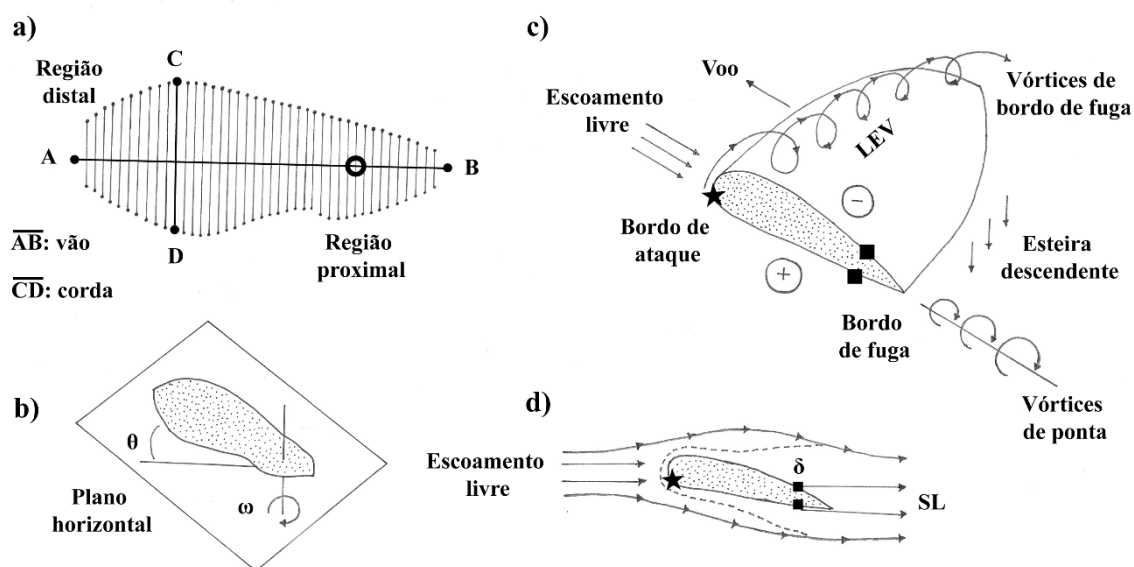


Figura 2. Esquema conceitual simplificado da geometria, cinemática e aspectos aerodinâmicos de frutos alados assimétricos. **a)** Geometria em planta (*planform*) segmentada em linhas de corda. O vão, ou envergadura, representa o comprimento máximo do fruto, enquanto a corda corresponde à distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga em uma dada seção, indicando a largura local da ala. O centro de massa, representado pelo círculo vazado, está localizado na região proximal, onde a ala se ancora ao núcleo seminífero. A região distal corresponde à ponta da ala. **b)** Cinemática da autorrotação. O ângulo de cone (θ) expressa a inclinação do fruto em relação ao plano horizontal. A velocidade angular (ω) representa a taxa de rotação em torno do eixo vertical. **c)** Estrutura vortical tridimensional associada ao aerofólio. Os sinais opostos representam o gradiente de pressão entre as faces do perfil: menor pressão no extradorso (-) e maior no intradorso (+). No bordo de ataque do extradorso é formado o vórtice de bordo de ataque (LEV, do inglês

Leading-Edge Vortex), cuja vorticidade é transportada e liberada em vórtices de bordo de fuga, contribuindo para a esteira vortical descendente. **d)** Camada limite de um aerofólio. O ponto de estagnação (★) marca a região onde a velocidade do escoamento é nula e a pressão é máxima. O ponto de separação da camada limite (■) indica o início do desprendimento do fluxo. A linha tracejada representa a camada limite, indicada também por δ . A partir dos pontos de separação (■) seguem-se as linhas de separação (SL, do inglês *separation lines*), que delimitam a transição entre as regiões de fluxo aderente e separado. As SL organizam o fluxo desprendido e guiam sua evolução a jusante em estruturas vorticais coerentes. Elas contribuem para a formação de vórtices de ponta, que são posteriormente liberados na esteira descendente, ilustrada no painel anterior.

2.4 Análise alométrica

As 14 espécies compartilham semelhanças quanto à forma e tipo de voo [4,12], permitindo análise alométrica conjunta [19,28]. Pela Lei do quadrado-cubo, como princípio teórico para esta abordagem, a A do fruto alado assimétrico equivale ao quadrado de uma dimensão característica (L), dessa forma, $A \sim k \cdot L^2$, e sua $m_{diaspore}$ é proporcional ao volume, ou seja, o cubo dessa mesma dimensão característica, logo, $m_{diaspore} \sim k \cdot L^3$, onde k é uma constante adimensional que pode se omitida. Assume-se aqui a dimensão característica L como o S , e para abranger toda a *planform*, a dimensão complementar será a c [5]. Assim, pela proporcionalidade, tem-se a previsão alométrica dos frutos alados assimétricos (Eq. 1) [5]:

$$A \sim m_{diaspore}^{2/3}, A \sim S^2, A \sim c^2 \text{ e } A \sim cS \quad (1)$$

Para considerar os erros naturais de medição em ambas as variáveis, as relações alométricas foram testadas por meio de regressões de Eixo Maior Padronizado (*Standardized Major Axis – SMA*), aplicadas aos dados transformados em \log_{10} , utilizando o pacote *smatr* no *software R*. A força da associação entre as variáveis foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2). Os expoentes de escala empíricos, correspondentes às inclinações das regressões, foram comparados às suas respectivas previsões teóricas por meio de testes de hipótese sobre a inclinação ($H_0: b = b_{teórico}$), conforme implementado no pacote *smatr*. A partir desses testes, foi possível identificar desvios estatisticamente significativos e classificar as relações como isométricas ou alométricas, positivas ou negativas, de acordo com sua divergência em relação às expectativas teóricas.

2.5 Análise aerodinâmica

As propriedades aerodinâmicas foram estimadas a partir de dados morfométricos. Para cada espécie, foram calculadas a carga alar (W/S) e a razão de aspecto (AR), o que permitiu inferir, com base em *proxies* morfológicas, o potencial de desempenho aerodinâmico interespecífico, ainda que sem medições experimentais de voo.

A W/S é um indicador de leveza do fruto, demonstrando o quão sobrecarregada a ala está aerodinamicamente em função da m_{seed} [17]. É expressa pelo peso sobre a área, e foi obtida pela Eq. (2), onde W/S é a carga alar ($N\ m^{-2}$), $m_{diaspore}$ é a massa do fruto (kg), g é a aceleração da gravidade ($9.81\ m/s^2$) e A é a área projetada do fruto (m^2) [19].

$$W/S = \frac{(m_{diaspore} \times g)}{A} \quad (2)$$

A AR expressa as proporções do perfil geométrico e foi obtida pela Eq. (3), onde AR é a razão de aspecto (adimensional), S é o vão (cm) e A é a área do fruto (cm^2) [19].

$$AR = \frac{S^2}{A} \quad (3)$$

2.6 Análise morfológica

A caracterização morfológica teve como base a obra taxonômica de Barroso *et al.* [21]. Foram definidos 14 descritores morfológicos, agrupados em três categorias – fruto, núcleo seminífero e ala –, para registrar atributos qualitativos relevantes à relação forma e função e compatíveis com as análises morfométricas e aerodinâmicas. Os descritores incluíram:

- (i) Para o fruto – tipo carpológico, deiscência, configuração e ocorrência de frutos parciais;
- (ii) Para o núcleo seminífero – forma e indumento; e
- (iii) Para a ala – forma, afilamento, forma do ápice, textura, indumento, nervação, espessura do bordo de ataque e forma do bordo de fuga.

2.7 Análise anatômica

Para a caracterização da micromorfologia, com ênfase na ornamentação epidérmica e rugosidade superficial [20,29], porções medianas das alas foram analisadas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As amostras foram fixadas em *stubs* metálicos com fita de carbono condutiva e recobertas por pulverização catódica em metalizador Leica EM SCD 500. As imagens foram obtidas em um MEV JEOL JSM-7001F, com tensão de aceleração de 15 kV.

O MEV também foi utilizado para análise da nervação [7]. Para isso, as alas foram seccionadas transversalmente no terço mediano, seguindo a orientação das nervuras. As seções foram preparadas conforme o mesmo protocolo descrito anteriormente e submetidas à aquisição de imagens sob as mesmas condições de análise. A descrição anatômica foi feita de acordo com Roth [22].

3. Resultados

3.1 Análise morfométrica

Ampla variação foi observada em todos os dados morfométricos (Anexos C e D). Dentro da mesma espécie, a $m_{diaspore}$ apresentou a maior amplitude de variação ($n = 20$). Em *Banisteriopsis megaphylla*, *Banisteriopsis* sp. 1, *Banisteriopsis* sp. 2 e *Vatairea macrocarpa*, a $m_{diaspore}$ do espécime mais leve não ultrapassou 50% do valor registrado no espécime mais pesado. Especificamente, essa proporção foi de 50% em *Banisteriopsis* sp. 1, 49% em *Banisteriopsis* sp. 2 e 41% em *B. megaphylla*. Já *Vatairea macrocarpa* apresentou a maior variação intraespecífica, com o espécime mais leve correspondendo a apenas 35% da $m_{diaspore}$ do mais pesado.

Para a m_{seed} , quatro espécies apresentaram frutos cuja menor m_{seed} foi inferior à metade do valor máximo observado. Em *Banisteriopsis* sp. 1 e *Banisteriopsis* sp. 2, a menor m_{seed} representou 48% do maior valor, enquanto em *B. megaphylla* essa relação foi de 40%. Novamente, *Vatairea macrocarpa* apresentou a maior variação, com a m_{seed} do fruto mais leve atingindo apenas 30% do valor registrado para o espécime mais pesado.

Em relação à A projetada, as maiores variações intraespecíficas ocorreram em *Banisteriopsis argyrophylla* e *Vatairea macrocarpa*. Em *Banisteriopsis argyrophylla* a menor A correspondeu a 58% do maior valor observado, enquanto em *Vatairea macrocarpa* essa proporção foi de 52%.

Na comparação entre espécies (Tabela 2), os valores médios de $m_{diaspore}$ variaram em três ordens de grandeza. Os frutos mais pesados pertencem a *Vatairea macrocarpa*, com média de 1.52 ± 0.13 g, enquanto os mais leves são de *Banisteriopsis megaphylla*, com 42.22 ± 2.20 mg. Em 13 das 14 espécies analisadas, a m_{seed} representa mais de 75% da $m_{diaspore}$, sendo *Diplopterys pubipetala* a única exceção, com 63%. Em *Vatairea macrocarpa* essa proporção atinge 90%, e nas espécies *Heteropterys eglandulosa* e *Pterogyne nitens*, chega a 91%. Além de apresentar os frutos mais pesados, *Vatairea macrocarpa* também possui os maiores frutos alados assimétricos, com média de A igual a 19.80 ± 0.81 cm². Os menores frutos pertencem a *Banisteriopsis* sp. 2, cuja A é de 1.35 ± 0.03 cm².

Tabela 2. Valores médios e desvios-padrão de dados morfométricos dos frutos alados assimétricos. Inferência de 200 reamostragens *bootstrap* de $n = 20$ para cada espécie, onde, $m_{diaspore}$ é a massa do fruto e m_{seed} é a massa do núcleo seminífero, ambas expressas em miligramas; S , c e \varnothing são vão, corda e espessura, respectivamente, expressas em centímetros, e A é a área projetada do fruto, em centímetros quadrados.

Espécie	$m_{diaspore}$ (mg)	m_{seed} (mg)	S (cm)	c (cm)	\varnothing (cm)	A (cm ²)
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i>	102.40 ± 2.80	91.22 ± 2.73	3.49 ± 0.06	1.54 ± 0.03	0.03 ± 0.01	3.15 ± 0.10
<i>Banisteriopsis megaphylla</i>	42.22 ± 2.20	32.94 ± 2.06	2.10 ± 0.03	1.28 ± 0.02	0.04 ± 0.01	1.72 ± 0.05
<i>Banisteriopsis</i> sp. (1)	67.80 ± 2.60	59.18 ± 2.47	2.71 ± 0.07	0.99 ± 0.01	0.05 ± 0.00	1.70 ± 0.07
<i>Banisteriopsis</i> sp. (2)	48.41 ± 1.60	42.76 ± 1.62	2.29 ± 0.03	0.95 ± 0.01	0.02 ± 0.00	1.35 ± 0.03
<i>Banisteriopsis variabilis</i>	57.39 ± 1.60	49.47 ± 1.59	2.42 ± 0.03	1.23 ± 0.02	0.03 ± 0.00	2.01 ± 0.05
<i>Diplopterys pubipetala</i>	49.12 ± 1.20	31.01 ± 0.98	4.11 ± 0.04	1.82 ± 0.02	0.04 ± 0.00	4.68 ± 0.07
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i>	72.10 ± 2.10	60.35 ± 1.89	3.40 ± 0.02	1.40 ± 0.01	0.04 ± 0.00	3.22 ± 0.03
<i>Heteropterys eglandulosa</i>	77.31 ± 1.70	70.44 ± 1.64	2.58 ± 0.02	0.92 ± 0.01	0.04 ± 0.00	1.73 ± 0.02
<i>Heteropterys umbellata</i>	47.49 ± 1.30	40.58 ± 1.27	2.71 ± 0.02	1.30 ± 0.02	0.03 ± 0.00	2.03 ± 0.04
<i>Luetzelburgia auriculata</i>	681.61 ± 25.70	581.28 ± 22.03	7.41 ± 0.11	2.58 ± 0.04	0.05 ± 0.01	14.06 ± 0.37
<i>Peixotoa goiana</i>	71.57 ± 1.90	54.23 ± 1.61	2.89 ± 0.05	1.65 ± 0.04	0.10 ± 0.01	3.07 ± 0.09
<i>Pterogyne nitens</i>	201.52 ± 6.20	183.94 ± 6.91	5.09 ± 0.05	1.39 ± 0.01	0.04 ± 0.00	5.05 ± 0.06
<i>Serjania lethalis</i>	60.87 ± 1.30	51.52 ± 1.24	2.91 ± 0.02	1.22 ± 0.02	0.05 ± 0.00	2.25 ± 0.03
<i>Vatairea macrocarpa</i>	1 517.70 ± 128.40	1 377.60 ± 123.36	8.09 ± 0.18	2.88 ± 0.08	0.10 ± 0.02	19.80 ± 0.81

No que se refere ao perfil geométrico, *Vatairea macrocarpa* apresentou também os maiores valores de S e c , consolidando seus frutos alados assimétricos como os de maior porte da amostra. O menor valor de S foi registrado em *Banisteriopsis megaphylla* (2.10 ± 0.03 cm), enquanto o menor valor de c foi observado em *Heteropterys eglandulosa* (0.92 ± 0.01 cm). Quanto aos atributos do perfil aerodinâmico, *Peixotoa goiana* e *Vatairea macrocarpa* apresentaram frutos mais espessos, com \varnothing média de 0.10 ± 0.01 cm e 0.10 ± 0.02 cm, respectivamente. As demais espécies apresentaram valores de \varnothing próximos entre si.

Em síntese, *Vatairea macrocarpa* destaca-se por apresentar consistentemente os maiores valores médios em praticamente todas as morfométricas analisadas, confirmando seus frutos como os maiores da amostra. Já *Banisteriopsis* sp. 2 e *B. megaphylla* dispõem dos menores frutos entre as espécies avaliadas.

3.2 Análise alométrica

As relações bivariadas em escala log – log e suas respectivas retas de melhor ajuste SMA são apresentadas na Figura 3.

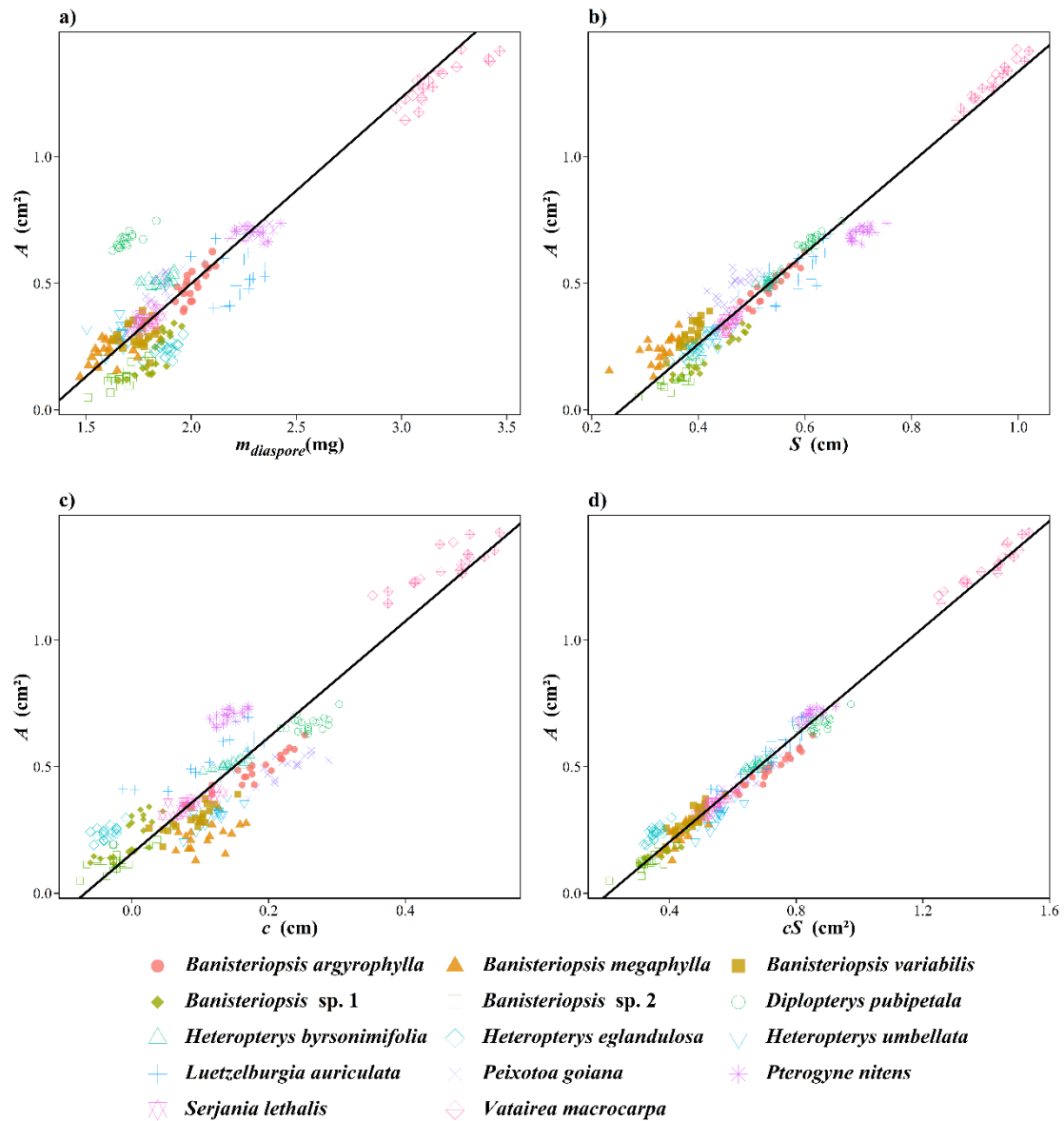


Figura 3. Análise alométrica dos frutos alados assimétricos utilizando regressão de Eixo Maior Padronizado (Standardized Major Axis – SMA). Os gráficos apresentam os ajustes empíricos em escala \log_{10} entre **a)** $A \sim m_{diaspore}^{2/3}$, **b)** $A \sim S^2$, **c)** $A \sim c^2$ e **d)** $A \sim cS$. Cada espécie é representada por uma cor e um símbolo, conforme indicado na figura.

Para a relação entre A e $m_{diaspore}$ (Fig. 3a), espera-se que $A \sim m_{diaspore}^{2/3}$ ($b = 0.667$). As variáveis apresentaram forte associação positiva ($R^2 = 0.75$). O ajuste SMA resultou em um expoente de 0.735 (IC 95%: 0.693 – 0.779), significativamente maior que o valor teórico ($p = 0.001$), caracterizando alometria positiva. Esse resultado indica que A

aumenta em ritmo superior ao previsto pela isometria à medida que $m_{diaspore}$ cresce, sugerindo uma expansão desproporcional da superfície alar em frutos mais pesados.

Na relação entre A e S (Fig. 3b), a expectativa teórica é de escalonamento quadrático ($A \sim S^2$, $b = 2$). Observou-se associação elevada entre as variáveis ($R^2 = 0.94$), com expoente empírico de 1.794 (IC 95%: 1.744 – 1.845), significativamente inferior ao esperado ($p < 0.001$), indicando alometria negativa. Isso sugere que o aumento da A ocorre de forma subquadrática em relação ao S .

Para a relação entre A e c (Fig. 3c), também se espera um escalonamento quadrático ($A \sim c^2$, $b = 2$). As variáveis apresentaram forte associação ($R^2 = 0.82$), e o expoente estimado foi de 2.295 (IC 95%: 2.183 – 2.413), significativamente superior ao valor teórico ($p < 0.001$), caracterizando alometria positiva. Em conjunto com o resultado anterior, esses padrões revelam que c contribui proporcionalmente mais para a variação de A do que S .

Por fim, na relação entre A e cS (Fig. 3d), que representa diretamente a geometria planar da estrutura, foi observada associação extremamente forte entre as variáveis ($R^2 = 0.98$). O expoente empírico foi de 1.056 (IC 95%: 1.038 – 1.075), valor muito próximo da expectativa isométrica ($b = 1$), embora estatisticamente diferente ($p < 0.001$). Esse resultado indica uma relação aproximadamente proporcional entre A e *planform*, com leve tendência à alometria positiva, refletindo um pequeno desvio em relação à proporcionalidade ideal.

3.3 Análise aerodinâmica

Os valores de AR e W/S (Tabela 3) dos frutos alados assimétricos evidenciam variação interespecífica nos parâmetros aerodinâmicos, refletindo diferenças morfométricas.

Tabela 3. Propriedades aerodinâmicas dos frutos alados assimétricos. Valores empíricos de razão de aspecto (AR), adimensional, e da carga alar (W/S), expressa em newtons por metro quadrado, obtidos a partir de médias morfométricas.

Espécie	AR (adimensional)	W/S ($N\ m^{-2}$)
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i>	3.81	3.19
<i>Banisteriopsis megaphylla</i>	2.65	2.41
<i>Banisteriopsis</i> sp. (1)	4.22	3.91
<i>Banisteriopsis</i> sp. (2)	3.93	3.51
<i>Banisteriopsis variabilis</i>	2.95	2.80
<i>Diplopterys pubipetala</i>	3.62	1.03
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i>	3.62	2.20
<i>Heteropterys eglandulosa</i>	3.50	4.38
<i>Heteropterys umbellata</i>	3.67	2.30
<i>Luetzelburgia auriculata</i>	3.85	4.75
<i>Peixotoa goiana</i>	2.77	2.29
<i>Pterogyne nitens</i>	5.11	3.91
<i>Serjania lethalis</i>	3.69	2.65
<i>Vatairea macrocarpa</i>	4.04	7.52

A AR variou de 2.65 a 5.11, com *Banisteriopsis megaphylla* na extremidade inferior e *Pterogyne nitens* na superior, indicando um espectro que vai de alas curtas e largas a alas longas e estreitas. Valores de AR superiores a 4 foram observados em *Pterogyne nitens*, *Banisteriopsis* sp. 1 e *Vatairea macrocarpa*, espécies que compartilham alas mais estreitas e alongadas. Em contraste, *Banisteriopsis megaphylla* e *Peixotoa goiana* apresentam alas mais curtas e largas, refletindo valores de AR inferiores a 3. A maioria das espécies concentrou-se em valores de AR entre 3 e 4, correspondendo a alas de proporções intermediárias.

A W/S variou de $1.03\ N\ m^{-2}$, em *Diplopterys pubipetala*, a $7.52\ N\ m^{-2}$, em *Vatairea macrocarpa*, definindo uma ampla amplitude de variação. Essa amplitude, contudo, é determinada pelos valores extremos e não reflete a distribuição dos dados. Considerando a distribuição, a maioria das espécies apresentou valores de W/S concentrados no intervalo intermediário entre 2 e $4\ N\ m^{-2}$, evidenciando predominância de valores centrais apesar da presença de extremos.

3.4 Análise morfológica

A caracterização morfológica dos frutos alados assimétricos revela um conjunto de variações geométricas, estruturais e de superfície que se organizam em torno de certos padrões funcionais recorrentes. A caracterização completa é apresentada no Anexo E.

A primeira distinção decorre do tipo carpológico. Há frutos do tipo sâmara (Fig. 4d-4f) e frutos do tipo esquizocarpo (Fig. 4a-4c), ambos indeiscentes. As três espécies de Fabaceae representam o primeiro tipo carpológico, cujos frutos não se fragmentam em frutos parciais. Já as demais espécies apresentam fruto esquizocarpáceo composto por samarídeos, em configuração bi-alar ou tri-alar. *Banisteriopsis* sp. 1, *Heteropterys byrsonimifolia* e *H. eglandulosa* agrupam majoritariamente dois samarídeos em seu esquizocarpo (Fig. 4a).

O núcleo seminífero varia em forma, entre reniforme (Fig. 4g), oblongo (Fig. 4h), orbicular (Fig. 4i) e trapezoidal (Fig. 4j), e é recoberto por indumento tomentoso seríceo, exceto em *Pterogyne nitens*, que apresenta tricomas muito espaçados, praticamente glabro. Projeções muricadas são observadas em todas as *Banisteriopsis* (Fig. 4b, 4g e 4n). Outras estruturas que indumentam o núcleo seminífero inclui nervuras (Fig. 4d e 4f) e alélulas (Fig. 4k-4m). *Vatairea macrocarpa* dispõe de nervura proeminente sobre o núcleo seminífero (Fig. 4d). *Diplopterys pubipetala*, *Luetzelburgia auriculata* e *Peixotoa goiana* apresentam alélulas conspícuas (Fig. 4k-4m).

Indumento tomentoso seríceo contínuo é observado como ornamentação das alas de *Luetzelburgia auriculata* (Fig. 4e) e *Peixotoa goiana*, conferindo-lhes aspecto velutino. As demais espécies apresentam tricomas mais ou menos espaçados ou são praticamente glabras, esse último aspecto observado apenas em *Pterogyne nitens* (Fig. 4f). A textura papirácea foi observada em todos os frutos alados assimétricos analisados.

A forma das alas variou entre cristiforme e cultriforme. A forma cristiforme foi observada nas alas de Malpighiaceae e Sapindaceae (Fig. 4n-4p), embora nem todas as Malpighiaceae apresentem essa forma. *Banisteriopsis* sp. 1 (Fig. 4n) e *Banisteriopsis* sp. 2, assim como *Heteropterys byrsonimifolia* (Fig. 4a) e *H. eglandulosa*, apresentam ala cultriforme, evidenciando variações morfológicas dentro do mesmo gênero. O formato cristiforme foi associado às espécies cujos frutos são esquizocarpos com três samarídeos (Fig. 4b e 4c) (*Banisteriopsis argyrophylla*, *B. megaphylla*, *B. variabilis*, *Diplopterys pubipetala*, *Heteropterys umbellata*, *Peixotoa goiana* e *Serjania lethalis*). Já as três espécies de Fabaceae possuem ala cultriforme (Fig. 4d-4f).

O ápice da ala é majoritariamente obtuso entre as espécies. *Heteropterys byrsonimifolia* (Fig. 4a), *H. eglandulosa* e *Peixotoa goiana* apresentam forma intermediária, entre obtuso e arredondado. Ápice arredondado é observado em *Banisteriopsis megaphylla* e *Serjania lethalis* (Fig. 4p). *Pterogyne nitens* foi a única espécie com ápice acuminado (Fig. 4f), onde se observa extensão em formato falcado, característica recorrente também em *Luetzelburgia auriculata* (Fig. 4e) e *Vatairea macrocarpa* (Fig. 4d). Quanto ao afilamento da ala, o padrão de ocorrência é concomitante nas duas regiões, afilamento proximal e distal (Fig. 4e, 4f e 4n-4p), com exceção de *Vatairea macrocarpa*, que apresenta apenas a região distal afilada (Fig. 4d).

As nervuras das alas também apresentam padrões distintos entre as espécies (Fig. 5). Embora todas compartilhem organização geral curvilínea e justaposta, há variações na origem. Algumas partem exclusivamente do núcleo seminífero, outras também do bordo de ataque, como observado em *Luetzelburgia auriculata* (Fig. 5m), *Serjania lethalis* (Fig. 5e) e *Vatairea macrocarpa* (Fig. 5n). Em relação à direção de término das nervuras, elas se encerram oblíquas e/ou perpendiculares ao bordo de fuga, com predominância da coocorrência dos dois padrões. A exceção a esse padrão é *Serjania lethalis* (Fig. 5e), com nervuras reticuladas proeminentes ao longo de toda a extensão da ala. A espécie também se distingue quanto ao aspecto do bordo de ataque e do bordo de fuga. Enquanto todas as demais apresentam bordo de ataque curvo/abaulado, mais espesso na região proximal e mais fino na região distal, e ondulação ou padrão serreado no bordo de fuga, *Serjania lethalis* (Fig. 5e) dispõe de espessura constante ao longo do bordo de ataque e bordo de fuga plano.

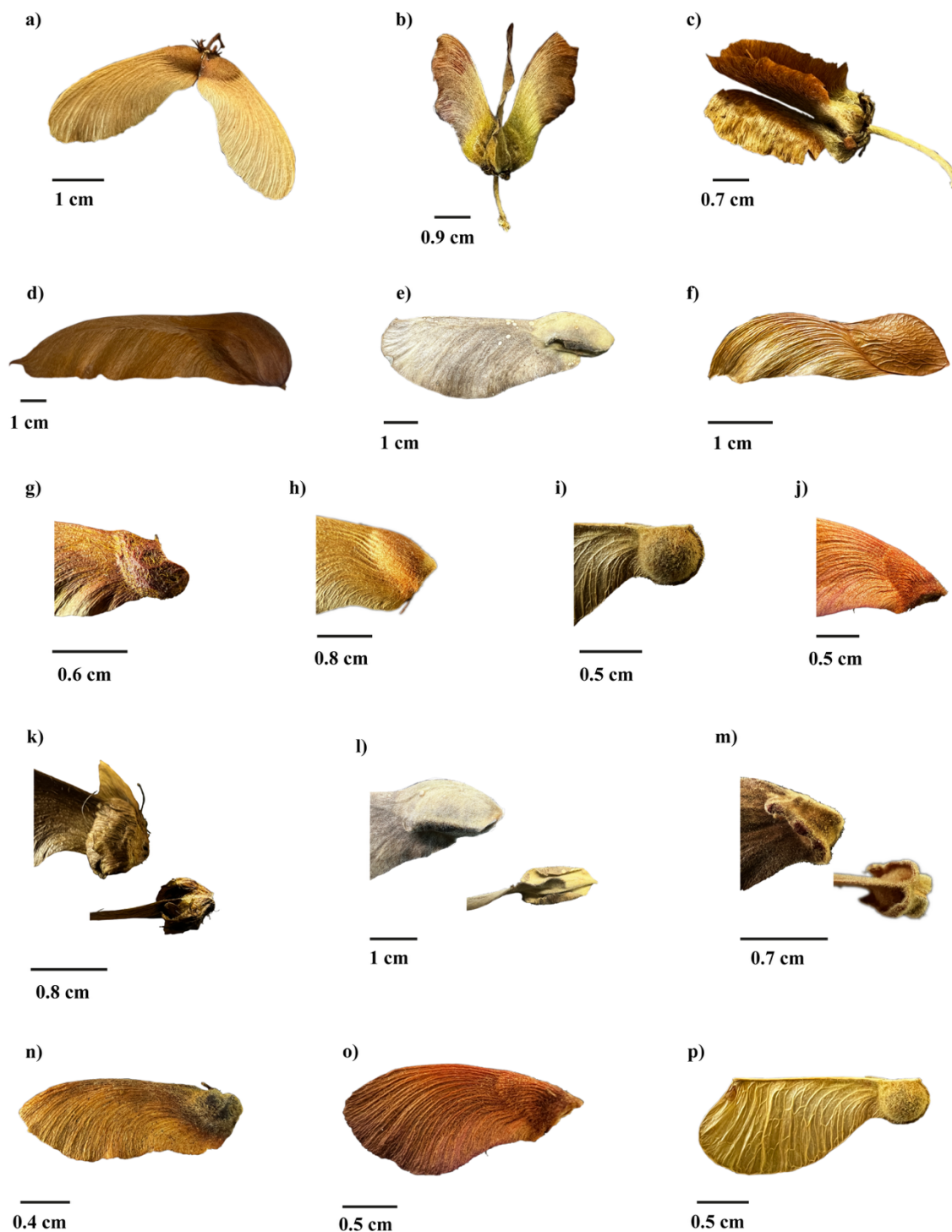


Figura 4. Morfologia de frutos alados assimétricos. **a)** Esquizocarpo samarídeo bi-alar de *Heteropterys byrsonimifolia*. **b)** Esquizocarpo samarídeo tri-alar de *Banisteriopsis argyrophylla*. **c)** Esquizocarpo samarídeo tri-alar de *Banisteriopsis variabilis*. **d)** Sâmara cultriforme de *Vatairea macrocarpa*, com extensão falcada no ápice da ala. **e)** Sâmara cultriforme e de aspecto velutino de *Luetzelburgia auriculata*. **f)** Sâmara cultriforme e glabra de *Pterogyne nitens*, com ápice da ala acuminado. **g)** Núcleo seminífero reniforme, muricado e com indumento tomentoso seríceo em *Banisteriopsis* sp. (2). **h)** Núcleo seminífero oblongo e com indumento tomentoso seríceo em *Heteropterys byrsonimifolia*. **i)** Núcleo seminífero orbicular e com indumento tomentoso seríceo em *Serjania lethalis*. **j)** Núcleo seminífero trapezoidal e com indumento tomentoso seríceo em *Heteropterys umbellata*. **k)** Conjunto de alélulas

conspícuas em *Diplopterys pubipetala*. **l)** Conjunto de alélulas conspícuas em *Luetzelburgia auriculata*. **m)** Conjunto de alélulas conspícuas em *Peixotoa goiana*. **n)** Samarídeo cultriforme de *Banisteriopsis* sp. (1). **o)** Samarídeo cristiforme de *Heteropterys umbellata*. **p)** Samarídeo cristiforme de *Serjania lethalis*.

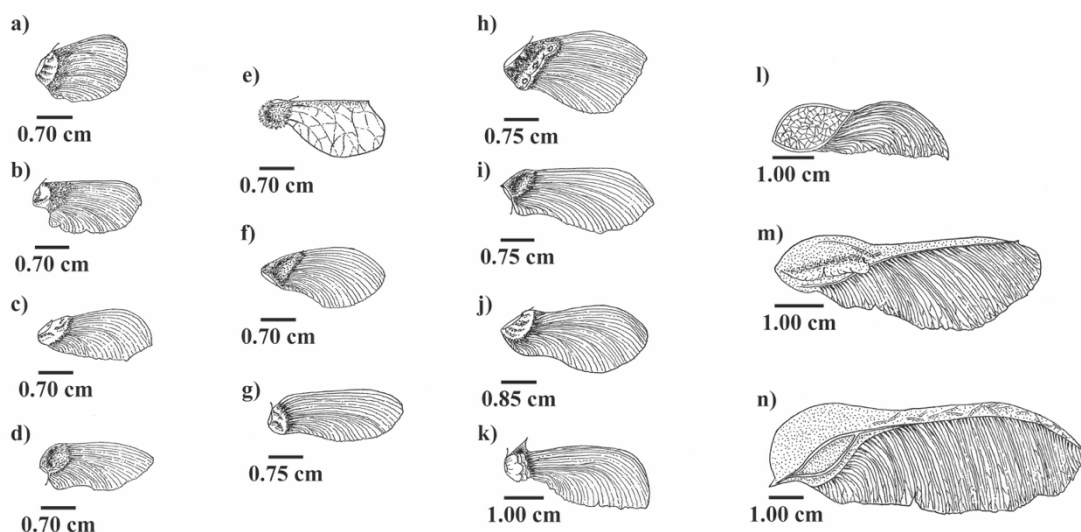


Figura 5. Padrão de nervação das alas de frutos alados assimétricos. **a)** *Banisteriopsis megaphylla*. **b)** *Banisteriopsis variabilis*. **c)** *Banisteriopsis* sp. (2). **d)** *Heteropterys eglandulosa*. **e)** *Serjania lethalis*, com nervuras curvilíneas a reticuladas, partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque. **f)** *Heteropterys umbellata*. **g)** *Banisteriopsis* sp. (1). **h)** *Peixotoa goiana*. **i)** *Heteropterys byrsonimifolia*. **j)** *Banisteriopsis argyrophylla*. **k)** *Diplopterys pubipetala*. **l)** *Pterogyne nitens*. **m)** *Luetzelburgia auriculata*, com nervuras partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque. **n)** *Vatairea macrocarpa*, com nervuras partindo do núcleo seminífero e do bordo de ataque.

3.5 Análise anatômica

3.5.1. Micromorfologia

Na maioria das espécies estudadas, a superfície das alas apresenta estrutura alveolada (Fig. 6a), composta por células poligonais com paredes anticlinais sinuosas e espessadas e paredes periclinais côncavas, formando cavidades no tecido epidérmico, cuja superfície central é pregueada. Como exceção, em *Serjania lethalis*, as células epidérmicas são alongadas, estreitas e justapostas (Fig. 6b), com paredes anticlinais levemente sinuosas, projetando-se em reentrâncias alternadas, e paredes periclinais levemente convexas, com pregueamento longitudinal e estriações finas contínuas. Em *Heteropterys umbellata* e *Vatairea macrocarpa*, as células possuem paredes anticlinais impressas, formando suaves sulcos nos limites intercelulares, e paredes periclinais

levemente abauladas, dando as células aspecto convexo, caracterizando protuberâncias epidérmicas (Fig. 6c).

Os tricomas constituem as principais estruturas acessórias da epiderme, sendo tectores simples, filiformes ou ramificados, com extremidade afilada e comprimento variável (Fig. 6d-6f). Tricomas ramificados foram observados apenas em *Peixotoa goiana*, com ramificação em forma de Y (Fig. 6g). As espécies com maior ocorrência de tricomas foram *Luetzelburgia auriculata* e *Peixotoa goiana*. Nessas espécies, os tricomas estão dispostos de forma irregular, cruzando-se em várias direções. Em contraste, *Pterogyne nitens* apresentou epiderme praticamente glabra, com baixa ocorrência de tricomas. Em *Banisteriopsis megaphylla*, os tricomas estão justapostos em faixas longitudinais, alternando com regiões glabras (Fig. 6f).

Também foram observadas cicatrizes de tricoma (Fig. 6h), caracterizadas pela forma circular com bordas protuberantes. Estômatos (Fig. 6i) foram identificados em *Serjania lethalis*, *Luetzelburgia auriculata*, *Pterogyne nitens* e *Vatairea macrocarpa*, indicando que os frutos dessas espécies apresentam atividade fotossintética em estágios ontogenéticos iniciais, a qual diminui progressivamente com a esclerificação e secagem, à medida que o fruto passa a exercer a função de diásporo anemocórico.

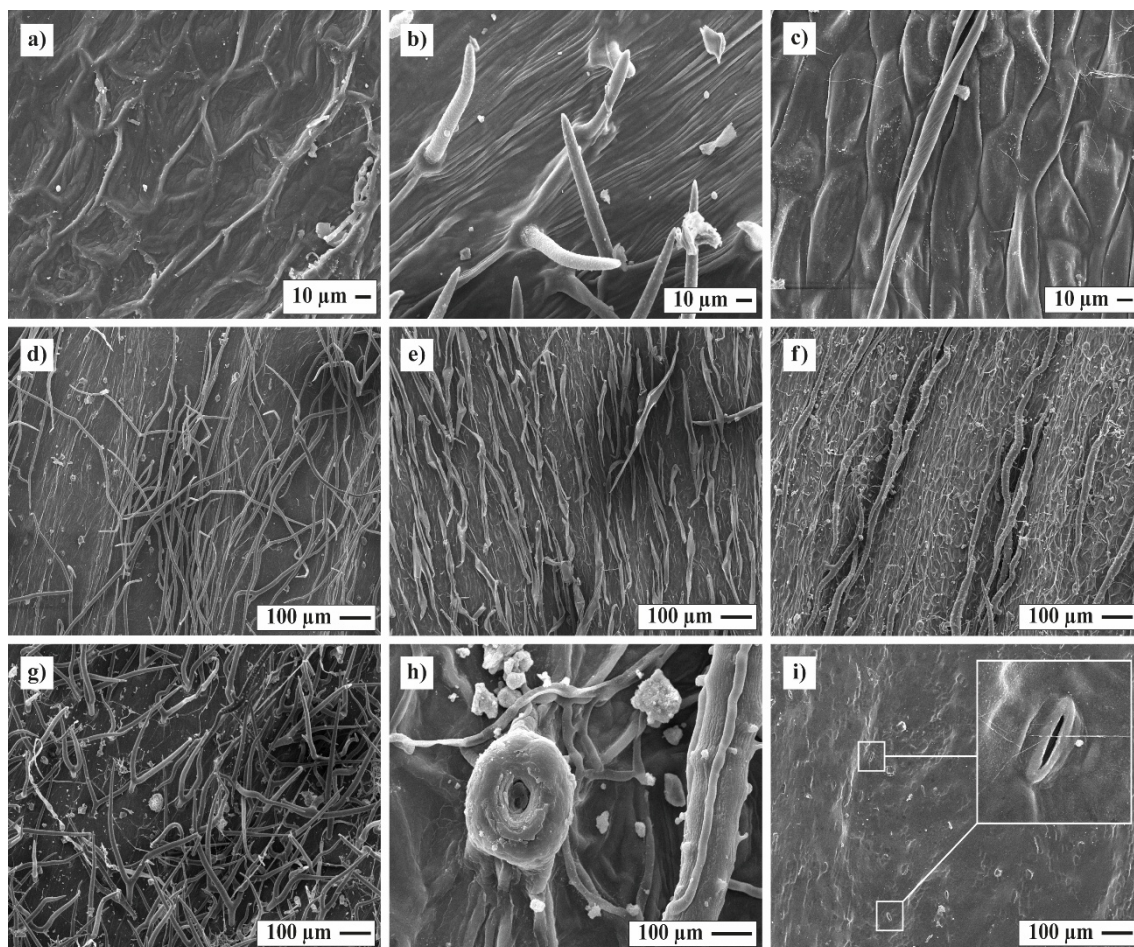


Figura 6. Micromorfologia das alas de frutos alados assimétricos. **a)** Epiderme alveolada composta por células poligonais com paredes anticlinais sinuosas e espessadas e paredes periclinais côncavas, em *Banisteriopsis variabilis*. **b)** Epiderme com células alongadas, estreitas e justapostas, com paredes anticlinais levemente sinuosas e periclinais levemente convexas, em *Serjania lethalis*. **c)** Epiderme com sulcos nos limites intercelulares e células com protuberância irregular, em *Heteropterys umbellata*. **d)** Tricomas simples, filiformes e afilados, dispostos em diferentes direções, em *Banisteriopsis argyrophylla*. **e)** Tricomas simples, filiformes e afilados, dispostos na mesma direção, em *Heteropterys eglandulosa*. **f)** Tricomas justapostos em faixas longitudinais, alternando com regiões glabras, em *Banisteriopsis megaphylla*. **g)** Tricomas ramificados em forma de Y, dispostos em diferentes direções, em *Peixotoa goiana*. **h)** Cicatriz de tricoma em *Banisteriopsis megaphylla*. **i)** Estômato em *Pterogyne nitens*.

3.5.2. Secção transversal

As seções transversais evidenciam organização estrutural complexa. A lâmina da ala é unifacial, com epiderme e mesofilo estruturalmente semelhantes em ambas as faces. Essa estrutura engloba zonas de alta e baixa densidade, correspondentes à intensa nervação observada nas alas dos frutos alados assimétricos.

Nos frutos das 10 espécies de Malpighiaceae, a organização estrutural é descrita da seguinte forma:

- Zonas de alta densidade: correspondem às nervuras, compostas por células tubulares compactas, de paredes espessas e lignificadas (Fig. 7b), dispostas longitudinalmente em duas camadas, alternas ou parcialmente paralelas entre si, próximas à epiderme, em ambas as faces (Fig. 7a).
- Zonas de baixa densidade: correspondem às regiões internervais, compostas por aerênquima com células parenquimáticas tubulares e ocas, de paredes finas, muito ramificadas e com orientação aleatória (Fig. 7a e 7c). Os espaços intercelulares são angulares e formam ampla rede de pequenas câmaras aeríferas (Fig. 7c).

Nas demais espécies, a organização estrutural difere parcialmente da observada nas Malpighiaceae. Características recorrentes na única espécie de Sapindaceae e nas três espécies de Fabaceae desse estudo, incluem nervuras de menor calibre, ainda que lignificadas e unidirecionais, e o mesofilo composto por colênquima angular. Em *Serjania lethalis* e *Pterogyne nitens*, o colênquima é disposto em três a quatro camadas paralelas à epiderme (Fig. 7d). Em *Luetzelburgia auriculata* e *Vatairea macrocarpa*, o mesofilo da ala consiste em duas a quatro camadas de colênquima que delimitam uma camada central de aerênquima (Fig. 7e), com câmaras aeríferas de grande dimensão (Fig. 7f). Durante o corte para obtenção das seções transversais, essas alas abriam-se persistentemente em duas lâminas ao longo da região central, dada as câmaras aeríferas de grande dimensão, permanecendo unidas apenas nos bordos de ataque e de fuga, contraste evidente em relação ao aerênquima das Malpighiaceae, cujas câmaras aeríferas são numerosas e compactas.

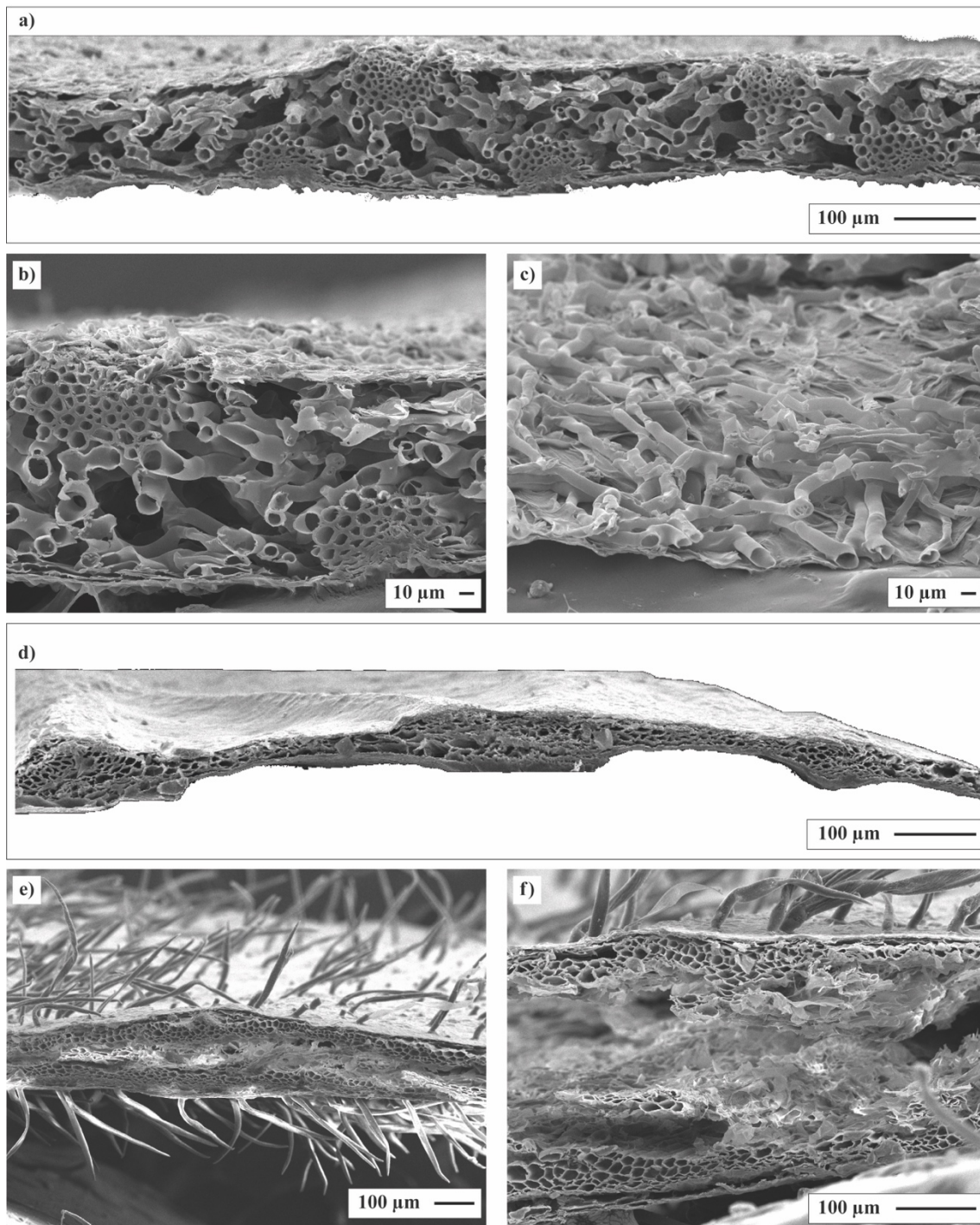


Figura 7. Secções transversais das alas de frutos alados assimétricos. **a)** Estrutura anatômica da ala de *Heteropterys byrsonimifolia*, expondo nervuras reforçadas e tecido internerval complacente. **b)** Nervuras da ala de *Heteropterys byrsonimifolia*, compostas por células tubulares compactas, de paredes espessas e lignificadas, dispostas longitudinalmente. **c)** Tecido internerval em *Banisteriopsis variabilis*, composto por aerênquima com células parenquimáticas tubulares e ocas, de paredes finas, muito ramificadas, com orientação aleatória e câmaras aeríferas de pequena dimensão. **d)** Mesófilo da ala de *Pterogyne nitens*, composto por colênquima angular. **e)** Mesófilo da ala de *Luetzelburgia auriculata*, composto por camadas de colênquima que delimitam uma camada central de aerênquima. **f)** Câmaras aeríferas de grande dimensão no aerênquima de *Luetzelburgia auriculata*.

4. Discussão

A variação morfométrica intra e interespecífica observada nas espécies de frutos alados assimétricos do Cerrado reflete a interação entre diversidade de forma associada a diferentes linhagens [27] e respostas morfológicas a gradientes ambientais. Embora a plasticidade fenotípica [30] contribua para a amplitude de variação registrada nos parâmetros mensurados, especialmente em contextos microambientais, este estudo concentra-se nos padrões morfofuncionais subjacentes a essa variação, com vistas à identificação de princípios de *design* estáveis e transferíveis para aplicações biomiméticas.

Em escala microambiental, fatores como luminosidade, temperatura, umidade, intensidade e direção do vento, além de herbivoria e arquitetura da planta-mãe, constituem um conjunto de variáveis que modulam pressões seletivas sobre os frutos e sua forma alada. A disposição espacial dos frutos influencia diretamente o ponto de liberação e, portanto, o potencial de dispersão [31]. A amplitude morfométrica observada em parâmetros como $m_{diaspore}$, m_{seed} e A traduz a flexibilidade funcional dos frutos alados assimétricos, evidenciando que a variação fenotípica não é um ruído experimental, mas parte integrante da estratégia biológica.

Em escala macroambiental, a heterogeneidade fisionômica entre formações savânicas e florestais [9], de onde provêm as espécies deste estudo, impõe regimes aerodinâmicos contrastantes associados à variação na rugosidade ambiental. Em formações florestais, a maior densidade do dossel eleva a rugosidade ambiental, o que consequentemente reduz a velocidade média do vento, restringindo o transporte horizontal e favorecendo estratégias associadas a maiores alturas de liberação. Em contraste, ambientes savânicos ou florestas decíduais durante a senescência foliar, apresentam menor rugosidade ambiental efetiva, permitindo que o fluxo de ar perpassa continuamente o ambiente, o que favorece a advecção dos frutos. Dessa forma, o gradiente de rugosidade ambiental modula o regime de escoamento e favorece morfologias distintas segundo o hábito [13], implicando em diferentes contextos na conversão da altura de liberação em distância horizontal.

As 10 Malpighiaceae variam entre arbustos com ramos férteis lianescentes e lianas propriamente ditas. *Diplopterys pubipetala* (Malpighiaceae) e *Serjania lethalis* (Sapindaceae), ambas lianas, ascendem a cerca de 15 m no dossel [32], liberando frutos em condições de maior velocidade do vento, o que potencializa a dispersão. Já as

Fabaceae arbóreas, *Pterogyne nitens*, *Luetzelburgia auriculata* e *Vatairea macrocarpa*, com ponto de liberação inferior, altura média de 10 m [32], devem compensar essa limitação com ajustes em forma e/ou estrutura, uma vez que, à medida que a morfologia se altera, também se modificam os atributos aerodinâmicos a ela relacionados [18,29]. Assim, a variação morfométrica dos frutos alados assimétricos do Cerrado representa uma estratégia evolutiva flexível, na qual a forma expressa ajustes mediados pela função ecológica e biomecânica que esses frutos exercem [15,16].

Compreender essa estratégia exige integrar a variação observada aos padrões de crescimento que a sustentam, o que é apresentado pela análise alométrica. Ao evidenciar como modificações de tamanho repercutem na forma e nas taxas relativas de crescimento dos componentes estruturais [28], a análise alométrica permite interpretar tais padrões em um contexto funcional. Nos frutos alados assimétricos, essas variações são avaliadas dentro do mesmo estágio ontogenético [21], permitindo inferir como ajustes de escala influenciam diretamente a geometria dos frutos e, conseqüentemente, o desempenho aerodinâmico [5].

A alometria positiva entre A e $m_{diaspore}$ indica que frutos mais pesados expandem sua superfície alar de forma desproporcional ao aumento da massa, em relação à expectativa isométrica. Em contraste, a relação próxima à isometria entre A e cS evidencia que os frutos ajustam principalmente sua geometria bidimensional, e não o escalonamento volumétrico, para modular a eficiência dispersiva. Logo, os resultados empíricos sustentam a hipótese de que os frutos alados assimétricos apresentam alometria predominantemente bidimensional, isto é, a variação em A é explicada majoritariamente por dimensões planas, em especial combinações de comprimentos e larguras, que definem a *planform* dos frutos. O desempenho estatístico de cS , caracterizado por associação extremamente forte e baixo desvio em relação à isometria, reforça essa interpretação.

A predominância das dimensões planas decorre da própria morfologia laminar desses frutos e evidencia a importância funcional da *planform* [5,17–19]. O núcleo seminífero, protegido por pericarpo robusto, concentra a maior parte da massa do fruto, armazenando reservas lipídicas de alta densidade energética, necessárias devido às restrições impostas pela síndrome de dispersão anemocórica, que favorece frutos globalmente leves [14]. Trata-se, portanto, da carga que a ala deve sustentar durante a autorrotação. Em contrapartida, a ala é ampla e extremamente leve, aumentando a superfície exposta ao ar e favorecendo a sustentação [5,17–19]. Esse contraste entre um componente volumétrico e denso e uma estrutura laminar pouco massiva explica por que,

embora a área aumente de forma mais que proporcional à $m_{diaspore}$, sua variação é melhor descrita por relações bidimensionais, como cS , do que por escalonamentos volumétricos diretos, o que é consistente com o comportamento de estruturas laminares.

O mecanismo de autorrotação (Fig. 2b) desses frutos resulta da interação entre sua geometria tridimensional assimétrica e afilada, a distribuição de massa e o comportamento do escoamento [17,18]. Quando um fruto alado assimétrico intercepta o fluxo de ar (Fig. 2c e 2d), um ponto de estagnação se forma no bordo de ataque intradorsal. A partir desse ponto, desenvolve-se um expressivo gradiente de pressão adverso ao longo do extradorso, promovendo a separação da camada limite, que se organiza em um vórtice de bordo de ataque (LEV, do inglês *Leading-Edge Vortex*) compacto, coeso e estável. A estabilização do LEV frente a gradientes de pressão adversos é favorecida pelo escoamento axial gerado pela força centrífuga da rotação, que transporta fluido e vorticidade em direção à ponta da ala. Essa drenagem contínua impede o acúmulo excessivo de vorticidade, liberando-a pelo bordo de fuga distal, o que mantém o LEV compacto. O campo de velocidade induzido pelo LEV acelera o escoamento próximo à superfície, transferindo *momentum* para a camada limite e permitindo que o voo se sustente em altos ângulos de ataque sem estol. O resultado é uma trajetória helicoidal estável, que maximiza sustentação, reduz arrasto, diminui a velocidade terminal e prolonga o tempo de queda, ampliando o alcance dispersivo (Fig. 2b) [4,33].

Dentro desse contexto funcional, a AR influencia diretamente o comportamento do escoamento durante o voo [17,19]. Essa dinâmica é melhor compreendida à luz do Re , que expressa a razão entre forças inerciais e viscosas no escoamento. Como o Re depende de uma dimensão característica, geralmente c ou S , alas com dimensões maiores tendem a apresentar Re locais mais elevados, modulando a transição entre regimes laminares e turbulentos na camada limite [20,33].

Frutos alados assimétricos com AR baixa, como observado em *Banisteriopsis megaphylla*, possuem alas largas e curtas, com corda extensa e maior superfície exposta ao fluxo. Como resultado, o Re tende a valores baixos, no qual o escoamento laminar predomina e a separação da camada limite pode ocorrer precocemente, reduzindo sustentação e aumentando o arrasto [20,33]. Por outro lado, frutos com AR elevada, como observado em *Pterogyne nitens*, apresentam alas estreitas e alongadas, favorecendo autorrotação estável e prolongada. Contudo, o alongamento excessivo aumenta a susceptibilidade ao estol, pois a distribuição do fluxo ao longo do S torna-se desigual, prejudicando a coesão do escoamento [17]. Além disso, alas muito longas podem ser

estruturalmente frágeis e energeticamente custosas em termos de biomassa, o que introduz um segundo conjunto de restrições biomecânicas, relacionadas a robustez [7]. Assim, uma AR intermediária, comum à maioria das espécies deste estudo, oferece o melhor compromisso aerodinâmico, pois permite a formação do LEV que intensifica a sustentação em baixos Re , evita o estol e preserva integridade estrutural da ala [4,17–20].

A geração de vórtices como mecanismo de sustentação é uma estratégia aerodinâmica recorrente na natureza, presente em asas de insetos, aves e morcegos. Os frutos alados assimétricos, apesar de sua simplicidade morfológica como sistemas passivos, alcançam desempenho aerodinâmico notavelmente eficiente baseado nos mesmos princípios físicos [4].

A W/S complementa a interpretação funcional ao expressar quanto peso cada unidade de área deve sustentar [19]. Frutos com W/S baixa, como observado em *Diplopterys pubipetala*, implicam em maior superfície aerodinâmica e prolongam a aderência dos vórtices. Por outro lado, frutos com W/S elevada, como observado em *Vatairea macrocarpa*, concentram mais peso por unidade de área. A sustentação gerada pode ser insuficiente para contrabalancear o peso, assim, a velocidade terminal aumenta e limita a dispersão [4,19].

Em conjunto, AR e W/S são parâmetros centrais para discutir atributos morfométricos e seu comportamento alométrico. Valores intermediários tendem a maximizar eficiência aerodinâmica [5,19]. Sob essa perspectiva, um *trade-off* entre ganho aerodinâmico e custos de biomassa e estrutura da ala pode ser considerado, englobando equilíbrio dinâmico entre $m_{diaspore}$, A e robustez da lâmina.

A eficiência aerodinâmica em frutos alados assimétricos exige alas amplas, leves e com *planform* ajustada, mas a expansão exagerada da lâmina implica custos biomecânicos e fisiológicos, como maior susceptibilidade à deformação, fragilidade e aumento desnecessário de $m_{diaspore}$ [7,17]. Há, portanto, um limite inferior de robustez, abaixo do qual a integridade mecânica é comprometida. Esse limite é frequentemente atendido por reforços como nervuras e tecidos resistentes que distribuem tensões e evitam falhas [7]. Paralelamente, há um limite superior imposto pelo núcleo seminífero mais denso, necessário para proteger o embrião e armazenar reservas [14].

O *trade-off* entre ganho aerodinâmico e custos de biomassa e estrutura da ala demonstra que os frutos alados assimétricos operam dentro de um intervalo funcional ótimo e o arranjo desse custo-benefício é coerente com os padrões alométricos aqui observados e com as exigências funcionais da dispersão anemocórica [4,5,7,14–17,19].

Essas dinâmicas funcionais, porém, não esgotam a complexidade de forma e estrutura apresentada pelos frutos alados assimétricos, mas se articulam dentro de um panorama morfológico e anatômico mais amplo.

O conjunto de 14 caracteres relacionados ao fruto, ao núcleo seminífero e à ala [21] evidencia não apenas a diversidade morfológica entre as espécies, mas também a convergência morfológica entre táxons distantes filogeneticamente [27], indicando que pressões seletivas associadas à dispersão anemocórica moldaram essas morfologias sob um viés funcional comum [3,13]. Contudo, apesar da convergência funcional observada, em que todos os frutos são alados e apresentam assimetria, favorecendo a dispersão anemocórica por voo autorrotacional, há diversidade notável de especificidade morfológica entre as espécies, em termos de forma e estrutura. Portanto, é possível sustentar a hipótese de que a morfologia desses frutos é espécie-específica, embora circunscrita a um contexto morfofuncional primeiramente delimitado pela convergência.

Os caracteres relacionados ao fruto ajudam a explicar as diferenças interespecíficas de $m_{diaspore}$ em função do tipo carpológico. Nas Malpighiaceae e Sapindaceae, cada diásporo corresponde a um mericarpo de esquizocarpo, ou seja, 1/2 ou 1/3 do fruto original. Essa fragmentação reduz naturalmente a massa absoluta e o volume investidos em cada unidade de dispersão, tornando esses frutos estruturalmente mais econômicos. Nas Fabaceae, ao contrário, os frutos são sâmaras inteiras, com investimento concentrado em uma unidade. A necessidade de suportar sementes geralmente maiores implica maior aporte estrutural no pericarpo e na ala, resultando em frutos maiores e mais pesados [21,22]. Como consequência, mericarpos ou frutos parciais esquizocárpicos apresentam menores $m_{diaspore}$ e menores W/S , enquanto sâmaras inteiras dispõem de maiores $m_{diaspore}$ e maiores W/S .

Quanto ao núcleo seminífero, apesar da diversidade de formas, é observada convergência na presença de indumento, com predomínio de tricomas. Essa textura aumenta a rugosidade superficial e perturba o fluxo de ar incidente, atuando como microturbuladores que favorecem a aderência da camada limite sobre o núcleo seminífero e influenciam localmente o comportamento aerodinâmico da região proximal [20,29]. O padrão muricado, caracterizado por relevo irregular formado por pequenas projeções e depressões de bordas abauladas que recobrem o núcleo seminífero em todas as espécies de *Banisteriopsis* analisadas [21], atua pelo mesmo princípio, reforçando a modulação do escoamento.

É importante destacar que a rugosidade superficial dos frutos alados assimétricos gera dois efeitos antagônicos no *momentum* da camada limite. Por um lado, aumenta o atrito de fricção superficial, dissipando *momentum* e aumentando o arrasto viscoso. Por outro, atua como um distúrbio mecânico que promove a instabilidade e antecipa a transição da camada limite de laminar para turbulenta. Uma camada limite turbulenta possui maior energia cinética e apresenta maior resistência à separação devido à intensa mistura transversal e difusão de *momentum*, que recombinam o escoamento livre com o fluido próximo à superfície. Em condições de baixo *Re*, esse segundo efeito pode superar as perdas por atrito, resultando em uma camada limite globalmente mais aderente, capaz de suportar gradientes de pressão adversos mais severos e contribuindo para a estabilização do LEV [20,29,33].

Um destaque morfológico particular são as alélulas [21] presentes em *Diplopterys pubipetala* (Fig. 4k), *Luetzelburgia auriculata* (Fig. 4l) e *Peixotoa goiana* (Fig. 4m). Por se projetarem no sentido do escoamento, este estudo propõe a hipótese inédita de que essas estruturas atuem como defletores naturais, direcionando o fluxo do núcleo seminífero para a região proximal da ala. Em razão de sua forma, semelhante a uma rampa abaulada, as alélulas podem também perturbar o escoamento e atuar como turbuladores. Esse mecanismo é análogo às descrições de defletores e turbuladores, em termos gerais de mecânica dos fluidos [33] e em termos de estruturas biológicas que interagem com fluidos [15,16], e teria como benefício o efeito combinado de deflexão e turbulência com potencial de energizar a camada limite na região proximal nos estágios iniciais da rotação, potencialmente facilitando a formação ou estabilização do LEV. Contudo, ressalta-se que essa interpretação é conjectural e demanda verificação experimental.

A micromorfologia das alas mostra que os frutos alados assimétricos investem em um sistema integrado de rugosidade multiescalar, que desempenha papel complementar ao LEV na modulação da camada limite [20,29]. Esse sistema opera em pelo menos duas ordens de magnitude. Na escala das estruturas projetadas, há os tricomas, que atuam como elementos de atrito e distúrbio, e na escala da textura epidérmica, há superfícies alveoladas, células estriadas ou micro protuberâncias [22], que interagem diretamente com o fluxo aderido. A combinação na densidade e arranjo dessas características estabelece um gradiente de rugosidade que, de forma coletiva, promove as condições para energizar a camada limite [20,29]. Esse efeito pode ser ainda potencializado por estruturas do núcleo seminífero, como as alélulas e o indumento de padrão muricado, que modulam o fluxo incidente na região proximal.

A separação da camada limite é um fenômeno inevitável e, de fato, funcionalmente necessário. Ela ocorre quando o gradiente de pressão aumenta ao longo do extradorso e o fluido próximo à superfície já não possui *momentum* suficiente para avançar contra essa adversidade, levando à desaceleração, à reversão local do escoamento e à formação de bolhas de recirculação, dando início a separação (Fig. 2d) [33]. Em frutos alados assimétricos, a geometria tridimensional assimétrica e afilada retarda esse processo, deslocando o ponto de separação para mais próximo do bordo de fuga, enquanto a rugosidade superficial favorece a transição da camada limite de laminar para turbulenta, conferindo maior resistência à separação. O efeito combinado dessas características ameniza o gradiente de pressão adverso e promove a formação de uma esteira descendente mais suave e estável, essencial para a trajetória helicoidal regular típica da cinemática desses frutos [20].

A porção média e final da ala opera sob um gradiente de pressão adverso pronunciado [17]. Para suavizar seus efeitos nocivos, as espécies evoluíram formas especializadas no bordo de fuga. Em todas as espécies analisadas, exceto *Serjania lethalis*, o bordo de fuga é serreado e/ou ondulado. Essa conformação, atuando em conjunto com a forma do ápice, organiza a separação inevitável da camada limite [29]. Ao fragmentar a vorticidade que converge na extremidade da ala, o bordo serreado e/ou ondulado drena a energia dos vórtices de maneira ordenada. Esse mecanismo reduz o arrasto induzido, minimiza as oscilações na esteira e, conseqüentemente, contribui para a estabilidade da trajetória de autorrotação [4,33].

A forma geral da ala, cristiforme ou cultriforme, é um indicador qualitativo da *AR* dos frutos [19,21] e está intrinsecamente ligada ao seu padrão de afilamento proximal-distal. Esse afilamento é um mecanismo geométrico fundamental que organiza a distribuição de $m_{diaspore}$ e c ao longo do S [17,18]. Além disso, a espessura da lâmina, já consideravelmente menor que a do robusto bordo de ataque [21], diminui ainda mais em direção à ponta da ala. Como resultado conjunto, as regiões proximais concentram mais massa por unidade de comprimento de corda, enquanto as distais são progressivamente mais leves, criando um gradiente de densidade que promove a assimetria rotacional necessária [17,18].

Esse gradiente de densidade proximal-distal favorece o estabelecimento de um escoamento axial, do núcleo seminífero para a ponta da ala, que, impulsionado pela força centrífuga da rotação, é responsável por convectar vorticidade de forma organizada em direção ao bordo de fuga distal. Lá, a vorticidade é liberada na forma de vórtices de bordo

de fuga coerentes (Fig. 2c), condição essencial para evitar o crescimento descontrolado do LEV, e, portanto, para sua estabilização [4,33].

Para que esse mecanismo aerodinâmico opere de forma confiável, a estrutura da ala deve equilibrar leveza e resistência. A robustez da ala, que constitui um dos componentes do *trade-off* entre ganho aerodinâmico e custos de biomassa e estrutura da ala, parte da observação do padrão de nervação e sua caracterização anatômica. As nervuras são o principal reforço de forma observado nas alas dos frutos alados assimétricos, e atuam como coluna vertebral do fruto em macroescala. Em microescala, a presença de tecidos resistentes cumpre esse papel [7].

Os resultados anatômicos corroboram a hipótese de que a organização hierárquica da estrutura das alas é modulada por regiões de distinta densidade e orientação de tecidos, conferindo diferentes propriedades mecânicas essenciais ao voo autorrotativo dos frutos alados assimétricos. As seções transversais evidenciam a alternância entre zonas de alta densidade, correspondentes às nervuras, e zonas de baixa densidade, associadas à região internerval [22]. As regiões densas asseguram rigidez e sustentação estrutural, preservando a integridade morfológica da ala durante a autorrotação, enquanto as regiões de menor densidade proporcionam flexibilidade e leveza [7]. Essa rigidez é fundamental para manter *planform* e aerofólio eficientes durante a autorrotação, estabilizando os gradientes de pressão e o escoamento axial descritos.

As zonas de baixa densidade, embora não apresentem orientação aleatória em todas as espécies analisadas, desempenham papel fundamental na redução da W/S efetiva. O colênquima angular, caracterizado por reforço periférico nas arestas celulares [22], reforça a estrutura sem acréscimo significativo de massa, sendo importante para dissipar tensões e controlar deformações sob forças aerodinâmicas [7]. Esse arranjo confere resistência local e flexibilidade global às alas de *Serjania lethalis*, *Pterogyne nitens*, *Luetzelburgia auriculata* e *Vatairea macrocarpa*. Considerando que as três espécies de Fabaceae apresentam os maiores frutos dentre as espécies estudadas, é plausível associar a presença de colênquima como reforço adicional em espécies que investem em frutos maiores, como o tipo carpológico sâmara, especialmente porque as nervuras nas alas dessas espécies apresentaram menor calibre.

Como o núcleo seminífero já concentra cerca de 75% da $m_{diaspore}$, o investimento em tecidos leves nas alas [22] sugere que a evolução favoreceu alas otimizadas principalmente em sua *planform* como mecanismo compensatório frente à $m_{diaspore}$

concentrada na m_{seed} para conter o aumento da W/S [5,28]. Dessa forma, mesmo frutos pesados, como os de *Vatairea macrocarpa*, podem manter voo sustentado.

Em *Serjania lethalis*, o padrão de nervação curvilínea justaposta ao reticulado, caracterizado por menor número de nervuras, coincide com a presença de colênquima como tecido internerval, em vez do aerênquima [7,22] observado nas Malpighiaceae, embora seu fruto também seja esquizocarpo samarídeo [21]. Essa configuração anatômica pode representar uma adaptação estrutural para conferir rigidez e suporte mecânico à ala, compensando o menor número de nervuras e mantendo a integridade necessária para o voo autorrotativo. Nas Malpighiaceae, o aerênquima predomina como tecido internerval, caracterizado por espaços intercelulares preenchidos por ar [22], o que reduz a densidade do tecido, confere ainda mais leveza e fluabilidade e permite deformações locais sem ruptura celular, graças às suas propriedades elásticas e compressíveis [7]. Nos esquizocarpos das Malpighiaceae, os samarídeos, originados de ovários bi-carpelares ou tri-carpelares [21], podem desenvolver alas amplas e leves, com aerênquima internerval, sem elevar significativamente o custo energético ou de biomassa [7,22].

A presença de aerênquima ou colênquima no mesofilo promove a redistribuição crítica da $m_{diaspore}$. Essa diferenciação tecidual acentua o gradiente de densidade proximal-distal oriundo do afilamento da ala, deslocando o centro de massa em direção ao núcleo seminífero e otimizando a assimetria funcional [17,18]. Mecanicamente, o mesofilo atua como uma matriz flexível que conecta as nervuras, distribui tensões e resiste a danos localizados. As próprias nervuras, dispostas em padrão curvilíneo e perpendicular aos bordos, funcionam como cordas de reforço, que guiam a propagação de fissuras nas alas, aumentam a tenacidade da estrutura e previnem falhas catastróficas [7].

Assim, a anatomia das alas dos frutos alados assimétricos evidencia um mecanismo estrutural de suporte de carga convergente com padrões observados em frutos do mesmo grupo funcional em outras famílias botânicas [7,22], sugerindo que a dispersão anemocórica impõe restrições funcionais universais que moldam a morfologia e a hierarquia estrutural das alas [7], representando um conjunto integrado de estratégias morfoanatômicas que finaliza a proposição do *trade-off*. Primeiramente, a alometria positiva entre A e $m_{diaspore}$ demonstra que frutos mais pesados compensam a maior massa com expansão desproporcional da superfície alar. Contudo, essa expansão não resulta em incremento proporcional de massa alar. Na maioria das espécies, a ala contribui com menos de 25% da massa total do fruto, principalmente nas espécies com maiores $m_{diaspore}$.

Essa baixa massa alar é viabilizada por adaptações anatômicas como a presença de aerênquima e colênquima, que representam baixo acréscimo de biomassa, além de padrões de nervação que distribuem tensões mecânicas. Dessa forma, a expansão da área alar, necessária para sustentar frutos mais pesados, ocorre com incremento marginal de massa e sem comprometer a integridade estrutural, o que configura uma solução de compromisso funcionalmente ótima. O *trade-off* entre ganho aerodinâmico, via expansão da A , e custos de biomassa e estrutura da ala, contidos pelas adaptações anatômicas, são um princípio organizador central da morfologia dos frutos alados assimétricos.

5. Conclusão

A morfologia dos frutos alados assimétricos do Cerrado é funcionalmente otimizada para o voo autorrotativo. O projeto natural desses frutos não revela uma solução única, mas um espectro de estratégias coexistentes, que incluem ajustes alométricos bidimensionais, um *trade-off* entre ganho aerodinâmico e custos de biomassa e estrutura da ala e soluções morfológicas e anatômicas simultaneamente convergentes e específicas. Todas essas soluções culminam em uma estratégia biológica comum: maximizar a sustentação em escoamentos de baixo Re sem mecanismos ativos.

Este é o primeiro estudo a analisar os frutos alados assimétricos do Cerrado sob uma ótica integrada de morfologia funcional. A coexistência de múltiplas estratégias de otimização em um único arquétipo aerodinâmico projeta o Cerrado como laboratório evolutivo e fomenta sua valorização como patrimônio tecnológico, cuja conservação é estratégica não apenas do ponto de vista da proteção da diversidade biológica, mas dos princípios de *design* a ela relacionado.

Neste contexto, embora a validação completa das interpretações exija testes aerodinâmicos para quantificar diretamente o desempenho de voo, a convergência com frutos descritos na literatura, particularmente os do gênero *Acer* spp., corrobora o potencial biomimético desses sistemas. Os resultados deste estudo apoiam o desenvolvimento de estratégias de projeto de engenharia que abordam desafios como a geração e estabilização de vórtices em baixos Re , o controle passivo da camada limite e a otimização estrutural, domínios nos quais os frutos alados assimétricos do Cerrado demonstram alto grau de refinamento evolutivo.

Referências

1. Pandolfi C, Izzo D. 2013 Biomimetics on seed dispersal: survey and insights for space exploration. *Bioinspir. Biomim.* **8**, 025003. (doi:10.1088/1748-3182/8/2/025003)
2. Benyus JM. 2016 *Biomimética: Inovação inspirada pela natureza*. 13th edn. São Paulo: Cultrix.
3. Speck O, Speck T. 2021 Functional morphology of plants – a key to biomimetic applications. *New Phytologist* **231**, 950–956. (doi:10.1111/nph.17396)
4. Lentink D, Dickson WB, Van Leeuwen JL, Dickinson MH. 2009 Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. *Science (1979)*. **324**. (doi:10.1126/science.1174196)
5. Schaeffer BM, Truman SS, Truscott TT, Dickerson AK. 2024 Maple samara flight is robust to morphological perturbation and united by a classic drag model. *Communications Biology* 2024 7:1 **7**, 1–10. (doi:10.1038/s42003-024-05913-3)
6. Salcedo E, Treviño C, Vargas RO, Martínez LA. 2013 Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow field of a descending autorotating Mahogany seed (*Swietenia macrophylla*). *Journal of Experimental Biology* (doi:10.1242/jeb.085407)
7. Ezra Z, Levavi L, Bar-On B. 2023 The load-bearing mechanism of plant wings: A multiscale structural and mechanical analysis of the T. tipu samara. *Acta Biomater.* **158**, 423–434. (doi:10.1016/j.actbio.2022.12.040)
8. Mittermeier. 2004 Hotspots revisitados.
9. Ribeiro JF, Walter BMT. 1998 As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In *Cerrado: ambiente e flora*, pp. 89–166. EMBRAPA-CPAC.
10. Pijl L. 1982 *Principles of Dispersal in Higher Plants*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. (doi:10.1007/978-3-642-87925-8)
11. Howe F, Smallwood J. 1982 Ecology of seed dispersal. *Annual review of ecology and systematics. Volume 13* , 201–228. (doi:10.1146/annurev.es.13.110182.001221)
12. Augspurger CK. 1986 Morphology and dispersal potential of wind-dispersed diaspores of Neotropical trees. *Am. J. Bot.* **73**, 353–363. (doi:10.1002/J.1537-2197.1986.TB12048.X)
13. Kuhlmann M, Ribeiro JF. 2016 Evolution of seed dispersal in the Cerrado biome: ecological and phylogenetic considerations. *Acta Bot. Brasilica* **30**, 271–282. (doi:10.1590/0102-33062015ABB0331)
14. Melo RB de., Ferreira CS, Lopes A, Vinson CC, Franco AC. 2020 Dispersal mode constrains allocation of carbon and mineral nutrients in seeds of forest and savanna trees. *Plant Biol.* **22**, 203–211. (doi:10.1111/plb.13075)
15. Vogel S. 1994 *Life in Moving Fluids: The Physical Biology of Flow - Revised and Expanded Second Edition*. Princeton University Press. (doi:10.2307/j.ctvzsmfc6)
16. Niklas KJ. 1992 *Plant biomechanics : an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago Press.
17. Norberg RÅ. 1973 Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. *Biological Reviews* **48**, 561–596. (doi:10.1111/j.1469-185X.1973.tb01569.x)
18. Azuma A, Yasuda K. 1989 Flight performance of rotary seeds. *J. Theor. Biol.* **138**. (doi:10.1016/S0022-5193(89)80176-6)

19. Greene DF, Johnson EA. 1993 Seed Mass and Dispersal Capacity in Wind-Dispersed Diaspores. *Source: Oikos*. **67**. (doi:<https://doi.org/10.2307/3545096>)
20. Arranz G, Gonzalo A, Uhlmann M, Flores O, García-Villalba M. 2018 A numerical study of the flow around a model winged seed in auto-rotation. *Flow Turbulence Combust*, 477–497. (doi:<https://doi.org/10.1007/s10494-018-9945-z>)
21. Barroso GM, Morim MP, Peixoto AL, Ichaso CLF. 1999 *Frutos e sementes: morfologia aplicada à sistemática de dicotiledôneas*. Viçosa: UFV.
22. Roth I. 1977 Fruits of Angiosperms. *Handbuch der Pflanzenanatomie* **10**, 1–675.
23. Krishnan A, Al-Obaidi AShM, Hao LC. 2023 A comprehensive review of innovative wind turbine airfoil and blade designs: Toward enhanced efficiency and sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **60**, 103511. (doi:10.1016/j.seta.2023.103511)
24. Ye X, Hu J, Zheng N, Li C. 2023 Numerical study on aerodynamic performance and noise of wind turbine airfoils with serrated gurney flap. *Energy* **262**, 125574. (doi:10.1016/j.energy.2022.125574)
25. Cikalleshi K, Nexha A, Kister T, Ronzan M, Mondini A, Mariani S, Kraus T, Mazzolai B. 2023 A printed luminescent flier inspired by plant seeds for eco-friendly physical sensing. *Sci. Adv.* **9**. (doi:10.1126/sciadv.adi8492)
26. INPE. 2025 Estação de Brasília: Climatologia Local. See https://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/brasilia_clima.html (accessed on 18 March 2025).
27. APG IV. 2016 An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* **181**, 1–20. (doi:10.1111/boj.12385)
28. Klingenberg CP. 2016 Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Dev. Genes Evol.* **226**, 113–137. (doi:10.1007/s00427-016-0539-2)
29. Drisya V V, C. P, Pradeep AK, T.P. S. 2024 Winged Diaspores in Flowering Plants: A Means of Plant Movement with Enigmatic Flight Mechanisms. In *Glimpses of Diversity: Fungi and Plants*, pp. 137–159. Malappuram.
30. Bradshaw AD. 1965 Evolutionary Significance of Phenotypic Plasticity in Plants. pp. 115–155. (doi:10.1016/S0065-2660(08)60048-6)
31. Larson-Johnson K. 2023 Wind variability limits the potential influence of propagule morphology and descent rate on dispersal in the winged fruits of *Carpinus* (Betulaceae). *Rev. Palaeobot. Palynol.* **310**, 104829. (doi:10.1016/J.REVPALBO.2022.104829)
32. Flora e Funga do Brasil. 2026 Flora e Funga do Brasil. See <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/consulta/> (accessed on 6 January 2026).
33. Fox RW., McDonald AT., Pritchard PJ. 2006 *Introdução à mecânica dos fluidos*. LTC.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela A 1. Lista de espécies anemocóricas do Cerrado amostradas, com localização, atributos ecológicos e morfofuncionais. As coordenadas são apresentadas em graus decimais. A marcação (*) corresponde as espécies doadas pelo Grupo de Estudos em Sementes da Universidade de Brasília (Gesem), sem localização específica informada. A designação de hábito A / L indica arbustos com ramos férteis lianescentes.

Família	Espécie	Latitude	Longitude	Fitofisionomia	Hábito	Estrutura de voo	Tipo de voo
Anacardiaceae	<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	-15.993778	-47.823654	savana	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Anacardiaceae	<i>Astronium urundeuva</i> (M.Allemao) Engl.	-15.584751	-47.846897	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Apocynaceae	<i>Aspidosperma macrocarpon</i> Mart. & Zucc.	-15.94555	-47.946043	savana	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Apocynaceae	<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	*	*	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Apocynaceae	<i>Aspidosperma tomentosum</i> Mart. & Zucc.	-15.991291	-47.825566	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Apocynaceae	<i>Ditassa burchellii</i> Hook. & Arn. var. <i>burchellii</i>	-15.933253	-47.885132	savana	liana	coma piloso	regime de paraquedas
Asteraceae	<i>Chresta scapigera</i> (Less.) Gardner	-15.966276	-47.921416	savana	herbácea	pápus piloso	regime de paraquedas
Asteraceae	<i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.) MacLeish	-15.943900	-47.876955	savana	árvore	pápus aristado	regime de paraquedas
Asteraceae	<i>Lepidaploa aurea</i> (Mart. ex DC.) H.Rob.	-15.766348	-47.865215	área antrópica	arbusto	pápus piloso	regime de paraquedas
Asteraceae	<i>Lessingianthus bardanoides</i> (Less.) H.Rob.	-15.933539	-47.885183	savana	arbusto	pápus piloso	regime de paraquedas
Bignoniaceae	<i>Amphilophium crucigerum</i> (L.) L.G.Lohmann	*	*	savana	liana	membrana simétrica alongada	planagem sustentada
Bignoniaceae	<i>Cybistax antisiphilitica</i> (Mart.) Mart.	-15.933569	-47.885139	savana	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	-15.987971	-47.820869	área antrópica	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	-15.765791	-47.866724	área antrópica	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.Grose	-15.990976	-47.82571	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Jacaranda brasiliiana</i> (Lam.) Pers.	-15.771493	-47.871356	área antrópica	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Jacaranda ulei</i> Bureau & K.Schum.	-15.933263	-47.885108	savana	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore	*	*	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	-15.993101	-47.821959	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana

Bignoniaceae	<i>Tanaecium dichotomum</i> (Jacq.) Kaeher & L.G.Lohmann	-15.993716	-47.823291	floresta	liana	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Bignoniaceae	<i>Zeyheria montana</i> Mart.	*	*	savana	arbusto	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Calophyllaceae	<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	-15.943936	-47.877078	savana	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Calophyllaceae	<i>Kielmeyera speciosa</i> A.St.-Hil.	*	*	savana	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Combretaceae	<i>Terminalia argentea</i> Mart. & Zucc.	-15.58571	-47.846658	floresta	árvore	ala simétrica	rotação oscilatória ou rolante
Combretaceae	<i>Terminalia fagifolia</i> Mart.	-15.769943	-47.866678	área antrópica	árvore	ala simétrica	rotação oscilatória ou rolante
Combretaceae	<i>Terminalia glabrescens</i> Mart.	-15.993688	-47.82362	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Eriocaulaceae	<i>Coracoralina chiquitensis</i> (Herzog) Andrino	*	*	savana	herbácea	escala reduzida e leveza	suspensão atmosférica
Fabaceae	<i>Centrolobium tomentosum</i> Guillem. ex Benth.	-15.763695	-47.866925	área antrópica	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Dalbergia miscolobium</i> Benth.	-15.770081	-47.866275	área antrópica	árvore	ala simétrica	rotação oscilatória ou rolante
Fabaceae	<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	-15.585145	-47.846692	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Machaerium hirtum</i> (Vell.) Stellfeld	-15.586318	-47.843546	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Machaerium paraguariense</i> Hassl.	*	*	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Platypodium elegans</i> Vogel	-15.993654	-47.823496	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Pterodon pubescens</i> (Benth.) Benth.	-15.943902	-47.877822	savana	árvore	ala simétrica	rotação oscilatória ou rolante
Fabaceae	<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	-15.769276	-47.867362	área antrópica	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Fabaceae	<i>Tachigali rubiginosa</i> (Mart. ex Tul.) Oliveira-Filho	-15.990694	-47.825971	floresta	árvore	ala simétrica	rotação oscilatória ou rolante
Fabaceae	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	-15.987929	-47.820734	savana	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Lythraceae	<i>Physocalymma scaberrimum</i> Pohl	-15.766226	-47.865213	área antrópica	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	-15.932295	-47.885218	savana	A / L	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis laevifolia</i> (A.Juss.) B.Gates	-15.933176	-47.885247	savana	liana	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	-15.942767	-47.879901	savana	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis</i> sp. C.B.Rob. ex Small	-15.932705	-47.885268	savana	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis</i> sp. C.B.Rob. ex Small	-15.965972	-47.921886	savana	A / L	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis</i> sp. C.B.Rob. ex Small	-15.586488	-47.843586	floresta	liana	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	-15.966133	-47.918191	savana	A / L	ala assimétrica	autorrotação estável

Malpighiaceae	<i>Bronwenia ferruginea</i> (Cav.) W.R.Anderson & C.C.Davis	-15.993837	-47.823396	floresta	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	-15.991762	-47.824052	floresta	liana	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	-15.987783	-47.820495	savana	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Heteropterys campestris</i> A.Juss.	-15.989114	-47.821517	savana	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	-15.988289	-47.821041	savana	arvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	-15.932273	-47.885179	savana	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malpighiaceae	<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	-15.942813	-47.87983	savana	arbusto	ala assimétrica	autorrotação estável
Malvaceae	<i>Cavanillesia umbellata</i> Ruiz & Pav.	-15.846862	-48.065243	área antrópica	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	-15.993621	-47.823693	floresta	árvore	paina	oscilação instável por pilosidade
Malvaceae	<i>Eriotheca pubescens</i> (Mart.) Schott & Endl.	-15.966401	-47.921691	savana	árvore	paina	oscilação instável por pilosidade
Meliaceae	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	*	*	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Orchidaceae	<i>Encyclia linearifolioides</i> (Kraenzl.) Hoehne	-15.857352	-48.006098	área antrópica	herbácea	escala reduzida e leveza	suspensão atmosférica
Poaceae	<i>Loudetiopsis chrysothrix</i> (Nees) Conert	-15.76625	-47.865373	área antrópica	herbácea	espiguetas aristadas	oscilação instável por pilosidade
Polygonaceae	<i>Triplaris gardneriana</i> Wedd.	-15.993946	-47.823775	floresta	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Sapindaceae	<i>Magonia pubescens</i> A.St.-Hil.	-15.585799	-47.84662	floresta	árvore	membrana simétrica curta	oscilação instável por membrana
Sapindaceae	<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	-15.990961	-47.824308	floresta	liana	ala assimétrica	autorrotação estável
Vochysiaceae	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	*	*	savana	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável
Vochysiaceae	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	-15.966439	-47.921800	savana	árvore	ala assimétrica	autorrotação estável

ANEXO B

Tabela B 1. *Vouchers* das 14 espécies de frutos alados assimétricos do bioma Cerrado analisadas neste estudo. As espécies foram coletadas em remanescentes de vegetação natural, preparadas utilizando técnicas padrão de herborização e depositadas na coleção do Herbário UB.

Espécie	Voucher
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	UB 257853
<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	UB 257856
<i>Banisteriopsis</i> sp. 1 C.B.Rob. ex Small	UB 257854
<i>Banisteriopsis</i> sp. 2 C.B.Rob. ex Small	UB 257866
<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	UB 257857
<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	UB 257858
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	UB 257863
<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	UB 257864
<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	UB 257865
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	UB 257860
<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	UB 257855
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	UB 257859
<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	UB 257862
<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	UB 257861

ANEXO C

Tabela C 1. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Banisteriopsis argyrophylla* (A.Juss.) B.Gates. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.09	0.08	3.37	1.50	0.04	2.96
2	0.09	0.08	3.41	1.47	0.04	2.88
3	0.09	0.08	3.12	1.31	0.04	2.51
4	0.10	0.08	3.59	1.57	0.04	3.22
5	0.10	0.09	3.01	1.45	0.04	2.68
6	0.08	0.07	3.27	1.31	0.04	2.68
7	0.12	0.10	3.68	1.65	0.05	3.40
8	0.10	0.09	3.29	1.51	0.04	2.69
9	0.09	0.09	3.41	1.49	0.04	3.12
10	0.10	0.09	3.62	1.65	0.04	3.52
11	0.09	0.08	3.49	1.43	0.04	3.06
12	0.12	0.11	3.91	1.68	0.04	3.63
13	0.11	0.09	3.48	1.50	0.05	3.20
14	0.11	0.10	3.24	1.60	0.02	3.05
15	0.09	0.08	3.18	1.31	0.03	2.45
16	0.10	0.09	3.15	1.46	0.02	2.88
17	0.12	0.10	3.82	1.70	0.02	3.76
18	0.10	0.08	3.51	1.66	0.02	3.39
19	0.13	0.12	3.73	1.73	0.02	3.70
20	0.13	0.11	3.98	1.79	0.02	4.22

Tabela C 2. Dados morfológicos brutos de diásporos de *Banisteriopsis megaphylla* (A.Juss.) B.Gates. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.07	0.06	2.02	1.47	0.06	1.89
2	0.04	0.03	2.11	1.16	0.03	1.47
3	0.03	0.02	2.13	1.22	0.03	1.50
4	0.04	0.03	2.22	1.30	0.05	1.68
5	0.04	0.03	2.05	1.21	0.05	1.50
6	0.04	0.04	1.71	1.37	0.03	1.43
7	0.04	0.03	2.11	1.22	0.04	1.74
8	0.05	0.04	2.21	1.31	0.04	1.87
9	0.04	0.03	2.32	1.44	0.04	1.87
10	0.04	0.04	2.31	1.26	0.04	1.91
11	0.04	0.03	2.15	1.17	0.04	1.74
12	0.03	0.03	2.17	1.22	0.04	1.62
13	0.04	0.03	2.17	1.20	0.03	1.68
14	0.04	0.03	2.24	1.26	0.04	1.94
15	0.05	0.04	1.95	1.40	0.02	1.72
16	0.04	0.03	2.03	1.36	0.02	1.75
17	0.05	0.04	2.31	1.34	0.04	2.17
18	0.06	0.05	2.12	1.29	0.02	1.61
19	0.04	0.03	2.24	1.26	0.04	1.90
20	0.03	0.02	2.07	1.24	0.03	1.35

Tabela C 3. Dados morfológicos brutos de diásporos de *Banisteriopsis* sp. 1 C.B.Rob. ex Small. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.06	0.05	2.53	0.94	0.05	1.39
2	0.06	0.05	2.50	0.99	0.05	1.46
3	0.06	0.05	2.47	1.01	0.05	1.47
4	0.06	0.05	2.92	1.07	0.05	1.91
5	0.07	0.06	2.73	1.04	0.05	1.77
6	0.07	0.06	2.58	1.06	0.05	1.52
7	0.05	0.04	2.24	0.94	0.04	1.31
8	0.05	0.04	2.31	0.87	0.05	1.32
9	0.06	0.06	2.25	0.93	0.05	1.38
10	0.07	0.07	2.83	1.11	0.04	2.11
11	0.07	0.06	2.87	0.99	0.04	1.85
12	0.07	0.06	2.99	1.00	0.05	1.90
13	0.05	0.05	2.34	0.90	0.05	1.37
14	0.07	0.06	2.44	0.88	0.04	1.40
15	0.08	0.07	2.41	1.00	0.04	1.49
16	0.09	0.08	3.12	1.03	0.04	2.14
17	0.08	0.07	2.89	1.04	0.04	1.96
18	0.07	0.07	3.06	1.04	0.05	2.04
19	0.08	0.07	3.04	1.06	0.05	2.20
20	0.08	0.07	3.08	1.00	0.04	2.02

Tabela C 4. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Banisteriopsis* sp. 2 C.B.Rob. ex Small. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.04	0.04	2.29	0.89	0.02	1.34
2	0.05	0.04	2.17	0.94	0.02	1.23
3	0.04	0.04	2.33	0.91	0.03	1.34
4	0.03	0.03	1.94	0.84	0.02	1.12
5	0.05	0.04	2.38	0.95	0.03	1.42
6	0.05	0.05	2.50	1.06	0.03	1.55
7	0.05	0.05	2.14	0.95	0.03	1.25
8	0.07	0.06	2.45	0.94	0.03	1.56
9	0.04	0.04	2.15	0.97	0.02	1.30
10	0.04	0.04	2.23	0.92	0.02	1.17
11	0.05	0.04	2.27	0.97	0.02	1.32
12	0.06	0.05	2.52	1.05	0.03	1.56
13	0.04	0.03	2.43	0.99	0.02	1.30
14	0.05	0.04	2.36	0.97	0.02	1.35
15	0.05	0.04	2.13	0.95	0.02	1.32
16	0.05	0.04	2.39	0.94	0.03	1.34
17	0.05	0.05	2.33	0.95	0.03	1.34
18	0.05	0.04	2.37	0.86	0.02	1.30
19	0.05	0.04	2.31	0.89	0.02	1.36
20	0.06	0.06	2.42	1.09	0.02	1.63

Tabela C 5. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Banisteriopsis variabilis* B.Gates. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.04	0.04	2.43	1.28	0.03	1.90
2	0.05	0.04	2.54	1.22	0.04	2.19
3	0.07	0.06	2.44	1.27	0.04	2.06
4	0.06	0.05	2.32	1.06	0.03	1.81
5	0.04	0.04	2.37	1.24	0.04	1.98
6	0.05	0.04	2.31	1.13	0.03	1.76
7	0.06	0.05	2.36	1.11	0.03	1.78
8	0.06	0.05	2.32	1.16	0.04	1.84
9	0.06	0.05	2.38	1.25	0.03	1.84
10	0.07	0.06	2.54	1.28	0.04	2.36
11	0.06	0.05	2.49	1.20	0.04	2.22
12	0.07	0.06	2.51	1.27	0.03	2.00
13	0.05	0.04	2.47	1.15	0.03	1.87
14	0.06	0.05	2.51	1.22	0.03	1.95
15	0.06	0.06	2.19	1.11	0.04	1.53
16	0.06	0.05	2.53	1.30	0.03	2.12
17	0.06	0.05	2.64	1.43	0.04	2.46
18	0.05	0.05	2.52	1.29	0.03	2.26
19	0.06	0.06	2.37	1.26	0.03	1.95
20	0.06	0.05	2.45	1.32	0.03	2.25

Tabela C 6. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Diplopterys pubipetala* (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.05	0.03	4.10	1.94	0.04	4.63
2	0.04	0.03	3.98	1.81	0.04	4.39
3	0.05	0.03	4.12	1.77	0.04	4.73
4	0.05	0.03	4.09	1.75	0.04	4.80
5	0.05	0.03	4.03	1.75	0.04	4.36
6	0.05	0.03	4.05	1.81	0.04	4.53
7	0.04	0.03	3.99	1.68	0.04	4.48
8	0.05	0.03	4.20	1.91	0.04	4.93
9	0.05	0.03	3.94	1.81	0.04	4.45
10	0.04	0.03	4.04	1.81	0.04	4.26
11	0.05	0.03	4.17	1.94	0.04	4.85
12	0.05	0.03	4.10	1.88	0.04	4.76
13	0.05	0.03	4.18	1.90	0.04	4.45
14	0.05	0.03	4.28	1.74	0.04	5.09
15	0.07	0.05	4.67	2.01	0.04	5.59
16	0.05	0.03	3.96	1.78	0.04	4.37
17	0.06	0.04	4.17	1.86	0.04	4.72
18	0.05	0.03	4.07	1.73	0.04	4.82
19	0.05	0.03	4.26	1.84	0.04	4.80
20	0.04	0.03	3.85	1.65	0.04	4.49

Tabela C 7. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Heteropterys byrsonimifolia* A.Juss.. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.07	0.06	3.36	1.39	0.04	3.05
2	0.08	0.07	3.40	1.31	0.04	3.10
3	0.07	0.06	3.35	1.32	0.04	3.09
4	0.08	0.07	3.39	1.36	0.04	3.17
5	0.08	0.07	3.59	1.47	0.04	3.58
6	0.06	0.05	3.41	1.38	0.04	3.17
7	0.08	0.06	3.47	1.46	0.04	3.27
8	0.06	0.05	3.36	1.39	0.04	3.05
9	0.08	0.07	3.58	1.49	0.04	3.50
10	0.08	0.07	3.41	1.39	0.04	3.21
11	0.06	0.05	3.32	1.45	0.04	3.21
12	0.07	0.05	3.52	1.38	0.04	3.23
13	0.08	0.07	3.46	1.48	0.04	3.34
14	0.07	0.06	3.39	1.36	0.04	3.22
15	0.07	0.06	3.38	1.27	0.04	3.03
16	0.08	0.07	3.48	1.44	0.04	3.40
17	0.06	0.05	3.39	1.40	0.04	3.07
18	0.06	0.05	3.43	1.43	0.04	3.34
19	0.07	0.06	3.39	1.41	0.04	3.32
20	0.08	0.07	3.22	1.36	0.04	3.15

Tabela C 8. Dados morfológicos brutos de diásporos de *Heteropterys eglandulosa* A.Juss.. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.08	0.07	2.51	0.91	0.04	1.74
2	0.08	0.07	2.36	0.91	0.04	1.61
3	0.08	0.07	2.47	0.91	0.04	1.62
4	0.09	0.08	2.50	0.95	0.05	1.80
5	0.08	0.07	2.57	0.87	0.04	1.75
6	0.08	0.07	2.45	0.92	0.04	1.64
7	0.07	0.06	2.52	0.95	0.04	1.77
8	0.09	0.08	2.44	0.95	0.04	1.81
9	0.08	0.07	2.53	0.93	0.05	1.86
10	0.07	0.06	2.45	0.94	0.04	1.74
11	0.08	0.07	2.37	0.95	0.04	1.72
12	0.09	0.08	2.61	0.98	0.04	1.99
13	0.07	0.06	2.46	0.91	0.04	1.77
14	0.08	0.07	2.53	0.95	0.04	1.72
15	0.07	0.07	2.49	0.89	0.04	1.81
16	0.06	0.05	2.40	0.88	0.04	1.55
17	0.08	0.08	2.22	0.94	0.05	1.56
18	0.08	0.08	2.44	0.91	0.05	1.70
19	0.08	0.07	2.40	0.91	0.04	1.76
20	0.07	0.06	2.49	0.89	0.04	1.69

Tabela C 9. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Heteropterys umbellata* A.Juss.. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.04	0.03	2.70	1.34	0.03	2.07
2	0.03	0.03	2.71	1.32	0.03	2.09
3	0.05	0.04	2.92	1.38	0.04	2.40
4	0.05	0.05	2.80	1.33	0.03	2.26
5	0.06	0.05	2.72	1.34	0.03	2.12
6	0.05	0.04	2.71	1.35	0.04	2.04
7	0.05	0.04	2.95	1.46	0.03	2.27
8	0.05	0.04	2.71	1.14	0.04	1.84
9	0.04	0.03	2.55	1.19	0.04	1.60
10	0.05	0.04	2.65	1.23	0.03	2.00
11	0.05	0.04	2.72	1.28	0.03	1.86
12	0.05	0.05	2.65	1.36	0.03	2.06
13	0.05	0.04	2.81	1.33	0.04	2.16
14	0.05	0.04	2.73	1.24	0.03	1.75
15	0.06	0.05	2.62	1.35	0.03	1.99
16	0.05	0.04	2.75	1.32	0.03	2.03
17	0.05	0.04	2.71	1.29	0.03	2.02
18	0.05	0.04	2.63	1.26	0.04	1.85
19	0.04	0.04	2.61	1.23	0.03	2.07
20	0.05	0.04	2.92	1.28	0.03	2.13

Tabela C 10. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Luetzelburgia auriculata* (Allemão) Ducke. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.59	0.50	7.49	2.54	0.05	13.38
2	0.52	0.44	6.87	2.40	0.06	11.93
3	0.93	0.80	7.86	2.88	0.04	16.21
4	0.56	0.45	7.53	2.72	0.05	13.81
5	0.74	0.63	8.01	2.84	0.04	15.69
6	0.68	0.59	7.21	2.60	0.05	13.10
7	0.58	0.49	7.18	2.60	0.05	14.08
8	0.86	0.74	7.81	2.82	0.05	16.47
9	0.78	0.68	8.11	2.76	0.05	16.11
10	0.74	0.62	7.71	2.59	0.06	14.97
11	0.70	0.59	7.32	2.57	0.06	13.64
12	0.55	0.46	6.54	2.37	0.05	11.76
13	0.60	0.51	7.18	2.57	0.05	12.73
14	0.63	0.54	7.29	2.60	0.05	14.10
15	0.78	0.66	8.34	2.74	0.06	17.33
16	0.65	0.57	7.05	2.30	0.06	12.45
17	0.56	0.49	6.96	2.43	0.05	12.77
18	0.73	0.63	6.35	2.40	0.06	12.75
19	0.76	0.66	7.49	2.48	0.06	14.61
20	0.67	0.57	6.92	2.49	0.05	13.33

Tabela C 11. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Peixotoa goiana* C.E.Anderson. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.08	0.06	3.14	1.79	0.06	3.49
2	0.07	0.05	2.92	1.62	0.06	3.46
3	0.08	0.06	3.21	1.66	0.07	3.29
4	0.07	0.05	2.94	1.69	0.06	3.25
5	0.08	0.06	3.01	1.74	0.08	3.25
6	0.08	0.06	3.12	1.75	0.06	3.19
7	0.06	0.05	2.92	1.62	0.06	2.72
8	0.06	0.05	2.71	1.62	0.05	2.81
9	0.07	0.05	2.95	1.75	0.05	3.26
10	0.07	0.06	2.90	1.56	0.06	3.12
11	0.08	0.07	2.74	1.62	0.03	2.77
12	0.09	0.07	2.91	1.83	0.07	3.66
13	0.07	0.06	3.02	1.74	0.05	3.19
14	0.08	0.06	3.27	1.83	0.05	3.52
15	0.06	0.04	2.73	1.52	0.05	2.62
16	0.07	0.05	2.84	1.26	0.05	2.47
17	0.07	0.05	2.81	1.31	0.03	2.60
18	0.08	0.06	3.12	1.94	0.04	3.35
19	0.05	0.04	2.43	1.48	0.05	2.37
20	0.08	0.06	2.61	1.58	0.05	2.95

Tabela C 12. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Pterogyne nitens* Tul. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.22	0.20	5.08	1.33	0.04	4.53
2	0.18	0.17	4.89	1.36	0.03	4.66
3	0.21	0.20	4.85	1.30	0.04	4.89
4	0.15	0.14	4.83	1.42	0.03	4.77
5	0.19	0.17	4.91	1.38	0.04	4.79
6	0.20	0.18	4.96	1.37	0.04	5.07
7	0.27	0.25	5.67	1.48	0.04	5.46
8	0.21	0.19	5.39	1.33	0.04	5.02
9	0.19	0.17	5.25	1.46	0.04	5.02
10	0.22	0.20	4.82	1.38	0.04	5.00
11	0.16	0.13	4.91	1.41	0.04	5.15
12	0.25	0.23	5.04	1.37	0.04	5.12
13	0.23	0.22	4.87	1.32	0.04	4.62
14	0.16	0.14	5.12	1.37	0.04	5.07
15	0.18	0.16	5.09	1.39	0.04	5.31
16	0.24	0.22	5.28	1.39	0.04	5.44
17	0.18	0.16	5.21	1.45	0.04	5.13
18	0.19	0.18	5.11	1.48	0.04	5.35
19	0.18	0.17	5.09	1.37	0.04	5.34
20	0.21	0.20	5.29	1.45	0.04	5.29

Tabela C 13. Dados morfométricos brutos de diásporos de *Serjania lethalis* A.St.-Hil.. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	0.06	0.05	2.83	1.15	0.05	2.01
2	0.06	0.05	2.90	1.32	0.05	2.37
3	0.06	0.05	2.90	1.22	0.04	2.27
4	0.07	0.06	2.92	1.29	0.05	2.45
5	0.07	0.06	2.99	1.22	0.05	2.36
6	0.06	0.05	3.06	1.33	0.04	2.60
7	0.07	0.06	2.98	1.36	0.05	2.50
8	0.06	0.05	2.81	1.20	0.05	2.21
9	0.05	0.04	2.84	1.17	0.05	2.04
10	0.07	0.06	2.83	1.24	0.05	2.23
11	0.05	0.04	2.75	1.11	0.04	2.03
12	0.06	0.05	2.78	1.19	0.04	2.21
13	0.06	0.05	2.85	1.19	0.04	2.09
14	0.06	0.05	2.99	1.13	0.04	2.28
15	0.06	0.05	2.93	1.20	0.05	2.29
16	0.07	0.06	2.90	1.22	0.05	2.18
17	0.07	0.06	2.93	1.24	0.05	2.28
18	0.06	0.05	2.81	1.19	0.05	2.29
19	0.06	0.05	2.74	1.18	0.05	2.15
20	0.06	0.05	2.94	1.21	0.04	2.21

Tabela C 14. Dados morfológicos brutos de diásporos de *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke. (n = 20). Massa do fruto: $m_{diaspore}$. Massa do núcleo seminífero: m_{seed} .

Espécime	$m_{diaspore}$ (g)	m_{seed} (g)	Vão (cm)	Corda (cm)	Espessura (cm)	Área (cm ²)
1	1.41	1.21	8.91	3.02	0.11	18.89
2	1.83	1.65	9.43	3.39	0.11	22.63
3	1.04	0.94	7.64	2.37	0.10	13.96
4	2.60	2.39	9.93	2.95	0.12	24.34
5	1.20	1.08	8.97	3.04	0.09	18.36
6	2.63	2.44	10.28	2.82	0.12	23.90
7	1.26	1.12	8.56	2.83	0.10	18.64
8	1.18	1.04	9.18	3.03	0.09	20.00
9	0.95	0.85	7.79	2.37	0.07	15.56
10	1.35	1.19	8.92	3.07	0.08	19.96
11	2.92	2.79	10.47	3.12	0.13	26.19
12	1.28	1.13	9.08	3.12	0.08	21.22
13	1.92	1.73	9.93	3.45	0.10	26.64
14	1.57	1.38	9.37	3.28	0.10	21.29
15	1.25	1.12	8.45	2.59	0.09	16.77
16	1.50	1.35	9.56	3.10	0.10	21.82
17	1.13	1.01	8.17	2.64	0.09	17.42
18	1.24	1.11	8.29	2.60	0.10	17.09
19	1.21	1.10	7.91	2.25	0.09	15.01
20	1.04	0.93	8.24	2.58	0.09	16.92

ANEXO D

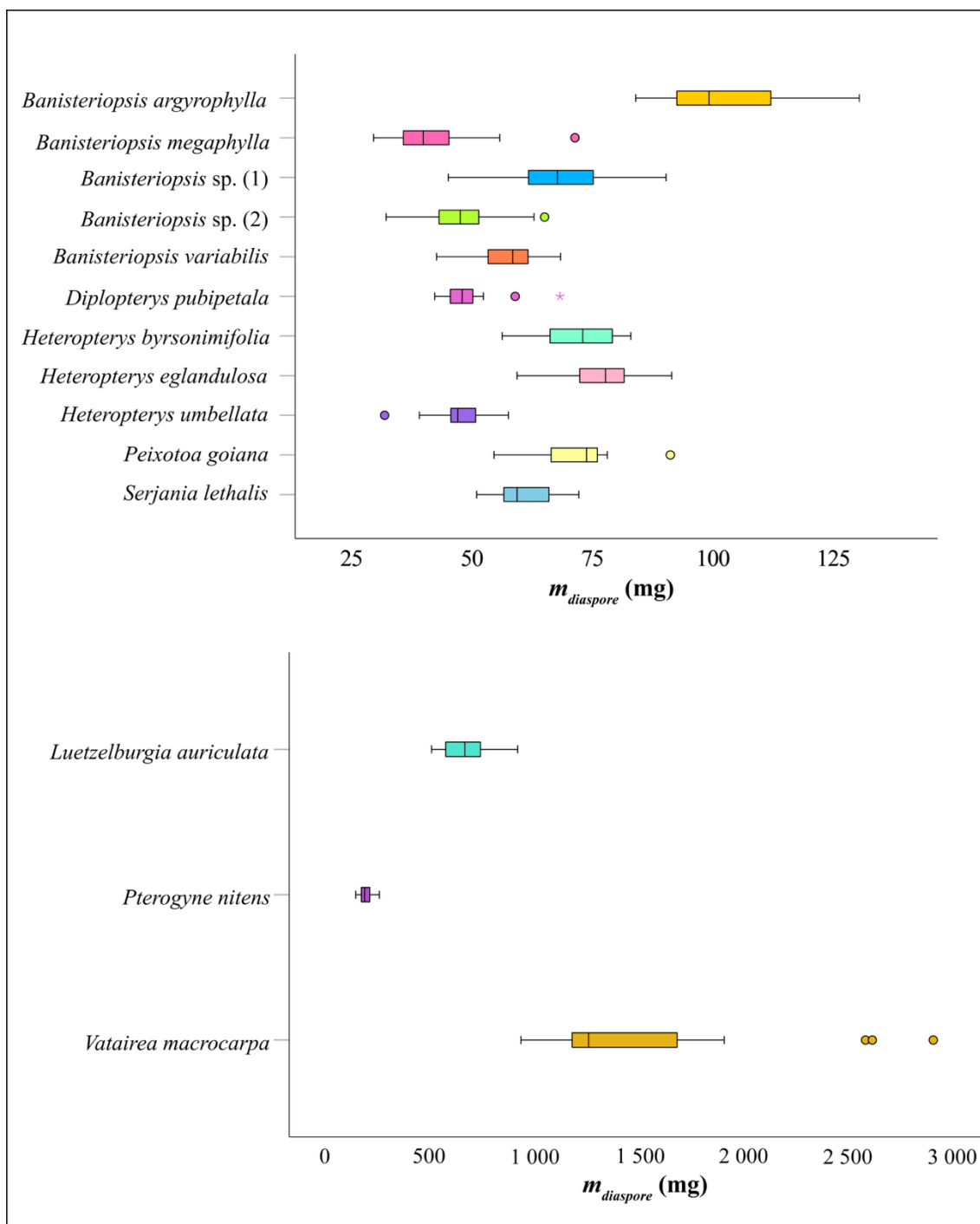


Figura D 1. Distribuição da massa do diásporo ($m_{diaspore}$) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala da $m_{diaspore}$ interespecífica. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os *whiskers* estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times$ IQR. Pontos individuais representam *outliers*.

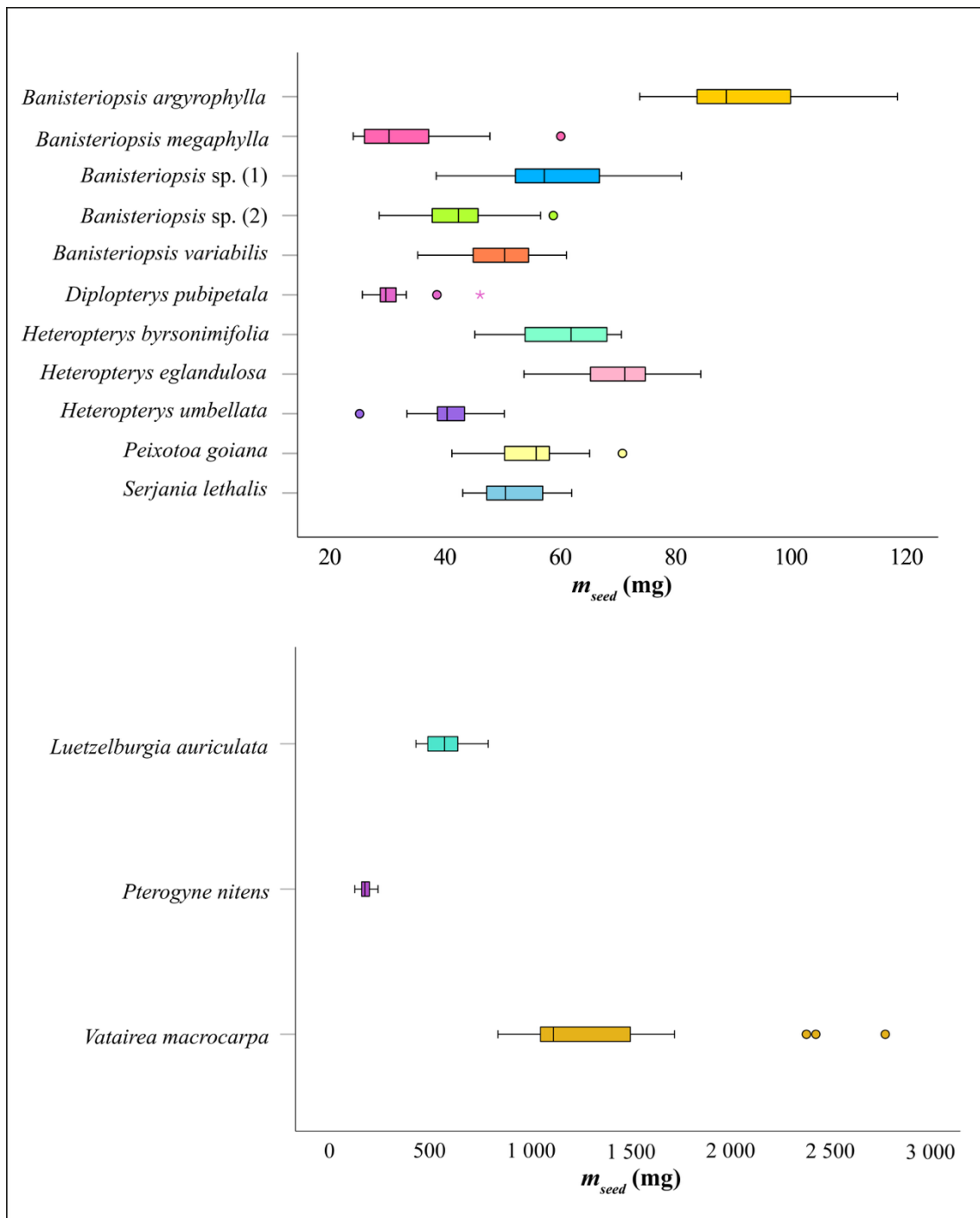


Figura D 2. Distribuição da massa do núcleo seminífero (m_{seed}) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala da m_{seed} interespecífica. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os whiskers estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times$ IQR. Pontos individuais representam outliers.

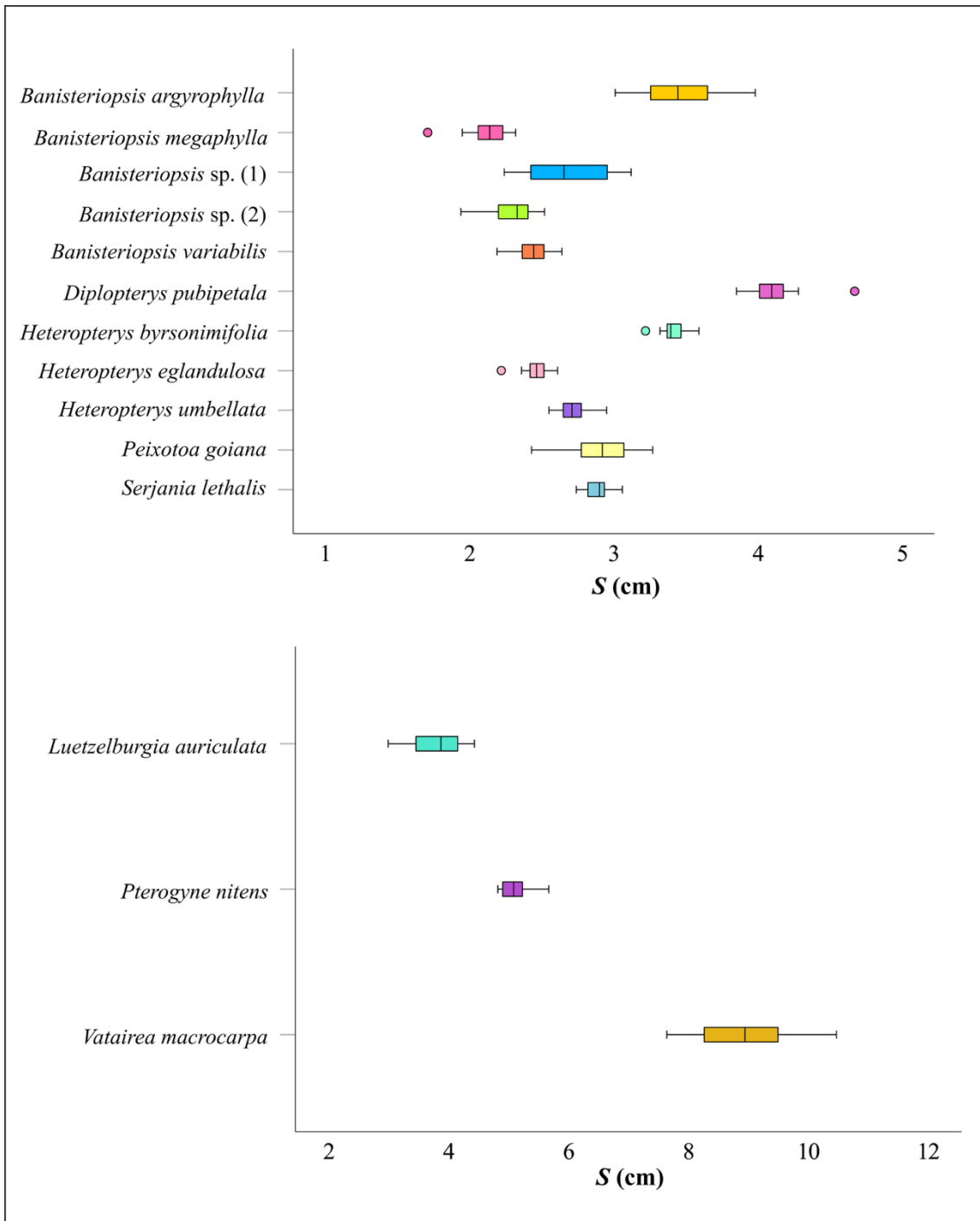


Figura D 3. Distribuição do vão do diásporo (S) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala do S interespecífico. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os *whiskers* estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times$ IQR. Pontos individuais representam *outliers*.

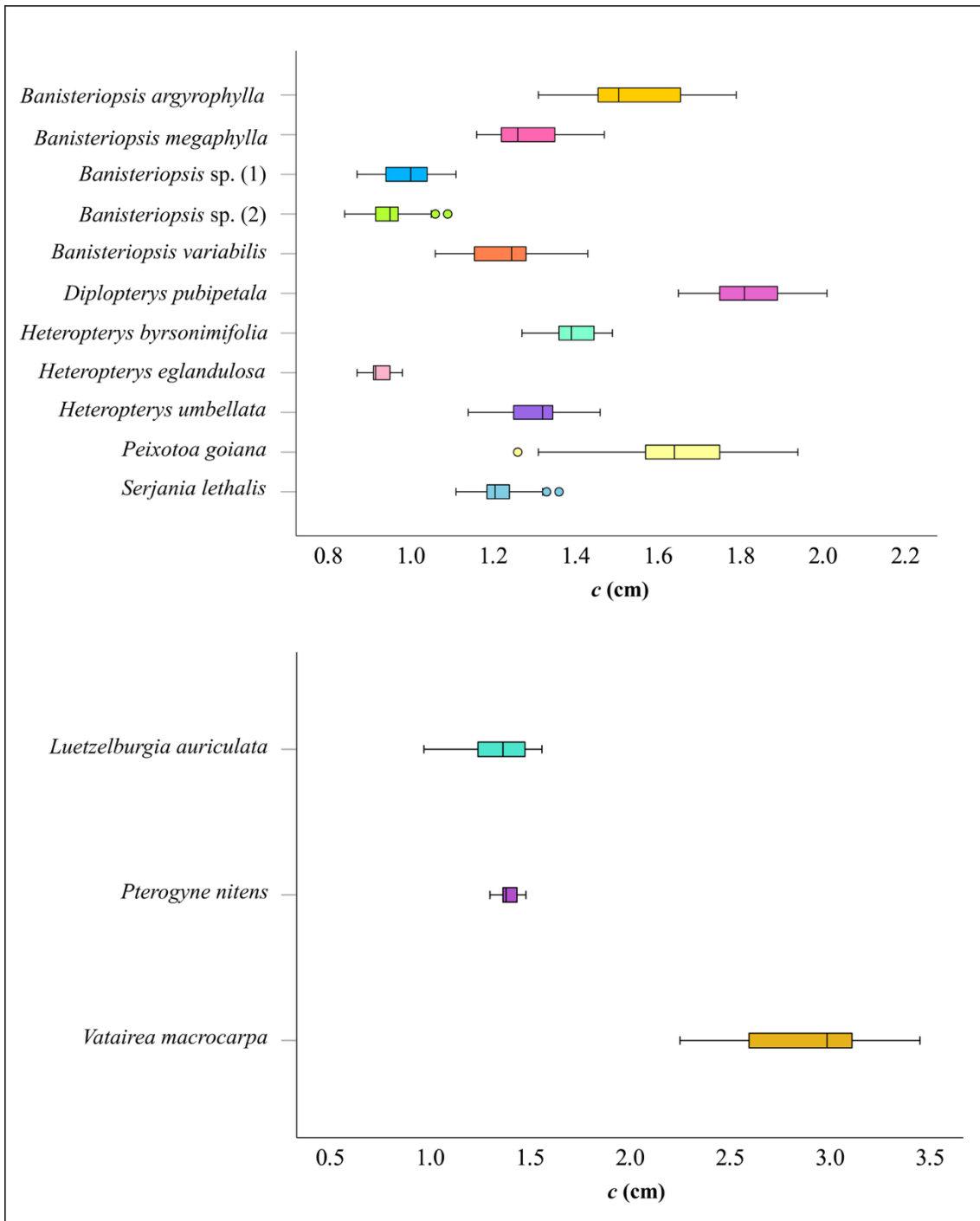


Figura D 4. Distribuição da corda do diásporo (c) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala da c interespecífica. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os *whiskers* estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times$ IQR. Pontos individuais representam *outliers*.

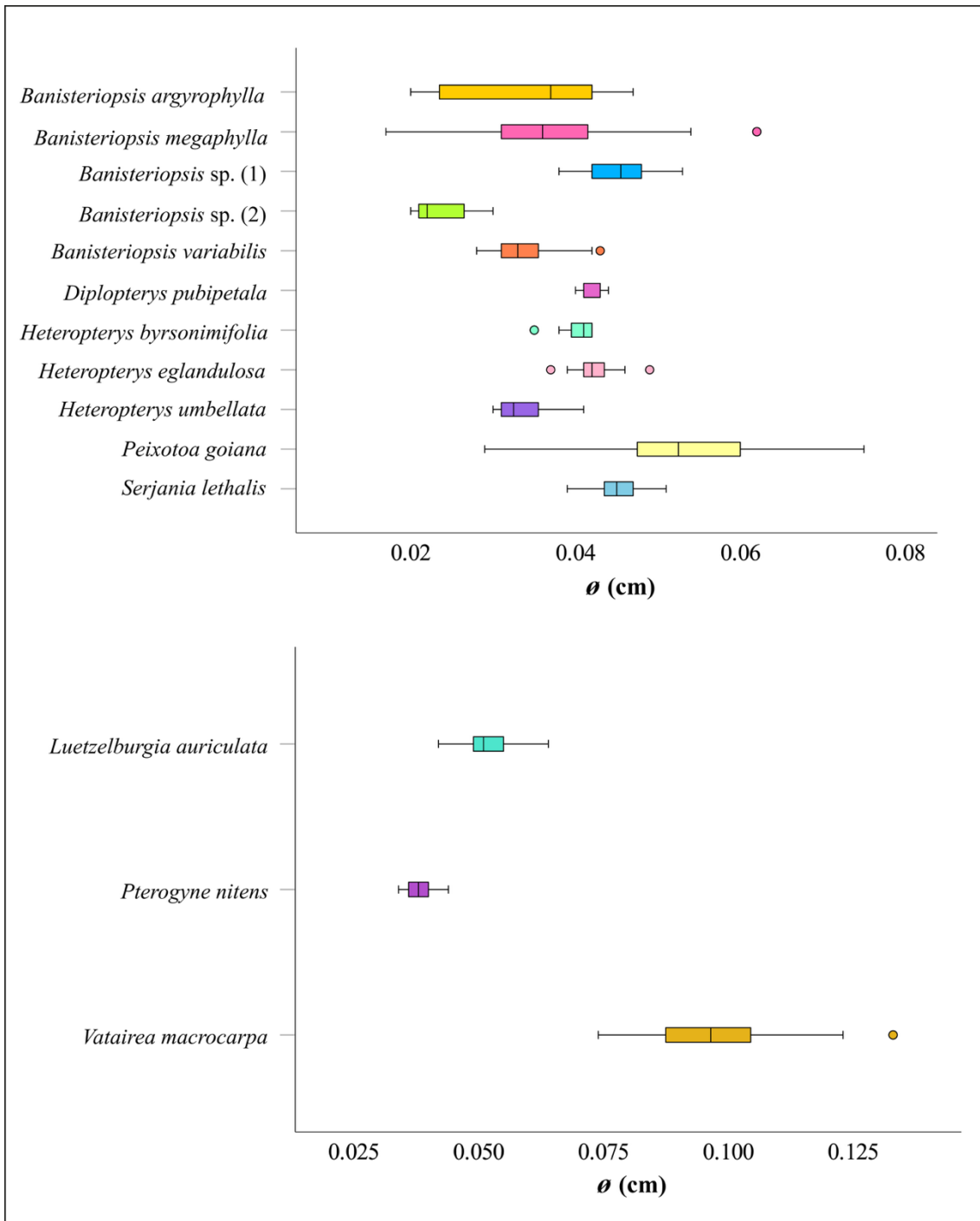


Figura D 5. Distribuição da espessura do diásporo (\varnothing) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala da \varnothing interespecífica. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os *whiskers* estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times$ IQR. Pontos individuais representam *outliers*.

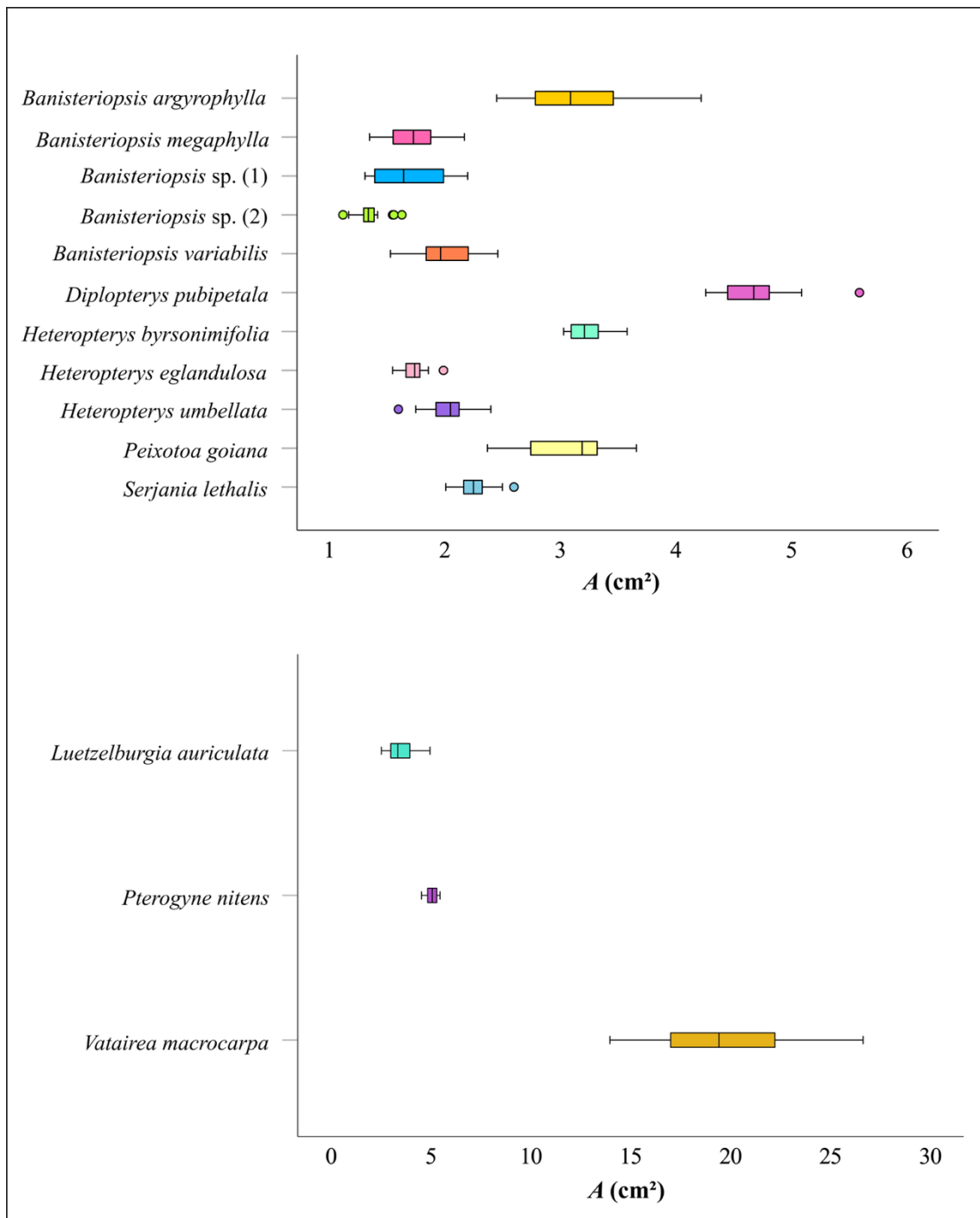


Figura D 6. Distribuição da área do diásporo (A) entre as 14 espécies com frutos alados assimétricos. O gráfico está dividido em dois painéis devido a diferença de escala da A interespecífica. Em ambos os painéis, a caixa central representa o intervalo interquartil (IQR), contendo 50% dos dados; a linha interna marca a mediana. Os *whiskers* estendem-se até os limites superior e inferior dentro do intervalo de $1,5 \times \text{IQR}$. Pontos individuais representam *outliers*.

ANEXO E

Tabela E 1. Caracteres morfológicos relacionados ao fruto das 14 espécies com frutos alados assimétricos. A designação bi-alar ou tri-alar está relacionada ao tipo carpológico esquizocarpo e refere-se à ocorrência de duas ou três alas, respectivamente. Nas sâmaras, a configuração em distintos números de alas não se aplica (n/a).

Espécie	Tipo carpológico	Deiscência	Configuração	Frutos Parciais
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Banisteriopsis</i> sp. (1) C.B.Rob. ex Small	esquizocarpo	indeiscente	bi-alar	samarídeo
<i>Banisteriopsis</i> sp. (2) C.B.Rob. ex Small	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	esquizocarpo	indeiscente	bi-alar	samarídeo
<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	esquizocarpo	indeiscente	bi-alar	samarídeo
<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	sâmara	indeiscente	n/a	n/a
<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	sâmara	indeiscente	n/a	n/a
<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	esquizocarpo	indeiscente	tri-alar	samarídeo
<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	sâmara	indeiscente	n/a	n/a

Tabela E 2. Caracteres morfológicos relacionados ao núcleo seminífero dos diásporos das 14 espécies com frutos alados assimétricos.

Espécie	Forma	Indumento
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	reniforme	tomento seríceo e projeções muricadas
<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	reniforme	tomento seríceo e projeções muricadas
<i>Banisteriopsis</i> sp. (1) C.B.Rob. ex Small	reniforme	tomento seríceo e projeções muricadas
<i>Banisteriopsis</i> sp. (2) C.B.Rob. ex Small	reniforme	tomento seríceo e projeções muricadas
<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	reniforme	tomento seríceo e projeções muricadas
<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	reniforme	tomento seríceo e alélulas conspicuas
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	oblongo	tomento seríceo
<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	oblongo a orbicular	tomento seríceo
<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	trapezoidal	tomento seríceo
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	oblongo	tomento seríceo e alélulas conspicuas
<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	oblongo	tomento seríceo e alélulas conspicuas
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	oblongo achatado	nervuras reticuladas e tricomas esparsos
<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	orbicular	tomento seríceo
<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	oblongo	nervuras e tomento seríceo

Tabela E 3. Caracteres morfológicos relacionados a ala dos diásporos das 14 espécies com frutos alados assimétricos. Afilamento: P, padrão de afilamento proximal; D, padrão de afilamento distal. Ápice: Ob., obtuso; A, arredondado; Ac., acuminado; F, extensão falcada. Nervação: curvi., padrão curvilíneo justaposto; ret., padrão reticulado. Bordo de ataque: $\nabla\emptyset$, gradiente de espessura no bordo de ataque, com redução da espessura no sentido proximal-distal; const., espessura constante do bordo de ataque no sentido proximal-distal. Bordo de fuga: On., ondulado; S, serreado.

Espécie	Forma	Afilamento	Ápice	Textura	Indumento	Nervação	Bordo de ataque	Bordo de fuga
<i>Banisteriopsis argyrophylla</i> (A.Juss.) B.Gates	crístiforme	P e D	Ob.	papirácea	tomento seríceo	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.
<i>Banisteriopsis megaphylla</i> (A.Juss.) B.Gates	crístiforme	P e D	A	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Banisteriopsis</i> sp. (1) C.B.Rob. ex Small	cultriforme	P e D	Ob.	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.
<i>Banisteriopsis</i> sp. (2) C.B.Rob. ex Small	cultriforme	P e D	Ob.	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.
<i>Banisteriopsis variabilis</i> B.Gates	crístiforme	P e D	Ob.	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Diplopterys pubipetala</i> (A.Juss) W.R.Anderson & C.C.Davis	crístiforme	P e D	Ob.	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Heteropterys byrsonimifolia</i> A.Juss.	cultriforme	P e D	Ob. / A	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Heteropterys eglandulosa</i> A.Juss.	cultriforme	P e D	Ob. / A	papirácea	tricomas esparsos	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Heteropterys umbellata</i> A.Juss.	crístiforme	P e D	Ob.	papirácea	tomento seríceo	curvi.	$\nabla\emptyset$	On. / S
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemão) Ducke	cultriforme	P e D	Ob.+ F	papirácea	tomento seríceo	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.
<i>Peixotoa goiana</i> C.E.Anderson	crístiforme	P e D	Ob. / A	papirácea	tomento seríceo	curvi.	$\nabla\emptyset$	S
<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	cultriforme	D	Ac.+ F	papirácea	tricomas escassos, glabra	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.
<i>Serjania lethalis</i> A.St.-Hil.	crístiforme	P e D	A	papirácea	tricomas esparsos	curvi. / ret.	const.	plano
<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	cultriforme	D	Ob.+ F	papirácea	tomento seríceo	curvi.	$\nabla\emptyset$	On.