



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA/FITOTECNIA

LUIZA NASCIMENTO BRAGA

**MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE *Bactrocera carambolae* DREW &
HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE): RISCO DE DISPERSÃO E PREVISÕES
FUTURAS**

FORTALEZA

2022

LUIZA NASCIMENTO BRAGA

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE *Bactrocera carambolae* DREW &
HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE): RISCO DE DISPERSÃO E PREVISÕES
FUTURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Magister Scientiae* em Agronomia/Fitotecnia. Área de concentração: Entomologia Agrícola.

Orientador: Prof. Patrik Luiz Pastori, *D. Sc.*
Coorientador: Ruan Carlos de Mesquita Oliveira, *D. Sc.*

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B794m Braga, Luiza Nascimento.
Modelagem de nicho ecológico de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) :
Risco de dispersão e previsões futuras / Luiza Nascimento Braga. – 2023.
66 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Patrik Luiz Pastori.
Coorientação: Prof. Dr. Ruan Carlos de Mesquita Oliveira.
1. Mosca-da-carambola. 2. Pragas quarentenárias. 3. Modelos de previsão. 4. Mudanças climáticas. 5.
CLIMEX. I. Título.

CDD 630

LUIZA NASCIMENTO BRAGA

MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICO DE *Bactrocera carambolae* DREW & HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE): RISCO DE DISPERSÃO E PREVISÕES FUTURAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de *Magister Scientiae* em Agronomia/Fitotecnia. Área de concentração: Entomologia Agrícola.

Orientador: Prof. Patrik Luiz Pastori, *D. Sc.*
Coorientador: Ruan Carlos de Mesquita Oliveira, *D. Sc.*

Aprovada em: 29/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Patrik Luiz Pastori, *D. Sc.* (Orientador)
Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)

Ruan Carlos de Mesquita Oliveira, *D. Sc.* (Coorientador)
IN Soluções Biológicas LTDA.

Neiliane Santiago Sombra Borges, *D. Sc.*
Agência de Defesa Agropecuária do Ceará (ADAGRI)

Marco Aurélio Tramontin da Silva, *D. Sc.*
Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)

A Deus

Ao meu amado filho, Eduardo, aos meus sábios pais, Rubemar e Cláudia, e às minhas queridas irmãs.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me criar e me sustentar a cada dia com seu amor, por ter planos maiores do que meus olhos podem enxergar e por me conceder muito mais do que eu peço.

À Universidade Federal do Ceará que, por meio dos professores e demais colaboradores, teve papel crucial na minha formação acadêmica desde a graduação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia pela oportunidade concedida para realização do Mestrado em Agronomia/Fitotecnia com ênfase em Entomologia Agrícola.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro através de bolsa de auxílio.

Ao prof. Patrik Luiz Pastori, pela orientação, paciência, apoio e bons conselhos desde a graduação. Agradeço especialmente pela compreensão que demonstrou diante das minhas limitações de tempo e por ter enxergado “brilho nos meus olhos”.

Ao Ruan Carlos de Mesquita Oliveira, meu coorientador, pela sugestão do tema de pesquisa e por me transmitir tão generosamente seus conhecimentos acerca da modelagem de distribuição de espécies. Também sou grata por encontrar um tempo na sua agenda para me auxiliar sempre que necessário.

Aos colegas do mestrado e do Laboratório de Entomologia Aplicada (LEA), pelo auxílio, colaboração e amizade.

Aos meus amados pais, Rubemar e Cláudia, por se dedicarem para oferecer o melhor que podiam para mim e minhas irmãs, por todo amor empreendido em nossa educação doméstica e por nos orientarem a seguir o caminho da educação.

Às minhas incríveis irmãs, Mayara e Rebeca, que são minhas melhores amigas desde o início e permanecerão até o fim de nossas vidas. Obrigada pelo apoio, ajuda e por fazerem parte da minha trajetória. Aos meus pequeninos irmãos, Rubemar Filho e Luiza Rubi, que são igualmente amados. A todos os meus familiares, avós, tios, primos, em especial à minha avó Marilac e minha tia Marcia.

Especialmente a minha mãe, Cláudia, padrasto, Alexandre, e irmãs Mayara e Rebeca por serem minha rede de apoio, me permitindo conciliar maternidade e mestrado, nesse momento de pandemia.

Ao meu filho, Eduardo, por ser minha motivação diária para melhorar, por alegrar meus dias e por personificar o amor na minha vida. Espero ser um exemplo para você e te conduzir pelos caminhos do bem.

RESUMO GERAL

O uso de modelagem de nicho ecológico de espécies é uma abordagem bem aceita para prever a possível extensão do habitat adequado para espécies, podendo colaborar para o manejo eficaz e medidas preventivas. O CLIMEX é um dos softwares de modelagem mais utilizados, capaz de prever a adequação climática de uma região para a espécie-alvo, partindo da premissa que, conhecendo o lugar onde uma espécie vive, pode-se inferir sobre as condições climáticas por ela tolerada e; assim simular os mecanismos que limitam sua distribuição geográfica. O software tem sido utilizado principalmente para modelar espécies com maior potencial de dano em países, continentes ou no mundo. Objetivou-se determinar a distribuição geográfica preditiva de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) no mundo. Nativa do Sudeste asiático, é uma praga de frutas extremamente polífaga e danosa, e que foi introduzida na América do Sul. A entrada ou a dispersão da mosca-da-carambola em áreas produtoras de frutas pode resultar em onerosos gastos com controle e perda de mercados importadores. Para auxiliar nas estratégias de biossegurança pré e pós-fronteira, a modelagem de nicho ecológico do CLIMEX estimou a potencial dispersão de *B. carambolae* pelo mundo, no cenário climático atual (2022) e futuro (2100) tendo em vista os efeitos das mudanças climáticas. Sob as condições climáticas atuais, o modelo indica que *B. carambolae* pode se estabelecer em todas as regiões tropicais e subtropicais do globo, com ênfase para os seguintes continente: África, América do Sul, América Central, Ásia e Oceania; não sendo uma ameaça relevante para a Europa, América do Norte e Antártica. Em simulação de cenário futuro, onde a temperatura terrestre será elevada em 3 °C, o nicho ecológico da espécie sofrerá redução, embora ainda permaneça concentrado na zona intertropical. O nível de adequação ambiental será reduzido em muitos países e outros tantos deixarão de ser ameaçados pela dispersão do inseto-praga. Isso deve-se à intensificação do estresse provocado pelo calor e pela redução da umidade.

Palavras-chave: mosca-da-carambola; pragas quarentenárias; modelos de previsão; mudanças climáticas; CLIMEX.

ABSTRACT

The use of species ecological niche modeling is a well-accepted approach to predicting the possible extent of suitable habitat for species and can contribute to effective management and preventive measures. CLIMEX is one of the most used modeling software, capable of predicting the climatic suitability of a region for the target species, based on the premise that, knowing the place where a species lives, one can infer about the climatic conditions tolerated by it; and thus simulate the mechanisms that limit their geographic distribution. The software has been used mainly to model species with the greatest damage potential in large countries, continents or the world. The objective of this study was to determine the predictive geographic distribution of *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) in the world, an extremely polyphagous and harmful fruit pest. Native to Southeast Asia and introduced to South America, the entry or dispersal of the carambola fruit fly in fruit-producing areas can result in costly control costs and loss of import markets. To assist in pre- and post-border biosecurity strategies for this pest, CLIMEX ecological niche modeling estimated the potential dispersal of *B. carambolae* around the world, in the current (2022) and future (2100) climate scenario, taking into account the effects of climate change. Under current climatic conditions, the model indicates that *B. carambolae* can establish itself in all tropical and subtropical regions of the globe, with emphasis on the following continents: Africa, South America, Central America, Asia and Oceania; not being a relevant threat to Europe, North America and Antarctica. In a simulation of a future scenario, where the terrestrial temperature will increase by 3 °C, the ecological niche of the species will suffer a reduction, although it will still remain concentrated in the intertropical zone. The level of environmental adequacy will be reduced in many countries and many others will no longer be threatened by the dispersal of the pest insect. This is due to increased heat stress and reduced humidity.

Keywords: carambola fruit fly; quarantine pests; forecasting models; climate changes; CLIMEX.

LISTA DE SIGLAS

SIGLA	Significado em inglês	Significado em português
CABI	Centre For Agricultural Bioscience International	Centro Internacional de Biociência Agrícola
DHCS	Cold Stress Accumulates At A Given rate	Taxa de Grau-Dia de Estresse por Frio
DHHS	Stress Accumulation Rate	Taxa de Graus-Dia de Estresse por Calor
DTCS	Cold Stress Degree-Day Threshold	Graus-Dia de Estresse por Frio
DTHS	Weekly Degree-Day Threshold	Limite de Estresse Térmico
DV0	Lower Temperature Threshold	Limite Mínimo de Temperatura
DV1	Lower Optimum Temperature	Temperatura Ideal Inferior
DV2	Upper Optimum Temperature	Temperatura Ideal Superior
DV3	Upper Temperature Threshold	Limite Máximo de Temperatura
EPPO	European And Mediterranean Plant Protection Organization	Organização Europeia e Mediterrânea de Proteção de Plantas
GBIF	Global Biodiversity Information Facility	Instalação Global de Informações sobre Biodiversidade
GI	Growth Index	Índice de Crescimento
GMIA5	Global Irrigated Area V5	Área Irrigada Global V5
HDS	Dry Stress Rate	Taxa de Estresse Seco
HWS	Wet Stress Rate	Taxa de Estresse Úmido
EI	Ecoclimatic Index	Índice Ecoclimático
ISC	Invasive Species Compendium	Compêndio de Espécies Invasoras
MNE	-	Modelagem de Nicho Ecológico
MAPA	-	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
PNMF	-	Programa Nacional de Combate às Moscas-das-Frutas
SI	Stress Index Annual	Índice de Estresse Anual
SM1	Lower Optimal Soil Moisture	Umidade Ideal Inferior
SM2	Upper Optimal Soil Moisture	Umidade Ideal Superior
SM3	Upper Soil Moisture Threshold	Limite Máximo de Umidade
SMDS	Dry Stress Threshold	Limite de Estresse Seco
SM0	Lower Soil Moisture Threshold	Limite Mínimo de Umidade
SMWS	Wet Stress Threshold	Limite de Estresse Úmido
SX	Stress Interaction Index	Índice de Interação de Estresse
THCS	Cold Stress Temperature Rate	Taxa de Temperatura de Estresse por Frio
THCSA	Cold Stress Average Temperature Threshold	Taxa de Temperatura de Estresse por Frio (Média)
THHS	Heat Stress Temperature Rate	Taxa de Estresse por Calor
TTCS	Cold Stress Temperature Threshold	Limite de Temperatura de Estresse por Frio
TTCSA	Cold Stress Temperature Threshold (Average)	Limite de Temperatura de Estresse por Frio (Médio)
TTHS	Heat Stress Temperature Threshold	Limite de Estresse por Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
2 MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE <i>Bactrocera carambolae</i> DREW & HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE) NO BRASIL E NO MUNDO	11
2.1 Introdução	16
2.2 Material e Métodos	19
2.3 Resultados	31
2.4 Discussão	36
2.5 Conclusões	40
3 MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE <i>Bactrocera carambolae</i> DREW & HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE) PARA CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS	41
3.1 Introdução	43
3.2 Material e Métodos	45
3.3 Resultados	47
3.4 Discussão	52
3.5 Conclusões	55
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO GERAL

A produção e a distribuição de frutas têm apresentado incrementos constantes para suprir os mercados cada vez mais exigentes por qualidade e variedade. Para isso, os países produtores têm buscado técnicas de cultivo e de manejo mais eficientes para aumentar a produtividade (HOFFMANN *et al.*, 2003; YAHIA; MALDONADO CELIS; SVENDSEN, 2017; ANGELINO *et al.*, 2019). A China é, com larga vantagem, o maior produtor mundial de frutas e conta com uma diversidade de cultivos, como maçã, citros, melão, pera, uva e tangerina (FAO, 2021). A Índia detém a segunda posição, cultivando principalmente manga, uva, maçã, mamão, banana e coco. Na terceira colocação, está o Brasil, responsável por 4,5% da produção mundial de frutas, dentre elas os citros, a banana, o cacau e o caju (FAO, 2021). Em 2021 o Brasil exportou mais de 1,24 milhão de toneladas de frutas frescas com faturamento superior à US\$ 1,21 bilhão, o que representa 20,4% a mais que no ano anterior (MAPA, 2022).

A fruticultura mundial tem como principal ameaça um grupo de insetos-praga conhecidas como moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) (PAPADOPOULOS, 2014; FIDELIS *et al.*, 2018; GABAYET; FLORES; HOEFLICH, 2020). Dos mais de 400 gêneros de moscas-das-frutas, três são os que causam mais danos às frutas: *Anastrepha*, *Ceratitis* e *Bactrocera* (Diptera: Tephritidae), possuindo juntos mais de 350 espécies vegetais hospedeiras (MALAVASI; ZUCCHI, 2000). No Brasil são registradas 128 espécies de *Anastrepha*, com mais de 300 espécies hospedeiras associadas (ZUCCHI; MORAES, 2021a). O gênero *Ceratitis* é representado no país por apenas uma espécie, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae), a mais cosmopolita e invasiva espécie de mosca-das-frutas (ADAIME; LEMOS; ZUCCHI, 2011), com mais de 115 espécies vegetais hospedeiras registradas (ZUCCHI; MORAES, 2021b). O gênero *Bactrocera*, por sua vez, é representado, no Brasil, unicamente pela mosca-da-carambola, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) e pode atacar mais de 20 vegetais (ADAIME *et al.*, 2016).

No gênero *Bactrocera* spp., estão incluídas algumas das espécies de moscas-das-frutas mais invasoras e cosmopolitas (ALI *et al.*, 1999; VARGAS; GÓMEZ; MICHAUD, 2015). Dentre elas, *B. carambolae*, mosca-da-carambola, é considerada uma das mais severas (Categoria A) na região do Pacífico, onde é nativa e ataca diversas culturas domésticas e comerciais (VARGAS; PIÑERO; LEBLANC, 2015), resultando em perdas consideráveis na produção, redução do preço das frutas, devido ao comprometimento da qualidade e, imposição de barreiras para exportações (SARWAR, 2015).

Comumente as espécies de moscas-da-frutas são transportadas por meio do comércio internacional de frutas e de outros vegetais (PERMALLOO, 1998; PECK;

MCQUATE, 2004). Provavelmente foi dessa forma que *B. carambolae* chegou ao Suriname em 1975 (SAUERS-MULLER, 2005) e posteriormente, ao Brasil, em 1996, no município de Oiapoque - AP (SAUERS-MULLER; SIGNORETTI, 2013) e se dispersou por municípios vizinhos, sendo registrada e oficialmente controlada nos Estados do Amapá, Pará e Roraima (LEBLANC *et al.*, 2019; CABI, 2021).

Logo na chegada, já foram identificados alguns hospedeiros primários para *B. carambolae* no Brasil, sendo: a carambola (*Averrhoa carambola*), a goiaba (*Psidium guajava*), o jambo-vermelho (*Syzygium malaccensis*), as laranjas (*Citrus aurantium*), a maçaranduba, Arapaju, Mararaju (*Manilkara zapota*) e a manga (*Mangifera indica*) (BRASIL, 2008). Desses hospedeiros, a goiaba, a laranja e a manga são as plantas com maior importância econômica, por serem culturas de considerável volume de produção e consumo interno, como também para exportação (PESSOA *et al.*, 2016). Ainda considerando plantas exploradas economicamente, tem-se o ataque da praga à uva e à acerola, que apesar de não serem hospedeiras preferenciais, permitem que *B. carambolae* complete o desenvolvimento, deixando descendentes viáveis (PASINATO, 2018).

Uma das maiores preocupações das autoridades fitossanitárias brasileiras envolve o risco de entrada e de dispersão da mosca-da-carambola na região do Vale do São Francisco, região essa que engloba áreas dos Estados da Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (MARCHIORO, 2016). Essa região é conhecida pela considerável produção de uma variedade de frutas usando sistema de irrigação o que garante, para a espécie-praga, plantas hospedeiras e condições de temperatura e de umidade favoráveis durante todo o ano (PESSOA *et al.*, 2016; MAPA, 2019a).

Estudos apontam que a umidade do solo desempenha importante papel no ciclo de vida de moscas-das-frutas do gênero *Bactrocera* spp., portanto a irrigação, que tanto contribui para o desenvolvimento das plantas, pode também ser uma forte aliada dessa espécie (MALAVASI, 2015). Assim, fatores ‘modificadores’ do clima como é o caso da irrigação podem desempenhar influência considerável na expansão dos limites territoriais interferindo na abundância sazonal de pragas durante o ano (DE VILLIERS *et al.*, 2016). Considerando que cerca de 40% da produção agrícola mundial é sustentada pela irrigação, que viabiliza a produção em períodos secos e permite até quatro ciclos produtivos em um mesmo ano, é fundamental considerar a irrigação nos estudos que mapeiam a distribuição das espécies (ZACCARIA; RODRIGUES, 2020).

A distribuição e a dispersão de espécies sempre motivaram estudos e, algumas metodologias estão baseadas em softwares que elaboram modelos de nicho ecológico (MNE)

onde, por meio de análises inferenciais, permitem a predição do estabelecimento de pragas, como a mosca-da-carambola. Esses softwares podem gerar gradientes de adequação da espécie, projetando-os em um espaço geográfico, em escala local ou global, utilizando dados de ocorrência da espécie e dados ambientais formados a partir de algoritmos (LOMOLINO; RIDDLE; BROWN, 2009; PETERSON, *et al.*, 2011).

Os modelos podem ser classificados basicamente de duas formas, sendo correlativos ou mecanicistas. Os modelos correlativos utilizam modelagem clássica apoiada em dois tipos de dados, sendo os registros de ocorrência da espécie e as variáveis ambientais para a região de interesse, gerando uma correlação entre os dois conjuntos de variáveis para determinar a distribuição geográfica potencial da espécie (DALAPICOLLA, 2016). Já os modelos mecanicistas utilizam uma abordagem que leva em consideração as características biológicas da espécie de estudo e os dados ambientais para estimar áreas onde a espécie pode se estabelecer. Esse tipo de modelagem pode ou não levar em conta dados de ocorrência da espécie para realizar suas análises (DALAPICOLLA, 2016).

Os dados ambientais utilizados nas análises são predominantemente climáticos, como temperatura, umidade, precipitação, mas também podem ser a profundidade da água, o tipo de solo, entre outros (GIANNINI *et al.*, 2012). Essas informações podem ser obtidas em bancos de dados internacionais que visam à padronização, compartilhamento e disponibilização de variáveis ambientais em formato digital (ELITH; LEATHWICK, 2009). Além dos bancos de dados geoclimáticos, os bancos de informações biológicas de espécies também vem sendo aprimorados para disponibilizar dados de coleções biológicas, museus e herbários (GRAHAM *et al.*, 2004).

Todas as informações ambientais e biológicas são cruciais para o conhecimento sobre o local onde uma espécie vive e seu modo de vida. A partir desse conhecimento, pode-se fazer inferências sobre as condições ambientais que a espécie tolera e projetar para ambientes onde ela não está distribuída (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Essa é a suposição fundamental que sustenta a maioria modelos de distribuição de espécies (KRITICOS *et al.*, 2015a), com o Bioclim, o CLIMEX, o Domain, o GARP e o MaxEnt, que buscam caracterizar o ambiente ocupado pela espécie para extrapolar para novas áreas (KRITICOS *et al.*, 2015a). Porém, enquanto a maioria dos modelos se concentra em descrever a relação entre as ocorrências das espécies usando variáveis ambientais estáticas, o CLIMEX pode estimar a abundância relativa, a variação sazonal e a distribuição geográfica de uma espécie, sendo um dos softwares de modelagem mecanicista mais bem aceitos (KRITICOS *et al.*, 2015a). O software CLIMEX

simula mecanismos em relação ao clima para limitar geograficamente a distribuição das espécies ao longo do tempo (SUTHERST; MAYWALD; KRITICOS, 2007).

O software de modelagem de nicho ecológico CLIMEX (CLIMatic indEX), desenvolvido pela Hearne Scientific Software Pty Ltd, Austrália, foi descrito pela primeira vez por Sutherst e Mayward em 1985 (SUTHERST; MAYWALD, 1985). O aplicativo possui duas ferramentas de modelagem de adaptação climática: o 'Modelo CLIMEX' e a 'Climate Matching'. Na primeira, utilizada neste trabalho, pode-se obter a resposta da espécie ao clima em diferentes locais ao longo do tempo. Já na segunda, a função CLIMEX, é possível comparar os dados meteorológicos em locais diferentes sem referência a nenhuma espécie em particular (SUTHERST; MAYWALD; KRITICOS, 2007).

Por tanto, o objetivo deste trabalho foi prever as áreas onde a mosca-da-carambola encontrará condições ambientais favoráveis para o seu estabelecimento em todo o mundo, com base em seus requerimentos climáticos. Além disso, objetiva-se estimar os impactos das mudanças climáticas sobre o nicho ecológico da espécie, prevendo as alterações que o aquecimento global provocará na adequação ambiental de *B. carambolae* no mundo.

2 MODELAGEM DE NICHO ECOLÓGICO DE *Bactrocera carambolae* DREW & HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE) NO BRASIL E NO MUNDO

RESUMO

Bactrocera carambolae Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), a mosca-da-carambola, é uma importante praga da fruticultura mundial. O risco de sua introdução em novas áreas é facilitado pelo comércio de frutas e pelo turismo, resultando em impactos econômicos associados à redução da produção e da qualidade dos frutos, perda de mercado para exportação e onerosas exigências de quarentena e erradicação. Empregando a modelagem de nicho ecológico CLIMEX, com base nos parâmetros climáticos adequados para a espécie, estimou-se a adequação ambiental de *B. carambolae* em escala global e, em menor escala, avaliou-se o risco de dispersão na Ásia, continente de origem, e no Brasil, onde foi introduzida. Considerando que a irrigação, constantemente presente nas áreas produtoras de frutas pode favorecer a permanência da *B. carambolae* durante as épocas mais secas, utilizou-se dados das áreas irrigadas para as previsões de distribuição da espécie. As previsões baseadas na modelagem CLIMEX sugerem que praticamente toda a porção tropical e subtropical da América do Sul e da América Central é adequada para a mosca-da-carambola, assim como a África Subsaariana, onde não há relatos de ocorrência da mesma. A Ásia também apresenta adequação do Sul da China até a Indonésia, e a costa Leste e Oeste da Índia, grande produtora de manga. O litoral Norte da Austrália, onde a praga não foi registrada até o momento também mostrou-se adequado para seu estabelecimento. As informações geradas demonstram o potencial de distribuição da espécie-praga e podem ser utilizadas por órgãos governamentais como ferramenta para tomada de decisão visando evitar a dispersão da mosca-da-carambola.

PALAVRAS-CHAVE: Mosca-da-carambola; Pragas quarentenárias; Modelo de distribuição de espécies; CLIMEX.

ABSTRACT

Bactrocera carambolae Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), carambola fruit fly, is an important pest of fruit production worldwide. The risk of its introduction into new areas is facilitated by the fruit trade and tourism, resulting in economic impacts associated with reduced fruit production and quality, loss of export market, and onerous quarantine and eradication requirements. Using ecological niche modeling, developed by CLIMEX, based on suitable climatic parameters for the species, the environmental suitability of *B. carambolae* was estimated on a global scale and, on a smaller scale, the risk of dispersal in Asia was evaluated. continent of origin, and in Brazil, where it was introduced. Considering that irrigation, which is constantly present in fruit-producing areas, can favor the permanence of *B. carambolae* during the driest seasons, data from irrigated areas was used to predict the distribution of the species. CLIMEX forecasts suggest that practically the entire tropical and subtropical portion of South and Central America is suitable for the carambola fruit fly, as well as sub-Saharan Africa, where there are no reports of its occurrence. Asia also shows suitability from South China to Indonesia, and the East and West coast of India, a major producer of mangoes. The coastline of Northern Australia, where the pest has not yet been recorded, is also suitable for its establishment. The information generated demonstrates the distribution potential of the pest species and can be used by government agencies as a decision-making tool to prevent the dispersion of the carambola fruit fly around the world.

KEYWORDS: Carambola fruit fly; Quarantine pests, Species distribution model. CLIMEX.

2.1 INTRODUÇÃO

Insetos da família Tephritidae, Ordem Diptera, são conhecidos como moscas-das-frutas e representam o principal problema fitossanitário para a maioria das frutas produzidas e comercializadas no mundo (FIDELIS *et al.*, 2018). São mais de 4300 espécies distribuídas em 484 gêneros, sendo *Anastrepha* spp., *Bactrocera* spp. e *Ceratitis* spp. os gêneros de maior relevância econômica (SILVA *et al.*, 2017).

Dentre as espécies, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), conhecida como mosca-da-carambola, tem recebido mais atenção devido ao seu potencial de causar danos e a ampla gama de hospedeiros que possui (MALAVASI; ZUCCHI, 2000). O primeiro relato aconteceu em caramboleiras, mas o inseto-praga já foi registrado em mais de 100 espécies vegetais (DANJUMA *et al.*, 2014).

A mosca-da-carambola é nativa do Sudeste da Ásia com ocorrência registrada nos seguintes países asiáticos: Bangladesh, Brunei, Camboja, Timor Leste, Índia, Indonésia, Malásia, Mianmar, Cingapura, Tailândia e Vietnã. Na América do Sul, a mosca-da-carambola, *B. carambolae*, foi identificada em 1975 no Suriname (SAUERS-MULLER, 2005), posteriormente na Guiana Francesa em 1989 e, no Brasil em 1996 onde é classificada como praga quarentenária presente estando sob controle oficial do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e, restrita à alguns municípios dos Estados do Amapá, Pará e Roraima (SAUERS-MULLER; SIGNORETTI, 2013; LEBLANC *et al.*, 2019; CABI, 2021).

A entrada e/ou a dispersão da mosca-da-carambola em países produtores de frutas pode resultar em considerável prejuízo, causado pela queda da produção, inviabilização dos frutos e, principalmente, pela perda de mercados importadores (MAPA, 2019b; SOUSA, 2021). No Brasil, estima-se que a dispersão da mosca-da-carambola para outros Estados pode gerar prejuízo estimado em US\$ 120 milhões ao ano, apenas com a suspensão das exportações de manga, laranja e goiaba, e ameaçaria a manutenção dos mercados de exportação para outras culturas (MAPA, 2019b).

Os maiores produtores de frutas do mundo, China, Índia e Brasil, respectivamente são os mais ameaçados pela dispersão da *B. carambolae* (FAO, 2021). O primeiro faz fronteira com países onde *B. carambolae* está presente, a Índia registrou a espécie em três localidades (Abhirampur, Ilhas Andaman e Nicobar) e, o Brasil, terceiro maior produtor, já registrou a espécie em municípios do Amapá, Pará e Roraima (EPPO, 2022).

Diante do risco de dispersão da espécie-praga, o MAPA do Brasil, instituiu o Programa Nacional de Combate às Moscas-das-Frutas (PNMF) com o objetivo de erradicar a mosca-da-carambola e mais quatro espécies de moscas-das-frutas já estabelecidas (RIBEIRO,

2015). O retorno estimado do programa é de R\$ 26,40 a R\$ 35,70 para cada R\$ 1,00 investido (SUGAYAMA *et al.*, 2015). Além das medidas de controle da praga nos focos detectados, o MAPA estabeleceu, por meio da Instrução Normativa n° 28 de 20 de julho de 2017, medidas de monitoramento, realizado pelas agências de defesa, em todos os Estados da Federação (BRASIL, 2017).

A Instrução Normativa n° 28, de 20 de julho de 2017, tem por objetivo definir os procedimentos operacionais para prevenção, contenção, supressão e erradicação da *B. carambolae*. No artigo 5° da referida IN, fica estabelecida a classificação de risco de introdução e dispersão da praga para novas áreas em três níveis: I - baixo risco; II - médio risco e III - alto risco. Essa classificação é feita pelo Departamento de Sanidade Vegetal da Superintendência Federal de Agricultura usando critérios como a proximidade com os países de ocorrência da praga; a proximidade de outras áreas com ocorrência da praga; o nível de efetividade de execução das ações de monitoramento e de controle nas áreas com ocorrência contíguas à área objeto de avaliação; a movimentação de pessoas, produtos, equipamentos e meios de transporte provenientes de áreas de ocorrência da praga; a existência de barreiras naturais; a existência de hospedeiros; e a estrutura e o funcionamento do serviço oficial de defesa sanitária vegetal da unidade da federação cujas áreas são objetos de avaliação (BRASIL, 2017).

Atendendo as exigências contidas na IN n° 28, em 2021 foram monitoradas semanalmente ou quinzenalmente, pelas agências de defesa estaduais, mais de 9 mil armadilhas distribuídas em todo o território brasileiro (MAPA, 2021). Foram utilizadas armadilhas do tipo Jackson (que usa feromônio sexual para atrair e capturar machos) e McPhail (que utiliza atrativo alimentar para atrair especialmente as fêmeas) (GODOY; PACHECO; MALAVASI, 2011).

Devido a importância da espécie-praga e de compreender a possibilidade do estabelecimento em determinadas regiões produtoras e exportadoras de frutas, pode-se utilizar a modelagem de nicho ecológico (MNE), também conhecida por modelagem de distribuição de espécies, para estimar a adequação ambiental em todo o mundo.

O nicho ecológico, que dá nome a essa ferramenta de modelagem, teve seu conceito remodelado diversas vezes. Em 1957, George E. Hutchinson definiu nicho ecológico como sendo a gama de condições ambientais onde uma espécie é capaz de se estabelecer e reproduzir com sucesso (HUTCHINSON, 1957). O zoólogo e ecologista, Hutchinson, considerou que as espécies teriam um nicho fundamental, onde todas as condições e recursos seriam ideais para sua sobrevivência e reprodução. Porém, as interações interespecíficas forçariam essas espécies a ocuparem um nicho menor e no qual são menos adaptadas, chamado de nicho realizado (GRIESEMER, 1994). A representação matemática do nicho fundamental ou realizado de uma

espécie em um espaço geográfico é a base da modelagem de nicho ecológico (SMITH & VARZI, 1999).

Para que essa representação seja precisa é necessário conhecer a distribuição geográfica de ocorrência da espécie, seja animal, vegetal ou microorganismo, e os dados ambientais dessas localidades, para que, usando algoritmos seja gerado um gradiente de adequação ambiental projetado para uma região de interesse ou para todo o globo terrestre (LOMOLINO; RIDDLE; BROWN, 2009). Assim, o MNE pode estimar os locais onde a *B. carambolae* encontraria condições favoráveis, caso o controle aplicado pelos países onde ela está presente não seja suficiente para contê-la (SILVA *et al.*, 2018). Além disso, poderiam ser elaborados planos de ação direcionados aos locais onde a espécie teria melhores condições de se estabelecer (GIANNINI *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Neste estudo, utilizou-se o software CLIMEX que permite fazer uma análise descritiva de como a espécie responde a variáveis climáticas em escalas temporais (diária ou semanal) (KEARNEY; PORTER, 2009) para conhecer a resposta de *B. carambolae* ao clima e sua distribuição geográfica potencial, desconsiderando as medidas de controle e interações com outros níveis tróficos (KRITICOS *et al.*, 2015b).

Tendo em vista a importância de compreender a adequação climática de *B. carambolae* em locais onde a espécie não foi introduzida, ou não está plenamente distribuída, objetivou-se neste estudo realizar uma projeção a nível global e identificar áreas com maior risco de serem colonizadas por *B. carambolae*.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O CLIMEX (versão 4.0, software Hearne, Austrália) é uma ferramenta computacional, que permite estudar os efeitos do clima na distribuição geográfica de espécies e a abundância relativa das mesmas (SUTHERST; MAYWALD; KRITICOS, 2007). O CLIMEX tem duas funções principais: Comparar locais (Compare Locations) e combinar climas (Match Climates). Neste trabalho foi aplicada a função comparar locais para uma espécie, de forma a obter a resposta de *B. carambolae* ao clima em diferentes locais ao longo do tempo.

O software precisa ser abastecido com as informações sobre locais onde a espécie está estabelecida, ou seja, sua distribuição geográfica nativa e dos locais onde foi introduzida para então desenvolver o modelo (SUTHERST; MAYWALD; KRITICOS, 2007). Para esse fim, foram consultadas bases de dados globais que visam a disponibilização e padronização das informações sobre espécies no Mundo, sendo: O Global Biodiversity Information Facility (GBIF), a European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) e a Centre for Agricultural Bioscience International (CABI).

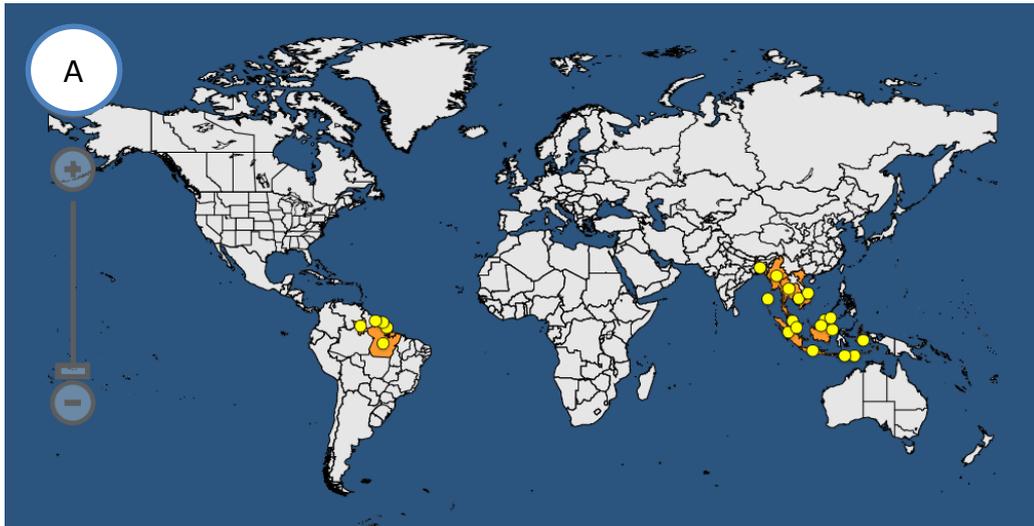
Além da localização dos pontos de ocorrência da espécie-praga, o CLIMEX também utiliza um conjunto de parâmetros que dizem respeito à resposta da espécie em relação às variações climáticas. Esses parâmetros foram obtidos na literatura científica disponível para mosca-da-carambola, somados às informações de outras espécies do gênero *Bactrocera*.

2.2.1 Distribuição geográfica de *B. carambolae*

Os pontos de ocorrência da espécie são normalmente utilizados na MNE (KUMAR *et al.*, 2014). As coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos locais onde a mosca-da-carambola foi registrada, foram obtidas em diferentes redes de compartilhamento de dados. Mais de 740 registros estão contidos no GBIF, uma rede internacional de dados destinada a fornecer acesso aberto a informações sobre todos os tipos de vida na terra, porém poucos tinham detalhes de coordenadas geográficas. Também foi consultada a base de dados globais do EPPO, que fornece informações específicas e constantemente atualizadas sobre pragas (EPPO, 2022), das quais foram coletados registros de ocorrência da *B. carambolae* (Figura 1). O Invasive Species Compendium (ISC), elaborado e disponibilizado pelo CABI, é um recurso enciclopédico que reúne uma ampla gama de informações científicas para apoiar a tomada de decisão no manejo de espécies invasoras em todo o mundo (CABI, 2021). Esse recurso também foi utilizado no levantamento de dados sobre a espécie em estudo.

Os únicos continentes onde a ocorrência da *B. carambolae* foi relatada são Ásia e América do Sul. Bangladesh, Brunei, Camboja, Timor Leste, Índia, Indonésia, Malásia, Myanmar, Cingapura, Tailândia e Vietnã são os países asiáticos onde a espécie-praga ocorre e, na América do Sul, Guiana Francesa, Suriname e Brasil (Figura 1) (LEBLANC *et al.*, 2019; CABI, 2021).

Figura 1 - Pontos de ocorrência de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) no mundo.



FONTE: EPPO, 2022.

A compilação dos dados de ocorrência com coordenadas geográficas disponíveis totalizou 44 localidades (Tabelas 1 e 2). Esses dados foram inseridos no CLIMEX para gerar os algoritmos de conhecimento das condições ambientais dessas localidades e extrapolar para o mundo.

Tabela 1 - Pontos de ocorrência de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) nas Américas

País	Localidade	Latitude	Longitude	Distribuição	Referência
Brasil	Mazagão	0.000	-51.283	Presente e restrita	EPPO (2022)
	Santana	0.000	-51.167		
	Pára	-	-		
	Amapá	-	-		
	Roraima	-	-		
Guiana Francesa	Sant-Georges	3.817	-51.886	Presente e restrita	Drew e Hancock (1994); EPPO (2022)
	Sant-Georges	3.883	-51.833		
	Saül	4.000	-53.250		
	Regina	4.317	-52.133		
	Roura	4.583	-52.467		
Suriname	Roura	4.733	-52.333	Presente e restrita	Sauer-Muller (1991); EPPO (2022)
	Apoera	5.200	-57.167		
	Apoera	5.217	-57.183		
	Para	5.417	-55.333		
	Coronie	5.583	-56.250		
	Saramacca	5.667	-55.583		
	Paramaribo	5.867	-55.167		

FONTE: Elaborado pela autora.

Tabela 2 - Pontos de ocorrência de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) na Ásia

País	Localidade	Latitude	Longitude	Distribuição	Referência
Bangladesh	-	-	-	Presente, sem detalhes	EPPO (2022)
Brunei Darussalam	Belait	4.500	114.667	Presente e restrita	EPPO (2022)
Camboja	-	-	-	Presente, sem detalhes	EPPO (2022)
Cingapura	Pierce Lake	1.349	103.837	Presente, sem detalhes	Drew e Hancock (1994)
Índia	Abhirampur	22.340	88.220	Presente e restrita	Drew e Hancock (1994); EPPO (2022)
	Ilhas Andaman	-	-		
	Nicobar	-	-		
	West Java	-6.910	107.610		
	Bogor	-6.598	106.799		
	Palangkaraya	-2.190	113.540		
	Wonosobo Regency	-7.492	110.004		
Indonésia	Sumbawa Regency	-8.740	117.533	Presente, sem detalhes	Drew e Hancock (1994); EPPO (2022)
	Bontokape	-8.511	118.648		
	Lombok	-8.500	115.489		
	Gringsing	-7.000	110.000		
	Kalimantan	-	-		
	Maluku	-	-		
	Nusa Tenggara	-	-		
	Ilhas de Sonda Menor	-	-		
	Ilhas Maluku	-	-		
	Sumatra	-	-		
	Trolak	3.900	101.410		
Malásia	Teluk Intan	4.020	101.010	Presente, sem detalhes	Drew e Hancock (1994); EPPO (2022)
	Kota Kinabalu	6.080	116.160		
	Ipoh	4.583	101.083		
	Tambunan	5.450	116.000		
	Kinabatangan	5.500	117.000		
	Belum Perak	5.543	101.342		
	Labis	2.500	103.200		
	Selangor	2.967	101.867		
Balakong	3.030	101.750			

Continuação da Tabela 2

	Kuala Lumpur	3.104	101.661		
	Kapar	3.200	101.300		
	Limbang	4.520	115.000		
	Sabah	-	-		
	Sarawak	-	-		
	Oeste	-	-		
Mianmar	-	-	-	Presente, sem detalhes	Drew e Hancock (1994)
	Songhkla	6.833	100.667		
	Tha Chang	9.300	98.990		
	Ranong	10.100	98.750		
Tailândia	Andaman Islands	12.150	92.750	Presente e restrita	EPPO (2022)
	Ubon Ratchathani	15.167	105.167		
Timor Leste	-	-	-	Presente e restrita	EPPO (2022)
Vietnã	Thua Thien Hue	16.167	107.833	Presente, sem detalhes	EPPO (2022)

FONTE: Elaborado pela autora.

2.2.2 Índices do modelo CLIMEX

O modelo CLIMEX avalia um conjunto de parâmetros que dizem respeito à resposta da espécie em relação ao clima. Esses parâmetros geram índices como o Índice de Crescimento (GI) que descreve o potencial de crescimento de uma população da espécie-alvo durante a estação do ano mais favorável. Outros índices descrevem a redução da população durante a estação desfavorável, sendo os índices de estresse de frio, quente, úmido e seco (KRITICOS *et al.*, 2015a).

2.2.2.1 Índice Ecoclimático e índice de crescimento

O Índice Ecoclimático (EI) é uma medida geral da adequação climática da espécie-alvo a determinado local (KRITICOS *et al.*, 2015b). Esse índice numérico, de grande importância para a avaliação da adaptação da espécie, é calculado pelo software CLIMEX, usando a combinação dos seguintes índices: Índices de Crescimento (GI), Índice de Estresse Anual (SI) e Índice de Interação de Estresse (SX) de cada ponto, resultando na fórmula: $EI = GIA \times SI \times SX$.

O EI indica a adaptação da espécie e, variou de 0 a 60 neste trabalho, sendo o limite máximo proporcional à adequação ambiental estimada, ou seja, igual a 0 indica que a espécie

não se adapta àquela região e quanto mais perto 60 sugere que a espécie tem grande adequação ambiental e, portanto, elevada probabilidade de se estabelecer (KRITICOS *et al.*, 2015c).

O índice de crescimento é o indicador coletivo do crescimento das espécies. Esse índice é baseado na temperatura, umidade do solo, radiação, substrato, quantidade de luz exposta e diapausa (quando houver), enquanto os índices de estresse, ou seja, estresse frio, estresse quente, estresse úmido e estresse seco são fatores que limitam o crescimento da população da espécie-alvo (KRITICOS *et al.*, 2015c; BYEON *et al.*, 2017).

2.2.2.2 Índice de umidade

A umidade do solo é indispensável para o desenvolvimento de pupas da mosca-da-carambola. Solos com umidade abaixo ou acima da considerada ideal causam morte da pupa por falta de umidade ou por favorecer o desenvolvimento de fungos entomopatogênicos (RODRIGUES, 2004).

Estudos indicam que a faixa de umidade favorável, onde os insetos apresentarão boa velocidade de desenvolvimento, maior longevidade e fecundidade, é entre 0,4 e 0,8 (RODRIGUES, 2004). Os parâmetros do guia de usuário CLIMEX sugerem que a faixa ideal de umidade esteja entre 0,1 a 1,5 (Tabela 3). Nessa faixa, os níveis de umidade do solo são mais adequados para o crescimento e o desenvolvimento populacional das espécies e o estresse por umidade, portanto, não pode se acumular. Uma vez que os limites de tensão tenham sido definidos, os parâmetros de desenvolvimento de umidade (SM0, SM1, SM2 e SM3) podem ser ajustados. Para esse ajuste foram inseridos valores experimentais sobre como a espécie responde à umidade. Os valores dos parâmetros referem-se à umidade média do solo na profundidade de enraizamento da maioria das culturas. Os parâmetros foram definidos pelos desenvolvedores do CLIMEX para garantir que o índice de umidade seja diretamente proporcional ao teor real de umidade do solo (SUTHERST; MAYWALD; KRITICOS, 2007).

Para *B. carambolae* a literatura indica que os níveis de umidade do solo (0, 0,3, 0,6 e 0,9 da capacidade de campo) não alteraram significativamente a taxa de emergência das moscas adultas. Contudo, da emergência de insetos adultos foi afetada pelo tipo de solo, com maior número observado em solo arenoso, seguido do franco-argilosos e do franco-arenosos (AMARAL *et al.*, 2021).

Dessa forma, para o desenvolvimento do modelo, foi utilizada ampla faixa de umidade do solo, onde o limite mínimo de umidade (SM0) foi estabelecido em 0,1, pois é o mínimo necessário para a manutenção da vida dos insetos. A umidade ideal mínima (SM1) foi de 0,5; a umidade ideal máxima (SM2) igual a 1,0 e o limite máximo de umidade (SM3)

correspondeu a 1,5, o mesmo indicado para *Bactrocera dorsalis* (Handel 1912) (Diptera: Tephritidae), outra espécie do gênero, em estudo similar (KIM; PARK; KIM, 2020).

Tabela 3 - Descrição dos parâmetros de umidade do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor ajustado
Limite mínimo de umidade	SMO	Nenhum crescimento populacional ocorre em ou abaixo desta umidade média semanal do solo	0-0,25	0,1
Umidade ideal inferior	SM1	Limite inferior da faixa de umidade ideal do solo para o crescimento populacional. A taxa de crescimento populacional é reduzida se a umidade média semanal do solo estiver abaixo desse valor	0,1-1,0	0,5
Umidade ideal superior	SM2	Limite superior da faixa de umidade ideal do solo para o crescimento populacional. A taxa de crescimento populacional é reduzida se a umidade média semanal do solo estiver acima	0,25-1,5	1
Limite máximo de umidade	SM3	Nenhum crescimento populacional ocorre nesta umidade média semanal do solo ou acima	1-10	1,5

FONTE: Elaborada pela autora.

2.2.2.3 Índice de temperatura

A temperatura é o fator ambiental que mais impacta o desenvolvimento dos insetos, uma vez que estes são ectotérmicos e não regulam sua temperatura corporal. De forma geral, 25 °C é considerada temperatura ótima para o desenvolvimento dos insetos, sendo 15 °C o limiar inferior e 38 °C o superior (RODRIGUES, 2004).

Esses dados corroboram com estudos sobre o efeito de quatro regimes de temperatura (20, 25, 27 e 30 °C) no ciclo vida da mosca-da-carambola em goiaba, *Psidium guajava*. Os resultados indicaram que o período de pré-oviposição é maior a 20 °C e menor para todos os outros regimes de temperatura. Já o período de oviposição, a fecundidade bruta (ovo/fêmea), a fecundidade líquida (adulto/fêmea), o número de ovos diário (ovo/dia), a longevidade da fêmea e do macho (dias) diminuíram a 20 °C e aumentaram com o acréscimo da temperatura. A taxa reprodutiva e a expectativa de vida diminuem a 20 °C e atingem o patamar ótimo em 25-27 °C com um declínio crítico a 30 °C (DANJUMA *et al.*, 2018).

No caso da mosca-da-carambola, 11,2 °C é o limite inferior para o desenvolvimento dos ovos (DANJUMA *et al.*, 2014) sendo, portanto, considerada a temperatura limite inferior

(DV0) no modelo proposto. Assim como 25°C foi estabelecida como ótima inferior (DV1) e 30°C ótima superior (DV2) (Tabela 4), uma vez que nessa faixa foram obtidas maiores taxas de sobrevivência da espécie (DANJUMA *et al.*, 2014).

Tabela 4 - Descrição dos parâmetros de temperatura do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor
Limite mínimo de temperatura	DV0	Nenhum crescimento populacional ocorre nessa temperatura média semanal ou abaixo	-50 a 25	11,2
Temperatura ideal inferior	DV1	O limite inferior da faixa de temperaturas ideais para o crescimento populacional. A taxa de crescimento populacional é reduzida se a temperatura média mínima semanal estiver abaixo desse valor	10 a 33	25
Temperatura ideal superior	DV2	O limite superior da faixa de temperaturas ideais para o crescimento populacional. A taxa de crescimento populacional é reduzida se a temperatura média semanal máxima exceder este valor	25 a 42	30
Limite máximo de temperatura	DV3	Nenhum crescimento populacional ocorre quando a temperatura máxima média semanal é igual ou superior a este valor	33 a 50	35

FONTE: Elaborada pela autora.

A temperatura limite superior (DV3) (Tabela 3) foi estabelecida em 35 °C (DANJUMA *et al.*, 2014). A quantidade de graus-dias para a espécie completar seu ciclo de vida foi de 371,4 graus-dia (DANJUMA *et al.*, 2014). Todos os valores constam dentro da amplitude indicada pelo CLIMEX.

2.2.2.4 Índice de estresse por frio

As baixas temperaturas podem ocasionar estresses como redução ou pausa na atividade e até no desenvolvimento dos insetos (BRÉVAULT; QUILICI, 2000), portanto a temperatura limite de estresse a frio (TTCS) (Tabela 3) foi definida em 11 °C, considerando que temperaturas abaixo interferem negativamente a ponto de nenhum estágio imaturo se desenvolver (DANJUMA *et al.*, 2014). A taxa de estresse por frio (THCS) (Tabela 5) foi definida em -1 °C e para o limiar de graus-dia (DTCS), foi considerado 30 graus-dia (Tabela 5). Os graus-dia de estresse pelo frio (DHCS), foi definido em -0,00025 semana⁻¹, para justificar o limite Norte do globo terrestre onde a espécie foi relatada, considerando que temperaturas mais baixas são encontradas mais facilmente ao se aproximar dos polos do planeta. Para *B.*

dorsalis que tem ocorrência relatada em localidades mais frias, o parâmetro DHCS foi estabelecido em $-0,0035$ semana⁻¹ (KIM; PARK; KIM, 2020).

Tabela 5 - Descrição dos parâmetros de estresse por frio do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor ajustado
Limite de Temperatura de Estresse por Frio	TTCS	Representa a média de temperatura mínima semanal abaixo da qual o Estresse Frio se acumula	-50 a 20°C	11°C
Taxa de Temperatura de Estresse por Frio	THCS	Taxa na qual o Estresse por Frio se acumula quando as temperaturas ficam abaixo do valor limite de TTCS	-1 a 0	-0,012
Graus-dia de estresse por frio	DTCS	Limite de temperatura usado para os cálculos dos graus-dia de estresse frio	0 a 200C	10°C
Taxa de Grau-dia de Estresse por Frio	DHCS	Taxa na qual o Estresse por Frio se acumula quando o número limite de graus-dia (DTCS) acima do DTCS não é alcançado	-1 a 0 semana ⁻¹	0 semana ⁻¹
Limite de Temperatura de Estresse por Frio (Médio)	TTCSA	Representa a média da temperatura semanal média abaixo da qual o Estresse Frio se acumula	-20 a 30	0
Taxa de Temperatura de Estresse por Frio (Média)	THCSA	Taxa na qual o Estresse por Frio se acumula quando as temperaturas médias ficam abaixo do valor limite de TTCS	-1 a 0	0

FONTE: Elaborada pela autora.

Os valores utilizados foram selecionados baseando-se em dados encontrados na literatura e que apresentaram semelhanças para a distribuição de *B. carambolae*.

2.2.2.5 Índice de estresse por calor

O estresse por calor ocorre quando a temperatura máxima favorável é excedida ocasionando estivação temporária (torpor) que pode ser revertida. Essa estivação pode ocorrer na faixa entre 38 e 48 °C (RODRIGUES, 2004). Já na faixa entre 48 a 52 °C, os insetos entram em estivação permanente, não voltando as suas atividades normais quando a temperatura retorna ao normal e, acima de 52 °C, geralmente atinge-se a temperatura fatal (RODRIGUES, 2004).

Para a confecção do modelo para *B. carambolae* usando o CLIMEX, estabeleceu-se 50 °C com a temperatura máxima que antecede a morte (Tabela 6). O parâmetro de estresse por calor (TTHS) (Tabela 6) foi definido em 36 °C, uma vez que não houve emergência de

adultos a partir dessa temperatura (DANJUMA *et al.*, 2014). A taxa de acúmulo (THHS) foi estabelecida em $0,005/\text{semana}^{-1}$ (Tabela 6).

Tabela 6 - Descrição dos parâmetros de estresse por calor do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor ajustado
Limite de estresse por calor	TTHS	Temperatura média semanal máxima acima da qual se acumula o estresse por calor	0 a 50 °C	36 °C
Taxa de estresse por calor	THHS	Taxa na qual o estresse térmico se acumula quando as temperaturas excedem o valor limite de TTHS	0 a 1	0,005 semana^{-1}
Limite de Estresse térmico	DTHS	O estresse térmico começará a se acumular quando esse número limite de graus-dia acima de DV3 for excedido	0 a 200	0
Taxa de graus-dia de estresse por calor	DHHS	Taxa na qual o estresse térmico se acumula quando o número limite de graus-dia acima de DV3 (DTHS) é excedido	0 a 1	0

FONTE: Elaborada pela autora.

2.2.2.6 Índice de estresse seco

A distribuição de *B. carambolae* ocorre predominantemente em regiões tropicais e subtropicais do globo terrestre que apresentam clima quente e úmido. Assim, o limite de umidade do solo (SMDS) foi definido em 0,1 e, a taxa de acúmulo de estresse (HDS) em $-0,005/\text{semana}^{-1}$ (Tabela 7).

Tabela 7 - Descrição dos parâmetros de estresse por secura do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor ajustado
Limite de estresse seco	SMDS	O estresse seco é acumulado quando o nível médio semanal de umidade do solo fica abaixo desse valor	0 a 0,25	0,1
Taxa de estresse seco (semana-1)	HDS	Esta é a taxa na qual o estresse seco se acumula quando a umidade do solo fica abaixo do limite de estresse seco do SMDS	-1 a 0	-0,024

FONTE: Elaborada pela autora.

2.2.2.7 Índice de estresse úmido

O estresse por umidade afeta a sobrevivência dos insetos, prejudicando o desenvolvimento de pupas e a emergência de adultos (AMARAL *et al.*, 2021). Assim, o limiar

de umidade do solo (SMWS) foi fixado em 2,0 e a taxa de acumulação de estresse (HWS) em 0,002 semana⁻¹ (Tabela 8).

Tabela 8 - Descrição dos parâmetros de estresse por umidade do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Parâmetros	Sigla	Definição	Amplitude	Valor ajustado
Limite de estresse úmido	SMWS	O estresse úmido é acumulado quando os níveis médios semanais de umidade do solo excedem esse valor	1 a 10	1,5
Taxa de estresse úmido	HWS	Esta é a taxa na qual o estresse úmido se acumula quando a umidade do solo excede o limite de estresse por umidade do SMWS	0 a 1	0,007 semana ⁻¹

FONTE: Elaborada pela autora.

2.2.3 Validação do modelo

Os modelos de nicho ecológico têm sido universalmente validados usando comparações entre o modelo e a ocorrência real no espaço geográfico (SOBERÓN; PETERSON, 2005). A validação de um modelo de nicho ecológico consiste em verificar se o modelo representa adequadamente o nicho conhecido da espécie em estudo, englobando o máximo de pontos de ocorrência conhecida da mesma (KRITICOS et al., 2016).

No CLIMEX é possível ajustar as exigências climáticas de uma espécie com base em sua distribuição conhecida, abundância relativa e fenologia sazonal (KRITICOS et al., 2015a), no entanto, não foram encontrados dados suficientes sobre abundância relativa e fenologia sazonal. Logo, a distribuição conhecida foi utilizada como base para os ajustes.

Os parâmetros que dizem respeito à resposta da espécie em relação ao clima foram ajustados visando o melhor resultado do modelo, englobando os registros de ocorrência de *B. carambolae*. Esses ajustes foram feitos com base em estudos dessa e de outras espécies do gênero *Bactrocera* (DE VILLIERS et al., 2016). Porém, alguns parâmetros não foram identificados na literatura e foram determinados de forma dedutiva até que as saídas do modelo incluíssem todos os pontos de distribuição conhecida (VERA et al., 2002; KRITICOS et al., 2005; SUTHERST; MAYWALD, 2005; DE VILLIERS et al., 2016, KRITICOS et al., 2015b).

2.2.4 Irrigação

Cerca de 20% da área total cultivada no planeta conta com o uso de irrigação (BORGHETTI, 2017). Portanto é importante considerar esse fator nos modelos de nicho

ecológico, ainda que as informações sobre a irrigação mundial sejam limitadas. Para avaliar a influência da irrigação sobre a distribuição da mosca-da-carambola no mundo foi utilizado um cenário de irrigação composto por mapas de adequação considerando áreas irrigadas e não irrigadas (chuva natural) (SUTHERST; YONOW, 1998).

As informações sobre as áreas irrigadas foram obtidas gratuitamente do Global Irrigated Area V5 (GMIA5) desenvolvido por SIEBERT *et al.* (2005) com dados de localização das áreas onde a irrigação é praticada. Para as áreas irrigadas, foi acrescido 2,5 mm dia⁻¹, ao longo do ano (KRITICOS *et al.*, 2016). Por fim, dados do GMIA5 foram interpolados com a modelagem de nicho ecológico desenvolvida pelo software CLIMEX para o globo terrestre, onde para cada célula de 10" do mapa projetado pelo CLIMEX em que a área de irrigação foi maior que 0, utilizou-se o cenário de irrigação.

2.3 RESULTADOS

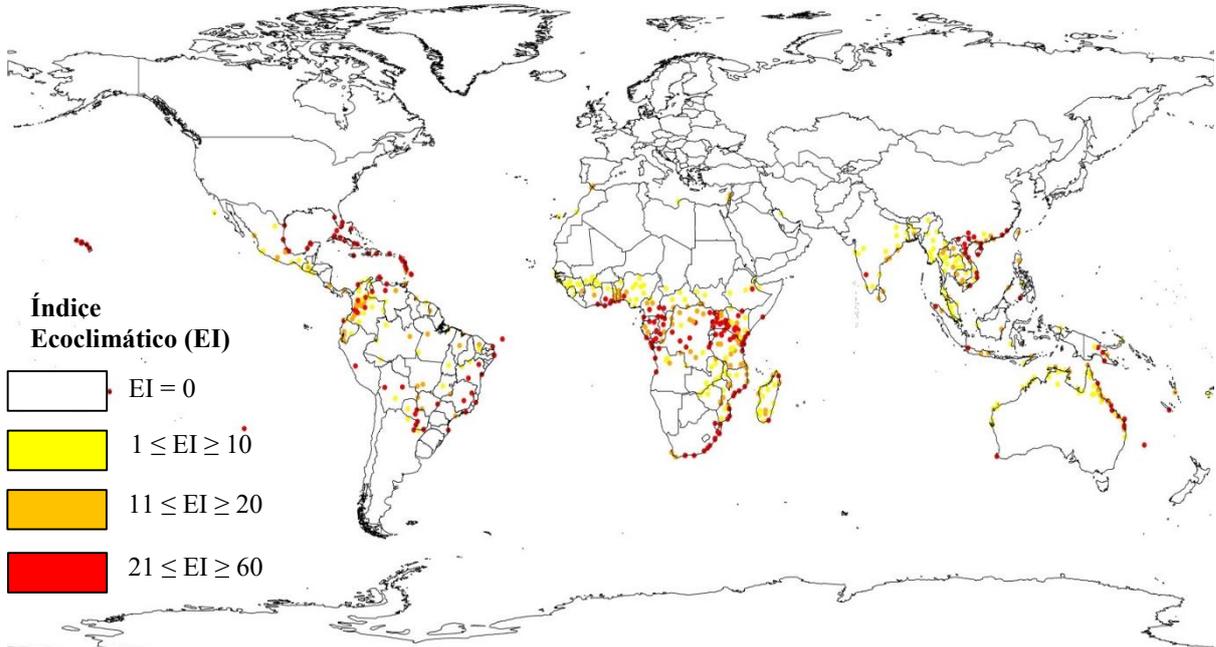
A adequação potencial para persistência de *B. carambolae* em uma área é indicada pelo Índice Ecoclimático (EI). Todos os pontos de ocorrência natural da mosca-da-carambola relatados (Figura 1) estão inseridos na projeção do CLIMEX e, novas áreas com adequação climática para essa espécie-praga também foram identificadas (Figura 2).

O índice ecoclimático (EI) gerado indicou adequação climática para a mosca-da-carambola, em diversas localidades do mundo. No Continente americano predomina elevada adequação nos Estado Unidos da América (Estado da Flórida); em toda a América Central, especialmente Cuba, México e República Dominicana; e todos os países da América Latina, com exceção do Chile (Figura 2).

Ao Norte da África foram localizados pontos com adequação climática, porém com baixa à moderada adequação (Figura 2). No Centro e Sul deste Continente, a adequação é muito evidente. A região conhecida como África Subsaariana tem condições climáticas compatíveis para o desenvolvimento da *B. carambolae*, com destaque para países como Gabão, República Democrática do Congo, Tanzânia, Ilha de Madagascar e a porção litorânea da África do Sul, no extremo Sul do continente (Figura 2).

A Ásia tem adequação climática coincidente com os pontos de ocorrência natural (Figura 1). Localidades no Sul da China (país livre da praga) apresentam diferentes possibilidades de adequação (Figura 2); assim como a Índia Continental onde *B. carambolae* não foi relatada, mas as áreas possuem adequação para o estabelecimento no caso de ser introduzida (Figura 2). Na Oceania, algumas ilhas foram consideradas climaticamente ideais para essa espécie de mosca-das-frutas assim como o litoral da Austrália (Figura 2).

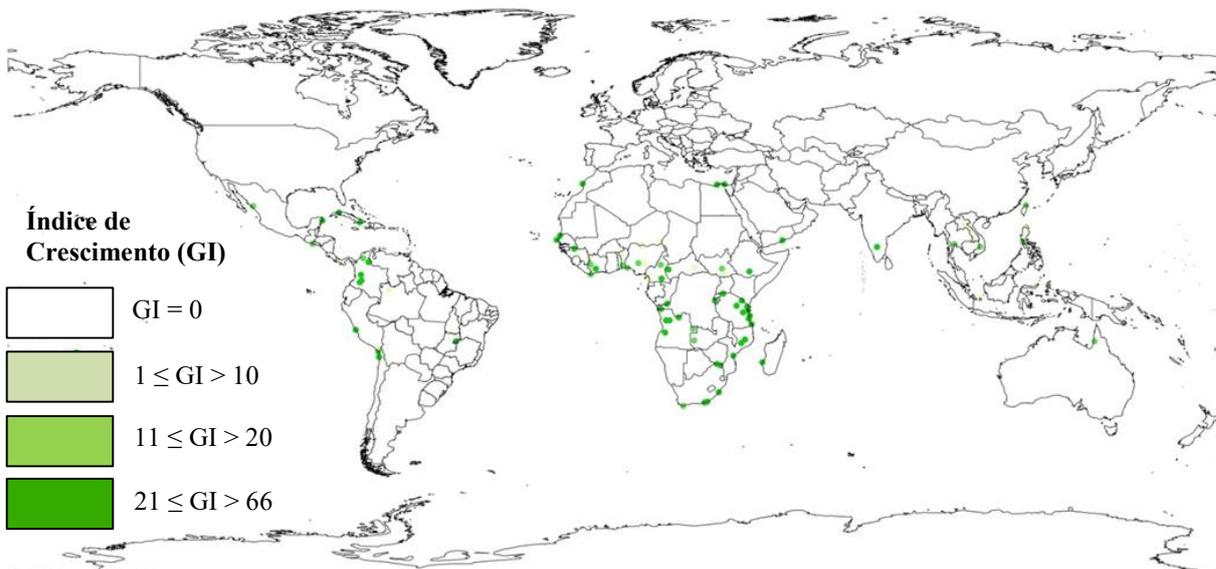
Figura 2 - Adequação climática para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

O Índice de Crescimento (GI) descreve a possibilidade de estabelecimento e de crescimento populacional da espécie. O GI indicou, de modo geral, menos pontos de adequação que o EI (Figura 2). As regiões com maior crescimento populacional, considerando o GI, estariam localizadas na África Subsaariana, e países da América Central e do Sul (Figura 3).

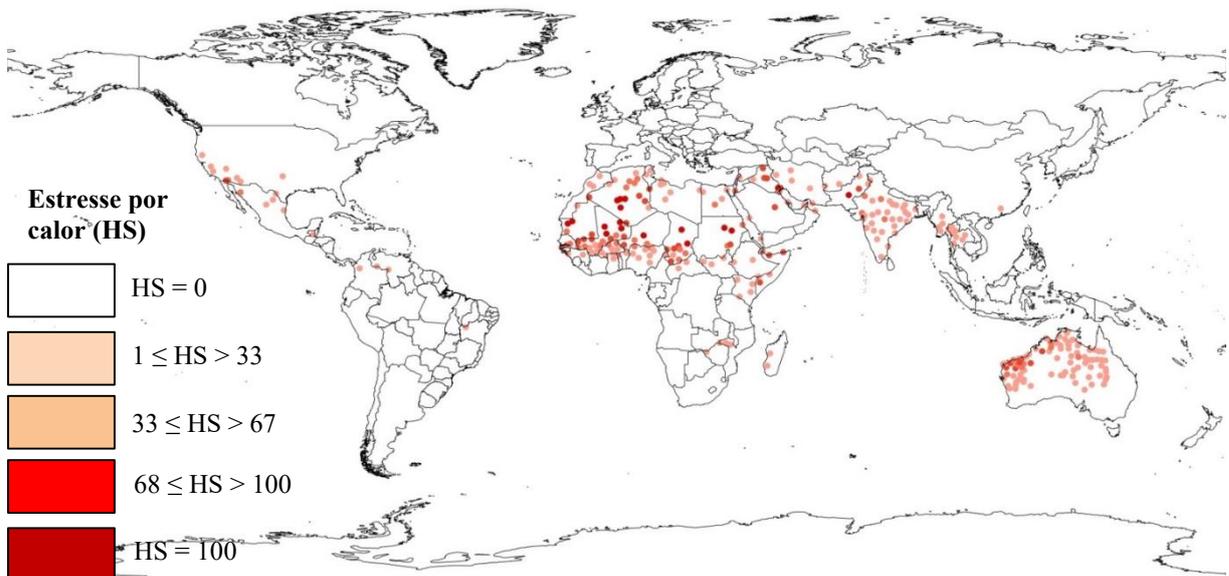
Figura 3 - Índice de crescimento (GI) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

O estresse por calor (HS) indica regiões onde a temperatura elevada impede a vida ou o desenvolvimento da espécie (Figura 4). Regiões desérticas localizadas no Norte da África (onde encontra-se o deserto do Saara), Oriente Médio, Oeste dos Estados Unidos e centro da Austrália evidenciam altos índices de estresse por calor (Figura 4), o que dificulta o estabelecimento de *B. carambolae* seja pela condição climática em si ou pela ausência de plantas hospedeiras.

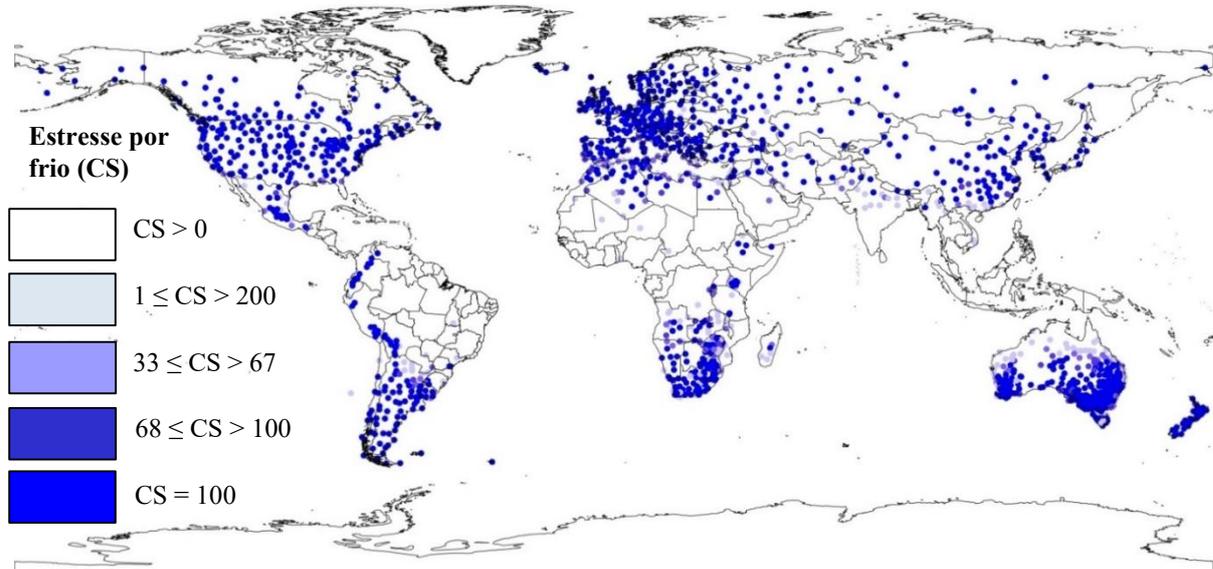
Figura 4 - Índice de estresse por calor (HS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

O índice de estresse (CS) (Figura 5) por frio indica as localizações onde as baixas temperaturas devem afetar a permanência da espécie caso a mosca-da-carambola venha a ser introduzida. Maiores níveis de CS foram detectados nas porções subtropicais e temperadas do mundo. Nas áreas localizadas próximo à linha do Equador, zona Equatorial, Subequatorial não são detectadas temperaturas que possam causar algum estresse por frio (Figura 5).

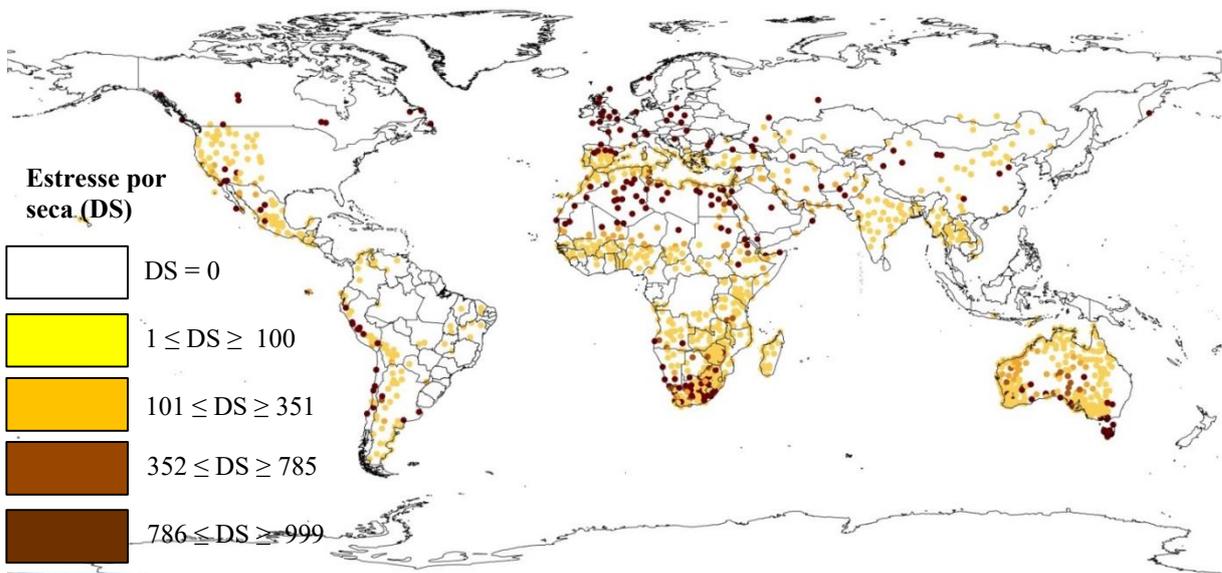
Figura 5 - Índice de estresse por frio (CS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

O estresse causado pela seca (DS) (Figura 6) ocorre quando o solo, onde a pupa permanece até a emergência do adulto, tem baixa umidade. Dessa forma, as regiões que não apresentam estresse por seca coincidem, em grande parte, com as regiões de ocorrência real de *B. carambolae*, como o Norte da América do Sul e Países banhados pelo Oceano Índico, na Ásia. Além desses, o litoral brasileiro também tem baixo ou nenhum estresse por seca e uma porção central do Continente Africano (Figura 6).

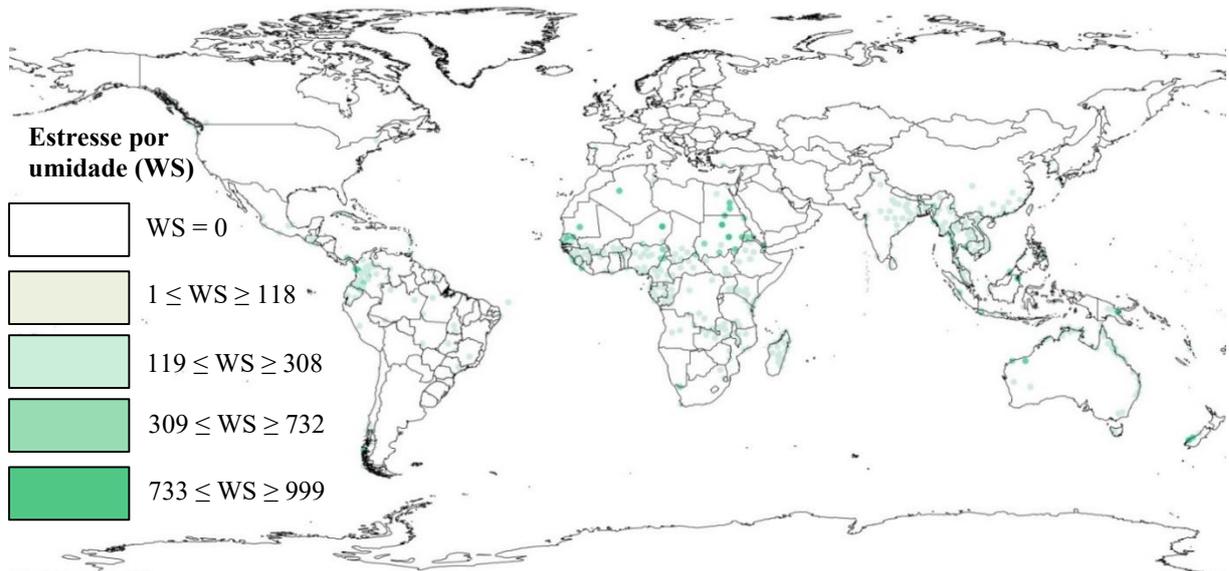
Figura 6 - Índice de estresse por seca (DS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

O estresse por umidade (WS) (Figura 7), ao contrário do DS, ocorre quando o solo apresenta elevada umidade. Dessa forma, o estágio de pupa de *B. carambolae* não encontra condições adequadas no solo para desenvolver-se. Porém, esse estresse não é tão pronunciado, uma vez que as espécies variam a profundidade em que as pupas ficam enterradas no solo. No caso de *B. carambolae* observou-se que em condições de solo encharcado a pupa fica sobre o solo (DANJUMA *et al.*, 2014). Apesar de o WS pouco afetar a sobrevivência e o desenvolvimento da mosca-da-carambola, é possível observar que algumas regiões onde há elevado estresse por umidade (Figura 7).

Figura 7 - Índice de estresse por umidade (WS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX, considerando efeitos da irrigação



FONTE: Elaborada pela autora.

2.4 DISCUSSÃO

O modelo CLIMEX utilizado no presente estudo mapeou o potencial de distribuição global de *B. carambolae* levando em consideração sua adaptação climática. Parâmetros biológicos da mosca-da-carambola, juntamente com dados de ocorrência da espécie em áreas nativas e introduzidas há algum tempo, indicam as áreas climaticamente adequadas.

Os resultados encontrados revelam boa correspondência entre a distribuição atual de *B. carambolae* e o índice ecoclimático do CLIMEX. Países da Ásia como Indonésia, Tailândia e Malásia, onde a mosca-da-carambola é nativa, apresentam semelhanças climáticas com países da América do Sul, onde a espécie-praga fora introduzida. O clima predominante nessas regiões são Equatorial e Tropical, tipicamente quentes e úmidos, onde a mosca encontra elevada adequação climática. As altas taxas de sobrevivência de *B. carambolae* em uma faixa estreita de temperatura ótima intermediária de 25-27°C pode explicar sua ocorrência distinta em muitos países tropicais do mundo (DANJUMA *et al.*, 2014).

O índice ecoclimático também indica que, além do Suriname, Guiana Francesa e Norte do Brasil, onde a mosca-da-carambola já está estabelecida (LEBLANC *et al.*, 2019; CABI, 2021), outros oito países da América do Sul apresentam alta adequação para *B. carambolae*, são eles Argentina, Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana, Paraguai, Peru e Venezuela. No Brasil o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) formulou um plano para prevenção, contenção, supressão e erradicação da mosca-da-carambola. Usando a Instrução Normativa nº 28, de 20 de julho de 2017, foi estabelecida uma classificação de risco de introdução e dispersão da espécie para novas áreas (baixo risco, médio risco e alto risco) com base em fronteiras terrestres, fluxo de pessoas e mercadorias, entre outros fatores. Atribuiu-se a esse controle regulatório o sucesso da contenção da mosca-da-carambola em municípios dos Estados do Pará, Amapá e Roraima.

O Brasil apresenta maior adequação climática na porção litorânea, onde o EI é mais elevado. Estados como São Paulo, Bahia e Minas Gerais estão entre os principais produtores e exportadores de frutas e coincidem com as áreas de maior probabilidade da *B. carambolae* se estabelecer, se for introduzida.

Devido as dimensões do país há uma ampla diversidade de cultivos espalhadas pelas regiões do Brasil. As frutas mais produzidas são banana, laranja, uva, abacaxi, maçã e melancia. Algumas delas já foram identificadas como hospedeiras da *B. carambolae*, a citar a laranja, manga e uva. A laranja é uma das principais culturas produzidas no Brasil, faturando mais de 12 bilhões no ano de 2021, majoritariamente no Estado de São Paulo, responsável por cerca de 70% do valor de produção nacional, seguido pelo Paraná, Minas

Gerais, Bahia e Rio Grande do Sul (IBGE, 2021a). A cultura da manga é mais expressiva nos Estados da Bahia, Pernambuco, São Paulo e Minas Gerais, somando mais de 1.500.000 toneladas produzidas no país em 2021 (IBGE, 2021b). E a vinicultura, que rendeu ao Brasil mais de 4 bilhões de reais no mesmo ano, tendo como principais produtores Pernambuco, Rio Grande do Sul, São Paulo, Bahia e Paraná (IBGE, 2021c).

Chama a atenção que os Estados com maior produção frutícola do país estão classificados como maior adequação climática para a praga em estudo. Portanto, as medidas de prevenção devem ser efetivas e constantes para que a mosca-da-carambola não seja introduzida nos Estados onde a fruticultura têm papel importante na economia.

Ainda na América do Sul, o Chile, o Uruguai e grande parte do território da Argentina não apresentam nenhum nível de adequação para a espécie. Isso deve-se, provavelmente, ao clima temperado com altas temperaturas no inverno. Além do estresse por frio, CS, mais evidente nessa porção do Continente, também foi observado estresse causado por seca, DS, que coincide com uma faixa desértica presente nessa região. Esses países se destacam na cultura da uva e seu beneficiamento para produção de vinhos (ROSA; SIMÕES, 2004).

Já na América Central todos os países possuem áreas de adequação para a mosca-da-carambola, especialmente as Ilhas do Mar do Caribe, onde o índice ecolimático é elevado. Todo o México e uma pequena porção ao Sul dos Estados Unidos obtiveram adequação ambiental elevada, indicando que essas áreas são de risco para o avanço a espécie-praga (Figura 2).

No Continente Africano muitos países como Gana, Nigéria, Camarões, Congo, Quênia, Tanzânia, Moçambique e África do Sul, obtiveram elevada adequação ambiental para a mosca-da-carambola. Isso deve-se ao Clima Equatorial, Tropical e Subtropical que predomina nessa porção do continente, com temperaturas médias anuais oscilando entre 22 e 30 °C (BASTOS; FERREIRA, 2000). Outras regiões da África não tiveram nenhum grau de adequação ambiental embora estejam localizadas na Zona Intertropical, isso se deve à presença de grandes desertos, Deserto do Saara, Deserto da Namíbia e Deserto Calaari, onde o índice de estresse ocasionado pela seca foi muito evidenciado (Figura 6).

Os resultados corroboram com a incidência de outras espécies de *Bactrocera* no Continente Africano, como *B. dorsalis* que foi introduzido no Quênia, descrito como muito invasivo e polífago (LUX *et al.*, 2003) e posteriormente se espalhou por grande parte da região da África Subsaariana (DREW *et al.*, 2005). A introdução de *B. dorsalis* na África causou impacto na exportação de frutas, gerando prejuízo de US\$ 20 milhões com a suspensão da

exportação de banana em Moçambique e mais de 300 toneladas de abacate do Quênia (CUGALA *et al.*, 2014; DOHINO *et al.*, 2017).

No Continente Asiático é notória a adequação climática de *B. carambola* em diversos países. Na Malásia, um dos centros de origem da espécie, a praga é muito severa e ataca frutos da caramboleira tão pequenos que o ensacamento (uma prática de controle geralmente eficaz) é impraticável (CABI, 2021).

Ao Sul da China, a introdução da *B. carambolae* é uma preocupação dos órgãos de controle daquele país (BIOSECURITY AUSTRALIA, 2009). A China é grande produtora de citros e uvas, hospedeiras da espécie-praga, porém o índice ecolimático na maior parte do território é nulo, ou seja, não há adequação climática para a permanência da mosca-da-carambola. Apenas uma pequena porção do Sul do país apresenta adequação de leve a alta, por isso a fiscalização de fronteiras é indicada nessa situação, visto que nos países vizinhos a espécie-praga foi relatada em seus territórios. Contudo, os índices de estresse por seca e por frio, DS e CS respectivamente, sugerem que a espécie-praga sofrerá variados níveis de estresse ao longo do ano devido ao clima de monções, característico dessa região, ser frio e seco (FERNANDES, 2021), o que deverá desfavorecer a manutenção de populações da mosca-da-carambola na China durante todo o ano.

Na Oceania, destaca-se a adequação da mosca-da-carambola no território Norte da Austrália, porção litorânea. Essa adequação expressa por EI favorável pode estar ligada às condições climáticas tropicais que persistem nesta região. *B. carambolae* parece ser mais adaptada ao clima tropical do que a qualquer outro tipo de clima (DANJUMA *et al.*, 2014). No clima tropical, a temperatura média permanece acima de 18 °C e é relativamente constante ao longo do ano. As variações sazonais são reguladas pela precipitação, contudo, a Austrália apresenta cerca de 80 espécies nativas de moscas-das-frutas e outras espécies introduzidas, sendo a espécie mais importante a *Bactrocera tryoni* Froggatt, conhecida como mosca-das-frutas de Queensland, seguida pela *Ceratitidis capitata* (Wiedemann), a mosca-do-mediterrâneo (DOMINIAK; MAPSON, 2017).

Para minimizar o impacto da grande quantidade de moscas-das-frutas contidas em seu território, a Austrália mantém programas de monitoramento e de erradicação dessas espécies-praga, além de medidas severas de importação de produtos vegetais (DOMINIAK; DANIELS, 2012). Acredita-se que esse monitoramento massivo seja a razão principal para a *B. carambolae* não adentrar os territórios desse país.

Portanto, os países da América do Sul, Central, Ásia e África que são adequados para a espécie-praga devem manter consistentes programas de barreiras fitossanitárias, normas

de certificação fitossanitária para produtos de origem vegetal importados e realização de estudos para estabelecimento de tratamentos quarentenários específicos para a *B. carambolae* (LEMOS, 2006).

2.5. CONCLUSÕES

O estudo foi bem ajustado com parâmetros ambientais bem encaixados, obtendo-se um modelo que contempla estreitamente a distribuição real conhecida de *B. carambolae* e dando alta confiança à distribuição espacial projetada, indicando um bom ajuste do modelo CLIMEX.

A projeção global do nicho ecológico da mosca-da-carambola encontrou adequação climática para a espécie-praga em dois novos continentes, África e Oceania, além de ampliar áreas de adequação na Ásia e América, onde já está estabelecida. Na Ásia, centro de origem da espécie, é possível que a praga se estabeleça nos territórios abaixo do Trópico de Câncer, incluindo o Sul da China. A Índia Continental, onde a mosca-da-carambola não foi registrada, apresenta predominantemente áreas com baixa e moderada probabilidade de estabelecimento se a espécie for introduzida. Na América do Norte existe possibilidade de estabelecimento da praga no México e em toda a América Central há adequação climática. Na América do Sul existem a probabilidade de estabelecimento da mosca-da-carambola é alta na maioria dos países. Na África, a mosca-da-carambola pode se estabelecer na porção subsaariana, ou seja, abaixo do deserto do Saara, onde o clima é tropical. Na Oceania, a região costeira da Austrália é favorável ao estabelecimento de *B. carambolae*, entretanto o interior do país não possui características compatíveis para o estabelecimento e desenvolvimento da espécie-praga, devido ao clima desértico. Em outras regiões do planeta, como a Europa e a maior parte da América do Norte, o estresse ocasionado pelo frio é o principal fator limitante para o estabelecimento da mosca-da-carambola.

3 MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE *Bactrocera carambolae* DREW & HANCOCK (DIPTERA: TEPHRITIDAE) PARA CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

RESUMO

A mosca-da-carambola, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), é importante praga na fruticultura mundial. Nativa da Ásia, espalhou-se por muitos países do Sudeste Asiático e posteriormente, alcançou a América Latina. Sabendo que as mudanças climáticas podem impulsionar modificações na distribuição de pragas invasoras, estudou-se como tais mudanças podem impactar a distribuição global de *B. carambolae* no final do século XXI. Modelos de nicho ecológico, elaborados pelo software de modelagem CLIMEX, foram usados para mapear habitats adequados para *B. carambolae* sob condições climáticas atuais (2022) e futuras (2100). Estimou-se a elevação da temperatura global em 3 °C até 2100 para formulação do cenário de mudança climática. O modelo foi elaborado com base nos parâmetros climáticos que a espécie-praga tolera e projetado para todo o mundo. Os resultados destacaram que parte do globo terrestre localizado entre os trópicos será climaticamente adequado para a mosca-da-carambola em um cenário futuro, incluindo, a América Central e do Sul, a África Subsaariana, litoral da Austrália e muitos países asiáticos banhados pelo Oceano Índico. Entretanto, as áreas adequadas para a espécie sofrerão redução, segundo o modelo, e não se deslocarão para o Norte do Hemisfério Norte ou para o Sul no Hemisfério Sul. Esse resultado reflete a importância do estresse por frio que afetará a praga nas estações frias do ano. Portanto o monitoramento de áreas onde a praga não está presente deve considerar também os impactos das mudanças climáticas globais na potencial distribuição geográfica.

PALAVRAS-CHAVE: Aquecimento global; Mosca-da-carambola; CLIMEX.

ABSTRACT

The carambola fruit fly, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), is an important pest of fruit production worldwide. Native to Asia, it spread to many countries in Southeast Asia and later reached Latin America. Knowing that climate changes can drive modifications in the distribution of invasive pests, we studied how such changes could impact the global distribution of *B. carambolae* at the end of the 2000th century. Ecological niche models, elaborated by the CLIMEX modeling software, were used to map suitable habitats for this species under current (2022) and future (2100) climatic conditions. An increase in global temperature of 3 °C was estimated by 2100 to formulate the climate change scenario. The model was elaborated based on the climatic parameters that the pest species tolerates and projected for the whole world. The results highlighted that part of the globe located between the tropics will be climatically suitable for the carambola fruit fly in a future scenario, including Central and South America, sub-Saharan Africa, the coast of Australia and many Asian countries bordering the Ocean. Indian. However, the areas suitable for the species will be reduced, according to the model, and will not move to the North in the Northern Hemisphere or to the South in the Southern Hemisphere. This result should reflect the importance of cold stress that will still affect the pest in the coldest seasons of the year. Therefore, monitoring areas where the pest is not present must also consider the impacts of global climate change on the potential geographic distribution.

KEYWORDS: Global warming; Carambola fruit fly; CLIMEX.

3.1 INTRODUÇÃO

Segundo diversas organizações, dentre elas, a Organização Mundial da Saúde (OMS), as mudanças climáticas e o aquecimento global são os maiores desafios da humanidade no século XXI, pois ameaçam todos os aspectos da vida (ORGANIZAÇÃO WH, 2018). Mudanças climáticas são descritas como transformações nos padrões de temperatura e clima de maneira geral que ocorrem gradualmente com o passar do tempo e podem ocorrer de forma natural e/ou por influência da ação humana (EL-SAYED; KAMEL, 2020). Portanto, o aquecimento global é uma consequência das mudanças climáticas, indicando que a temperatura da terra está aumentando (ROBINSON, 2020).

Desde a revolução industrial, em meados de 1800, a ação antrópica tem tido participação intensa na elevação da temperatura do planeta devendo-se principalmente a queima de combustíveis fósseis (CONTI, 2011). Entretanto, o desmatamento, os aterros para lixo, as indústrias, os meios de transporte movidos a combustíveis fósseis e a agropecuária, são algumas das principais fontes emissoras de metano, gás de efeito estufa, colaborando com as mudanças climáticas (ALBRITTON; DOKKEN, 2001). Como resultado, a terra está cada vez mais quente - aquecimento global - tendo registrado aumento de 1,1 °C de 2011 a 2020, em relação à temperatura no final do século XIX (UN BRASIL, 2022). As perspectivas para os próximos anos indicam que a temperatura da terra poderá sofrer acréscimo de 1,6 a 6,0 °C (ALBRITTON; DOKKEN, 2001; JIMÉNEZ-CLAVERO, 2012; IPCC, 2018; UN BRASIL, 2022).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica que o aquecimento do planeta deve ser de 1,5 a 4 °C, acima dos níveis pré-industriais em 2100 (IPCC, 2018). Já o modelo climático global CSIRO-Mk3 considera um futuro de rápido crescimento econômico, baixo crescimento populacional e aumento na emissão de gases causadores de efeito estufa até 2050. De 2050 a 2100, a previsão é de aumento no uso de fontes de energia predominantemente limpas e, conseqüentemente redução na emissão de gases poluentes. Desta forma, a previsão resulta em aumento de 2,1 °C na temperatura global até 2100 (GORDON *et al.*, 2002).

Dentre as consequências dessa elevação na temperatura global, estão as secas intensas, grandes incêndios espontâneos, escassez de água, derretimento das calotas polares, que resultam em elevação do nível do mar, inundações e catástrofes e por fim, declínio da biodiversidade (QIN *et al.*, 2019). Portanto, a pressão de insetos-praga e de doenças deve aumentar prejudicando a produtividade em muitas regiões (IPCC, 2022). Além disso, a dispersão natural dos insetos pode ser afetada pelas alterações do ambiente, sejam causadas pelas mudanças climáticas ou mudanças na composição do agroecossistema resultando em

possíveis introduções de novas espécies-praga (SUTHERST; MAYWALD; BOURNE, 2007; GARRETT *et al.*, 2013). Essas alterações ambientais devem interferir até no equilíbrio entre os agentes de controle biológico e seus hospedeiros e presas, podendo afetar o controle biológico natural como também o controle biológico aplicado (GUISAN *et al.*, 2013). Portanto, o entendimento do comportamento dos insetos-praga frente às mudanças climáticas é importante para o planejamento das estratégias de controle, considerando as escalas local, regional e global, antecipando cenários de ataque e assim implementando medidas preventivas (EHRLÉN; MORRIS, 2015; NURHAYATI KOESMARYONO, 2017).

Uma importante praga para a fruticultura é a mosca-da-carambola, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), que é umas das espécies de moscas-das-frutas mais destrutivas e polípagas do mundo, com mais de 100 espécies de plantas hospedeiras já relatadas (DANJUMA *et al.*, 2014). Os frutos cítricos são bons hospedeiros para moscas-das-frutas e essas plantas são cultivadas em mais de 140 países (LOUZEIRO, 2017). Países como o Brasil, EUA, Índia, México e Espanha, produzem juntos, mais de dois terços do total mundial de citros e derivados (LV *et al.*, 2015). A China é o maior produtor mundial de frutas, especialmente citros, maçã, pera, uva e banana (AQSIQ, 2007), algumas delas, hospedeiras de *B. carambolae*. Além disso, muitas frutícolas como a carambola *Averrhoa carambola* L., a goiaba, *Psidium guajava* L. e, a manga *Mangifera indica* L. são produzidas em todo o globo e os frutos são adequados ao desenvolvimento de *B. carambolae* (IWAIZUMI, 2004; DANJUMA *et al.*, 2014; FUJII *et al.*, 2016 ; KOSWANUDIN *et al.*, 2018).

No contexto geral, a elevação da temperatura global poderá modificar o ambiente adequado à *B. carambolae* gerando problemas devido à dispersão da praga (MARCHIORO, 2016). Considerando as condições atuais (2022), as espécies de *Bactrocera* spp. não encontram boas condições climáticas devido às baixas temperaturas registradas no inverno em regiões produtoras chinesas, por exemplo. Porém, a elevação da temperatura global poderá ampliar o nicho ecológico dessa espécie-praga assim como de outras espécies de mosca-das-frutas (BIOSECURITY AUSTRALIA, 2009).

Desta forma, objetivou-se prever a distribuição geográfica futura (2100) de *B. carambolae*, considerando as modificações do clima ocasionadas pelas mudanças climáticas. Para tanto, utilizou-se modelos de nicho ecológico (MNE) que abordam o impacto das mudanças climáticas na potencial distribuição futura de espécies (ARAÚJO; PETERSON, 2012; GIANNINI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018) e também para avaliar possível estabelecimento de espécies exóticas (JIMÉNEZ-VALVERDE *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2018).

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Para avaliação da adequação climática de *B. carambolae* em todo o globo terrestre, considerando um cenário futuro para 2100, baseou-se nas condições climáticas atuais (ano referência 2022). Para tanto, utilizou-se o CliMond 10' coletando-se cinco variáveis climáticas do período de 1950 a 2000. As variáveis utilizadas foram: Temperatura média mensal mínima (Tmin), temperatura média mensal máxima (Tmax), precipitação média mensal (Ptotal), umidade às 09h00min (RH09:00) e umidade às 15h00min (RH15:00) (KRITICOS *et al.*, 2012). Para a estimativa utilizou-se como base o cenário proposto pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), onde não foi considerada nenhuma redução na radiação líquida emitida mas, incremento de 3 °C na temperatura mundial em 2100 (IPCC, 2018).

Utilizando o software CLIMEX, com a função e a modelagem adequadas para *B. carambolae* foi considerando o cenário atual (2022) usando os parâmetros climáticos que melhor representam a distribuição conhecida da espécie (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros climáticos do CLIMEX e valores utilizados para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae)

Índice	Parâmetro	Sigla	Valores	Unidade
Temperatura	Limite mínimo de temperatura	DV0	11,2	°C
	Temperatura ótima inferior	DV1	25	°C
	Temperatura ótima superior	DV2	27	°C
	Limite máximo de temperatura	DV3	35	°C
Umidade do solo	Limite mínimo de umidade do solo	SM0	0.1	A
	Umidade ótima inferior	SM1	0.5	A
	Umidade ótima superior	SM2	1	A
	Limite máximo de umidade do solo	SM3	1.5	A
Estresse - Frio	Limiar de temperatura	TTCS	11	°C
	Taxa de acumulação de estresse	THCS	-0,012	Semana-1
	Limiar de graus-dia	DTCS	10	°C dias
	Taxa de acumulação de estresse	DHCS	0	Semana-1
Estresse - Calor	Limiar de temperatura	TTHS	36	°C
	Taxa de acumulação de estresse	THHS	0,005	Semana-1
Estresse - Seca	Limiar de umidade do solo	SMDS	0,1	A
	Taxa de acumulação de estresse	HDS	-0,024	Semana-1
Estresse - Umidade	Limiar de umidade do solo	SMWS	1,5	A
	Taxa de acumulação de estresse	HWS	0,007	Semana-1
Graus dias	Graus dias por geração	PDD	371,4	°C dias

FONTE: Compilado pela autora.

Os parâmetros forneceram informações a respeito da resposta da espécie em relação às variações climáticas e foram obtidos na literatura científica disponível para mosca-da-carambola e para outras espécies do gênero *Bactrocera*. Contudo, alguns parâmetros não localizados nos domínios de consulta foram estimados empiricamente, usando testes no modelo até que todos os pontos de localização conhecida fossem incluídos. A localização dos pontos de ocorrência real da *B.carambolae* são disponibilizados por bancos de dados internacionais que visam a disponibilização de informações sobre as espécies.

Após a elaboração do modelo de previsão para o cenário atual, foi incluído acréscimo de 3 °C para a temperatura de todo o globo terrestre, para assim prever a distribuição geográfica da mosca-da-carambola nessas “novas” condições ambientais. Considerou-se que os parâmetros biológicos da espécie-praga, quando a sua resposta ao clima, não sofreriam alterações ou alterações mínimas até o ano de 2100.

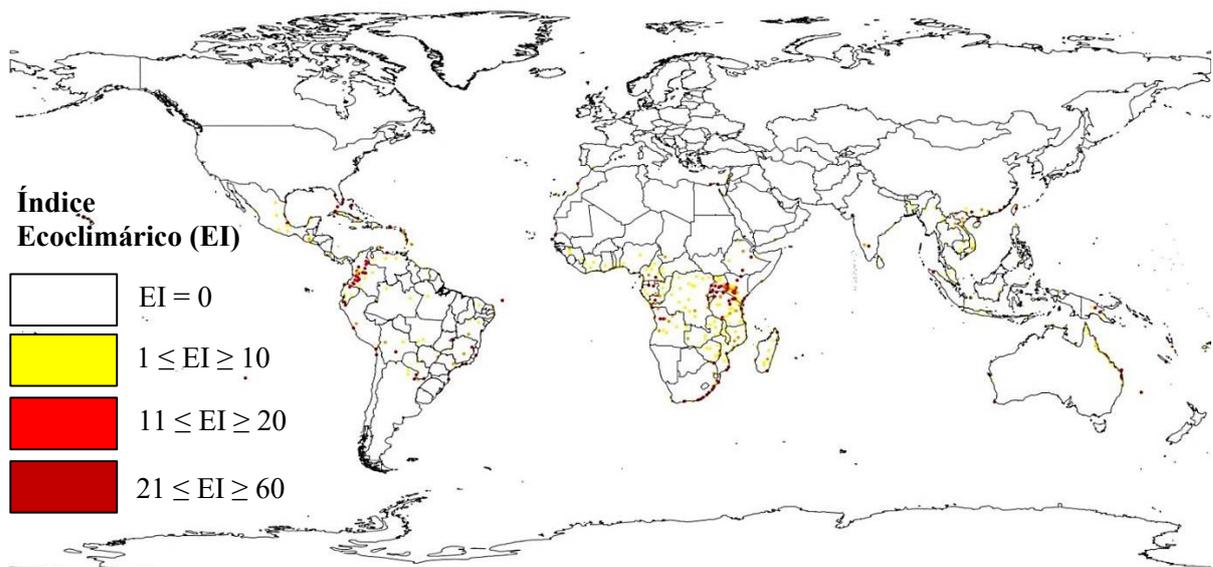
Além disso, para melhor representatividade dos resultados, foi adicionado um cenário de irrigação, onde a lâmina de água foi estabelecida em 2,5 mm.dia⁻¹, para regiões onde existe irrigação (GMIA5) (SIEBERT *et al.*, 2005). Para as demais localidades, considerou-se apenas o cenário de chuva.

3.3. RESULTADOS

A distribuição geográfica, em potencial, para *B. carambolae* em 2100, com base no Índice Ecoclimático (EI) indica que haverá redução das áreas adequadas para a espécie, quando comparada as projeções de distribuição no cenário atual (2022).

O acréscimo de 3 °C na temperatura global, em decorrência das mudanças climáticas, deverá ocasionar maior adequação de *B. carambolae* na porção Noroeste da América do Sul e na América Central (Figura 1). No continente africano, a região Subsariana permanece com adequação ambiental, especialmente no litoral. As maiores mudanças foram observadas na Ásia e na Oceania, onde as áreas de adequação provavelmente reduzirão, embora a maioria dos países atualmente adequados mantenham a perspectiva de permanecerem adequados em 2100, com menor EI e áreas pontuadas (Figura 1). O litoral da Austrália permanece apto para o desenvolvimento da mosca-da-carambola, embora com menos pontos e EI considerado baixo (Figura 1). Os países asiáticos, de onde a espécie é originária, também permanecem favoráveis para a mesma, porém com redução do nível de adequação e com pontos de ocorrência provável. Estima-se que a Índia continental terá considerável redução nas áreas adequadas a *B. carambolae* em 2100, assim como Myanmar, Tailândia e algumas ilhas do Oceano Índico (Figura 1).

Figura 1 - Índice Ecoclimático (IE) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3 °C)



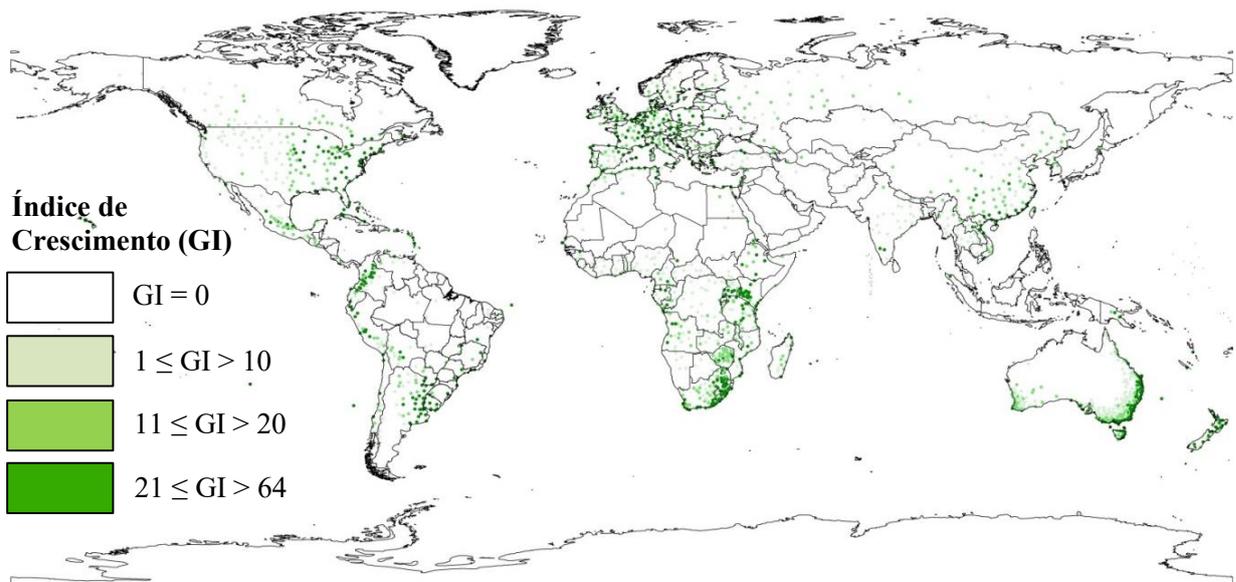
FONTE: Elaborado pela autora.

A redução das áreas adequadas climaticamente para essa praga deve-se ao aumento de temperatura nas zonas tropicais e subtropicais, porém não foi observada a elevação da zona adequada para regiões equatoriais. Provavelmente esse comportamento deve-se ao inverno ser mais rigoroso nas regiões próximas dos polos e que dificultaria o estabelecimento da mosca-da-carambola.

Entretanto, o índice de crescimento (GI) que corresponde ao potencial de crescimento populacional da espécie, considerando a reprodução de pelo menos uma geração, indica que muitas áreas se tornarão adequadas ao crescimento populacional de *B. carambolae* até o final do século XXI (Figura 2). Porém, o GI estima apenas a estação ou período do ano mais favorável, não levando em consideração os períodos quentes, frios, secos, ou úmidos.

Com o cenário de mudança climática resultando em um aquecimento global de 3 °C, muitos países anteriormente inadequados ao estabelecimento da praga, passarão a ter áreas propensas ao estabelecimento da *B. carambolae* (Figura 2). Nas Américas observa-se crescimento da probabilidade em grande parte dos Estados Unidos, Canadá, Chile e Argentina, áreas onde o frio é fator limitante para a mosca-da-carambola em algum momento do ano (Figura 2). O mesmo ocorre com países da Europa, que apresentaram elevado GI (Figura 2).

Figura 2 - Índice de crescimento (GI) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3 °C)

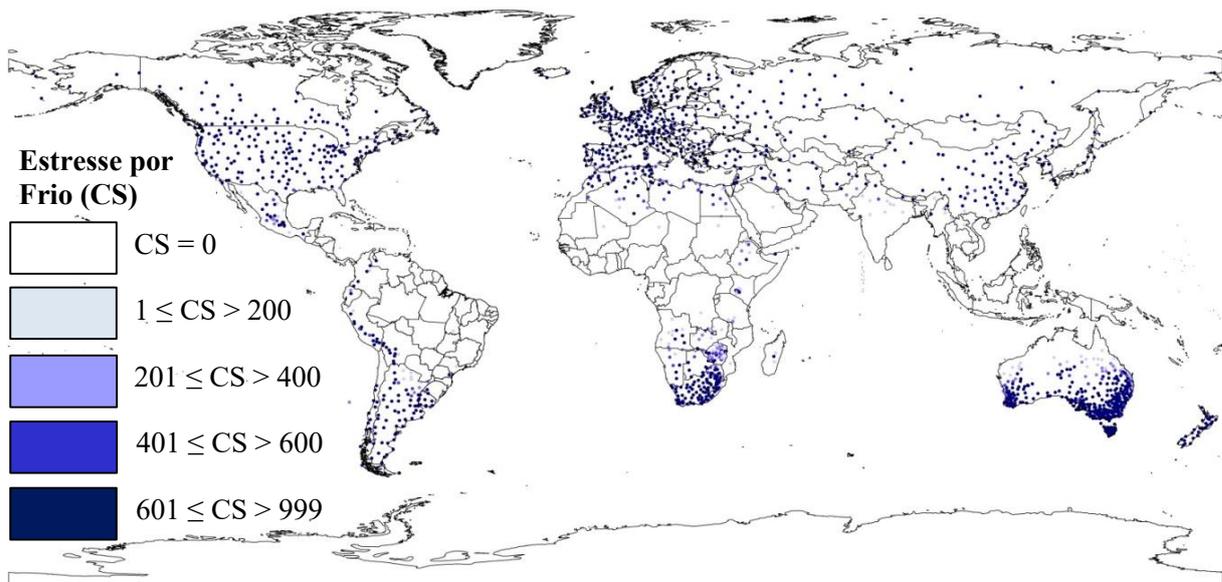


FONTE: Elaborado pela autora.

Para explicar o GI elevado nessas áreas, deve-se analisar também os índices de estresse por frio, calor, seca e umidade. Esses índices de estresse limitam o crescimento populacional da mosca-da-carambola nessas regiões. Pode-se observar que em muitos pontos onde o índice de crescimento é observado no cenário ideal, são coincidentes com pontos de estresse por frio (Figura 3), indicando que o frio é um fator limitante para a *B. carambolae*.

Os maiores níveis de estresse por frio (CS) foram expressos em regiões da Europa, América do Norte, Sul da África, Sul da Austrália, Sul e Oeste da América do Norte (Figura 3). Isso explica porque a população da *B. carambolae* não tem boa adequação ambiental nessas regiões mesmo com a elevação climática provocada pelo aquecimento global.

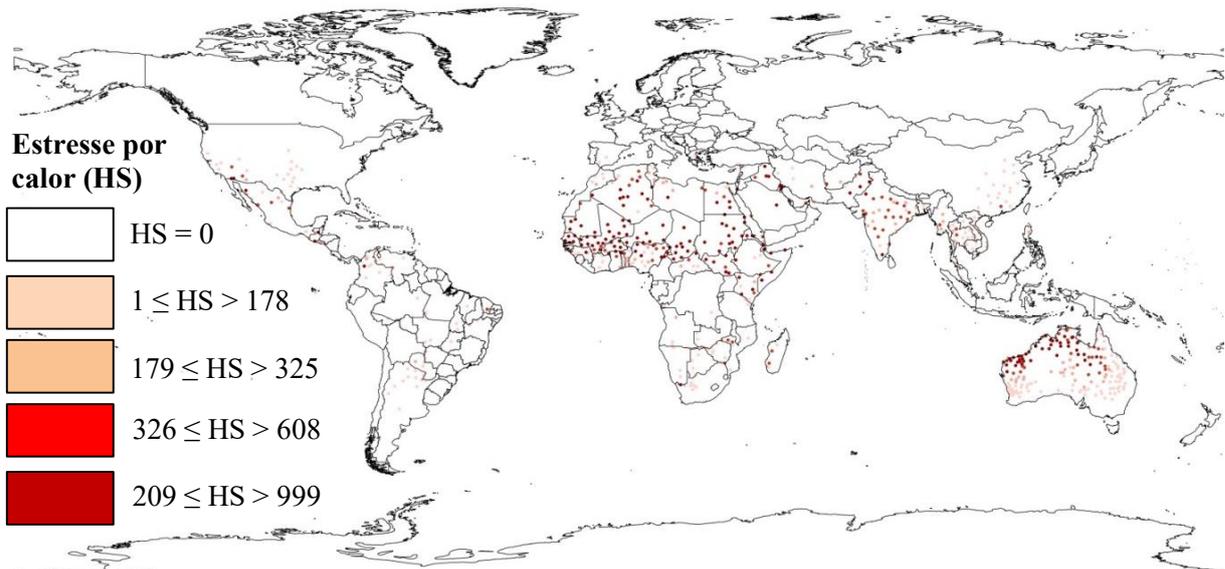
Figura 3 - Índice de estresse por frio (CS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3°C)



FONTE: Elaborado pela autora.

O índice de estresse por calor (HS) estima as áreas onde o calor será fator limitante, em 2100, durante pelo menos uma época do ano (Figura 4). Esse índice explica a inadequação da mosca-da-carambola na África setentrional, Norte desse continente, e regiões de grandes desertos, assim como na porção desértica da América do Norte e da Austrália (Figura 4), caracterizadas por altas temperaturas.

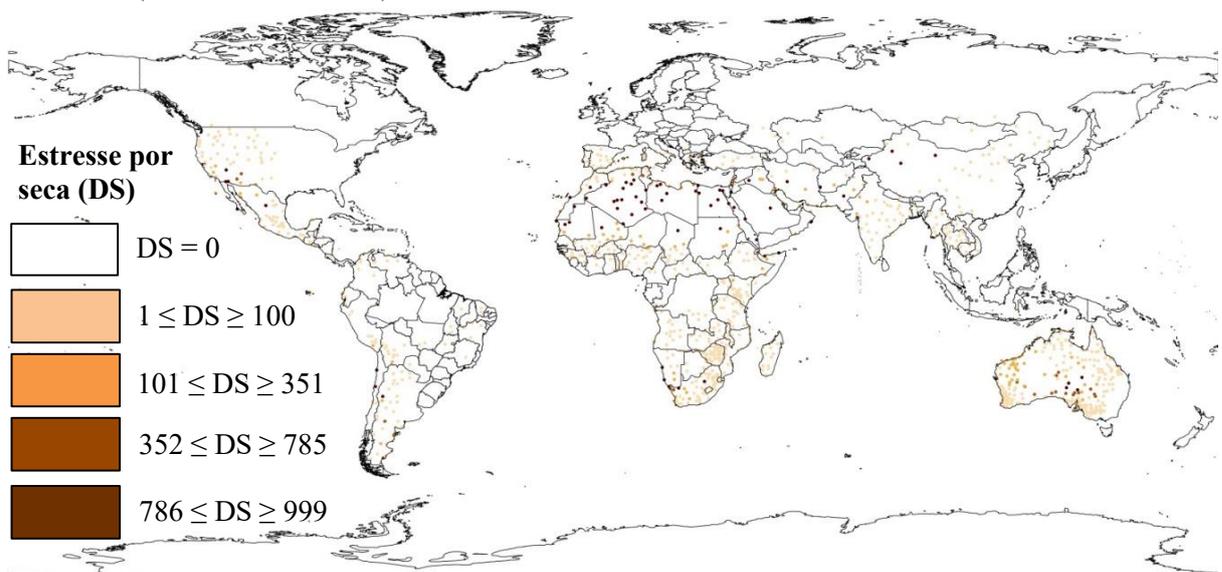
Figura 4 - Índice estresse por calor (HS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3°C)



FONTE: Elaborado pela autora.

O índice de estresse por seca (DS) indica as regiões onde a falta de água no solo poderá afetar a sobrevivência da *B. carambola* no final do século XXI (Figura 5). Os pontos com DS mais elevado coincidem com regiões desérticas, onde a umidade é extremamente baixa, e não são áreas de produção frutícola (Figura 5).

Figura 5 - Índice estresse por seca (DS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3°C)



FONTE: Elaborado pela autora.

Porém, pontos com índice de estresse por seca leve a moderada são encontrados em regiões onde a mosca-da-carambola já ocorre, como nos países asiáticos (Figura 5), indicando que em alguma época do ano a falta de água será um fator limitante para essa espécie de mosca-das-frutas em outras regiões (países) consideradas adequadas. Vale ressaltar que as áreas irrigadas conhecidas foram consideradas, no entanto, o incremento de novas áreas de produção com irrigação pode alterar o resultado do DS, pois elevaria a umidade em períodos onde naturalmente o estresse por seca seria fatal.

O índice de estresse por umidade (WS) é identificado quando há excesso de água no solo, o que dificulta a entrada da praga no solo durante a fase de pupa. Contudo, estudos indicam que a *B. carambolae* pode transformar-se em pupas acima do solo em condições de alta umidade (DANJUMA *et al.*, 2014), logo esse índice de estresse não é o mais impactante para o estabelecimento de *B. carambolae*. Assim, observa-se nível baixo de estresse por umidade para todo o mundo em 2100 (Figura 6).

Figura 6 - Índice estresse por umidade (WS) para *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), modelado globalmente pelo CLIMEX em um cenário de mudança climática (Acréscimo de 3°C)



FONTE: Elaborado pela autora.

3.4. DISCUSSÃO

A mudança climática está relacionada a eventos climáticos extremos, como secas e inundações, e impacta no ecossistema global, incluindo aumento do nível do mar (LEE, 2010), mudança de áreas de produção agrícola e distribuição de espécies (PEARSON; DAWSON, 2003; KWAK *et al.*, 2008). Os fitopatógenos e os artrópodes-praga estão entre os primeiros indicadores dos efeitos das mudanças climáticas por suas características populacionais e de crescimento podendo estender seu alcance e causar danos aos meios de subsistência humanos (MORALES *et al.*, 2021). Estima-se que nos Estados Unidos são perdidos cerca de 13 bilhões de dólares em produção agrícola devido à invasão de insetos-praga exóticos e na Europa esse prejuízo pode ultrapassar 20 bilhões de euros por ano (KETTUNEN *et al.*, 2009, US FISH AND WILDLIFE SERVICE, 2013).

Para prever o comportamento das populações de insetos-praga frente as mudanças do clima, uma abordagem comum é a modelagem de nicho ecológico para cenários futuros (JIMÉNEZ-VALVERDE *et al.*, 2011; GIANNINI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018). Os estudos envolvendo modelagem de cenários de mudanças climáticas, comumente, revelam aumento nas projeções de nicho de pragas exóticas (BRADLEY *et al.*, 2010; DUURSMA *et al.*, 2013). A exemplo disso tem-se estudo de modelagem da distribuição futura de *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae), uma espécie nociva, que causa danos em fruteiras na Ásia e ameaça muitos países localizados ao longo ou perto do Mar Mediterrâneo. O programa de mapeamento climático, CLIMEX 3.0, foi usado para modelar a distribuição geográfica potencial atual e futura de *B. zonata*. Cenários de mudanças climáticas para 2070 indicam que a distribuição potencial de *B. zonata* expandirá em direção aos polos em áreas que atualmente são consideradas frias (NI *et al.*, 2012).

O CLIMEX também foi utilizado para modelar a distribuição global potencial de outra espécie de mosca-das-frutas, a *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae), em cenários climáticos atuais e futuros. A mosca-das-frutas-oriental, *B. dorsalis*, é uma praga importante em todo o Sudeste Asiático e em várias ilhas do Pacífico, com ampla distribuição, capacidade invasiva e impacto potencial no acesso aos mercados importadores. Em cenário climático futuro, com influência das mudanças climáticas, o alcance global potencial para *B. dorsalis* é projetado para se estender ainda mais em direção aos polos, à medida que os limites do estresse por frio diminuem. No entanto, o intervalo potencial se contrai em áreas onde a precipitação tem previsão de redução substancial, indicando que a baixa umidade do solo pode ser um fator bastante limitante (STEPHENS; KRITICOS; LERICHE, 2007).

Os resultados obtidos demonstram que a adequação climática global de *B. carambolae* deve reduzir significativamente em muitas regiões do mundo diante do aumento dos efeitos das mudanças climáticas. Corroborando com os resultados, existem estudos para cenários de mudanças climáticas na Índia com as espécies *Bactrocera papayae* (Drew e Hancock) (Diptera: Tephritidae) e *B. dorsalis*, usando o software CLIMEX. Esses estudos preveem redução gradual na adequação climática para ambas as espécies devido ao aumento de vários fatores de estresse (SRIDHAR *et al.*, 2014; SRIDHAR *et al.*, 2017). Estima-se que para *B. dorsalis*, a Índia Central e Ocidental se tornem progressivamente menos adequadas até 2030, 2050 e totalmente inadequada até 2090. No Sul da Índia, haverá ligeira redução na adequação climática para a praga ao longo dos anos, e o Nordeste desse país, em contrapartida, se tornará altamente adequado até 2090 (SRIDHAR *et al.*, 2014). Para *B. papayae* a similaridade climática para o estabelecimento da espécie também caiu gradualmente em todo o país, com o aumento da temperatura em 3 °C, exceto nos Estados de Karnataka e Maharashtra (SRIDHAR *et al.*, 2017).

A modelagem do nicho ecológico de *B. carambolae* estima que haverá o mesmo comportamento de *B. papayae* e de *B. dorsalis* esperado para a Índia, com redução na adequação climática para a maior parte do país. O Estado de Karnataka, é uma exceção, pois apresenta elevada adequação para mosca-da-carambola, *B. carambolae*, assim como para *B. papayae*.

Grande parte da América Central e do Sul, África, Ásia e Oceania, que apresentam adequação climática atualmente (2022) deverão permanecer adequadas no futuro (2100), diante da elevação de 3 °C na temperatura global. Entretanto, observou-se que o nível de adequação, indicado pelo índice ecoclimático reduziu em todo o globo terrestre. Localidades com elevada adequação ambiental devem ter adequação moderada a baixa. Essa redução pode estar relacionada ao aumento do estresse por seca, tendo em vista a previsão de redução das chuvas em cerca de 14% até 2100 e, conseqüente aumento da evaporação (GORDON *et al.*, 2002), assim como aumento do estresse por calor, em virtude do aquecimento do planeta.

O estresse por seca ocorre com a redução da umidade do solo e do ar, que desfavorece a cópula, a oviposição, a viabilidade de pupas e a emergência de adultos de moscas-das-frutas (VAYSSIÈRES *et al.*, 2009). O estresse por calor pode causar estivação temporária ou permanente, impedindo que o inseto realize suas atividades normais como alimentação e reprodução. Para *B. carambolae* a estivação ocorre a partir de 35 °C, temperatura onde não foi observada emergência de adultos (DANJUMA *et al.*, 2014). Assim, o aquecimento global desfavorece a incidência da espécie em regiões equatoriais e tropicais onde a temperatura atinge facilmente os 30 °C nas condições atuais (2022) e deverá sofrer acréscimo de 3 °C até 2100 (BASTOS; FERREIRA, 2000).

Para as regiões temperadas o estresse por frio é apontado como principal fator limitante ao estabelecimento da mosca-da-carambola mesmo com acréscimo de 3 °C na temperatura. Isso deve-se ao fato de as temperaturas serem tão baixas, especialmente no inverno, que mesmo com o aumento da temperatura global previsto ainda não serão favoráveis para a espécie.

É certo que a ocorrência de *B. carambolae*, assim como de outras espécies do gênero, permanecerão associadas à zona intertropical, onde estima-se que as condições climáticas permanecerão favoráveis em 2100. Embora os modelos de previsão futura envolvendo outras espécies de *Bactrocera* pareçam divergentes, deve-se levar em consideração que os fatores estressantes são variáveis considerando cada espécie e que as previsões para os cenários de mudanças climáticas utilizadas nos estudos não são padronizadas.

Destaca-se que no presente estudo foi avaliado o efeito da irrigação no cenário atual, sem a qual muitas culturas não seriam possíveis em algumas regiões. A irrigação exclui a limitação da umidade, cria microclimas adequados e possibilita o cultivo de plantas hospedeiras, permitindo a persistência de moscas-das-frutas em áreas que poderiam não existir sem irrigação (SUTHERST; YONOW, 1998). Nesse caso, é possível que as projeções de adequação apresentadas sofram modificações caso a irrigação não seja considerada. Além do clima, outros fatores também podem influenciar a ocorrência da espécie, como a sazonalidade de frutos hospedeiros, a presença de inimigos naturais e a utilização de medidas de controle e programas de erradicação. A modelagem do nicho ecológico futuro de *B. carambolae*, baseada no clima, traz informações que norteiam o desenvolvimento de estratégias para conter a praga em todo o mundo. A modelagem pode auxiliar na formulação de estratégias de controle do avanço da praga para regiões onde ainda não ocorre, colaborando com a implementação ou exclusão de barreiras quarentenárias.

3.5 CONCLUSÕES

Com as mudanças climáticas e a elevação da temperatura global, estima-se que o nicho ecológico de *B. carambolae* sofrerá modificações. As áreas adequadas para a espécie-praga deverão reduzir, assim como o nível de adequação nas regiões tropicais e subtropicais do mundo. Diversos países da África, abaixo do deserto do Saara, das Américas do Sul e Central revelaram alta adequação climática prevista pelo modelo. O continente asiático apresentou discreta redução na adequação ambiental, com o cenário de aquecimento do planeta. O principal fator limitante ao estabelecimento de *B. carambolae* é o estresse causado pelo frio, enquanto que a umidade do solo é o fator de estresse que menos influencia essa espécie.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo CLIMEX desenvolvido para *B. carambolae* é robusto e consistente, pois enquadra bem todos os pontos de ocorrência e os parâmetros biológicos inseridos estão em conformidade com o observado em estudos realizados com a espécie. No modelo atual (2022) e futuro (2100), considerando um cenário de aquecimento do globo terrestre de 3 °C, a espécie possui adequação climática nas regiões Equatoriais, Tropicais e Subtropicais.

Devido as mudanças climáticas, a mosca-da-carambola terá seu nicho ecológico reduzido e sofrerá maiores níveis de estresse ambiental devido ao calor e ao clima mais seco nas áreas onde habita.

Os resultados obtidos nesta pesquisa são importantes para embasar o debate do risco que *B. carambolae* representa para os países da Zona Intertropical do mundo. Principalmente para os países que produzem frutas em grande escala, para consumo interno ou para exportação, como a China, Índia e Brasil. Na China, este estudo revelou que a espécie-praga não tem adequação climática para adentrar o país, embora seja capaz de se estabelecer no Sul do país. Brasil e Índia devem fortalecer suas medidas de controle e de erradicação nas localidades que apresentam ocorrência da mosca-da-carambola para que ela não atinja novas localidades, especialmente as áreas produtoras de frutas. As barreiras fitossanitárias para importação de produtos vegetais devem ser rigorosamente mantidas, assim como as armadilhas de monitoramento e a fiscalização em portos e aeroportos.

Por fim, é necessário que a cooperação entre os órgãos de regulação fitossanitária em todo o mundo esteja em sintonia com a comunidade acadêmica afim de construir modelos cada vez mais robustos e adequados para a confecção de políticas de defesa fitossanitária.

REFERÊNCIAS

- ADAIME, R.; JESUS-BARROS, C. R.; BARIANI, A.; LIMA, A. L.; CRUZ, K. R.; CARVALHO, J. P. Novos registros de hospedeiros da mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae*) no Estado do Amapá, Brasil. **Embrapa Amapá-Comunicado técnico**, p. 146. 2016.
- ADAIME, R.; LEMOS, W. P.; ZUCCHI, R. A. **Moscas-das-frutas na Amazônia brasileira: diversidade, hospedeiros e inimigos naturais**. Macapá: Embrapa Amapá, p. 299, 2011.
- ALBRITTON, D. L.; DOKKEN, D. J. Climate Change 2001: Synthesis Report. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA, p. 398, 2001.
- ALI, I.; F. ULLAH, F.; KHAN S.A. Efficacy of various insecticides and trap heights in methyl eugenol baited traps against fruitflies (*Bactrocera* spp.). **Sarhad Journal of Agriculture (Pakistan)**, v. 15, n. 6, p. 589-594, 1999.
- AMARAL, E. J. F. D.; SOUSA, M. D. S. M. D.; SANTOS, J. E. V. D.; COSTA, L. M.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; TOLEDO, J. J. D.; ADAIME, R. Effect of soil class and moisture on the depth of pupation and pupal viability of *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (1994). **Revista Brasileira de Entomologia, s.l., s.n.**, v. 65, n. 1, p. 1-8, 2021.
- ANGELINO, D.; GODOS, J.; GHELFI, F.; TIERI, M.; TITTA, L.; LAFRANCONI, A.; GROSSO, G. Fruit and vegetable consumption and health outcomes: An umbrella review of observational studies. **International Journal of Food Sciences and Nutrition, s.l., s.n.**, v. 70, n. 6, p. 652-667, 2019.
- AQSIQ. Letter on Requesting Recognition of North China's Pear and Apple Producing Regions as a Fruit Fly Areas. **General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China**, 2007.
- ARAÚJO, M. B.; PETERSON, A. T. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. **Ecology, s.l., s.n.**, v. 93, n. 7, p. 1527-1539. 2012.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. Análise climatológica da alta Subtropical do Atlântico Sul. **CEP, s.l., s.n.**, v. 12220, n. 110, p. 973-990, 2000.
- BELLIS, G.A; BRITO, A. A; DE JESUS, H; QUINTAO, V; SARMENTO, J. C; BERE, A; RODRIGUES, J; HANCOCK, D. L. A preliminary account of the fruit fly fauna of Timor-Leste (Diptera: Tephritidae: Dacinae). **Zootaxa, s.l., s.n.**, v. 4362, n. 3, p. 421-432, 2017.
- BIOSECURITY AUSTRALIA. Report of the assessment of northern China's fruit fly pest free areas: Hebei, Shandong and Xinjiang. **Biosecurity Australia**, Canberra, 2009.
- BORGHETTI, J. R.; SILVA, W. L. C., NOCKO, H. R.; LOYOLA, L. N.; CHIANCA, G. K. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. Brasília, p. 243, 2017.

- BRADLEY, B. A.; WILCOVE, D. S.; OPPENHEIMER, M. J. B. I. Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. **Biological Invasions**, *s.l., s.n.*, v.12, p.1855-1872, 2010.
- BRASIL. **Instrução Normativa nº 28**, de 20 de julho de 2017. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2/10/2018. Seção 1. 2017.
- BRASIL. **Instrução Normativa Nº 41**, de 1º de Julho de 2008. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02/07/2008, Seção 1, p. 8, 2008.
- BRÉVAULT, T.; QUILICI, S. Relationships between temperature, development and survival of different life stages of the tomato fruit fly, *Neoceratitis cyanescens*. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, *s.l., s.n.*, v. 94, n. 1, p. 25-30, 2000.
- BYEON, D. H.; JUNG, J. M.; LOHUMI, S.; CHO, B. K.; JUNG, S.; LEE, W. H. Predictive analysis of *Metcalfa pruinosa* (Hemiptera: Flatidae) distribution in South Korea using CLIMEX software. **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, *s.l., s.n.*, v. 10, n. 3, p. 379-384, 2017.
- CABI. *Bactrocera carambolae* (mosca da carambola). Compendio de espécies invasivas. **Wallingford**, Reino Unido: CABI, 2021. Disponível em: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/8700>. Acesso em: 17 dez. 2021.
- CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, *s.l., s.n.*, v. 16, p. 70-75, 2011.
- CUGALA, D.; EKESI, S.; AMBASSE, D.; ADAMU, R. S.; MOHAMED, S. A. Assessment of ripening stages of Cavendish dwarf bananas as host or nonhost to *Bactrocera invadens*. **Journal of Applied Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 138, p. 449-457, 2014.
- DALAPICOLLA, J. Tutorial de modelos de distribuição de espécie: Guia prático usando o MaxEnt e o ArcGIS 10. **Laboratório de Mastozoologia e Biogeografia**. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Retrieved, v. 6, 2016.
- DANJUMA, S.; BOONROTPONT, S.; THAOCHAN, N.; SURAKRAI, P.; CHUTAMAS, S.; NIRANJAN, K. Life history strategy of the carambola fruit fly *Bactrocera carambolae* Drew and Hancock (Diptera: Tephritidae) on guava *Psidium guajava*. **Equity Journal of Science and Technology**, *s.l., s.n.*, v. 5, n. 1, p. 35-35, 2019.
- DANJUMA, S.; THAOCHAN, N.; PERMKAM, S.; SATASOOK, C. Effect of temperature on the development and survival of immature stages of the carambola fruit fly, *Bactrocera carambolae*, and the Asian papaya fruit fly, *Bactrocera papayae*, reared on guava diet. **Journal of Insect Science**, v. 14, n.1, p.126, 2014.
- DE VILLIERS, M.; HATTINGH, V.; KRITICOS, D. J.; BRUNEL, S.; VAYSSIÈRES, J. F.; SINZOGAN, A.; BILLAH, M. K.; MOHAMED, S. A.; MWATAWALA, M.; ABDELGADER, H.; SALAH, F. E. E.; DE MEYER, M. The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns. **Bulletin of Entomological Research**, *s.l., s.n.*, v.106, p. 19-33, 2016.

- DOHINO, T.; HALLMAN, G.; GROUT, T.; CLARKE, T.; FOLLETT, P. A. Phytosanitary treatments against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae): current situation and future prospects. **Journal of Economic Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 110, n. 1, p. 67-79, 2017.
- DOMINIAC, B. C.; DANIELS, D. Review of the past and present distribution of Mediterranean fruit fly (*Ceratitis capitata* Wiedemann) and Queensland fruit fly (*Bactrocera tryoni* Froggatt) in Australia. **Australian Journal of Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 51, n. 2, p. 104-115, 2012.
- DOMINIAC, B. C.; MAPSON, R. Revised distribution of *Bactrocera tryoni* in Eastern Australia and effect on possible incursions of Mediterranean fruit fly: Development of Australia's Eastern trading block. **Journal of Economic Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 110, n. 6, p. 2459-2465, 2017.
- DREW, R. A. I.; TSURUTA, K.; WHITE, I. M. A new species of pest fruit fly (Diptera: Tephritidae: Dacinae) from Sri Lanka and Africa. **African Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 13, n. 1, p. 149-154, 2005.
- DREW, R. A. I.; HANCOCK, D. L. The *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies (Diptera: Tephritidae: Dacinae) in Asia. **Bulletin of Entomological Research - Supplement Series**, *s.l., s.n.*, v. 2, p. 1-68, 1994.
- DUURSMA, D. E.; GALLAGHER, R. V.; ROGER, E.; HUGHES, L.; DOWNEY, P. O.; LEISHMAN, M. R. Next-generation invaders? Hotspots for naturalised sleeper weeds in Australia under future climates. **PloS One**, *s.l., s.n.*, v. 8, p. e84222, 2013.
- EHRLÉN, J.; MORRIS, W. F. Predicting changes in the distribution and abundance of species under environmental change. **Ecology Letters**, *s.l., s.n.*, v. 18, n. 3, p. 303-314, 2015.
- ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, *s.l., s.n.*, v. 40, n. 1, p. 677-697, 2009.
- EL-SAYED, A.; KAMEL, M. Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases. **Environmental Science and Pollution Research**, *s.l., s.n.*, v. 27, n. 18, p. 22336-22352, 2020.
- EPPO. EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION. *Bactrocera carambolae*. EPPO Global Database. 2022. Disponível em: <<https://gd.eppo.int>>. Acesso em: 21 abril 2022.
- FAO. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. FAOSTAT. **Divisão de estatística**. 2021. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>>. Acesso em: 05 maio 2021.
- FERNANDES, C. S. **China e o clima: uma análise da política climática chinesa (2007 - 2019)**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Estudos Estratégicos Internacionais) - UFRGS, Porto Alegre, 2021
- FIDELIS, E. G.; LOHMANN, T; R., SILVA, M. L.; PARIZZI, P.; LARANJEIRA, F; F.

Priorização de Pragas Quarentenárias ausentes no Brasil. **Embrapa Roraima** - Livro científico (ALICE), 2018.

FUJII, N.; SUJIONO KAGO, H.; HIDAKA, N.; TAKAKURA, K. I.; HONMA, A.; TSUKADA, M.; SAWADA, H.; NISHIDA, T. A comparison of host utilization between sibling fruit flies *Bactrocera carambolae* and *B. papayae* (Diptera: Tephritidae) in west Java, Indonesia, serious quarantine pests of fruit. **Japanese Journal Environmente Entomology and Zoology**, *s.l., s.n.*, v. 26, n. 4, p. 133-141, 2016.

GABAYET, J. A. R.; FLORES, J. R.; HOEFLICH, W. E. The Mexican national fruit fly eradication campaign: largest fruit fly industrial complex in the world. In: **Fruit Fly Pests**. CRC Press, p. 561-563, 2020.

GARRETT, K. A.; DOBSON, A. D. M.; KROSCHER, J.; NATARAJAN, B.; ORLANDINI, S.; TONNANG, H. E.; VALDIVIA, C. The effects of climate variability and the color of weather time series on agricultural diseases and pests, and on decisions for their management. **Agricultural and Forest Meteorology**, *s.l., s.n.*, v. 170, p. 216-227, 2013.

GIANNINI, T. C., COSTA, W. F., CORDEIRO, G. D., IMPERATRIZ-FONSECA, V. L., SARAIVA, A. M., BIESMEIJER, J., & GARIBALDI, L. A. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. **PloS One**, *s.l., s.n.*, v. 12, n. 8, p. e0182274, 2017.

GIANNINI, T. C.; SIQUEIRA, M. F.; ACOSTA, A. L.; BARRETO, F. C.; SARAIVA, A. M.; ALVES-DOS-SANTOS, I. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies. **Rodriguésia**, *s.l., s.n.*, v. 63, n. 3 p. 733-749, 2012.

GODOY, M. J. S.; PACHECO, W. S. P.; MALAVASI, A. Moscas-das-frutas quarentenárias para o Brasil. In: ADAIME, R. S.; ZUCCHI, R. A. **Moscas-das-frutas na Amazônia brasileira diversidade, hospedeiro e inimigos naturais**. Embrapa. Macapá, Amapá, Brasil, p. 111, 2011.

GORDON, H. B.; ROTSTAYN, L. D.; MCGREGOR, J. L.; DIX, M. R.; KOWALCZYK, E. A.; O'FARRELL, S. P.; ELLIOTT, T. I. **The CSIRO Mk3 climate system model**. 2002.

GRAHAM, C. H.; FERRIER, S.; HUETTMAN, F.; MORITZ, C.; PETERSON, A. T. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. **Trends in Ecology and Evolution**, *s.l., s.n.*, v. 19, p. 497-503, 2004.

GUISAN, A.; TINGLEY, R.; BAUMGARTNER, J. B.; NAUJOKAITIS-LEWIS, I.; SUTCLIFFE, P. R.; TULLOCH, A. I.; BUCKLEY, Y. M. Predicting species distributions for conservation decisions. **Ecology Letters**, *s.l., s.n.*, v. 16, n. 12, p. 1424-1435, 2013.

HOFFMANN, K.; BOEING, H.; VOLATIER, J. L.; BECKER, W. Evaluating the potential health gain of the World Health Organization's recommendation concerning vegetable and fruit consumption. **Public Health Nutrition**, *s.l., s.n.*, v. 6, n. 8, p. 765-772, 2003.

IPCC. Aquecimento global de 1,5 °C. **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC)**. 2018. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/

07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 30 abril 2022.

IPCC. Summary for Policymakers. **Cambridge University Press**, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3-33, 2022.

ITTERSUM, M.; LEFFELAAR, P.; KEULEN, H.; KROPFF, M. On approaches and applications of the wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, *s.l., s.n.*, v. 18, n. 3-4, p. 201- 234, 2003.

IWAIZUMI, R. Species and host record of the *Bactrocera dorsalis* complex (Diptera: Tephritidae) detected by the plant quarantine of Japan. **Applied Entomology and Zoology**, *s.l., s.n.*, v. 39, n. 2, p. 327-333, 2004.

JIMÉNEZ-CLAVERO, M. Á. Animal viral diseases and global change: bluetongue and West Nile fever as paradigms. **Frontiers in Genetics**, *s.l., s.n.*, v. 3, p. 105, 2012.

JIMÉNEZ-VALVERDE, A.; PETERSON, A. T.; SOBERÓN, J.; OVERTON, J. M.; ARAGÓN, P.; LOBO, J. M. Use of niche models in invasive species risk assessments. **Biological Invasions**, *s.l., s.n.*, v. 13, n. 12, p. 2785-2797, 2011.

KEARNEY, M.; PORTER, W. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. **Ecology Letters**, *s.l., s.n.*, v. 12, p. 334-350, 2009.

KIM, S. B.; PARK, J.; KIM, D. CLIMEX simulated predictions of the potential distribution of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) considering the northern boundary: With special emphasis on Jeju, Korea. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 23, n. 3, p. 797-808, 2020.

KOSWANUDIN, D.; BASUKRIADI, A.; SAMUDRA, I.M.; UBAIDILLAH, R. Host preference fruit flies *Bactrocera carambolae* (Drew & Hancock) and *Bactrocera dorsalis* (Drew and Hancock) (Diptera: Tephritidae). **Jurnal Entomologi Indonesia**, *s.l., s.n.*, v. 15, n. 1, p. 40-40, 2018.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; SUTHERST, R. W. The potential distribution of *Bactrocera dorsalis*: considering phenology and irrigation patterns. **Bulletin of Entomological Research**, *s.l., s.n.*, v. 106, n. 1, p. 19-33, 2016.

KRITICOS, D. J.; OTA, N.; HUTCHISON, W. D.; BEDDOW, J.; WALSH, T.; TAY, W. T.; ZALUCKI, M. P. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time? **PLoS ONE**, *s.l., s.n.*, v. 10, n. 3, p.e0119618, 2015c.

KRITICOS, D. J.; WEBBER, B. L.; LERICHE, A.; OTA, N.; MACADAM, I.; BATHOLS, J.; SCOTT, J. K. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**, *s.l., s.n.*, v. 3, n. 1, p.53-64, 2012.

KRITICOS, D.J.; MAYWALD, G.F.; YONOW, T.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; SUTHERST, R.W. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. **CSIRO**, Canberra, p. 184, 2015a.

KRITICOS, D.J.; MAYWALD, G.F.; YONOW, T.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; SUTHERST, R.W. CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. **CSIRO**, Canberra, p.184, 2015b.

KUMAR, S.; GRAHAM, J.; WEST, A. M.; EVANGELISTA, P. H. Using district-level occurrences in MaxEnt for predicting the invasion potential of an exotic insect pest in India. **Computers and Electronics in Agriculture**, *s.l., s.n.*, v. 103, p. 55-62, 2014.

KWAK, T. S.; KI, J. H.; KIM, Y. E.; JEON, H. M.; KIM, S. J. A study of GIS prediction model of domestic fruit cultivation location changes by the global warming-six tropical and sub-tropical fruits. **Journal of Korea Spatial Information System Society**, *s.l., s.n.*, v. 10, n. 3, p. 93-106, 2008.

LEBLANC, L.; HOSSAIN, M. A.; DOORENWEERD, C.; AHMED KHAN, S.; MOMEN, M.; SAN JOSE, M.; RUBINOFF, D. Six years of fruit fly surveys in Bangladesh: a new species, 33 new country records and discovery of the highly invasive *Bactrocera carambolae* (Diptera, Tephritidae). **ZooKeys**, *s.l., s.n.*, v. 876, p. 87, 2019.

LEE, H. W. A study of methodologies assessing species susceptibility to climate change. **Issue studies of Korea Environment Institute**, 2010.

LEMONS, W. P.; SOUZA, L. A.; FARIAS, P. R. S.; MACEDO, L. P.; RODRIGUES, T. W. Estratégias de controle da mosca-da-carambola *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae) visando impedir sua disseminação para áreas livres de ocorrência no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental (ALICE)**, 2006.

LOMOLINO, M. V.; RIDDLE, B. R.; BROWN, J. H. The reticulating phylogeny of island biogeography theory. **The Quarterly review of biology**, *s.l., s.n.*, v. 84, n. 4, p. 357-390, 2009.

LOUZEIRO, L. R. F. Caracterização das perdas na comercialização de frutas *in natura* devido ao dano direto das moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae e Lonchaeidae). Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) - **Instituto Biológico**, São Paulo, 2017.

LUX, S. A.; COPELAND, R. S.; WHITE, I. M.; MANRAKHAN, A.; BILLAH, M. K. A new invasive fruit fly species from the *Bactrocera dorsalis* (Hendel) group detected in East Africa. **Insect Science and Its Application**, v. 23, p. 355-360, 2003.

LV, X.; ZHAO, S.; NING, Z.; ZENG, H.; SHU, Y.; TAO, O.; LIU, Y. Citrus fruits as a treasure trove of active natural metabolites that potentially provide benefits for human health. **Chemistry Central Journal**, *s.l., s.n.*, v. 9, n. 1, p. 1-14, 2015.

MALAVASI, A. Mosca-da-carambola, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock. In: VILELA, E. F.; ZUCCHI, R. A. **Pragas introduzidas no Brasil**: insetos e ácaros. Piracicaba: FEALQ, cap. 1, p. 173-184, 2015.

MALAVASI, A.; ZUCCHI, R.A. Moscas-das-frutas de importância econômica no Brasil: Conhecimento básico e aplicado. **Holos**, Ribeirão Preto, p. 93-98, 2000.

MAPA. **Brasil bate recorde histórico com mais de US\$ 1,21 bilhão em exportação de frutas em 2021**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-historico-com-mais-de-us-1-21-bilhao-em-exportacao-de-frutas-em-2021>>. Acesso em: 21 fev. 2022.

MAPA. **Mapa atualiza lista de pragas quarentenárias ausentes**. Sanidade vegetal. 17/09/2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-atualiza-lista-de-pragas-quarentenarias-ausentes>>. Acesso em: 14 dez 2021.

MAPA. **Mapa participa de ações de capacitação de combate à mosca da carambola na Guiana**. 2019a. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-participa-de-acoes-de-capacitacao-de-combate-a-mosca-da-carambola-na-guiana>> Acesso em: 20/05/2021.

MAPA. **Tratamento natural garante exportação de manga para mercados exigentes**. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/tratamento-natural-garante-exportacao-de-manga-para-mercados-exigentes>>. Acesso em: 02 ago. 2021.

MARCHIORO, C. A. Global potential distribution of *Bactrocera carambolae* and the risks for fruit production in Brazil. **PLoS One**, *s.l., s.n.*, v. 11, n. 11, p. e0166142, 2016.

MORALES, C. D. C.; HAMADA, E.; MADARIAGA, H. L.; RAGO, A. M. Impacto das mudanças climáticas sobre a ferrugem marron da cana-de-açúcar nas principais áreas produtoras das Argentina. **Embrapa Semiárido**, 2021.

NAKAHARA, S; KATAYAMA, M; THEIN, M. M; YEE, K. N; NAING, S. S; SOE, W; HTIEK, T; TSURUTA, K. Notes on the genus *Bactrocera* fruit fly species in mango orchards in Myanmar. **Research Bulletin Plant Protection Japan**, *s.l., s.n.*, v. 55, p. 43-51, 2019.

NI, W.; LI, Z.; CHEN, H.; WAN, F.; QU, W.; ZHANG, Z.; KRITICOS, D. Including climate change in pest risk assessment: the peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae). **Bulletin of Entomological Research**, *s.l., s.n.*, v. 102, n. 2, p. 173-183, 2012.

NURHAYATI, E.; KOESMARYONO, Y. Predictive modeling of rice yellow stem borer population dynamics under climate change scenarios in Indramayu. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, v. 58, n. 1, p. 012054, 2017.

OLIVEIRA, R. C. M.; ZALUCKI, M. P.; PASTORI, P. L.; KRITICOS, D. J. Current and future potential distributions of *Helicoverpa punctigera* (Lepidoptera: Noctuidae): is this the next FAW?. **Bulletin of Entomological Research**, *s.l., s.n.*, v. 112, n. 1, p. 119-130, 2021.

ORGANIZAÇÃO WH. **Relatório especial da COP24: saúde e mudanças climáticas**. 2018.

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, p. 219-252, 2014.

PASINATO, J. **Biologia da mosca-da-carambola (*Bactrocera carambolae*) em uva 'Itália' e acerola**. 2018.

PEARSON, R. G.; DAWSON, T. P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. **Global Ecology and Biogeography**, *s.l., s.n.*, v. 12, n. 5, p. 361-371, 2003.

PECK, S. L.; MCQUATE, G. T. Ecological aspects of *Bactrocera latifrons* (Diptera: Tephritidae) on Maui, Hawaii: movement and host preference. **Environmental Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 33, n. 6, p. 1722-1731, 2004.

PERMALLOO, S., SEEWORUTHUN, S. I., JOOMAYE, A., SOONNOO, A. R., GUNGAH, B., UNMOLE, L., & BOODRAM, R. An area wide control of fruit flies in Mauritius. In: **Proceedings of the 2 nd Annual Meeting of Agricultural Scientists, Food and Agricultural Research Council**. *s.l., s.n.*, p. 203-210, 1998.

PESSOA, M. C. P. Y.; PRADO, J.; MINGOTI, R.; LOVISI FILHO, E.; SILVA, A. D. S.; de MOURA, M. S. B.; FARIAS, A. R. Estimativas de potencial adaptação de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (praga quarentenária A2): estudo de caso para dois perímetros irrigados do Vale do Rio São Francisco. **Embrapa Gestão Territorial**, Campinas. Nota técnica, p. 2, 2016.

PETERSON, A. T.; SOBERÓN, J.; PEARSON, R. G.; ANDERSON, R. P.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; NAKAMURA, M.; ARAÚJO, M. B. Ecological niches and geographic distributions (MPB-49). In: **Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49)**. Princeton University Press, Princeton, p. 314, 2011.

QIN, Y.; WANG, C.; ZHAO, Z.; PAN, X.; LI, Z. Climate change impacts on the global potential geographical distribution of the agricultural invasive pest, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). **Climatic Change**, *s.l., s.n.*, v. 155, n. 2, p. 145-156, 2019.

RIBEIRO, S. Governo lança programa de combate às moscas-das-frutas. **Agência Brasil**, 2015. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2015-09/governo-lanca-programa-de-combate-moscas-das-frutas>>. Acesso em: 24 set 2021.

ROBINSON, S. Climate change adaptation in SIDS: A systematic review of the literature pre and post the IPCC Fifth Assessment Report. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, *s.l., s.n.*, v. 11, n. 4, p. e653, 2020.

RODRIGUES, W. C. Fatores que influenciam no desenvolvimento dos insetos. **Info Insetos**, *s.l., s.n.*, v. 1, n. 4, p. 1-4, 2004.

ROSA, S. E. S. D.; SIMÕES, P. M. Desafios da vitivinicultura brasileira. **BNDES Setorial**, *s.n.*, Rio de Janeiro, n. 19, p. 67-90, 2004.

SARWAR, M. How to manage fruit fly (Family Tephritidae) pests damage on different plant host species by take up of physical control measures. **International Journal of Animal Biology**, *s.l., s.n.*, v. 1, n. 4, p. 124-129, 2015.

- SAUERS-MULLER, A. VAN. Host plants of the carambola fruit fly, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae), in Suriname, South America. **Neotropical Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 34, n. 2, p. 203-214, 2005.
- SAUERS-MULLER, A. VAN.; SIGNORETTI, J. G. **Manual for the control of the Carambola fruit fly in South America**: Operations Manual. Paramaribo. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317182807_Manual_for_the_control_of_the_Carambola_fruit_fly_in_South_America>. Acesso em: 31 ago. 2021.
- SHINE, C.; KETTUNEN, M.; GENOVESI, P.; GOLLASCH, S.; PAGAD, S.; STARFINGER, U. Technical support to EU strategy on Invasive Alien Species (IAS). **Institute for European Environmental Policy**, *s.l., s.n.*, p. 35, 2009.
- SIEBERT, S.; DOLL, P.; HOOGEVEEN, J.; FAURES, J. M.; FRENKEN, K.; FEICK, S. Development and validation of the global map of irrigation areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, *s.l., s.n.*, v. 9, n. 5, p.535-547, 2005.
- SILVA, D. P.; DEW, R. M.; VILELA, B.; STEVENS, M. I.; SCHWARZ, M. P. No deaths in the desert: Predicted responses of an arid-adapted bee and its two nesting trees suggest resilience in the face of warming climates. **Insect Conservation and Diversity**, *s.l., s.n.*, v. 11, n. 5, p. 449-463, 2018.
- SILVA, E.; MORAIS, E. G. F.; JÚNIOR, R. J. S.; SOUZA-FILHO, M. F.; ANDRADE, P. C. R.; SANTOS, W. N. Diversidade de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) no sul do estado de Roraima. **XI Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no Estado de Roraima**. Roraima, 2017.
- SOBERÓN, J.; PETERSON, A.T. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. **Biodiversity Informatics**, *s.l., s.n.*, vol. 2, p. 1-10, 2005.
- SOUSA, K. Monitoramento para detecção da praga *Bactrocera carambolae* evita prejuízos à fruticultura maranhense. **AGED**, 2021. Disponível em: <<https://www.aged.ma.gov.br/monitoramento-para-deteccao-da-praga-bactrocera-carambolae-evita-prejuizos-a-fruticultura-maranhense/>>. Acesso em: 20 maio 2021.
- SRIDHAR, V., VINESH, L. S., JAYASHANKAR, M., JAYANTHI, P. D., & VERGHESE, A. CLIMEX modelling for risk assessment of Asian fruit fly, *Bactrocera papayae* (Drew and Hancock, 1994) in India. **Journal of Environmental Biology**, *s.l., s.n.*, n. 1, p. 105, 2017.
- SRIDHAR, V.; VERGHESE, A.; VINESH, L. S.; JAYASHANKAR, M.; JAYANTHI, P. K. CLIMEX simulated predictions of Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) geographical distribution under climate change situations in India. **Current Science**, *s.l., s.n.*, p. 1702-1710, 2014.
- STEPHENS, A.; KRITICOS, D.; LERICHE, A. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). **Bulletin of Entomological Research**, *s.l., s.n.*, v. 97, n. 4, p. 369-378, 2007.

- SUGAYAMA, R. L.; SILVA, M. L.; SILVA, S. X. B.; RANGEL, L. E. P. (Ed.). Defesa vegetal: fundamentos, ferramentas, políticas e perspectivas. **Sociedade Brasileira de Defesa Agropecuária**, Belo Horizonte, p. 183-203, 2015.
- SUTHERST, R.W.; MAYWALD, G. F. A computerised system for matching climates in ecology. **Agriculture Ecosystems and Environment**, *s.l., s.n.*, v. 13, n. 3-4, p. 281-299, 1985.
- SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania. **Environmental Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 34, n. 2, p. 317-335, 2005.
- SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; BOURNE, A. S. Including species interactions in risk assessments for global change. **Global Change Biology**, *s.l., s.n.*, v. 13, n. 9, p. 1843-1859, 2007.
- SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; KRITICOS, D. J. CLIMEX v.3: User's Guide. **Hearne Scientific Software**, Australia, v. 1, p.131, 2007.
- SUTHERST, R. W.; YONOW, T. The geographical distribution of the Queensland fruit fly, *Bactrocera* (*Dacus*) *tryoni*, in relation to climate. **Australian Journal of Agricultural Research**, *s.l., s.n.*, v. 49, n. 6, p. 935-954, 1998.
- UN BRASIL. O que são as mudanças climáticas? Nações Unidas do Brasil. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-sao-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 11 out. 2022.
- US FISH AND WILDLIFE SERVICE. **National fish, wildlife, and plants climate adaptation strategy**, 2013.
- VARGAS, G.; GÓMEZ, L.A.; MICHAUD, J.P. Sugarcane stem borers of the Colombian Cauca River Valley: pest status, biology and control. **Florida Entomologist**, *s.l., s.n.*, v. 98, n. 2, p. 728-735, 2015.
- VARGAS, R. I.; PIÑERO, J. C.; LEBLANC, L. An overview of pest species of *Bactrocera* fruit flies (Diptera: Tephritidae) and the integration of biopesticides with other biological approaches for their management with a focus on the Pacific region. **Insects**, *s.l., s.n.*, v. 6, n. 2, p. 297-318, 2015.
- VAYSSIÈRES, J.-F.; KORIE, S.; AYEIGNON, D. Correlation of fruit fly (Diptera Tephritidae) infestation of major mango cultivars in Borgou (Benin) with abiotic and biotic factors and assessment of damage. **Crop Protection**, *s.l., s.n.*, v. 28, n. 6, p. 477-488, 2009.
- VERA, M.T.; RODRIGUEZ, R.; SEGURA, D.F.; CLADERA, J.L.; SUTHERST, R.W. Potential geographical distribution of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata* (Diptera : Tephritidae), with emphasis on Argentina and Australia. **Environmental Entomology**, *s.l., s.n.*, v. 31, n. 6, p. 1009-1022, 2002.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: Methods, tools and examples for agriculture and environment**. Academic Press, 3 ed, 2018.

YAHIA, E. M.; MALDONADO CELIS, M. E.; SVENDSEN, M. The contribution of fruit and vegetable consumption to human health. **Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health**, ed. 2, p. 1-52, 2017.

ZACCARIA, D.; RODRIGUES, L. **Agricultura Irrigada**: um breve olhar. 2020.

ZUCCHI, R. A.; MORAES, R. C. B. **Moscas-das-frutas no Brasil - Espécies de *Anastrepha* suas plantas hospedeiras e parasitóides**. Piracicaba: Esalq/USP, 2021a. Disponível em: <www.lea.esalq.usp.br/anastrepha/>. Acesso em: 22 nov 2021.

ZUCCHI, R. A.; MORAES, R. C. B. **Moscas-das-frutas no Brasil - Hospedeiros e parasitóides da mosca-das-frutas do Mediterrâneo**. Piracicaba: Esalq/USP, 2021b. Disponível em: <www.lea.esalq.usp.br/ceratitis/>. Acesso em: 22 nov 2021.