

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia
Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade

Tese



Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana
***Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae):**
projeções para novos territórios e cenários futuros

Cristiano Machado Teixeira

Pelotas, 2019.



Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana *Anastrepha grandis*
(Diptera: Tephritidae): projeções para novos territórios e cenários futuros
Cristiano Machado Teixeira
Tese, 2019

Cristiano Machado Teixeira

**Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana
Anastrepha grandis (Diptera: Tephritidae):
projeções para novos territórios e cenários futuros**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Flávio Roberto Mello Garcia.

Pelotas, 2019.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

T266m Teixeira, Cristiano Machado

Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) : projeções para novos territórios e cenários futuros / Cristiano Machado Teixeira ; Flávio Roberto Mello Garcia, orientador. — Pelotas, 2019.

75 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Praga quarentenária. 2. Mosca-das-aboboras. 3. Mudanças climáticas. 4. Adequabilidade ambiental. I. Garcia, Flávio Roberto Mello, orient. II. Título.

CDD : 595.7

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB: 10/1842

Cristiano Machado Teixeira

**Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana
Anastrepha grandis (Diptera: Tephritidae):
projeções para novos territórios e cenários futuros**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 05 de setembro de 2019.

Banca examinadora:

**Prof. Dr. Flávio Roberto Mello Garcia (Orientador)
Doutor em Zoologia (Entomologia) pela PUCRS**

**Dra. Adrise Medeiros Nunes
Doutora em Ciências-Fitossanidade pela UFPel**

**Prof. Dr. Edison Zefa
Doutor em Zoologia pela UNESP**

**Prof. Dr. Marco Silva Gottschalk
Doutor em Biologia Animal pela UFRGS**

**Prof. Dr. Rafael Antunes Dias
Doutor em Ecologia pela UFRGS**

*Dedico esse trabalho a minha esposa
Josiane por todo tempo de companheirismo e
compreensão, esse trabalho também é dela.*

Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade que me proporcionou ampliar meu conhecimento sobre o mundo dos insetos. Principalmente ao corpo docente de profissionais os quais sempre admirei e tive a oportunidade de ser instruído e de conviver.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao professor Flávio que no decorrer dos anos tem acreditado em mim, tem sido um amigo e grande mestre. Ao mesmo tempo agradeço aos colegas do Laboratório de Ecologia de Insetos pelo convívio e aprendizado mútuo.

Aos colegas do Laboratório de Biologia de Insetos e aos estagiários. Especialmente às colegas Mity, Juti e Lili que sempre estavam por perto para aconselhar, para ajudar e para rir um pouco também, aprendi muito com vocês.

À minha esposa Josiane pela paciência, pelo companheirismo e pelo incentivo, sempre acreditando em mim mesmo em momentos em que eu mesmo duvidava.

Ao professor Marco Gottschalk que sempre foi muito solícito em tirar dúvidas sobre a modelagem.

Muitas outras pessoas colaboraram para que eu chegasse até aqui, seja ajudando diretamente ou dando suporte para que eu pudesse desenvolver o projeto e cada uma delas também é responsável pelos resultados desse trabalho.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

TEIXEIRA, Cristiano Machado. Modelagem de distribuição da mosca-das-cucurbitáceas sul-americana *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae): projeções para novos territórios e cenários futuros. Orientador: Flávio Roberto Mello Garcia. 2019. 75f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

A mosca-da-abóbora, *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846) (Diptera: Tephritidae) é a mais importante mosca que infesta cucurbitáceas na América do Sul. Compreender as áreas de distribuição potencial da espécie pode ajudar em estratégias de monitoramento e controle em regiões onde a mosca encontraria condições de adequabilidade ambiental para o seu estabelecimento. A modelagem de distribuição de espécie possibilita prever onde e em quais condições uma espécie pode ocorrer. Entender como a distribuição geográfica da espécie pode ocorrer em diferentes cenários permite maior poder de previsibilidade em estratégias de controle nas diferentes regiões e em diferentes cenários climáticos, como o que pode ocorrer se mudanças no clima previstos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas se confirmarem. O objetivo desse trabalho foi modelar as distribuições potenciais da mosca em dois tipos de abordagens, uma em relação as áreas onde a mosca ainda não ocorre fora da América do Sul, e outra com foco em distribuição preditiva nos cenários de mudança climática. Os resultados sugerem que a mosca pode se estabelecer em várias áreas de alta e média adequabilidade em todos os continentes, principalmente em regiões como o centro da África, sudeste asiático e Austrália. Mas também encontra atualmente condições adequadas em áreas no sul dos Estados Unidos e na Península Ibérica no hemisfério norte. Se forem consideradas as áreas de baixa adequabilidade o número de localidades que podem ser invadidas aumentaria. Em cenários de mudanças climáticas, a mosca tem sua distribuição favorecida em geral pelas mudanças em todos os cenários e embora possa perder algumas faixas de território hoje potenciais, ainda manterá áreas estáveis de distribuição com ganho maior nas novas áreas disponíveis principalmente nas regiões já favoráveis no presente e regiões em direção aos polos. Nesse sentido conclui-se que *A. grandis* tem condições de dispersar e colonizar novos ambientes fora de sua faixa nativa, inclusive em regiões onde é considerada quarentenária, e a exemplo de outros tefritídeos será beneficiada com mudanças climáticas que aumentarão a área adequada para seu estabelecimento.

Palavras-chave: praga quarentenária, mosca-das-abóboras, mudanças climáticas, adequabilidade ambiental.

Abstract

TEIXEIRA, Cristiano Machado. Distribution model of *Anastrepha grandis*: Projections for new territories and future scenarios. Orientador: Flávio Roberto Mello Garcia. 2019. 75f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Pumpkin fly, *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846) (Diptera: Tephritidae) is the most important cucurbit-infested fly in South America. Understanding the potential distribution areas of that specie may help in monitoring and control strategies in regions where the fly would find conditions of environmental suitability for its establishment. Species distribution modeling makes it possible to predict where and under what conditions a species might occur. Understanding how the geographic distribution of the species may occur in different scenarios allows for greater predictability in control strategies in different regions and in different climate scenarios, as can occur if climate change predicted by the Intergovernmental Panel on Climate Change is confirmed. The aim of this work was to model the potential distributions of the fly in two types of approaches, one in relation to areas where the fly does not yet occur outside South America, and the other focusing on predictive distribution in climate change scenarios. The results suggest that the fly may settle in various areas of high and medium suitability on all continents, especially in regions such as central Africa, Southeast Asia and Australia. But it also currently finds adequate conditions in areas in the southern United States and the Iberian Peninsula in the northern hemisphere. If areas of low suitability are considered, the number of locations that could be invaded would increase. In climate change scenarios, the fly has its distribution generally favored by changes in all scenarios and although it may lose some of today's potential territory ranges, it will still maintain stable distribution current areas with greater gain in the new areas available mainly in the already favorable regions of the world and regions towards the poles. In this sense, it is concluded that *A. grandis* is able to disperse and colonize new environments outside its native range, including in regions where it is considered quarantine, and like other tephritids will benefit from climate change that will increase the area suitable for its establishment.

Key words: quarantine pest, pumpkin fly, climatic changes, environmental suitability

Lista de Figuras

Artigo 1

- Figura 1 Pontos de ocorrência de *Anastrepha grandis* de acordo com registros em artigos científicos..... 41
- Figura 2 Resposta de *Anastrepha grandis* a variável abiótica bio1 (Temperatura anual média). As curvas mostram a resposta média (vermelho) e a média +/- um desvio padrão (azul) das 100 réplicas executadas pelo Maxent..... 42
- Figura 3 Resposta de *Anastrepha grandis* a variável abiótica bio13 (precipitação no mês mais úmido). As curvas mostram a resposta média (vermelho) e a média +/- um desvio padrão (azul) das 100 réplicas executadas pelo Maxent..... 43
- Figura 4 Mapa de distribuição potencial de *Anastrepha grandis* gerado pelo algoritmo Maxent. Em destaque diferentes níveis de adequabilidade ambiental acima do limite de corte mínimo (MTP)..... 44

Artigo 2

- Figura 1 Área total de adequabilidade ambiental para *Anastrepha grandis* em todos os cenários testados: Atual, RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 e RCP8,5 em cada um dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 com projeções para os períodos de 2050 e 2070..... 64
- Figura 2 Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para *Anastrepha grandis* nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2050 no modelo HadGEM2-ES. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas..... 66

Figura 3	Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para <i>Anastrepha grandis</i> nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2070 no modelo HadGEM2-ES. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.....	67
Figura 4	Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para <i>Anastrepha grandis</i> nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2050 no modelo MIROC5. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.....	68
Figura 5	Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para <i>Anastrepha grandis</i> nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2070 no modelo MIROC5. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.....	69

Lista de Tabelas

Artigo 2

Tabela 1	Comparativo entre as áreas de média a alta adequabilidade (>0.50) para <i>Anastrepha grandis</i> nos cenários atual e de mudança climática até o final do século XXI, projeções para os períodos de 2050 e 2070 nos modelos HadGEM2-ES e MIROC5.....	65
----------	--	----

Sumário

1 Introdução geral.....	12
2 Capítulo 1 - Artigo 1.....	18
Resumo.....	20
Abstract.....	21
Introdução.....	22
Material e métodos.....	24
Coleta e tratamento dos dados.....	24
Camadas ambientais.....	25
Modelagem.....	26
Resultados.....	27
Discussão.....	28
Conclusões.....	35
Referencias.....	36
3 Capítulo 2 - Artigo 2.....	45
Resumo.....	47
Abstract.....	48
Introdução.....	50
Material e métodos.....	53
Coleta e tratamento dos dados.....	53
Camadas ambientais.....	53
Modelos globais de mudança climática para cenários futuros.....	54
Modelagem.....	55
Tamanho da área adequada.....	55
Resultados.....	56

Discussão.....	57
Conclusões.....	60
Referencias.....	60
4 Conclusões gerais.....	71
5 Referencias gerais.....	72

1 introdução geral

A espécie *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846) (Diptera: Tephritidae) é a mais importante mosca que infesta cucurbitáceas na América do Sul. Essa espécie está presente na maioria dos países sul americanos e no Panamá. Em sua área de ocorrência tem hospedeiros de diferentes gêneros de Cucurbitaceae e é de importância não apenas pelos danos causados aos frutos, mas por questões quarentenárias, uma vez que países importadores de cucurbitáceas evitam comprar produtos de áreas que não sejam livres da ocorrência de *A. grandis*, como ocorre para uma porção relativamente grande do território brasileiro (Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste com registro até Wenceslau Guimarães - Bahia) e demais países sul americanos com exceção de Chile, Uruguai, Suriname e Guianas onde ainda não foi registrada (NORRBOM, 1991; MELO et al., 2012; BOLZAN et al., 2015; HALLMAN et al., 2017). Em relação ao nordeste brasileiro, existe um duradouro trabalho de monitoramento no semiárido que possibilitou a implantação de uma Área Livre da ocorrência da mosca no Rio Grande do Norte e Ceará, importantes produtores e exportadores de melão (ARAÚJO et al., 2005; SOUSA; MIRANDA et al., 2017).

Quando criada em abóboras ($25 \pm 2^\circ\text{C}$, $70 \pm 5\%$ UR e 12 h fotofase), os adultos podem alcançar longevidades médias de 148,4 dias para machos e 52,2 dias para fêmeas quando avaliados individualmente. Da oviposição à emergência de adultos existe um período de aproximadamente 41 dias, com as fases de ovo, larva e pupa ocorrendo em 3,93, 17,7, e 19,7 dias, respectivamente. Nessas condições é possível que haja viabilidades de 16,6 % para a fase de ovo, 88,0% para fase de larva e de 59,0% para a fase de pupa (SILVA; MALAVASI, 1996).

Em um estudo com diferentes temperaturas sobre a biologia de *A. grandis*, (BOLZAN et al., 2017), pesquisadores verificaram que o tempo de desenvolvimento foi inversamente proporcional à temperatura, havendo maior fecundidade e fertilidade observada a 25°C . Nessa temperatura as viabilidades de ovos e pupas foram maiores, assim como maior quantidade de insetos por fruta. Observaram também que o limiar

térmico e a constante térmica para as fases de ovos e pupas foi de 8,3°C, com 132,3 graus-dias (GD) para a fase de ovo e 347,0 GD para a fase pupal. De ovo a adulto, os valores foram de 5,2°C e 858,7 GD. Os autores ainda coletaram dados no campo e obtiveram valores de GD (937,9) e duração do período de ovo a adulto (79,7 d) condizentes com os ensaios laboratoriais. Segundo os autores, as informações sobre limiares térmicos podem ser utilizadas para a previsão de ocorrência da espécie em áreas de quarentena e estimar o número de gerações por ano (BOLZAN et al., 2017).

Em outro estudo (BOLZAN et al., 2015) avaliaram o desenvolvimento de *A. grandis* em hospedeiros da família Cucurbitaceae. Entre os hospedeiros utilizados havia abobrinhas (*Cucurbita pepo* L.), abóbora (*Cucurbita moschata* Duchesne), chuchu [*Sechium edule* (Jacq.) Swartz], mini melancia [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum & Nakai], melão espanhol (*Cucumis melo* L.), abóbora híbrida "Tetsukabuto" (*C. moschata* x *Cucurbita maxima* Duchesne) e pepino de salada (*Cucumis sativus* L.). Os autores relatam que hospedeiros de *Cucurbita* proporcionaram melhor desenvolvimento de *A. grandis* em comparação a outros hospedeiros, por possibilitarem o desenvolvimento de maior quantidade de insetos por fruto e maior taxa de infestação. Além disso, a fecundidade e longevidade de fêmeas foram maiores para as que se desenvolveram em *Cucurbita* sp. (BOLZAN et al., 2015).

Um estudo para determinar a tolerância dos estágios larvais ao frio foi realizado em abobrinha (*C. pepo*) e foi constatado que em 23 dias a uma temperatura mínima de 1°C pode haver algum tratamento fitossanitário. Os autores do estudo, entretanto, alertam que o 3º instar é o mais tolerante ao frio quando no interior dos frutos e que mais estudos devem ser realizados em larga escala com o objetivo de reduzir o tempo de tratamento para que seja comercialmente viável (HALLMAN et al., 2017).

Diante do exposto, é necessário compreender se *A. grandis* tem potencial para dispersar e se estabelecer em áreas onde ainda não ocorre, esse foi o objetivo apresentado no capítulo 1 desse trabalho (página 19), onde áreas de adequabilidade ambiental são calculadas com discussão sobre a expressão do nicho da espécie diante dos possíveis novos territórios que podem ser invadidos caso a mosca de alguma forma consiga chegar a tais regiões. A hipótese inicial desse estudo é de que já existem áreas de adequabilidade ambiental para a mosca fora de sua distribuição nativa na América do Sul. Para responder a este tipo de questão acerca da distribuição potencial de espécies, muitos estudos têm sido conduzidos lançando mão de ferramentas da modelagem de distribuição geográfica e dos sistemas de

georreferenciamento associados aos dados disponíveis de ausência ou presença das espécies nos territórios alvos dos estudos (PEARSON et al., 2007; SOBERÓN, 2010).

Dentre as ferramentas utilizadas estão algoritmos que computam dados de presença das espécies em um mapa e utilizam dados de variáveis bióticas e abióticas para prever a ocorrência dentro de limites de corte relacionados a capacidade adaptativa da espécie com base em dados de ocorrência atuais e em estudos de biologia. Estes algoritmos estão inseridos no contexto dos modelos relacionados a inteligência artificial como por exemplo o aprendizado de máquinas (Machine Learning) que é um subcampo da ciência da computação (KEARNEY; PORTER, 2009; PAGLIA et al., 2012; EVANS et al., 2015).

Além disso, nesse campo estão envolvidas ainda as redes neurais artificiais, que são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático baseado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Desse modo toda vez que a matriz é alimentada com novos dados ou se randomiza os mesmos dados de ocorrência das espécies, a máquina é capaz de aprender e identificar padrões, convertendo-os assim em probabilidades de ocorrência diante de variáveis ambientais, sejam elas bióticas ou abióticas (PAGLIA et al., 2012).

O banco de dados que alimenta os modelos de distribuição de espécies pode ser gerado com base em registros disponíveis em sites especializados, através de coleções existentes em museus ou de artigos científicos da área de ecologia, taxonomia ou áreas relacionadas (GIANNINI et al., 2012; PAGLIA et al., 2012).

Outro objetivo desse estudo foi prever através da distribuição potencial de espécies como a mosca poderia ter sua distribuição afetada frente as mudanças climáticas, isso foi discutido no segundo capítulo (página 45). A hipótese testada está respaldada por trabalhos de modelagem de distribuição realizados com outras espécies de tefritídeos (NI et al., 2012; FU et al., 2014; SRIDHAR et al., 2014; HILL et al., 2016; QIN et al., 2019) na qual se defende que a mosca poderia ser favorecida com o aumento de áreas favoráveis a sua distribuição mesmo em ambientes atualmente inviáveis como nas regiões mais ao norte ou ao sul perto das áreas polares, caso as mudanças no clima viessem a se confirmar em um dos quatro cenários possíveis testados nesse estudo.

Toda mudança, quando ocorre num contexto microclimático, pode significar ajustes no modo de vida dos organismos, nesse sentido seria de se esperar o mesmo para um quadro de mudança a níveis globais como o que propõe o Painel

Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês). Em alguns casos os impactos das mudanças podem ser percebidos em fenômenos de redução populacional, isolamento pelo surgimento de matrizes entre habitats, e em outros casos podem abrir espaço para oportunistas generalistas que estão migrando enquanto acompanham o gradiente de mudança climática favorável a estes. Os cenários de mudanças climáticas afetam assim as populações através de impactos na fisiologia, comportamento, ou indiretamente através das interações bióticas (HELLMANN et al., 2008; GUTIERREZ; PONTI, 2014).

Devido ao que se chama conservadorismo de nicho ecológico ou climático (Niche Conservatism), o qual representa a tendência de uma espécie manter seu nicho ecológico ao longo do tempo sem alterações (WIENS; GRAHAM, 2005) se especula que frente as mudanças climáticas, espécies serão encontradas em ambientes cujas condições expressem as qualidades de seu nicho assim como no presente.

A modelagem de distribuição de espécies tem focado em espécies ameaçadas e em espécies invasoras de ecossistemas. Tanto a modelagem para ações de conservação quanto a modelagem preditiva para ocorrência de organismos invasores fazem uso das mesmas ferramentas, e cada mudança percebida no clima pode afetar ambos. Assim, a escolha do modelo deve refletir o objetivo do seu uso e está sujeita a disponibilidade de dados sobre os organismos (TONNANG et al., 2017).

O clima em mudança por efeito de ação antropogênica precisa de alguma forma ser entendido e previsto com precisão (GUTIERREZ; PONTI, 2014). As simulações para climas futuros são realizadas com base em diferentes cenários de mudança na emissão de gases do efeito estufa. As mais atuais, são experimentos de controle que utilizam a nova geração de cenários denominados de Representative Concentration Pathways (RCPs) os quais representam a força radiativa até o fim do século. O cenário mais pessimista prevê o crescimento da força radiativa que culminaria em $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP8,5) em 2100. Dois cenários que estabilizariam, um chegando a $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP4,5) antes de 2100 e outro chegando a 6 W.m^{-2} (RCP6,0) após 2100. Por último um cenário mais otimista onde o máximo de força radiativa ficaria em torno de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP2,6) antes de 2100 e declinando após isso. Em relação às concentrações equivalentes de CO_2 , os RCPs correspondem a 490, 650, 850 e 1370 ppm no final do século XXI, respectivamente (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011).

Estudos com objetivo de prever a distribuição potencial de espécies economicamente importantes têm sido realizados. Em um trabalho com objetivo de prever a distribuição futura da broca da manga no território indiano *Citripestis eutrapphera* (Meyrick, 1933) (Lepidoptera: Pyralidae) no qual foram utilizados os períodos de 2050 e 2070 nos cenários otimista (RCP 2,6) e pessimista (RCP 8,5) ambos originados no modelo HadGEM2-AO, os autores concluíram por meio dos resultados da modelagem que com mudanças nas condições climáticas, é provável que a praga se espalhe em outras grandes regiões de cultivo de manga do país, e há indicativos de que a "isotermalidade" e a "sazonalidade da temperatura" afetam significativamente a distribuição. Além disso, bolsões de cultivo de manga foram considerados moderadamente a altamente suscetíveis a ocorrência da broca em 2050 e 2070 (CHOUDHARY et al., 2019).

Outro estudo realizado na África com três espécies de insetos-praga propõe que a adequação para o estabelecimento de *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae), *Ceratitis cosyra* (Walker, 1849) (Diptera: Tephritidae) e *Bactrocera invadens* Drew, Tsuru & White, 2005 (Diptera: Tephritidae) irá aumentar no período de 2050 de acordo com os modelos GFDL, HadGEM-ES e MPI-ESM em todos os cenários de mudança, principalmente em áreas próximas aos locais cujas condições atuais já são favoráveis. (BIBER-FREUDENBERGER et al., 2016).

Com relação as moscas, outros tefritídeos ganham destaque em estudo onde foi realizada modelagem no CLIMEX, com projeção em cenários futuros para ocorrência das espécies *Anastrepha ludens* (Loew, 1873), *Anastrepha obliqua* (Macquart, 1835), *Bactrocera dorsalis* (Hendel, 1912), *Bactrocera correcta* (Bezzi, 1916), *Bactrocera latifrons* (Hendel, 1915), *Bactrocera tryoni* (Froggatt, 1897), *Bactrocera zonata* (Saunders, 1841), *Ceratitis capitata* (Wied., 1824), *Ceratitis rosa* Karsch, 1887, *Rhagoletis pomonella* (Walsh 1867), *Rhagoletis indifferens* Curran, 1932 e *Zeugodacus cucurbitae* (Coquillett, 1899). Os autores relatam que existem territórios que são mais propícios a receberem invasores, outros estão sujeitos a disseminar um tefritídeo invasivo e outros que apresentam ambas as características, no caso do sudeste asiático e da região australásica ambos os riscos estão presentes (HILL et al., 2016).

No presente estudo abordam-se as questões de ganho ou perda territorial na distribuição potencial da mosca e os resultados indicam que haverá ganho de áreas de média e alta adequabilidade para cenários de mudança climática, assim como já

existem atualmente condições para que a mosca possa se estabelecer em outras áreas fora de sua faixa nativa de ocorrência.

Capítulo 1 - Artigo 1

Artigo submetido ao Journal of Economic Entomology.

**Federal University of Pelotas, Institute
of Biology. Ecology, Zoology and
Genetics Department, Insect Ecology
Lab, 96010900 - Pelotas, RS - Brazil -
PO Box: 354
E-mail: flavio.garcia@ufpel.edu.br**

**Potential Global Distribution of the South American cucurbit fruit fly
Anastrepha grandis (Diptera: Tephritidae)**

Cristiano Machado Teixeira¹ and Flávio Roberto Mello Garcia^{1,2}

**¹ Postgraduate Program in Plant Health, Federal University of Pelotas –
UFPel.**

**² Postgraduate Program in Entomology, Federal University of Pelotas –
UFPel**

**Distribuição potencial global da mosca-das-abóboras *Anastrepha grandis*
(Diptera: Tephritidae)**

Cristiano Machado Teixeira¹ e Flávio Roberto Mello Garcia^{1,2}

crisakst@yahoo.com.br

¹ Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade Universidade Federal de Pelotas – UFPel

² Programa de Pós-Graduação em Entomologia Universidade Federal de Pelotas – UFPel

Resumo

A mosca-das-cucurbitáceas sul-americana ou mosca-das-abóboras *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846) (Diptera: Tephritidae) é considerada praga quarentenária em diversos países, e por esse motivo é necessário saber mais sobre questões relacionadas a sua capacidade de estabelecimento em novos territórios e acerca de seu nicho ecológico. O objetivo do estudo foi modelar a distribuição potencial de *A. grandis* no presente e discutir aspectos de seu nicho ecológico. A modelagem de distribuição da espécie foi realizada por meio do método de Entropia Máxima – Maxent, o qual evidenciou uma extensa área de adequabilidade ambiental em todos os continentes com climas tropicais e subtropicais. As principais variáveis preditoras para o estabelecimento de *A. grandis* foram temperatura média anual e pluviosidade. Desse modo, localidades em todo o mundo onde existem condições semelhantes

podem ser invadidas pela mosca, inclusive áreas onde a espécie é considerada como praga quarentenária como, por exemplo, no sul dos Estados Unidos.

Palavras-Chave: mosca-sul-americana-das-cucurbitáceas, praga quarentenária, adequabilidade ambiental

Abstract

The South American cucurbit fruit fly *Anastrepha grandis* (Macquart, 1846) (Diptera: Tephritidae) is considered a quarantine pest by several countries and, therefore, further knowledge about its ability to establish itself in new territories and its ecological niche are necessary. The goal of this study was to model the current potential distribution of *A. grandis* and discuss aspect of its ecological niche. The species distribution model was built using the Maximum Entropy method - Maxent, which showed an extensive environmental suitability area in all continents of tropical and subtropical climates. The main prediction variables for the *A. grandis* establishment were average annual temperature and pluviosity. Thus, worldwide locations sustaining similar conditions may be invaded by the fly, including areas where the pest is considered a quarantine pest such as, for instance, the south of United States.

Keywords: South American cucurbit fruit fly, quarantine pest, environmental suitability

Introdução

Anastrepha grandis (Macquart 1846) (Diptera: Tephritidae) é a mais importante mosca que infesta cucurbitáceas na América do Sul. Essa espécie está presente na maioria dos países sul americanos e no Panamá (Norrbom 1991, NAAPO 2009). Em sua área de ocorrência tem hospedeiros de diferentes gêneros de Cucurbitaceae e é de importância não apenas pelos danos causados aos frutos, mas por questões quarentenárias, uma vez que países importadores de cucurbitáceas evitam comprar produtos de áreas que não sejam livres da ocorrência de *A. grandis* como ocorre para uma porção relativamente grande do território brasileiro e demais países sul americanos (Norrbom 1991, Bolzan et al. 2015, Hallman et al. 2017).

Devido a isso, é necessário saber se *A. grandis* tem potencial para dispersar e se estabelecer em áreas onde ainda não ocorre. Para responder a este tipo de questão acerca da distribuição potencial de espécies, muitos estudos têm sido conduzidos lançando mão de ferramentas da modelagem e dos sistemas de georreferenciamento associados aos dados disponíveis de ausência e presença das espécies nos territórios alvo dos estudos (Pearson et al. 2007, Soberón 2010).

Dentre as ferramentas utilizadas estão algoritmos que computam registros de presença das espécies em um mapa, e utilizam dados de variáveis bióticas e abióticas para prever a ocorrência dentro de limites de corte relacionados a capacidade adaptativa da espécie com base em dados de ocorrência atuais e em estudos de biologia. Estes algoritmos estão inseridos no contexto dos modelos relacionados a inteligência artificial, como por exemplo o aprendizado de máquinas (Machine Learning) que é um subcampo da ciência da computação (Kearney e Porter 2009, Paglia et al. 2012, Evans et al. 2015).

O banco de dados que alimenta os modelos de distribuição de espécies pode ser gerado com base em registros disponíveis em sites especializados, através de coleções existentes em museus e através de artigos científicos da área de ecologia, taxonomia ou áreas relacionadas (Giannini et al. 2012, Paglia et al. 2012).

Vários estudos com outros tefritídeos têm sido realizados com o objetivo de prever a ocorrência global de espécies importantes do ponto de vista econômico. Em um destes, os pesquisadores utilizaram o Self Organising Map (SOM), ou mapa auto organizado, para classificar o risco de estabelecimento de várias espécies simultaneamente em diferentes territórios onde consideraram uma escala de 0 a 1. Dentre os insetos estudados *A. grandis* e *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett 1899), ambas possuem as cucurbitáceas como hospedeiros e estão presentes em climas tropicais e subtropicais embora sejam de regiões de origem diferentes. Nos resultados obtidos observa-se que *A. grandis* foi classificada como 0.51 para as chances de invadir e se estabelecer nos Estados Unidos, por outro lado na África do Sul o risco de estabelecimento é para *B. cucurbitae* que recebeu a classificação 0.55 (Qin et al.(2015).

Em outro trabalho com modelagem de distribuição de espécies realizado com foco na Europa, e utilizando Maxent e árvores de regressão impulsionadas (Boosted Regression Trees), foi modelada a distribuição potencial de seis espécies, dentre as quais *B. cucurbitae*, mas *A. grandis* não foi incluída. O estudo mostra áreas passíveis de invasão por *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann, 1830), *Anastrepha obliqua* (Macquart 1835), *B. cucurbitae*, *Bactrocera oleae* (Rossi 1790), *Ceratitis fasciventris* (Bezzi 1920) e *Rhagoletis pomonella* (Walsh 1867) de diferentes linhagens e todas apresentaram potencial invasivo na Europa com destaque para *R. pomonella* que tem potencial de grande distribuição (Godefroid et al. 2015).

Utilizando o CLIMEX, com o objetivo de prever áreas adequadas para o estabelecimento de *B. cucurbitae* e por meio de variáveis como temperatura e umidade do solo, foi realizado um estudo com o modelo de taxa de eclosão, no qual os pesquisadores verificaram a existência de uma área no sul da China que poderia variar de tamanho sazonalmente, em que as condições de estabelecimento da mosca estariam sujeitas a essa variação. Assim, mesmo em escala reduzida como regiões de países extensos como a China servindo de modelo, as projeções em escala global poderiam acompanhar os mesmos padrões de variação e adequabilidade para as espécies de moscas (Li et al. 2013).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi aplicar modelos de distribuição de espécies para prever a distribuição potencial de *A. grandis* com base nos dados obtidos confrontados com as variáveis ambientais limítrofes e através disso discutir sobre o nicho da espécie.

Material e métodos

Coleta e tratamento dos dados

Todos os registros disponíveis catalogados passaram por diferentes etapas de seleção para uso na construção dos modelos. Os registros foram obtidos por meio de publicações científicas de diversos periódicos através de busca pelas palavras-chave: mosca-sul-americana-das-cucurbitáceas, mosca-das-cucurbitáceas, mosca-das-abóboras, South American cucurbit fruit fly (CABI 2019, GBIF 2019). A primeira etapa de seleção consistiu em separar em dois grupos os registros de acordo com o ano da coleta dos espécimes, nesse sentido foram obtidos dois grupos um com registros realizados antes de 1950 e outro com registros feitos de 1951 até o presente. Os dados utilizados para modelagem foram os mais recentes pelo fato das camadas

bioclimáticas utilizadas para modelagem atual serem formadas com dados que abrangem os anos de 1950 até o ano 2000.

O segundo passo para seleção dos registros foi a rarefação dos pontos de ocorrência através da ferramenta Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMS do ArcGIS® por meio da qual os dados de ocorrência são selecionados de acordo com a distância entre si não podendo exceder a distância mínima de 10 km sendo descartados os registros que excedem este valor, evitando assim o viés amostral que poderia prejudicar a confiança nos resultados modelados. Todas as coordenadas geográficas foram transformadas em coordenadas decimais com tipo de projeção WGS1984. Para converter coordenadas no formato UTM ou graus, minutos e segundos em coordenadas decimais, foi utilizada a calculadora geográfica da Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www.dpi.inpe.br/calcula/>). A seleção de pontos não excluiu aqueles localizados em sede de municípios informados nas publicações pois os autores deste trabalho entendem que por se tratar de uma espécie que infesta plantas comumente cultivadas em pequenos espaços em quintais de residências da periferia de áreas urbanas, a ocorrência da mosca nesses ambientes não seria algo inadmissível, sendo, portanto, altamente provável.

Camadas ambientais

As camadas ambientais utilizadas foram obtidas através do WorldClim (<http://worldclim.org/>) na resolução espacial de 2.5min o que é equivalente a 5km por pixel e recomendado para modelagem ao nível continental (Giannini et al. 2012) e cortadas para a distribuição nativa da mosca e o raster obtido foi reamostrado no formato asc para leitura pelo MaxEnt 3.4.1 que só admite este formato de arquivo.

As camadas foram ainda selecionadas através da análise de componentes principais (PCA) para reduzir a auto correlação ambiental entre as variáveis ambientais e escolher quais camadas devem ser usadas nos modelos para diminuir a complexidade e o sobre ajuste (overfitting). Foi utilizada a ferramenta Remove Highly Correlated Variables do ArcGIS® que usa o Pearson's Correlation Coefficient (R) com a escolha de 0,7 de correlação máxima entre as camadas sendo removidas aquelas variáveis altamente correlacionadas.

Nesse sentido, a modelagem foi realizada com oito variáveis bioclimáticas. São elas: temperatura média anual (Bio1), amplitude média diurna (Bio2), isotermalidade (Bio3), precipitação no mês mais úmido (Bio13), precipitação no mês mais seco (Bio14), sazonalidade na precipitação (Bio15), precipitação no trimestre mais quente (Bio18) e precipitação no trimestre mais frio (Bio19).

Modelagem

Foi adotado o método de Entropia Máxima – Maxent (Phillips et al. 2006). Os conjuntos de dados foram divididos em treino e teste para se realizar a modelagem com 70% dos dados para treino e 30% para teste. Foi utilizado o total de 5000 iterações e 100 réplicas. Utilizou-se a técnica de “bootstrap” para gerar diferentes conjuntos de dados. Esta técnica envolve a partição dos dados aleatoriamente, com reposição, em vários conjuntos de treino e teste. Em conjunto com essa técnica de validação foi utilizado o “Jackknife” para ranquear a importância das variáveis na construção dos modelos (Giannini et al. 2012). O limite de corte adotado foi o Minimum Training Presence Logistic Threshold (MTP), pois o interesse é avaliar o potencial invasivo de *A. grandis* (maiores áreas de sobreprevisão) e aumentar o conhecimento sobre o nicho da espécie. Depois de estabelecido o limite de corte, foram utilizadas

as curvas características de operação (ROC), e o cálculo da área sob a curva (AUC) para avaliar o desempenho do modelo (Giannini et al. 2012).

Resultados

Na literatura foram encontrados 87 pontos de ocorrência, destes 66 são atuais, ou seja, são posteriores a 1950. Após a rarefação, que consiste na eliminação de pontos muito próximos com menos de 10 km entre si, restaram 55 pontos que foram utilizados para a modelagem (Figura 1).

Foram utilizados pelo Maxent 39 pontos de ocorrência para criar o modelo e 16 pontos para validar o modelo. O limite de corte obtido (MTP) foi de 0,0985. Os percentuais de participação das variáveis abióticas mais importantes para a construção dos modelos foram: Bio1 com 41,0%, Bio13 21,6%, Bio3 15,0%, Bio14 10.1%, Bio15 5,1%, Bio18 4,6%, Bio2 1,4% e Bio19 com 1,2%.

Por meio do teste de Jackknife se pode observar a importância de cada variável abiótica para a construção dos modelos, sendo que a variável com maior ganho foi a temperatura anual média com valor em torno de 20,5 °C relacionada a maior probabilidade de ocorrência da mosca (Figura 2). A segunda mais importante foi a precipitação no mês mais úmido (Figura 3), e maior probabilidade de ocorrência de *A. grandis*, segundo os modelos gerados, está condicionada a uma precipitação em torno de 235 mm no mês mais úmido. Juntas as duas variáveis somam mais de 62% de participação na construção dos modelos.

A avaliação dos modelos pôde ser realizada de acordo com a área sob a curva (AUC) a qual foi de 0.965. O mapa gerado através dos modelos construídos pelo algoritmo Maxent (Figura 4) evidencia áreas de adequabilidade em todos os continentes.

Na América do Sul as áreas favoráveis estão presentes, em sua maioria, distribuídas no bioma de floresta tropical, na Colômbia, Venezuela, Equador, Peru, Guiana, Suriname, Bolívia, Paraguai, Uruguai, nordeste e noroeste da Argentina, centro e sul do Chile. No Brasil as áreas estão principalmente nas regiões centro oeste, sudeste e sul. No caso dos biomas brasileiros, áreas de cerrado e pampa também estão incluídas.

Na América Central existe adequabilidade ambiental em áreas do bioma de floresta tropical e na América do Norte em áreas de floresta temperada, principalmente no sul e sudeste. No México em áreas que podem estar contidas em bioma de floresta tropical ou mesmo em bioma de campos e isso se repete em boa parte das áreas previstas nos demais territórios.

As áreas favoráveis na Europa localizam-se principalmente ao norte de Portugal e noroeste da Espanha. Nestes dois países predomina o bioma chaparral, mas as áreas favoráveis estão contidas em pontos onde a floresta temperada está presente.

Na África subsaariana o maior volume de áreas adequadas estão contidas em bioma de floresta tropical e de savana. Na Ásia e Oceania estão presentes em áreas de floresta tropical e em territórios como Austrália principalmente nas regiões costeiras.

Discussão

A mosca-das-abóboras tem potencial de invadir e se estabelecer em áreas distribuídas em todos os continentes tendo como principais fatores limitantes a temperatura anual média e a precipitação no mês mais úmido, a expressão de seu nicho indica áreas de maior adequabilidade em biomas de floresta tropical ou

temperada. A modelagem de distribuição de espécies realizada para *A. grandis* evidencia áreas no sul dos Estados Unidos com adequabilidade para o estabelecimento da mosca. Em trabalho realizado em 2015 (Qin et al. 2015), *A. grandis* foi classificada com índice de 0.51 para as chances de invadir e se estabelecer nos Estados Unidos.

Uma grande parte das ocorrências está em áreas de média ou baixa adequabilidade ambiental, com classificações de Köppen-Geiger que variam de Af, Aw, Cwb, Cfa e Cfb (Beck et al. 2018). Desse modo, áreas onde a mosca ainda não está presente como nas regiões dos Estados Unidos onde o bioma predominante é de floresta temperada, podem ser facilmente invadidas pois possuem condições semelhantes ou até melhores do que as experimentadas pela mosca em sua distribuição nativa na América do Sul em que predomina o bioma de floresta tropical e o clima é classificado como Cfa (Beck et al 2018). Isso porque na área de ocorrência da mosca uma parte dos registros foi realizada em pontos mais temperados desse bioma (Norrbom 1991, Garcia e Corseuil 1998, Bortoli et al. 2016).

É importante fazer esta relação pois *A. grandis* representa risco se introduzida no sul do Texas ou na Flórida (Weems 1990), sendo que a Flórida apresenta condições favoráveis ao seu estabelecimento em quase toda a sua extensão territorial. Lugares como Lihue no Havaí podem oferecer climas adequados em territórios pequenos de fácil colonização.

Em regiões próximas ao mediterrâneo como em Portugal e Espanha na Europa onde o bioma de chaparral está presente, mas existem áreas de floresta temperada, as condições climáticas permitem o estabelecimento da mosca. Muitos países subsaarianos, assim como do sudeste asiático e Oceania, possuem bioma de floresta tropical e são igualmente adequados. Entretanto a mosca não parece se comportar

bem em climas quentes ou frios de estepes e desertos, além de locais com ocorrência de neve ainda que ocorram verões quentes como os climas de classificação D (Beck et al. 2018).

Regiões mais áridas do território de origem da espécie na América do Sul não parecem ser favoráveis a mosca, pois não se tem registros de ocorrência em áreas áridas ou semi-áridas. Vários trabalhos de levantamento faunístico na região do semiárido do Rio Grande do Norte tem evidenciado a ausência de sinais da presença de *A. grandis* naqueles ecossistemas, o que corrobora com o que é proposto neste estudo (Araújo et al. 2005).

O fato da segunda variável abiótica mais importante ser a precipitação no mês mais úmido indica a importância da pluviosidade para o estabelecimento da espécie. Mesmo no período mais úmido no semiárido, no mês de março, a maior precipitação média registrada é de 133,7 mm (Moura et al. 2007), e a curva resposta a variável pluviométrica indica que maior probabilidade de ocorrência da espécie está condicionada a uma precipitação média de 235 mm.

No Brasil os modelos gerados indicam uma área de adequabilidade ambiental situada na região oeste do estado de Santa Catarina que segundo Köppen-Geiger é considerado Cfa assim como a maior parte do sul do Brasil (Beck et al. 2018).

Segundo estudos de levantamento faunístico em Santa Catarina, *A. grandis* foi considerada com rara abundância, pouco frequente, de constância acidental e não dominante em pomar de citrus. Pois o foco do estudo não era *A. grandis* e o levantamento não foi em cultivo do hospedeiro preferencial (Zilli e Garcia 2010). Em outro estudo, algo diferente foi encontrado no município de Dionísio Cerqueira onde *A. grandis* foi muito abundante, muito frequente, acessória e dominante (Garcia e Lara 2006).

Ainda nessa região vários estudos têm reportado a ocorrência da mosca (Garcia et al. 2003, Garcia e Norrbom 2011, Alberti et al. 2012). Segundo registro realizado em Iraceminha, os níveis populacionais de *A. grandis* mantiveram-se mais elevados durante os primeiros cinco meses do estudo, sendo que seu pico populacional ocorreu no mês de junho (Alberti et al. 2012). Nesses casos se percebe que não apenas o registro corrobora com os modelos gerados mas também o fato de que em uma área de alta adequabilidade os níveis populacionais da espécie tendem a ser mais expressivos e a mosca chega a ser dominante em uma área ainda que o registro não tenha sido realizado em cultivo de hospedeiro preferencial.

Em outro trabalho com modelagem de distribuição de espécies realizado com foco na Europa e utilizando Maxent e árvores de regressão impulsionadas (Boosted Regression Trees), foi modelada a distribuição potencial de seis espécies dentre as quais *B. cucurbitae*, mas *A. grandis* não foi incluída (Godefroid et al. 2015). Na projeção de distribuição potencial de *B. cucurbitae* foi observado áreas em comum com o que foi modelado para *A. grandis* no presente estudo, como áreas em Portugal por exemplo. Nesse sentido não se pode prever até o momento se ambas as espécies poderiam coexistir competindo pelo mesmo nicho nesses territórios, nem foi o objetivo do presente estudo, mas as condições de adequabilidade ambiental poderiam favorecer uma ou outra se acaso além de fazerem uso da mesma variedade de hospedeiros também forem suscetíveis as mesmas condições ambientais.

Nas regiões de Braga, Gondomar e Porto no norte de Portugal existem áreas onde o estabelecimento da mosca é possível uma vez que introduzida e considerando-se as variáveis abióticas presentes, e como foi mencionado, também evidenciam para *B. cucurbitae* os mesmos territórios favoráveis (Godefroid et al. 2015).

A África do Sul é suscetível ao estabelecimento de *B. cucurbitae* e nos modelos gerados para *A. grandis* as áreas favoráveis para as duas espécies coincidem (Qin et al. 2015). Considerando-se que *A. grandis* possa se estabelecer em áreas também favoráveis a *B. cucurbitae*, resultados de modelagem para *B. cucurbitae* podem servir de comparação na discussão dos resultados obtidos.

Outras áreas de adequabilidade estão concentradas na África central onde localidades apresentam climas Af e Am o que também ocorre na distribuição original da espécie.

Na Ásia e Oceania, essas áreas favoráveis integram territórios da Indonésia, Malásia e Papua Nova Guiné. Na Indonésia as áreas se concentram na Sumatra do Norte onde predominam os climas Af e Cfb. Sulawesi do Norte (Af), Molucas do Norte (Af, Am) e em Papua onde há maior variabilidade de climas, sendo que áreas favoráveis estão mais no centro do território. Na Malásia pequenas áreas ocorrem em Ranau, Kinabatangan, Lahad Datu, Tawau e Keningau com clima Af. Nas Filipinas somente no sul em uma pequena porção de Davao do Sul nas localidades de Don Marcelino e Jose Abad Santos onde predomina o clima Af.

Na China, segundo maior mercado consumidor atualmente, áreas favoráveis ocorrem no sul e sudeste do país como por exemplo em Ganzhou, Guangzhou e Wenzhou (Cfa). Em trabalho realizado utilizando um modelo de taxa de eclosão com o objetivo de prever áreas adequadas para o estabelecimento de *B. cucurbitae* e utilizando variáveis como temperatura e umidade do solo, os pesquisadores anunciaram uma área no sul da China que variava de tamanho sazonalmente onde as condições permitiriam o estabelecimento da mosca (Li et al. 2013), tais áreas coincidem com o proposto neste trabalho para *A. grandis* e podem estar relacionadas

com os achados do mesmo ainda que tais variáveis não tenham sido utilizadas no presente trabalho.

Na Austrália onde as introduções acidentais ou voluntárias no passado, são constante foco de preocupação para as autoridades locais, áreas favoráveis estão presentes e são semelhantes ao que ocorre na América do Sul. A maior parte das áreas está na costa leste do país em localidades como Sydney, New Castle, Bellingen e muitas outras. Na costa oeste se concentram no sudoeste como por exemplo em Bunbury, Mandurah, Busselton e Armadale, também na costa oeste da Tasmânia em Wynyard e Burnie (Cfb).

Em arquipélagos se percebe que praticamente toda a Nova Caledônia representa áreas de adequabilidade assim como as três ilhas do sul de Vanuatu e pequenas porções de Fiji. Na Nova Zelândia as maiores áreas se concentram na ilha do norte com algumas porções da ilha do sul favoráveis. Na ilha do norte Whakatane, Waitomo e Whangarei são alguns exemplos e a predominância é para o clima Cfb.

Trata-se de uma espécie que se adapta em climas tropicais e subtropicais, sendo que a tolerância ao frio pode ser um fator que possibilite seu estabelecimento em baixas populações ao longo de um gradiente ambiental em direção a zonas climáticas menos favoráveis e ao passo que mudanças climáticas se tornem cada vez mais consistentes, áreas de maior adequabilidade ambiental podem surgir.

Foi registrado em pesquisa recente (Hallman et al. 2017) que o estágio larval de maior tolerância ao frio (1,0 °C) quando no interior de frutos foi o terceiro instar, e os autores relatam que seria necessário um tempo de 23 dias para um tratamento fitossanitário adequado, isso sugere que se a mosca consegue sobreviver em temperaturas baixas em uma época do ano menos favorável, pode haver possibilidades de se estabelecer em áreas de baixa adequabilidade ambiental como

foi evidenciado nos modelos gerados no presente estudo. É verdade que essa abordagem com base em condições simuladas em laboratório não pode explicar satisfatoriamente a realidade do que ocorre no meio em que a espécie está inserida, com variações de microclimas e interações intra e interespecíficas, no entanto, podem ser informações uteis para ajudar a descrever os modelos gerados. Em Pinto Bandeira a menor temperatura do ano pode chegar a 9°C e em Dionísio Cerqueira chega a 5,6°C e embora haja geadas que façam a temperatura cair abaixo deste limiar, larvas no interior de um fruto poderiam tolerar tais condições por vários dias reduzindo a velocidade de seu desenvolvimento, mas não inviabilizando seu potencial estabelecimento.

Nos trabalhos realizados com foco na biologia da mosca, foram testadas temperaturas diferentes, mas a média de 25°C parece ser a que melhor proporcionaria o desenvolvimento da mosca (Silva e Malavasi 1996, Bolzan et al. 2017). Entretanto, de acordo com as curvas respostas obtidas, uma temperatura mais baixa pode contribuir para o sucesso da mosca, que pode se estabelecer em áreas naturais que ofereçam uma média de 20,5 °C ao longo do ano.

É interessante notar que o registro realizado em Iraceminha onde os níveis populacionais da mosca tiveram seu pico no mês de junho é precisamente a época do ano em que as temperaturas estão diminuindo (Alberti et al. 2012). Além disso na localidade de Dionísio Cerqueira a mosca foi considerada mais abundante, constante, frequente e dominante, podendo ser considerada como predominante pelos autores (Garcia e Lara 2006), justamente em um dos locais onde as temperaturas mínimas são as mais baixas, isso mostra que a tolerância de populações selvagens da espécie podem ter a expressão do seu nicho ecológico maior até do que o estimado até o momento.

Assume-se nesse estudo que o nicho da espécie em questão seja em parte elucidado pela modelagem de distribuição sendo este um nicho fundamental, considerando-se que a modelagem elucidada através de alguns elementos as áreas prováveis de expressão do nicho da espécie através de sua presença e condições adequadas ou mesmo a sua ausência quando as condições se mantem adequadas mas há um limite de dispersão qualquer que não tenha permitido até o momento sua ocorrência. Concordando com Soberón (2007) trata-se de um subespaço de condições para a ocorrência da espécie ainda que não haja registro até o momento.

A totalidade da área ocupada atualmente por *A. grandis* não é conhecida, mas de acordo com os modelos produzidos se prediz uma área potencial de ocorrência de 11.463.595,80 km² e este dado pode ser útil em um trabalho a *posteriori* com efeito das mudanças climáticas sobre o tamanho da área de distribuição potencial da mosca.

Conclusões

Os modelos gerados para *A. grandis* podem prever sua distribuição potencial atual e mostram o potencial invasivo da mosca em territórios onde ela é considerada praga quarentenária. Os resultados permitem vislumbrar características do nicho fundamental da mosca e revelam a sua potencial amplitude dentro de uma grande faixa de condições favoráveis sendo as principais variáveis preditoras a temperatura média anual e a precipitação no mês mais úmido, tendo nos biomas de floresta tropical e floresta temperada a maior parte das áreas de adequabilidade ambiental potencial.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado do primeiro autor e ao Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de produtividade em Pesquisa do segundo autor.

Referencias

Alberti, S., Bogus, G. M. e Garcia, F. R. M. 2012. Flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomares de pessegueiro e maracujazeiro em Iraceminha, Santa Catarina. *Biotemas*. 25 (1): 53-58.

Araújo, E. L., Medeiros, M. K. M., Silva, V. E e Zucchi, R. A. 2005. Moscas-das-Frutas (Diptera: Tephritidae) no Semi-Árido do Rio Grande do Norte: Plantas Hospedeiras e Índices de Infestação. *Neotropical Entomology*. 34 (6): 889-894.

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., Mcvigar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A. e Wood, E. F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific*. 5 (180214): 1-12.

Bolzan, A., Nava, D.E., Garcia, F. R. M., Valgas, R. A. e Smaniotto, G. 2015. Biology of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) in different Cucurbits. *Journal of Economic Entomology*. 108 (3): 1034–1039.

Bolzan, A., Nava, D.E., Smaniotto, G., Valgas, R. A. e Garcia, F. R. M. 2017. Development of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) under constant temperatures and field validation of a laboratory model for temperature requirements. *Crop Protection*. 100 (1): 38-44.

Bortoli, L. C., Machota Jr, R., Garcia, F. R. M. e Botton, M. 2016. Evaluation of Food Lures for Fruit Flies (Diptera: Tephritidae) Captured in a Citrus Orchard of the Serra Gaúcha. *Florida Entomologist*. 99 (3): 381-384.

CABI, 2019. *Anastrepha grandis*. In: Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CAB International. www.cabi.org/isc.

Evans, T. G., Diamond, S. E. e Kelly, M. W. 2015. Mechanistic species distribution modelling as a link between physiology and conservation. *Conservation Physiology*. 3: 1-16.

Garcia, F. R. M. e Corseiul, E. 1998. Análise faunística de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomares de pessegueiro em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Zoologia*. 15(4): 1111 -1117.

Garcia, F. R. M. e Lara, D. B. 2006. Análise faunística e flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomar cítrico no município de Dionísio Cerqueira, Santa Catarina. *Biotemas*. 19(3): 65-70.

Garcia, F. R. M. e Norrbom, A. L. 2011. Tephritoid Flies (Diptera, Tephritoidea) and Their Plant Hosts from the State of Santa Catarina in Southern Brazil. *Florida Entomologist*. 94(2):151-157.

Garcia, F. R. M., Campos, J. V. e Corseiul, E. 2003. Análise faunística de espécies de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) na região oeste de Santa Catarina. *Neotropical Entomology*. 32 (3): 421-426.

GBIF, 2019. GBIF Home Page. Disponível em: <https://www.gbif.org> [08 de setembro de 2018].

Giannini; T, C., Siqueira, M. F., Acosta; A. L., Barreto, F. C. C., Saraiva, A. M. e Alves-Dos-Santos, I. 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição

de espécies/ Current challenges of species distribution predictive modelling.

Rodriguésia. 63(3): 733-749.

Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J-P e Rasplus J-Y. 2015. Assessing the Risk of Invasion by Tephritid Fruit Flies: Intraspecific Divergence Matters. PLoS ONE. 10(8): e0135209. doi:10.1371/journal.pone.0135209

Hallman, G. J., Maset, B. A., Martínez, E. I. C., Barrios, C. E. C., Vreysen, M. J. B., Myers, S. W. e Wornoyayporn, V. 2017. Phytosanitary cold treatment against *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae). Florida Entomologist. 100(1): 29-31.

Kearney, M. e Porter, W. 2009. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species ranges. Ecology Letters. 12: 1–17.

Li, Z., Wang, N., Wu, J., Stauffer, J. R. e Li, Z. 2013. The Potential Geographical Distribution of *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae) in China Based on Eclosion Rate Model and ArcGIS. Computer and Computing Technologies in Agriculture. 1: 334–342.

Moura, M.S.B. de; Galvincto, J.D.; Brito, L.T. de L.; Souza, L.S.B. de; Sá, I.I.S.; Silva, T.G.F. da. Clima e água de chuva no semi-árido. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. p.37-59.

NAAPO. Phytosanitary Alert System. Outbreak of *Anastrepha grandis* (South American cucurbit fruit fly) in Panama. 2009. Disponível em:

<<http://www.pestalert.org/viewNewsAlert.cfm?naid=76>>. [08 de setembro de 2018].

- Norrbom, A. L. 1991. The species of *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) with a grandis-type wing pattern. Proceedings of the Entomological Society of Washington. 93 (1): 101-124.
- Paglia, A. P., Rezende, D. T., Koch, I., Kortz, A. R. e Donatti, C. 2012. Modelos de Distribuição de Espécies em Estratégias para a Conservação da Biodiversidade e para Adaptação Baseada em Ecossistemas Frente a Mudanças Climáticas/ Species Distribution Models (SDM) in Biodiversity Conservation Strategies and Climate Change Ecosystem Based Adaptation. Natureza & Conservação.10(2): 231-234.
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. e Peterson, A. T. 2007. Predicting species' distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography. 34: 102-117.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P. e Schapire, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling. 190(3-4): 231-259.
- Qin, Y., Paini, Dr., Wang, C., Fang, Y., Li, Z. 2015. Global Establishment Risk of Economically Important Fruit Fly Species (Tephritidae). PLoS ONE. 10(1): e0116424. doi:10.1371/journal.pone.0116424
- Silva, J. G. e Malvasi, A. 1996. Life cycle of *Anastrepha grandis*, pp. 347-355. In: McPherson, B. A. e Steck, G. J. (eds.), Fruit fly pests: a world assessment of their biology and management. St. Lucie Press, Delray Beach.
- Soberón, J. 2007. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. Ecology Letters. 10(12):1115-1123.

Soberón, J. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*. 33(1): 159-167.

Weems, H. V. Jr. 1990. *Anastrepha grandis* (Macquart) (Diptera: Tephritidae). Entomology Circular nº 334. Taxonomic Entomologist, Div.Plant.Ind. Gainesville, FL.

Zilli, G. e Garcia, F. R. M. 2010. Análise faunística e flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomar de *Citrus sinensis* no município de Chapecó, Santa Catarina. *Biodiversidade Pampeana*. 8(1): 39-45.

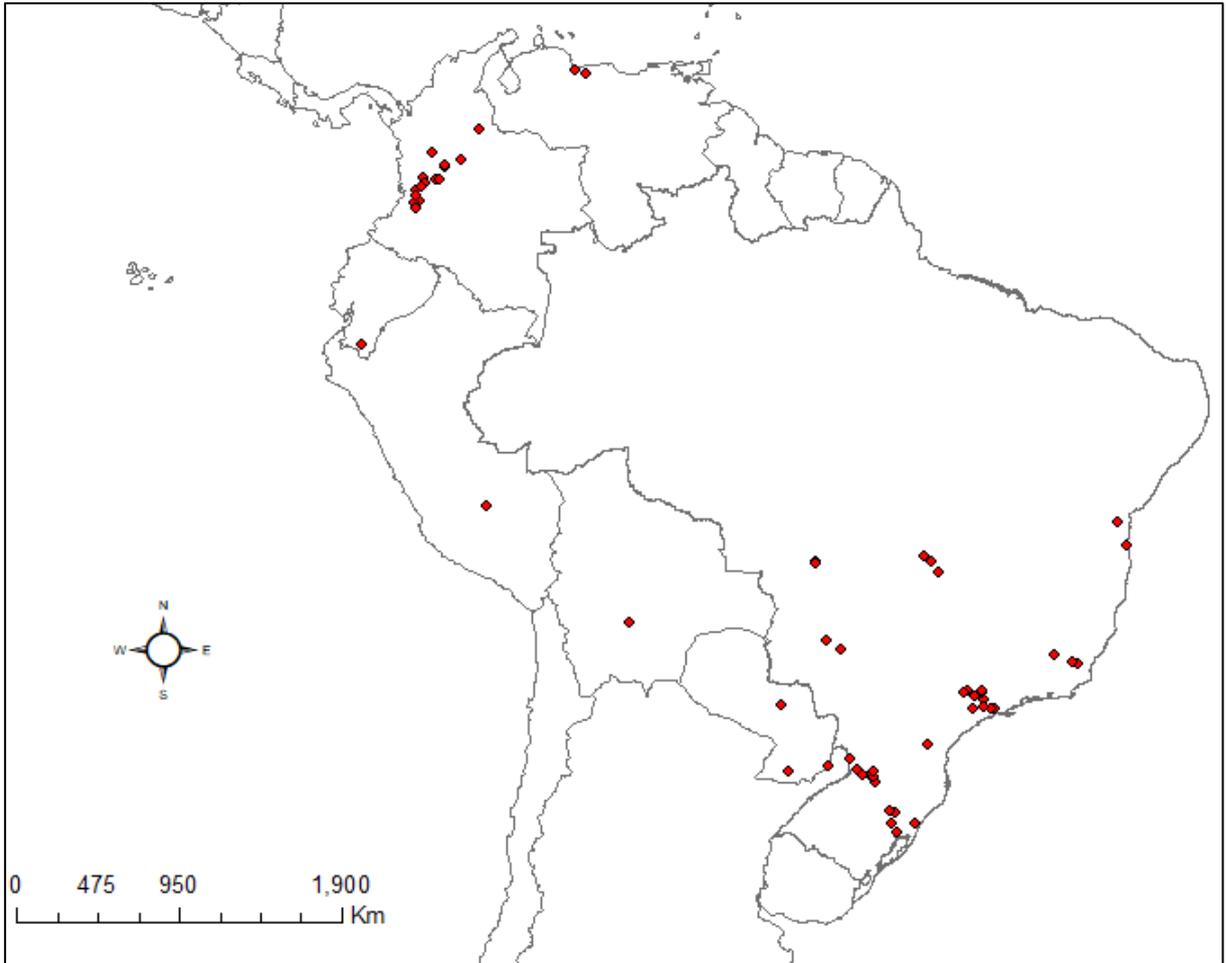


Figura 1 - Pontos de ocorrência de *Anastrepha grandis* de acordo com registros em artigos científicos.

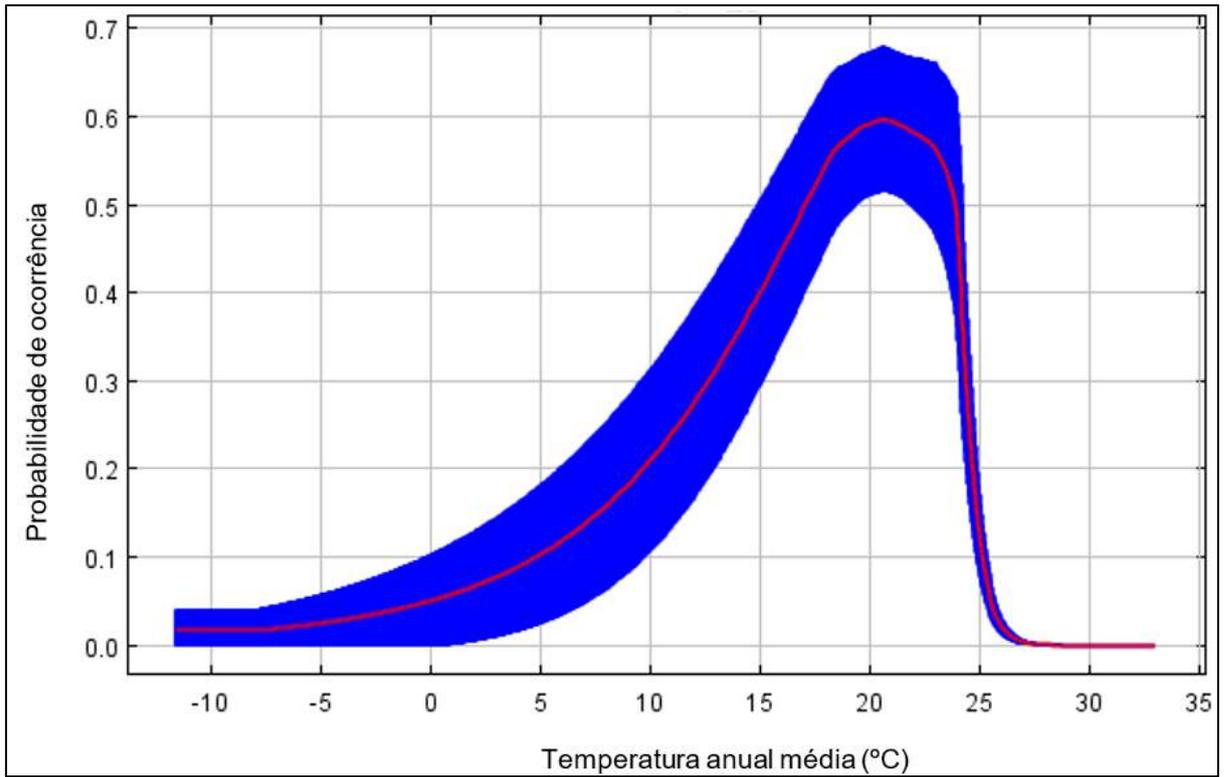


Figura 2. Resposta de *Anastrepha grandis* a variável abiótica bio1 (Temperatura anual média). As curvas mostram a resposta média (vermelho) e a média +/- um desvio padrão (azul) das 100 réplicas executadas pelo Maxent.

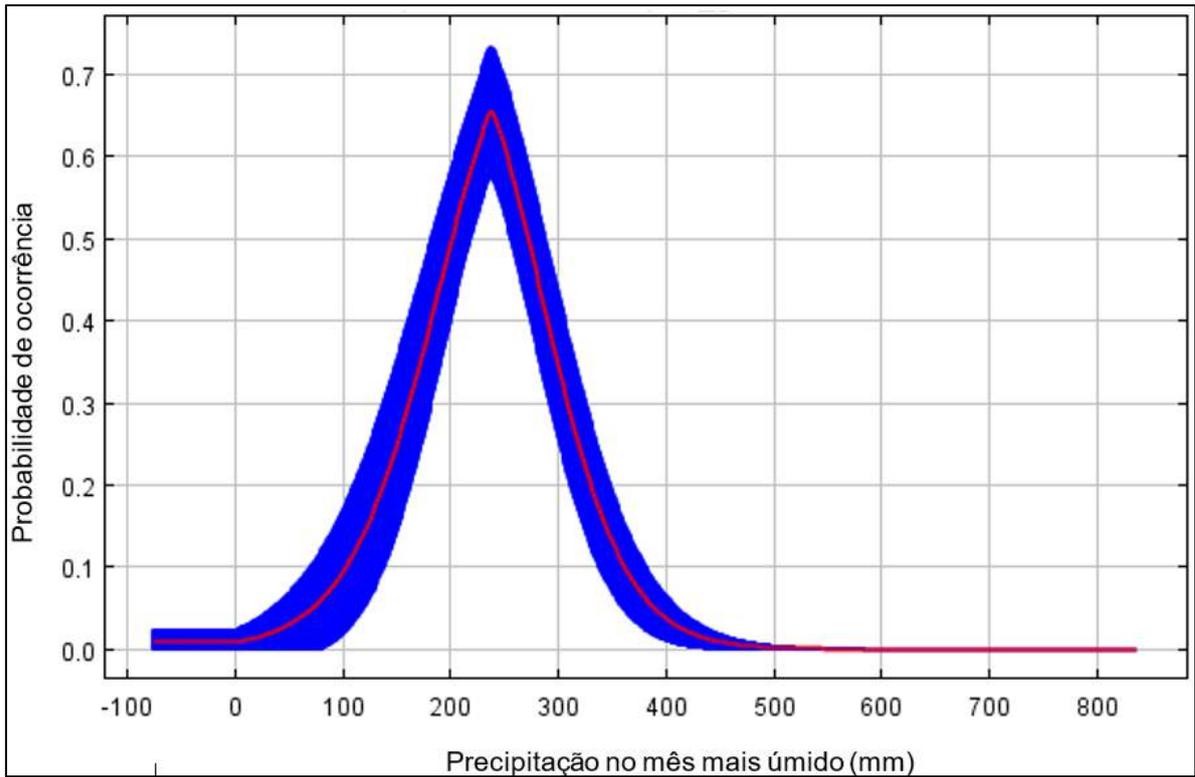


Figura 3. Resposta de *Anastrepha grandis* a variável abiótica bio13 (precipitação no mês mais úmido). As curvas mostram a resposta média (vermelho) e a média +/- um desvio padrão (azul) das 100 réplicas executadas pelo Maxent.

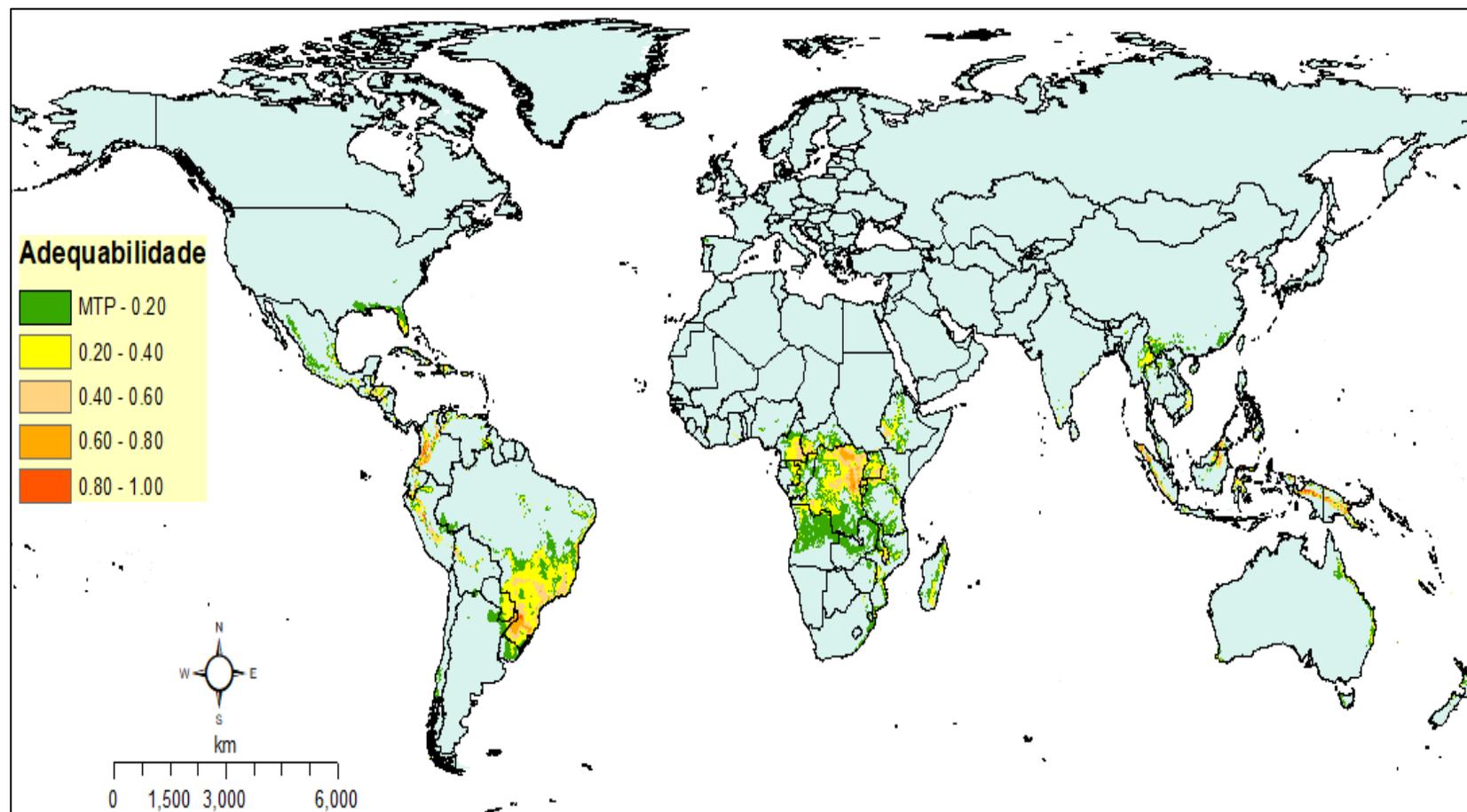


Figura 4 - Mapa de distribuição potencial de *Anastrepha grandis* gerado pelo algoritmo Maxent. Em destaque diferentes níveis de adequabilidade ambiental acima do limite de corte mínimo (MTP).

Capítulo 2 -Artigo 2

Artigo submetido ao Anais da Academia Brasileira de Ciências.

**Potential Global distribution of *Anastrepha grandis* (Diptera, Tephritidae) under
climate change scenarios**

Cristiano Machado Teixeira¹ and Flávio Roberto Mello Garcia^{1,2}

¹ Postgraduate Program in Plant Health, Federal University of Pelotas – UFPel

² Postgraduate Program in Entomology, Federal University of Pelotas – UFPel

Federal University of Pelotas, Institute of Biology. Ecology, Zoology and Genetics
Department, Insect Ecology Lab, 96010900 - Pelotas, RS - Brazil - PO Box: 354

Keywords: South American cucurbit fruit fly, environmental suitability, invasions,
pest

Potential distribution of *Anastrepha grandis*

Agrarian Sciences

Cristiano Machado Teixeira

Phone: +55 53 984299308

E-mail: crisakst@yahoo.com.br

**Distribuição potencial global da mosca-da-abóbora *Anastrepha grandis*
(Diptera, Tephritidae) frente aos cenários de mudanças climáticas**

Cristiano Machado Teixeira¹ e Flávio Roberto Mello Garcia^{1,2}

crisakst@yahoo.com.br

**¹ Programa Pós-Graduação em Fitossanidade Universidade Federal de Pelotas
– UFPel**

**² Programa de Pós-Graduação em Entomologia Universidade Federal de Pelotas
– UFPel**

Resumo

A mosca-da-abóbora *Anastrepha grandis* (Diptera, Tephritidae) tem sua distribuição atual restrita a América do Sul e Central. Entretanto, é considerada praga quarentenária e sua presença na forma de larvas ou ovos no interior de frutos é altamente indesejada em exportações para territórios que oferecem condições ao seu estabelecimento. De acordo com estudos recentes, mudanças nas condições climáticas podem contribuir para uma maior expansão nas áreas de ocorrências de alguns insetos devido a redução do estresse pelo frio que ainda impede a colonização

de muitas áreas. Nesse estudo objetivou-se por meio de modelagem preditiva responder à questão que envolve o potencial de distribuição da mosca das cucurbitáceas frente as mudanças climáticas, utilizando dois modelos de circulação global HadGEM2-ES e Miroc5 em quatro cenários de mudança que representam simulações sobre a força radiativa em $2,6 \text{ W.m}^{-2}$, $4,5 \text{ W.m}^{-2}$, 6 W.m^{-2} e $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ até o ano de 2100. Todos os cenários testados fornecem condições de adequabilidade ambiental para o estabelecimento da mosca em outros continentes, principalmente em regiões do centro da África, sudeste asiático e região australásica. Além disso, as áreas de média e baixa adequabilidade previstas em todos os cenários futuros serão maiores do que as métricas atuais e a mosca se beneficiará das mudanças climáticas com aumento nas áreas de adequabilidade ambiental cada vez mais em direção aos polos.

Palavras-Chave: mosca-das-cucurbitáceas, adequabilidade ambiental, invasões, praga

Abstract

The South American cucurbit fruit fly *Anastrepha grandis* (Diptera, Tephritidae) current distribution is restricted to South and Central America. However, it is considered a quarantine pest and its presence in larval or ova form within fruits is highly unwanted in exports to territories that offer conditions for its establishment. According to recent studies, changes in climate conditions may contribute to a larger expansion in areas of occurrence of some insects due to reduction of cold induced stress, which still prevents colonization of many areas. By means of predictive modeling, this study aimed to answer the question regarding the potential distribution of the South American cucurbit fruit fly under climate change, using two global circulation models – HadGEM2-ES and

Miroc5 – in four change scenarios representing simulations of radiative force at 2.6 W.m⁻², 4.5 W.m⁻², 6 W.m⁻² and 8.5 W.m⁻² until the year 2100. All tested scenarios supply environmental suitability conditions for the establishment of the fly in other continents, especially at regions of central Africa, southeast Asia and Australasian territories. Furthermore, areas of medium and low suitability predicted in all future scenarios are larger than current metrics and the fly will benefit of climate change, as environmental suitability areas move forward towards the poles.

Keywords: cucurbit fly, environmental suitability, invasion, pest

Introdução

Toda mudança quando ocorre num contexto microclimático pode significar ajustes no modo de vida dos organismos, nesse sentido seria de se esperar o mesmo para um quadro de mudança a níveis globais como o que propõe o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Os impactos das mudanças podem ser percebidos em fenômenos de redução populacional, isolamento pelo surgimento de matrizes entre habitats, e podem abrir espaço para oportunistas generalistas que estão migrando enquanto acompanham o gradiente de mudança climática favorável a estes. Os cenários de mudanças climáticas afetam assim as populações através de impactos na fisiologia, comportamento ou indiretamente através das interações bióticas (Hellmann et al. 2008, Gutierrez e Ponti 2014).

Devido ao que se chama conservadorismo de nicho ecológico ou climático (Niche Conservatism), o qual representa a tendência de uma espécie manter seu nicho ecológico ao longo do tempo sem alterações (Wiens e Graham 2005) se especula que frente as mudanças climáticas, espécies serão encontradas em ambientes cujas condições expressem as qualidades de seu nicho assim como no presente.

A modelagem de distribuição de espécies tem focado em espécies ameaçadas e em espécies invasoras de ecossistemas. Tanto a modelagem para ações de conservação quanto a modelagem preditiva para ocorrência de organismos invasores fazem uso das mesmas ferramentas e cada mudança percebida no clima pode afetar ambos. Assim, a escolha do modelo deve refletir o objetivo do seu uso e está sujeita a disponibilidade de dados sobre os organismos (Tonnang et al. 2017).

O clima em mudança por efeito de ação antropogênica precisa de alguma forma ser entendido e previsto com precisão (Gutierrez e Ponti 2014). As simulações para

climas futuros são realizadas com base em diferentes cenários de mudança na emissão de gases do efeito estufa. As mais atuais, são experimentos de controle que utilizam a nova geração de cenários denominados de Representative Concentration Pathways (RCPs) os quais representam a força radiativa até o fim do século. O cenário mais pessimista prevê o crescimento da força radiativa que culminaria em $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP8,5) em 2100. Dois cenários que estabilizariam, um chegando a $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP4,5) antes de 2100 e outro chegando a 6 W.m^{-2} (RCP6,0) após 2100. Por último um cenário mais otimista onde o máximo de força radiativa ficaria em torno de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ (RCP2,6) antes de 2100 e declinando após isso. Em relação às concentrações equivalentes de CO_2 , os RCPs correspondem a 490, 650, 850 e 1370 ppm no final do século XXI, respectivamente (Moss et al. 2010, Van Vuuren et al. 2011).

As moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae), *Ceratitis cosyra* (Walker 1849) e *Bactrocera invadens* Drew, Tsuru & White 2005 poderão ter sua distribuição aumentada devido ao aumento das áreas de adequabilidade ambiental no período de 2050 de acordo com os modelos GFDL, HadGEM-ES e MPI-ESM em todos os cenários de mudança, principalmente em áreas próximas aos locais cujas condições atuais já são favoráveis. (Biber-Freudenberger et al. 2016).

Outros tefritídeos ganham destaque no estudo realizado com modelagem no CLIMEX, em que são testadas projeções em cenários futuros para ocorrência de *Anastrepha ludens* (Loew 1873), *Anastrepha obliqua* (Macquart 1835), *Bactrocera dorsalis* (Hendel 1912), *Bactrocera correcta* (Bezzi 1916), *Bactrocera latifrons* (Hendel 1915), *Bactrocera tryoni* (Froggatt 1897), *Bactrocera zonata* (Saunders 1841), *Ceratitis capitata* (Wied. 1824), *Ceratitis rosa* Karsch 1887, *Rhagoletis pomonella* (Walsh 1867), *Rhagoletis indifferens* Curran 1932 e *Zeugodacus cucurbitae* (Coquillett 1899). Os autores relatam que existem territórios que são mais propícios a receberem

invasores, outros estão sujeitos a disseminar um tefritídeo invasivo e outros que apresentam ambas as características, no caso do sudeste asiático e da região australásica ambos os riscos estão presentes (Hill et al. 2016).

Na América do Sul existem muitas espécies de tefritídeos de importância econômica que poderiam gerar problemas com as mudanças climáticas, dentre estas, a mosca-das-abóboras *Anastrepha grandis* (Macquart 1846) (Diptera: Tephritidae) é a mais importante mosca que infesta cucurbitáceas na região. Essa espécie está presente na maioria dos países sul americanos e no Panamá (Norrbon 1991, NAAPO 2009).

As exigências térmicas para sua ocorrência foram testadas (Bolzan et al. 2017) e foi verificado maior fecundidade e fertilidade a 25°C, faixa em que as viabilidades de ovos e pupas foram maiores. Foi observado que o limiar térmico e a constante térmica para as fases de ovo e pupa é de 8,3°C para ambas as fases, com 132,3 graus-dias (GD) para a fase de ovo e 347,0 GD para a fase pupal. De ovo a adulto, os valores foram de 5,2°C e 858,7 GD.

As informações sobre limiares térmicos podem ser utilizadas para a previsão de ocorrência da espécie em áreas de quarentena e estimar o número de gerações por ano (Norrbon 1991, Bolzan et al. 2015, Bolzan et al. 2017, Hallman et al. 2017).

Devido a isso, objetivou-se saber se *A. grandis* tem potencial para dispersar e se estabelecer em áreas as quais ainda não ocorre, para isso foram aplicados modelos de distribuição de espécies com projeções em cenários futuros para prever a distribuição potencial de *A. grandis* no caso de previsões de mudanças no clima se confirmarem.

Material e métodos

Coleta e tratamento dos dados

Os dados foram obtidos por meio de publicações científicas de diversos periódicos, com registros feitos de 1951 até o presente através de busca pelas palavras-chave: mosca-sul-americana-das-cucurbitáceas, mosca-das-cucurbitáceas, mosca-da-abóbora, South American cucurbit fruit fly (CABI 2019, GBIF 2019).

Para converter coordenadas no formato UTM ou graus, minutos e segundos em coordenadas decimais, foi utilizada a calculadora geográfica da Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www.dpi.inpe.br/calcula/>).

Os dados utilizados para modelagem foram os mais recentes pelo fato das camadas bioclimáticas utilizadas para modelagem atual serem formadas com dados que abrangem os anos de 1950 até o ano 2000. Foi realizada a rarefação dos pontos de ocorrência através da ferramenta Spatially Rarefy Occurrence Data for SDMS do ArcGIS® por meio da qual os dados de ocorrência são selecionados de acordo com a distância entre si não podendo exceder a distância mínima de 10 km sendo descartados os registros que excedem este valor, evitando assim o viés amostral que poderia prejudicar a confiança nos resultados modelados.

Camadas ambientais

As camadas ambientais utilizadas foram obtidas através do WorldClim (<http://worldclim.org/>) na resolução espacial de 2,5min o que é equivalente a 5km por pixel e recomendado para modelagem ao nível continental (Giannini et al. 2012). As camadas foram cortadas para a distribuição nativa da mosca e o raster obtido foi reamostrado no formato asc para leitura pelo MaxEnt 3.4.1.

As camadas foram selecionadas através da análise de componentes principais (PCA) para reduzir a auto correlação ambiental entre as variáveis ambientais e escolher quais camadas devem ser usadas nos modelos para diminuir a complexidade e o sobre ajuste (overfitting). Foi utilizada a ferramenta Remove Highly Correlated Variables do ArcGIS® que usa o Pearson's Correlation Coefficient (R) com a escolha de 0,7 de correlação máxima entre as camadas sendo removidas aquelas variáveis altamente correlacionadas.

Desse modo, a modelagem foi realizada com oito variáveis bioclimáticas. São elas: temperatura média anual (Bio1), amplitude média diurna (Bio2), isotermalidade (Bio3), precipitação no mês mais úmido (Bio13), precipitação no mês mais seco (Bio14), sazonalidade na precipitação (Bio15), precipitação no trimestre mais quente (Bio18) e precipitação no trimestre mais frio (Bio19).

Modelos globais de mudança climática para cenários futuros

Os modelos de circulação escolhidos para projeção nos possíveis cenários futuros de mudanças climáticas foram o Hadley Global Environment Model 2 - Earth System [HadGEM2-ES (HE)] (Bellouin et al. 2011, Collins et al. 2011) e o Model for Interdisciplinary Research On Climate [MIROC5 (MC)] desenvolvido juntamente ao Centro de Pesquisa do Sistema Climático (CCSR), Universidade de Tokyo, Instituto Nacional para Estudos Ambientais (NIES) e Agencia Japonesa para Ciência e Tecnologia Terra-Mar. Ambos os modelos com projeções para os períodos de 2050 e 2070. Com eles foram modelados os cenários futuros RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 e RCP8,5 que incluem os períodos de 2050 (média para 2041-2060) e 2070 (média para 2061-2080).

Modelagem

Foi utilizado o método de Entropia Máxima – Maxent (Phillips et al. 2006). Para testar o modelo no programa MaxEnt os conjuntos de dados foram divididos em treino e teste. Foram utilizados 70% dos dados para treino e 30%. Utilizou-se a técnica de “bootstrap” para gerar diferentes conjuntos de dados. Esta técnica envolve a partição dos dados aleatoriamente, com reposição, em vários conjuntos de treino e teste. Em conjunto com essa técnica de validação foi utilizado o “Jackknife” (Giannini et al. 2012) que serve para ranquear o percentual de participação de cada variável na construção dos modelos.

Foram utilizadas 100 réplicas e máximo de 5.000 iterações. Como regularização de multiplicadores dos modelos se optou por 1. Como tipo de recurso adotou-se o linear. Para caracterizar as áreas de maior adequabilidade ambiental para ocorrência da mosca foi utilizado o limite de corte mínimo (Minimum training presence Logistic threshold - MTP), pois o interesse é avaliar o potencial invasivo de *A. grandis* frente as mudanças climáticas.

Tamanho da área adequada

Também foram calculadas as áreas de média a alta adequabilidade ambiental para ocorrência da mosca, ou seja, áreas acima de 0.50 de adequabilidade ambiental. Os cálculos das áreas de adequabilidade foram realizados com base no calculador de raster do ArcGIS®. Foram consideradas áreas acima de 0.50 com o objetivo de se ter uma margem de erro menor e não superestimar valores de baixa adequabilidade ainda que estejam acima do limite de corte mínimo.

Os resultados das áreas de adequabilidade no tempo corrente foram comparados com as perdas e ganhos em cenários de mudanças climáticas para os períodos de 2050 e 2070.

Resultados

A área de adequabilidade atual para *A. grandis* com base no cenário climático que abrange o período de 1950 a 2000 chega a 11.463.595,80 km². Nas condições previstas para os cenários de mudança climática (RCP's) se percebe um aumento da área total de adequabilidade acima do limite de corte (MTP) (Figura 1).

As áreas de adequabilidade ambiental acima de 0.50 foram consideradas como sendo de média a alta adequabilidade. Em todos os cenários foram calculadas as áreas de adequabilidade e os valores em km² são observados comparados na tabela 1.

O ganho e a perda de territórios de adequabilidade ambiental acima de 0.50 para *A. grandis* nos possíveis cenários de mudança (RCP 2,6 e 8,5) podem ser verificados nas figuras 2, 3, 4 e 5 onde se observam áreas de distribuição potencial no tempo presente, áreas de ganho territorial ou áreas que se manterão estáveis frente as mudanças em um cenário considerado otimista e outro considerado pessimista.

Em todos os cenários se observa áreas onde a adequabilidade ambiental se manterá favorável, ou seja, existirão áreas tanto na distribuição nativa atual quanto na distribuição atual prevista que permanecerão estáveis para a ocorrência da espécie. E ainda que haja redução de áreas propícias, essa contração não parece interromper um possível fluxo populacional de regiões menos adequadas para outras vizinhas de adequabilidade progressivamente melhor conforme o clima muda.

As áreas estáveis, ainda que menores, identificadas nas distribuições potenciais fora da faixa nativa de ocorrência da mosca, poderiam ser um importante

foco dos estudos sobre hotspots, ou seja, locais que se manterão adequados apesar das mudanças podem ser a porta de entrada para invasões.

As três principais regiões que exigem maior atenção para o risco de invasão por *A. grandis* são áreas na própria América do Sul, África Subsaariana (principalmente região central) e região do sudeste asiático e da Australásia com especial atenção para ilhas.

Discussão

Em geral, no período de 2050 haverá ganho de território para áreas de média adequabilidade em quase todos os cenários de ambos os modelos. Apenas haverá redução territorial para o cenário RCP2,6 no modelo HE (Tabela 1).

No período de 2070 as áreas de adequabilidade acima de 0.5 serão mais numerosas do que atualmente para a maioria dos cenários, apenas nos cenários RCP 4,5 e 6,0 no modelo HE existirá uma redução na área favorável média, o mesmo é observado para o modelo MC no cenário RCP 8,5, mas com exceção do cenário RCP2,6 do modelo HE, em todos os outros casos as métricas superam as condições atuais de probabilidade de ocorrência da mosca.

Nesse sentido, há um aumento de áreas de adequabilidade em todos os continentes, mas com maior expressão na África subsaariana, sudeste asiático e região australásica, além de áreas novas na América do Sul. Com relação a África Subsaariana e a América do Sul, em outro estudo com tefritídeos foi sugerido que estas áreas são e serão altamente adequadas para ocorrência de moscas desse grupo, assim como no sudeste asiático e partes da Austrália e ilhas da região (Hill et al. 2016). No estudo em questão foi realizada modelagem no CLIMEX, com projeção em cenários futuros para ocorrência dos gêneros *Anastrepha* (*A. ludens*, *A. obliqua*),

Bactrocera (*B. dorsalis*, *B. correcta*, *B. latifrons*, *B. tryoni*, *B. zonata*), *Ceratites* (*C. capitata*, *C. rosa*), *Rhagoletis* (*R. pomonella*, *R. indifferens*) e *Zeugodacus cucurbitae*.

Os autores relatam que existem territórios que são mais propícios a receberem invasores, outros estão sujeitos a disseminar um tefritídeo invasivo e outros que apresentam ambas as características, no caso da região do sudeste asiático e Australásia ambos os riscos estão presentes, isso é reforçado no presente estudo pelo fato de que fora da América do Sul essa região juntamente com o centro africano, é uma das que mais apresenta áreas favoráveis a disseminação de *A. grandis*.

Outro estudo realizado com três espécies de insetos-praga na África propõe que a adequação para o estabelecimento de *C. cosyra* e *B. invadens* irá aumentar, principalmente em áreas próximas aos locais cujas condições atuais já são favoráveis (Biber-Freudenberger et al. 2016), isso se assemelha ao encontrado nesse trabalho onde áreas de adequabilidade vão se expandindo em cenários futuros muito próximas ou como uma continuidade de áreas adequadas no presente, um gradiente progressivo de condições de adequabilidade ambiental.

Áreas pouco prováveis como a região próxima ao ártico surgem como de adequabilidade acima de 0.50 e o mesmo ocorre no extremo sul da América do Sul, isso já foi percebido antes para outros tefritídeos como *Rhagoletis* sp. Em que os autores do estudo preveem que a distribuição de tefritídeos será em direção aos polos como uma resposta a redução de condições de estresse ambiental pelo frio em latitudes mais altas (Hill et al. 2016). Também foi verificado para *B. dorsalis* em um trabalho realizado na Índia onde em algumas áreas do país como na parte oeste as condições de adequabilidade tendem a diminuir até 2090, em contrapartida os autores sugerem que o deslocamento das populações se darão em direção a regiões temperadas que no futuro sofrerão menos estresse devido ao frio (Sridhar et al. 2014).

Outro estudo também com *B. dorsalis* prevê que sob condições climáticas futuras, a área de risco no hemisfério norte tende a expandir para o norte, enquanto no hemisfério sul o movimento seria para o sul considerando o cenário pessimista para o período de 2070 (Qin et al. 2019). Outros trabalhos com tefritídeos chegam as mesmas conclusões, e aproximam dos resultados encontrados para *A. grandis* (Stephens et al. 2007, Ni et al. 2012, Fu et al. 2014).

Contudo áreas onde a questão hídrica no presente é um problema ao estabelecimento da mosca, se manterão como desfavoráveis nos diferentes modelos e cenários e não há previsão de mudança antes da virada do século.

Outras regiões como por exemplo na América do Norte (EUA, Canadá) onde a mosca é considerada praga quarentenária a distribuição prevista para modelagem futura mostra áreas adequadas no modelo HE em 2050 no cenário RCP4,5 no sul dos EUA e leste do Canadá. Em 2070 nos cenários RCP2,6 áreas mais concentradas no sul e sudeste dos EUA e no leste do Canada, e no cenário RCP8,5 no leste do Canadá. No modelo MC em 2050 nenhuma área de adequabilidade igual ou acima de 0.50, mas em 2070 no RCP6,0 uma grande faixa contínua do sul e sudeste dos EUA ao leste do Canadá.

Ainda existe espaço para muitos desdobramentos sobre os dados deste estudo e estudos posteriores que apliquem análises semi-mecanicistas e outros algoritmos são bem vindos para ajudar a prever a dimensão de distribuição que a mosca-das-cucurbitáceas sul-americana pode alcançar e os riscos que pode representar para territórios hoje considerados livres da praga.

Conclusões

Em todos os cenários dos modelos utilizados para esse estudo *A. grandis* encontrará condições semelhantes as atuais para sua distribuição. As áreas de adequabilidade previstas no futuro para períodos de 2050 e 2070 serão em geral maiores do que no presente. Áreas de alta adequabilidade não irão aumentar de maneira excepcional, mas áreas de média e baixa adequabilidade estarão disponíveis em maior quantidade seja na distribuição nativa da mosca ou em outros continentes.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado do primeiro autor e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de produtividade em pesquisa do segundo autor.

Referencias

BELLOUIN N, RAE J, JONES A, JOHNSON C, HAYWOOD J AND BOUCHER O. 2011. Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *J Geophys Res*116: 1-27.

BIBER-FREUDENBERGER L, ZIEMACKI J, TONNANG HEZ AND BORGEMEISTER C. 2016. Future Risks of Pest Species under Changing Climatic Conditions. *PLoS ONE*. 11(4): e0153237. doi:10.1371/journal.pone.0153237.

BOLZAN A, NAVA DE, GARCIA FRM., VALGAS RA AND SMANIOTTO G. 2015. Biology of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) in different Cucurbits. J Econ Entomol 108(3): 1034–1039.

BOLZAN A, NAVA DE, SMANIOTTO G, VALGAS RA AND GARCIA FRM. 2017. Development of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) under constant temperatures and field validation of a laboratory model for temperature requirements. Crop Prot 100(1): 38-44.

CABI. 2019. *Anastrepha grandis*. In: Invasive Species Compendium. Wallingford, UK: CAB International. Available in: www.cabi.org/isc.

COLLINS WJ et al. 2011. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. Geosci Model Dev 4: 997–1062.

FU L, LI ZH, HUANG GS, WU XX, NI WL AND QÜ WW. 2014. The current and future potential geographic range of West Indian fruit fly, *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae). Insect Sci 21(2): 234-244.

GBIF.org. 2019. *Anastrepha grandis*. Available in: <https://www.gbif.org>

GIANNINI TC, SIQUEIRA MF, ACOSTA AL, BARRETO FCC, SARAIVA AM AND ALVES-DOS-SANTOS I. 2012. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies/ Current challenges of species distribution predictive modelling. Rodriguésia. 63(3): 733-749.

GUTIERREZ AP AND PONTI L. 2014. Analysis of invasive insects: links to climate change, pp. 1-18. In: ZISKA LH AND DUKES JS (eds.), Invasive Species and Global Climate Change. CABI Publishing, Wallingford, UK.

HALLMAN GJ, MASET BA, MARTÍNEZ EIC, BARRIOS CEC, VREYSEN MJB, MYERS SW AND WORNOAYPORN V. 2017. Phytosanitary cold treatment against *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae). Fla Entomol 100(1): 29-31.

HELLMANN JJ, BYERS JE, BIERWAGEN BG AND DUKES JS. 2008. Five potential consequences of climate change for invasive species. Conserv Biol 22: 534-543.

HILL MP, BERTELSMEIER C, CLUSELLA-TRULLAS S, GARNAS J, ROBERTSON MP AND TERBLANCHE JS. 2016. Predicted decrease in global climate suitability masks regional complexity of invasive fruit fly species response to climate change. Biol Invasions 18: 1105–1119.

MOSS RH et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature. 463: 747–756.

NAAPO. Phytosanitary Alert System. Outbreak of *Anastrepha grandis* (South American cucurbit fruit fly) in Panama. 2009. Available in: <https://www.pestalerts.org/viewNewsAlert.cfm?naid=76>

NI W, LI Z, CHEN H, WAN F, QU W, ZHANG Z AND KRITICOS D. 2012. Including climate change in pest risk assessment: The peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Diptera: Tephritidae). Bull Entomol Res. 102(2): 173-183.

NORRBOM AL. 1991. The species of *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) with a grandis-type wing pattern. P Entomol Soc Wash 93(1): 101-124.

PHILLIPS SJ, ANDERSON RP AND SCHAPIRE RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecol Model 190(3-4): 231-259.

QIN Y, WANG C, ZHAO Z, PAN P AND LI Z. 2019. Climate change impacts on the global potential geographical distribution of the agricultural invasive pest, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Clim Change* 1:1-12.

SRIDHAR V, VERGHESE A, VINESH LS, JAYASHANKAR M AND KAMALA JAYANTHI PD. 2014. CLIMEX simulated predictions of Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) geographical distribution under climate change situations in India. *Curr Sci* 106(12): 1702-1710.

STEPHENS AEA, KRITICOS DJ AND LERICHE A. 2007. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *Bull Entomol Res* 97(4): 369-378.

TONNANG HEZ et al. 2017. Advances in crop insect modelling methods—Towards a whole system approach. *Ecol Model* 354: 88–103.

VAN VUUREN DP et al. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change*. 109: 5–31.

WIENS JJ AND GRAHAM CH. 2005. Niche Conservatism: Integrating Evolution, Ecology, and Conservation Biology. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 36: 519–539.

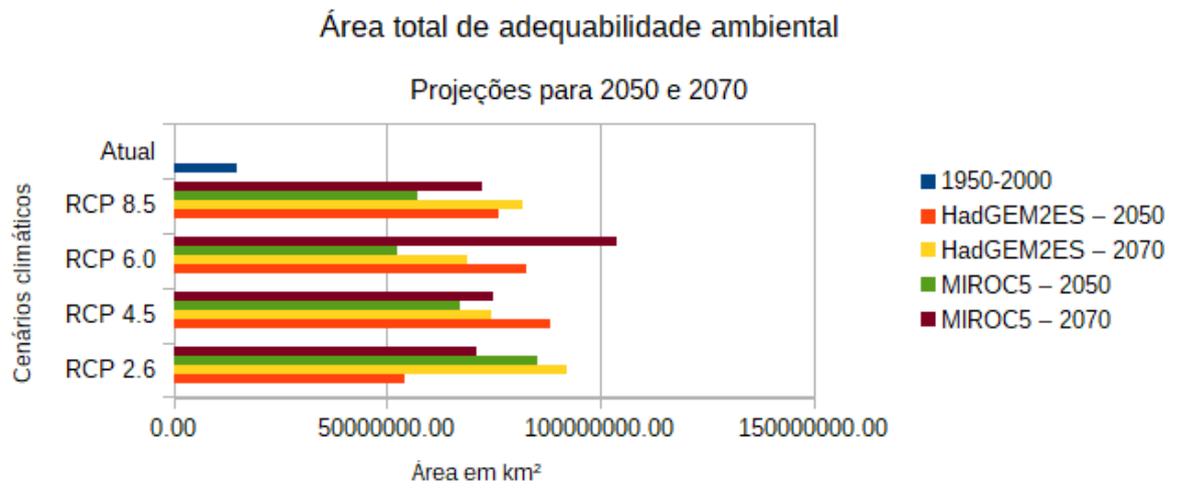


Figura 1. Área total de adequabilidade ambiental para *Anastrepha grandis* em todos os cenários testados: Atual, RCP2,6, RCP4,5, RCP6,0 e RCP8,5 em cada um dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 com projeções para os períodos de 2050 e 2070

Tabela 1. Comparativo entre as áreas de média a alta adequabilidade (>0.50) para *Anastrepha grandis* nos cenários atual e de mudança climática até o final do século XXI, projeções para os períodos de 2050 e 2070 nos modelos HadGEM2-ES e MIROC5

Cenário	2050 (km ²)			2070 (km ²)		
	1950-2000	HadGEM2-ES	MIROC5	1950-2000	HadGEM2-ES	MIROC5
RCP 2,6		476.944,71	2.519.497,12		6.035.989,96	2.268.260,74
RCP 4,5		5.302.687,02	1.821.601,68		3.540.135,62	1.979.544,10
RCP 6,0		3.097.979,28	1.827.068,71		1.176.851,97	9.910.454,42
RCP 8,5		3.427.521,05	3.561.370,19		4.443.043,83	2.485.817,45
Atual	1.112.678,96			1.112.678,96		

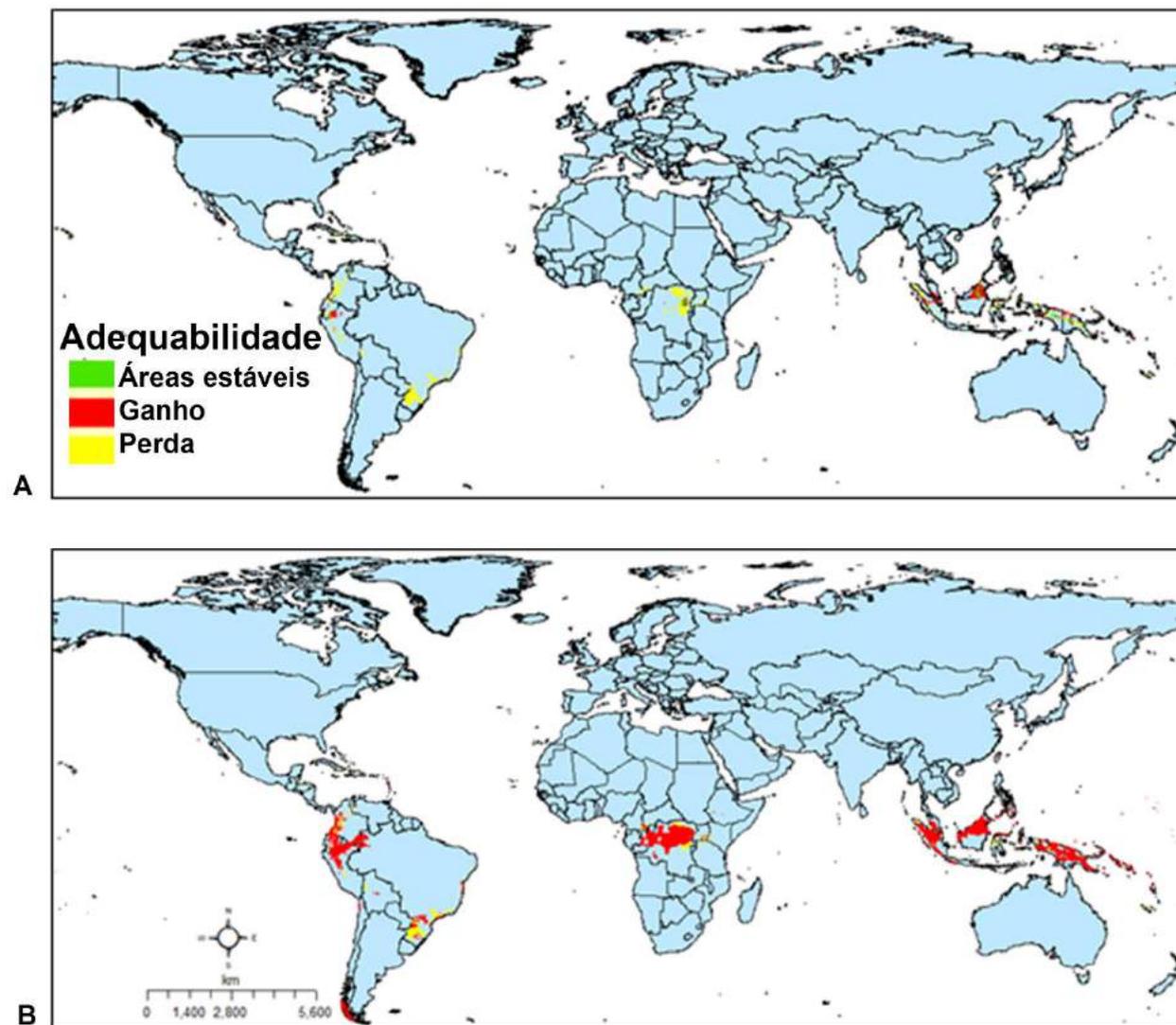


Figura 2. Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para *Anastrepha grandis* nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2050 no modelo HadGEM2-ES. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.

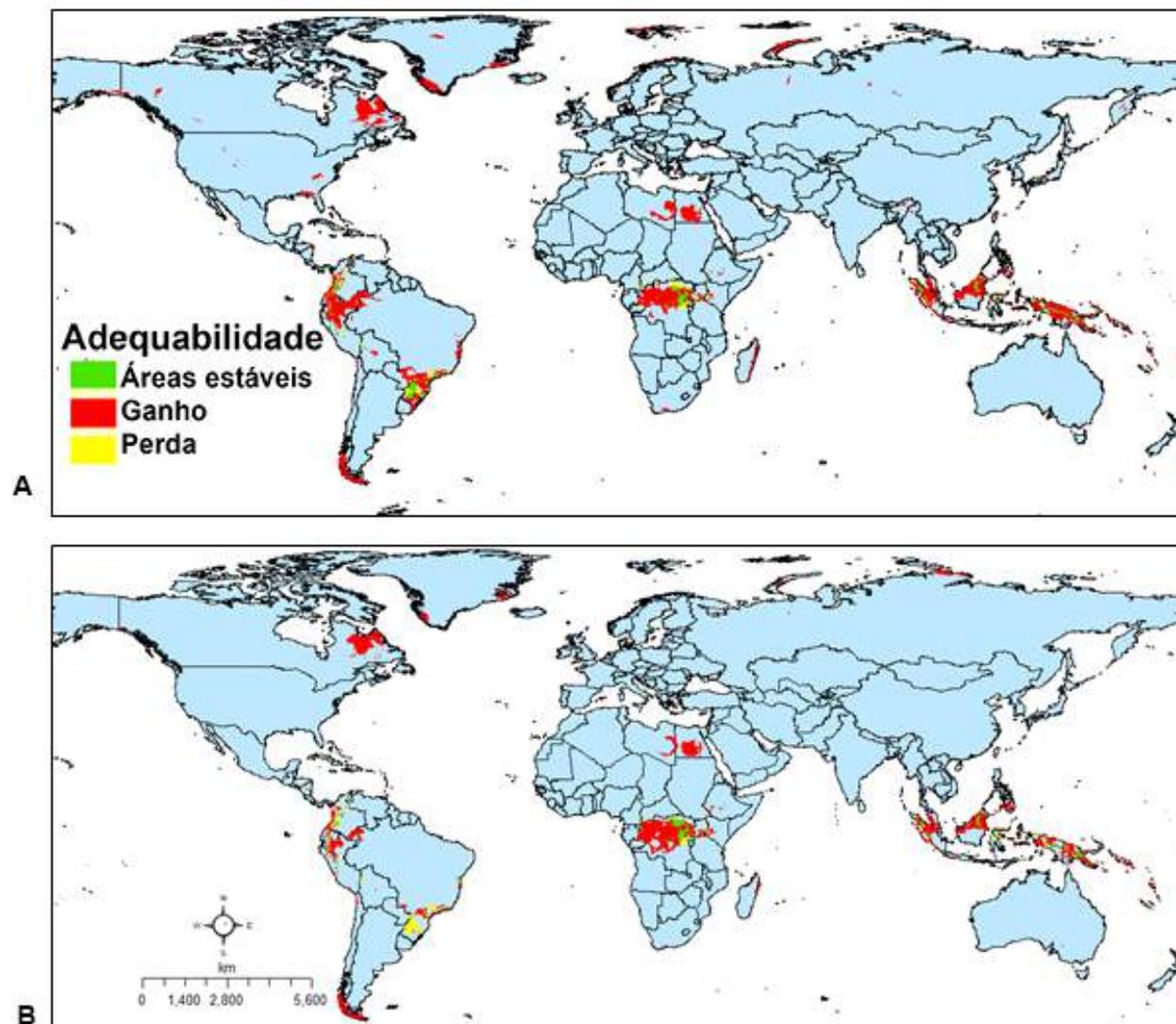


Figura 3. Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para *Anastrepha grandis* nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2070 no modelo HadGEM2-ES. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.

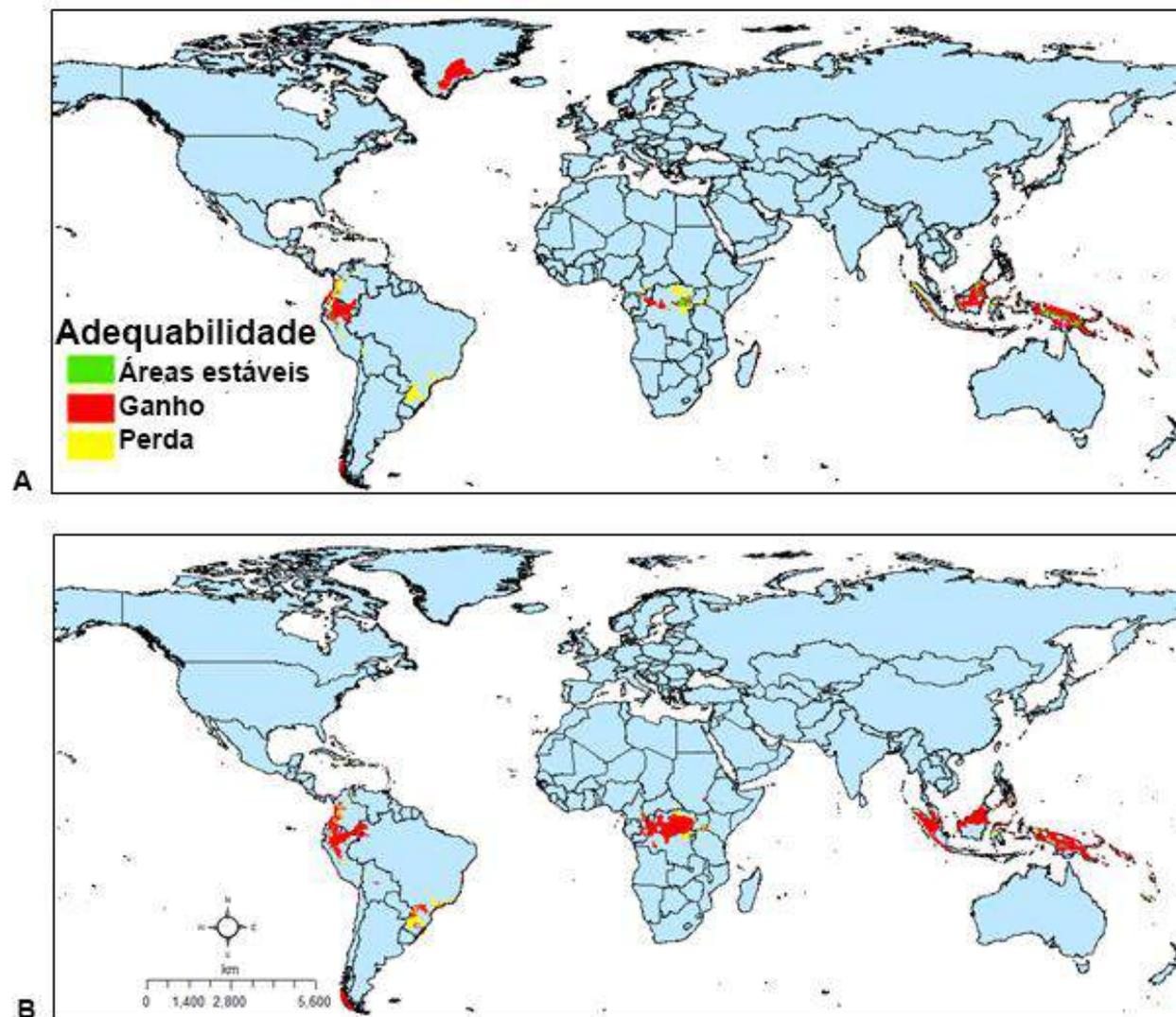


Figura 4. Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para *Anastrepha grandis* nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2050 no modelo MIROC5. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.

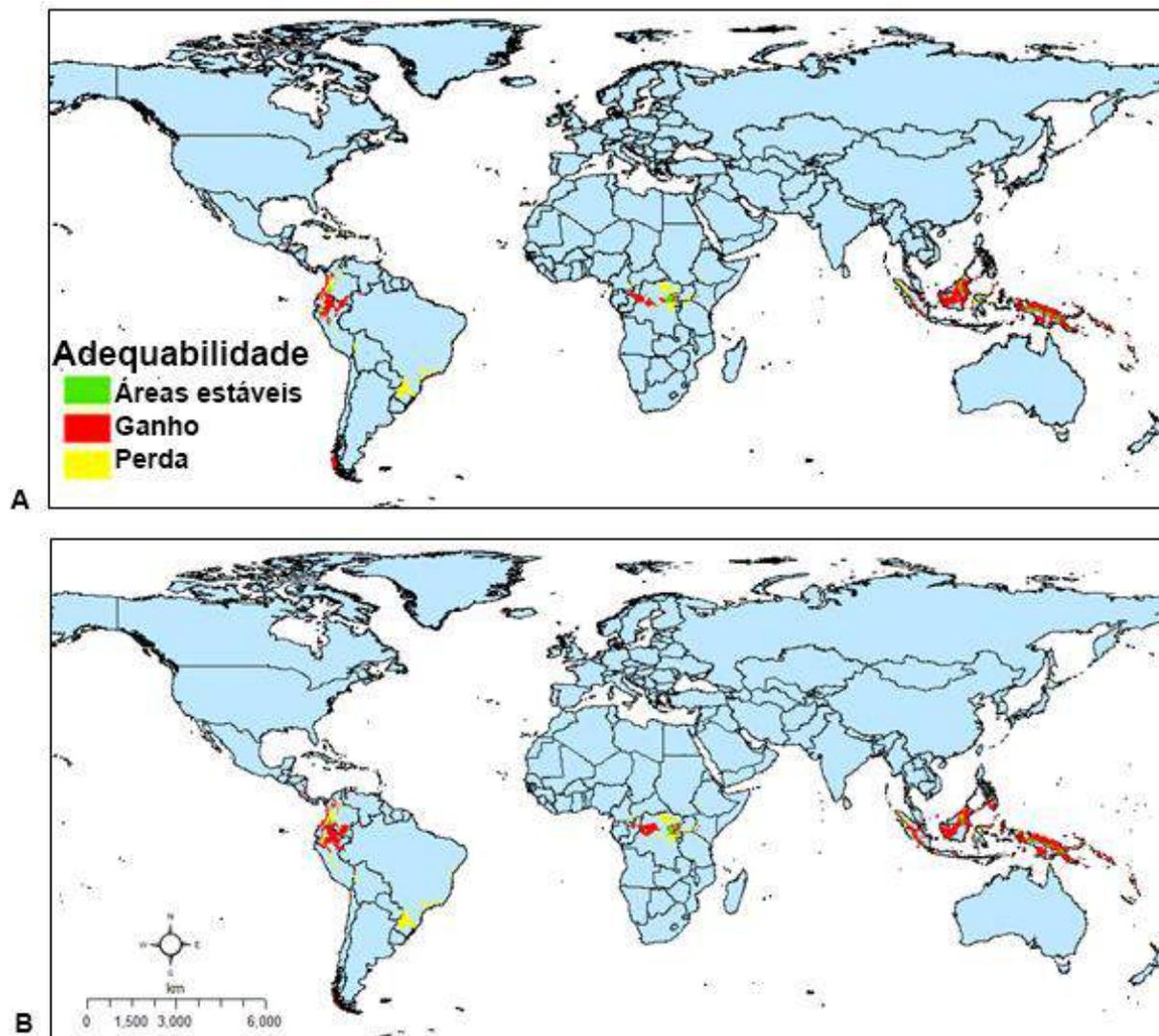


Figura 5. Área de distribuição potencial acima de 0.50 de adequabilidade para *Anastrepha grandis* nos cenários (RCPs) 2,6(A) e 8,5 (B) em 2070 no modelo MIROC5. Em vermelho a distribuição potencial da mosca no cenário futuro, em amarelo a distribuição potencial atual que será perdida e em verde as áreas que se mantem estáveis apesar das mudanças climáticas.

Conclusões gerais

A modelagem de distribuição potencial de *A. grandis* revela o potencial invasivo da mosca em territórios onde ela é considerada praga quarentenária. Os resultados permitem vislumbrar características do nicho fundamental da mosca e revelam a sua potencial amplitude dentro de uma grande faixa de condições favoráveis sendo as principais variáveis preditoras a temperatura média anual e a precipitação no mês mais úmido.

Em todos os cenários dos modelos utilizados para esse estudo *A. grandis* encontrará condições semelhantes as atuais para sua distribuição. As áreas de adequabilidade previstas no futuro para períodos de 2050 e 2070 serão em geral maiores do que no presente. Áreas de alta adequabilidade não irão aumentar de maneira excepcional, mas áreas de média e baixa adequabilidade estarão disponíveis em maior quantidade seja na distribuição nativa da mosca ou em outros continentes. Em cenários de mudanças climáticas a mosca tem sua distribuição favorecida em geral pelas mudanças em todos os cenários e embora possa perder algumas faixas de território hoje potenciais, ainda manterá áreas estáveis de distribuição e irá ter um ganho maior nas novas áreas disponíveis principalmente nas regiões já favoráveis no presente e regiões em direção aos polos. Nesse sentido conclui-se que *Anastrepha grandis* tem condições de dispersar e colonizar novos ambientes fora de sua faixa nativa, inclusive em regiões onde é considerada quarentenária e a exemplo de outros tefritídeos será beneficiada com mudanças climáticas que aumentarão a área adequada para seu estabelecimento.

Referências

- ALBERTI, S.; BOGUS, G. M.; GARCIA, F. R. M. Flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomares de pessegueiro e maracujazeiro em Iraceminha, Santa Catarina. *Biotemas*, v. 25, n. 1, p. 53-58, 2012.
- ARAUJO, E. L.; MEDEIROS, M. K. M.; SILVA, V. E.; ZUCCHI, R. A. Moscas-das-Frutas (Diptera: Tephritidae) no Semi-Árido do Rio Grande do Norte: Plantas Hospedeiras e Índices de Infestação. *Neotropical Entomology*, v. 34, n. 6, p. 889-894, 2005.
- BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific*, v. 5, n. 180214, p. 1-12, 2018.
- BELLOUIN, N.; RAE, J.; JONES, A.; JOHNSON, C.; HAYWOOD, J.; BOUCHER, O. Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate, *Journal of Geophysical Research*, v.116, p. 1-27, 2011.
- BIBER-FREUDENBERGER, L.; ZIEMACKI, J.; TONNANG, H. E. Z.; BORGEMEISTER, C. Future Risks of Pest Species under Changing Climatic Conditions. *PLoS ONE*, v. 11, n. 4, p. 1-17, 2016.
- BOLZAN, A.; NAVA, D.E.; GARCIA, F. R. M.; VALGAS, R. A.; SMANIOTTO, G. Biology of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) in different Cucurbits. *Journal of Economic Entomology*, v. 108, n. 3, p. 1034–1039, 2015.
- BOLZAN, A.; NAVA, D.E.; SMANIOTTO, G.; VALGAS, R. A.; GARCIA, F. R. M. Development of *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae) under constant temperatures and field validation of a laboratory model for temperature requirements. *Crop Protection*, v. 100, n. 1, p. 38-44, 2017.
- BORTOLI, L. C.; MACHOTA JR, R.; GARCIA, F. R. M.; BOTTON, M. Evaluation of Food Lures for Fruit Flies (Diptera: Tephritidae) Captured in a Citrus Orchard of the Serra Gaúcha. *Florida Entomologist*, v. 99, n. 3, p. 381-384, 2016.
- CABI. 2019. *Anastrepha grandis*. In: *Invasive Species Compendium*. Wallingford, UK: CAB International. Disponível em: <www.cabi.org/isc>. Acesso em 10 de setembro de 2018.
- CHOUDHARY, J. S.; MALI, S.S.; FAND, B. B.; DAS, B. Predicting the invasion potential of indigenous restricted mango fruit borer, *Citripestis eutraptera* (Lepidoptera: Pyralidae) in India based on MaxEnt modelling. *Current Science*, v. 116, n. 4, p. 636-642, 2019.
- COLLINS, W. J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-system

model – HadGEM2. Geoscientific Model Development Discussions, v. 4, p. 997–1062, 2011.

EVANS, T. G.; DIAMOND, S. E.; KELLY, M. W. Mechanistic species distribution modelling as a link between physiology and conservation. Conservation Physiology, v. 3, p. 1-16, 2015.

FU, L.; LI, Z.-H.; HUANG, G.-S.; WU, X.-X.; NI, W.-L.; QÜ, W.-W. The current and future potential geographic range of West Indian fruit fly, *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae). Insect Science, v.21, n. 2, p. 234-244, 2014.

GARCIA, F. R. M.; CAMPOS, J. V.; CORSEIUL, E. Análise faunística de espécies de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) na região oeste de Santa Catarina. Neotropical Entomology, v. 32, n. 3, p. 421-426, 2003.

GARCIA, F. R. M.; CORSEIUL, E. Análise faunística de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomares de pessegueiro em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Zoologia, v. 15, n. 4, p. 1111 -1117, 1998.

GARCIA, F. R. M.; LARA, D. B. Análise faunística e flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomar cítrico no município de Dionísio Cerqueira, Santa Catarina. Biotemas, v. 19, n. 3, p. 65-70, 2006.

GARCIA, F. R. M.; NORRBOM, A. L. Tephritoid Flies (Diptera, Tephritoidea) and Their Plant Hosts from the State of Santa Catarina in Southern Brazil. Florida Entomologist, v. 94, n. 2, p.151-157, 2011.

GBIF, 2019. *Anastrepha grandis*. Disponível em: <<https://www.gbif.org>>. Acesso em 10 de setembro de 2018.

GIANNINI; T, C.; SIQUEIRA; M. F.; ACOSTA; A. L.; BARRETO, F. C. C.; SARAIVA, A. M.; ALVES-DOS-SANTOS, I. Desafios atuais da modelagem preditiva de distribuição de espécies/ Current challenges of species distribution predictive modelling. Rodriguésia, v. 63, n. 3, p. 733-749, 2012.

GODEFROID, M.; CRUAUD, A.; ROSSI, J-P; RASPLUS J-Y. Assessing the Risk of Invasion by Tephritid Fruit Flies: Intraspecific Divergence Matters. PLoS ONE, v. 10, n. 8, p.1- , 2015.

GUTIERREZ, A. P.; PONTI, L. Analysis of invasive insects: links to climate change. In: ZISKA, L. H.; DUKES, J. S. (eds.). Invasive Species and Global Climate Change. CABI Publishing, Wallingford, UK: 45-61. 2014, p. 1-18.

HALLMAN, G. J.; MASET, B. A.; MARTÍNEZ, E. I. C.; BARRIOS, C. E. C.; VREYSEN, M. J. B.; MYERS, S. W.; WORNOAYPORN, V. Phytosanitary cold treatment against *Anastrepha grandis* (Diptera: Tephritidae). Florida Entomologist, v. 100, n. 1, p. 29-31, 2017.

HELLMANN, J. J.; BYERS, J. E.; BIERWAGEN, B. G.; DUKES, J. S. Five potential consequences of climate change for invasive species. Conservation Biology, v. 22, p. 534-543, 2008.

HILL, M. P.; BERTELSMEIER, C.; CLUSELLA-TRULLAS, S.; GARNAS, J.; ROBERTSON, M. P.; TERBLANCHE, J. S. Predicted decrease in global climate suitability masks regional complexity of invasive fruit fly species response to climate change. *Biological Invasions*, v. 18, p. 1105–1119, 2016.

KEARNEY, M.; PORTER, W. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species ranges. *Ecology Letters*, v. 12, p. 1–17, 2009.

LI, Z.; WANG, N.; WU, J.; STAUFFER, J. R.; LI, Z. The Potential Geographical Distribution of *Bactrocera cucurbitae* (Diptera: Tephritidae) in China Based on Ecllosion Rate Model and ArcGIS. *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI*, p. 334–342, 2013.

MELO, R.; SUPLICY FILHO, N.; RAGA, E.; RAMOS, E.R.K. Levantamento localidade moscas-das-frutas do gênero *Anastrepha* em vários municípios localidade Bahia. *Arquivos do Instituto Biológico*, v 55, p. 55-60, 2012.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VAN VUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, p. 747–756, 2010.

MOURA, M.S.B. de; GALVINCIO, J.D.; BRITO, L.T. de L.; SOUZA, L.S.B. de; SÁ, I.I.S.; SILVA, T.G.F. da. Clima e água de chuva no semi-árido. In: BRITO, L.T.L.; MOURA, M.S.B. de; GAMA, G.F.B. (Ed.). *Potencialidades da água de chuva no Semiárido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2007. p.37-59.

NAAPO. Phytosanitary Alert System. Outbreak of *Anastrepha grandis* (South American cucurbit fruit fly) in Panama. 2009. Disponível em: <<https://www.pestalerts.org/viewNewsAlert.cfm?naid=76>>. Acesso em 10 de setembro de 2018.

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*, v. 102, n. 2, p. 173-183, 2012.

NORRBOM, A. L. The species of *Anastrepha* (Diptera: Tephritidae) with a grandis-type wing pattern. *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, v. 93, n. 1, p. 101-124, 1991.

PAGLIA, A. P.; REZENDE, D. T.; KOCH, I.; KORTZ, A. R.; DONATTI, C. Modelos de Distribuição de Espécies em Estratégias para a Conservação da Biodiversidade e para Adaptação Baseada em Ecossistemas Frente a Mudanças Climáticas/ Species Distribution Models (SDM) in Biodiversity Conservation Strategies and Climate Change Ecosystem Based Adaptation. *Natureza & Conservação*, v.10, n. 2, p. 231-234, 2012.

PEARSON, R. G.; RAXWORTHY, C. J.; NAKAMURA, M.; PETERSON, A. T. Predicting species' distributions from small numbers of occurrence records: A test

case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, v. 34, p. 102-117, 2007.

PHILLIPS, S. J.; ANDERSON, R. P.; SCHAPIRE, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, v. 190, n. 3-4, p. 231-259, 2006.

QIN, Y.; PAINI, D. R.; WANG, C.; FANG, Y.; LI, Z. Global Establishment Risk of Economically Important Fruit Fly Species (Tephritidae). *PLoS ONE*, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2015.

QIN, Y.; WANG, C.; ZHAO, Z.; PAN, P.; LI, Z. Climate change impacts on the global potential geographical distribution of the agricultural invasive pest, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae). *Climatic Change*, p. 1-12, 2019.

SILVA, J.G.; MALAVASI, A. Life cycle of *Anastrepha grandis*. In: McPHERON, B.A.; STECK, G.J. *Fruit fly pests: a world assessment of their biology and management*. Delray Beach: St. Lucie Press, 1996. p. 347-35.

SOBERÓN, J. Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, v. 10, n. 12, p.1115-1123, 2007.

SOBERÓN, J. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*, v. 33, n. 1, p. 159-167, 2010.

SOUSA, E. P.; MIRANDA, S. H. G. Competitividade dos produtores de melão na Área Livre de *Anastrepha grandis* no Nordeste brasileiro. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 1, p. 199-208, 2018.

SRIDHAR, V.; VERGHESE, A.; VINESH, L. S.; JAYASHANKAR, M.; KAMALA JAYANTHI, P. D. CLIMEX simulated predictions of Oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) geographical distribution under climate change situations in India. *Current Science*, v. 106, n. 12, p. 1702-1710, 2014

STEPHENS, A. E. A.; KRITICOS, D. J.; LERICHE, A. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *Bulletin of Entomological Research*, v. 97, n. 4, p. 369-378, 2007.

TONNANG, H. E. Z.; HERVÉ, B. D. B; BIBER-FREUDENBERGER, L.; SALIFU, D.; SUBRAMANIAN, S.; NGOWI, V. B.; GUIMAPI, R. Y. A.; ANANI, B.; KAKMENI, F. M. M.; AFFOIGNON, H.; NIASSY, S.; LANDMANN, T.; NDJOMATCHOUA, F. T.; PEDRO, S. A.; JOHANSSON, T.; TANGA, C. M.; NANA, P.; FIABOE, K. M.; MOHAMED, S. F.; MANIANIA, N. K.; NEDOREZOV, L. V.; EKESI, S.; BORGEMEISTER, C. Advances in crop insect modelling methods—Towards a whole system approach. *Ecological Modelling*, v. 354, p. 88–103, 2017.

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, J. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.-F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109, p. 5–31, 2011.

WEEMS, H. V. Jr. *Anastrepha grandis* (Macquart) (Diptera: Tephritidae). Entomology Circular nº 334. Taxonomic Entomologist, Div.Plant.Ind. Gainesville, FL. 1990.

WIENS, J. J.; GRAHAM, C. H. Niche Conservatism: Integrating Evolution, Ecology, and Conservation Biology. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, v. 36, p. 519–539, 2005.

ZILLI, G.; GARCIA, F. R. M. Análise faunística e flutuação populacional de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae) em pomar de *Citrus sinensis* no município de Chapecó, Santa Catarina. Biodiversidade Pampeana, v. 8, n. 1, p. 39-45, 2010.