

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS HENRIQUE HAMANN

**VARIAÇÃO MORFOLÓGICA EM *SARCONESIA CHLOROGASTER*
(WIEDEMANN, 1830) (DIPTERA: CALLIPHORIDAE): UMA ABORDAGEM POR
MORFOMETRIA GEOMÉTRICA**

CURITIBA

2024

MATHEUS HENRIQUE HAMANN

**VARIAÇÃO MORFOLÓGICA EM *SARCONESIA CHLOROGASTER*
(WIEDEMANN, 1830) (DIPTERA: CALLIPHORIDAE): UMA ABORDAGEM
POR MORFOMETRIA GEOMÉTRICA**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Ciências Biológicas, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Osvaldo Moura

CURITIBA

2024

Mantenha essa página em branco para inclusão da ficha catalográfica após a conclusão do trabalho.

Mantenha essa página em branco para inclusão do termo/folha de aprovação assinado e digitalizado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao professor Maurício Osvaldo Moura por ser um amigo para momentos descontraídos ou difíceis, um mentor para incentivar e encorajar, um chefe para dar puxões na orelha e me pôr de volta no chão, e, acima de tudo, um exemplo, simplesmente *the greatest to ever do it*.

Obrigado aos profissionais que acompanharam de perto minha trajetória em algum momento nos últimos cinco anos, que me deram valiosas lições e aprendizados com paciência e dedicação, em especial: Vinícius Abilhoa, Mateus Oliveira Freitas, Roger Henrique Dalcin, Deisy Morselli Gysi e Rosana Moreira da Rocha.

À Universidade Federal do Paraná por me dar acesso às oportunidades que me proporcionaram, tanto para meu desenvolvimento acadêmico e profissional, quanto para meu crescimento como cidadão, conhecimentos, vivências e conexões que mudaram minha vida.

Às minhas colegas do Laboratório de Dinâmicas Ecológicas, pelas alegrias, pelos choros, pelos conselhos de todas as naturezas, pelas risadas, mas acima de tudo pelas fofocas.

Aos colegas e amigos que a graduação me trouxe, pelas conversas sempre edificantes, rolês e, principalmente, pela camaradagem: João Vitor de Lima Machado, Leonardo Scheffer, Mateus Marchetto, Breno Cardoso Soares e Mateus Tokarski Lima

Aos meus irmãos que a vida me deu, que cresceram e compartilharam comigo momentos inesquecíveis, os meus de verdade: Nicholas Motti Bach, Gustavo Gonçalves, Luís Eduardo Prince Goehr, Guilherme de Conte Mazur e Henrique Silva Tolentino de Souza.

À pepita de ouro que achei em minha vida, Flávia Alessandra Soares Dutra, pelo seu apoio incondicional, seu carinho imensurável, sua vontade incansável e por muito, muito mais do que pode ser dito pelas minhas palavras, obrigado.

Oh no, not me
I never lost control
You're face to face
With the man who sold the world

David Bowie

RESUMO

Espécies com grandes distribuições geográficas como *Sarconesia chlorogaster* (Wied.) têm populações expostas a diferentes condições ambientais ao longo de sua área de ocorrência. Devido a tal variabilidade, os indivíduos podem responder a essas variações durante sua ontogênese, resultando em mudanças no seu fenótipo, que alteram seu valor adaptativo nesse ambiente. A temperatura é um fator capaz de realizar essas mudanças e, no caso de dípteros, elas podem ser observadas na variação da forma e do tamanho de suas asas. Métodos baseados em Morfometria Geométrica conseguem comparar marcos anatômicos nessas estruturas, capturando com eficiência quaisquer modificações entre diferentes grupos. Por isso, neste estudo tivemos como objetivo investigar como a forma e o tamanho alar variam em função da temperatura, ou ainda do sexo, elucidando descontinuidades morfológicas e propondo explicações. Fotografamos 277 asas direitas de uma população de Curitiba de *S. chlorogaster* onde os indivíduos foram sujeitos à tratamentos de 10°, 15°, 20° e 25°C durante seu desenvolvimento, fizemos a marcação de 18 marcos anatômicos em cada uma e removemos efeitos de posição, escala e orientação das coordenadas, submetendo as variáveis de forma e tamanho resultantes à modelagem estatística, PCA, LDA e testes de comparação de médias. O tamanho alar responde de maneira significativa aos tratamentos, sendo a direção e magnitude de resposta semelhante entre os sexos. No geral, os indivíduos que se desenvolveram no regime de 15°C possuem o maior tamanho, enquanto os que se desenvolveram no regime de 10°C tem os menores tamanhos. Já a forma da asa varia significativamente em função do sexo, com fêmeas e machos apresentando diferentes respostas para os tratamentos intermediários de 15° a 25°C, mas respondendo igualmente para o regime mais extremo de 10°C. Fêmeas possuem variação morfológica maior do que os machos, mostrando maior plasticidade.

Palavras-chave: Plasticidade fenotípica; Descontinuidades morfológicas; Norma de reação; Dimorfismo sexual; Análise multivariada;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – POSIÇÃO DOS MARCOS ANATÔMICOS AO LONGO DA ASA DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	19
FIGURA 2 – FÓRMULA PARA OBTENÇÃO DA REPETIBILIDADE	20
FIGURA 3 – PCA E LDA DE FÊMEAS (QUADRANTE ESQUERDO) E MACHOS (QUADRANTE DIREITO) DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	29
FIGURA 4 – CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE FÊMEAS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD1 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.	30
FIGURA 5 – CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE FÊMEAS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD2 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.	30
FIGURA 6 – CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD1 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA	31
FIGURA 7 – CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD2 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.	31

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – MÉDIAS MARGINAIS ESTIMADAS DE TAMANHO DE CENTROIDE DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.) EM CADA REGIME DE TEMPERATURA (TRATAMENTOS)	24
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DAS ASAS DIREITAS	18
TABELA 2 – DESCRIÇÃO DOS MARCOS ANATÔMICOS UTILIZADOS PARA DESCREVER A FORMA DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	19
TABELA 3 – RESULTADO DA ANOVA DE PROCRUSTES PARA ANÁLISE DE ERROS	22
TABELA 4 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DO TAMANHO DE CENTROIDE EM SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	23
TABELA 5 – RESULTADOS DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS A POSTERIORI DO MODELO DE MELHOR AJUSTE PARA A VARIAÇÃO DO TAMANHO DE CENTROIDE EM SARCONESIA CHLOROGASTER	23
TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DA FORMA DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	25
TABELA 7 – COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DA FORMA ENTRE FÊMEAS E MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	25
TABELA 8 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTÂNCIA ENTRE VETORES DAS MÉDIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	27
TABELA 9 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE VETORES DE MÉDIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	28
TABELA 10 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE VARIÂNCIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE SARCONESIA CHLOROGASTER (WIED.)	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
4	RESULTADOS	22
5	DISCUSSÃO	32
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das populações, frequentemente, acarretam na dispersão dos indivíduos e, conseqüentemente, na expansão de área de ocorrência. Dessa forma, esse aumento da distribuição geográfica pode aumentar a variedade de condições ambientais e, por conseguinte, de pressões seletivas às quais cada indivíduo é exposto. Tal heterogeneidade do ambiente pode induzir a expressão de diferentes características fenotípicas a partir de um mesmo genótipo e, devido à estruturação espacial das variáveis ambientais, criar gradientes contínuos ou padrões descontínuos de variação morfológica (MATEUS et al. 2013; COSTA et al., 2015).

De maneira simultânea, o aquecimento global e as mudanças climáticas vertiginosas também têm introduzido uma instabilidade nas condições ambientais, incluindo eventos climáticos extremos. Esses fatores intensificam a variação nos habitats naturais, colocando em evidência a capacidade dos organismos de suportarem e se adaptarem a essas mudanças ou então, em caso de seu fracasso, revelando uma gama de conseqüências (CARMO et al., 2022). Uma das possibilidades de resposta a mudanças nas condições do ambiente é a plasticidade fenotípica. Nesse caso, os organismos, a partir de pressões externas, sofrem alterações na regulação das vias ontogenéticas durante o desenvolvimento, modificando a forma como as características fenotípicas são expressas e interagem entre si (CHAIPHONGPACHARA et al., 2022).

Nesse contexto, os recursos, já limitados, utilizados para manutenção da homeostase, crescimento, reprodução e desempenho desses indivíduos vão ser alocados diferentemente em função do ambiente e, como resultado, o *fitness* desses indivíduos pode variar. Esses processos compensatórios, denominados *trade-offs*, influenciam diretamente a aptidão desses organismos (FLISSAK, 2022). No geral, características fenotípicas plásticas possibilitam que os organismos se aclimatem às diferentes condições ambientais, alterando a maneira como pressões seletivas que atuam sobre as populações as afetam. A longo prazo, essas respostas podem direcionar a evolução, resultando em adaptações, mal-adaptações ou mesmo neutralidade fenotípica (ALVES et al., 2016).

Espécies com ampla distribuição geográfica, estão expostas a uma extensa variação ambiental, e podem apresentar traços plásticos adaptativos específicos de populações locais, já que dificilmente um único fenótipo ótimo seria encontrado ao

longo da distribuição (LECHETA, 2012). Um exemplo notável é *Sarconesia chlorogaster* Wiedemann 1830 (Calliphoridae: Toxotarsinae), uma espécie de díptero neotropical nativa da América do Sul, cuja distribuição geográfica abrange desde regiões andinas montanhosas, localizada no noroeste sul-americano, até os pampas e planícies de campos sulinos da Bacia do Rio da Prata, atravessando climas subtropicais e polares ao longo de um gradiente latitudinal de mais de 30° (LECHETA et al., 2015, 2017). Essa ampla distribuição faz da espécie um modelo ideal para investigar os limites da plasticidade fenotípica.

Entre os fatores ambientais, a temperatura desempenha um papel fundamental na fisiologia de animais ectotérmicos, como os insetos. Diversos estudos demonstraram que a temperatura afeta diretamente o desenvolvimento, aumentando ou diminuindo as taxas de crescimento e alterando índices de sobrevivência (FLISSAK, 2022). Características plásticas como o tamanho e a forma corporal são altamente sensíveis e comumente influenciados por mudanças térmicas, sendo indicadores primordiais da capacidade de uma espécie de lidar com variações ambientais (ALVES et al., 2016).

Além disso, classes demográficas de uma mesma população podem afetar a manifestação da plasticidade, de acordo com as características desses indivíduos, especialmente no que tange as diferenças entre dimorfismos sexuais em forma e tamanho, frequentemente atribuídos a interações ecológicas e diferenças nas histórias de vida (LECHETA, 2012). Essas diferenças são essenciais para compreender a variação fenotípica, os processos evolutivos e eventos de especiação, pois, de forma inerente, machos e fêmeas apresentam plasticidade diferencial que responde de maneira única às nuances do meio e a como elas afetam a sua aptidão (ESPERK et al., 2007). Dado o exposto, é possível observar a necessidade da compreensão da variação fenotípica dentro de uma espécie, bem como da maneira que ela evolui e dos limites máximos da expressão.

Dentro de Diptera, a morfologia e as dimensões alares são amplamente reconhecidas como bons indicadores do tamanho corporal e da capacidade de voo, características que impactam diretamente o fitness das espécies (REIS et al., 2021; ALVES et al., 2016). Suas asas são estruturas cujo desenvolvimento é muito conservado devido ao compartilhamento das vias ontogenéticas por genes HOX, possibilitando o reconhecimento de homologias entre diversos de seus componentes histológicos (SHIMMI et al., 2014). Por consequência, também são propícias para

estudos de correlação e discriminação dos indivíduos, uma vez que garantem que as comparações sejam entre estruturas homólogas e permitem a determinação de hipóteses sobre os efeitos biológicos que podem gerar a variação encontrada (FORNEL; CORDEIRO-ESTRELA, 2012). Ademais, pela interdependência entre os genes homeóticos necessários para que a delicada cascata que dá a origem às asas aconteça, o tamanho e a conformação alar são facilmente modificados por fatores do meio, fazendo da variação interespecífica dessas características um excelente proxy para detecção de alterações nas condições ambientais (HOFFMANN et al., 2002; EMLÉN; NIJHOUT, 2000).

Desde a popularização na década de 90 da Morfometria Geométrica, a análise de morfologia de componentes biológicos uma abordagem muito mais precisa e detalhada, além de uma análise acessível dessas estruturas biológicas. Essa metodologia garante a detecção de mudanças sutis em forma e tamanho, considerando a alometria e possibilitando análises estatísticas multivariadas e reconstruções gráficas (ADAMS et al., 2004). Com base na abordagem de marcos anatômicos (landmark-based), as estruturas de interesse são analisadas por meio de coordenadas que permitem extrair variáveis relacionadas à forma e ao tamanho, com base nos pontos referenciados (MONTEIRO; REIS, 1999; SLICE, 2005). A bidimensionalidade e riqueza em marcos anatômicos de tipo 1 das asas de dípteros as tornam ideais para essa abordagem, uma vez que essas características, resultantes de encontros de tecidos com trajetórias ontogenéticas individualizadas, permitem concluir as causas das mudanças na forma e no tamanho, além de reduzir consideravelmente a ocorrência de erros na captura de imagens e na digitalização dos marcos anatômicos (MORATORE, 2009; SILVEIRA, 2011).

Na última década, a Morfometria Geométrica tem sido amplamente utilizada em estudos de Calliphoridae, abordando temas como Sistemática, Evolução e Ecologia atreladas à discriminação de espécies (HALL et al., 2014; KHANG et al., 2021; LYRA et al., 2009; JIMÉNEZ-MARTÍN et al., 2020; VÁSQUEZ; LIRIA, 2012), descrição de dimorfismos sexuais, identificação de plasticidade fenotípica e adaptações morfológicas resultantes de pressões competitivas (ESPRA et al., 2015; GEMMELLARO et al., 2024; CARMO et al., 2022; MACEDO et al., 2020; PUCOT et al., 2021).

Entretanto, os estudos têm se concentrado predominantemente em algumas subfamílias específicas, como Luciliinae, Chrysomyinae e Calliphorinae, com foco

em gêneros amplamente distribuídos, como *Lucilia*, *Hemipyrelia*, *Chrysomya* e *Cochliomyia*. Compreendendo espécies associadas à miíase secundária, também conhecida como bicheira (*Old & New World screwworm flies*), com grande associação com a saúde pública e veterinária. Ademais, também são amplamente empregadas em Entomologia Forense devido à sua importância na estimativa do intervalo mínimo post-mortem (KLONG-KLAEW et al., 2018).

Ao contrário, a subfamília Toxotarsinae e sobretudo a espécie *S. chlorogaster* (Wied.) encontra-se no grupo de espécies neotropicais com grande déficit de pesquisa. Embora existam estudos dispostos sobre a sua aplicação em Ciências Forenses e análises relacionadas a alterações morfológicas em estágios imaturos sob influência de condições ambientais (FLISSAK, 2017, 2022; LECHETA, 2012, 2015), nenhum trabalho até o momento estudou a plasticidade e a variação morfológica dos adultos de *S. chlorogaster*, em termos de forma e tamanho.

Considerando que os imaturos de *S. chlorogaster* respondem de maneira plástica a variações nas temperaturas, empregamos métodos de Morfometria Geométrica para descrever como essas variações nos imaturos afetam o fenótipo do adulto, utilizando como marcador morfológico a forma e o tamanho das asas. Esperamos que os resultados obtidos contribuam para uma melhor compreensão da evolução morfológica da espécie, evidenciando sua capacidade adaptativa e plástica diante de variações ambientais. Por fim, visamos que esse conhecimento seja estendido para a análise de outros organismos submetidos a contextos ecológicos semelhantes.

1.1 OBJETIVOS

Determinar como a temperatura afeta a forma e o tamanho das asas de *Sarconesia chlorogaster* (Wied.) e como o dimorfismo sexual varia entre temperaturas, descrevendo as normas de reação entre os sexos.

Apresentar e explorar possíveis descontinuidades morfológicas em *S. chlorogaster* para entender mecanismos plásticos e efeitos de estressantes, propondo explicações em um contexto ecológico e evolutivo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A ideia de estudar e quantificar a variação de forma dos seres vivos usando medidas de estruturas biológicas surgiu durante o início do século XX com a biometria e morfometria tradicional, a qual em conjunto com o uso de técnicas estatísticas multivariadas que nasciam na época, tornou possível caracterizar e discernir organismos (MONTEIRO; REIS, 1999).

Porém, medidas lineares frequentemente tinham sobreposição entre si e quase nunca eram definidas por pontos de ocorrência homólogos nos indivíduos. Além disso, as posições relativas de onde eram mensuradas raramente eram uma preocupação, tornando comparações incertas e incapazes de prover informações espacialmente definidas (ZELDITCH et al., 2012). A relação geométrica das formas também não era considerada, o que muitas vezes negligenciava relações entre as estruturas e dificultava as reconstruções gráficas. Por fim, havia o problema de que a natureza de comprimentos, larguras, ângulos e razões preserva a alometria, por isso qualquer informação sobre a conformação era indissociável do tamanho (ADAMS et al., 2004).

À vista disso, a morfometria geométrica surge como uma alternativa capaz de descrever essa geometria, particionar a variação do tamanho e da forma, além de realizar interpretações biológicas sobre as causas das alterações por meio do uso de configurações de marcos anatômicos homólogos e de suas coordenadas de forma (ROHLF; MARCUS, 1993). De forma sintética, é o estudo das covariâncias entre conformações biológicas, suas associações, causas e efeitos, atuando como um link entre geometria, estatística e biologia (BOOKSTEIN, 1991).

Nesse contexto, uma conformação corresponde a todas as propriedades de uma figura que não mudam quando realizamos rotações, translações e proporcionalizações nela (BOOKSTEIN, 1978). Com o advento e a popularização, através da disponibilização de pacotes de análise (a série TPS de James Rohlf), do método de Superposição de Procrustes e da subsequente Análise Generalizada de Procrustes, foi possível empregar essa abordagem geométrica na quantificação da forma (GOWER, 1975; ROHLF; SLICE, 1990).

Uma propriedade diferencial desse método é a natureza não-euclidiana, complexa e curvilínea do espaço geométrico ocupado pelos indivíduos após a transformação, o espaço de forma de Kendall ou o hemisfério de Procrustes, o qual impede o uso das

abordagens estatísticas padrões, baseadas no espaço euclidiano (KLINGENBERG, 2016). No entanto, a projeção ortogonal de suas coordenadas em um plano tangente permite que variáveis morfométricas sejam extraídas e submetidas ao pipeline convencional da estatística multivariada para testar hipóteses: modelagem linear, análise exploratória e análise discriminante (ROHLF, 1999; BOOKSTEIN, 1986).

Ademais, devido ao fato de tal sistema ser capaz de reter todas as informações sobre suas posições relativas entre si, distâncias e ângulos, mesmo após as análises e as transformações matemáticas aplicadas sobre os dados, reconstruções e visualizações da forma se tornaram possíveis (SLICE, 2005).

Por isso, como as variáveis morfométricas advindas de marcos anatômicos apresentam uma estrutura espacial que também deve ser explorada, análises de decomposição de deformação surgiram como complementos à análise estatística (BOOKSTEIN, 1986). Uma das ferramentas mais utilizadas para tal, a função thin-plate spline, expressa a diferença entre formas como uma deformação contínua em uma placa de metal infinitamente extensiva em todas as direções e de espessura infinitesimal, possibilitando mapear mudanças relativas entre as posições de marcos sem inferir que possam mover ou ser movidos individualmente (BOOKSTEIN, 1989; MITTEROECKER; GUNZ, 2009).

Na década de 1990, essa mesma abordagem das análises de deformação foi utilizada para o desenvolvimento da série de softwares TPS - nomeados pelo uso da função thin-plate spline (ROHLF, 2015). Compreendendo não só métodos intuitivos para o processamento de imagens e aquisição de dados morfométricos, mas também incorporando análises estatísticas multivariadas e visualização gráfica, eles foram fundamentais para a disseminação e popularização de métodos em morfometria geométrica durante esse período revolucionário para o campo.

Portanto, embora os procedimentos da morfometria geométrica ainda estejam sendo estabelecidos e seja um toolbox bem recente, eles já trouxeram grandes avanços para a identificação e comparação de seres vivos, assim como de quantificação e qualificação da variação fenotípica, abrangendo os campos de taxonomia, sistemática, ecologia e evolução (PERES-NETO, 1995).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado corresponde a conjuntos de imagens de 277 asas direitas de *Sarconesia chlorogaster* (Wied.), tirados de espécimes advindos da coleção entomológica do Laboratório de Dinâmicas Ecológicas (Departamento de Zoologia, Setor de Ciências Biológicas, UFPR) de experimentos realizados previamente (LECHETA et al., 2015). O montante está subdividido com indicação do sexo e regimes de temperatura (tratamentos) que os indivíduos foram submetidos durante seu desenvolvimento: de a 10°C, 15°C, 20°C ou 25°C (Tabela 1).

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA DAS ASAS DIREITAS

Tratamentos	Fêmeas	Machos	Total
10°	51	39	90
15°	31	49	80
20°	36	19	55
25°	37	15	52

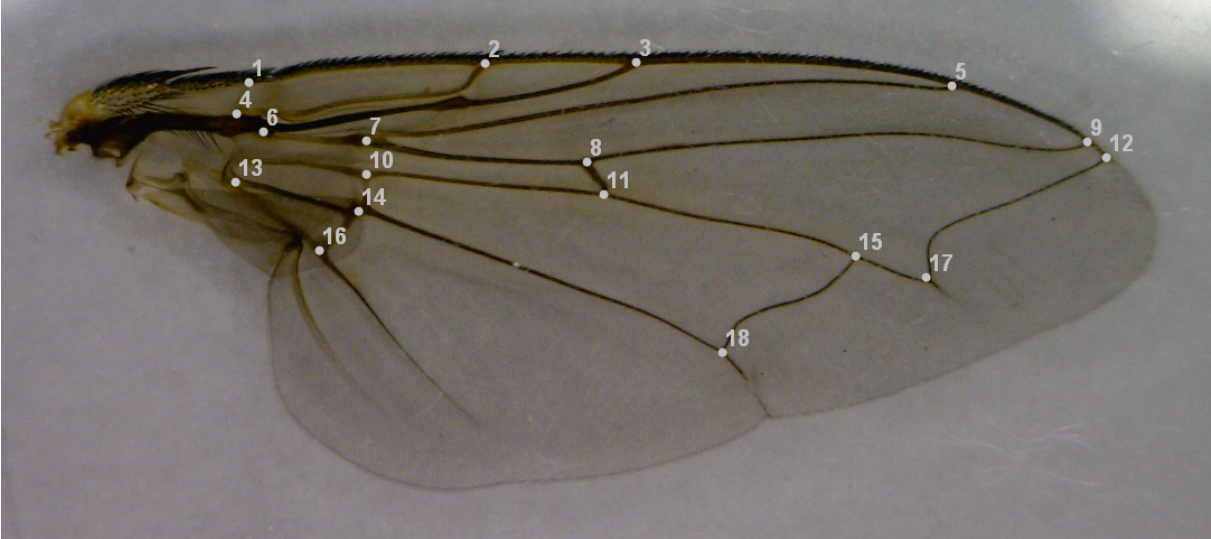
FONTE: O autor (2024).

Cada asa foi preparada e montada em uma lâmina semipermanente, utilizando glicerina e uma escala de 1 mm para que as imagens fossem capturadas com o auxílio do microscópio digital Dino-Lite Pro® AM413T. Depois, elas foram organizadas em um único arquivo com o software tpsUtil versão 1.82 (ROHLF, 2023) e processadas no tpsDIG2 versão 2.31 (ROHLF, 2021). Esse procedimento possibilitou a digitalização de 18 marcos anatômicos (Figura 1, Tabela 2) por asa, selecionados para otimizar a captura da forma alar, conforme metodologias previamente estabelecidas (HALL, 2014; KHANG et al., 2021; LYRA, 2009).

Posteriormente, todos os procedimentos de manipulação de dados e análise estatística foram realizados utilizando o R Studio versão 4.4.1 (R CORE TEAM, 2024). As configurações dos marcos anatômicos individuais foram dadas como entrada para a Análise Generalizada de Procrustes, visando a obtenção das variáveis de forma e de tamanho necessárias para todo o *pipeline* analítico. Esse procedimento removeu variações relativas à posição, escala e rotação das imagens, permitindo que as dimensões das asas fossem descritas por uma medida geometricamente independente da forma - o tamanho de centroide - e as

propriedades geométricas da forma fossem mantidas (GOWER, 1975; ROHLF; SLICE, 1990).

FIGURA 1 - POSIÇÃO DOS MARCOS ANATÔMICOS AO LONGO DA ASA DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)



FONTE: O autor (2024).

TABELA 2 - DESCRIÇÃO DOS MARCOS ANATÔMICOS UTILIZADOS PARA DESCREVER A FORMA DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

Marco	Intersecção
1	Costal (C) com Humeral (h)
2	Costal (C) com Subcostal (Sc)
3	Costal (C) com Radial Anterior 1 (R ₁)
4	Subcostal (Sc) com Humeral (h)
5	Radial 2+3 (R ₂₊₃) com Costal (C)
6	Radial Anterior 1 (R ₁) com Radial 2+3 (R ₂₊₃)
7	Radial 2+3 (R ₂₊₃) com Radial 4+5 (R ₄₊₅)
8	Radial 4+5 (R ₄₊₅) com Radio Mediana (r-m)
9	Radial 4+5 (R ₄₊₅) com Costal (C)
10	Média (M ₁) com Basal Mediana Cubital (bm-cu)
11	Média (M ₁) com Radio Mediana (r-m)
12	Média (M ₁) com Costal (C)
13	Cubital Anterior 1 (CuA ₁) com Anal 1 (A ₁)
14	Cubital Anterior 1 (CuA ₁) com Basal Mediana Cubital (bm-cu)
15	Média (M ₁) com Discal Mediana Cubital (dm-cu)
16	Anal 1 (A ₁) com Cubital Anterior 2 (CuA ₂)
17	Ponto de curvatura máxima da Média (M ₁)
18	Cubital Anterior 1 (CuA ₁) com Discal Mediana Cubital (dm-cu)

FONTE: Adaptado de Silveira (2011).

Com base nas variáveis de forma e nesse tamanho, foi primeiramente realizada uma análise do erro de medição, visto que o processo de marcação dos marcos anatômicos em cada imagem é manual. Durante essa etapa, foi utilizado um subconjunto de dados composto por três repetições de digitalizações independentes - realizadas em três dias distintos pela mesma pessoa - de 10 espécimes selecionados aleatoriamente de cada grupo (ARNQVIST; MÅRTENSSON, 1998), totalizando 30 unidades. A partir dos resultados de uma ANOVA de Procrustes comparando a variação da forma e do tamanho por indivíduo e por réplica, calculamos a razão entre o componente de variância individual e o componente da variância total, a repetibilidade “R” coma descrito pela fórmula abaixo (Figura 2):

FIGURA 2 - FÓRMULA PARA OBTENÇÃO DA REPETIBILIDADE

$$R = \frac{\frac{MS_{Ind} - MS_{Rep}}{2}}{\frac{MS_{Ind} - MS_{Rep}}{2} + MS_{Rep}}$$

FONTE: Adaptada de Zelditch et al. (2012)

Utilizamos Modelos Lineares Generalizados e ANOVA para verificar se o tamanho e a forma das asas variaram em função do regime térmico e do sexo, quantificando a variação atribuída a cada fator (ZELDITCH et al., 2012). Testes a posteriori foram realizados par a par, entre membros de cada grupo de interesse, incluindo comparações de vetores e de Médias Marginais Estimadas entre os eles, para identificar diferenças individuais e medir a magnitude dessas distinções (HOTHORN, 2008).

Para investigar a orientação dos grupos no espaço morfológico, foi aplicada uma Análise dos Componentes Principais (PCA), uma análise exploratória capaz de reduzir a complexidade desses dados morfológicos multivariados e colineares ao sintetizar muitas variáveis em poucos componentes principais, possibilitando a visualização de padrões entre os grupos (PERES-NETO, 1995; FORNEL; CORDEIRO-ESTRELA, 2012). Em sequência, foi realizada uma Análise

Discriminante Linear (LDA) com o objetivo de maximizar a separação entre os grupos anteriormente supracitados (MONTEIRO; REIS, 1999).

4 RESULTADOS

O tamanho e a forma alar não diferiram entre réplicas nem indivíduos ($MS_{ind} = 0.0058228$, $MS_{rep} = 0.0000003$, $p = 1$; $MS_{ind} = 0.00120454$, $MS_{rep} = 0.00000682$, $p = 1$)(Tabela 3). A repetibilidade calculada do processo de digitalização foi de 99,99% para o fator tamanho e 98.95% para o fator forma, comprovando que os resultados não são afetados por erros sistêmicos de marcação.

TABELA 3 - RESULTADO DA ANOVA DE PROCRUSTES PARA ANÁLISE DE ERROS

	Df	SS	MS	Rsq	F	Z	Pr(>F)
Shape							
Individuo	9	0.011	0.001	0.988	0.000	0.000	1.000
Replica	2	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	1.000
Individuo:Replica	18	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	1.000
Total	29	0.011					
Size							
Individuo	9	0.052	0.006	1.000	0.000	0.000	1.000
Replica	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Individuo:Replica	18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
Total	29	0.052					

FONTE: O autor (2024).

Os modelos lineares ajustados para determinar o efeito da temperatura, sexo e suas variações com e sem interação, indicam que todos esses fatores são importantes (Tabela 4). No entanto, o acréscimo do sexo como fator, seja aditivo ou em interação, não aumenta o poder de explicação do modelo, considerando o numero maior de parâmetros envolvidos e a variação descrita pelo quadrado médio. Dessa forma, o modelo com melhor ajuste (menor número de parâmetros e poder de explicação semelhante) e explicação para a variação do tamanho do centroide das asas de *S. chlorogaster* foi apenas em função dos tratamentos aplicados (Tabela 4), uma vez que o tamanho variou significativamente entre eles ($MS_{treat} = 0.210$, $MS_{res} = 0.003$, $p < 0.001$, $R^2_a = 0.439$), mas não entre os sexos ($MS_{sexo} = 0.002$, $MS_{res} = 0.005$, $p = 0.553$, $R^2 = 0.001$).

Dentre os tratamentos, as asas resultantes de indivíduos expostos a 10°C se destacaram em relação àsquelas dos demais, sendo claramente distintas e com o menor tamanho dentre todas (Gráfico 1). As maiores asas foram encontradas no

tratamento de 15°C, porém ainda assim 20 e 25°C tiveram pequenas diferenças em relação a ele e os três configuraram um grupo de tamanhos relativamente próximos (Tabela 5).

TABELA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DO TAMANHO DE CENTROIDE EM *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	ResDf	Df	RSS	SS	MS	Rsq	F	Z	P
Tamanho ~ 1 (Null)	273	1	1.435			0.000			
Tamanho ~ Sexo	272	1	1.433	0.002	0.002	0.001	0.305	-0.103	0.553
Tamanho ~ Tratamento	270	3	0.805	0.630	0.210	0.439	70.374	9.025	0.001
Tamanho ~ Sexo + Tratamento	269	4	0.804	0.631	0.158	0.440	52.764	9.902	0.001
Tamanho ~ Sexo * Tratamento	266	7	0.799	0.635	0.091	0.443	30.204	10.524	0.001
Total	273		1.435						

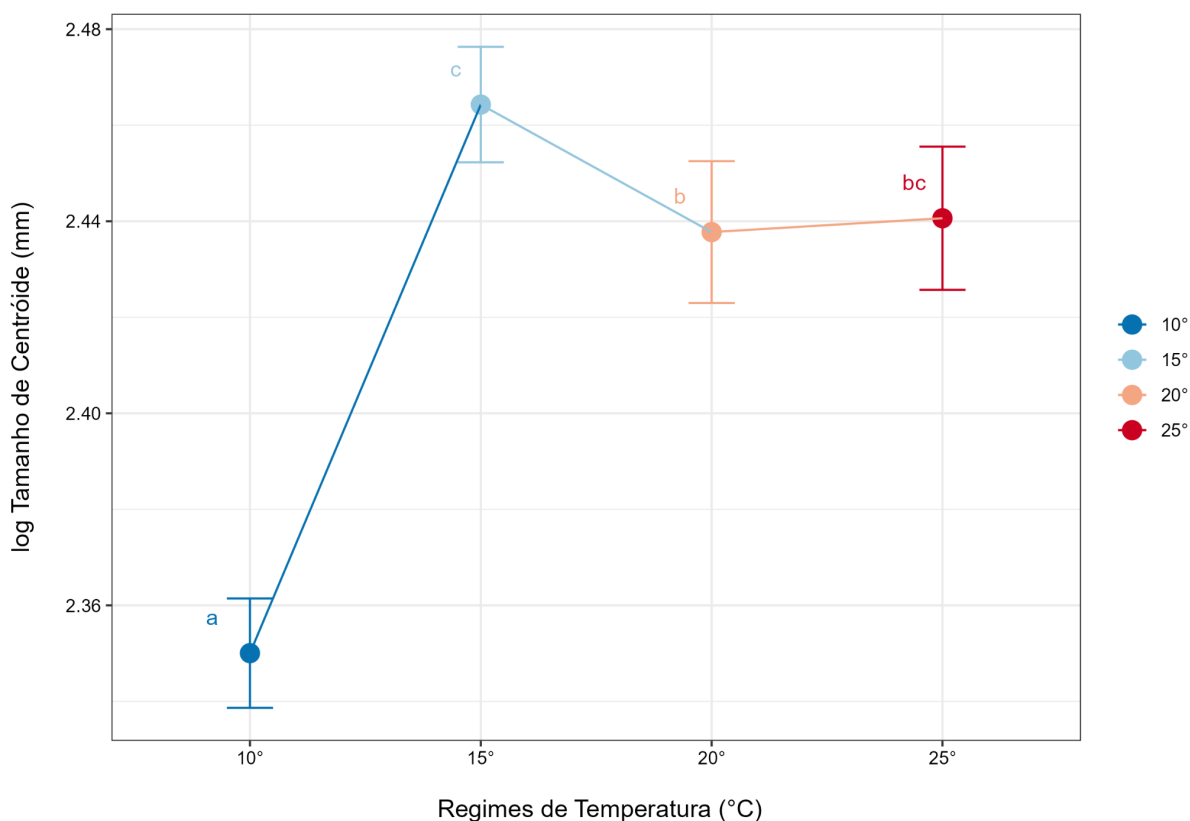
FONTE: O autor (2024).

TABELA 5 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS A POSTERIORI DO MODELO DE MELHOR AJUSTE PARA A VARIAÇÃO DO TAMANHO DE CENTROIDE EM *SARCONESIA CHLOROGASTER*

	Estimativa	Desvio	t.valor	Pr
15° - 10° == 0	0.114	0.008	13.579	<0.001
20° - 10° == 0	0.088	0.009	9.255	<0.001
25° - 10° == 0	0.091	0.010	9.502	<0.001
20° - 15° == 0	-0.027	0.010	-2.746	0.032
25° - 15° == 0	-0.024	0.010	-2.434	0.073
25° - 20° == 0	0.003	0.011	0.271	0.993

FONTE: O autor (2024).

GRÁFICO 1 – MÉDIAS MARGINAIS ESTIMADAS DE TAMANHO DE CENTROIDE DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.) EM CADA REGIME DE TEMPERATURA (TRATAMENTOS)



FONTE: O autor (2024).

Inicialmente, entre nove modelos candidatos para descrever a variação na forma, o modelo aditivo sem interação entre as variáveis preditoras parecia o mais adequado (Tabela 6). Porém, dos três fatores, as diferenças na forma da asa entre machos e fêmeas dessa espécie foram as que mais capturaram variância do modelo e por isso ajustamos os modelos separadamente por sexo (Tabela 7).

TABELA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DA FORMA DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	ResDf	Df	RSS	SS	MS	Rsq	F	Z	P
Forma ~ 1 (Null)	273	1	0.107			0.000			
Forma ~ Tamanho	272	1	0.103	0.004	0.004	0.042	11.840	5.325	0.001
Forma ~ Tratamento	270	3	0.094	0.013	0.004	0.125	12.834	9.115	0.001
Forma ~ Tamanho + Sexo	271	2	0.095	0.012	0.006	0.109	16.654	7.853	0.001
Forma ~ Tamanho * Sexo	270	3	0.095	0.012	0.004	0.113	11.483	9.245	0.001
Forma ~ Tamanho + Tratamento	269	4	0.092	0.015	0.004	0.141	11.005	8.924	0.001
Forma ~ Tamanho * Tratamento	266	7	0.090	0.017	0.002	0.162	7.347	11.452	0.001
Forma ~ Tamanho + Sexo + Tratamento	268	5	0.087	0.021	0.004	0.192	12.697	10.849	0.001
Forma ~ Tamanho + Sexo * Tratamento	265	8	0.085	0.022	0.003	0.205	8.521	11.514	0.001
Total	273		0.107						

FONTE: O autor (2024).

TABELA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DESCRITIVOS DA FORMA ENTRE FÊMEAS E MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	ResDf	Df	RSS	SS	MS	Rsq	F	Z	P
Fêmeas									
Forma ~ 1 (Null)	154	1	0.055			0.000			
Forma ~ Tamanho	153	1	0.052	0.003	0.003	0.058	9.390	5.512	0.001
Forma ~ Tratamento	151	3	0.046	0.010	0.003	0.176	10.772	7.270	0.001
Forma ~ Tamanho + Tratamento	150	4	0.044	0.011	0.003	0.199	9.320	8.459	0.001
Forma ~ Tamanho * Tratamento	147	7	0.042	0.013	0.002	0.235	6.460	9.667	0.001
Total	154		0.055						
Machos									
Forma ~ 1 (Null)	121	1	0.048			0.000			
Forma ~ Tamanho	120	1	0.046	0.002	0.002	0.040	4.988	3.455	0.001
Forma ~ Tratamento	118	3	0.043	0.005	0.002	0.098	4.257	5.018	0.001
Forma ~ Tamanho + Tratamento	117	4	0.042	0.005	0.001	0.110	3.625	5.071	0.001
Forma ~ Tamanho * Tratamento	114	7	0.041	0.007	0.001	0.146	2.776	4.616	0.001
Total	121		0.048						

FONTE: O autor (2024).

Contrapondo os nossos novos modelos com os previamente concebidos, ficou evidente que a maior variação em função de alometria estava atrelada ao sexo e por isso tiramos o fator tamanho do modelo ao fazer a escolha do mais ajustado, visando reduzir o número de parâmetros (Tabela 7). Ao final, chegamos a conclusão de que a forma da asa de *S. chlorogaster* é melhor descrita apenas em termos dos tratamentos aplicados, os quais sozinhos captaram cerca de 18% da variação nos

indivíduos fêmeas ($R^2_a = 0.176$, $p < 0.001$) e 10% da variação nos indivíduos machos ($R^2_a = 0.098$, $p < 0.001$).

A modelagem em separado para fêmeas e machos chegou a pontos comuns nos dois grupos (Tabela 7), indicando que as trajetórias de variação são semelhantes. Para ambos, a forma difere significativamente em função do tratamento ($p < 0.001$, $Z = 7.270$; $p < 0.001$, $Z = 5.018$), mas no caso das fêmeas quase o dobro da variação conformacional pode ser atribuída aos diferentes regimes de temperatura, em relação aos machos.

Os testes a posteriori pares mostraram que ambos os sexos têm respostas similares em relação aos tratamentos, com pequenas diferenças.

Analisando primeiramente as comparações entre pares dos espécimes fêmeas de tratamentos distintos, encontramos diferenças significativas entre as distâncias dos vetores das médias de quadrados mínimos referentes a todos os regimes de temperatura (Tabela 8), assim como diferenças na direção dos vetores no morfoespaço para cada um desses tratamentos também (Tabela 9). Isto é, cada temperatura provocou, de maneira única e exclusiva, alterações em cada uma das variáveis de forma derivadas das coordenadas cartesianas dos marcos anatômicos, o que pode ser visualizado como vetores orientados diferentemente em um espaço de forma multidimensional associado à gradientes de, nesse caso, mudança ecológica (COLLYER et al., 2015).

Agora, olhando para os resultados das comparações entre espécimes machos advindos de tratamentos distintos, descobrimos que embora o regime de 10°C também tenha ocasionado em diferenças significativas nas médias e na direção do vetor da forma em relação aos demais regimes, os tratamentos às temperaturas de 15°, 20° e 25° têm similaridade na maneira que afetam as variáveis de forma, apresentando médias e orientações vetoriais próximas (Tabela 8, Tabela 9).

Porém, nossos achados sobre as distâncias entre as variâncias de pares de grupos, tanto de machos quanto de fêmeas, foram semelhantes. As asas dos indivíduos criados sob a temperatura de 10°C formam um grupo isolado, apresentando uma variação da conformação ao redor da média até 100 vezes maior do que a encontrada para os três outros tratamentos às temperaturas de 15°, 20° e 25°, mais homogêneos nas comparações entre eles (Tabela 10).

A PCA para o as fêmeas capturou apenas 42.2% da variação dos dados nos primeiros dois PCs, não muito diferentemente do encontrado para os machos com

42.5%. Os grupos se organizaram de maneira muito imbricada e com grande sobreposição, sem a formação de um padrão discernível (Figura 3). Utilizando os autovalores resultantes dessa PCA, a CVA conseguiu representar - nos dois primeiros eixos - 96.5% e 96.6% da variação dos dados das fêmeas e dos machos, respectivamente. Para ambos os conjuntos de dados, o LD1 separou à esquerda (valores negativos) o tratamento a 10°C dos outros três regimes, que ficaram à direita do gráfico, em um agrupamento com valores positivos. Uma segregação fraca entre os fenótipos dos organismos que se desenvolveram a 15°C, 20°C e 25°C se dá pelo LD2, formando uma transição dos valores negativos nas temperaturas mais baixas até os valores mais positivos encontrados nas maiores temperaturas (Figura 3).

TABELA 8 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA DISTÂNCIA ENTRE VETORES DAS MÉDIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	d	UCL	Z	Pr
Fêmeas				
10° - 15°	3.453	1.434	4.607	0.001
10° - 20°	3.910	1.393	6.466	0.001
10° - 25°	4.191	1.365	6.784	0.001
15° - 20°	1.631	1.391	2.321	0.009
15° - 25°	2.857	1.411	4.524	0.001
20° - 25°	2.407	1.378	4.177	0.001
Machos				
10° - 15°	2.440	1.409	4.061	0.001
10° - 20°	2.304	1.376	3.647	0.001
10° - 25°	2.572	1.430	3.888	0.001
15° - 20°	1.158	1.381	0.874	0.199
15° - 25°	1.922	1.418	2.997	0.002
20° - 25°	1.104	1.410	0.640	0.266

FONTE: O autor (2024).

TABELA 9 - RESULTADOS DA ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE VETORES DE MÉDIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	r	Ângulo	UCL	Z	Pr
Fêmeas					
10° - 15°	1.000	0.782	0.354	4.397	0.001
10° - 20°	1.000	0.846	0.329	6.155	0.001
10° - 25°	1.000	0.900	0.319	6.474	0.001
15° - 20°	1.000	0.397	0.368	1.971	0.026
15° - 25°	1.000	0.692	0.371	4.234	0.001
20° - 25°	1.000	0.560	0.350	3.819	0.001
Machos					
10° - 15°	1.000	0.572	0.342	3.954	0.001
10° - 20°	1.000	0.705	0.436	3.546	0.001
10° - 25°	1.000	0.854	0.492	3.796	0.001
15° - 20°	1.000	0.342	0.422	0.715	0.233
15° - 25°	1.000	0.620	0.474	2.866	0.002
20° - 25°	1.000	0.417	0.551	0.485	0.313

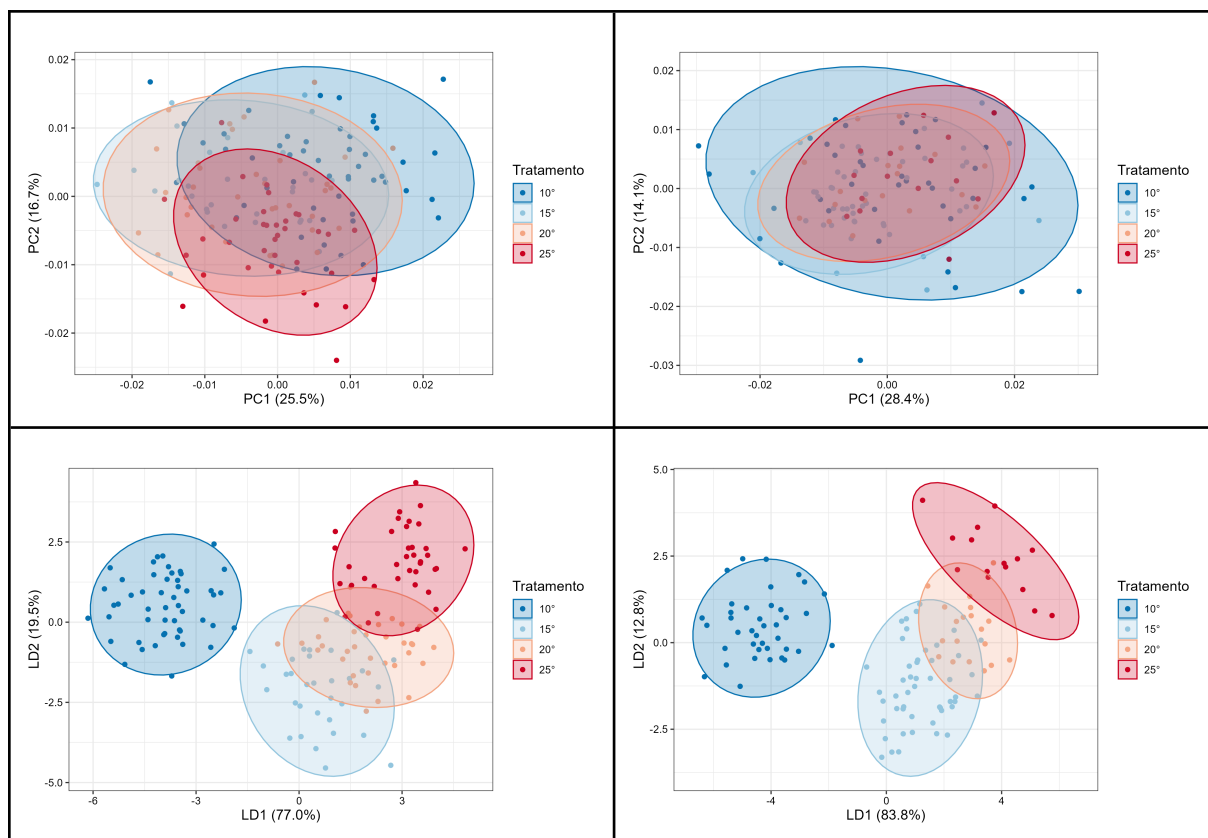
FONTE: O autor (2024).

TABELA 10 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE DISTÂNCIA ENTRE VARIÂNCIAS DE FÊMEAS E MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

	d	UCL	Z	Pr
Fêmeas				
10° - 15°	1.080	0.730	2.416	0.003
10° - 20°	0.989	0.698	2.299	0.009
10° - 25°	1.465	0.694	3.152	0.001
15° - 20°	0.091	0.788	-0.984	0.823
15° - 25°	0.385	0.800	0.456	0.336
20° - 25°	0.476	0.790	0.766	0.242
Machos				
10° - 15°	2.090	1.079	2.877	0.001
10° - 20°	2.186	1.414	2.430	0.003
10° - 25°	2.108	1.540	2.134	0.016
15° - 20°	0.096	1.349	-1.254	0.882
15° - 25°	0.017	1.463	-2.108	0.986
20° - 25°	0.079	1.758	-1.612	0.941

FONTE: O autor (2024).

FIGURA 3 - PCA E LDA DE FÊMEAS (QUADRANTE ESQUERDO) E MACHOS (QUADRANTE DIREITO) DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.)

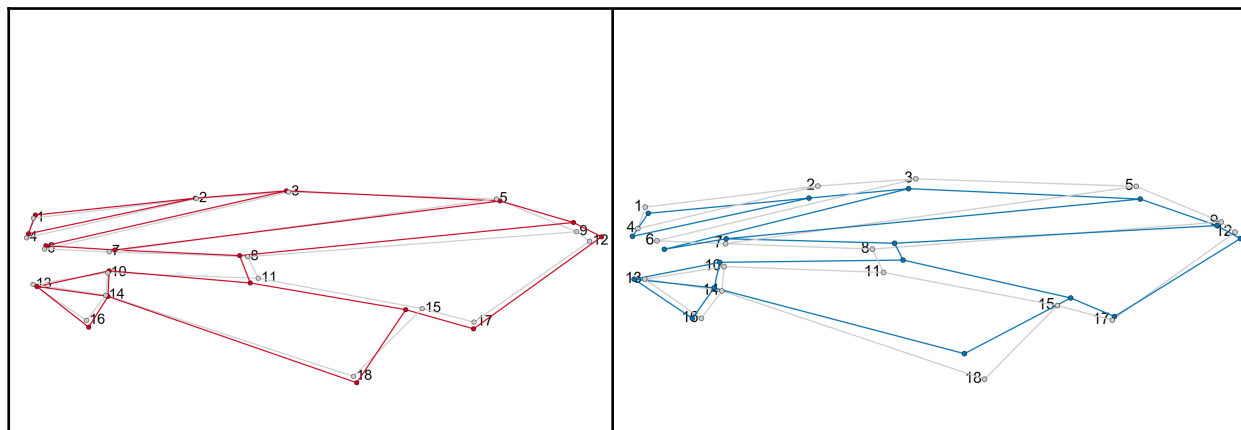


FONTE: O autor (2024).

Para as fêmeas, valores positivos do eixo LD1, como encontrados em asas de indivíduos expostos à 25°C, indicam uma mudança na conformação para uma expansão da área proximal da asa que a conecta com a musculatura corporal e um alongamento da porção distal. Quando passamos para pontuações negativas desse eixo encontramos conformações com a área proximal contraída e um afinamento das porções medial e distal, comuns nas asas que passaram pelo tratamento de 10°C (Figura 4). Asas com valores negativos no LD2, como as do tratamento a 15°C, tendem a ser mais delgadas, se tornando mais arredondadas e dilatadas conforme a pontuação nesse eixo se torna mais positiva (Figura 5).

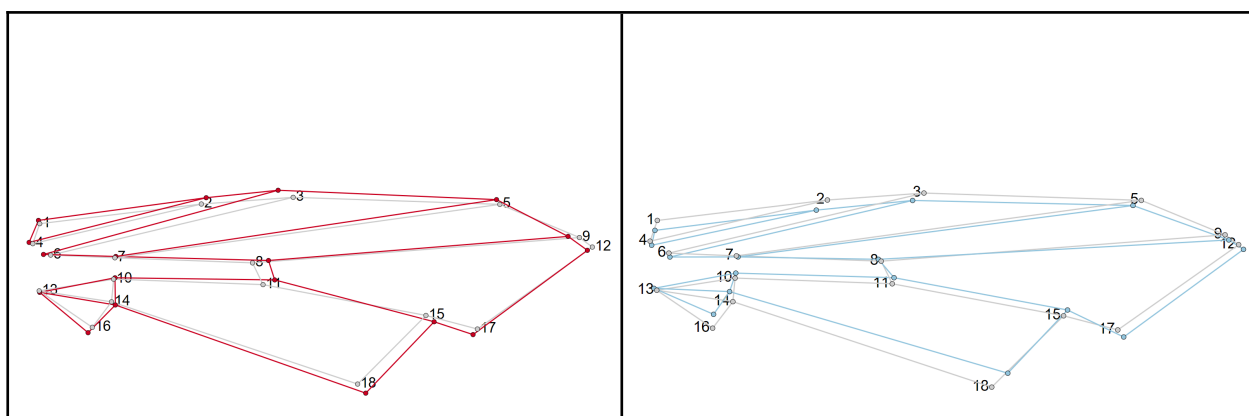
Apesar de boa parte desses padrões se repetirem nos machos, eles apresentam algumas particularidades. No caso do eixo LD1, os valores positivos continuam sendo relacionados ao alongamento da porção distal e à expansão na área proximal, mas os valores negativos apontam para um padrão mais angular, além de afilado (Figura 6). O padrão no LD2 é o que mais difere das fêmeas, uma vez que os valores negativos nele apontam para uma asa com mudanças muito sutis para o encurtamento da porção distal, ao passo que conforme a pontuação se torna positiva, existe uma tendência de alongamento dessa mesma porção (Figura 7).

FIGURA 4 - CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE FÊMEAS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD1 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.



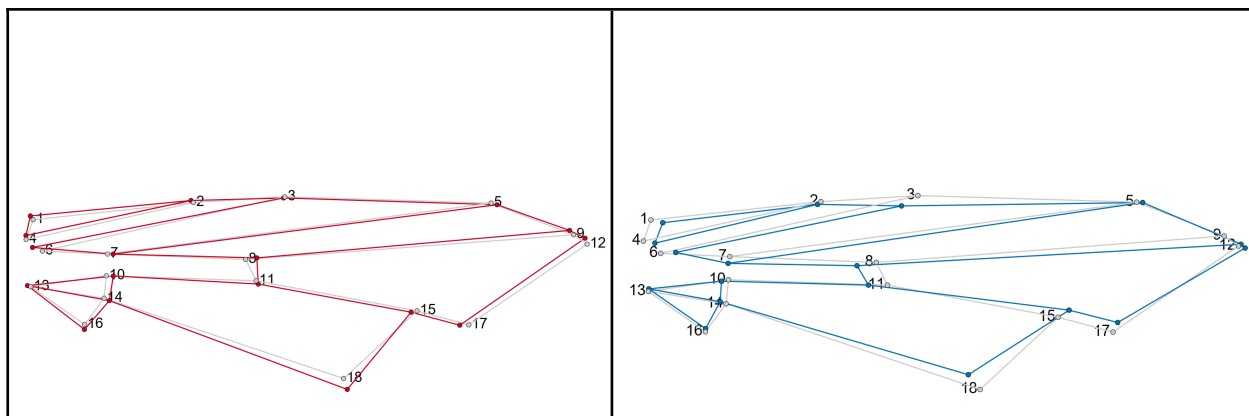
FONTE: O autor (2024).

FIGURA 5 - CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE FÊMEAS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD2 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.



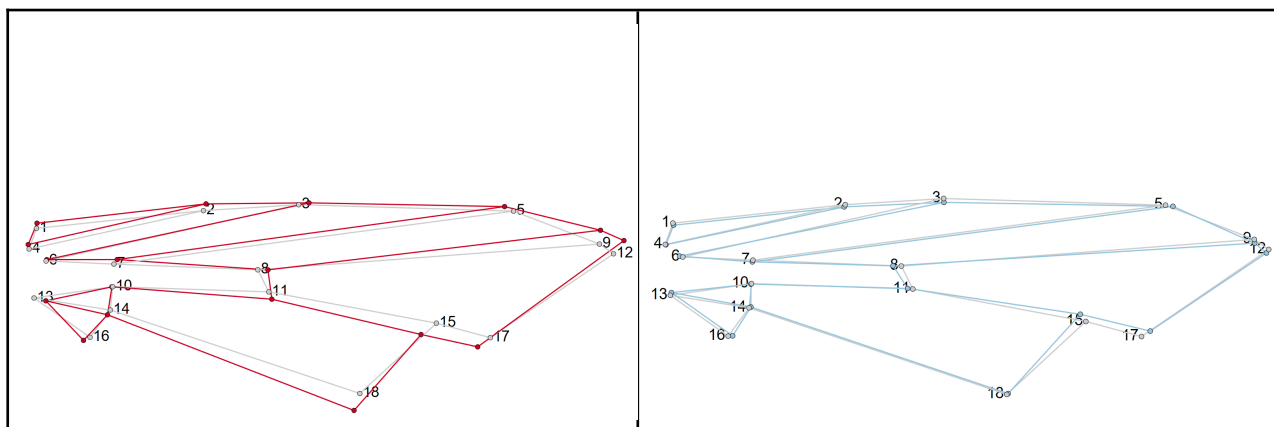
FONTE: O autor (2024).

FIGURA 6 - CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD1 NO QUADRO A ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.



FONTE: O autor (2024).

FIGURA 7 - CONFORMAÇÕES DAS ASAS DE MACHOS DE *SARCONESIA CHLOROGASTER* (WIED.) EM COMPARAÇÃO A CONFIGURAÇÃO CONSENSO (LINHAS CINZAS), COM VALORES POSITIVOS DO LD2 NO QUADRO À ESQUERDA, NEGATIVOS NO QUADRO À DIREITA.



FONTE: O autor (2024).

5 DISCUSSÃO

Os nossos espécimes de *S. chlorogaster* (Wied.), tanto fêmeas quanto machos, apresentaram um fenótipo ótimo e melhor ajustado à um regime de temperatura de 15°C, no qual o tamanho de centroide encontrado, representativo do tamanho alar, foi isoladamente o maior entre as quatro temperaturas. Esse padrão condiz com os resultados encontrados na tese de mestrado de Flissak (2022), na qual o comprimento do tórax de adultos de *S. chlorogaster* (Wied.), que assim como os que utilizamos também foram advindos de uma população de Curitiba, foi maior sob esse mesmo regime.

Podemos atribuir essa plasticidade diferencial ao efeito retardante do desenvolvimento atrelado às menores temperaturas, as quais reduzem a reatividade em processos bioquímicos e desestabilizam interações intermoleculares, modificando taxas metabólicas e expressões gênicas. Devido a tais alterações, podem estender diferentes períodos da ontogênese de indivíduos, permitindo que acumulem e aloquem mais recursos para o crescimento, levando a um maior tamanho corporal e melhor aptidão (SCHULTE et al., 2011). Porém, existem limites de tolerância à temperatura, os quais podem ser observados nesta espécie abaixo de 15°C, quando o tamanho passa a se tornar consideravelmente menor. Além disso, como a temperatura média compensada anual de Curitiba é de 17.8°C (INMET, 2024), é de se esperar que os espécimes utilizados estejam mais aclimatados a esse regime em comparação aos demais tratamentos aplicados por um pequeno período de tempo, resultando em respostas adaptativas e não apenas agudas como no caso das temperaturas de 10°, 20° e 25°C (GHALAMBOR et al., 2007).

Também explorando populações coletadas em Curitiba, LECHETA et al. (2015) realizaram um experimento para comparar os efeitos de cinco regimes de temperatura sobre o desenvolvimento larval e pupal de *S. chlorogaster*, resultando na descoberta de que pupas criadas sob temperaturas intermediárias de 15° a 25°C apresentaram mortalidade de 4%, ao passo que aquelas à 10°C e 30°C tiveram uma mortalidade mais que quatro vezes maior, de cerca de 16,7%. Os adultos emergidos dessas pupas foram utilizados no presente estudo e nós encontramos uma clara separação, tanto no tamanho quanto na forma, entre um grupo contendo aqueles organismos desenvolvidos em regimes dessas temperaturas intermediárias e um

outro com aqueles expostos a uma temperatura mais extrema. Sendo assim, é possível concluir que os indivíduos de *S. chlorogaster* que cresceram sob temperaturas de 15° a 25°C não só tiveram maiores tamanhos em relação aos submetidos ao tratamento da temperatura 10°C, mas também maior sobrevivência e por consequência valor adaptativo, tornando o fenótipo melhor adaptado para *S. chlorogaster* nestas condições.

Flissak (2022) determinou como o dimorfismo sexual ocorre em *S. chlorogaster*, chegando à conclusão de que machos de *S. chlorogaster* são maiores que as fêmeas em todas as populações estudadas, no entanto, os fenótipos ótimos diferem entre as populações. Nossos resultados indicam que isso também ocorreu com o tamanho da asa na população de Curitiba, embora o efeito do regime de temperatura seja o principal fator que influencia o tamanho da asa e. Isso também ocorre porque as normas de reação entre machos e fêmeas, para a população de Curitiba, são semelhantes, o que não ocorre em outras populações, ou seja, existem diferenças de tamanho entre sexos, mas eles se comportam como um só, apresentando respostas paralelas (FLISSAK, 2022). Na análise da forma alar, machos e fêmeas apresentaram algumas distinções em função dos regimes de temperatura. Enquanto para as fêmeas cada um dos tratamentos afetou de maneira única o desenvolvimento das asas, para os machos as temperaturas de 15° a 25°C provocaram mudanças similares no formato alar. Tais achados também estão em consonância com a linearidade da norma de reação do tamanho encontrada nas fêmeas do estudo de Flissak e apontam para a existência de maior plasticidade na forma das fêmeas em relação a forma dos machos, uma vez que, mesmo que ambos tenham sido expostos igualmente, um sexo foi mais sensível à alteração das condições. Como existe essa diferença entre os sexos na resposta, é possível que a forma da asa represente um *trade-off* entre reprodução e dispersão, que é fundamental para encontrar sítios de reprodução (ALVES et al., 2016). Mas, uma hipótese alternativa seria que os resultados entre os sexos representam as resoluções alométricas do efeito da temperatura no tamanho entre os sexos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desvendar a maneira como organismos mudam em função de diversos aspectos ecológicos e evolutivos é fundamental, uma vez que podemos utilizar esse conhecimento para realizar predições com base em outros dados, que podem ser de outros organismos em situações diferentes. Assim, determinamos que a resposta plástica de *Sarconesia chlorogaster* (Wiedemann, 1830) varia entre os sexos, mas no caso do tamanho da asa, essa variação tem a mesma direção. Já no caso da forma da asa, as fêmeas respondem mais à variação na temperatura do que os machos, indicando possíveis papéis da reprodução nesse padrão. Nesse sentido, o estudo aqui apresentado traz uma série de novos *insights*, podendo dar luz a indagações que completem as lacunas deixadas pelo nosso desenho experimental.

REFERÊNCIAS

- MATEUS, R.P; MOURA, M.O; MANFRIN, M.H; MONTEIRO, S.G; SENE, F.N. Contrasting Patterns of Within-Species Morphological Variation in Two Cactophilic *Drosophila* Species (Diptera: Drosophilidae). *Neotropical Entomology*, 42, p. 384-392, 2013.
- COSTA, M; MATEUS, R.P.; MOURA, M.O. Constant fluctuating asymmetry but not directional asymmetry along the geographic distribution of *Drosophila antonietae* (Diptera, Drosophilidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 59, p. 337-342 , 2015.
- CARMO, R.F.R; ASTÚA, D.; VASCONCELOS, S.D. Environmental conditions differently affect the wing size and shape of two blow fly species (Calliphoridae) of forensic importance in the Brazilian tropical ecosystems. *International Journal of Tropical Insect Science*, Vol. 42, p. 1903-1911, 2022.
- CHAIPHONGPACHARA, T.; DUVALET, G.; CHANGBUNJONG, T. Wing Phenotypic Variation among *Stomoxys calcitrans* (Diptera: Muscidae) Populations in Thailand. *Insects*, 13, 405, 2022.
- FLISSAK, J.C. Dimorfismo sexual de tamanho em *Sarconesia chlorogaster* (WIEDEMANN) (DIPTERA: CALLIPHORIDAE): Variação geográfica e o papel do desenvolvimento larval. 2022. 62 f. Tese (Doutorado em Entomologia) - Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.
- ALVES, V.M; MOURA, M.O; CARVALHO, C.J.B. Wing shape is influenced by environmental variability in *Polietina orbitalis* (Stein) (Diptera: Muscidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 60, p. 150-156, 2016.
- LECHETA, M.C. Efeitos da temperatura no desenvolvimento de *Sarconesia chlorogaster* (WIEDEMANN, 1830) (DIPTERA, CALLIPHORIDAE) e sua possível utilização na entomologia forense. 2012. 77 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia) - Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

LECHETA, M.C; THYSSEN, P.J.; MOURA, M.O. The effect of temperature on development of *Sarconesia chlorogaster*, a blowfly of forensic importance. Forensic Science, Medicine and Pathology. 11: 538-543, 2015.

LECHETA, M.C; CORRÊA, R.C; MOURA, M.O. Climate Shapes the Geographic Distribution of the Blowfly *Sarconesia chlorogaster* (Diptera: Calliphoridae): An Environmental Niche Modeling Approach. Environmental Entomology. Vol. 0, No. 0, p. 1-9, 2017.

ESPERK, T.; TAMMARU, T; NYLIN, S.; TEDER, T. Achieving high sexual size dimorphism in insects: females add instars. Ecological Entomology, 32, p. 243-256, 2007.

REIS, M.; SIOMAVA, N.; WIMMER, E.A; POSNIEN, N. Conserved and Divergent Aspects of Plasticity and Sexual Dimorphism in Wing Size and Shape in Three Diptera. Frontiers in Ecology and Evolution. 9: 660546, 2021.

SHIMMI, O.; MATSUDA, S.; HATAKEYAMA, M. Insights into the molecular mechanisms underlying diversified wing venation among insects. Proceedings of the Royal Society. B 281: 20140264, 2014.

FORNEL, R.; CORDEIRO-ESTRELA, P. Morfometria geométrica e a quantificação da forma dos organismos, 2012. DOI: 10.13140/2.1.1793.1844.

HOFFMANN, A. A.; COLLINS, E.; WOODS, R.E. Wing shape and wing size changes as indicators of environmental stress in *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae) moths: comparing shifts in means, variances and asymmetries. Environmental Entomology, 31, p. 965-971, 2002.

EMLLEN, D.J.; NIJHOUT, H.F. The development and evolution of exaggerated morphologies in insects. Annual Review of Entomology, 45, p. 661-708, 2000.

ADAMS, D.C.; ROHLF, F.J.; SLICE, D.E. Geometric morphometrics: ten years of progress following the 'revolution'. Italian Journal of Zoology 71: p. 5-16, 2004.

MONTEIRO, L.R.; dos REIS, S.F. Princípios de Morfometria Geométrica. Holos Editora, Ribeirão Preto, 1999. p. 97-128.

SLICE, D.E. Modern morphometrics In. SLICE, D.E. Modern morphometrics in physical anthropology. Springer New York, NY, 2005. p. 1-45.

MORATORE, C. Padrões genético-morfológicos em populações de *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae). 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Parasitologia, Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, 2009.

SILVEIRA, B.E. Morfometria geométrica comparativa de asas de Sarcophagidae (Diptera) de interesse forense: uma ferramenta eficaz para a identificação? 2011. 76 f. Dissertação (Mestrado em Entomologia) - Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HALL, M.J.R; MACLEOD, N.; WARDHANA, A.H. Use of wing morphometrics to identify populations of the Old World screwworm fly, *Chrysomya bezziana* (Diptera: Calliphoridae): A preliminary study of the utility of museum specimens. Acta Tropica, 138S, S49-S55, 2014.

KHANG, T.F.; PUAAD, N.A.D.M.; TEH, S.H.; MOHAMED, Z. Random forests for predicting species identity of forensically important blow flies (Diptera: Calliphoridae) and flesh flies (Diptera: Sarcophagidae) using geometric morphometric data: Proof of concept. Journal of Forensic Sciences, 66, p. 960-970, 2021.

LYRA, M.L; HATADANI, L.M; DE AZEREDO-ESPIN, A.M.L; KLACZCO, L.B. Wing morphometry as a tool for correct identification of primary and secondary New World screwworm fly. Bulletin of Entomological Research, 100, p. 19-26, 2009.

JIMÉNEZ-MARTÍN, F. J.; CABRERO, F. J.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, A. Wing morphometrics for identification of forensically important blowflies (Diptera: Calliphoridae) in Iberian Peninsula. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 75, 2020.

VÁSQUEZ, M.; LIRIA, J. Morfometría geométrica alar para la identificación de *Chrysomya albiceps* y *C. megacephala* (Diptera: Calliphoridae) de Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, Vol. 60(3): 1249-1258, 2012.

ESPRA, S.A; TABUGO, S.R.M.; TORRES, M.A.J.; GOROSPE, J.G.; MANTING, M.M.E; DEMAYO, C.G. Describing Dimorphism in Wing Shapes in the Blowfly *Lucilia sericata* Meigen (Diptera: Calliphoridae) using Geometric Morphometrics. *Advances in Environmental Biology*, 9(19), p. 64-70, 2015.

GEMMELLARO, M.D.; FORZISI, E.G; ANDERSON, G.S; HAMILTON, G.C; WEIDNER, L.M. A geometric morphometric analysis of wing variations in shape and size of the blue bottle fly, *Calliphora vicina* (Diptera: Calliphoridae). *Environmental Entomology*, Vol. 53, 4, p. 577-586, 2024.

MACEDO, M.P; ARANTES, L.C; TIDON, R. Contrasting Responses of Wing Morphology of Three Blowfly (Diptera: Calliphoridae) Species to Competition. *Journal of Medical Entomology*, 57(3), p. 738-744, 2020.

PUCOT, J.R.; GUADALQUIVER, D.M.E.; DEMAYO, C.G. Geometric-morphometric analysis of wing shape of *Lucilla sericata* Meigen (Diptera: Calliphoridae) from two different environments. *Computational Ecology and Software*, 11(1): 35-45, 2021.

KLONG-KLAEW, T.; NGOEN-KLAN, R.; MOOPHAYAK, K.; SUKONTASON, K.; IRVINE, K.N.; TOMBERLIN, J.K.; KURAHASHI, H.; CHAREONVIRIYAPHAP, T.; SOMBOON, P.; SUKONTASON, K.L. Spatial Distribution of Forensically Significant Blow Flies in Subfamily Luciliinae (Diptera: Calliphoridae), Chiang Mai Province, Northern Thailand: Observations and Modeling Using GIS. *Insects*, 9, 181, 2018.

ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D.L.; SHEETS, H.D. Landmarks and Semilandmarks *In*: ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D.L.; SHEETS, H.D. **Geometric Morphometrics for Biologists**. Second edition. Academic Press, 2012. p. 23-50.

ROHLF, F.J.; MARCUS, L.F. A revolution in morphometrics. **Trends in Ecology & Evolution**, 8: p. 129-132, 1993.

BOOKSTEIN, F.L. Introduction *In*: BOOKSTEIN, F.L. **Morphometric tools for landmark data: Geometry and Biology**. Cambridge University Press, 1991, p. 1-19.

BOOKSTEIN, F.L. Shapes and Measures of Shape *In*: BOOKSTEIN, F.L. **Measurement of Biological Shape and Shape Change. Lecture Notes on Biomathematics**, Vol. 24. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1978, p. 4-11.

GOWER, J.C. Generalized Procrustes Analysis. *Psychometrika*, Vol. 40, No. 1, 1975.

ROHLF, F.J.; SLICE, D.E. Extensions of the Procrustes Method for the Optimal Superimposition of Landmarks. *Systematic Zoology* 39(1): p. 40-59, 1990.

KLINGENBERG, C.P. Size, shape and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. **Development, genes and evolution**, 216, p. 113-137, 2016.

ROHLF, F.J. Shape Statistics: Procrustes Superimpositions and Tangent Spaces. **Journal of Classification**, 16: p. 197-223, 1999.

BOOKSTEIN, F.L. Size and Shape Spaces for Landmark Data in Two Dimensions. **Statistical Science** 6, Vol. 1, No. 2, p. 181-242, 1986.

BOOKSTEIN, F.L. Principal warps: thin-plate splines and the decomposition of deformations. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. 11, no. 6, 1989.

MITTEROECKER, P.; GUNZ, P. Advances in geometric morphometrics. **Evolutionary Biology**, 36: p. 235-247, 2009.

ROHLF, F.J. 2015. The Tps series of software. **Hystrix**. Online first.

PERES-NETO, P.R. 1995. Introdução a análises morfométricas. Tópicos em tratamentos de dados biológicos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. p. 57-89.

ROHLF, F.J. TpsUtil File Utility Program 2022. Version 1.83. F. James Rohlf, 2023. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook. Available at: <<https://www.sbmorphometrics.org/soft-utility.html>> (accessed 01.07.22).

ROHLF, F.J. TpsDig2. Version 2.31. F. James Rohlf, 2021. Department of Ecology and Evolution, State University of New York at Stony Brook, Available at: <<https://sbmorphometrics.org/soft-dataacq.html>> (accessed 01.07.22).

R CORE TEAM (2023). **R: A Language and Environment for Statistical Computing version 4.3.1**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

ARNQVIST, G.; MÅRTENSSON, T. Measurement error in geometric morphometrics: Empirical strategies to assess and reduce its impact on measures of shapes. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 44 (1-2), pp. 73-96, 1998.

ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D.L.; SHEETS, H.D. General Linear Models In: ZELDITCH, M.L.; SWIDERSKI, D.L.; SHEETS, H.D. *Geometric Morphometrics for Biologists*. Second edition. Academic Press, 2012. p. 225-260.

HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P. "Simultaneous Inference in General Parametric Models." *Biometrical Journal* 50(3), p. 346-363, 2008.

COLLYER, M.L.; SEKORA, D.J.; ADAMS, D.C. A method for analysis of phenotypic change for phenotypes described by high-dimensional data. **Heredity**, 115, p. 357-365, 2015.

SCHULTE, P.M.; HEALY, T.M.; FANGUE, N.A. Thermal Performance Curves, Phenotypic Plasticity, and the Time Scales of Temperature Exposure. **Integrative and Comparative Biology**, volume 51, number 5, p. 691-702, 2011.

INMET. Brasil. Temperatura Média Compensada Mensal e Anual (°C) [conjunto de dados]. **Normas Climatológicas do Brasil**, período 1991-2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 01 dez. 2024.

GHALAMBOR, C.K., MCKAY, J.K., CARROL, S.P., REZNICK, D.N. Adaptive versus non-adaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. **Functional Ecology**, 21, p. 394-407, 2007