



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS E FLORESTAIS
CURSO DE AGRONOMIA

FRANCISCO DE ASSIS JUNIOR

**VARIAÇÃO MORFOMÉTRICA E ASSIMETRIA FLUTUANTE EM ABELHAS
AFRICANIZADAS EM PERÍODO SECO E CHUVOSO EM REGIÃO SEMIÁRIDA**

MOSSORÓ

2025

FRANCISCO DE ASSIS JUNIOR

**VARIAÇÃO MORFOMÉTRICA E ASSIMETRIA FLUTUANTE EM ABELHAS
AFRICANIZADAS EM PERÍODO SECO E CHUVOSO EM REGIÃO SEMIÁRIDA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Profa. Dra. Kátia Peres Gramacho

Co-orientador: Msc. Leandro Alves da Silva

MOSSORÓ

2025

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

A95v Assis Junior, Francisco de.
 Variação morfométrica e assimetria flutuante em
 abelhas africanizadas em período seco e chuvoso em
 região semiárida / Francisco de Assis Junior. -
 2025.
 42 f. : il.

 Orientadora: Kátia Peres Gramacho.
 Coorientador: Leandro Alves da Silva.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Agronomia, 2025.

 1. Apis mellifera. 2. Morfometria geométrica.
 3. Estressores ambientais. I. Peres Gramacho,
 Kátia, orient. II. Alves da Silva, Leandro, co-
 orient. III. Título.

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

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

FRANCISCO DE ASSIS JUNIOR

**VARIAÇÃO MORFOMÉTRICA E ASSIMETRIA FLUTUANTE EM ABELHAS
AFRICANIZADAS EM PERÍODO SECO E CHUVOSO EM REGIÃO SEMIÁRIDA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Defendida em: 15 / 12/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **KATIA PERES GRAMACHO**
Data: 23/12/2025 11:19:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Katia Peres Gramacho (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **LORENA ANDRADE NUNES**
Data: 15/12/2025 16:55:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lorena Andrade Nunes (UNEX)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **EDGAR RODRIGUES DE ARAÚJO NETO**
Data: 23/12/2025 10:04:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Edgar Rodrigues de Araújo Neto (Pesquisador)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Deus, te agradeço por estar comigo, por segurar a minha mão em toda a caminhada da minha vida. Te agradeço, senhor, pelos sonhos já realizados. Obrigado por fazer a tua vontade em minha vida, pela sua amizade e pela sua graça. Mais um dia, sem desistir. Te amo, Deus.

Obrigado, a toda a minha família, que me apoiou e me deu os recursos necessários para que eu pudesse chegar até aqui e, concluir esse curso de graduação. A faculdade foi um sonho possível pela minha perseverança e o apoio da minha família. Pai – Francisco de Assis Feitosa de Castro – mãe – Celineide Queiroz de Souza Feitoza, eu amo vocês e sou eternamente grato por todo o esforço de vocês para me formar. Em especial, meu tio Ivonézio Queiroz, que sempre incentivou todos os seus sobrinhos a estudar e fazerem um curso de graduação. Tio, o senhor me incentivou e apoiou, obrigado.

“Estude, estude”, essa frase é sua, vizinha. Agradeço a minha vó – Itaécia Queiroz de Souza – (*In memoriam*), que assim como meu tio, sempre incentivou seus filhos e netos a estudar, pois ela sabia que só através do estudo poderíamos ser alguém na vida. Obrigado vó, por ter me incentivado e apoiado a estudar.

Aos amigos, muito obrigado. Diante de todas as situações que a graduação nos impõe, longe de casa e com desafios que vão além das obrigações acadêmicas, é nos amigos que nos seguramos. Em especial, Ítalo Mateus, Luiz Henrique, Pedro Gurgel e Raí Aires, vocês são família pra mim.

Por falar em família, Leandro Alves da Silva, você tem um agradecimento especial nesse trabalho de conclusão de curso. Eu desejo que Deus de abençoe grandemente, que Ele possa derramar toda a sua graça sobre ti. Obrigado Leandro, pela sua amizade, pelo seu cuidado, por se importar comigo. Você é meu irmão.

Por fim, existem outros irmãos que o grupo de pesquisa me deu, e eu gostaria de agradecê-los. Edgar Rodrigues de Araújo Neto, Lucas da Silva Moraes, Nailton Oliveira de Sousa Chagas e Tuanny Daniele de Araújo Gomes, levo vocês pra vida, obrigado por cada momento vivido, pelo apoio e pelo cuidado.

A minha orientadora, profa. Dra. Kátia Peres Gramacho, muito obrigado por ter enxergado potencial e apostado em mim. Te agradeço por ser solidária comigo, e por torcer e querer que eu cresça e obtenha sucesso.

Agradeço a colaboração e dedicação da profa. Dra. Lorena Andrade Nunes, para que esse trabalho pudesse ser possível. Agradeço também a colaboração do prof. Dr. Airton Torres Carvalho.

Agradeço ao grupo de pesquisa NECTAS, por toda a ajuda e parceria no desenvolvimento dessa pesquisa científica. A cada membro, de 2019 até 2025, meu muito obrigado.

“Seu nível de sucesso raramente excederá seu nível de desenvolvimento pessoal, pois o sucesso é algo que você atrai pela pessoa que você se torna.”

Jim Rohn

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição de 19 marcos anatomicos nas intersecções das nervuras da asa anterior direita de operária africanizada.	24
Figura 2. A: Gráfico de dispersão da forma da asa de abelhas africanizadas, a partir da técnica de morfometria geométrica, coletadas em 3 períodos diferentes. Coleta 1 - Março, coleta 2 - Julho e coleta 3 - Dezembro. B e C: Outline no eixo positivo (contorno azul) e negativo (contorno vermelho).	26
Figura 3. Tamanho do centroide de asas de abelhas africanizadas (<i>Apis mellifera</i>) coletadas em três períodos diferentes (Coleta 1 em março, coleta 2 em julho e coleta 3 em dezembro de 2024).	27
Figura 4. Análise de Partial Least Squares (PLS) em asas de abelhas operárias africanizadas. A: análise de PLS comparando variação morfométrica com variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura interna da colmeia, umidade relativa e umidade interna da colmeia). B e C: grades de deformação da PLS 1.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise de variância da forma de asa de abelhas africanizadas (<i>Apis mellifera</i>) coletadas em 3 períodos (março, julho e dezembro referentes as coletas 1, 2 e 3, respectivamente).....	28
Tabela 2. Análise de variância do tamanho do centróide da asa (intra-período) de abelhas africanizadas coletadas em março, julho e dezembro.....	28

RESUMO

As abelhas *Apis mellifera* desempenham um papel fundamental na polinização de diversas culturas agrícolas e espécies nativas, sendo consideradas organismos-chave para a manutenção da biodiversidade e para a segurança alimentar. Essas abelhas se destacam pela ampla adaptação a diferentes condições ambientais, incluindo regiões de clima adverso, como o semiárido. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do ambiente na morfometria das asas de abelhas africanizadas no semiárido brasileiro, comparando espécimes coletadas nos períodos seco e chuvoso. Foram selecionadas 10 colônias, e em cada foram coletadas 10 operárias em 3 períodos diferentes (março, julho e dezembro). Asas anteriores direita e esquerda foram fixadas em lâminas e fotografadas. A partir das imagens, foi criado arquivo TPS e marcados 19 landmarks. A Análise das Variáveis Canônicas (AVC) demonstrou que a variação total na forma da asa das abelhas pode ser inteiramente explicada pelos dois primeiros eixos, sendo a primeira variável canônica responsável por 70% da variação, e a segunda, por 30%. Há uma maior variação entre os indivíduos coletados em dezembro, daqueles coletados em março e julho, não obstante, existe diferença significativa entre os indivíduos coletados nos meses de março e julho. A validação cruzada mostrou que a diferenciação entre coleta 1 e coleta 2 é de 59%, enquanto que, a diferenciação entre coleta 1 e coleta 3 é de 74,7% e, a diferenciação entre coleta 2 e coleta 3 é de 72,4%. Foi observado AF entre os indivíduos analisados dentro do mesmo período (coletas) e em todos os períodos, tanto para forma quanto para tamanho do centroide. Entretanto, não foi observado diferença significativa entre o nível de AF e as populações, indicando o mesmo nível de estresse entre períodos. A PLS mostrou que a umidade relativa do ar foi o fator ambiental responsável por 94.9% ($P < 0.01$) da interferência na forma das asas, tendo efeito mais significativo nas abelhas da coleta 1. Com o presente estudo foi possível concluir que a população de abelhas estudada durante os diferentes períodos, mudaram a forma e tamanho da asa por influência das condições ambientais. Foi visto também, que, ocorreu estresse em todos os períodos.

Palavras-chave: *Apis mellifera*, Morfometria geométrica, Estressores ambientais.

ABSTRACT

Honeybees (*Apis mellifera*) play a fundamental role in the pollination of various agricultural crops and native species, being considered key organisms for maintaining biodiversity and food security. These bees stand out for their wide adaptation to different environmental conditions, including regions with adverse climates, such as the semi-arid region. This study aimed to evaluate the effect of the environment on the morphometry of Africanized bee wings in the Brazilian semi-arid region, comparing specimens collected during the dry and rainy seasons. Ten colonies were selected, and ten worker bees were collected from each colony during three different periods (March, July, and December). Right and left forewings were fixed on slides and photographed. From the images, a TPS file was created and 19 landmarks were marked. The Canonical Variable Analysis (CVA) demonstrated that the total variation in the shape of the bee wings can be entirely explained by the first two axes, with the first canonical variable accounting for 70% of the variation and the second for 30%. There is greater variation among individuals collected in December compared to those collected in March and July; however, there is a significant difference between individuals collected in March and July. Cross-validation showed that the difference between collection 1 and collection 2 is 59%, while the difference between collection 1 and collection 3 is 74.7%, and the difference between collection 2 and collection 3 is 72.4%. Wing shape (WS) was observed among the individuals analyzed within the same period (collections) and in all periods, both for shape and centroid size. However, no significant difference was observed between the level of WS and the populations, indicating the same level of stress between periods. PLS showed that relative air humidity was the environmental factor responsible for 94.9% ($P < 0.01$) of the interference in wing shape, having a more significant effect on bees from collection 1. This study concluded that the bee population studied during the different periods changed the shape and size of their wings due to the influence of environmental conditions. It was also observed that stress occurred during all periods.

Keywords: *Apis mellifera*, Geometric morphometrics, Environmental stressors.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 HIPÓTESE.....	15
3 OBJETIVOS	16
3.1 Objetivo geral.....	16
3.2 Objetivos específicos	16
4 REFERENCIAL TEÓRICO	17
4.1 Biologia do desenvolvimento das asas de <i>Apis mellifera</i>	17
4.2 O Semiárido e estressores das abelhas.....	18
4.3 Morfometria geométrica	19
4.4 Assimetria flutuante	21
4.5 Plasticidade fenotípica.....	22
5 MATERIAL E MÉTODOS	24
6 RESULTADOS	26
7 DISCUSSÃO	30
8 CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

As abelhas do gênero *Apis* desempenham um papel fundamental na polinização de diversas culturas agrícolas e espécies nativas, sendo consideradas organismos-chave para a manutenção da biodiversidade e para a segurança alimentar (BARBOSA *et al.*, 2017). De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura cerca de 87,5% das plantas com flores dependem de polinizadores animais, incluindo abelhas, para a sua reprodução e produção de frutos, sementes e proteínas (FAO, 2021). Além disso, o valor econômico dos serviços prestados por polinizadores, especialmente pelas abelhas *Apis mellifera*, é estimado em centenas de bilhões de dólares anuais (World Bee Project, 2023).

No Brasil, as abelhas africanizadas, resultantes do cruzamento entre subespécies africanas e europeias, destacam-se pela ampla adaptação a diferentes condições ambientais, incluindo regiões de clima adverso, como o semiárido. O semiárido brasileiro é caracterizado por elevada variabilidade climática, com períodos prolongados de estiagem intercalados por chuvas concentradas em curtos intervalos (Nascimento e Medeiros, 2022). Além disso, o índice de insolação é grande e a temperatura varia de 23°C a 27°C (Teixeira, 2016). Nesse ambiente, geralmente o período chuvoso ocorre entre os meses de março e junho e o período seco de julho a fevereiro, porém, o ano de 2024 foi atípico, tendo o início das chuvas em janeiro e estas se estenderam até primeira quinzena de julho. Em março de 2024, as colônias africanizadas já estavam praticamente recuperadas do período de estiagem de 2023, marcado por longo estresse térmico, nutricional e consequentemente sanitário (Silva *et al.*, 2024; Santos *et al.* 2023; Ferreira *et al.*, 2019; Domingos *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2018; Castilhos *et al.*, 2016).

A robustez e resiliência da *Apis mellifera* indicam uma vantagem adaptativa relevante diante de estresses bióticos e abióticos (Gebremedhn *et al.*, 2025). Diante da capacidade adaptativa e ocupação de diversos ambientes por essas abelhas, se fez necessário estudar essas populações e suas características morfológicas. Nesse contexto, a morfometria geométrica tem se destacado como uma ferramenta precisa para o estudo das diferenças entre populações de abelhas (Francoy, Franco e Roubik, 2012). A morfometria geométrica (MG) utiliza pontos de referência, também chamados de pontos homólogos, para descrever formas. A análise se dá através das coordenadas cartesianas dos pontos homólogos, localizados nas interseções das nervuras das asas. Assim, a MG é uma ferramenta moderna que analisa com precisão a forma de estruturas biológicas (Masaquiza *et al.*, 2023).

As flutuações ambientais podem afetar o desenvolvimento e a fisiologia de organismos vivos, incluindo insetos. Entre os parâmetros utilizados para avaliar os efeitos ambientais sobre

populações biológicas, utilizando os dados de MG, pode-se buscar quantificar a assimetria flutuante (AF) (Drager, 2022; Freire, 2016; Paniago, 2016; Nunes *et al.*, 2012). A AF refere-se a diferenças sutis entre estruturas bilaterais que deveriam ser simetricamente idênticas, como as asas em insetos. Esse fenômeno é interpretado como um indicador de estresse ambiental, pois reflete a incapacidade do organismo em manter um desenvolvimento perfeitamente estável diante de condições adversas (Carneiro *et al.*, 2019).

Assim, estudos de morfometria e assimetria das asas em abelhas podem fornecer informações relevantes sobre a qualidade ambiental e a resiliência desses polinizadores em diferentes ecossistemas (Manochio, 2023). Diante desse cenário, é importante entender como a sazonalidade do semiárido, períodos seco e chuvoso, exerce influência sobre a forma e tamanho das asas de abelhas africanizadas.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do período seco e chuvoso na morfometria das asas e na assimetria flutuante de abelhas africanizadas no semiárido brasileiro, com o propósito de identificar possíveis alterações morfométricas associadas às condições ambientais adversas.

2 HIPÓTESE

A hipótese desse trabalho é que o desenvolvimento ontogenético das abelhas africanizadas é diretamente influenciado pelo ambiente semiárido, tanto no período seco quanto chuvoso, a ponto de causar assimetria bilateral.

3 OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar o efeito do período seco e chuvoso na morfometria das asas e na assimetria flutuante de abelhas africanizadas no semiárido brasileiro.

Objetivos específicos

- i. Estudar morfometricamente a população de abelhas africanizadas em período seco e chuvoso.
- ii. Mensurar a assimetria flutuante em abelhas africanizadas em diferentes em período seco e chuvoso.
- iii. Investigar o efeito de variáveis climáticas sob o estresse causado nas colônias nos períodos seco e chuvoso.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Biologia do desenvolvimento das asas de *Apis mellifera*

A ontogenia pode ser definida como o estudo do desenvolvimento de um organismo desde a fertilização do ovo até sua forma adulta, abrangendo todas as etapas morfológicas, fisiológicas e comportamentais. Nas abelhas (Hymenoptera: Apidae), a ontogenia é um processo notavelmente complexo e fascinante, intimamente ligado à sua organização social (Wogles e Kurze, 2025; Rahimi e Jung, 2024). O desenvolvimento pós-embrionário, que inclui os estágios de larva, pré-pupa e pupa (metamorfose completa ou holometabolia), é crucial para a determinação das castas. Fatores ambientais, especialmente a dieta larval e a presença de feromônios, modulam a expressão gênica e a diferenciação, determinando se um indivíduo se tornará uma operária estéril (com desenvolvimento ovariano suprimido) ou uma rainha fértil (com rápida maturação reprodutiva e longevidade) (Wojciechowski *et al.*, 2025).

O desenvolvimento das asas em *Apis mellifera*, como em outros insetos holometábolos, é um processo intrinsecamente ligado à metamorfose, iniciando-se a partir de estruturas embrionárias conhecidas como discos imaginais alares. Durante o estágio larval, esses discos permanecem indiferenciados, mas ativos, constituindo reservas de células que proliferam e se dobram. É no estágio de pupa que ocorre a rápida e complexa morfogênese: o tecido do disco alar se expande, formando um saco duplo (epiderme dorsal e ventral) que é esticado e fundido (Collins *et al.*, 2020). O espaço entre as duas camadas epidermais é preenchido pela hemolinfa e posteriormente define a intrincada rede de nervuras alares. A geometria final dessas nervuras não é apenas uma característica morfológica, mas também uma ferramenta fundamental na taxonomia e na morfoanálise das populações de abelhas (morfometria geométrica), refletindo a adaptação e a linhagem genética (Bresnahan *et al.*, 2025; Wojciechowski *et al.*, 2025).

O desenvolvimento das asas de *Apis mellifera* é altamente sensível às condições ambientais ao longo dos estágios larval e pupal, pois a morfogênese das nervuras alares depende de estabilidade térmica, adequada disponibilidade nutricional e baixa oscilação hídrica dentro da colmeia (Nunes, Araújo e Marchini, 2015; Nunes, 2012). Durante esse processo ontogenético, fatores como temperatura, oferta de pólen, poluição e outros estressores ambientais podem interferir na estabilidade do desenvolvimento (Gérard *et al.*, 2022; Leonard *et al.*, 2018; Nunes, Araújo e Marchini, 2015). Em regiões semiáridas, caracterizadas por déficit hídrico, variações térmicas acentuadas e menor disponibilidade de recursos florais, essas

pressões podem alterar a formação das asas e aumentar a instabilidade ontogenética, refletida em mudanças sutis de forma e na ocorrência de pequenas diferenças aleatórias entre os lados direito e esquerdo, fenômeno conhecido como assimetria flutuante (AF). Por isso, parâmetros morfométricos e a AF constituem marcadores eficientes para avaliar os efeitos ambientais sobre populações de abelhas expostas a condições contrastantes (Gérard *et al.*, 2022; Leonard *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2015).

O Semiárido e estressores das abelhas

O semiárido brasileiro é caracterizado por ser uma região de quadros climáticos extremos, seca e chuvoso, sendo os efeitos causados pela seca, um dos maiores passivos sociais do país (Travassos, Souza e Silva, 2013). As secas podem ocorrer como uma drástica diminuição, concentração espacial ou temporal da precipitação pluviométrica durante o ano (Carvalho, 2020; Travassos, Souza e Silva, 2013). Ciclos fortes de estiagens e secas são frequentes na região semiárida brasileira, além disso, podem ocorrer veranicos durante a estação chuvosa, que podem provocar fortes danos às culturas de subsistência (Marengo, 2008). As chuvas no semiárido do Brasil são bastante irregular, resultando assim em secas constantes (Sá, 2018). As precipitações médias anuais do semiárido variam de 280 mm a 800 mm, sendo que boa parte da região não alcança a marca dos 800 mm (Araujo, 2011). Além disso, o índice de insolação é grande e a temperatura varia de 23°C a 40°C, e o solo dessa região é rochoso, arenoso e raso (Teixeira, 2016).

O cenário de escassez no semiárido nordestino faz com que a vegetação seja específica. O déficit hídrico e as altas temperatura, fizeram com que a vegetação se adaptasse as variações das condições ambientais. Tal vegetação adaptada, permanece em estado de latência durante todo o período sem chuvas. Essa vegetação recebe o nome de xerófila, característica da Caatinga, presente no semiárido nordestino brasileiro (Araujo, 2011).

A cadeia produtiva da apicultura apresenta um grande potencial no Nordeste brasileiro, parte desse sucesso se deve as condições ambientais. O Bioma Caatinga, predominante no semiárido nordestino, possui uma imensa quantidade e diversidade de flora apícola. Durante o período de florada, essa vegetação nativa oferece néctar e pólen em abundância, servindo como base para a alimentação das abelhas e para a produção de mel (Brasil e Guimarães-Brasil, 2018).

As condições climáticas extremas do semiárido, atuam diretamente sobre o desenvolvimento ontogenético das abelhas. De forma que, interferem na termorregulação da colmeia, na disponibilidade de recursos florais e na qualidade nutricional oferecida às larvas,

elementos reconhecidos por afetarem a morfogênese das asas e aumentarem a instabilidade do desenvolvimento (Medina *et al.*, 2018; Abou-Shaara *et al.*, 2017; Ellis *et al.*, 2008).

Essas condições tornam o semiárido um ambiente naturalmente propenso a induzir variações fenotípicas e instabilidade de desenvolvimento, expressas por alterações no tamanho, na forma e pelo aumento da assimetria flutuante (AF), um biomarcador sensível de estresse ambiental em abelhas (Klingenberg, 2015; Graham *et al.*, 2010). Assim, investigar a assimetria flutuante (AF) da abelha africanizada nesse contexto é especialmente relevante, pois evidencia como as adversidades típicas da Caatinga modulam o fenótipo desses insetos e influenciam sua capacidade adaptativa.

As condições climáticas da região semiárida interferem especialmente durante as fases larval e pupal. O déficit hídrico prolongado reduz a disponibilidade e a diversidade de recursos florais, limitando o acesso ao pólen e ao néctar, que são essenciais para a nutrição das larvas e para o desenvolvimento saudável das colônias (Castellanos-Zacarías *et al.*, 2024; Di Pasquale *et al.*, 2016). Além disso, a elevada variabilidade térmica típica da região pode comprometer a estabilidade térmica dentro das colmeias, dificultando a manutenção de condições ideais para a morfogênese das asas e outros processos ontogenéticos (Minaud *et al.*, 2024).

A análise morfométrica e a avaliação da assimetria flutuante tornam-se, portanto, ferramentas valiosas para detectar e quantificar o impacto desses estressores ambientais sobre as populações de *Apis mellifera*. Essas métricas permitem identificar alterações sutis na forma e no tamanho das asas, funcionando como biomarcadores sensíveis de estresse ambiental e de instabilidade ontogenética, especialmente em regiões sujeitas a condições climáticas extremas e à limitação de recursos (Castellanos-Zacarías *et al.*, 2024; Minaud *et al.*, 2024; Tommasi *et al.*, 2021).

Morfometria geométrica

A técnica de morfometria geométrica descreve e representa a imagem real da forma do objeto que está sendo estudado. Diferente da morfometria tradicional, a morfometria geométrica não usa como base as medições de ângulos e distâncias, e sim pontos cartesianos, chamados de marcos anatômicos. Os trabalhos realizados com as asas de abelhas *Apis mellifera* indicam que a utilização de 19 marcos anatômicos é suficiente para encontrar resultados confiáveis (Silva *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2015; Nunes, 2012).

A morfometria geométrica é uma ferramenta precisa para detectar modificações sutis na forma das asas, permitindo avaliar como fatores ambientais influenciam o desenvolvimento das abelhas. Essa abordagem utiliza coordenadas de marcos anatômicos (landmarks) para capturar

a geometria das asas, possibilitando análises robustas de variações morfológicas entre indivíduos, populações e ao longo de gradientes ambientais (Ghassemi-Khademi *et al.*, 2024; Vaca-Sánchez *et al.*, 2023; Abed *et al.*, 2020; Henriques *et al.*, 2020). Como a formação da asa ocorre principalmente durante o estágio pupal, esse período é altamente sensível a estressores ambientais, como temperatura, disponibilidade nutricional, umidade e qualidade dos recursos florais. Estudos mostram que variações nessas condições durante o desenvolvimento podem resultar em alterações no tamanho, forma e simetria das asas, refletindo diretamente o estresse enfrentado pela colmeia (Tafi *et al.*, 2025; Gérard *et al.*, 2023; Vaca-Sánchez *et al.*, 2023; Benítez *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2016).

Alterações no tamanho ou na conformação das asas podem indicar desde pressões ambientais adversas até processos adaptativos populacionais. Por exemplo, diferenças morfométricas em asas de abelhas foram associadas a gradientes altitudinais, variações climáticas regionais, manejo apícola e disponibilidade de recursos, demonstrando a sensibilidade da técnica para detectar respostas fenotípicas a múltiplos fatores ambientais (Akçakaya, Erkan e Tozkar, 2025; Bakhchou *et al.*, 2025; Vaca-Sánchez *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2016). A técnica baseada em landmarks permite comparar indivíduos e grupos de forma estatisticamente robusta, identificando padrões de divergência associados ao clima, ao manejo, ao fluxo de néctar, ao tipo de vegetação disponível ou mesmo ao estresse hídrico característico do semiárido (Akçakaya *et al.*, 2025; Bakhchou *et al.*, 2025; Vaca-Sánchez *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2016). Dessa forma, a morfometria geométrica torna-se uma ferramenta útil para compreender respostas fenotípicas das abelhas e monitorar a influência de estressores ambientais sobre seu desenvolvimento, sendo recomendada para estudos de monitoramento ambiental e conservação (Vaca-Sánchez *et al.*, 2023; Abed *et al.*, 2020; Benítez *et al.*, 2020; Henriques *et al.*, 2020).

A morfometria geométrica é uma ferramenta considerada adequada para identificação de espécies de abelhas. Utilizando a morfometria geométrica é possível identificar com precisão os indivíduos de uma colmeia, em poucos minutos, ao contrário da morfometria tradicional que pode levar horas para realizar as mesmas análises (Francoy e Fonseca, 2010).

Francoy, Franco e Roubik (2012), confirmam a eficácia do método baseado em marcos anatômicos para identificação de abelhas *Euglossa* e apontam que esse método já foi confirmado para *A. mellifera*, *Bombus* e outras abelhas sem ferrão. As características morfométricas podem ser mais efetivas do que dados genéticos (Francoy, Franco e Roubik, 2012). Uma subespécie pura nunca foi classificada erroneamente como outra subespécie pura (Tofilski e Oleksa, 2015).

De acordo com Winston (2003) as asas das abelhas são extensões do exoesqueleto, adaptadas para o voo, sendo a principal forma de deslocamento desses indivíduos. O efeito das variações do ambiente afeta o desenvolvimento perfeito do organismo, principalmente na fase de pupa, podendo causar modificações na forma e tamanho das asas (Henriques *et al.*, 2020; Nunes *et al.*, 2012). A mudança na morfometria das asas, não necessariamente gera um impacto negativo na colônia, pelo contrário, consiste em uma manifestação adaptativa do indivíduo ao ambiente em que está inserido, tendo em vista que, o ambiente interage continuamente com o genótipo da abelha, alterando assim o seu fenótipo (Vaca-Sánchez *et al.*, 2023).

Assimetria flutuante

As estruturas bilaterais dos seres vivos se desenvolvem sob controle de um mesmo genoma, resultando em características equivalentes nos dois lados do corpo. Pequenos desvios aleatórios dessa simetria são denominados assimetria flutuante (AF) (Coster *et al.*, 2013). Para compreender a AF, é essencial conhecer os tipos de simetria descritos por Klingenberg (2015): (1) simetria de correspondência, quando duas estruturas simétricas estão separadas no corpo, como as asas dos insetos; e (2) simetria do objeto, quando o próprio organismo apresenta simetria interna, como a cabeça de artrópodes.

A AF é uma ferramenta morfométrica utilizada para detectar instabilidade do desenvolvimento em organismos submetidos a fatores estressantes. A interação entre genoma e ambiente define o fenótipo; quando esse desenvolvimento ocorre sob condições adversas, aumenta a probabilidade de desvios assimétricos (Vilaseca *et al.*, 2022). Assim, a AF reflete a incapacidade do organismo de manter um desenvolvimento normal, funcionando como um indicador direto de estresse ambiental (Coster *et al.*, 2013). Diferentemente da antissimetria e da assimetria direcional, geralmente determinadas por fatores genéticos, a AF responde sobretudo a variações ambientais (Medina *et al.*, 2018; Klingenberg, 2015).

Em insetos sociais, a AF tem sido consistentemente associada a estressores térmicos, hídricos e nutricionais, sobretudo durante o estágio pupal, considerado altamente sensível (Medina *et al.*, 2018; Graham *et al.*, 2010). A manutenção da simetria bilateral depende da estabilidade térmica interna da colmeia: temperaturas acima de 33–36 °C comprometem a termorregulação e alteram o ritmo do desenvolvimento pupal, produzindo assimetrias (Jones & Oldroyd, 2006). A baixa umidade relativa também agrava o estresse, reduzindo a eficiência da termólise evaporativa e dificultando o acesso à água necessária para o preparo do alimento larval (Domingos *et al.*, 2018; Ellis, Evans e Pettis, 2008).

Em ambientes áridos, como o semiárido brasileiro, oscilações térmicas acentuadas, déficit hídrico prolongado e oferta irregular de pólen intensificam a instabilidade do desenvolvimento, elevando os níveis de AF (Poot-Báez *et al.*, 2020). O estresse nutricional é particularmente relevante, pois o pólen é a principal fonte proteica para a construção de tecidos larvais; sua escassez ou baixa qualidade leva à formação de asas menos simétricas (Szentgyorgyi, Márton e Miklós, 2016).

Assim, a AF constitui um marcador sensível e informativo para detectar instabilidade do desenvolvimento em abelhas, especialmente em regiões sujeitas a variações térmicas, hídricas e nutricionais frequentes, como o semiárido. Sua aplicação em análises morfométricas contribui para compreender como condições ambientais adversas modulam o fenótipo e afetam a capacidade adaptativa de abelhas *Apis mellifera*.

Plasticidade fenotípica

A plasticidade fenotípica refere-se à capacidade de um único genótipo produzir diferentes fenótipos em resposta a variações ambientais (Bonamour *et al.*, 2019). Esse fenômeno é crucial para a adaptação e sobrevivência de muitas espécies, e nas abelhas do gênero *Apis*, manifesta-se de maneira notável através do desenvolvimento de castas (Fox *et al.*, 2019). O mesmo conjunto de genes em ovos fertilizados pode originar operárias ou rainhas, dependendo das condições nutricionais e ambientais durante o estágio larval. A plasticidade é o mecanismo subjacente que permite à colônia modular a proporção de indivíduos com funções distintas, garantindo a especialização necessária para a manutenção da estrutura social complexa e a eficiência na exploração de recursos (Corona, Libbrecht e Wheeler, 2016).

Nas abelhas melíferas, *Apis mellifera*, a plasticidade fenotípica é estudada no contexto da diferenciação de castas. O desenvolvimento de uma larva em rainha ou operária é determinado primariamente pela dieta: larvas destinadas a serem rainhas são alimentadas exclusivamente com geleia real, enquanto larvas de operárias recebem uma dieta mista de geleia real, mel e pólen após os primeiros dias (Slater, Yocum e Bowsher, 2020). Essa diferença nutricional desencadeia vias de desenvolvimento genéticas e epigenéticas distintas, resultando em fenótipos dramaticamente diferentes em termos de morfologia (tamanho, órgãos reprodutivos), fisiologia (longevidade, fertilidade) e comportamento (reprodução versus forrageamento e cuidado da colmeia) (Slater, Yocum e Bowsher, 2020). A plasticidade também é observada nas operárias adultas, onde a idade e as necessidades da colônia regulam a

progressão nas tarefas, como limpeza, construção de favos e forrageamento, um processo conhecido como polietismo etário (Beck, Wenseleers e Oliveira, 2023).

5 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Fazenda Experimental Rafael Fernandes (5° 4.116'S e 37° 24.350'O) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). Foram selecionadas 10 colônias de abelhas africanizadas nidificadas em colmeias Langstroth, considerando padrões semelhantes (idade da rainha, tamanho populacional e área de cria). Dez abelhas operárias foram coletadas por colmeia, nos meses de março, julho e dezembro (esses meses cobrem os períodos estudados, chuvoso e seco), totalizando 100 indivíduos em março, 100 em julho e 70 em dezembro de 2024 (no mês de dezembro 3 colônias enxamearam, em um processo natural, assim, contamos com 7 colônias nesse mês).

Asas anteriores direitas e esquerdas foram dispostas em lâminas para visualização em estereomicroscópio, fixadas com esmalte incolor. Posteriormente foram fotografadas (Figura 1) com o auxílio do Leica S9i acoplada à câmera fotográfica M500 leica com Software LASX Application Suíte X (versão 5.0.3.24880), com escala de 5 mm. As imagens foram processadas no tpsUtil versão 1.81 (Rohlf, 2021) para criar os arquivos com extensão TPS. Para análise de população foi considerado apenas asas anteriores direitas e para análise de assimetria flutuante foi feito arquivo com asas anteriores direitas e esquerdas. Posteriormente, foram marcados 19 landmarks utilizando o software tpsDig (Rohlf, 2017). As medições foram feitas três vezes pelo mesmo medidor, como sugerido por Palmer (1994).

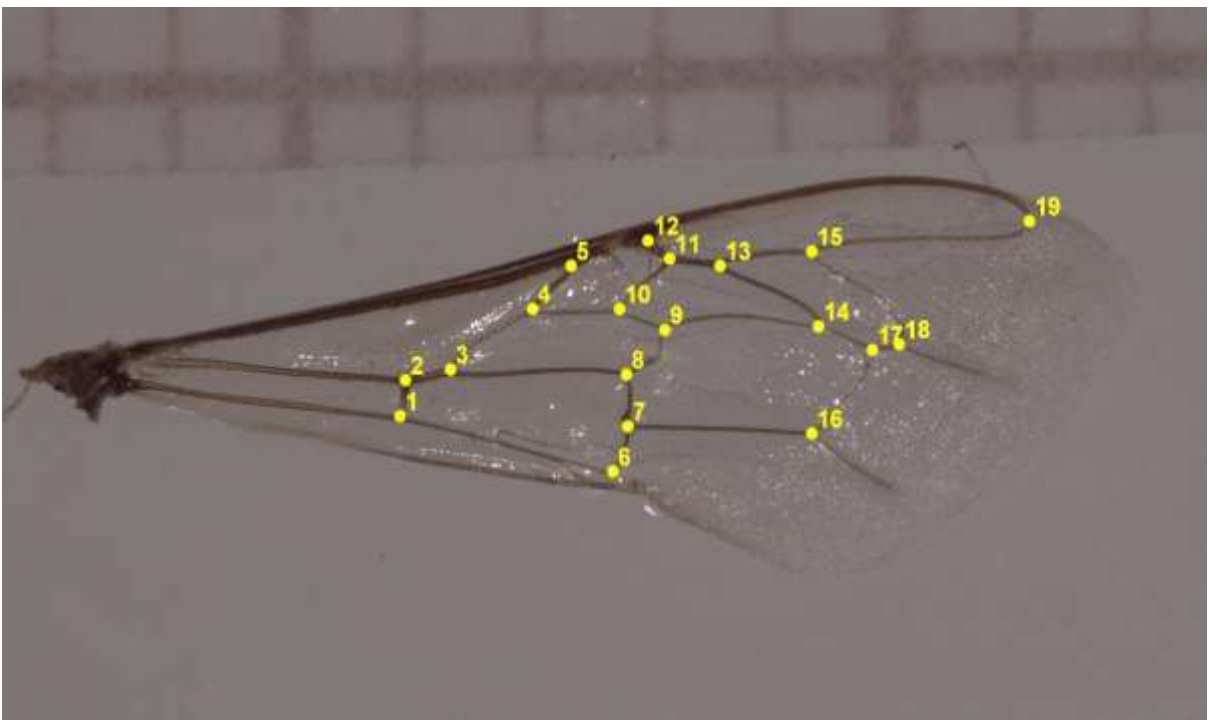


Figura 1. Distribuição de 19 marcos anatomicos nas intersecções das nervuras da asa anterior direita de operária africanizada.

Para análise da forma, foi empregado a Análise de Variáveis Canônicas (AVC), Função Discriminante (FD) seguida de Validação Cruzada (VC), utilizando o MorphoJ. Para verificar diferenças no tamanho, foi usado o tamanho do centróide, onde foram aplicados One-way ANOVA e teste de Tukey, após a verificação de homogeneidade dos dados pelo teste de Levene ($P < 0,05$). O tamanho do centróide das asas foi tratado como uma variável independente, o lado do corpo como um efeito fixo e os indivíduos como efeito aleatório. As correlações estatísticas e análises foram calculadas no programa PAST, versão 5.2.1, considerando significância de 5%.

Para analisar a assimetria flutuante (AF) foram obtidas as medidas das asas (tamanho e forma) no programa MorphoJ. a fim de verificar as diferenças bilaterais (direito menos esquerdo). Para a forma e tamanho foi aplicado uma ANOVA de Procrustes (Klingenberg e McIntyre, 1998). Além disso, foi realizada a análise PLS (Partial Least Squares) de dois blocos, que é uma técnica de modelagem preditiva multivariada que cria fatores latentes (componentes) para relacionar variáveis independentes (x) e dependentes (y). Testamos a covariação entre blocos de variáveis (formato da asa direita dentro das populações), usando as coordenadas de Procrustes e variáveis ambientais (Rohlf e Corti, 2000).

Para as variáveis ambientais foram consideradas a Temperatura interna (°C) e Umidade interna (%) da colmeia, Temperatura do ar (°C) e Umidade relativa do ar (%). A mensuração da temperatura e umidade interna da colmeia foi feita utilizando Dataloggers (modelo RC-4HC, Elitech-Brasil), que foram colocados no interior das colmeias durante todo período experimental, de março a dezembro de 2024. A leitura dos Dataloggers foi feita a cada 15 dias e os dados estavam sendo registrados a cada 60 minutos, durante o período de 24 horas. A coleta dos dados de temperatura e umidade ambiente foi feito através da estação climatológica automática, localizada a 300 metros do local onde o experimento foi instalado. Após a coleta dos dados, foi feito a média mensal referente a cada período de coleta.

6 RESULTADOS

Análise de populações

Duas variáveis canônicas (AVC) foram suficientes para explicar 100% da variação, AVC 1-70% e a AVC 2-30% (Figura 2. A). A AVC 1 separou os indivíduos da coleta 1 e 2 (eixo positivo) da coleta 3 (eixo negativo). Pelo outline, observou-se que os indivíduos da coleta 1 e 2 (Figura 2B) apresentaram expansão da primeira célula submarginal (pontos 5 e 12) e da célula marginal (ponto 19) e, compressão da terceira célula submarginal (pontos 17 e 18) e segunda célula cubital (ponto 6), sendo o oposto observado na população 3 (Figura 2.B). Na AVC 2, os indivíduos da coleta 1 (eixo positivo) estão separados da coleta 2 (eixo negativo), mostrando diferenças significativas entre esses grupos. Pelo outline, observou-se uma expansão da primeira célula medial (pontos 8 e 9) e compressão da terceira célula submarginal (pontos 10 e 11) (Figura 2. C). O oposto foi observado nos indivíduos da coleta 2.

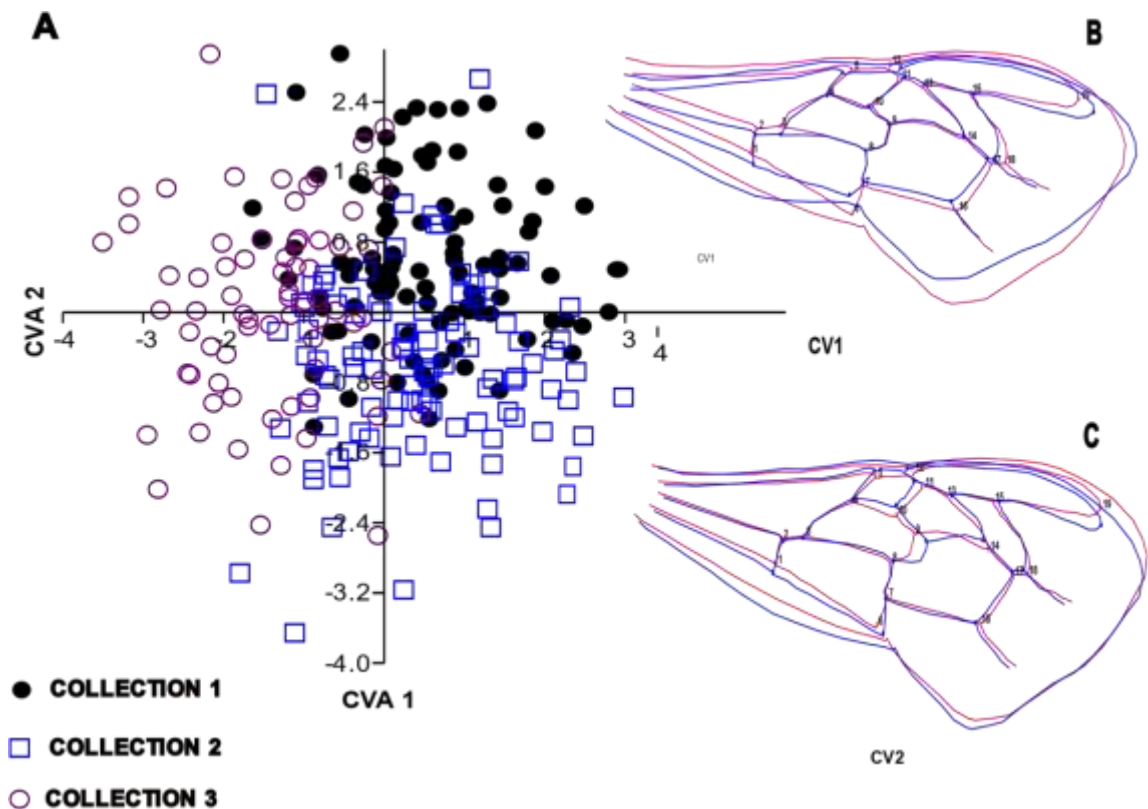


Figura 2. A: Gráfico de dispersão da forma da asa de abelhas africanizadas, a partir da técnica de morfometria geométrica, coletadas em 3 períodos diferentes. Coleta 1 - Março, coleta 2 - Julho e coleta 3 - Dezembro. B e C: Outline no eixo positivo (contorno azul) e negativo (contorno vermelho).

De acordo com a validação cruzada, houve diferença significativa entre as coletas ($p < 0,01$), tendo as abelhas da coleta 3 apresentando as maiores diferenças morfológicas (coleta 1 x coleta 2: 59%; coleta 1 x coleta 3: 74,7% e coleta 2 x coleta 3: 72,4%).

O tamanho de centroide da asa diferiu significativamente entre coletas ($F = 46.36$; $p < 0,01$), sendo os indivíduos da coleta 3 menores que os demais (Figura 3).

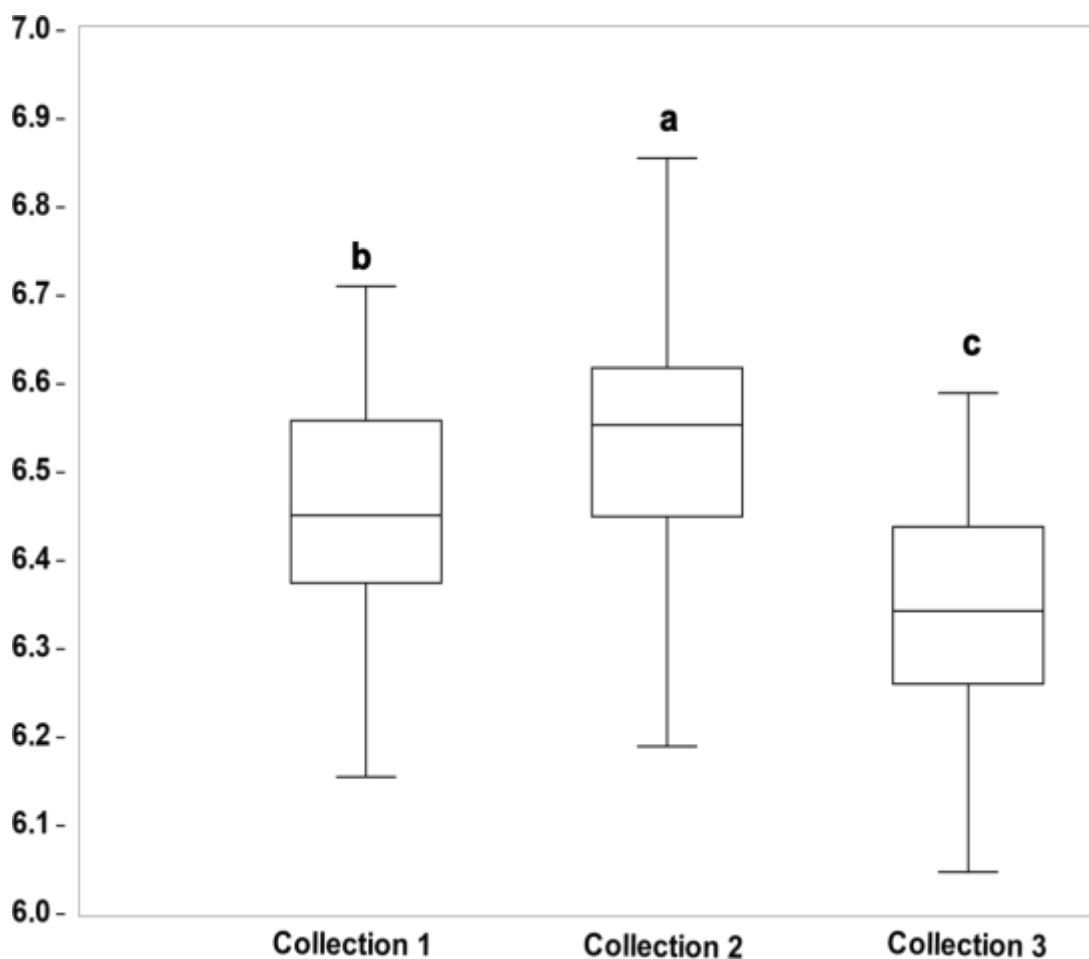


Figura 3. Tamanho do centroide de asas de abelhas africanizadas (*Apis mellifera*) coletadas em três períodos diferentes (Coleta 1 em março, coleta 2 em julho e coleta 3 em dezembro de 2024).

Assimetria flutuante

Pela procrustes ANOVA, foi observado assimetria flutuante entre os indivíduos ($p < 0.0001$) analisados dentro do mesmo período (coletas), tanto para forma (Tabela 1), quanto para tamanho do centroide (Tabela 2)

Tabela 1. Análise de variância da forma de asa de abelhas africanizadas (*Apis mellifera*) coletadas em 3 períodos (março, julho e dezembro referentes as coletas 1, 2 e 3, respectivamente).

EFEITO	GL	SQ	QM	F
Coleta 1 - Março				
Lado	34	0,00317824	0,0000934777	9,08**
Indivíduo	3366	0,17018276	0,0000505593	4,91**
Lado x indivíduo	3366	0,03465111	0,0000102944	3,89**
Erro	6800	0,01798991	0,0000026456	
Coleta 2 - Julho				
Lado	34	0,00311910	0,0000917382	10,28**
Indivíduo	3366	0,19136388	0,0000568520	6,37**
Lado x indivíduo	3366	0,03004038	0,0000089247	3,56**
Erro	6800	0,01705346	0,0000025079	
Coleta 3 - Dezembro				
Lado	34	0,00288224	0,0000847717	9,63**
Indivíduo	2346	0,13453330	0,0000573458	6,51**
Lado x indivíduo	2346	0,02065427	0,0000088040	3,48**
Erro	4760	0,01204892	0,0000025313	

GL- grau de liberdade, SQ- soma de quadrados, QM- quadrado médio.

Tabela 2. Análise de variância do tamanho do centróide da asa (intra-período) de abelhas africanizadas coletadas em março, julho e dezembro.

EFEITO	GL	SQ	QM	F
Coleta 1 - Março				
Lado	1	0,048038	0,048038	12,13**
Indivíduo	99	6,517469	0,065833	16,62**
Lado x indivíduo	99	0,392040	0,003960	3,34 **
Erro	200	0,237478	0,001187	
Coleta 2 - Julho				
Lado	1	0,192523	0,192523	44,81**
Indivíduo	99	5,894559	0,059541	13,86**
Lado x indivíduo	99	0,425339	0,004296	2,43**
Erro	200	0,352948	0,001765	
Coleta 3 - Dezembro				
Lado	1	0,049239	0,049239	13,92**
Indivíduo	69	3,282368	0,047571	13,44**
Lado x indivíduo	69	0,244152	0,003538	1,43**
Erro	140	0,346435	0,002475	

Apesar da assimetria flutuante encontrada dentro do período, não foi observado diferença significativa ($F=2.78$; $p=0.6307$) entre o nível de AF e as populações entre períodos, indicando o mesmo nível de estresse.

A análise de PLS mostrou que a umidade relativa do ar foi o fator ambiental responsável por 94.9% ($p<0.01$) da interferência na forma das asas (Figura 4), tendo efeito significativo nas abelhas operárias da coleta 1. Na coleta 1, houve compressão da célula marginal (ponto 19) e da 1ª célula submarginal (pontos 5, 11 e 12) e expansão da 1ª célula medial (pontos 9 e 10) e 2ª célula cubital (ponto 6). O oposto foi observado nas asas das demais coletas.

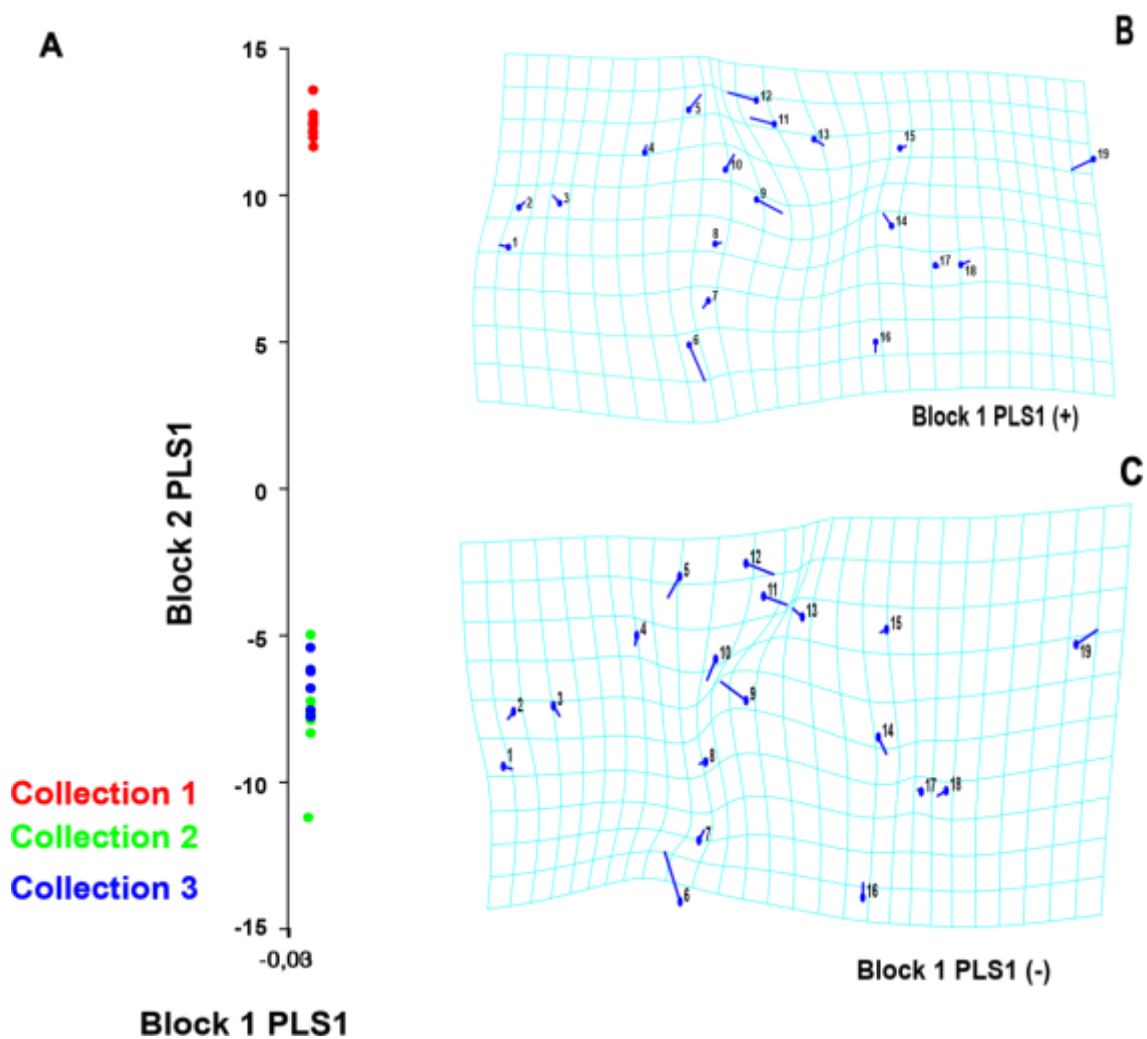


Figura 4. Análise de Partial Least Squares (PLS) em asas de abelhas operárias africanizadas. A: análise de PLS comparando variação morfométrica com variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura interna da colmeia, umidade relativa e umidade interna da colmeia). B e C: grades de deformação da PLS 1.

7 DISCUSSÃO

As abelhas africanizadas apresentam alta plasticidade fenotípica, que lhes proporcionam adaptações fisiológicas e comportamentais de acordo com a sazonalidade ambiental típica do semiárido (Poot-Báez *et al.*, 2020; Meixner *et al.*, 2010). No clima semiárido, caracterizado por duas estações bem definidas, seca e chuvosa, a população de abelhas africanizadas estudada sofreu alterações morfológicas a nível de forma e de tamanho, como visto principalmente entre março e dezembro, onde as abelhas apresentaram os maiores níveis de diferenças e a população de dezembro apresentaram os menores tamanhos.

As chuvas no ano de 2024 tiveram uma duração mais longa (janeiro a julho), assim, as floradas se estenderam até meados de setembro, garantido fontes naturais de pólen e néctar para as abelhas e a partir de outubro as abelhas foram submetidas ao estresse nutricional associado ao estresse térmico e baixa umidade. Esse quadro provavelmente foi o que favoreceu as alterações morfométricas que diferenciaram os indivíduos coletados entre março e dezembro, confirmando a hipótese desse trabalho.

As condições climáticas da região, caracterizadas por altas temperaturas, baixa umidade relativa, forte sazonalidade das floradas e períodos prolongados de estresse hídrico, são amplamente reconhecidas como fatores que comprometem a estabilidade do desenvolvimento em insetos sociais (Abou-Shaara, Omer e Mohamed, 2017; Ellis *et al.*, 2008). Esse cenário ambiental oferece base para interpretar as diferenças identificadas entre períodos e colônias, reforçando que o ambiente exerce papel determinante na construção do fenótipo das operárias de *A. mellifera* africanizada no bioma caatinga.

As variações observadas na AF entre as coletas sugerem que o estresse térmico e hídrico atuou diretamente sobre a morfogênese das asas. Flutuações de temperatura acima da faixa ideal de 33 a 36 °C e baixos níveis de umidade relativa comprometem a termorregulação da colmeia e afetam etapas críticas do desenvolvimento pupal, aumentando as chances de assimetrias (Medina, Ariza e González, 2018; Jones e Oldroyd, 2006). Estudos em abelhas e outros insetos sociais mostram que ambientes áridos, sujeitos a altas temperaturas e variações bruscas no microclima, induzem maior instabilidade do desenvolvimento, com aumento consistente de AF (Poot-Báez *et al.*, 2020). A tendência observada neste estudo está alinhada a esses achados, indicando que as oscilações ambientais do semiárido influenciam diretamente a formação das estruturas alares.

Além dos efeitos térmicos e hídricos, a disponibilidade irregular de recursos florais no semiárido se destaca como um fator crítico. O pólen, principal fonte proteica para a construção

dos tecidos larvais, apresenta alta sazonalidade na Caatinga, com lapsos significativos entre períodos de florada. Essa flutuação pode resultar em larvas submetidas a alimentação insuficiente, favorecendo a ocorrência de assimetrias nas asas (Gérard *et al.*, 2023; Szentgyorgyi, Márton e Miklós, 2016). A relação entre maior AF e momentos de menor disponibilidade floral observada neste estudo confirma que a irregularidade nutricional é um modulador importante da estabilidade do desenvolvimento das operárias.

Os padrões registrados são coerentes com pesquisas realizadas tanto no Nordeste brasileiro quanto em outras regiões áridas do mundo. Estudos conduzidos em áreas de Caatinga identificam alterações na forma e tamanho das asas de *A. mellifera* associadas à variabilidade térmica e hídrica ao longo do ano (Oliveira, 2021; Moretti, Costa e Franco, 2018). Em escala global, análises históricas com espécimes de museus mostram que anos mais quentes e úmidos resultam em maiores níveis de AF em himenópteros, refletindo aumento do estresse ambiental. A convergência entre os achados deste estudo e da literatura reforça que a AF é um indicador sensível aos desafios ambientais enfrentados por abelhas em ecossistemas restritivos.

A presença de AF, embora geralmente sutil, pode ter implicações ecológicas relevantes. Assimetrias alares influenciam a aerodinâmica, aumentando o gasto energético durante o voo e reduzindo a eficiência no forrageamento, fatores que podem afetar a produtividade da colônia e seu sucesso em ambientes com recursos imprevisíveis (Medina *et al.*, 2018). Em condições típicas do semiárido, onde o acesso aos recursos já é limitado, pequenas perdas de performance podem ter impacto ampliado sobre a sobrevivência da colmeia, especialmente durante períodos de estiagem prolongada.

Embora útil, a AF apresenta limitações. Em situações de estresse extremo, indivíduos com maior instabilidade no desenvolvimento podem não atingir a fase adulta, o que pode levar à subestimativa da AF real nas populações estudadas (Klingenberg, 2015). Além disso, respostas inconsistentes sob estresse moderado e a dependência do traço analisado exigem cautela na interpretação isolada desse indicador. Assim, recomenda-se o uso da AF combinada a outros indicadores, como tamanho da asa, peso corporal, análise da genética populacional ou parâmetros fisiológicos.

Os resultados obtidos apresentam implicações práticas relevantes para a apicultura no semiárido. A detecção de maiores níveis de AF em períodos marcados por estresse ambiental indica a necessidade de estratégias de manejo adaptativo, como suplementação nutricional, instalação de sombreamento, oferta de fontes alternativas de água e planejamento das atividades de multiplicação de colônias. O monitoramento morfométrico periódico pode contribuir para

identificar momentos críticos e orientar práticas que minimizem o impacto das condições ambientais sobre o desempenho e a produtividade das colmeias.

Considerando a natureza não controlada do ambiente de estudo, é esperado que os indivíduos apresentem assimetria flutuante (AF), entendida como uma resposta ao estresse ambiental que afeta o desenvolvimento das abelhas. A assimetria entre os lados esquerdo e direito do corpo é um indicador consolidado de estresse, amplamente utilizado para avaliar a instabilidade e a plasticidade do desenvolvimento dos organismos em resposta a condições adversas (Graham *et al.*, 2010; Clarke, 1998). Diferentemente de um caráter geneticamente determinado, a AF é influenciada principalmente por fatores ambientais atuantes durante a ontogenia (Leamy e Klingenberg, 2005). Por essa razão, constitui uma ferramenta valiosa para estudos de biologia populacional, refletindo o nível de adaptação de uma população ao seu habitat (Graham *et al.*, 2010).

A temperatura do ar é o fator que mais influência o ambiente interno da colmeia (Abou-Shaara, Omer e Mohamed, 2017; Bonoan *et al.*, 2014), contribuindo ativamente no desenvolvimento das atividades primordiais da colônia, entre elas, a termorregulação e o forrageamento. A termorregulação interfere no desenvolvimento ontogenético (Medina *et al.*, 2018; Abou-Shaara, Omer e Mohamed, 2017; Cook *et al.*, 2016; Ellis *et al.*, 2008; Winston, 2003), reduzindo ou acelerando o ciclo, caso a temperatura interna não esteja dentro da faixa ideal, entre 33 e 36 ° C (Cook *et al.*, 2016; Jones e Oldroyd, 2006); já o forrageamento interfere diretamente nas reservas energéticas e proteicas da colônia e na busca de água, fundamental para as atividades fisiológicas, preparação do alimento das crias e na atividade de termólise evaporativa, quando a colônia está sob estresse térmico (Domingos, Gramacho e Gonçalves, 2022; Domingos *et al.*, 2018). Apesar disso, a umidade relativa do ar (%) foi o fator ambiental que mais influenciou nos padrões morfométricos das asas, durante o desenvolvimento das pupas e não a temperatura. Essa variável respondeu por quase 95% da assimetria, principalmente na população do mês de março, indicando uma relação direta com a disponibilidade de chuvas nesse período.

Esse resultado não deve ser visto como fator isolado, mas, associado a temperatura, tendo em vista que a umidade relativa é dependente desse eixo térmico (Human, Nicolson e Dietemann, 2006) e inversamente correlacionado (Carvalho *et al.*, 2016). A nível de colônia, a variação da umidade é dependente da temperatura interna e esta é diretamente influenciada pela temperatura do ar. Dessa forma, sob estresse térmico, as abelhas usam água do néctar ou de fontes externas para resfriamento da colmeia e essa umidade gerada no processo influencia no desenvolvimento adequado das crias, sendo as pupas mais susceptíveis a umidade. No caso da

população de dezembro, que apresentaram alterações morfométricas mais intensas, como asas menores, provavelmente foi em decorrência da baixa umidade ambiental associado aos estressores térmicos e nutricionais, que podem ter acelerado o ciclo ontogenético.

As colônias estudadas foram submetidas durante o período experimental a sombreamento artificial. Essa condição pode ter garantido maior conforto térmico nesse período, que consequentemente pode ter sido suficiente para não ser o fator de estresse mais significativo. Domingos *et al.* (2018) avaliando diferenças termorregulatórias entre abelhas africanizadas sob estresse e conforto térmico, verificaram aumento de pelo menos 3 °C nas colônias sob radiação solar direta.

Nesse período, em virtude desses estressores já mencionados, as colônias africanizadas reduzem consideravelmente a população (Silva *et al.* 2024), de forma que as abelhas nutrizas mal nutridas, responsáveis pela produção do alimento da cria, não consigam fornecer alimentação adequada nutricionalmente e suficiente para garantir o pleno desenvolvimento das crias. Szentgyorgyi, Márton e Miklós (2016) verificaram que sob estresse nutricional, principalmente a carência de pólen, o desenvolvimento ontogenético é comprometido, resultando em alterações morfológicas na forma e no tamanho em todos os indivíduos em desenvolvimento.

Nunes, Araújo e Marchini (2015) associaram diferentes níveis de antropização ambiental ao estresse em *Apis mellifera*, confirmando que alterações antrópicas também geram assimetria flutuante. Moretti, Costa e Francoy (2018) avaliaram padrões morfométricos de abelhas africanizadas em diferentes estados do Nordeste, coletadas em períodos seco e chuvoso e verificaram a morfometria da asa das abelhas do período seco diferiam do período chuvoso, inclusive em amostras coletadas em Mossoró-RN. Oliveira (2021), estudando variações morfométricas em abelhas africanizadas em Mossoró, encontrou variações nas venações das asas em decorrência da influência das condições climáticas em que as abelhas estavam expostas. Ele comprova em seu estudo, que a variação na forma das asas dessas abelhas é uma manifestação adaptativa. O mesmo resultado é encontrado por Moretti, Costa e Francoy (2018), estudando populações de abelhas africanizadas em Mossoró e em áreas costeiras úmidas, comprovaram que a morfometria geométrica das amostras coletadas em Mossoró durante a estação chuvosa é semelhante as abelhas coletadas em áreas costeiras úmidas.

Dessa forma, esses resultados observados apoiam a hipótese de que o semiárido exerce influência direta sobre o desenvolvimento ontogenético das abelhas africanizadas, afetando a forma e o tamanho das asas e promovendo níveis detectáveis de assimetria bilateral. O conjunto dos dados evidencia que essas alterações são respostas adaptativas que refletem as condições

ambientais vivenciadas pela população em períodos diferentes. Pesquisas futuras, devem investigar esse efeito ambiental em colônias sob radiação solar direta para verificar se esse efeito é mais intenso. Além disso, associar assimetria flutuante com longevidade das operárias é importante para ver o quanto que essa condição afeta o forrageamento, consequentemente a coleta de alimentos e a produtividade da colônia.

8 CONCLUSÃO

Com o presente estudo foi possível concluir que há efeito do período seco e chuvoso na morfometria das asas e na assimetria flutuante nas abelhas africanizadas no semiárido brasileiro. A variável climática que teve maior efeito na assimetria das asas foi a umidade do ar.

Assim, foi possível entender como a sazonalidade do semiárido, períodos seco e chuvoso, exerce influência sobre a forma e tamanho das asas de abelhas africanizadas.

REFERÊNCIAS

- ABED, F. *et al.* Procruste analysis of forewing shape in two endemic honeybee subspecies *Apis mellifera intermissa* and *A. m. sahariensis* from the Northwest of Algeria. **Biodiversitas**, v. 22, p. 1-8, 2020.
- ABOU-SHAARA, H. F.; OMER, A. M.; MOHAMED, A. A. Effects of temperature and relative humidity on honey bee *Apis mellifera* colonies. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 24, n. 5, p. 1161–1166, 2017.
- ABOU-SHAARA, H. F. *et al.* A Review of Impacts of Temperature and Relative Humidity on Various Activities of Honey Bees. **Insectes Sociaux**, v. 64, n. 4, p. 455–463, 2017.
- AKÇAKAYA, S.; ERKAN, C.; TOZKAR, Ö. Landmark-based analysis of honey bee wing variation: findings from some regions of Van, Hakkari (Türkiye) and Iran. **Turkish Journal of Entomology**, 2025.
- ARAÚJO, S. D. A. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica: Revista Científica da FASETE**, v. 5, n. 5, p. 2-4, 2011.
- BAKHCHOU, S. *et al.* Morphological Diversity of Moroccan Honey Bees (*Apis mellifera* L. 1758): Insights from a Geometric Morphometric Study of Wing Venation in Honey Bees from Different Climatic Regions. **Diversity**, 2025.
- BARBOSA, D. B. *et al.* As abelhas e seu serviço ecossistêmico de polinização. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 3, n. 4, p. 694-703, 2017.
- BECK, E.; WENSELEERS, T.; OLIVEIRA, R. C. The effect of forager loss on honeybee workers temporal polyethism and social network structure. **Apidologie**, v. 54, n. 51, p. 1-13, 2023.
- BENÍTEZ, H. *et al.* Breaking Symmetry: Fluctuating Asymmetry and Geometric Morphometrics as Tools for Evaluating Developmental Instability under Diverse Agroecosystems. **Symmetry**, v. 12, n. 11, p. 1789, 2020.
- BONAMOUR, S. *et al.* Phenotypic plasticity in response to climate change: the importance of cue variation. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 374, n. 1768, 2019.
- BONOAN, R. E. *et al.* Vasculature of the hive: heat dissipation in the honey bee (*Apis mellifera*) hive. **Naturwissenschaften**, v. 101, n. 5, p. 459-465, 2014.
- BRASIL, D. F.; GUIMARÃES-BRASIL, M. O. Principais recursos florais para as abelhas da caatinga. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 17, n. 2, p. 149-156, 2018.
- BRESNAHAN, S. T. *et al.* Intragenomic conflict associated with extreme phenotypic plasticity in queen-worker caste determination in honey bees (*Apis mellifera*). **Genome Biology**, v. 26, n. 171, p. 1-30, 2025.

- CARNEIRO, L. S. *et al.* Avaliação da assimetria flutuante em populações de *Eulaema cingulata* (Fabricius, 1804) (Hymenoptera: Apidae) em diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 3, p. 409–416, 2019.
- CARVALHO, A. T. F. Caracterização climática da quadra chuvosa em Apodi semiárido brasileiro, nos anos de 2013 a 2017. **Geografia em Atos**, v. 2, n. 17, p. 4-23, 2020.
- CARVALHO, R. D. S. *et al.* Comportamento das séries temporais de temperatura do ar, umidade e precipitação pluviométrica no município de Ariquemes (Rondônia-Brasil). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 12, p. 130-131, 2016.
- CASTELLANOS-ZACARÍAS, C. *et al.* Effect of Flowering Period on Drone Reproductive Parameters (*Apis mellifera* L.). **Insects**, v. 15, n. 9, p. 676, 2024.
- CASTILHOS, D. *et al.* Apiculture in Rio Grande do Norte, Brazil: a four-year follow-up survey. **Latin American Journal of Business Management**, v. 7, n. 1, p. 96-106, 2016.
- CLARKE, G. M. The genetic basis of developmental stability. **Genetica**, Dordrecht, v. 102–103, p. 15–23, 1998.
- COLLINS, D. H. *et al.* Gene expression during larval caste determination and differentiation in intermediately eusocial bumblebees, and a comparative analysis with advanced eusocial honeybees. **Molecular Ecology**, v. 30, n. 1, p. 718-735, 2020.
- COOK, C. N. *et al.* Rapidly changing environment modulates the thermoregulatory fanning response in honeybee groups. **Animal Behaviour**, v. 115, n. 1, p. 237-243, 2016.
- CORONA, M.; LIBBRECHT, R.; WHEELER, D. E. Molecular mechanisms of phenotypic plasticity in social insects. **Insect Science**, v. 13, n. 1, p. 55-60, 2016.
- COSTER, G. *et al.* Fluctuating asymmetry and environmental stress: understanding the role of trait history. **PLoS ONE**, v. 8, n. 3, p. 1-8, 2013.
- DI PASQUALE, G. *et al.* Variations in the Availability of Pollen Resources Affect Honey Bee Health. **PLoS ONE**, v. 11, n. 9, e0162818, 2016.
- DOMINGOS, H. G. T.; GRAMACHO, K. P.; GONÇALVES, L. S. **Controle de temperatura em colônias de abelhas africanizadas (*Apis mellifera* L.) em diferentes faixas de temperatura do ar e radiação solar**. São Paulo: Dialética, 2022.
- DOMINGOS, H. G. T. *et al.* Surface temperature and heat transfer between body regions of africanized honeybees (*Apis mellifera* L.) in hives under sun and shade conditions in the Northeastern Semi-arid Region of Brazil. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 28-35, 2018.
- DRAGER, D. H. C. **A ictiofauna de riachos responde às alterações da paisagem no Cerrado? – investigando os sinais sutis da assimetria flutuante**. 2022. 67 f. Dissertação

- (Mestrado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- ELLIS, J. D.; EVANS, J. D.; PETTIS, J. Colony losses, managed colony population decline, and Colony Collapse Disorder in the United States. **Journal of Apicultural Research**, v. 47, n. 1, p. 134–136, 2008.
- ELLIS, M. B. *et al.* Hygropreference and brood care in the honeybee (*Apis mellifera scutellata*). **Journal of Insect Physiology**, v. 54, n. 1, p. 1516–1521, 2008.
- FAO. **The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture**. Roma: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/pollination/about/en>. Acesso em: 8 set. 2025.
- FERREIRA, J. M. *et al.* Própolis e geoprópolis do semiárido derivados de jurema preta. **Mensagem Doce**, v. 157, p. 6-11, 2019.
- FOX, R. J. *et al.* Beyond buying time: the role of plasticity in phenotypic adaptation to rapid environmental change. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 374, n. 1768, 2019.
- FRANCOY, T. M.; FONSECA, V. L. I. A morfometria geométrica de asas e a identificação automática de espécies de abelhas. **Oecologia Australis**, v. 14, n. 1, p. 317-321, 2010.
- FRANCOY, T. M.; FRANCO, F. F.; ROUBIK, D. W. Integrated landmark and outline-based morphometric methods efficiently distinguish species of *Euglossa* (Hymenoptera, Apidae, Euglossini). **Apidologie**, v. 43, n. 5, p. 609-617, 2012.
- FREIRE, I. R. **Assimetria flutuante e anomalias como ferramentas de medição de impactos ambientais em girinos de *Pithecopus ayeaye* Lutz, 1966 (Amphibia, Anura: Phyllomedusidae)**. 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado em Zoologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- GEBREMEDHN, H.; LEFEBRE, R.; GRAAF, D. C. Living in harmony with nature: the key to resilience of honeybees (*Apis mellifera*) in Africa. **Apidologie**, v. 56, n. 4, p. 56-67, 2025.
- GÉRARD, M. *et al.* Elevated developmental temperatures impact the size and allometry of morphological traits of the bumblebee *Bombus terrestris*. **The Journal of Experimental Biology**, v. 226, 2023.
- GÉRARD, M. *et al.* Impact of Crop Exposure and Agricultural Intensification on the Phenotypic Variation of Bees. **SSRN Electronic Journal**, 2022.
- GHASSEMI-KHADEMI, T. *et al.* Geographical variation in the forewing shape of the red dwarf honeybees revealed by landmark-based geometric morphometrics. **Zoologischer Anzeiger**, 2024.
- GRAHAM, J. H. *et al.* Fluctuating asymmetry and environmental stress: a multivariate evaluation. **Journal of Evolutionary Biology**, v. 23, n. 1, p. 132–143, 2010.

- GRAHAM, J. H. *et al.* Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications. **Symmetry**, Basel, v. 2, n. 2, p. 466–540, 2010.
- HENRIQUES, D. *et al.* Wing Geometric Morphometrics of Workers and Drones and Single Nucleotide Polymorphisms Provide Similar Genetic Structure in the Iberian Honey Bee (*Apis mellifera iberiensis*). **Insects**, v. 11, n. 2, p. 89, 2020.
- HUMAN, H.; NICOLSON, S. W.; DIETEMANN, V. Do honeybees, *Apis mellifera scutellata*, regulate humidity in their nest?. **Naturwissenschaften**, v. 93, n. 1, p. 397–401, 2006.
- JONES, J. C.; OLDROYD, B. P. Nest thermoregulation in social insects. **Advances in Insect Physiology**, v. 33, p. 153-191, 2006.
- KLINGENBERG, C. P. Analyzing fluctuating asymmetry with geometric morphometrics: concepts, methods, and applications. **Symmetry**, v. 7, n. 2, p. 843-934, 2015.
- KLINGENBERG, C. P.; MCINTYRE, G. S. Geometric morphometrics of developmental instability: analyzing patterns of fluctuating asymmetry with Procrustes methods. **Evolution**, Lancaster, v. 52, n. 5, p. 1363-1375, 1998.
- LEAMY, L. J.; KLINGENBERG, C. P. The genetics and evolution of fluctuating asymmetry. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 36, p. 1–21, 2005.
- LEONARD, R. *et al.* Urbanisation and wing asymmetry in the western honey bee (*Apis mellifera*, Linnaeus 1758) at multiple scales. **PeerJ**, v. 6, e5940, 2018.
- LIMA, C. *et al.* Morphometric differences and fluctuating asymmetry in *Melipona subnitida* Ducke 1910 (Hymenoptera: Apidae) in different types of housing. **Brazilian Journal of Biology = Revista Brasileira de Biologia**, v. 76, n. 4, p. 845-850, 2016.
- MANOCHIO, I. S. **A influência da paisagem sobre a morfometria das asas de *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) na Mata Atlântica**. 2023. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2023.
- MASQUIZA, D. *et al.* Geometric morphometric analysis of *Apis mellifera* in Camaguey, Cuba. **Insects**, v.14, n.3, p.306, 2023.
- MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima no semiárido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 149-176, 2008.
- MEDINA, L. M.; ARIZA, F. A.; GONZÁLEZ, J. A. Environmental stressors affecting wing morphology and fluctuating asymmetry in honey bees. **Apidologie**, v. 49, n. 3, p. 319–329, 2018.
- MEDINA, R. G. *et al.* Developmental stability, age at onset of foraging and longevity of africanized honey bees (*Apis mellifera* L.) under heat stress (Hymenoptera: Apidae). **Journal of Thermal Biology**, v. 74, n. 1, p. 214-225, 2018.

- MEIXNER, M. D. *et al.* Standard methods for characterising subspecies and ecotypes of *Apis mellifera*. **Journal of Apicultural Research**, v. 49, n. 1, p. 1–10, 2010.
- MINAUD, É. *et al.* How stressors disrupt honey bee biological traits and overwintering mechanisms. **Heliyon**, v. 10, e34390, 2024.
- MORETTI, C. J.; COSTA, C. P.; FRANCOY, T. M. Wing morphometrics reveals the migration patterns of Africanized honey bees in Northeast Brazil. **Sociobiology: An International Journal on Social Insects**, v. 65, n. 4, p. 679-685, 2018.
- NASCIMENTO, M. B.; MEDEIROS, M. D. Índices de severidade da seca no semiárido, Paraíba. **Mercator**, v. 21, e21024, 2022.
- NUNES, L. A. **Estruturação populacional, variações fenotípicas e estudos morfométricos em *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) no Brasil**. 2012. Tese (Doutorado em Entomologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- NUNES, L. A.; ARAÚJO, E. D.; MARCHINI, L. C. Fluctuating asymmetry in honey bee (*Apis mellifera* L.) wings as bioindicator of anthropic environments. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 59, n. 2, p. 159–165, 2015.
- NUNES, L. A. *et al.* Variation morphogeometrics of Africanized honey bees (*Apis mellifera*) in Brazil. **Iheringia - Série Zoologia**, v. 102, n. 3, p. 321-326, 2012.
- OLIVEIRA, D. A. G. **Variação morfogeométrica de abelhas africanizadas (*Apis mellifera*) sob condições de sol e sombra**. 2021. 42 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2021.
- PALMER, A. R. Fluctuating Asymmetry Analyses: A Primer. In: MARKOW, T. A. (ed.). **Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. p. 335-364.
- PANIAGO, L. P. M. **Aspectos ecológicos de *Antilophia galeata* (Passeriformes: Pipridae) e seu potencial em biomonitoramento e conservação**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) - Instituto de Biologia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- POOT-BÁEZ, V. *et al.* Intranidal temperature and body size of Africanized honey bees under heatwaves (Hymenoptera: Apidae). **Apidologie**, v. 51, n. 3, p. 382-390, 2020.
- RAHIMI, E.; JUNG, C. Global trends in climate suitability of bees: ups and downs in a warming world. **Insects**, v. 15, n. 2, p. 127, 2024.
- ROHLF, F. J. **TpsDig**. Versão 2.31. Stony Brook: Department of Ecology and Evolution, State University of New York, 2017.
- ROHLF, F. J.; CORTI, M. Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. **Systematic Biology**, v. 49, n. 4, p. 740–753, 2000.

- SÁ, E. S. S. C. G. **Caracterização de solos e pedogênese em lagoa temporária no semiárido brasileiro**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.
- SANTOS, R. G. *et al.* Comparative study of the performance of africanized bees managed in thermal stress and thermal comfort in a semiarid region. **Acta Veterinaria Brasilica**, v. 17, n. 4, p. 80-85, 2023.
- SANTOS, R. G. *et al.* Sobreamento de colmeias de abelhas africanizadas no semiárido brasileiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 5, p. 828-836, 2018.
- SILVA, L. A. *et al.* *Varroa destructor* mite population dynamics in africanized honeybee (*Apis mellifera*) colonies in a semi-arid region. **Experimental and Applied Acarology**, v. 93, n. 3, p. 537-547, 2024.
- SILVA, F. A. *et al.* Morfometria geométrica das asas permite verificar o posicionamento racial de abelhas africanizadas. **Pubvet**, v.13, n.1, p.150, 2019.
- SILVA, F. L. *et al.* Evaluating classification and feature selection techniques for honey bee subspecies identification using wing imagens. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.114, n.1, p.68-77, 2015.
- SLATER, G. P.; YOCUM, G. D.; BOWSHER, J. H. Diet quantity influences caste determination in honeybees (*Apis mellifera*). **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 287, n. 1927, 2020.
- SZENTGYORGYI, H.; MÁRTON, A.; MIKLÓS, P. Nutritional stress during larval development affects adult morphology in honey bees (*Apis mellifera*). **Environmental Entomology**, v. 45, n. 5, p. 1234–1240, 2016.
- TAFI, E. *et al.* Pathogens may affect wing morphology in *Apis mellifera* (L.) workers. **Journal of Apicultural Research**, v. 64, p. 862-870, 2025.
- TEIXEIRA, M. N. O. O sertão semiárido. Uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. **Sociedade e Estado**, v. 31, n. 3, p. 769-797, 2016.
- TOFILSKI, A.; OLESKSA, A. Wing geometric morphometrics and microsatellite analysis provide similar discrimination of honey bee subspecies. **Apidologie**, v. 46, n. 1, p. 49-60, 2015.
- TOMMASI, N. *et al.* Effect of urbanization and its environmental stressors on the intraspecific variation of flight functional traits in two bumblebee species. **Oecologia**, v. 199, p. 289-299, 2021.
- TRAVASSOS, I. S.; SOUZA, B. I.; SILVA, A. B. Secas, desertificação e políticas públicas no semiárido nordestino brasileiro. **OKARA: Geografia em Debate**, v. 7, n. 1, p. 147-164, 2013.

- VACA-SÁNCHEZ, M. S. *et al.* Patterns in wing morphology and fluctuating asymmetry in *Eulaema nigrata* along an altitudinal gradient in the Brazilian rupestrian grassland. **Neotropical Entomology**, v. 52, n. 5, p. 837-847, 2023.
- VILASECA, C. *et al.* Insect fluctuating asymmetry: an example in Bolivian peridomestic populations of *Triatoma infestans* (Klug, 1834) (Hemiptera: reduviidae). **Biological Symmetry Analysis**, v. 14, n. 3, p. 526, 2022.
- WINSTON, M. L. **A biologia da abelha**. Tradução de Carlos A. Osowski. Porto Alegre: Magister, 276 p. 2003.
- WOGLES, L.; KURZE, C. Experimental short-term heatwaves negatively impact body weight gain and survival during larval development in *Bombus terrestris* L. (Hymenoptera: Apidae). **Biology Open**, v. 14, n. 4, p. 1-7, 2025.
- WOJCIECHOWSKI, M. *et al.* Phenotypically distinct female castes in honey bees are defined by alternative chromatin states during larval development. **Genome Research**, v. 8, n. 28, p. 1532-1542, 2025.
- WORLD BEE PROJECT. **People & the Pollinators**. 2023. Disponível em: <https://worldbeeproject.org/2023/06/17/amazing-bee-stories-human-impact-on-pollinators-copy/>. Acesso em: 8 set. 2025.