



**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA ASA DE *CERATITIS*
CAPITATA (WIEDEMANN, 1824) PARA DETECÇÃO AUTOMÁTICA EM
ARMADILHAS INTELIGENTES**

ESTER MARQUES DE SOUSA

**SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE
SÃO PAULO
AGÊNCIA PAULISTA DE TECNOLOGIA DOS AGRONEGÓCIOS
INSTITUTO BIOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANIDADE, SEGURANÇA
ALIMENTAR E AMBIENTAL NO AGRONEGÓCIO**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA ASA DE
CERATITIS CAPITATA (WIEDEMANN, 1824) PARA DETECÇÃO
AUTOMÁTICA EM ARMADILHAS INTELIGENTES**

ESTER MARQUES DE SOUSA

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutora em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio. Área de concentração: Segurança Alimentar e Sanidade no Agroecossistema.

SÃO PAULO
2023

ESTER MARQUES DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA ASA DE
CERATITIS CAPITATA (WIEDEMANN, 1824) PARA DETECÇÃO
AUTOMÁTICA EM ARMADILHAS INTELIGENTES**

Tese apresentada para a obtenção do título de
Doutora em Sanidade, Segurança Alimentar e
Ambiental no Agronegócio.

Área de concentração: Segurança Alimentar e
Sanidade no Agroecossistema.

Orientador:

Prof. Dr. Miguel F. de Souza Filho

Coorientadora:

Dra. Talía S. dos Santos Ximenes

SÃO PAULO

2023

Eu **Ester Marques de Sousa**, autorizo o Instituto Biológico (IB-APTA), da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, a disponibilizar gratuitamente e sem ressarcimento dos direitos autorais, o presente trabalho acadêmico, de minha autoria, no portal, biblioteca digital, catálogo eletrônico ou qualquer outra plataforma eletrônica do IB para fins de leitura, estudo, pesquisa e/ou impressão pela Internet desde que citada a fonte.

Assinatura: _____ Data ___/___/___

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo
Núcleo de Informação e Documentação – IB

Sousa, Ester Marques de.

Avaliação dos parâmetros morfométricos da asa de *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) para detecção automática em armadilhas inteligentes. / Ester Marques de Sousa - São Paulo, 2023.

67 p.

doi: 10.31368/PGSSAAA.2023T.ES001

Tese (Doutorado). Instituto Biológico (São Paulo). Programa de Pós-Graduação.

Área de concentração: Segurança Alimentar e Sanidade no Agroecossistema.

Linha de pesquisa: Biodiversidade: caracterização, interações, interações ecológicas em agroecossistemas.

Orientador: Miguel Francisco de Souza Filho.

Coorientador: Talia Simões dos Santos Ximenes

Versão do título para o inglês: Evaluation of wing morphometric parameters of *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) for automatic detection on both conventional and smart traps.

1. Tephritidae 2. Moscas-das-frutas 3. Morfometria geométrica 4. Armadilha inteligente 5. Rastreamento por vídeo I. Sousa, Ester Marques de II. Souza Filho, Miguel Francisco de III. Instituto Biológico (São Paulo) IV. Título.

IB/Bibl./2023/001

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ester Marques de Sousa

Título: Avaliação dos parâmetros morfométricos da asa de *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) para detecção automática em armadilhas inteligentes.

Tese apresentado ao Programa de Pós-graduação em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio do Instituto Biológico, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo para a obtenção de título de Doutora em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio.

Aprovado em: ___/___/___

Banca Examinadora

Dr. Miguel Francisco de Souza Filho Instituição: Instituto Biológico - APTA
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dra. Denise Selivon Scheepmaker Instituição: Instituto de Biociências-USP
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dr Edson Luiz Ursini Instituição: FT- UNICAMP
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dra. Marta Siviero Guilherme Pires Instituição: FT - UNICAMP
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dr. Marcoandre Savaris Instituição: Entomologia e Acarologia – ESALQ
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Aos meus pais, Dionísio e Sandra, que são
meu exemplo maior de amor, carinho, dedicação,
coragem e temor a Deus,
OFEREÇO.

À minha família, pais, irmãos, sobrinhos e
marido, que são meu suporte emocional e minha
fortaleza,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel Francisco de Souza Filho, meu orientador, pela confiança depositada em mim, pelos ensinamentos dispensados que vão muito além do doutorado, pela contribuição no desenvolvimento da tese, pelos direcionamentos, experiências compartilhadas e por me encorajar nos momentos difíceis e até pelos momentos que me orientou a descasar.

À minha coorientadora, Dra. Talía Simões dos Santos Ximenes, por aceitar esse desafio e por acreditar em mim e na nossa parceria. Sua confiança e colaboração foram fundamentais para o desenvolvimento da nossa pesquisa.

Ao Dr. Adalton Raga, pela parceria desde o mestrado, por todos os projetos que desenvolvemos juntos, por sempre me incentivar e acreditar em mim, por todas as discussões científicas e sobre a vida, por me ajudar na escolha do tema, pela disposição em ajudar sempre que precisei e por todos os bons momentos e risadas no laboratório.

Ao Me. Rodrigo Luiz Ximenes (FT/UNICAMP), por todo o tempo despendido na programação e designer da armadilha inteligente, por aceitar essa parceria e acreditar no potencial da nossa pesquisa.

A Dra. Denise Selivon Scheepmaker (USP), Dr. Dori Edson Nava (Embrapa Clima Temperado) e Dr. Jair Fernandes Virginio (Biofábrica Moscamed Brasil), pela doação de pupas para os experimentos de morfometria geométrica.

Ao Prof. Dr. Alessandro Marques de Oliveira (UEMG) e a mestranda Isamara Silva dos Santos (INPA) pelas orientações nas análises morfométricas e disposição em ajudar sempre que precisei.

Ao Dr. Valmir Antônio Costa (IB), por me ensinar a montagem permanente das lâminas e pelos materiais doados para montá-las, por me deixar encantada pela fotografia de insetos e pelos ótimos ensinamentos.

Ao Dr. Jeferson Mineiro (IB) pelos materiais doados para montagem das lâminas, pelos conhecimentos compartilhados e pelos bons momentos de descontração.

Ao Me. Romildo Cássio Siloto pelos ensinamentos, bom convívio, ótimas conversas, incentivo e confiança.

A Sara Braga e Léo Rodrigo, pela amizade e companheirismo que construímos desde a graduação. Por me incentivarem e me ajudarem em várias as etapas do doutorado, e por me proporcionar bons momentos de descontração nos nossos reencontros, pelas boas risadas e conversas sobre meu projeto e sobre a vida.

A Prof. Me. Francieli Nunes, minha primeira orientadora, por acreditar no meu potencial. Por me ensinar os primeiros passos da vida acadêmica. Por todos esses anos

de amizade e parceria. Por todas as conversas sobre a pesquisa e a vida. Pelo amor em formar pessoas que tanto me inspira.

Aos colegas do Laboratório de Entomologia Econômica, sou grata pelos anos de convivência, pelo companheirismo e pelas trocas de conhecimento, por tornarem o ambiente de trabalho um local descontraído e agradável.

Aos amigos da pós-graduação, em especial a Alexsine Vanzela, pelas boas conversas e muitas risadas nas viagens para as aulas da pós-graduação.

Aos Profs. Drs. membros da banca examinadora, pela disponibilidade e pelas contribuições.

Ao programa de pós-graduação do Instituto Biológico e aos professores pela oportunidade e por contribuírem para o meu crescimento intelectual. Pelos ensinamentos passados nas disciplinas e pela disposição em conversar sobre minha pesquisa.

Aos meus pais, Dionísio e Sandra, por me apoiarem, mesmo “não entendendo direito” o que eu faço. Por me sustentarem com orações, por me ensinarem as lições mais importantes da minha vida. Por me ensinar o caminho que eu devo andar! Sou grata por me fazerem recordar a simplicidade da vida.

Aos meus irmãos, Raquel, Jeremias e Ezequiel, que apesar da distância sempre se fazem presente. Porque quando estamos juntos parece que nunca crescemos. Obrigada pelas vezes que vieram me visitar (Ezequi ainda me deve essa visita). Sou grata por sempre torcerem pelas minhas conquistas.

Ao meu marido Davi Parro, por todo o companheirismo na minha jornada, por suportar a distância, por compreender e me ajudar no processo, por todo o conforto nos momentos difíceis e pelo amor e cuidado comigo.

Por fim, agradeço a Deus, pela coragem concedida, pelos caminhos que se abrem e pelos pés aptos a trilhar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

**Não fiquem com medo, pois
estou com vocês; não se apavorem,
pois eu sou o seu Deus. Eu lhes dou
forças e os ajudo; eu os protejo com a
minha forte mão (Is. 41:10).**

RESUMO

Sousa, Ester Marques de. **Avaliação dos parâmetros morfométricos da asa de *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) para detecção automática em armadilhas convencionais e inteligentes.** 2023. 67 f. Tese (Doutorado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) – Instituto Biológico, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, São Paulo, 2023.

As moscas-das-frutas de importância econômica, como *Ceratitis capitata*, causam bilhões de dólares em perdas diretas na fruticultura mundial e limitam a exportação de frutas devido às restrições quarentenárias impostas pelo mercado internacional. A decisão sobre quando iniciar o manejo de moscas-das-frutas é baseado no reconhecimento de danos na cultura e incidência desses insetos em armadilhas e amostras de frutas. Devido à importância econômica de *C. capitata* para a fruticultura mundial, avaliamos a variação morfométrica de populações de *C. capitata* para auxiliar em banco de dados usados em armadilha inteligente com visão computacional. As ferramentas de morfometria geométrica foram usadas para comparar as posições relativas dos marcos nas asas de cinco populações de *C. capitata* do Brasil. Os resultados mostram diferenças significativas no formato das asas entre machos e fêmeas, indicando dimorfismo sexual. O tamanho e a forma da asa mostraram particularmente diferenças entre populações mantidas em diferentes dietas larvais, agrupando em dois grupos, dieta artificial e dieta natural (fruto). Esses resultados sugerem que os procedimentos morfométricos podem ser usados para fornecer informações importantes sobre a forma da asa do inseto. Esses dados têm o potencial de serem usadas para reconhecimento da forma do objeto em armadilhas inteligentes com uso de rastreamento por vídeo. Os sistemas automáticos de monitoramento de insetos têm o potencial de melhorar substancialmente a eficácia do monitoramento de moscas-das-frutas. Nossos resultados apresentam uma alta taxa de precisão na contagem de insetos e geraram um importante banco de imagens que será fundamental para identificação a nível de gênero por armadilhas inteligentes.

PALAVRAS-CHAVE: *Tephritidae*; *Moscas-das-frutas*; *morfometria geométrica*; *armadilha inteligente*; *rastreamento por vídeo*.

ABSTRACT

Sousa, Ester Marques de. **Evaluation of wing morphometric parameters of *Ceratitis capitata* for automatic detection on both conventional and smart traps.** 2023. 67 f. Tese (Doutorado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) – Instituto Biológico, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, São Paulo, 2023.

Economically important fruit flies, such as *Ceratitis capitata*, cause billions of dollars in direct losses in world fruit growing and limit fruit exports due to quarantine restrictions imposed by the international market. The decision on when to start managing fruit flies is based on recognizing crop damage and the incidence of these insects in traps and fruit samples. Due to the economic importance of *C. capitata* for world fruit growing, we evaluated the morphometric variation of *C. capitata* populations to assist in a database used in a smart trap with computer vision. Geometric morphometry tools were used to compare the relative positions of *landmarks* on the wings of five populations of *C. capitata*. The results show significant differences in wing shape between males and females of both populations, indicating sexual dimorphism. The size and shape of the wing particularly showed differences between populations maintained on different larval diets, grouping into two groups, artificial diet and natural diet (fruit). These results suggest that morphometric procedures can be used to provide important information about insect wing shape. These data are important for object shape recognition in smart traps using video tracking. Automated insect monitoring systems have the potential to substantially improve the effectiveness and monitoring of fruit flies. Our results show a high rate of accuracy in counting insects and generated an important image bank that will be essential for identification at the genus level by smart traps.

KEYWORDS: *Tephritidae*; *Fruit flies*; *geometric morphometric*; *smart trap*; *tracking*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo de vida de <i>Ceratitis capitata</i> (temperatura 25 ± 1 °C/umidade relativa $70 \pm 10\%$). Barra igual a 1mm.	19
Figura 2 - A) Criação massal de <i>Ceratitis capitata</i> (Foto: Adalton Raga); B) Criação em pequena escala de <i>C. capitata</i>	22
Figura 3 - Armadilhas usadas para monitoramento convencional de moscas-das-frutas. A) Armadilha McPhail; B) Armadilha Jackson. (Fotos: Miguel F. Souza-Filho)	24
Figura 4 A- Asas esquerda das fêmeas usadas para preparação das lâminas de cada população e suas gerações (Barra igual a 1mm).	32
Figura 4 B- Asas esquerda das fêmeas usadas para preparação das lâminas de cada população e suas gerações (Barra igual a 1mm).	322
Figura 5 - <i>Landmarks</i> usados nas asas de <i>C. capitata</i> (software tpsDig).....	34
Figura 6 A- Modificações na armadilha McPhail para contagem automática de moscas-das-frutas (Modelo1).	36
Figura 6 B- Modificações na armadilha McPhail para contagem automática de moscas-das-frutas (Modelo 2).	36
Figura 7 - Linhas programadas para detectar o movimento das moscas-das frutas, contar e fotografar.	37
Figura 8 - Teste de validação das modificações internas da armadilha.....	38
Figura 9 - Teste de validação do sistema de contagem das mosca-das-frutas.....	39
Figura 10 - Banco de imagem formado pelo sistema automatizado da armadilha McPhail.....	39
Figura 11 - Distribuição dos componentes principais em relação à porcentagem de variação para as 5 populações (parentais).	40
Figura 12 - Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para os parentais das populações estudadas. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores. .41	
Figura 13 - Análise Discriminante. Plotagem dos dois primeiros eixos indicando os grupos discriminados.....	42
Figura 14 - Peso dos Componentes Principais na separação das dietas naturais e artificias.	43

Figura 15 - Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para os parentais.	44
Figura 16 - Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para machos (M) e fêmeas (F). O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.	44
Figura 17 - <i>Wireframe</i> da forma da asa de machos (linha preta) e fêmeas (linha cinza). 45	
Figura 18 - <i>Wireframe</i> mostrando a diferença entre fêmeas (A) e machos (B) da população selvagem (linha clara) e população de inseto estéril - TSL (linhas pretas)...	46
Figura 19 - Distribuição dos componentes principais em relação à porcentagem de variação para as 5 populações (parentais).	46
Figura 20 - Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população LEE mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.	47
Figura 21 - Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população EBR mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.	48
Figura 22 - Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população TSL mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.	48
Figura 23 - Distribuição de frequência de machos	49
Figura 24 - Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para a população EBR.	49
Figura 25 - Distribuição de frequência de machos	49
Figura 26 - Detecção de movimento das moscas-das-frutas pelo programa de rastreamento da armadilha automatizada.	51
Figura 27 - Banco de imagens da armadilha automatizada. Fotos em vermelho foram invalidadas pelo sistema de contagem automática.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 . Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de <i>Ceratitis capitata</i> no Laboratório de Entomologia Econômica do Instituto Biológico, Campinas, SP.....	29
.Tabela 2 - Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de <i>Ceratitis capitata</i> na Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS (NAVA et al., 2019).	29
Tabela 3 - Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de <i>Ceratitis capitata</i> na Biofábrica Moscamed Brasil em Petrolina-PE.....	30
Tabela 4 - Número de imagens das asas de cinco populações de <i>C. capitata</i> utilizadas para análise de morfometria geométrica.	31
Tabela 5 - Descrição dos marcos anatômicos usados nas asas de <i>C. capitata</i>	34
Tabela 6 - Teste-t para centroides size das populações mantidas em dietas artificiais (I e III) e dietas naturais (IV e V), $p < 0,05$	41
Tabela 7 - Matriz de confusão (reclassificação) para machos e fêmeas dos parentais....	42
Tabela 8 - Quantidade de eixos extraídos e a sua porcentagem na separação dos grupos.	43
Tabela 9 - Matriz de confusão (reclassificação) para machos e fêmeas dos parentais.....	44
Tabela 10 - Comparação de captura entre armadilhas tradicional e com modificações no funil de entrada	50
Tabela 11 - Captura de moscas-das-frutas em armadilha automatizada.	50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 GERAL.....	18
2.2 ESPECÍFICOS.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFIA.....	19
3.1 <i>Ceratitis capitata</i> (Wiedemann, 1824).....	19
3.2. Variação do tamanho corporal relacionado aos recursos alimentares.....	20
3.2.1 Criação de <i>Ceratitis capitata</i> em laboratório.....	21
3.3 Monitoramento populacional de moscas-das-frutas.....	24
3.3.1 Monitoramento automatizado de moscas-das-frutas.....	25
3.3.2 Visão Computacional.....	26
3.4 Morfometria geométrica.....	27
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1 Populações de <i>Ceratitis capitata</i>	29
4.2 Morfometria geométrica das asas de <i>Ceratitis capitata</i>	30
4.2.1 Preparação das lâminas.....	30
4.2.2 Morfometria geométrica.....	31
4.2.3 Variação morfométrica associada à mudança na dieta larval.....	35
4.3 Armadilha automatizada.....	35
4.3.1 Programação.....	37
4.3.2 Testes de validação da armadilha para contagem dos insetos.....	38
5 RESULTADOS.....	40
5.1 Morfometria geométrica.....	40
5.1.2 Análise comparativa entre as dietas larvais dos parentais.....	41
5.1.3 Análise comparativa entre os machos e fêmeas dos parentais.....	43
5.1.4 Análise comparativa entre os parentais e suas gerações.....	46
5.1.5 Análise comparativa entre as dietas larvais dos parentais e suas gerações....	47
5.2 Armadilha automatizada.....	49
5.2.1 Teste de validação das modificações internas da armadilha.....	49
5.2.2 Validação do sistema de contagem.....	50
6 DISCUSSÃO.....	52
7 REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

As moscas-das-frutas (Tephritidae) de importância econômica causam bilhões de dólares em perdas diretas na fruticultura mundial, podendo chegar a 120 milhões de dólares/ano no Brasil, influenciando negativamente à produção e limitando a exportação de frutas devido às restrições quarentenárias impostas pelo mercado internacional (ALMEIDA et al., 2019; ALUJA; MANGAN, 2008; MOSCAMED, 2021; RAGA, 2005). Muitas espécies de tefritídeos de importância econômica apresentam características que as tornam a mais importante praga da fruticultura. Entre essas características, podemos destacar altas taxas reprodutivas (insetos multivoltinos), adaptabilidade às condições climáticas e polifagia (WHITE; ELSON-HARRIS, 1994; BATEMAN, 1972). Geralmente, os tefritídeos de importância econômica que apresentam essas características são responsáveis pelas maiores perdas na produção e dificultam o manejo.

Os tefritídeos depositam os ovos no interior do fruto, as larvas eclodem e se alimentam da polpa. Como resultado, a fruta cai precocemente ou sua qualidade se degrada (SALLES, 1999; RAGA et al., 1997; SANTOS et al., 2008; LORSCHWEITER et al., 2012). A decisão sobre quando iniciar o manejo de moscas-das-frutas é baseada no reconhecimento de danos na cultura e incidência desses insetos em armadilhas e amostras de frutas (RAGA; GALDINO, 2017; LOUZEIRO et al., 2021).

Para uma correta tomada de decisão de controle de moscas-das-frutas é necessário empregar um sistema de monitoramento populacional, que é uma importante ferramenta fitossanitária (LANCE, 2014) e atua como alerta da incidência da praga no pomar. O monitoramento tradicional é feito utilizando-se armadilhas que atraem adultos com sinais químicos que se originam de atrativos sexuais ou alimentares (ALUJA et al., 1989; MALAVASI, 2000; SILVA et al., 2011). A inspeção visual das armadilhas é realizada por um operador humano para coleta de insetos, triagem e análise de dados (ALUJA et al., 1989).

Por sua vez, o monitoramento automatizado com uso de armadilhas inteligentes gera dados diários ou em tempo real da captura do inseto alvo. Essas informações servem de base para estudos da biologia e comportamento do inseto e como modelos para prever os riscos de uma infestação e sua progressão. Além disso, auxilia a detectar o momento em que a população do inseto praga atinge o nível de controle e consequente redução do uso de inseticidas (POTAMITIS; RIGAKIS; TATLAS, 2017).

Alguns modelos de armadilhas automatizadas vêm sendo estudadas para moscas-das-frutas em diferentes regiões do mundo, por exemplo: Europa, Chile e Austrália. Nos sistemas propostos a contagem varia conforme o modelo da armadilha, usando desde sensores opto-eletrônicos para análise do espectro opto-acústico da batida de asa, sensores de passagem, até mesmo câmeras fotográficas acopladas com painel fotovoltaico e sensores climáticos (DOITSIDIS et al., 2017; POTAMITIS; RIGAKIS; TATLAS, 2017; SHAKED et al., 2017).

Aqui propomos a utilização de *tracking* (rastreamento por vídeo) para uso em armadilha de monitoramento de moscas-das-frutas. A utilização de sistemas automáticos de aquisição de dados baseados em *tracking* já é uma realidade para avaliar a trajetória de animais e pode ser aplicado no monitoramento de insetos quando adicionados a armadilhas inteligentes. Para avaliar a movimentação do inseto é importante informar ao algoritmo de rastreamento a aparência, forma e tamanho do objeto (inseto). No nosso caso, o conhecimento da forma do inseto pode ser obtida por meio de análise de morfometria geométrica.

Com a utilização dessa técnica é possível analisar o tamanho da forma e revelar padrões biológicos relacionados à herdabilidade e sensibilidade ambiental (KLINGENBERG, 2010), ou seja, almeja não somente quantificar as formas biológicas, mas também analisar as causas que levam às diferenças de forma (MONTEIRO; REIS, 1999). Além disso, a morfometria geométrica é considerada uma técnica rápida e de baixo custo (ADAMS et al., 2013; KLINGENBERG, 2013) que pode ser implementada com sucesso na identificação e caracterização da diversidade de muitos insetos.

Os trabalhos com resultados sobre a morfometria geométrica de algumas espécies de *Anastrepha* são promissores (NASCIMENTO, 2000, 2005). No entanto, tem sido pouco utilizados para estudos com *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824). Devido à importância econômica de *C. capitata* para a fruticultura mundial, pretendemos avaliar a variação morfométrica de populações de *C. capitata* para auxiliar em banco de dados usados em armadilha inteligente com visão computacional.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a variação morfométrica de populações de *Ceratitis capitata* para contribuição em banco de dados usados em armadilha inteligente com visão computacional.

2.2 ESPECÍFICOS

- Analisar as variações morfológicas alares de *C. capitata* por meio de morfometria geométrica;
- Verificar se existem diferenças morfométricas alares entre populações de *C. capitata* mantidas em dieta artificial e dieta natural (fruto);
- Avaliar as diferenças morfométricas alares entre machos e fêmeas de *C. capitata*;
- Avaliar as variações morfométricas alares em diferentes populações e gerações de *C. capitata* mantidas sob mesma dieta artificial;
- Realizar testes de leitura de *C. capitata* em laboratório utilizando armadilha McPhail e armadilha com visão computacional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFIA

3.1 *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824)

A mosca-do-mediterrâneo ou *medfly* (*Ceratitis capitata*) é nativa da África oriental (DE MEYER et al., 2002). Sua primeira detecção pode ter ocorrido na bacia do Mediterrâneo segundo dados mencionados na segunda metade do século XIX. Atualmente, *C. capitata* está distribuída por todos os continentes (MALAVASI et al., 2000) e é uma das pragas mais prejudiciais da fruticultura mundial (LIQUIDO et al., 1991).

Ceratitis capitata é polífaga, está associada a 350 hospedeiros entre eles diversos frutos comercialmente importantes (LIQUIDO et al., 1991). É uma espécie multivoltina, que expressa alta capacidade adaptativa e seu desenvolvimento depende da área geográfica, condições climáticas e disponibilidade de plantas hospedeiras (RAGA et al., 1996; PAPADOPOULOS et al., 2014).

No Brasil, *C. capitata* foi relatada pela primeira vez em 1901 (IHERING, 1901) e atualmente está associada a 115 espécies frutíferas distribuídas em 31 famílias botânicas, com maior número de espécies infestadas em Myrtaceae (25), Rutaceae (20), Rosaceae (11), Anacardiaceae (7) e Sapotaceae (7) (ZUCCHI; MORAES, 2021).

O ciclo de vida de *C. capitata* ocorre em três ambientes: vegetação (adultos), fruto (ovos e larvas) e solo (pupas) (CARVALHO, 2005; SOUZA-FILHO et al., 2003). Os ovos são depositados de forma aglomerada logo abaixo do epicarpo do fruto onde posteriormente eclodem as larvas. As larvas completam três estágios dentro do fruto antes de empupar geralmente no solo. O adulto vive de 1 a 2 meses em condições naturais. As fêmeas alcançam a maturidade sexual com 3 a 4 dias de idade, iniciando a oviposição entre 7 e 9 dias, produzindo entre 300 e 400 ovos (NUÑEZ-BUENO, 1987) (Figura 1).

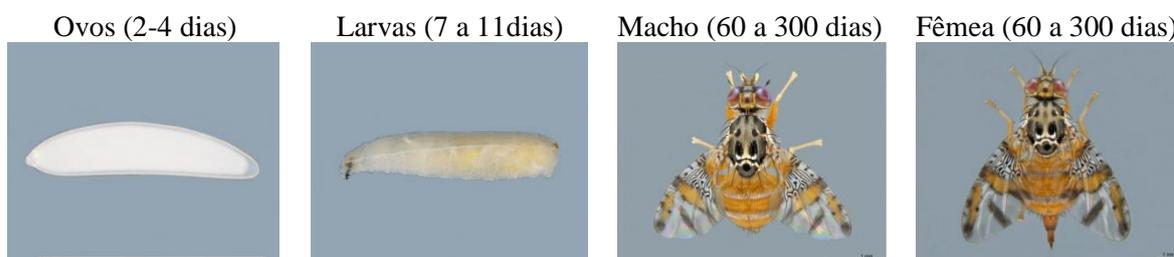


Figura 1- Ciclo de vida de *Ceratitis capitata* (temperatura 25 ± 1 °C/umidade relativa $70 \pm 10\%$). Barra igual a 1 mm.

As populações podem ocorrer o ano inteiro devido à sucessão hospedeira (RAGA et al., 2002; MONTES, et al., 2011). As fêmeas possuem a capacidade de discriminar, com pistas visuais e químicas, e depositar os ovos em hospedeiros filogeneticamente distantes (PAPADOPOULOS et al., 2014). A seleção de um bom hospedeiro assegura a sobrevivência de uma prole reprodutivamente competitiva, fator que garante o sucesso reprodutivo da espécie (WETZEL; STRONG, 2015; WETZEL et al., 2016; BIRKE; ALUJA, 2017).

3.2. Variação do tamanho corporal relacionado aos recursos alimentares

As necessidades nutricionais dos insetos variam de acordo com fatores bióticos (fase de desenvolvimento) e abióticos (temperatura e umidade relativa) (PANIZZI; PARRA, 2009). A quantidade e a qualidade dos recursos alimentares afetam o desenvolvimento das fases imatura e adulta (SLANSKY, 1986). Uma deficiência na qualidade alimentar resultará em danos no desempenho do adulto (acasalamento, dispersão, baixa fecundidade e fertilidade) e maior tempo de desenvolvimento larval (CHAPMAN, 1998).

As larvas da maioria das espécies de importância econômica de moscas-das-frutas se desenvolvem apenas dentro dos frutos, portanto a seleção da planta hospedeira é um dos pontos principais para o desenvolvimento larval e aptidão dos adultos (SINGER, 1986; BIRKE; ALUJA, 2017). As fêmeas das moscas-das-frutas selecionam os recursos de oviposição conforme seus hábitos alimentares: monófagas, oligófagas ou polífagas. *Ceratitis capitata* se enquadra no último grupo, que utilizam uma ampla gama de hospedeiros distribuídos em famílias botânicas diferentes (HERNANDEZ-ORTIZ; ALUJA, 1993).

Dentro do hospedeiro, as larvas podem selecionar porções mais adequadas para seu desenvolvimento, ou seja, são capazes de ajustar seu comportamento para aperfeiçoar a ingestão dos nutrientes. Larvas de *C. capitata* apresentam melhor desenvolvimento em porções mais maduras dos frutos (FERNANDES-DA-SILVA; ZUCOLOTO, 1993) que são mais ricas em proteína, sólidos solúveis e outros nutrientes. Em geral, as larvas dependem de compostos primários como proteínas, carboidratos, lipídios, vitaminas e sais minerais para se desenvolver.

Para *C. capitata*, um hospedeiro que possua boa fonte proteica para as larvas são preferidos, pois as proteínas aumentam o tamanho do indivíduo e diminuem o tempo de desenvolvimento imaturo (KASPI et al., 2002). A alimentação e a nutrição larval podem influenciar no peso, tempo de desenvolvimento, sobrevivência, composição química do corpo e tamanho do adulto. Portanto, adultos que se formaram de larvas bem alimentadas nutricionalmente apresentam maior capacidade na produção de óvulos, habilidade no cruzamento, sobrevivência, capacidade de dispersão e desenvolvimento de músculos e cutículas (SLANSKY; SCRIBER, 1985; ZUCOLOTO, 1991; ZUCOLOTO, 2000).

O tamanho final do adulto de *C. capitata* é importante para seu papel ecológico e potencial como inseto-praga. Indivíduos maiores são mais competitivos no acasalamento e têm maior capacidade de dispersão e fertilidade (SHARP et al., 1983; KRAINACKER et al., 1989). As fêmeas de *C. capitata* mostram ter maior interesse por machos com asas maiores e simétricas (HUNT et al., 2002). Um macho que possui uma área de asa maior produz uma vibração sonora mais alta, movimento das asas mais visíveis e mais atraente para as fêmeas (CHURCHILL STANLAND et al., 1986), o que resulta em maior sucesso de acasalamento.

No acasalamento das moscas-das-frutas polípagas como *C. capitata*, além das pistas acústicas e visuais (movimento e sons das asas), também são emitidos sinais químicos (semioquímicos). A constituição química da dieta é um dos percussores da síntese de feromônio e dos hidrocarbonetos dos insetos (RUNDLE et al., 2005).

A dispersão do adulto também está relacionada com o tamanho corporal. As populações de *C. capitata* podem apresentar dispersão de curto a longo alcance (MEATS; SMALLRIDGE, 2007). Indivíduos de tamanho maior possuem maior dispersão (logo alcance) e podem percorrer uma distância de pelo menos 50 km (ISRAELY et al., 2005).

3.2.1 Criação de *Ceratitis capitata* em laboratório

A manutenção de colônias de *C. capitata* em laboratório é importante para o desenvolvimento de pesquisa básica e aplicadas, além de estratégias de controle e erradicação. As criações podem ser em pequena ou grande escala (criação massal) (Figura 2).



Figura 2- A) Criação massal de *Ceratitidis capitata* (Foto: Adalton Raga); B) Criação em pequena escala de *C. capitata*.

Em geral, as colônias de insetos em pequena escala têm como principal objetivo o desenvolvimento de pesquisas, pois é possível obter uniformidade entre os indivíduos, possibilitando a realização de bioensaios gerais, estudo da biologia e comportamento, taxonomia, etc. Esses insetos podem ser mantidos em meio natural e/ou artificial (PARRA, 2000, 2009). Já a criação massal de insetos possibilita a liberação inundativa de predadores, parasitoides e/ou agentes entomopatogênicos em programas de controle de pragas, produção de feromônios, aplicação de controle genético e da Técnica do Inseto Estéril (TIE) (PARRA, 2000, 2009; PARRA et al., 2002). Na criação massal, é fornecida dieta artificial, que possibilita controlar os agentes patogênicos e pode reduzir custos de produção (SINGH, 1977; SINGH; MOORE, 1985; PARRA, 2001).

A TIE é a principal ferramenta de muitos programas de controle integrado de praga ao redor do mundo (DYCK et al., 2005). As premissas básicas dessa técnica são: insetos que apresentem reprodução sexuada, fêmeas com cópula única e facilidade de criação massal (PARANHOS et al., 2008). A aplicação dessa técnica em programas de manejo de pragas consiste na criação de insetos em grande escala, a esterilização dos machos e posterior liberação na área desejada. Os machos estéreis copulam com as fêmeas selvagens, interrompendo a reprodução e diminuindo a incidência da espécie alvo (KNIPLING, 1955).

Para moscas-das-frutas a TIE vem sendo usada há muito tempo por diversos países, entre eles Estados Unidos da América, México, Guatemala, Argentina, Chile,

Peru, Portugal, Tunísia, Tailândia, África do Sul e Japão. Essa técnica já foi usada com sucesso em programas de controle de espécies como *C. capitata*, *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett), *Anastrepha ludens* (Loew) e *A. obliqua* (Macquart) (HENDRICHS et al., 2002; MALAVASI; NASCIMENTO, 2003). Além de ser usada em programas de erradicação e supressão de pragas, a TIE auxilia a prevenir perdas em programas de exportação com estratégias de prevenção, contenção e exclusão de espécies pragas (IMPERATO; RAGA, 2015).

No Brasil, a TIE foi adotada em 2005 com a instalação da biofábrica Moscamed Brasil localizada no Município Juazeiro - Bahia, com o objetivo de suprimir a população de *C. capitata* nos polos de fruticultura do Vale do São Francisco. A linhagem mutante Viena 8 foi importada da *International Atomic Energy Agency* (IAEA/FAO) da Áustria, passou por diversas pesquisas de compatibilidade sexual até se iniciar a produção massal e a liberação inundativa nos pomares da região do Vale do São Francisco (PARANHOS et al., 2008).

A expansão do uso desta técnica tem comprovado sucesso em proteger áreas de fruticultura contra a infestação de moscas-das-frutas, no entanto, o sucesso depende do desempenho do macho estéril, que deve apresentar boa capacidade de dispersão, sobrevivência e desempenho sexual, em relação aos machos selvagens. Uma forma de melhorar a eficiência é aumentar em até 100 vezes a quantidade de moscas liberadas em relação à população selvagem de campo, pois aumenta a possibilidade das fêmeas copularem com os machos estéreis (KNIPLING, 1955).

Além disso, a qualidade dos indivíduos produzidos em larga escala deve ser constantemente estudada, visto que os insetos podem se tornar menos competitivos em meio artificial ao longo das gerações. Para o processo de criação massiva os estudos devem ser referentes, principalmente, à biologia (comportamento) e à nutrição (dieta artificial), para obter qualidade e eficiência. A formulação de uma nova dieta artificial pode influenciar positiva ou negativamente na qualidade do adulto, aumentando a qualidade o gerando morte na colônia. Portanto, qualquer alteração em uma criação massal pode gerar impacto no programa de controle e/ou erradicação de pragas com uso da TIE.

3.3 Monitoramento populacional de moscas-das-frutas

O sucesso de programas de manejo, controle e/ou erradicação de pragas baseia-se tanto na detecção precoce dos insetos-praga quanto no monitoramento conduzido em campo. O monitoramento populacional das moscas-das-frutas é realizado por meio da instalação de armadilhas contendo atrativos alimentares e/ou sexual em pontos estratégicos dos pomares, permitindo identificar a presença ou ausência e a incidência da mosca no local (SOUZA FILHO, 1999). Além disso, é possível determinar os índices de infestação (pupas/fruta e pupas/kg), analisar a flutuação populacional, detectar espécies exóticas ou quarentenárias e caracterizar a população das moscas-das-frutas do ponto de vista quantitativo e qualitativo (NASCIMENTO et al., 2000; CARVALHO, 2005; RAGA, 2005).

A eficácia do monitoramento de adultos de moscas-das-frutas depende da qualidade do atrativo alimentar ou sexual, do tipo de armadilha empregado e de sua localização em campo (ALUJA et al., 1989). No monitoramento em larga escala, utilizam-se armadilhas tipo McPhail com atrativo alimentar, para captura de espécies de *Anastrepha* e *C. capitata* e armadilhas tipo Jackson com paraferomônios Trimedlure que atrai exclusivamente macho de *C. capitata* (NASCIMENTO et al., 2000; GOULD; RAGA, 2002; SILVA et al., 2011) (Figura 3). A inspeção manual e reposição do atrativo alimentar devem ser feitas entre 7-15 dias nas armadilhas McPhail e a troca do paraferomônio na armadilha Jackson deve ser feita entre 30-45 dias, mas isso dependendo das condições do ambiente (temperatura e umidade relativa) (RAGA, 2005).



Figura 3- Armadilhas usadas para monitoramento convencional de moscas-das-frutas. A) Armadilha McPhail; B) Armadilha Jackson. (Fotos: Miguel F. Souza-Filho)

Com os dados coletados nas armadilhas se calcula o índice de moscas por armadilhas por dia ($\text{Moscas}/\text{Armadilha}/\text{Dia} = \text{MAD}$), dividindo-se o número total de moscas do mesmo gênero pelo número de armadilhas instaladas e pelo número de dias que ficou em exposição em campo. Quando a captura de *C. capitata* for maior ou se igualar a dois na armadilha Jackson ou entre um e dois adultos de *Anastrepha* spp. e/ou *C. capitata* na armadilha McPhail, é recomendado iniciar os métodos de manejo para diminuir a incidência do inseto.

Em geral, o método para coleta dos dados das armadilhas consiste em repetidas idas ao campo onde a observação visual das armadilhas é realizada por um operador humano (ALUJA et al., 1989). Esse método tradicional de monitoramento é intensivo em mão de obra e, portanto, dispendioso, considerando a frequência de monitoramento necessário e o tamanho da área monitorada.

Para garantir o sucesso dos programas fitossanitário, normalmente, é necessário instalar um grande número de armadilhas em grandes áreas cultivadas, o que aumenta custo associado às visitas periódicas e utilização de produtos e equipamentos. O Sistema Nacional de Detecção de Moscas-das-Frutas do Chile, por exemplo, para manter o status de área livre de moscas-das-frutas mantém cerca de 14.500 armadilhas cobrindo as principais áreas produtoras e de risco do país, enquanto, no sul do México e norte da Guatemala têm mais de 30000 armadilhas distribuídas para monitoramento de *C. capitata* (JANG et al., 2014).

3.3.1 Monitoramento automatizado de moscas-das-frutas

O método tradicional de monitoramento de moscas-das-frutas está diretamente ligado a fatores falíveis como (I) dependência de mão de obra treinada. A interrupção do monitoramento pela falta de mão de obra treinada e de qualidade é rotineira quando levamos em consideração um longo período de tempo e o tamanho da área monitorada. Esse processo remete à falta de credibilidade nos dados coletados; (II) interação negativa dos fatores climáticos. Os fatores climáticos podem interferir negativamente no monitoramento, atuando a deterioração dos espécimes coletados e impedindo ou interrompendo a inspeção das armadilhas; (III) a dinâmica da densidade populacional das moscas-das-frutas no campo não pode ser monitorada com precisão, uma vez que o

índice MAD é obtido por meio de uma média semanal; (IV) impossibilidade de associar qual o momento de maior captura/atratividade, informação crucial para escolha do controle adequado; (V) demora no resultado.

O desenvolvimento de armadilhas inteligentes para o monitoramento automatizado, portanto, poderia aumentar a eficácia desses programas e reduzir custos. Alguns modelos de armadilhas automatizadas vêm sendo estudadas para moscas-das-frutas em diferentes regiões do mundo. Shaked et al. (2017) testaram dois modelos de armadilhas eletrônicas para *C. capitata*, *Bactrocera oleae* (Rossi), *Dacus ciliatus* Loew e *Rhagoletis cerasi* (L.) em pomares da Itália, Grécia e Israel. Eles usaram armadilha do tipo Jackson para *C. capitata* e *B. oleae* e projetaram outra armadilha usando piso adesivo amarelo para *D. ciliatus* e *R. cerasi*, ambas usam sistemas ópticos e eletrônicos para obtenção da imagem e contagem dos insetos.

Potamitis et al. (2017) desenvolveram uma armadilha para detecção de *B. oleae* baseada em sensores que detectam diferenças na transmissão de luz resultantes da entrada de insetos na armadilha. Com este sistema, foi possível distinguir moscas-das-frutas de outros insetos com 91% de precisão, mas não entre espécies de moscas-das-frutas. Deqin et al. (2016) construíram um sistema de rastreamento e contagem de *B. dorsalis* (Hendel) baseado em visão computacional para conhecer o comportamento da espécie no pomar. Esse sistema obteve precisão de mais de 98%.

3.3.2 Visão Computacional

A visão humana é construída pelo cérebro. Os olhos funcionam como órgãos de conversão de estímulo luminoso em sinais elétricos, os quais são levados ao córtex occipital através dos nervos e vias ópticas. No córtex, os impulsos são decodificados na forma de uma impressão visual (SOUSA, 1997). Nos sistemas computacionais, a ciência responsável por estudar a visão das máquinas é a chamada Visão Computacional (BALLARD, 1982).

A visão computacional fornece a um computador informações de uma imagem capturada por câmeras de vídeo. Estas informações permitem à máquina enxergar o meio à sua volta, manipular e decodificar sobre os objetos que compõem uma imagem, além de executar tarefas inteligentes, simulando e aproximando-se da inteligência humana (BALLARD, 1982; MILANO; HONORATO, 2014).

Uma das áreas mais recentes da visão computacional é o *tracking* (rastreamento por vídeo). O interesse no rastreamento de objetos aumentou nos últimos anos com a disponibilidade de câmeras de vídeo de alta qualidade e baixo custo. Existem três etapas principais na análise de vídeo: (I) detecção do objeto em movimento, (II) rastreamento de tais objetos de quadro a quadro e (III) análise de rastros de objetos para reconhecer seu comportamento (YILMAZ; JAVED; SHAH, 2006). No entanto, rastrear objetos em movimento com base no fluxo de vídeo ainda é um grande desafio.

A utilização de sistemas automáticos de aquisição de dados baseados em *tracking* já é uma realidade para avaliar a trajetória de animais e pode ser aplicado no monitoramento de insetos quando adicionados a armadilhas inteligentes. Para avaliar a movimentação do inseto é importante informar ao algoritmo de rastreamento a aparência do objeto (no nosso, um inseto), forma e tamanho (HUSSAINI et al., 2009). O conhecimento da forma do inseto pode ser obtido por meio de análise de morfometria geométrica. Para moscas-das-frutas, estudos baseados em visão computacional e rastreamento por vídeo já foram realizados para *B. dorsalis* (DEQIN et al., 2016).

3.4 Morfometria geométrica

O termo morfometria, medida (metron) da forma (morphe), foi proposto em 1965 como um estudo da forma e tamanho dos organismos, analisados de forma quantitativa (MONTEIRO; REIS, 1999). Em 1993, o conceito de morfometria foi revisado por Rohlf e Marcus que definiram uma metodologia para estudos estatísticos da variação da forma dos organismos e da covariação da forma com causas intrínsecas e extrínsecas, ou seja, relacionando Biologia, Estatística e Geometria (ROHLF; MARCUS, 1993; MONTEIRO et al., 2000).

Esse período ficou conhecido como “a revolução na morfometria”. Uma nova abordagem, agora conhecida como morfometria geométrica considera que as coordenadas cartesianas são mais úteis que as medidas tradicionais e apresentam maior robustez estatística. Os dados são registrados a partir de marcos anatômicos homólogos (coordenadas cartesianas) para capturar a geometria do organismo estudado, o que permite perceber, estatisticamente, onde as mudanças na forma estão acontecendo (ROHLF; MARCUS, 1993). Os marcos anatômicos são pontos de correspondência em

cada organismo que coincidem entre e dentro da população (DRYDEN; MARDIA, 1998).

Uma das grandes vantagens da morfometria geométrica é o baixo custo e a capacidade de fornecer informações sobre variabilidade fenotípica e estrutura populacional (ADAMS et al., 2013; KLINGENBERG, 2013). Com a utilização dessa técnica é possível analisar o tamanho e forma e revelar padrões biológicos relacionados à herdabilidade e à sensibilidade ambiental (KLINGENBERG, 2010).

Diferentemente da morfometria tradicional, a morfometria geométrica utiliza ferramentas de imagens para aquisição das coordenadas dos marcos anatômicos e computadores para análise dos dados (ZELDITCH et al., 2004). Isso permite a exploração e visualização de grandes conjuntos de dados de alta dimensão, juntamente com testes estatísticos exatos baseados em procedimentos de reamostragem (MITTEROECKER; GUNZ, 2009).

Apesar da ampla utilização para estudos de insetos, a morfometria geométrica tem sido pouco utilizada para estudos com *C. capitata*. Souza et al. (2015) realizaram um estudo para entender o sucesso de acasalamento e as mudanças associadas na forma das asas em machos estéreis e selvagens. Pieterse et al. (2017), estudaram a influência de diferentes hospedeiros na forma da asa de *C. capitata*. O estudo mais atual, sobre morfometria geométrica com *C. capitata*, investiga a relação entre a variação morfológica em populações da mosca em diferentes sistemas agroecológicos (diferentes agroecossistemas climáticos e edáficos) na Croácia (LEMIC et al., 2020).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Populações de *Ceratitis capitata*

Foram estudadas quatro populações de *C. capitata* criadas em laboratório (Tabela 1-3) e uma população selvagem. As populações de laboratório foram obtidas de colônias de diferentes laboratórios do Brasil e criadas em diferentes tipos de dieta larval.

I- Laboratório de Entomologia Econômica- Instituto Biológico-SP (LEE)

Tabela 1. Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de *Ceratitis capitata* no Laboratório de Entomologia Econômica do Instituto Biológico, Campinas, SP.

Ingredientes	Quantidade
Cenoura liofilizada (g)	50
Levedo de cerveja (g)	40
Açúcar mascavo (g)	160
Leite em pó (g)	50
Nipagin (g)	2,5
Ácido benzoico (mL)	400
Ácido clorídrico (mL)	20
Bagacilho de cana-de-açúcar (g)	125

II- Laboratório da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS (EBR)

Tabela 2- Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de *Ceratitis capitata* na Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS (NAVA et al., 2019).

Ingredientes	Quantidade
Levedura de cerveja (g)	90
Açúcar refinado (g)	90
Ágar (g)	4,5
Benzoato de sódio (g)	1,5
Nipagin (mL)	12
Ácido clorídrico 37% (mL)	10
Água destilada (mL)	1000
Gérmen de trigo (g)	90

III- Biofábrica Moscamed Brasil, linhagem Viena 8 (TSL)

Tabela 3- Ingredientes utilizados para o preparo da dieta artificial visando o desenvolvimento larval de *Ceratitis capitata* na Biofábrica Moscamed Brasil em Petrolina-PE.

Ingredientes	Quantidade
Farinha de soja (g)	82,4
Levedura (g)	82,4
Açúcar cristal (g)	82,4
Nipagin (g)	2,4
Água (mL)	800
Ácido cítrico (g)	20
Benzoato de sódio (g)	2
Bagacilho de cana-de-açúcar (g)	134

IV- Laboratório de Estudos Evolutivos de Moscas-das-frutas - USP

Para os indivíduos dessa colônia são fornecidas goiabas como meio de oviposição e desenvolvimento larval. Os frutos fornecidos às moscas são transferidos para potes contendo vermiculita e após 15 dias são peneirados para retirada das pupas, as quais são colocadas em uma nova gaiola para emergência.

V- População selvagem (CAF)

Essa população foi obtida de frutos de café (*Coffea arabica*) cultivados na APTA – Leste (Polo Regional de Desenvolvimento Tecnológico dos Agronegócios do Leste Paulista) localizado no município de Monte Alegre do Sul (22° 4' 41''S; 46° 46' 18''W). Os frutos coletados foram levados para o laboratório e acondicionados em caixa plástica contendo vermiculita. Após 10 dias foi realizada a peneiração para retirada das pupas. As pupas foram transferidas para gaiola para aguardar a emergência. Os adultos foram mantidos na gaiola até a coloração total das asas. Após esse período foram separados por sexo e armazenados em álcool 70%.

4.2 Morfometria geométrica das asas de *Ceratitis capitata*

4.2.1 Preparação das lâminas

Entre três e cinco dias após a emergência foram separados 60 indivíduos de cada população (30 machos e 30 fêmeas) para montagem das lâminas. Os demais adultos foram mantidos nas gaiolas para recuperação de ovos. Os adultos coletados foram fixados em álcool 70%.

Com auxílio de pinças foram removidas as asas esquerdas de cada indivíduo, as quais passaram por desidratação alcoólica durante 30 minutos. Após esse período as asas foram imersas em óleo de cravo por 15 minutos e seguiram para a preparação permanente. As asas foram colocadas sobre uma gota de Balsamo do Canadá e cobertas com lamínula (20 mm x 20 mm). As lâminas foram levadas para estufa a 35° C até a secagem completa. Após a secagem todas as asas foram fotografadas (Figura 4 A e B) com câmera Quick Start (*software* Capture 2.0.exe) acoplada a microscópio estereoscópio Zeiss– Stemi 2000-C.

4.2.2 Morfometria geométrica

Foram usadas imagens das asas esquerdas de 1200 indivíduos (machos e fêmeas) (Tabela 4). Usando o *software* TpsUtil versão 1.64 foi gerado um arquivo para análise de imagens. Posteriormente, o *software* tpsDig versão 2.22 foi usado para marcar 14 *landmarks* nas imagens, descritos em Lemic et al. (2020) (Figura 5 e Tabela 5). As interseções foram ligadas pelo método de Procrustes e as deformações relativas, parciais e o *centroid size* foram obtidos pelo *software* tpsRelw versão 1.46.

Tabela 4- Número de imagens das asas de cinco populações de *C. capitata* utilizadas para análise de morfometria geométrica.

POPULAÇÃO	Nº de gerações	Machos	Fêmeas	Total
I-Lab. Entomologia Econômica- IB	6	180	180	360
II – Lab. Embrapa Clima Temperado	6	180	180	360
III-Lab. MOSCAMED	6	180	180	360
IV- Lab. Estudos Evolutivos de Moscas-das-frutas – USP	1	30	30	60
V- Selvagem (Café)	1	30	30	60
Total de imagens				1200



Figura 4 A- Asas esquerda das fêmeas usadas para preparação das lâminas de cada população e suas gerações (Barra igual a 1mm).



Figura 4 B- Asas esquerda dos machos usados para preparação das lâminas de cada população e suas gerações (Barra igual a 1mm).

O *software* Past versão 4.03 foi usado para descrever a variação na forma das asas usando a Análise de Componente Principal (APC). Também foram obtidos os valores dos centroids size, porcentagem de variância e as elipses representando as populações. Para avaliar os padrões relacionados às dietas larvais, gerações e sexo entre as populações foi feita a análise de Função Discriminante (FD). *Wireframe* foram gerados para visualizar onde as variações ocorrem.

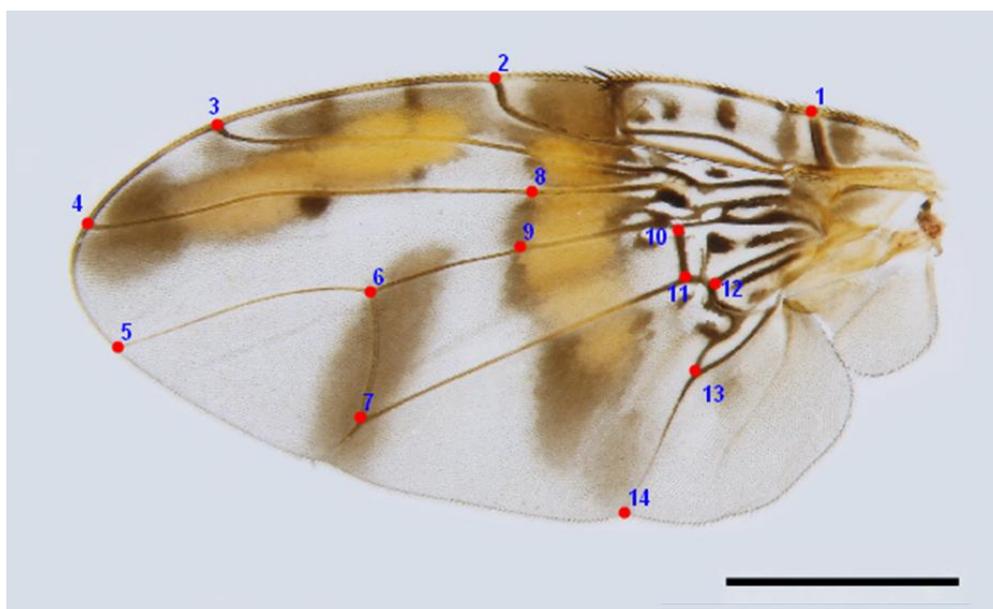


Figura 5- Landmarks usados nas asas de *C. capitata* (software tpsDig).

Tabela 5- Descrição dos marcos anatômicos usados nas asas de cinco populações de *C. capitata*.

MARCOS ANATÔMICOS	DESCRIÇÃO
1	Intersecção das nervuras costal e umeral
2	Intersecção junção da veia R ₁ e veia costal
3	Terminação da veia R ₂₊₃
4	Terminação da veia R ₄₊₅
5	Terminação da veia M
6	Intersecção da veia M e dm-cu
7	Intersecção da veia CuA1 e dm-cu
8	Intersecção da veia R ₄₊₅ e r-m
9	Intersecção da veia M e r-m
10	Intersecção da veia M e dm-bm
11	Intersecção da veia CuA1 e dm-bm
12	Intersecção de CuA1 e CuA2
13	Intersecção das veias A1 e CuA2

4.2.3 Variação morfométrica associada à mudança na dieta larval

Para avaliar se a dieta larval tem influência no tamanho e forma das asas de *C. capitata* foram utilizadas as populações I, II e III e a dieta da colônia I. Os adultos (parentais) foram mantidos em gaiolas (50x30x30cm) com lateral em tecido voil para possibilitar a oviposição e alimentados com dieta artificial (RAGA; VIEIRA, 2015; RAGA et al., 2018) e água sob condições controladas de temperatura (25 ± 1 °C), umidade relativa ($70 \pm 10\%$) e fotoperíodo (12h dia/noite). Ao lado de cada gaiola foram mantidas bandejas (30 x 18 x 3 cm) contendo água para recuperação dos ovos. Os ovos recuperados após 24 horas foram inoculados na dieta artificial. Após a emergência, os adultos (F1) foram transferidos para gaiolas e esse processo se repetiu até a quinta geração (F5).

4.3 Armadilha automatizada

A armadilha proposta consiste na automação de uma armadilha do tipo McPhail utilizando Visão Computacional. As modificações não alteram o design original já consolidado para coleta dos insetos. Todas as alterações internas foram testadas para avaliar se ocorreria redução da captura dos insetos.

Foi proposto a utilização de câmeras de vídeo em pontos diferentes da armadilha para testar a melhor área de visualização das moscas. No primeiro modelo (Figura 6A) foi introduzido de um funil de acrílico (9x8 cm) ligando a borda amarela à porção de entrada das moscas na armadilha. Esse funil foi inserido para acoplar a câmera (Genius FaceCam 320X) e aumentar a área de alcance da lente, mantendo um foco adequado e protegendo-a do atrativo alimentar (líquido). No segundo modelo (Figura 6B), o acrílico foi dispensado, pois a parte externa da câmera (Husky) já servia como proteção. A câmera foi inserida diretamente no funil invertido da armadilha, diminuindo a área de foco. Por se tratar de um protótipo, a alimentação das câmeras são feita via USB. Nos dois casos, foi necessário reduzir a área de entrada dos insetos na armadilha, para garantir que os mesmos passassem na área ideal para contagem. A área de entrada da armadilha passou a ser de 0,6 cm x 5,1 cm.

Uma segunda modificação foi na parte superior da armadilha, a qual foi pintada com tinta spray na cor prata. A alteração da cor foi necessária para impedir a variação da luz externa, pois a variação da luz pode ser identificada erroneamente como movimento. Isso foi pensado para que a armadilha pudesse operar durante o dia e a noite (a operação a noite é para manter a câmera ligada) e gerar resultados confiáveis sobre o pico de coleta dos insetos. Para suprir a necessidade de luz pela câmera, foram inseridos LEDs na parte superior interna (para o primeiro modelo) e/ou no funil invertido da armadilha (no segundo modelo), os quais foram ligados juntamente com os fios da câmera e alimentados via USB (Figura 6A e B).

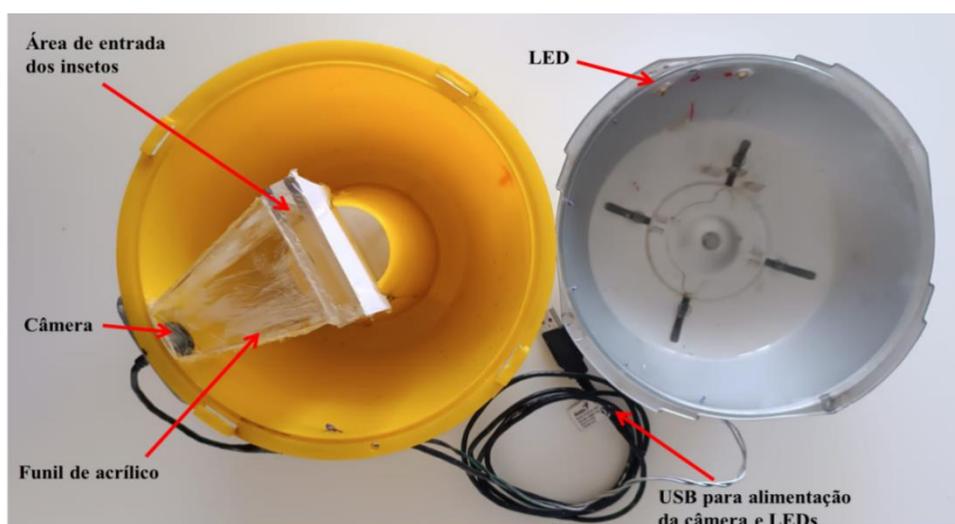


Figura 6A- Modificações na armadilha McPhail para contagem automática de moscas-das-frutas (Modelo 1).

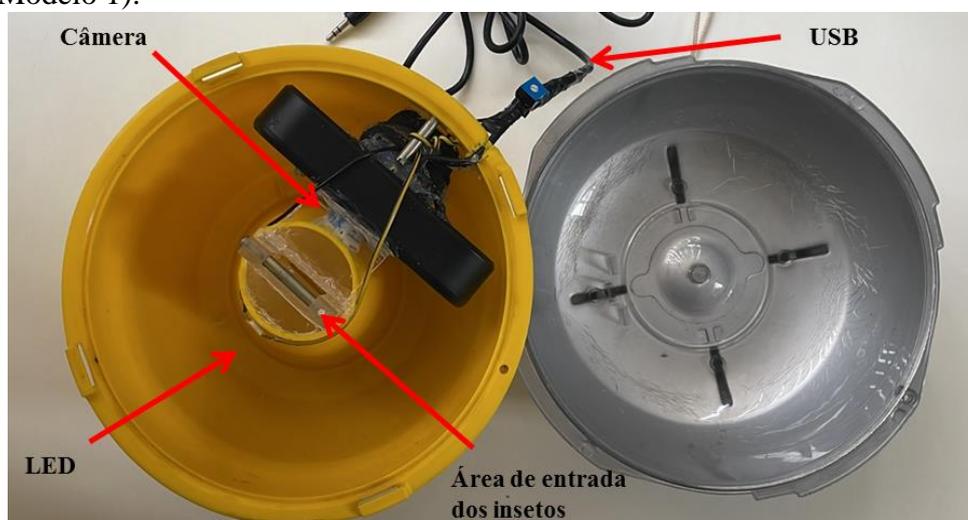


Figura 6B- Modificações na armadilha McPhail para contagem automática de moscas-das-frutas (Modelo 2).

4.3.1 Programação

A programação do sistema de contagem automático das moscas-das-frutas na armadilha foi desenvolvida em linguagem Python, o método Background Subtraction disponível na biblioteca OpenCV (Algoritmo: *KNN Background Subtraction*). Esse método é usado para melhorar a imagem e evitar erro de contagem em caso de sobreposição das moscas. Para não ocorrer erro de contagem ou dualidade (contar a mesma mosca mais de uma vez) foram programadas três linhas de passagem na área da lente da câmera (Figura 7). Na primeira linha considera-se que o inseto ainda pode sair da armadilha, portanto o movimento é detectado, mas não é fotografado. Passando da segunda linha a foto é tirada e enviada para um banco de imagens, onde serão tratadas. Passando da terceira linha é provável que o inseto não faça o movimento de saída da armadilha, então é realizada a contagem. Se a mosca sair da armadilha o programa subtrai do valor total de indivíduos capturados. A programação foi a mesma para os dois modelos. Em uma segunda etapa, foi testada a programação para identificação das moscas-das-frutas em nível de gênero e a alimentação sem fio.

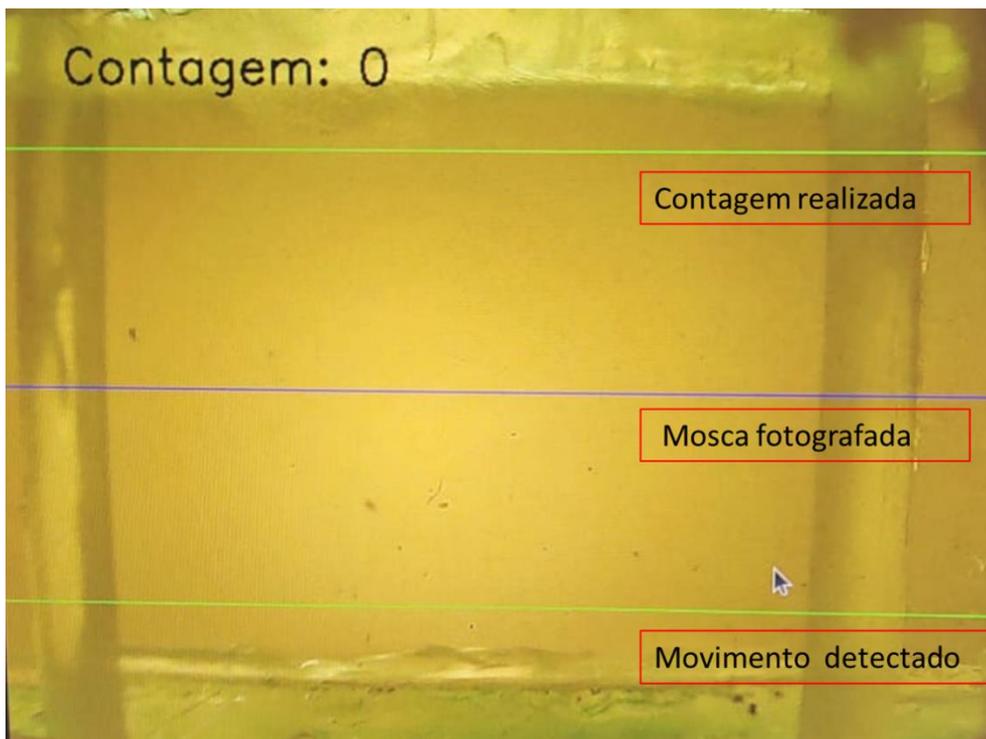


Figura 7- Linhas programadas para detectar o movimento das moscas-das frutas, contar e fotografar.

4.3.2 Testes de validação da armadilha para contagem dos insetos

A validação da armadilha foi dividida em duas etapas: I- avaliação das modificações internas e II- avaliação do sistema de contagem. Para avaliar se as modificações internas afetam a atratividade dos insetos a armadilha modificada foi comparada com uma armadilha tradicional. Em cada armadilha foi inserido o atrativo alimentar Ceratrap e em seguida penduradas em gaiolão de laboratório (Figura 8). O gaiolão apresenta formato cúbico, estrutura de alumínio com paredes de tela antiafídeo e dimensões de 1x1x1m (1 m³), exceto a base constituída completamente de acrílico, sob condições de temperatura de 25 ± 2 °C, umidade de $70 \pm 10\%$ e fotoperíodo de 12h dia/noite. Posteriormente, foram liberadas 100 adultos de *C. capitata* em cada gaiolão, simultaneamente. Os insetos capturados em cada armadilha foram contados manualmente após 48 horas, tempo estimado para que todas as moscas entrassem na armadilha.



Figura 8- Teste de validação das modificações internas da armadilha.

A segunda avaliação foi realizada para validar o sistema de contagem dos insetos. A armadilha foi pendurada a cima de uma gaiola de plástico (14x13 x13cm), onde foram liberadas 100 adultos de *C. capitata* com idade entre 5 e 7 dias. A gaiola foi escurecida para que os insetos seguissem em direção à luz dos LEDs da armadilha direto pelo túnel da armadilha voando ou caminhando pela borda do funil da armadilha (Figura 9). O processo de contagem foi realizado pelo sistema descrito no item 4.3.1.

Para confirmação, todos os insetos foram contados manualmente ao final do experimento. Todo o procedimento foi repetido por cinco vezes, com duração de cinco horas para cada repetição. A repetição é necessária para o treinamento do sistema e formação de um banco de imagens (Figura 10). A precisão do sistema foi definida como a média das contagens manual (CM) sobre a média das contagens automáticas (CA) (contagem realizada pelo sistema) e multiplicadas por 100, conforme equação abaixo:

$$P = \frac{MCM}{MCA} \cdot 100$$



Figura 9- Teste de validação do sistema de contagem das mosca-das-frutas

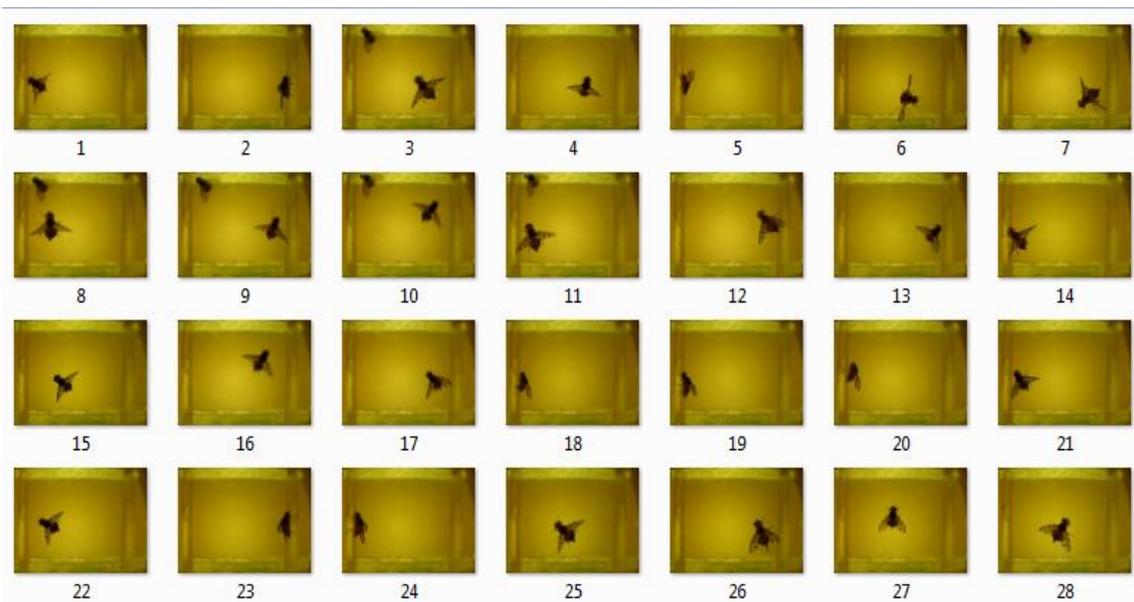


Figura 10- Banco de imagem formado pelo sistema automatizado da armadilha McPhail.

5 RESULTADOS

5.1 Morfometria geométrica

5.1.1 Análise comparativa entre os parentais

O conjunto total das variáveis morfológicas das asas dos parentais das 5 (cinco) populações estudadas resultaram em 24 deformações relativas extraídas dos 14 *landmarks* (Figura 11). Os primeiros cinco Componentes Principais (deformações relativas) explicam mais de 80% da variação da forma. Nota-se que os CP1 e CP2 representam a maior fração da variância, explicando 58,49% e 8,93% da variação de forma, respectivamente. Esses componentes foram considerados para as análises subsequentes.

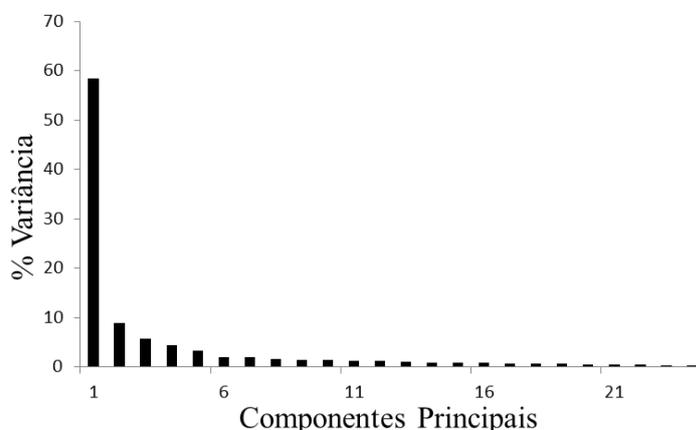


Figura 11- Distribuição dos componentes principais em relação à porcentagem de variação para as 5 populações (parentais).

O gráfico dos dois primeiros Componentes Principais (CP) tende a separar os machos das fêmeas (Figura 12). As mudanças de forma observadas no primeiro CP mostram uma tendência de encurtamento das ligações entre os pontos 2-3, 3-4, e 4-5 e um alargamento das ligações entre os pontos 1-8, 10-9, 1-10, 10-11 e 11-7 para escores positivos. Para pontuações negativas as principais mudanças ocorrem nas ligações 1-8, 10-9, 6-7, 13-14, em ambos ocorreu um encurtamento das ligações. Na CP2 para escores positivos as principais mudanças ocorreram no aumento da distância entre os pontos 1-8 e 10-9. Para valores negativos ocorre um aumento da ligação 4-8 e encurtamento das ligações dos pontos 2-3 e 3-4.

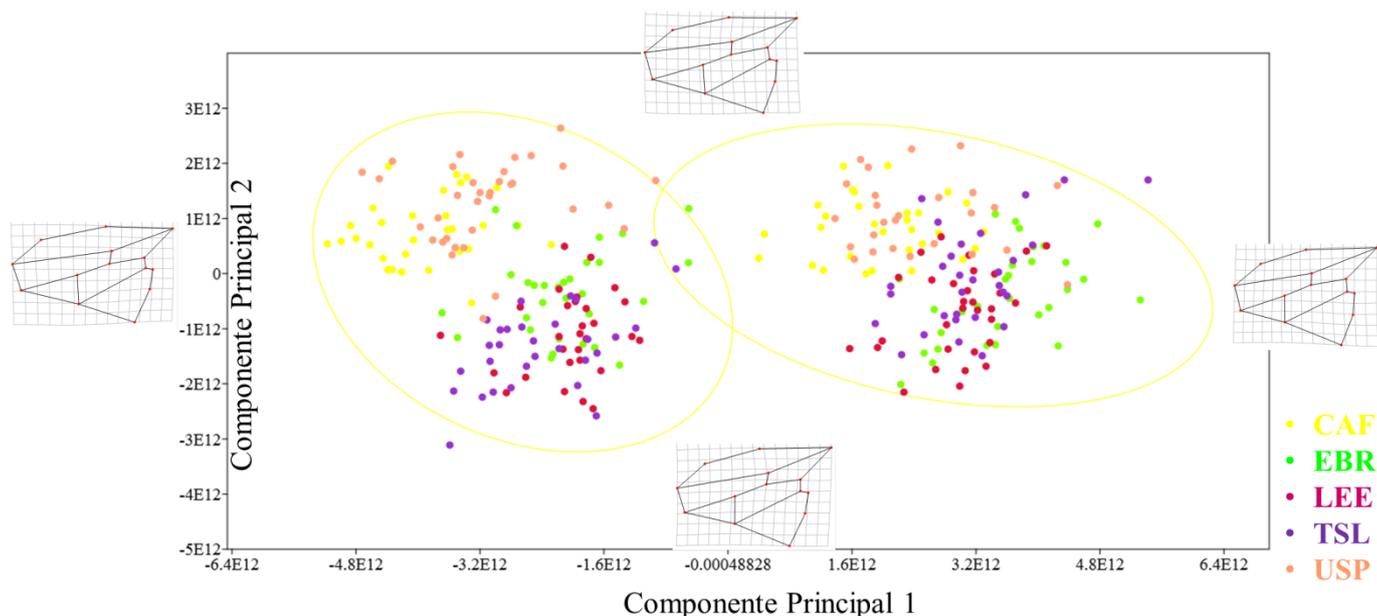


Figura 12- Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para os parentais das populações estudadas. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.

5.1.2 Análise comparativa entre as dietas larvais dos parentais

A Análise de Componente Principal (ACP) para dietas separou os grupos em dietas artificiais (I, II e III) para valores positivos maiores e menores e dietas naturais (IV e V) para valores negativos maiores e menores. Para dietas artificiais a dieta II (EBR) ocupa, praticamente, o mesmo morfoespaço das demais, por outro lado, existe diferença entre as dietas I (LEE) e III (TSL) (Figura 13). Por não haver grande diferença entre as dietas I e II, apenas a II foi considerada para o teste-t dos centroides. A análise comparativa entre os centroides size revelou haver diferença significativa entre as populações mantidas em dietas artificiais e dietas naturais ($p < 0,05$) (Tabela 6).

Tabela 6- Teste-t para centroides size das populações mantidas em dietas artificiais (I e III) e dietas naturais (IV e V), $p < 0,05$.

Tratamento	Nº	Média	Variância
Dieta artificial	120	19,65	0,0004
Dieta natural	120	19,66	0,0012

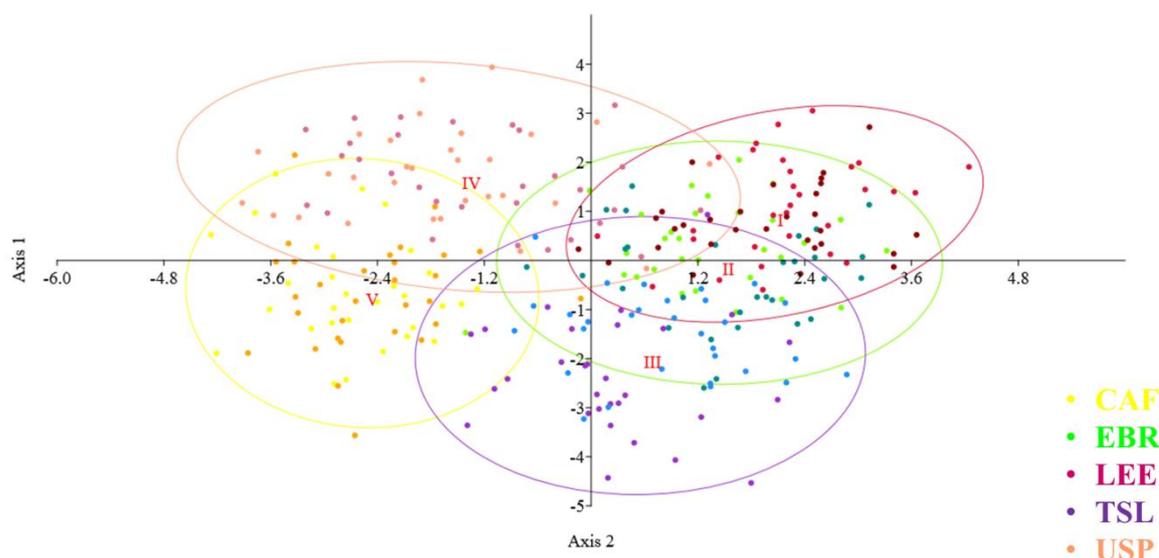


Figura 13- Análise Discriminante. Plotagem dos dois primeiros eixos indicando os grupos discriminados.

A matriz de confusão reclassificou indivíduos em todas as dietas. A dieta II possui o maior número de indivíduos reclassificados, principalmente como dietas I (cinco indivíduos) e III (três indivíduos) (Tabela 7). O procedimento de Jackknifed foi aplicado e obteve mais de 84% de correspondência.

Tabela 7- Matriz de confusão (reclassificação) para machos e fêmeas dos parentais.

	I	II	III	IV	V	Total
I	57	2	1	0	0	60
II	5	51	3	0	1	60
III	2	2	53	1	2	60
IV	2	3	1	52	2	60
V	0	1	0	3	56	60
Total	66	59	58	56	61	300

A APC extraiu dois eixos que explicam a separação das dietas naturais e artificiais. O CP1 tem maior peso para dietas artificiais, enquanto o CP2 com maior peso para dietas naturais (Figura 14). O total de eixos extraídos e a porcentagem que cada uma explica na separação dos grupos são observados na Tabela 8.

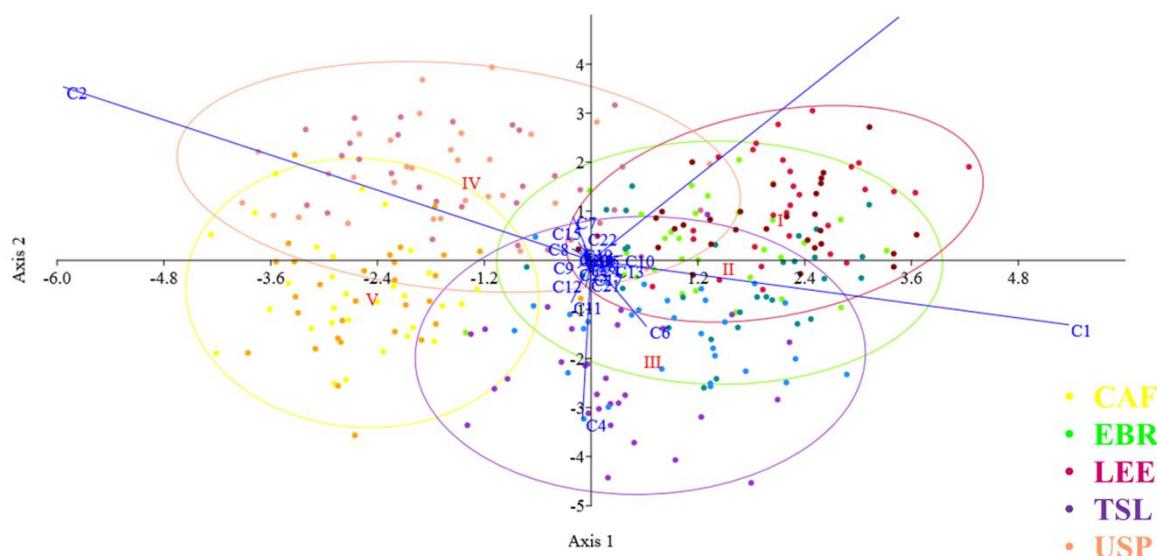


Figura 14- Peso dos Componentes Principais na separação das dietas natural e artificias.

Tabela 8- Quantidade de eixos extraídos e a sua porcentagem na separação dos grupos.

Eixo	Valor	%
1	3,1456	50,25
2	1,6266	25,98
3	0,83825	13,39
4	0,64999	10,38

5.1.3 Análise comparativa entre os machos e fêmeas dos parentais

Para machos e fêmeas a forma alar foi analisada pela Função Discriminante, revelando a existência de dois grupos, mostrando haver diferença entre os sexos (dimorfismo sexual) (Figura 15). A matriz de confusão reclassificou apenas cinco indivíduos (1 fêmea e 4 machos) (Tabela 9). O procedimento de Jackknifed foi aplicado e obteve mais de 98%, o que indica robustez dos dados.

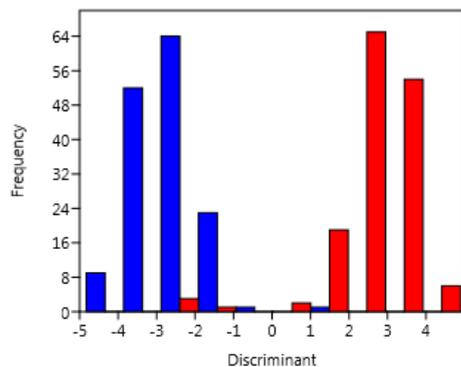


Tabela 9- Matriz de confusão (reclassificação) para machos e fêmeas dos parentais.

	F	M	Total
F	149	1	150
M	4	146	150
Total	153	147	300

Figura 15- Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para os parentais.

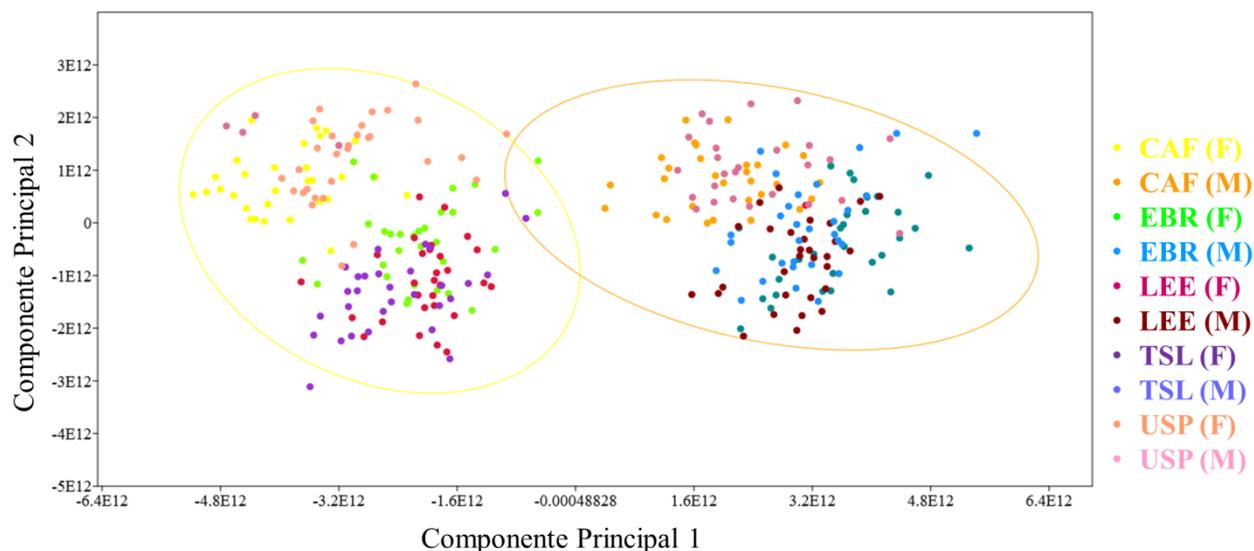


Figura 16- Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para machos (M) e fêmeas (F). O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.

A Análise de Componentes Principais para o sexo corroborou com o resultado da Função Discriminante, indicando variação entre machos e fêmeas, com maior distribuição de indivíduos no eixo do CP1 (Figura 16). A partir desses dados, a forma da asa pode ser observada pela comparação do recurso de visualização *wireframe* para cada população, mostrando as diferenças entre machos e fêmeas (Figura 17).

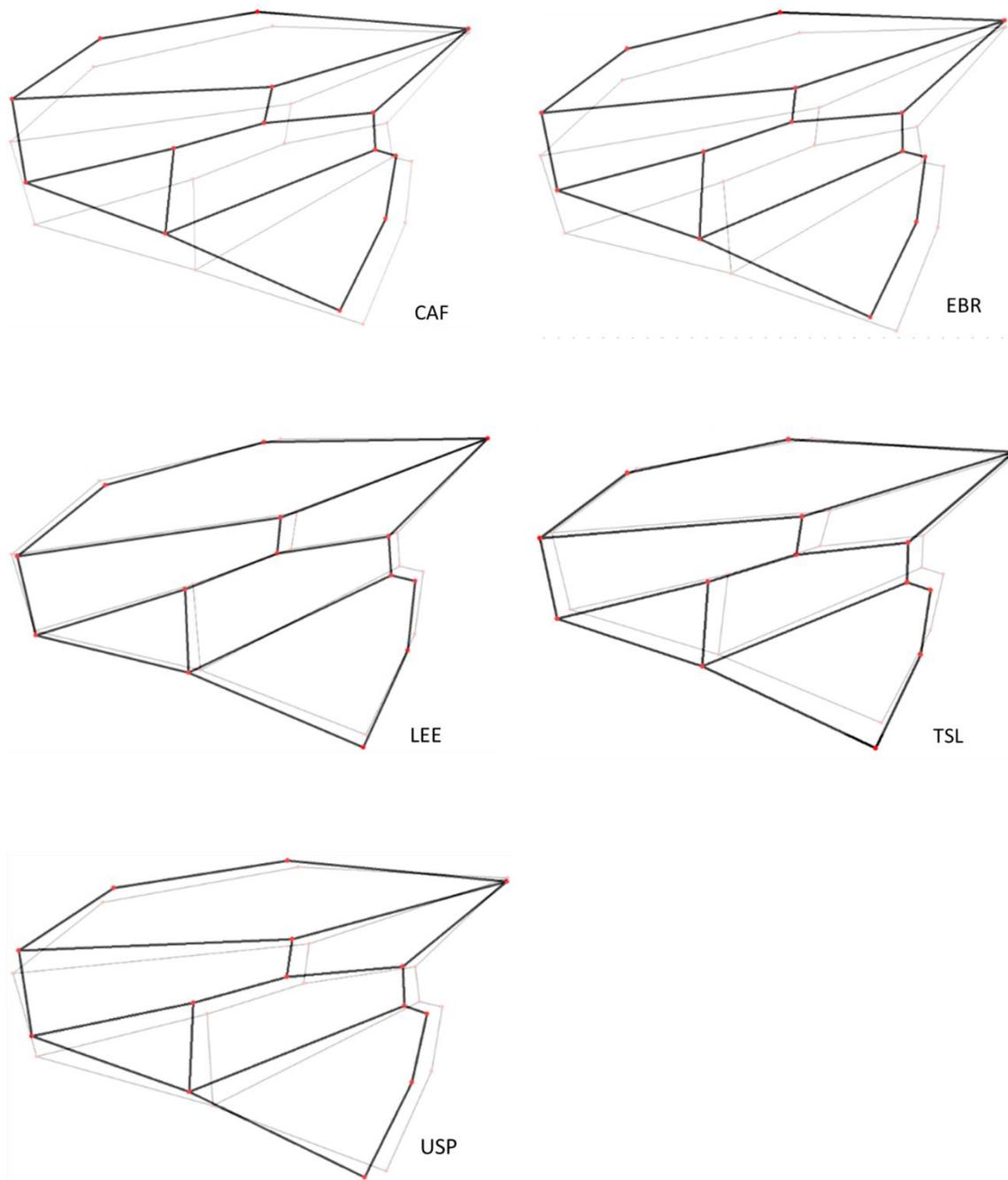


Figura 17- *Wireframe* da forma da asa de machos (linha preta) e fêmeas (linha cinza).

Também foi feito um *wireframe* para observar a diferença entre machos e fêmeas da população selvagem e da população de inseto estéril (TSL) (Figura 18). O tamanho das asas das fêmeas não difere entre as populações, porém a asa da população selvagem é mais larga. Já, os machos selvagens possuem asas mais curtas e estreitas.

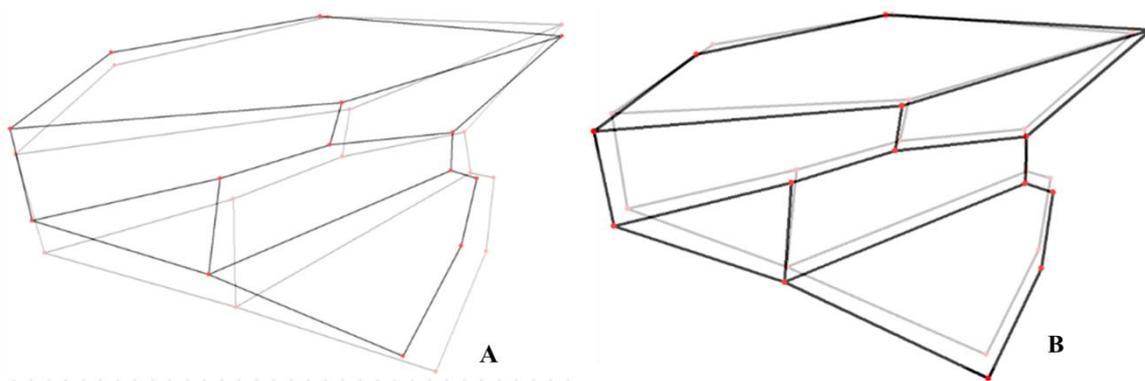


Figura 18- Wireframe mostrando a diferença entre fêmeas (A) e machos (B) da população selvagem (linha clara) e população de inseto estéril - TSL (linhas pretas).

5.1.4 Análise comparativa entre os parentais e suas gerações

Apenas três populações foram replicadas, para comparar os parentais e as gerações. Foram estas: I- LEE; II- EBR e III- TSL. Para essas três populações, a análise também resultou em 24 deformações relativas extraídas dos marcos anatômicos. (Figura 19). Nota-se que o CP1 representa a maior fração da variância explicando, sozinho, 61,72% da variação de forma. Os primeiros 11 CP explicam quase 90% da variação da forma (Tabela 10).

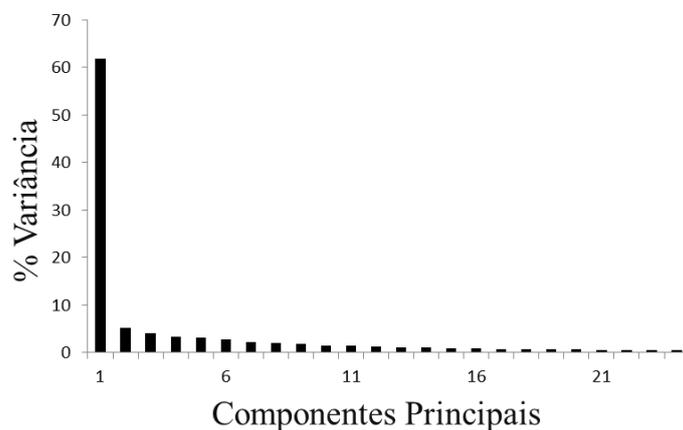


Figura 19- Distribuição dos componentes principais em relação à porcentagem de variação para as 5 populações (parentais).

5.1.5 Análise comparativa entre as dietas larvais dos parentais e suas gerações

A ACP foi realizada para cada população individualmente, para ver em qual geração a deformação deixava de acontecer. Como a dieta usada para replicar as populações foi a dieta I, na ACP para a população LEE os grupos ocupam o mesmo morfoespaço dos parentais não ocorrendo variação na forma (Figura 20). Para a população II (EBR) a análise separou os indivíduos em três grupos: parentais, para valores negativos no eixo 1, F1 e F2 para valores negativos não eixo 2 e F3, F4 e F5 para valores positivos nos dois eixos, ou seja, as deformações param de acontecer a partir da terceira geração (Figura 21). Para a população III (TSL), também houve separação em três grupos, parentais, F1 e F2-F5, as deformações parecem não ocorrer a partir da segunda geração (Figura 22).

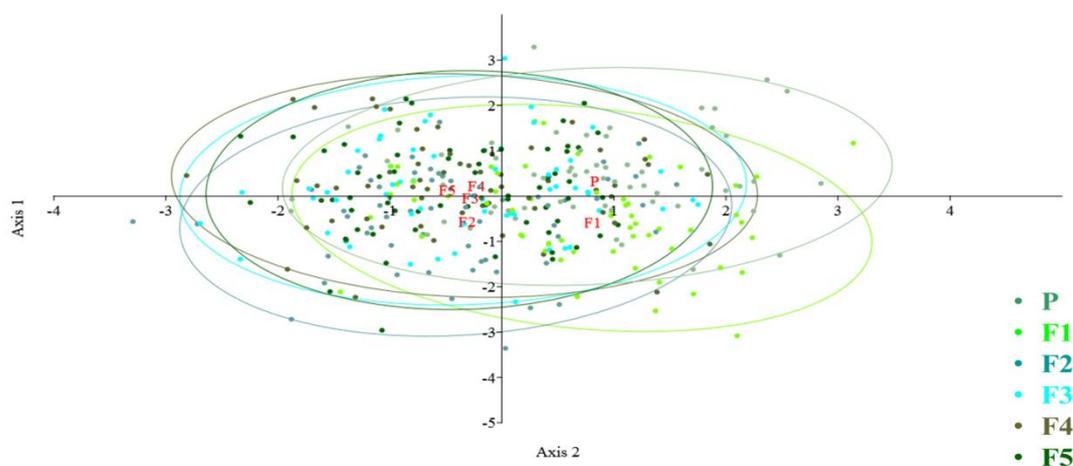


Figura 20- Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população LEE mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.

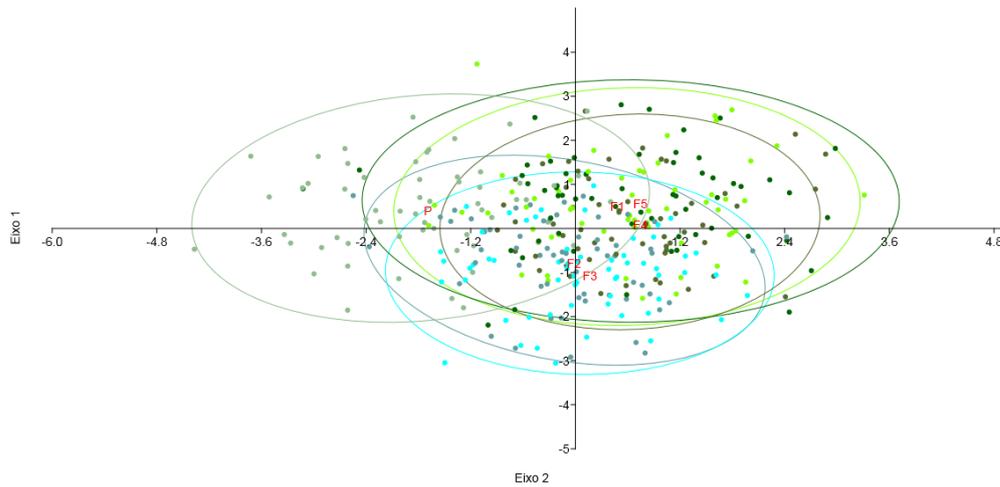


Figura 21- Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população EBR mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.

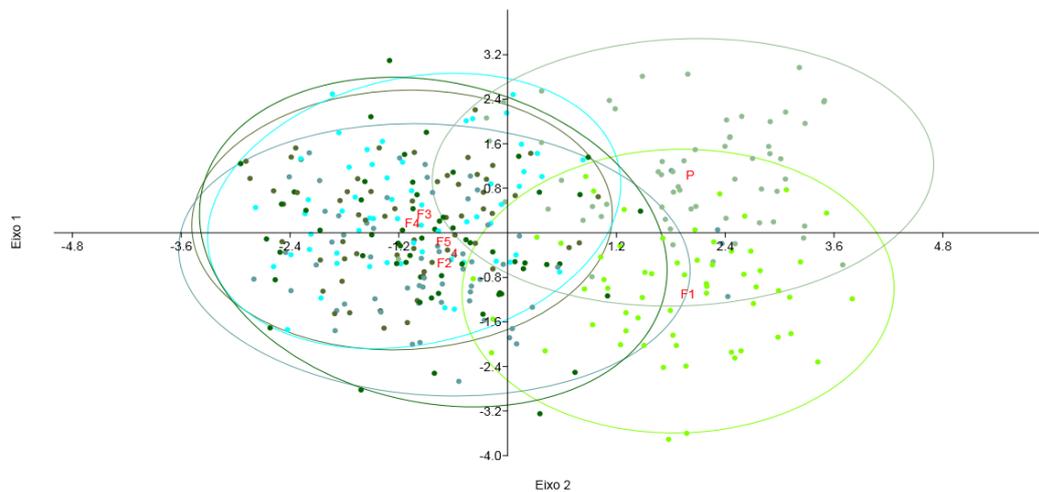


Figura 22- Gráfico de contraste entre CP1 e CP2 para a população TSL mantida na dieta artificial I. O intervalo de confiança das elipses é de 95% da distribuição dos valores.

5.1.3 Análise comparativa entre os machos e fêmeas dos parentais e suas gerações

Para machos e fêmeas a análise Função Discriminante, revelou a existência de dois grupos para as três populações, mostrando haver diferença entre os sexos (Figura 23 - 25).

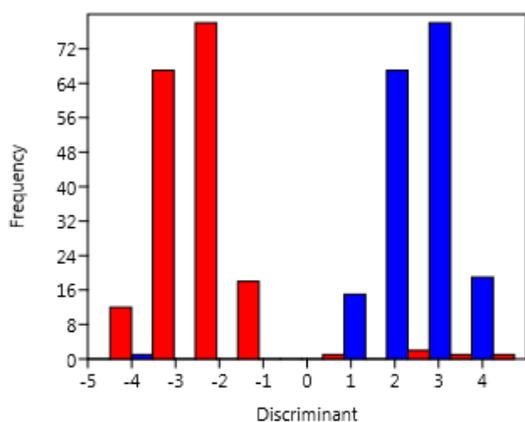


Figura 23- Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para a população LEE.

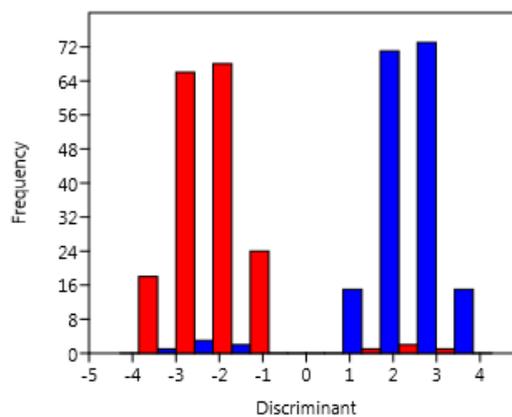


Figura 24- Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para a população EBR.

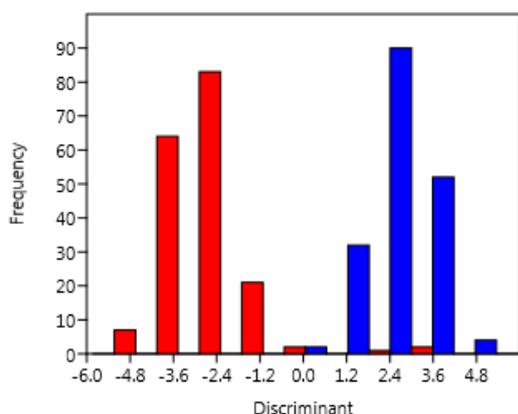


Figura 25- Distribuição de frequência de machos e fêmeas de acordo com os dados da Função Discriminante para a população TSL.

5.2 Armadilha automatizada

5.2.1 Teste de validação das modificações internas da armadilha

Após 48 horas de exposição, 93 espécimes *C. capitata* foram coletadas na armadilha convencional (sem modificações), cinco moscas morreram e duas ainda não tinham entrado na armadilha. No gaiolão com a armadilha modificada havia seis moscas mortas, três vivas e as demais foram capturadas (Tabela 10). Portanto, não houve redução de captura pelo estreitamento da área de entrada da armadilha. Algumas moscas podem morrer durante o experimento pelo estresse na troca de gaiolas.

Tabela 10- Comparação de captura entre armadilhas McPhail tradicional e com modificações no funil de entrada

Armadilha	Nº moscas liberadas	Nº mortas	Total captura
Convencional	100	5	93
Modificada	100	6	91

5.2.2 Validação do sistema de contagem

O sistema de rastreamento de movimento detectou com precisão todas as moscas que entraram andando lentamente pela borda do acrílico e, também, as moscas que voaram diretamente para o topo da armadilha. Apesar do sistema proposto no primeiro modelo ter funcionado, o mesmo apresentou uma alta taxa de erro, por isso a programação foi atualizada e ajustada para o segundo modelo, o qual funcionou com maior precisão e os resultados são apresentados a seguir.

O sistema detectou 348 movimentos de entrada, havendo um erro de contagem de 20 moscas a mais do total de contagem real, representando apenas 0,16% de erro (Tabela 11). Esse erro aconteceu quando alguns indivíduos saíram da armadilha, ou seja, erro na subtração. Não ocorreu nenhuma subcontagem. Pela análise de Qui-Quadrado não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$). A precisão do sistema corresponde a 90%.

Tabela 11- Captura de moscas-do-mediterrâneo em armadilha McPhail automatizada.

Tratamento	I	II	III	IV	V	Total	Média
Contagem automática	65	67	72	80	64	348	69,2
Contagem manual	57	61	69	78	59	324	62,8

Quando mais de uma mosca entrou ao mesmo tempo na armadilha foi possível distingui-las, desde que todas estivessem se movimentando (Figura 26). O programa responsável por acionar a câmera está funcionando corretamente, enviando as fotos para

o banco de imagens e invalidando as fotos das moscas que entraram e saíram da armadilha em seguida (Figura 27), ou seja, o valor de contagem foi subtraída no banco de imagens.



Figura 26- Detecção de movimento das moscas-do-mediterrâneo pelo programa de rastreamento da armadilha automatizada.

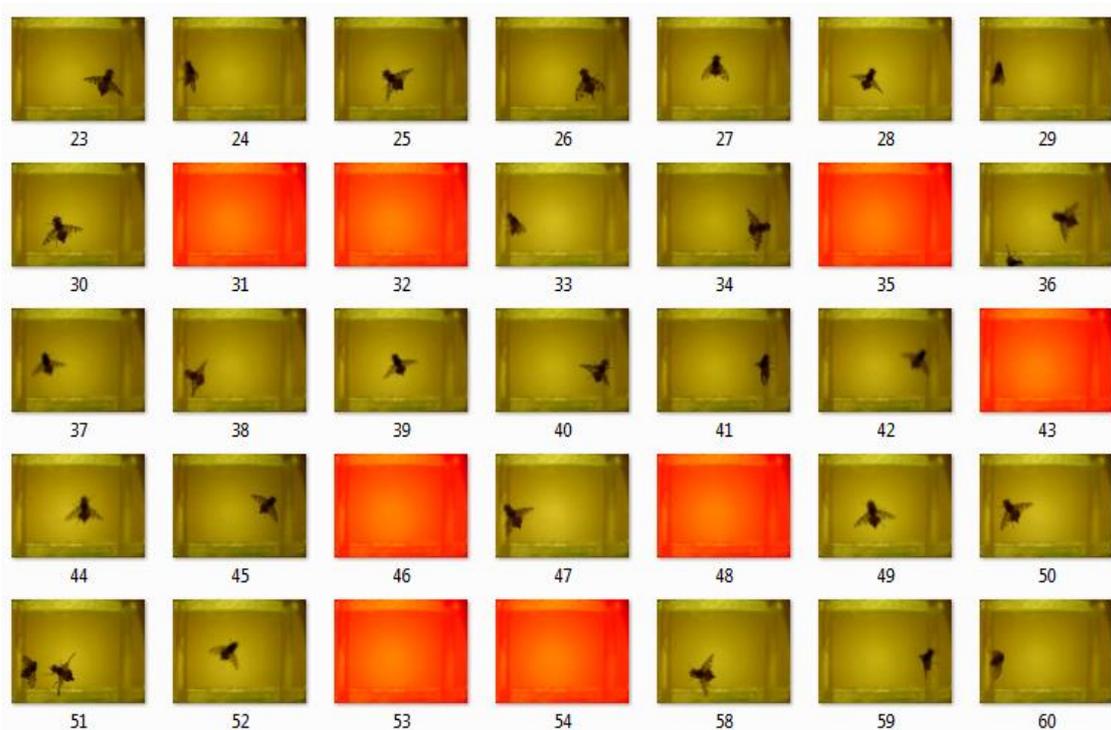


Figura 27- Banco de imagens da armadilha automatizada. Fotos em vermelho foram invalidadas pelo sistema de contagem automática.

6 DISCUSSÃO

As análises morfométricas das asas das cinco populações de *C. capitata* foram distintas quando comparamos os insetos mantidos em dieta artificial e dieta natural (frutos). Portanto, diferentes substratos alimentares proporcionam diferentes condições de desenvolvimento larval e conseqüentemente geram adultos com conformação específica adequada, porém com alterações na morfologia das asas.

A composição nutricional dos substratos alimentares utilizados pelas larvas são determinantes para o sucesso biológico dos insetos (COSTA et al., 2011). Sabe-se que os aspectos nutricionais do hospedeiro ou dieta larval são determinantes no comportamento de busca de alimento, dispersão, escolha e aceitação de parceiros sexuais (CHAPMAN, 1998; SLANSK; SCRIBER, 1985; COSTA et al., 2011). Esses comportamentos estão relacionados ao desempenho de voo, portanto, os recursos alimentares das larvas podem exercer pressão seletiva na modelagem das características das asas dos adultos.

A mudança do substrato de desenvolvimento larval também provocou alterações nas asas de *C. capitata*. Isso foi observado quando comparamos as asas das moscas mantidos em colônias que usavam diferentes substratos de desenvolvimento larval. No entanto, a medida em que as moscas vindas de diferentes colônias se adaptaram a nova dieta artificial (padrão LEE/IB) as variações morfométricas das asas foram reduzindo até estabilizarem, por volta da quarta geração. As mudanças na forma das asas das moscas podem ser associadas à plasticidade fenotípica, definida como a mudança na expressão fenotípica de um genótipo em resposta a fatores ambientais (DEWITT; SCHEINER, 2004), no nosso caso, a alteração dos recursos alimentares das larvas.

Foi observada a existência de dimorfismo sexual alar para todas as populações estudadas. Dimorfismo sexual pode ser definido como uma diferença fenotípica entre machos e fêmeas de uma mesma espécie e pode ser observado em diferentes estruturas, como asa (SIOMAVA; WIMMER; POSNIEN, 2016). De maneira geral, nosso estudo mostrou que as asas dos machos tinham uma tendência de ser mais alongadas do que as asas das fêmeas, principalmente em populações de laboratório. Em população selvagem foi observado o inverso, quando as asas dos machos foram mais curtas e largas, assim como observado por Churchill-Stanland et al. (1996).

Alterações morfométricas das asas também foram observadas entre machos da população selvagem (asas menores) e machos da população de insetos estéreis (asas

maiores). Mudanças na forma da asa de machos estéreis podem torná-los menos competitivos sexualmente (SHARP et al., 1983) afetando o sucesso do programa de controle com TIE. Souza et al. (2015) realizaram estudos sobre a performance de acasalamento e a variação morfométrica nas asas de *C. capitata*. Seus resultados mostraram que o sucesso reprodutivo foi maior para machos selvagens, quando comparados aos machos estéreis que apresentaram diferenças morfométricas nas asas (asas maiores).

As asas têm importante papel no comportamento reprodutivo das moscas-das-frutas, pois integram o conjunto de sinalizações sexuais (ALUJA et al., 1999). Dentro do comportamento sexual, existe uma diferença na demanda de voo para cada sexo. Os machos estabelecem os territórios de acasalamento e atraem as fêmeas com pistas visuais, químicas e sonoras, dessa forma não precisam realizar longos voos. Portanto, as asas mais curtas e largas dos machos evitam que eles gastem energia com voos desnecessários. Já as fêmeas vão à busca do sítio de oviposição, por isso, precisam de asas mais longas (HENDRICHS et al., 2002; ROY et al., 2019).

Alguns autores afirmam que o comprimento das asas dos machos não representa, por si só, um fator de seleção, configurando-se como uma característica associada como efeito colateral ao comprimento do tórax. Isso sugere que o tamanho do tórax está ligado ao sucesso da cópula para *C. capitata*, ou seja, quanto maior o tórax do macho maior é a chance de ser escolhido pela fêmea (RODRIGUEIRO et al., 2002). Por outro lado, diversos autores não deixam claro haver uma relação positiva entre sucesso de cópula e tamanho do macho (HUNT et al., 1998; NORRY et al., 1999). Arita e Kaneshiro (1988) relataram que os adultos recuperados de frutos de café copularam com mais frequência, mesmo tendo o corpo significativamente menor do que os adultos recuperados de cereja.

É seguro afirmar que um conjunto de fatores são responsáveis pelo sucesso da cópula nas moscas-das-frutas, dentre eles as asas exercem importante papel. As asas são responsáveis pela emissão de sinais acústicos com vibrações ritmicamente direcionadas da frente para trás e pela amplitude de emissão de feromônio (RODRIGUERO et al., 2002; LUX; GAGGL, 1996; SUGAYAMA; MALAVASI 2000). Esses sinais emitidos pelos machos vão auxiliar a fêmea na escolha do parceiro sexual (BURK, 1983).

As alterações na morfologia das asas de *C. capitata* não é resposta apenas da qualidade nutricional da dieta larval, mas resultado de diversas pressões de fatores bióticos e abióticos, como temperatura, umidade e luminosidade, manutenção da

colônia, origem dos parentais e relação entre mosca e hospedeiro. O nosso estudo avaliou as alterações em asas de várias gerações de *C. capitata* selvagens e de laboratório mantidas sobre diversas condições de temperatura, umidade e substratos alimentares. Com isso, os nossos resultados foram amplos e diversos e forneceram um banco de dados sobre a forma, tamanho e possíveis alterações das asas de *C. capitata*. Esse banco de dados é uma importante base para o desenvolvimento de inovações tecnológicas. Por exemplo, as informações sobre a forma e tamanho da asa de *C. capitata* podem servir como “identidade” do indivíduo em programas de reconhecimento por imagem empregados em armadilhas automáticas de monitoramento populacional, uma vez que alguns algoritmos reconhecem valores de área como coordenadas para localização de movimento. Os sistemas automáticos de monitoramento de insetos têm o potencial de melhorar substancialmente a eficácia e a eficiência do monitoramento.

O desenvolvimento de uma armadilha para contagem automática de moscas-das-frutas requer análise dos modelos já existentes para adaptação do programa de contagem dos insetos e/ou desenvolvimento de um novo design. No nosso estudo, adaptamos uma armadilha do tipo McPhail, por ser um modelo consagrado para o monitoramento de moscas-das-frutas. Alguns autores relataram que manter o conceito convencional da armadilha e realizar apenas adaptações internas é suficiente para um bom resultado de contagem dos insetos (LÓPEZ et al., 2012; POTAMITIS et al., 2014; SELBY et al., 2014). Para outros, todo o layout da armadilha precisou ser alterado para facilitar a integração de um módulo confiável de contagem automática (GUARNIERI et al., 2011; JIANG et al., 2008; SHIEH et al., 2011; GOLDSHTEIN et al., 2017).

Alterações na forma e nos componentes da armadilha pode ter efeitos adversos na liberação do odor do atrativo ou feromônio e conseqüentemente na atratividade do inseto para a armadilha. Por isso, foi necessário testar a eficiência da armadilha modificada e compará-la com uma armadilha convencional. Nossos resultados revelaram que a diminuição da área de passagem das moscas não afetou negativamente a atratividade de *C. capitata* em gaiolão de laboratório. Goldshtein et al. (2017) desenvolveram um novo design de armadilha para *C. capitata* e relatam que o aumento da abertura aumentou significativamente a eficiência de captura da armadilha desenvolvida, aparentemente devido à melhor liberação de feromônio.

A precisão do sistema de contagem da armadilha foi avaliada pelo resultado da razão entre o número de moscas contadas manualmente e o número total de detecções

feita pela armadilha. O nosso sistema apresenta uma precisão de 90% de acerto, mostrando uma alta correspondência entre as contagens automáticas e manuais. Altas taxas de precisão são geralmente obtidas em armadilhas baseadas em sensores (LIAO et al., 2012; SHIEH et al., 2011). Alguns autores obtiveram taxas de precisão entre 95-99% (GOLDSHTEIN et al., 2017).

Por se tratar do primeiro protótipo e testes iniciais, os valores morfométricos ainda não foram inseridos no algoritmo, mas são promissores para definição da área ocupada pela mosca. Dessa forma, em trabalhos futuros iremos adicionar os dados morfométricos de *C. capitata* e de outras espécies de moscas-das-frutas de importância econômica que são capturadas em armadilha McPhail, como é o caso de espécies do gênero *Anastrepha*.

6 CONCLUSÕES

- As cinco populações de *C. capitata* apresentam variações morfológicas alares, com observação clara de separação dos grupos pela análise de morfometria geométrica;
- Foi comprovado que existem diferenças morfométricas alares entre populações de *C. capitata* mantidas em dieta artificial e dieta natural (fruto);
- Todas as populações apresentam dimorfismo sexual alar;
- As deformações morfométricas podem ser minimizadas quando populações e gerações de *C. capitata* são mantidas sob mesma dieta larval;
- As informações das análises de morfometria geométrica podem ser usadas para compor banco de dados para uso em armadilhas inteligentes;
- A armadilha automatizada ainda está em desenvolvimento, mas apresenta potencial de uso no monitoramento de moscas-das-frutas;
- A armadilha automatizada apresenta uma alta taxa de precisão na contagem de moscas-das-frutas.

7 REFERÊNCIAS

- ADAMS, D.C., ROHLF, F.J., SLICE, D.E. A field comes of age: geometric morphometrics in the 21st century. **Hystrix It. J. Mamm.** v. 24, p. 7-14, 2013.
- ALMEIDA, L.B.M.; COELHO, J.B., UCHOA, M.A.; GISLOTI, L. J. Diversity of fruit flies (Diptera: Tephritoidea) and their host plants in a conservation unit from midwestern Brazil. **Florida Entomologist**, v. 102, n. 3, p. 562-570, 2019.
- ALUJA, M.; CABRERA, M.; GUILLEN, J.; CELEDONIO, H.; AYORA, F. Behavior of *Anastrepha ludens*, *A. obliqua* and *A. serpentina* (Diptera: Tephritidae) on a wild mango tree (*Mangifera indica*) harbouring three McPhail traps. **Insect Sci. Appl.**, v. 10, p. 309-318, 1989.
- ALUJA, M.; PIÑERO, J.; JÁCOME, I.; DÍAZ-FLEISCHER, F.; SIVINSKI, J. Behavior of flies in the genus *Anastrepha* (Trypetinae: Toxotrypanini). In: **Fruit Flies (Tephritidae)**. CRC Press. p. 393-424.1999.
- ALUJA, M.; MANGAN, R. L. Fruit fly (Diptera: Tephritidae) host status determination: critical conceptual, methodological, and regulatory considerations. **Annu. Rev. Entomol.**, v. 53, p. 473-502, 2008.
- ALUJA, M. The study of movement in Tephritid flies: review of concepts and recent advances (1993). In: ALUJA, M., LIEDO, P. (ed). **Fruit Flies**. New York: Springer. p. 105-113, v.1.
- ARITA, L.H.; KANESHIRO, K.Y. Body size and differential mating success between males of two populations of the Mediterranean fruit fly. **Pacific Science**, v.42, p.173-177, 1988.
- BALLARD, D. H. E BROWN, C. M. Computer vision. **Prentice-Hall**, v. 34, 1982.
- BATEMAN, M. A. The ecology of fruit flies. **Annual Review of Entomology**, v. 17, n. 1, p. 493-518, 1972.
- BIRKE, A.; ALUJA, M. Do mothers really know best? Complexities in testing the preference-performance hypothesis in polyphagous frugivorous fruit flies. **Bulletin of Entomological Research**, v. 108, n. 5, p. 674-684, 2018.
- BURK, T. Behavioral ecology of mating in the Caribbean fruit flies *Anastrepha suspensa* (Loew) (Diptera: Tephritidae). **Florida Entomological Society**, v.66, n.3, p.330-344, 1983.
- CARVALHO, R. P. L. **Metodologia para monitoramento populacional de moscas-das-frutas em pomares comerciais**. Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, Cruz das Almas-BA: EMBRAPA, 2005. 17 p. (Circular Técnica, 75).
- CHAPMAN, T.; TAKAHISA, M.; SMITH, H.K.; PARTRIDGE, L. Interactions of mating, egg production and death rates in females of the Mediterranean fruitfly,

Ceratitis capitata. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 265, n. 1408, p. 1879-1894, 1998.

CHURCHILL-STANLAND, C.; Stanland, R.; Wong, T.T.Y.; Tanaka, N.; McInnis, D.O.; Dowell, R.V. Size as a factor in the mating propensity of Mediterranean fruit flies, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae), in the laboratory. **Journal of Economic Entomology**, v. 79, n. 3, p. 614-619, 1986.

COSTA, A.M.; AMORIM, F.O.; ANJOS-DUARTE, C.S.; JOACHIM-BRAVO, I.S. Influence of different tropical fruits on biological and behavioral aspects of the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera, Tephritidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 55, n. 3, p. 355–360, 2011.

SOUSA, S.J.F. Fisiologia e desenvolvimento da visão. **Medicina, Ribeirão Preto**, v. 30, n. 1, p. 16-19, 1997.

DE MEYER, M., COPELAND, R.S., WHARTON, R.A., MCPHERON, B.A., 2002. On the geographical origin of the medfly, *Ceratitis capitata* (Wiedemann). In: Barnes, B. (ed.), Proceedings of the 6th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, Stellenbosch, South Africa. **Isteg Scientific Publications**, Iver, U.K., p. 45-53.

DEQIN, X.; QIUMEI, Y.; JUNQIAN, F.; XIAOHUI, D.; JIANZHAO, F.; YAOWENA, Y.; YONGYUE, L. A multi-target trapping and tracking algorithm for *Bactrocera dorsalis* based on cost models. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 224–231, 2016.

DEWITT, T.J.; SCHEINER, S.M. (Ed.). Phenotypic plasticity: functional and conceptual approaches. **Oxford University Press**, 2004.

DOITSIDIS, L.; FOUSKITAKIS, G.N.; VARIKOU, K.N.; RIGAKIS, I.I.; CHATZICHRISTOFIS, S.A.; PAPAFILIPPAKI, A.K.; BIROURAKI, A.E. Remote monitoring of the *Bactrocera oleae* (Gmelin) (Diptera: Tephritidae) population using an automated McPhail trap. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 137, p. 69-78, 2017.

DRYDEN, I.L.; MARDIA, K.V. Statistical shape analysis. **John Wiley & Sons**, New York. 1998.

DYCK, V. A. et al. Management of Area-Wide Integrated Pest Management Programmes that Integrate the Sterile Insect Technique. DYCK, V. A.; HENDRICH, J.; ROBINSON, A. S. (Ed.). **Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-Wide Integrated Pest Management**, XIV, Hardcover ISBN: 1-4020-4050-4, p. 525-542.2005.

FERNANDES-DA-SILVA, P. G.; ZUCOLOTO, F. S. The influence of host nutritive value on the performance and food selection in *Ceratitis capitata* (Diptera, Tephritidae). **Journal of insect physiology**, v. 39, n. 10, p. 883-887, 1993.

- GUARNIERI, A., MAINI, S., MOLARI, G., RONDELLI, V., 2011. Automatic trap for moth detection in integrated pest management. **Bulletin of Insectology**, v.64, n.2, p.247-251, 2011.
- GOULD, W. P.; RAGA, A. Pests of Guava. In: PEÑA, J.E.; SHARP, J.L.; WYSOKI, M. **Tropical fruit pests and pollinators: Biology, Economic Importance, Natural Enemies and Control**, p. 303, 2002.
- GOLDSHTEIN, E.; COHEN, Y.; HETZRONI, A.; GAZIT, Y.; TIMAR, D.; ROSENFELD, L.; GRINSHPON, Y.; HOFFMAN, A.; MIZRACH, A. Development of an automatic monitoring trap for Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* to optimize control applications frequency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.139, p. 115–125. 2017.
- HENDRICH, J.; ROBINSON, A.S.; CAYOL, J.P.; ENKERLIN, W. Medfly areawide sterile insect technique programmes for prevention, suppression or eradication: the importance of mating behavior studies. **Florida Entomologist**, Gainesville, v. 85, n. 1, p. 1-13, 2002.
- HERNÁNDEZ-ORTIZ, V.; ALUJA, M. Listado de especies del género neotropical *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) con notas sobre su distribución y plantas hospedeiras. **Folia Entomologica Mexicana**, v. 88, p. 89-105, 1993.
- HUNT, M.K.; ROUX, E.A.; WOOD, R. J.; GILBURN, A.S. The effect of supra-fronto-orbital (SFO) bristle removal on male mating success in the Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae). **Florida Entomologist**, v. 85, n. 1, p. 83-88, 2002.
- HUNT, M.K.; CREAN, C.S.; WOOD, R.J.; GILBRUN. A.S. Fluctuating asymmetry and sexual selection in the Mediterranean fruitfly (Diptera: Tephritidae). **Biol. J. Linn. Soc.** v.64, p.385-396, 1998.
- IHERING, H. Laranjas bichadas. **Revista Agrícola**, v. 6, n. 70, p. 179-181, 1901.
- IMPERATO, R.; RAGA, A. **Técnica do inseto estéril**. 2015. (Documento Técnico).
- ISRAELY, N., ZIV, Y., CALUN, R. Metapopulation spatial-temporal distribution patterns of Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in a patchy environment. **Ann. Entomol. Soc. Am.** v. 98, p. 302-308, 2005.
- JANG, E.B., ENKERLIN, W., “ED” MILLER, C., REYES-FLORES, J. . Trapping Related to Phytosanitary Status and Trade. In: Shelly, T., Epsky, N., Jang, E., Reyes-Flores, J., Vargas, R. (eds) **Trapping and the Detection, Control, and Regulation of Tephritid Fruit Flies**. Springer, Dordrecht. p. 589-608. 2014.
- JIANG, J.A., TSENG, C.L., LU, F.M., YANG, E.C., WU, Z.S., CHEN, C.P., LIN, S.H., LIN, K.C., LIAO, C.S. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: a case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). **Comput. Electron. Agric.** v.62, p.243–259, 2008.

KASPI, R.; Mossinson, S.; Drezner, T.; Kamensky, B.; Yuval, B. Effects of larval diet on development rates and reproductive maturation of male and female Mediterranean fruit flies. **Physiological Entomology**, v. 27, n. 1, p. 29-38, 2002.

KLINGENBERG, C.P. Visualizations in geometric morphometrics: how to read and how to make graphs showing shape changes. **Hystrix It. J. Mamm.** v. 24, p. 15-24, 2013.

KLINGENBERG, C.P.; Evolution and development of shape: integrating quantitative approaches. **Nature Reviews**, v. 11, p. 623-635, 2010.

KNIPLING, E. F. Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 48, p. 459-462, 1955.

KRAINACKER, D. A.; CAREY, J. R.; VARGAS, R. I. Size-specific survival and fecundity for laboratory strains of two tephritid (Diptera: Tephritidae) species: implications for mass rearing. **Journal of economic entomology**, v. 82, n. 1, p. 104-108, 1989.

LANCE, D. R. Integrating tephritid trapping into phytosanitary programs. In: **Trapping and the detection, control, and regulation of tephritid fruit flies**. Springer, Dordrecht, 2014. p. 559-588.

LEMIC, D.; BENÍTEZ, H.A.; BJELIŠ, M; ÓRDENES-CLAVERIA, R; NINČEVIĆ, P.; M.MIKAC, K.M.; PAJAČŽIVKOVIĆ, I. Agroecological effect and sexual shape dimorphism in medfly *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) an example in Croatian populations. **Zoologischer Anzeiger**, v. 288, p. 118-124, 2020.

LIAO, M.S.; CHUANG, C.L.; LIN, T.S.; CHEN, C.P.; ZHENG, X.Y.; CHEN, P.T.; LIAO, K.C.; JIANG, J.A. Development of an autonomous early warning system for *Bactrocera dorsalis* (Hendel) outbreaks in remote fruit orchards. **Comput. Electron. Agric.** v.88, p.1-12, 2012.

LIQUIDO, N. J; SHINODA, L. A.; CUNNINGHAM, R. T. Host plants of the Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae): na annotated world review. Lanham, **Miscellaneous Publications of the Entomological Society of America**, n. 77, p. 1-52, 1991.

LORSCHTEITER, R. et al. Caracterização de danos causados por *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann) (Díptera: Tephritidae) e desenvolvimento larval em frutos de duas cultivares de quivizeiro (*Actinidia* sp.). **Revevista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 34, n. 1, p. 67-76, 2012.

LOUZEIRO, L. R. F. et al. Incidence of frugivorous flies (Tephritidae and Lonchaeidae), fruit losses and the dispersal of flies through the transportation of fresh fruit. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 24 n. 1, p. 50-60, 2021.

LÓPEZ, O., RACH, M.M., MIGALLON, H., MALUMBRES, M.P., BONASTRE, A., SERRANO, J.J., Monitoring pest insect traps by means of low-power image sensor technologies. **Sensors** v.12, p.15801-15819, 2012.

- LUX, S. A.; GAGGL, K. Ethological analysis of medfly courtship: potential for quality control, In: MCPHERON, B. A.; STECK, G. J. (Eds.). **Fruit fly pests**. Delray Beach: St. Lucie Press, 1996. p.425-432.
- MALAVASI, A.; NASCIMENTO, A. S. Programa Biofábrica Moscamed Brasil. **Simpósio de Controle Biológico**, v. 8, p. 52, 2003.
- MALAVASI, A.; ZUCCHI, R.A.; SUGAYAMA, R.L. Biogeografia. In: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R.A. **Moscas-das-frutas de Importância Econômica no Brasil: Conhecimentos Básico e Aplicado**. Ribeirão Preto: Holos. p. 93-98. 2000.
- MEATS, A.; SMALLRIDGE, C. J. Short-and long-range dispersal of medfly, *Ceratitis capitata* (Dipt., Tephritidae), and its invasive potential. **Journal of Applied Entomology**, v. 131, n. 8, p. 518-523, 2007.
- MILANO, D.; HONORATO, L. B. Visão computacional. Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- MITTEROECKER, PHILIPP; GUNZ, PHILIPP. Advances in geometric morphometrics. **Evolutionary Biology**, v. 36, n. 2, p. 235-247, 2009.
- MONTEIRO, L. R.; BORDIN, B.; REIS, S. F. Shape distances, shape spaces and the comparison of morphometric methods. **Trends in ecology & evolution**, v. 15, n. 6, p. 1-220, 2000.
- MONTEIRO, L.R.; REIS, S.F. Princípios de Morfometria Geométrica. **Holos**, Ribeirão Preto. 1999.
- MONTES, S. M. N. M.; RAGA, A.; BOLIANI, A.C.; SANTOS, P.C. Dinâmica populacional e incidência de moscas-das-frutas e parasitoides em cultivares de pessegueiros (*Prunus pérsica* L. Batsch) no município de Presidente Prudente. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, SP, v. 33, n. 2, p. 402-411, 2011.
- MOSCAMED, 2021. Disponível em: <http://moscamed.org.br/linhas-de-acao/>. Acesso em: 06 de dez 2021.
- NASCIMENTO, A. S.; CARVALHO, R. S.; MALAVASI, A. Monitoramento Populacional. In: MALAVASI, A.; ZUCCHI, R.A. (Ed.). **Moscas-das-frutas de Importância Econômica no Brasil: Conhecimentos Básico e Aplicado**. Ribeirão Preto: Holos. p. 103-108. 2000.
- NORRY, F. M.; CALCAGNO, G.E.; VERA, M.T.; MANSO, F.; VILARDI, J.C. Sexual selection on morphology independent of male-male competition in the Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae). **Ann. Entomol. Soc. Amer.** v.92, n.4, p.571-577, 1999.
- NÚÑEZ-BUENO, L. La mosca del mediterráneo. **Separata de Revista ICA**, v. 21, n. 1, p. 1-8, 1987.

PANIZZI, A. R.; PARRA, J. R. P. A bioecologia e a nutrição de insetos como base para o manejo integrado de pragas. **Embrapa Soja-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2009.

PAPADOPOULOS, N. T. Fruit fly invasion: historical, biological, economic aspects and management. In: **Trapping and the detection, control, and regulation of Tephritid fruit flies**. Springer, Dordrecht, 2014. p. 219-252.

PARANHOS, B. A. J.; NASCIMENTO, A.S.; BARBOSA, F.B.; VIANA,R.; SAMPAIO, R.; MALAVASI, A.; WALDER, J.M.M. Técnica do Inseto Estéril: nova tecnologia para combater a mosca-das-frutas, *Ceratitis capitata*, no Submédio do Vale do São Francisco. Embrapa Semi-Arido. (**Comunicado Técnico, 137**) Petrolina: Embrapa Semi-Arido, 2008. 6p.

PARRA J.R.P. A biologia de insetos e o manejo integrado de pragas: da criação em laboratório à aplicação no campo. In: **Bases e técnicas do manejo de insetos**. Santa Maria: UFSM/CCR/DFS; Pallotti; 2000.

PARRA J.R.P. Criação massal de inimigos naturais. In: PARRA, J.R.P.; BOTELHO, P.S.M.; CORRÊA-FERREIRA, B.S.; BENTO, J.M.S. (Eds.) **Controle biológico no Brasil: parasitóides e predadores**. São Paulo: Manole, p. 143-164. 2002.

PARRA, J.R.P. A evolução das dietas artificiais e suas interações em ciência e tecnologia. In: PANIZZI, A.R.; PARRA, J.R.P. (Eds.) **Bioecologia e nutrição de insetos: base para o manejo integrado de pragas**. Brasília: Embrapa, p. 91-174. 2009.

PARRA, J. R. P. Técnicas de criação de insetos para programas de controle biológico. 6.ed. Piracicaba: ESALQ/FEALQ, p.134. 2001.

PIETERSE, W., BENÍTEZ, H. A., ADDISON, P., The use of geometric morphometric analysis to illustrate the shape change induced by different fruit hosts on the wing shape of *Bactrocera dorsalis* and *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). **Zool. Anz.** v. 269, p. 110-116, 2017.

POTAMITIS, I.; RIGAKIS, I.; TATLAS, N. Automated surveillance of fruit flies. **Sensors**, v. 17, p. 1-14, 2017.

POTAMITIS, I.; NTALAMPIRAS, S.;JAHN, O.; RIEDE, K. Automatic bird sound detection in long real-field recordings: Applications and tools. **Applied Acoustics**, v. 80, p. 1-9, 2014.

RAGA, A.; SOUZA-FILHO, M.F.; SATO, M.E.; CERÁVOLO, L.C. Dinâmica populacional de adultos de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) em pomar de citros de Presidente Prudente, SP. **Arqui. Inst. Biol.**, v. 63, n. 2, p. 23-28, 1996.

RAGA, A.; SOUZA-FILHO, M.D.; ARTHUR, V.; SATO, M.E.; MACHADO, L.A.; BATISTA FILHO, A. Observações sobre a incidência de moscas-das-frutas em frutos de laranja (*Citrus sinensis*). **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v. 64, p. 125-129, 1997.

RAGA, A.; PRESTES, D.D.O.; SOUZA-FILHO, M.D.; SATO, M.E.; SILOTO, R.C.; ZUCCHI, R. A. Occurrence of fruit flies in coffee varieties in the State of São Paulo, Brazil. **Boletín Sanidad Vegetal y Plagas**, Madrid, v. 28, p. 519-524, 2002.

RAGA, A. Incidência, monitoramento e controle de moscas-das-frutas na citricultura paulista. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 26, n. 2, p. 307-322, 2005.

RAGA, A; GALDINO, L. T. Sintomatologia do Ataque de Moscas-das-Frutas (Diptera: Tephritidae) em Citros. 16p, 2017. (**Documento Técnico 33**).

RAGA, A.; GALDINO, L.T.; SILVA, S.B.; BALDO, F.B.; SATO, M. E. Comparison of insecticide toxicity in adults of the fruit flies *Anastrepha fraterculus* (Wied.) and *Anastrepha grandis* (Macquart)(Tephritidae). **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 25, n. 2, p. 1-8, 2018.

RAGA, A.; VIEIRA, S.M.J. Attractiveness of corn steep liquor plus borax to fruit fly (Diptera: Tephritidae) under field cages. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v.82 p. 1-8, 2015.

RODRIGUERO, M.S.; VILARDI, J.C.; VERA, M.T.; CAYOL J.P.; RIAL, E. Morphometric traits and sexual selection in medfly (Diptera: Tephritidae) under field cage conditions. **Florida Entomologist**, v.85, n.1 p.143-149, 2002.

ROHLF, F.J.; MARCUS, L.F. A revolution in morphometrics. **Trends in Ecology and Evolution**, v.8, n.4, p.129-132, 1993.

ROY, C.L.; DEBAT, V.; LLAURENS, V. Adaptive evolution of butterfly wing shape: from morphology to behavior. **Biological Reviews**, v. 94, n. 4, p 1261-1281, 2019.

RUNDLE, H. D.; CHENOWETH, S.F.; DOUGHTY, P.; BLOWS, M.W. Divergent selection and the evolution of signal traits and mating preferences. **PLoS biology**, v. 3, n. 11, p. 368, 2005.

SALLES, L. A. Ocorrência precoce da mosca-das-frutas em ameixas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 349-350, 1999.

SANTOS, J. P.; CORRENT, A.R.; BERTON, O.; SCHWARZ, L L.; DENARDI, F. Incidência de podridão-branca em frutos de macieira com e sem fermentos. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 30, n. 1, p. 118-121, 2008.

SELBY, R. D.; GAGE, S. H.; WHALON, M. E. Precise and low-cost monitoring of plum curculio (Coleoptera: Curculionidae) pest activity in pyramid traps with cameras. **Environmental Entomology**, v. 43, n. 2, p. 421-431, 2014.

SHAKED, B.; AMORE, A.; IOANNOU, C.; VALDÉS, F.; ALORDA, B.; PAPANASTASIOU, S.; GOLDSHTEIN, E.; SHENDEREY, C.; LEZA, M.; PONTIKAKOS, C.; PERDIKIS, D.; TSILIGIRIDIS, T.; TABILIO, M.R.; SCIARRETTA, A.; BARCELÓ, C.; ATHANASSIOU, C.; MIRANDA, M.A.; ALCHANATIS, V.; PAPADOPOULOS, N.; NESTEL, D. Electronic traps for detection and population monitoring of adult fruit flies (Diptera: Tephritidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 142, n. 1-2, p. 43-51, 2018.

SHARP, J.L.; BOLLER, E.F.; CHAMBERS, D.L. Selection for flight propensity of laboratory and wild strains of *Anastrepha suspensa* and *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 76, n. 2, p. 302-305, 1983.

SHIEH, J.C.; WANG, J.Y.; LIN, T.S.; LIN, C.H.; YANG, E.C.; TSAI, Y.J.; TSAI, H.T.; CHIOU, M.T.; LU, F.M.; JIANG, J.A. A GSM-based field monitoring system for *Spodoptera litura* (Fabricius). **Engineering in agriculture, environment and food**, v. 4, n. 3, p. 77-82, 2011.

SILVA, R. A. et al. Monitoramento de moscas-das-frutas na Amazônia: amostragem de frutos e uso de armadilhas. In: SILVA, R. A.; LEMOS, W. de P.; ZUCCHI, R. A. (Ed.). **Moscas-das-frutas na Amazônia Brasileira: diversidade, hospedeiros e inimigos naturais**. Macapá-AP: EMBRAPA. p. 33-50. 2011.

SINGER, M. C. The definition and measurement of oviposition preference in plant-feeding insects. In: **Insect-plant interactions**. Springer, New York, NY, 1986. p. 65-94.

SINGH, P. **Artificial diets for insects, mites, and spiders**. New York: Cab Direct, 1977.

SINGH, P.; MOORE, R. F. Handbook of Insect Rearing. Amsterdam, **Elsevier**, v.2. p. 514, 1985.

SIOMAVA, N.; WIMMER, E.A.; POSNIEN, N. Size relationships of different body parts in the three dipteran species *Drosophila melanogaster*, *Ceratitidis capitata* and *Musca domestica*. **Development Genes and Evolution**, v. 226, n. 3, p. 245-256, 2016.

SLANSKY-JR, F. Nutritional ecology of endoparasitic insects and their hosts: an overview. **Journal of Insect Physiology**, v. 32, n. 4, p. 255-261, 1986.

SLANSKY, F.; SCRIBER, J.M. Food consumption and utilization, In: KERKUT, G. A.; GILBERT, L. I. (1985). **Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology**. Oxford: Pergamon. v.6, p 89–163. 1985.

SOUZA, J.M.G.A.D.; LIMA-FILHO, P.A.D.; MOLINA, W.F.; ALMEIDA, L.M.D.; GOUVEIA, M.B D.; MACÊDO, F.P.D.; LAUMANN, R.A.; PARANHOS, B.A.J. Wing morphometry and acoustic signals in sterile and wild males: implications for mating success in *Ceratitidis capitata*. **The Scientific World Journal**, v. 2015, 2015.

SOUZA FILHO, M. F. **Biodiversidade de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) e seus parasitoides (Hymenoptera) em plantas hospedeiras no Estado de São Paulo**. 1999. 173 f. Dissertação apresentada a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, Piracicaba, São Paulo, 1999.

SOUZA-FILHO, M. F.; RAGA, A.; ZUCCHI, R. A. Moscas-das-frutas no Estado de São Paulo: ocorrência e danos. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 1, p. 45-69, 2003.

SUGAYAMA, R.L.; MALAVASI, A. Ecologia Comportamental, p. 103-108. In MALAVASI, A.; ZUCCHI, R.A. (eds.). **Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: conhecimento básico e aplicado**. Ribeirão Preto, Holos, p.327. 2000.

WETZEL, W. C.; KHAROUBA, H.M.; ROBINSON, M.; HOLYOAK, M.; KARBAN, R. Variability in plant nutrients reduces insect herbivore performance. **Nature**, v. 539, n. 7629, p. 425-427, 2016.

WETZEL, W. C.; STRONG, D. R. Host selection by an insect herbivore with spatially variable density dependence. **Oecologia**, v. 179, n. 3, p. 777-784, 2015.

WHITE, I. M.; ELSON-HARRIS, M. M. Fruit flies of economic significance: their identification and bionomics. **Wallingford: CAB International**, p.601. 1994.

YILMAZ, A; JAVED, O; SHAH, M. Object Tracking: A survey. **ACM Comput. Surv.** v. 38, n. 4, p.13, 2006.

ZELDITCH, M.L. et al. Geometric Morphometrics for Biologists: a Primer. **Elsevier Academic Press**, San Diego, California, USA, 2004.

ZUCCHI, R. A.; MORAES, R. C. B. 2021. Moscas-das-frutas no Brasil-Espécies de *Anastrepha* suas plantas hospedeiras e parasitoides. Disponível em: <http://www.lea.esalq.usp.br/ceratitidis>.

ZUCOLOTO, F. S. Effects of flavour and nutritional value on diet selection by *Ceratitidis capitata* larvae (Diptera, Tephritidae). **Journal of Insect Physiology**, v. 37, n. 1, p. 21-25, 1991.

ZUCOLOTO, F.S. 2000. Alimentação e nutrição de moscas-dasfrutas, p.67-80. In A. MALAVASI & R.A. ZUCCHI (eds.), **Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil**. Conhecimento básico e aplicado. Ribeirão Preto, Holos, p.327.

APÊNCIES

Apêndice A- Deformações relativas, autovalores e porcentagem da influência de cada deformação relativa na variância.

Deformações relativas	Valores das deformações	% de variância
1	0,50946	58,49%
2	0,19906	8,93%
3	0,15961	5,74%
4	0,13945	4,38%
5	0,12306	3,41%
6	0,09593	2,07%
7	0,09257	1,93%
8	0,08501	1,63%
9	0,08276	1,54%
10	0,08147	1,50%
11	0,07667	1,32%
12	0,07399	1,23%
13	0,06843	1,06%
14	0,06250	0,88%
15	0,06048	0,82%
16	0,05991	0,81%
17	0,05635	0,72%
18	0,05519	0,69%
19	0,05280	0,63%
20	0,04942	0,55%
21	0,04672	0,49%
22	0,04402	0,44%
23	0,04160	0,39%
24	0,03888	0,34%

Apêndice B- Deformações relativas, autovalores e porcentagem da influência de cada deformação relativa na variância.

Deformações relativas	Valores das deformações	% de variância
1	0.88356	61.72%
2	0.25839	5.28%
3	0.22829	4.12%
4	0.20801	3.42%
5	0.19893	3.13%
6	0.18916	2.83%
7	0.16692	2.20%
8	0.16026	2.03%
9	0.15579	1.92%
10	0.13648	1.47%
11	0.13576	1.46%
12	0.12734	1.28%
13	0.12086	1.15%
14	0.11559	1.06%
15	0.11145	0.98%
16	0.10735	0.91%
17	0.09996	0.79%
18	0.09736	0.75%
19	0.09543	0.72%
20	0.09328	0.69%
21	0.08529	0.58%
22	0.08340	0.55%
23	0.08035	0.51%
24	0.07602	0.46%