

TARCISIO VISINTIN DA SILVA GALDINO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA DA MANGUEIRA E DO
SEU VETOR *Hypocryphalus mangiferae***

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G182d
2016
Galdino, Tarcísio Visintin da Silva, 1987-
Dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira e do seu
vetor *Hypocryphalus mangiferae* / Tarcísio Visintin da Silva
Galdino. – Viçosa, MG, 2016.
vi, 65f : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcelo Coutinho Picanço.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Manga - Doenças e pragas - Manejo Integrado. 2. Nicho
(Ecologia). 3. Besouros. 4. *Hypocryphalus mangiferae*. 5.
Fungos. 6. *Ceratocystis fimbriata*. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-graduação
em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 634.44

TARCISIO VISINTIN DA SILVA GALDINO

**DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA DA MANGUEIRA E DO
SEU VETOR *Hypocryphalus mangiferae***

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2016.

Ricardo Ribeiro de Castro Solar

Nilson Rodrigues da Silva

Gerson Adriano Silva

Shaiene Costa Moreno

Marcelo Coutinho Picanço
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nivaldo Pacheco Galdino e Maria Aparecida Visintin da Silva Galdino, pelo amor e dedicação desde o meu primeiro dia de vida.

Aos meus irmãos, Lauro Visintin da Silva Galdino e Álvaro Visintin da Silva Galdino, pela amizade.

À minha esposa, Mônica da Silva Pontes, pelo amor, companheirismo e pela paciência.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão de bolsas e recursos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos no exterior em período sanduiche (PDSE 99999.010192/2014-00).

À Vale pelos recursos concedidos para o desenvolvimento do projeto que sem isso não seria possível essa pesquisa.

Ao professor Marcelo Coutinho Picanço, pela paciência, orientação e amizade ao longo desses anos de convívio. À sua família pelos momentos agradáveis proporcionados.

Aos professores responsáveis pelos conhecimentos adquiridos durante a minha formação.

Aos membros da banca de tese pelas sugestões e dedicação na melhoria do trabalho.

Aos funcionários do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia e do departamento de Entomologia.

Aos colegas de Graduação e Pós-graduação do Laboratório de Manejo Integrado de Pragas pelo convívio, troca de conhecimentos e especialmente pela grande ajuda neste trabalho.

Ao amigo Reinaldo pelas estadias e ajudas durante as viagens de coleta.

A toda a minha família pelo apoio.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA

TARCÍSIO VISINTIN DA SILVA GALDINO, filho de Nivaldo Pacheco Galdino e Maria Aparecida Visintin da Silva Galdino, nasceu em Pedro Canário, Espírito Santo, no dia 24 de junho de 1987.

Em dezembro de 2004, concluiu o segundo grau no Centro Educacional Nacional de São Mateus. Em março de 2005, ingressou no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em janeiro de 2010. Durante a graduação, de janeiro de 2006 a dezembro de 2009 foi estagiário no Laboratório de Manejo Integrado de Pragas no Departamento de Entomologia da Universidade Federal de Viçosa, sob orientação do Prof. Marcelo Coutinho Picanço. Em março de 2010 ingressou no curso de mestrado do Programa de Pós-graduação em Entomologia obtendo o título de mestre ano 2012. Nesse mesmo ano ingressou no doutorado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia se tornando então doutor em 25 de fevereiro de 2016.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | v |
| ABSTRACT | vi |
| INTRODUÇÃO GERAL..... | 1 |
| LITERATURA CITADA..... | 3 |
| DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA DA MANGUEIRA E O PAPEL DO VETOR <i>Hypocryphalus mangiferae</i> | 5 |
| RESUMO | 5 |
| INTRODUÇÃO | 6 |
| MATERIAL E MÉTODOS..... | 8 |
| Local..... | 8 |
| Coleta de dados | 9 |
| Análise espacial | 9 |
| RESULTADOS..... | 11 |
| DISCUSSÃO..... | 13 |
| LITERATURA CITADA..... | 20 |
| MAPPING GLOBAL POTENTIAL RISK OF MANGO SUDDEN DECLINE DISEASE CAUSED BY FUNGUS <i>Ceratocystis fimbriata</i> | 31 |
| ABSTRACT | 31 |
| INTRODUCTION | 33 |
| MATERIAL AND METHODS..... | 36 |
| Occurrence data..... | 36 |
| Environmental data layers | 37 |
| Model development and validation | 38 |
| RESULTS | 41 |
| DISCUSSION..... | 43 |
| REFERENCES | 49 |
| SUPPORTING INFORMATION | 62 |
| CONCLUSÕES GERAIS | 67 |

RESUMO

GALDINO, Tarcísio Visintin da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira e do seu vetor *Hypocryphalus mangiferae***. Orientador: Marcelo Coutinho Picanço.

Objetivou-se neste trabalho: (i) determinar a dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira e de seu inseto vetor bem como o papel desses besouros nessa dinâmica e (ii) identificar os locais no mundo que estão sobre o risco de ocorrência da seca da mangueira e quais os fatores climáticos que estão associados a distribuição da doença. Para tanto, dois pomares com a ocorrência do agente causador da seca da mangueira, o fungo *Ceratocystis fimbriata*, e de seu besouro vetor, *Hypocryphalus mangiferae*, foram monitoradas entre o inverno de 2012 e inverno de 2015. Além disso, foram levantados os locais de ocorrência da doença no mundo para modelagem por meio de um modelo de correlação (MaxEnt). A infestação de novas plantas pela seca da mangueira foi normalmente precedida pelo ataque dos besouros. A colonização de novas mangueiras nos pomares pelo besouro e pelo fungo ocorre pelo ataque de novas plantas atacadas distantes e próximas a aquelas anteriormente atacadas. Isto possivelmente levou a grande sobreposição dos locais de ocorrência do besouro e do fungo. Ao contrário do que se supõe, esse trabalho demonstra que não são os besouros que vão em busca de plantas doentes, mas são eles que transmitem o fungo levando a disseminação da doença. O modelo previu áreas suscetíveis em países onde a doença ainda não ocorre, mas onde a manga é cultivada. Entre essas áreas estão os maiores produtores de manga como: Índia, China, Tailândia, Indonésia e México. Observou-se que a seca da mangueira ocorre em locais com temperatura média anual entre 20,4 e 28,5 °C, precipitação média anual entre 73 e 2093 mm e altitudes inferiores a 620m acima do nível do mar. A temperatura média anual (54,3 %), precipitação durante o trimestre mais frio do ano (13,7 %), sazonalidade da precipitação (12,9%), e precipitação no mês mais seco do ano (7,2%) foram as variáveis climáticas que mais contribuíram para a probabilidade de ocorrência da seca da mangueira em um determinado local.

ABSTRACT

GALDINO, Tarcísio Visintin da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Spatio-temporal dynamics of Mango Sudden Decline disease and of its vector *Hypocryphalus mangiferae***. Adviser: Marcelo Coutinho Picanço.

The aims of this study were: (i) to study the spatio-temporal dynamics of MSD and of its vector as well as the role of these vectors on the dynamics of the disease, and (ii) to identify the places in the world that are under the risk of Mango Sudden Decline (MSD) establishment and the climatic factors associated with MSD distribution. To reach this aim we monitored two orchards with the occurrence of the causal agent of MSD, the fungus *Ceratocystis fimbriata*, and of its vector, the beetle *Hypocryphalus mangiferae*, from the winter of 2012 to the winter of 2015. Also, we obtained the occurrence points of the disease in the world and modeled the potential distribution of the species using a correlative model (MaxEnt). The beetles attack to the plants preceded the appearance of MSD. The colonization of new plants by the beetles and fungus occurred in places far and near previous colonized plants. This led to a high overlap of the places with the occurrence the beetles and the fungus in the maps. Contrary to what people say about MSD, this study demonstrates that the beetles do not search for diseased trees, but they transmit the fungus to healthy tree causing the spread of the disease. Our model predicted highly susceptible areas in countries where the disease does not occur but the mango is grown. It includes the biggest mango producers in the world such as: India, China, Thailand, Indonesia e Mexico. MSD disease occurs in areas with mean annual temperature between 20.4-28.5°C, mean annual precipitation between 73-2093mm, and below 620m of elevation. The Mean annual temperature (54.3 %), precipitation of coldest quarter (13.7 %), precipitation seasonality (12.9%), and precipitation of driest month (7.2%) were the climatic variables that most contributed to MSD disease potential distribution.

INTRODUÇÃO GERAL

A manga (*Mangifera indica* L.), é originária do Sul da Ásia na região correspondente a Índia (Litz, 2009). A partir desses locais ela foi introduzida em outros continentes e atualmente é cultivada em todos os países de clima tropical e subtropical (Khanzada *et al.*, 2004). A manga está entre as frutas mais exportadas tendo como maiores produtores Índia, China, Tailândia, Indonésia, México, Paquistão e Brasil, que juntos correspondem a mais e 85% da produção mundial da fruta (Faostat, 2013). No Brasil os maiores produtores são os Estados da Bahia, de São Paulo, Pernambuco e Minas Gerais (IBGE, 2016; Pizzol *et al.*, 1998).

Dentre os principais problemas enfrentados pelos produtores de manga está o fungo *Ceratocystis fimbriata* (Ellis & Halsted), causador da doença conhecida como seca da mangueira. A primeira vez que o fungo foi reportado causando doença em manga ocorreu no Brasil na década de 40 (Al Adawi *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2006). Posteriormente a seca da mangueira foi observada no Paquistão (Fateh *et al.*, 2006) e no sultanado de Omã no final da década de 90 (Al Adawi *et al.*, 2006). As perdas são estimadas em até 60% da produção e mesmo com os esforços desses países para conter o avanço da doença o número de plantas infectadas não para de aumentar (Rossetto & Ribeiro, 1990; Al Adawi *et al.*, 2003; Al Adawi *et al.*, 2006; Litz, 2009; Masood *et al.*, 2012; Al Adawi *et al.*, 2013). Por estas razões essa doença apresenta uma grande ameaça para as regiões produtoras de manga no mundo.

Os sintomas da doença se caracterizam pela murcha e o amarelecimento das folhas apicais e posterior seca dessas, que permanecem aderidas ao galho por um longo tempo mesmo depois de secas. Além disso, plantas doentes podem apresentar descoloração da casca em galhos e tronco,

pequenos furos na casca e a exsudação de goma (gomose) (Rossetto & Ribeiro, 1990; Masood *et al.*, 2012; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013; Oliveira *et al.*, 2015). O lenho infectado escurece, contrastando com o tecido sadio que é bem mais claro (Rossetto & Ribeiro, 1990; Pereira, 2013; Oliveira *et al.*, 2015). A infecção da mangueira por *C. fimbriata* pode ocorrer através da copa e/ou das raízes das árvores. Mesmo na ausência do hospedeiro o fungo pode sobreviver na área por longos períodos e se multiplicar no solo e nos galhos mortos (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Oliveira *et al.*, 2015).

Entre os principais meios de transmissão da doença estão as coleobrocas (Curculionidae: Scolytinae), solos infestados, mudas e material vegetal contaminado (Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2007; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). As coleobrocas adquirem o inóculo de *C. fimbriata* de plantas infectadas e o dispersam para plantas suscetíveis sadias (Masood & Saeed, 2012; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). Os esporos de *C. fimbriata* podem ser carregados sobre os corpos de besouros ou sobreviverem no trato digestivo do inseto (Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). Várias espécies de coleobrocas já foram identificadas ocorrendo em plantas de manga atacadas pela doença, mas somente *Hypocryphalus mangiferae* (Stebbing 1914) e *Hylleborus affinis* são conhecidos como sendo capazes de transportar o fungo (Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). Esses coleópteros atacam o tronco e galhos das árvores e dessa forma podem introduzir o fungo em plantas sadias (Pereira, 2013). Entre essas duas espécies a mais importante é *H. mangiferae* por ocorrer em todas as regiões com a presença da doença e estar presente em todas as plantas contaminadas pela seca da mangueira infectadas (Rossetto & Ribeiro, 1990; Al

Adawi *et al.*, 2006; Van Wyk *et al.*, 2007; Masood *et al.*, 2008; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013).

Apesar do conhecimento do problema em manga a vários anos e de sua ameaça a outros países produtores não existem estudos do risco de introdução da doença em outros países e nem conhecimento suficiente sobre a dinâmica espaço-temporal da doença e de seus insetos vetores e da importância de *H. mangiferae* nessa dinâmica. Com isso, essa tese foi dividida em dois capítulos: no primeiro capítulo avaliou-se os locais no mundo que estão sobre o risco de ocorrência da seca da mangueira e qual o risco de áreas produtoras de serem invadidas com a doença e identificou-se quais os fatores climáticos que estão associados a distribuição da doença. No segundo estudou-se a dinâmica espaço-temporal da doença e de seu principal inseto vetor bem como o papel de *H. mangiferae* nessa dinâmica.

LITERATURA CITADA

- Accordi, S. The survival of *Ceratocystis fimbriata* f. sp. platani in the soil. *Informatore Fitopatologico*, v.39, n.5, p.57-62. 1989.
- Al Adawi, A. O.; Al Jabri, R.; Deadman, M.; Barnes, I.; Wingfield, B.; Wingfield, M. J. The mango sudden decline pathogen, *Ceratocystis manginecans*, is vectored by *Hypocryphalus mangiferae* (Coleoptera: Scolytinae) in Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.135, n.2, p.243-251. 2013.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Al Maqbali, Y. M.; Al Jahwari, A. A.; Al Saadi, B. A.; Al Amri, I. S.; Wingfield, M. J. Aetiology and causal agents of mango sudden decline disease in the Sultanate of Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.116, n.4, p.247-254. 2006.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Khan, A. J.; Al Maqbali, Y. M. *Diplodia theobromae* associated with sudden decline of mango in the Sultanate of Oman. *Plant Pathology*, v.52, n.3, p.419-419. 2003.
- Faostat. Food and Agriculture Organization of the United Nation in <http://faostat3.fao.org/home/E>. Accessed September 26th. (Ed.). 2013.
- Fateh, F. S.; Kazmi, M. R.; Ahmad, I.; Ashraf, M. *Ceratocystis fimbriata* isolated from vascular bundles of declining mango trees in Sindh, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, v.38, n.4, p.1257-1259. 2006.

- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016.
- Khanzada, M.; Lodhi, A. M.; Shahzad, S. Pathogenicity of *Lasiodiplodia theobromae* and *Fusarium solani* on mango. Pakistan Journal of Botany, v.36, n.1, p.181-190. 2004.
- Litz, R. E. The mango: botany, production and uses: CABI. 2009
- Masood, A. & Saeed, S. Bark beetle, *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) is a vector of mango sudden death disease in Pakistan. Pakistan Journal of Botany, v.44, n.2, p.813-820. 2012.
- Masood, A.; Saeed, S.; Iqbal, N.; Ullah, M. A. Spatial and Temporal Infestation of Mango Bark Beetle, *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae) Found on Mango Sudden Death Trees in Orchards. Pakistan J. Zool, v.44, n.6, p.1545-1553. 2012.
- Oliveira, L. S. S.; Harrington, T. C.; Ferreira, M. A.; Damacena, M. B.; Al-Sadi, A. M.; Al-Mahmooli, I. H. S.; Alfenas, A. C. Species or Genotypes? Reassessment of Four Recently Described Species of the *Ceratocystis* Wilt Pathogen, *Ceratocystis fimbriata*, on *Mangifera indica*. Phytopathology, v.105, n.9, p.1229-1244. 2015.
- Pereira, R. M. Identificação e distribuição de coleobrocas em mangueiras com seca causada por *Ceratocystis fimbriata*. Department of Entomology, Federal University of Viçosa, Viçosa, 2013. 29 p.
- Pizzol, S. J.; Filho Martines, J. G.; Silva, T. H. S.; Gonçalves, G. O mercado da manga no Brasil: aspectos gerais. Preços Agrícolas, Piracicaba, v.12, n.131, p.34-35. 1998.
- Rossetto, C. J. & Ribeiro, I. J. A. Mango wilt. XII. Recommendations for control. Revista de Agricultura (Piracicaba), v.65, n.2, p.173-180. 1990.
- Silveira, S. F.; Harrington, T. C.; Mussi-Dias, V.; Engelbrecht, C. J. B.; Alfenas, A. C.; Silva, C. R. *Annona squamosa*, a new host of *Ceratocystis fimbriata*. Fitopatologia Brasileira, v.31, p.394-397. 2006.
- Souza, A. G. C.; Maffia, L. A.; Murta, H. M.; Alves, Y. H.; Pereira, R. M.; Picanço, M. C. First Report on the Association Between *Ceratocystis fimbriata*, an Agent of Mango Wilt, *Xyleborus affinis*, and the Sawdust Produced During Beetle Colonization in Brazil. Plant Disease, v.97, n.8, p.1116-1116. 2013.
- Van Wyk, M.; Al Adawi, A. O.; Khan, I. A.; Deadman, M. L.; Al Jahwari, A. A.; Wingfield, B. D.; Ploetz, R.; Wingfield, M. J. *Ceratocystis manginecans* sp. nov., causal agent of a destructive mango wilt disease in Oman and Pakistan. Fungal Diversity, v.27, p.213-230. 2007.

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA SECA DA MANGUEIRA E O PAPEL DO VETOR *Hypocryphalus mangiferae*

RESUMO

O conhecimento da dinâmica espaço-temporal de patógenos e seus vetores pode fornecer informações importantes acerca do processo de dispersão do patógeno e o papel dos vetores na dinâmica de doenças. Esse é o caso da seca da mangueira causada por *Ceratocystis fimbriata*, uma vez que pouco se conhece sobre sua dinâmica espaço-temporal e a relação do seu vetor, o besouro *Hypocryphalus mangiferae*. Com isto, neste trabalho objetivou-se: (i) estudar a distribuição espaço-sazonal do ataque de *H. mangiferae* e *C. fimbriata* em pomares de manga e (ii) verificar a importância de *H. mangiferae* na dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira. Foram monitorados dois pomares de manga da variedade espada entre o junho de 2012 e julho 2015. As plantas dos pomares de manga foram georeferenciadas e vistoriadas mensalmente visando quantificar o número de plantas atacadas pelos besouros e pelo fungo. Nos pomares a percentagem de mangueiras atacadas pelo besouro foi sempre maior do que a percentagem de mangueiras infectadas pelo fungo. A infestação de novas plantas pela seca da mangueira foi precedida pelo ataque dos besouros. A colonização de mangueiras pelo besouro e pelo fungo ocorreram pela colonização de novas plantas distantes e próximas daquelas já atacadas. Os novos focos de plantas atacadas pelo fungo surgiram em locais onde anteriormente o besouro tinha iniciado seu ataque. Isto levou a grande sobreposição dos locais de ocorrência do besouro e do fungo, mostrando que onde o besouro se estabelece posteriormente ocorre o estabelecimento do fungo. Observou-se que os besouros além de serem capazes de disseminar o fungo são de extrema importância na sua dinâmica espaço-temporal.

INTRODUÇÃO

Dentre os maiores problemas enfrentados para a produção de manga (*Mangifera indica*) no mundo está a doença conhecida como seca da mangueira causada pelo fungo *Ceratocystis fimbriata* (Ellis and Halsted). Essa doença já se encontra presente no Brasil, Paquistão e Omã (Al Adawi *et al.*, 2006; Fateh *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2006; Faostat, 2013). Nesses países as perdas relacionadas a essa doença chegam a cerca de 60% da produção (Al Adawi *et al.*, 2003). Além de causar problemas nesses países a seca da mangueira é também uma ameaça para as demais regiões produtoras da fruta, visto que as maiores áreas produtoras de manga no mundo se encontram em locais de alta chance de ocorrência da doença como demonstrado no Capítulo 2 desta tese.

Entre os principais meios de transmissão da doença estão as coleobrocas (Curculionidae: Scolytinae), solos infestados, mudas e ferramentas contaminados (Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2007; Al Adawi *et al.*, 2013; Souza *et al.*, 2013). Várias espécies de coleobrocas foram identificadas em plantas de manga atacadas pela doença, mas somente *Hypocryphalus mangiferae* e *Hylleborus affinis* são conhecidas como sendo capazes de transportar o fungo (Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). Dentre essas espécies a mais importante é *H. mangiferae* por ocorrer em todas as regiões com a presença da doença e estar presente em todas as plantas infectadas (Rossetto & Ribeiro, 1990; Al Adawi *et al.*, 2006; Van Wyk *et al.*, 2007; Masood *et al.*, 2008; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013). No solo o fungo produz estruturas de resistência que o torna capaz de sobreviver por longos períodos de tempo na ausência do hospedeiro (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005).

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos com *H. mangiferaea* fim de se descobrir os meios pelos quais esse inseto pode transportar o fungo entre plantas (Al Adawi *et al.*, 2006; Masood *et al.*, 2008; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013). Entre as formas conhecidas pelas quais os besouros podem transportar o fungo estão o transporte de estruturas na superfície corporal (micângios presentes no aparelho bucal e nos élitros) e através das serragens eliminadas por eles (Pereira, 2013). Isolamentos do fungo realizados a partir de insetos presentes em plantas doentes indicaram taxa de presença do fungo entre 7 e 83% dos indivíduos (Al Adawi *et al.*, 2006; Masood *et al.*, 2008; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013). Esses trabalhos levantam sugerem que *H. mangiferaea* pode ser importante na dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira uma vez que eles são capazes de transportar o fungo.

O conhecimento da dinâmica espaço-temporal de patógenos e seus insetos vetores pode fornecer informações importantes acerca do processo de dispersão e do papel desses vetores na dinâmica da doença frente a outros meios de dispersão (Navas-Cortés *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2013), o que torna mais fácil adotar estratégias de manejo da doença (Navas-Cortés *et al.*, 2008). Esse conhecimento pode fornecer informações muito importantes no caso da seca da mangueira causada por *C. fimbriata* uma vez que pouco se conhece sobre sua dinâmica espaço-temporal e se *H. mangiferaea* desempenha algum papel nessa dinâmica.

Vários métodos estão disponíveis para se descrever padrões espaço-temporais de insetos e doenças (Madden & Hughes, 1995; Navas-Cortés *et al.*, 2008; Rosado *et al.*, 2015b). Nos últimos anos, o aperfeiçoamento de computadores e o desenvolvimento de softwares tem colocado a geoestatística em novo patamar de uso, sendo amplamente utilizada na modelagem e análise

de dados procedentes da geofísica, biologia e agricultura (Oliver, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Sciarretta & Trematerra, 2014; Rosado *et al.*, 2015a). A geoestatística utiliza o semivariograma para caracterizar a variação espacial em uma região de interesse e dessa forma avaliar se duas amostras mais próximas são mais parecidas do que aquelas mais distantes (Brenner *et al.*, 1998; Barrigossi *et al.*, 2001; Oliver, 2010). A partir disso é possível construir mapas da distribuição das espécies de forma a descrever o padrão de colonização no espaço.

Apesar de ferramentas de estudo estarem disponíveis e da comprovada capacidade de transmissão do fungo pelo besouro, há uma lacuna de informações do papel desempenhado por *H. mangiferae* na dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo: (i) estudar a distribuição espaço-sazonal do ataque de *H. mangiferae* e *C. fimbriata* e (ii) verificar a importância de *H. mangiferae* na dinâmica espaço-temporal da seca da mangueira.

MATERIAL E MÉTODOS

Local

O trabalho foi conduzido em dois pomares de manga da variedade espada localizados no município de Itaocara no estado do Rio de Janeiro. O pomar 1 (-21° 38' 14,40"S, -41° 57' 19,12"W) possui uma área de 2,6 ha e o pomar 2 (-21° 38' 11,22"S, -41° 57' 5,70"W) de 2,3 ha. Em ambos os pomares as plantas foram monitoradas de junho de 2012 a julho de 2015. No início das avaliações elas possuíam 15 anos de idade e o espaçamento de 6x8 m. Ambos os pomares não receberam aplicações de inseticidas e fungicidas durante todo o período do experimento. A temperatura, umidade relativa do ar e precipitação foram monitoradas durante todo período experimental.

Coleta de dados

Mensalmente foram avaliados o número de plantas atacadas por *H. mangiferae* e a densidade desses insetos, o número de plantas infectadas por *C. fimbriata* e a severidade da doença. Foram acompanhadas 251 plantas no pomar 1 e 273 plantas no pomar dois. A densidade de *H. mangiferae* foi avaliada contando-se o número de galerias desse inseto em retângulos de 5x10 cm (50 cm²) utilizando um gabarito de metal nas áreas que caracterizavam o seu ataque (Masood *et al.*, 2012). A avaliação da severidade da doença foi realizada usando a seguinte fórmula:

Onde NRS é o número de ramos com sintoma e NRT o número de ramos totais (Pereira, 2013). Os ramos que apresentavam sinais da ocorrência da doença (galhos mortos, folhagem seca, descoloração da casca, pequenos furos na casca ou exsudação de goma) foram investigados. Foi considerado doente o ramo que apresentava goma a sua superfície e alterações da coloração do xilema (Al Adawi *et al.*, 2006; Masood *et al.*, 2012; Pereira, 2013; Oliveira *et al.*, 2015b). Cada planta avaliada foi georeferenciada.

Análise espacial

Na geoestatística, o semivariograma é a ferramenta utilizada para avaliar a dependência espacial entre dois pontos amostrais (Matheron, 1963). O semivariograma é calculado a partir dos dados amostrais originais, obtendo assim o semivariograma empírico (Warrick & Myers, 1987). Para obter o semivariograma empírico as semivariâncias entre dois pontos amostrais são calculadas para gerar diferenças pareadas entre pontos para diferentes

distâncias. O semivariograma empírico é então utilizado para ajuste do melhor modelo para o semivariograma teórico(Rijal *et al.*, 2014). No semivariograma quando a semivariância aumenta com o aumento da distância é porquê existe dependência espacial para variável em questão. A partir de determinada distância a semivariância se torna constante. Esta constante semivariância é o patamar (C_0+C), a distância para qual o patamar é atingido é o alcance (A_0) e o valor de semivariância quando a distância é igual a zero é chamado de efeito pepita (C_0) (Liebhold *et al.*, 1993). O efeito pepita, o alcance, e o patamar foram calculados para cada modelo(Matheron, 1963; Isaaks & Srivastava, 1989).Com esses parâmetros foi verificado se a dependência espacial era igual para todas as direções.

Quando o semivariograma tem um patamar definido os modelos ajustados podem ser esférico, exponencial e gaussiano(Isaaks & Srivastava, 1989).Dessa forma foram ajustados esses três modelos para a densidade de *H. mangiferae* e para a severidade de *C. fimbriata* para cada estação durante o período de monitoramento. Para cada estação foi escolhido o melhor modelo entre os modelos ajustados pela validação cruzada, usando-se todos os pontos de amostragem(Liebhold *et al.*, 1993). Pela validação cruzada foram obtidos os parâmetros β_0 (intercepto) e β_1 (inclinação) do ajuste do modelo de regressão linear entre os valores observados e os estimados pelo modelo de semivariograma(Isaaks & Srivastava, 1989). Também foi utilizado a soma dos quadrados do resíduo (SQR) e o coeficiente de determinação da regressão (R^2) para validação dos modelos. Os modelos escolhidos foram aqueles que apresentaram menor intercepto, maior inclinação (Próxima de 1), menor soma de quadrados do resíduo e maiores coeficientes de regressão.

Após a seleção do modelo, utilizou-se a metodologia da Krigagem para construção dos mapas de distribuição espacial do besouro e da doença (Oliver & Webster, 1990). Essa metodologia foi utilizada por fornecer melhores previsões e estimativas com menores variâncias do que outros métodos de interpolação (Webster & Oliver, 2007; Li & Heap, 2011). Todas as análises espaciais foram realizadas utilizando o programa GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences Versão 9.0 (Robertson, 2008).

Finalmente calculou-se o grau de dependência espacial (GDE) usando o cálculo da razão entre o efeito pepita e o patamar $C_0/(C_0+C)$ para as densidades populacionais de *H. mangiferae* e a severidade de *C. fimbriata* (Cambardella et al. 1994). A dependência espacial foi considerada forte quando os valores estimados foram menores ou iguais a 0,25; moderada com valores entre 0,25 e 0,75 e fraca acima de 0,75 (Cambardella et al., 1994; Sciarretta & Trematerra, 2006).

RESULTADOS

No pomar 1 houve maiores percentagens de mangueiras atacadas pelo besouro *H. mangiferae* e infectadas pelo fungo *C. fimbriata* do que o pomar 2. Nos dois pomares as percentagens de mangueiras atacadas pelo besouro *H. mangiferae* e pelo fungo *C. fimbriata* variaram ao longo do tempo. Houve aumento da percentagem de árvores atacadas pelo besouro e infectadas pelo fungo com o passar do tempo. Nos dois pomares a percentagem de mangueiras atacadas pelo besouro sempre foi maior do que a percentagem de mangueiras infectadas pelo fungo (Figura 1). No pomar 1 ocorreram dois períodos com picos populacionais de ataque do besouro e do fungo a mangueira: o primeiro ocorreu entre dezembro de 2012 e fevereiro de 2013 e o

segundo ocorreu em setembro de 2014 (Figura 1A). Já no pomar 2 foram observados cinco períodos com picos populacionais de ataque do besouro e do fungo a mangueira: em dezembro de 2012, em julho de 2013, em maio de 2014, setembro de 2014 e fevereiro de 2015 (Figura 1B). As intensidades de ataque do besouro e do fungo à mangueira não apresentaram sazonalidade já que os picos de ataque destes dois organismos ocorreram em diferentes períodos do ano nos dois pomares.

Devido à proximidade entre os dois pomares eles apresentaram as mesmas variações climáticas. As temperaturas máximas do ar ocorreram entre os meses de novembro e março e as temperaturas mínimas entre maio e agosto para todos os anos das avaliações. A temperatura média durante o período experimental foi de $24,50 \pm 0,09$ °C e ela variou de 22 a 28 °C. A umidade relativa média do ar foi 45% e ela variou de 15 a 100 %. As maiores precipitações pluviométricas coincidiram com os períodos mais quentes com maiores intensidades ocorrendo entre outubro e abril de cada ano (Figura 2).

Foram ajustados 156 modelos de semivariogramas da distribuição espacial do besouro *H. mangiferae* e do fungo *C. fimbriata* nas plantas de manga entre o inverno de 2012 e o inverno de 2015 nos dois pomares. Destes 156 modelos ajustados foram selecionados 52 modelos por eles apresentarem β_0 mais próximos de zero, β_1 mais próximos de um, menores somas de quadrados do resíduo e maiores coeficientes de regressão. Dos modelos selecionados 36 foram exponenciais e 16 gaussianos. Tanto os modelos selecionados para *H. mangiferae* quanto para *C. fimbriata* foram isotrópicos. Os alcances dos semivariogramas para *H. mangiferae* variaram de 141,90 a 263,89 m no pomar 1 e entre 40,64 a 138,41 m no pomar 2. Os alcances dos semivariogramas para

C. fimbriata variaram de 150,47 a 234,17 m no pomar 1 e entre 45,44 a 101,28 no pomar 2 (Tabelas 1 e 2).

O grau de dependência espacial (GDE) dos modelos de semivariogramas para *H. mangiferae* variou de 0,29 a 0,74 no pomar 1 e entre 0,55 a 0,78 no pomar 2. Para *C. fimbriata* o grau de dependência espacial variou de 0,43 a 0,67 m no pomar 1 e entre 0,64 e 0,78 no pomar 2. A maioria dos modelos selecionados (94%) apresentaram dependência espacial moderada ($0,25 < GDE < 0,75$) e o restante desses modelos (6%) apresentaram dependência espacial fraca ($GDE > 0,75$) (Tabelas 1 e 2).

Observando os mapas de distribuição espacial do besouro e do fungo verifica-se um aumento de árvores plantas atacadas por *H. mangiferae* e *C. fimbriata*. Também se verifica que colonização de novas plantas pelo besouro e pelo fungo ocorreram tanto próximas quanto distantes a plantas já atacadas. Observou-se em ambos os pomares que os mapas de distribuição espacial do fungo e do besouro tiveram uma grande sobreposição. Os novos focos de ataque por *C. fimbriata* nos pomares foram precedidos pela colonização de plantas pelos besouros (Figuras 3 e 4).

DISCUSSÃO

Este trabalho fornece várias evidências que os besouros são importantes na dinâmica da seca da mangueira, demonstrando que *H. mangiferae* é o principal meio de dispersão do fungo a curtas e longas distâncias. Os trabalhos existentes com os meios de dispersão se limitaram basicamente em provar a capacidade de transmissão da doença, não determinando o real papel de cada um desses meios na dinâmica da doença

no campo (Masood *et al.*, 2008; Masood *et al.*, 2010; Masood & Saeed, 2012; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013).

A colonização de novas mangueiras nos pomares pelo besouro e pelo fungo ocorreu de duas formas. A primeira foi pelo surgimento de novas plantas atacadas distantes daquelas já atacadas. A segunda foi pelo surgimento de novas plantas atacadas próximas a aquelas anteriormente atacadas. Em ambos os casos fica evidente o papel de *H. mangiferae* na dispersão do fungo. Isso pode ser observado nos mapas de distribuição espacial dessas espécies em ambos os pomares avaliados (Figuras 3 e 4). Pelos mapas é possível notar que os novos focos de plantas atacadas pelo fungo, sejam distantes ou próximas das já atacadas, surgiram nos locais onde anteriormente o besouro tinha iniciado seu ataque. Isto possivelmente levou a grande sobreposição dos locais de ocorrência do besouro e do fungo, mostrando que onde o besouro se estabelece posteriormente ocorre o estabelecimento do fungo.

Além dos fatos acima citados, estão os valores similares dos alcances e dos graus de dependência espacial para as duas espécies (Tabelas 1 e 2). Se outros fatores que não os besouros estivessem atuando em maior grau, seria de se esperar que essas diferenças fossem maiores entre os valores observados para *H. mangiferae* e *C. fimbriata*. Patógenos de plantas lenhosas que produzem estruturas de resistência no solo, ao se dispersar por esse meio têm demonstrado possuir alto grau de dependência espacial e com novas plantas infectadas surgindo vizinhas a plantas previamente infectadas, principalmente dentro das fileiras (Navas-Cortés *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2013), fato que não aconteceu com *C. fimbriata* em manga uma vez que os modelos foram isotópicos apresentando alcance igual para diferentes direções, o que indica uma dispersão igual todas as direções (Tabelas 1 e 2).

As outras fortes evidências foram encontradas no que diz respeito a variação sazonal das árvores infestadas por *H. mangiferae* e *C. fimbriata*. O fato de o número de árvores infestadas pelo besouro ter sido sempre maior do que aquelas infectadas pelo fungo mostra que a colonização de novas árvores ocorreu primeiro pelo besouro e posteriormente estas plantas foram infectadas pelo fungo (Figura 1). Outro indicativo está no fato de ambas as populações apresentarem flutuações populacionais muito similares, com coincidências dos picos de infestação (Figura 1). Além disso, para que a doença tenha vindo através de mudas, sintomas deveriam ter aparecido desde o início de implantação dos pomares. No entanto esse fato só foi ocorrer depois do pomar estabelecido e com produtividade estabelecida como relatado pelos produtores. Isso sugere que mesmo as primeiras infestações ocorreram por inócuos trazidos pelos besouros.

O aumento de plantas infestadas foi maior em plantas próximas aquelas já infestadas. Este fato pode estar relacionado ao processo de colonização das árvores pelos besouros. No processo de colonização, diversas espécies de Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) apresentam um mesmo padrão, o que pode também estar ocorrendo com *H. mangiferae*. Nesse processo os primeiros besouros a chegar a uma nova planta liberam um feromônio de agregação e dessa forma indicam que aquela árvore está propícia à colonização, guiando outros besouros para a mesma planta (Six & Wingfield 2011). Após saturação dessas árvores pelos besouros, eles liberam um feromônio de repelência fazendo com que os próximos indivíduos procurem outras plantas. Por se tratar de um pomar comercial, a chance de encontro com árvores vizinhas é maior fazendo com que elas tenham maior probabilidade de colonização, pois serão encontradas primeiro e terão o processo acelerado

pelos feromônios dos insetos (Coulson, 1979; Lieutier *et al.*, 2009; Six & Wingfield, 2011). Já em plantas distantes a colonização pode ter se dado tanto por indivíduos dos próprios pomares como indivíduos vindos de fora, uma vez que a região possui vários locais com ocorrência dos besouros e do fungo.

Organismos que possuem padrão sazonal de flutuação populacional variam suas densidades ao longo do tempo e possuem picos populacionais em épocas específicas do ano em resposta a variações de fatores do ambiente, sobretudo de elementos climáticos como a temperatura do ar, fotoperíodo e chuvas (Schowalter, 2006). Portanto os padrões de flutuação populacionais do besouro *H. mangiferae* e do fungo *C. fimbriata* não foram sazonais já que as percentagens de mangueiras atacadas por estes organismos aumentaram ao longo do tempo e cada uma destas espécies não apresentaram picos populacionais nas mesmas épocas em diferentes anos.

O crescimento das populações de *H. mangiferae* e *C. fimbriata* ao longo do tempo sem apresentar um padrão sazonal se deve, possivelmente aos pomares onde foi realizada esta pesquisa terem apresentado condições favoráveis a estes organismos ao longo dos anos. Assim tanto as plantas de manga como as condições climáticas nos dois pomares ao longo dos anos devem ter sido sempre favoráveis ao besouro e ao fungo. Com relação às plantas de manga a variedade cultivada nos dois pomares era a espada que constitui um genótipo altamente suscetível ao fungo *C. fimbriata* (Araujo *et al.*, 2014b). Com relação as condições climáticas a temperatura ótima para *H. mangiferae* e *C. fimbriata* está entre 24 e 26°C (Webster & Butler, 1967; Masood *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2015a) temperaturas estas que são próximas às verificadas nos pomares ($24,50 \pm 0,09$). Com relação ao efeito da chuva sobre *H. mangiferae* e *C. fimbriata* tem se verificado que os locais com

estação seca e chuvas definidas como ocorre na região de realização deste trabalho são ideais para estes dois organismos como observado no Capítulo 1 desta tese.

Alguns estudos têm demonstrado que em algumas espécies as variações populacionais são aleatórias sendo que nesta situação suas populações são reguladas pela sua densidade (Boopathi *et al.*, 2015). No entanto, este não parece ser o caso do besouro *H. mangiferae*, já que em locais de maior variação de temperatura do ar, umidade relativa do ar e chuvas como ocorre no Paquistão a sua flutuação populacional apresenta sazonalidade (Masood *et al.*, 2012).

A seca da mangueira é uma doença muito agressiva, tanto no que diz respeito à colonização da planta pelo fungo quanto pelos besouros, o que torna difícil parar o processo de colonização de uma planta sem a adoção de medidas de controle (Rossetto & Ribeiro, 1990; Pereira, 2013; Araujo *et al.*, 2014b; Oliveira *et al.*, 2015a). No entanto, foram observados períodos onde ocorreu a diminuição da proporção de árvores com a presença desses organismos, mostrando que em algumas mangueiras ocorreu redução grau de infecção da planta pelo fungo e pelo besouro. Esse fato ocorreu, possivelmente devido à ação dos mecanismos de defesa da planta ao fungo e ao besouro. Assim mesmo em variedades suscetíveis como é o caso da manga espada usada neste trabalho é possível observar a ação da defesa da planta contra insetos e patógenos (Trapp & Croteau, 2001; Lieutier, 2002; Lieutier, 2004).

Em mangueira ainda não existem estudos sobre os mecanismos de resistência contra *H. mangiferae* e *C. fimbriata*. No entanto existem estudos (Franceschi *et al.*, 2005; Diguistini *et al.*, 2007) com outras espécies de plantas que sofrem ataques por besouros e fungos com características similares às

espécies envolvidas na seca da mangueira. Entre os principais mecanismos de defesa utilizados por plantas lenhosas contra esse grupo de organismos estão a eliminação de galhos atacados pelo besouro e pelo fungo e a liberação de resina (Trapp & Croteau, 2001; Lieutier, 2002; Lieutier, 2004; Franceschi *et al.*, 2005; Diguistini *et al.*, 2007; Lieutier *et al.*, 2009). A eliminação de galhos se dá principalmente por meio de reação de hipersensibilidade. As plantas nesta situação liberam compostos que invadem os espaços intercelulares e células de crivo, conduzindo assim à morte dos tecidos afetados e consequente eliminação de partes afetadas, principalmente em galhos menores (Lieutier, 2002). Esta reação se desenvolve além da área infestada pelos insetos e seus fungos simbiotes o que ajuda a parar o processo de colonização (Lieutier, 2002; Lieutier, 2004).

Outro mecanismo de defesa das plantas a besouros e fungos que atacam seu caule são as resinas (Lieutier, 2004). Entre os principais componentes das resinas estão os terpenos e compostos fenólicos que têm ação tóxica e repelente contra insetos além de terem ação bactericida e antifúngica (Phillips & Croteau, 1999; Trapp & Croteau, 2001; Heldt, 2005). Observou-se durante este trabalho que a resina produzida pelo caule das mangueiras também exerceu efeito físico contra o besouro *H. mangiferae*. Verificou-se que algumas das mangueiras atacadas por *H. mangiferae* produziam resina que expelia adultos de orifícios no caule. Também observou-se adultos de *H. mangiferae* mortos e aderidos na resina produzida pelo caule das plantas atacadas. As galerias feitas pelos besouros provocam o rompimento dos vasos e o extravasamento da resina para as galerias feitas por estes insetos (Lieutier, 2002).

Nosso trabalho mostra ainda que é importante se levar em conta o besouro ao se trabalhar com o desenvolvimento de variedades resistentes à seca da mangueira. Diversos estudos com variedades de manga resistentes ao fungo têm sido realizados, porém estes trabalhos lidam com inoculações artificiais do patógeno (Araujo *et al.*, 2014a; Araujo *et al.*, 2014b). Como demonstrado em nosso estudo os besouros são muito importantes na dinâmica da doença e podem desempenhar um importante papel na seleção de variedades resistentes. Além disso, esses besouros podem reduzir as defesas das plantas e dessa forma facilitar o estabelecimento do fungo (Six & Wingfield, 2011).

Falhas no controle de pragas e doenças são muitas vezes resultado da falta de conhecimento das dinâmicas desses organismos a campo. Este estudo ajuda no entendimento da dinâmica espaço-temporal tanto do besouro vetor quanto do fungo causador da seca da mangueira. Observa-se que regiões onde se têm a ocorrência de condições favoráveis para essas espécies (temperatura média de $24,50 \pm 0,09^{\circ}\text{C}$, períodos secos e chuvosos bem definidos e umidade relativa do ar alta) necessitam de monitoramento constante para eliminação de focos do besouro e da doença. Como observado, as plantas atacadas exercem forte papel na colonização de novas plantas e devem ser eliminadas o mais rápido possível, com necessidade de queima para se eliminar os besouros e o fungo. O quanto antes partes atacadas da planta ou mesmo a planta inteira forem eliminadas, menores serão as chances de contaminação de novas plantas. Além disso, isso pode prevenir a contaminação dos solos pelo fungo, que quando acontece pode tornar a área imprópria para o plantio de novas plantas (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005).

Ao contrário do que se supõe até o momento, nosso trabalho mostra que a ocorrência da seca da mangueira é precedida do ataque de *H. mangiferae* em mangueira. Problemas com a seca da mangueira tem se tornado mais frequentes nos últimos anos, tanto no Brasil quanto em outros países onde foi introduzida recentemente (Rossetto & Ribeiro, 1990; Fateh *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2006). Este trabalho demonstra que os besouros além de serem capazes de disseminar o fungo são de extrema importância na sua dinâmica espaço-temporal. Além disso, locais com condições climáticas favoráveis aos besouros e a doença devem receber grande atenção, pois estarão sempre sob forte pressão desses organismos.

LITERATURA CITADA

- Accordi, S. The survival of *Ceratocystis fimbriata* f. sp. platani in the soil. *Informatore Fitopatologico*, v.39, n.5, p.57-62. 1989.
- Al Adawi, A. O.; Al Jabri, R.; Deadman, M.; Barnes, I.; Wingfield, B.; Wingfield, M. J. The mango sudden decline pathogen, *Ceratocystis manginecans*, is vectored by *Hypocryphalus mangiferae* (Coleoptera: Scolytinae) in Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.135, n.2, p.243-251. 2013.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Al Maqbali, Y. M.; Al Jahwari, A. A.; Al Saadi, B. A.; Al Amri, I. S.; Wingfield, M. J. Aetiology and causal agents of mango sudden decline disease in the Sultanate of Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.116, n.4, p.247-254. 2006.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Khan, A. J.; Al Maqbali, Y. M. *Diplodia theobromae* associated with sudden decline of mango in the Sultanate of Oman. *Plant Pathology*, v.52, n.3, p.419-419. 2003.
- Araujo, L.; Bispo, W. M. S.; Cacique, I. S.; Moreira, W. R.; Rodrigues, F. Á. Resistance in Mango Against Infection by *Ceratocystis fimbriata*. *Phytopathology*, v.104, n.8, p.820-833. 2014a.
- Araujo, L.; Bispo, W. M. S.; Cacique, I. S.; Cruz, M. F. A.; Rodrigues, F. A. Histopathological aspects of mango resistance to the infection process of *Ceratocystis fimbriata*. *Plant Pathology*, v.63, n.6, p.1282-1295. 2014b.
- Barrigossi, J. A. F.; Young, L. J.; Crawford, C. A. G.; Hein, G. L.; Higley, L. G. Spatial and Probability Distribution of Mexican Bean Beetle (Coleoptera: Coccinellidae) Egg Mass Populations in Dry Bean. *Environmental Entomology*, v.30, n.2, p.244-253. 2001.

- Boopathi, T.; Singh, S. B.; Manju, T.; Ramakrishna, Y.; Akoijam, R. S.; Chowdhury, S.; Singh, N. H.; Ngachan, S. V. Development of Temporal Modeling for Forecasting and Prediction of the Incidence of Lychee, *Tessaratomya papillosa* (Hemiptera: Tessaratomidae), Using Time-Series (ARIMA) Analysis. *Journal of Insect Science*, v.15, n.1, 2015.
- Brenner, R. J.; Focks, D. A.; Arbogast, R. T.; Weaver, D. K.; Shuman, D. Practical Use of Spatial Analysis in Precision Targeting for Integrated Pest Management. *American Entomologist*, v.44, n.2, p.79-102. 1998.
- Cambardella, C.; Moorman, T.; Parkin, T.; Karlen, D.; Novak, J.; Turco, R.; Konopka, A. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, v.58, n.5, p.1501-1511. 1994.
- Coulson, R. N. Population Dynamics of Bark Beetles. *Annual Review of Entomology*, v.24, n.1, p.417-447. 1979.
- Diguistini, S.; Ralph, S. G.; Lim, Y. W.; Holt, R.; Jones, S.; Bohlmann, J.; Breuil, C. Generation and annotation of lodgepole pine and oleoresin-induced expressed sequences from the blue-stain fungus *Ophiostoma clavigerum*, a Mountain Pine Beetle-associated pathogen. *FEMS Microbiology Letters*, v.267, n.2, p.151-158. 2007.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nation in <http://faostat3.fao.org/home/E>. Accessed September 26th. (Ed.). 2013.
- Fateh, F. S.; Kazmi, M. R.; Ahmad, I.; Ashraf, M. *Ceratocystis fimbriata* isolated from vascular bundles of declining mango trees in Sindh, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, v.38, n.4, p.1257-1259. 2006.
- Ferreira, M. A.; Harrington, T. C.; Gongora-Canul, C. C.; Mafia, R. G.; Zauza, E. a. V.; Alfenas, A. C. Spatial-temporal patterns of *Ceratocystis* wilt in Eucalyptus plantations in Brazil. *Forest Pathology*, v.43, n.2, p.153-164. 2013.
- Franceschi, V. R.; Krokene, P.; Christiansen, E.; Krekling, T. Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. *New Phytologist*, v.167, n.2, p.353-376. 2005.
- Heldt, H. W. *Plant Biochemistry*. London: Elsevier Academic Press. 2005
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press. 1989
- Li, J. & Heap, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics*, v.6, n.34, p.228-241. 2011.
- Liebholt, A. M.; Rossi, R. E.; Kemp, W. P. Geostatistics and Geographic Information Systems in Applied Insect Ecology. *Annual Review of Entomology*, v.38, n.1, p.303-327. 1993.
- Lieutier, F. Host resistance to bark beetles and its variations. In: Lieutier, F.; Day, K.; Battisti, A.; Grégoire, J. C.; Evans, H. (Ed.). *Bark and wood boring*

- insects in living trees in Europe, A synthesis,. Dordrecht: Kluwer, 2004. p.135–180
- Lieutier, F. Mechanisms of resistance in conifers and bark beetle attack strategies. In: Wagner, M. R.;Clancy, K. M.;Lieutier, F.;Paine, T. D. (Ed.). Mechanisms and deployment of resistance in trees to insects. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002. p.31-77
- Lieutier, F.; Yart, A.; Salle, A. Stimulation of tree defenses by Ophiostomatoid fungi can explain attack success of bark beetles on conifers. *Annals of Forest Science*, v.66, n.8, p.801. 2009.
- Madden, L. V. & Hughes, G. Plant Disease Incidence: Distributions, Heterogeneity, and Temporal Analysis. *Annual Review of Phytopathology*, v.33, n.1, p.529-564. 1995.
- Masood, A. & Saeed, S. Bark beetle, *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) is a vector of mango sudden death disease in Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, v.44, n.2, p.813-820. 2012.
- Masood, A.; Saeed, S.; Erbilgin, N.; Jung Kwon, Y. Role of stressed mango host conditions in attraction of and colonization by the mango bark beetle *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) and in the symptom development of quick decline of mango trees in Pakistan. *Entomological Research*, v.40, n.6, p.316-327. 2010.
- Masood, A.; Saeed, S.; Iqbal, N.; Ullah, M. A. Spatial and Temporal Infestation of Mango Bark Beetle, *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae) Found on Mango Sudden Death Trees in Orchards. *Pakistan J. Zool*, v.44, n.6, p.1545-1553. 2012.
- Masood, A.; Saeed, S.; Sajjad, A. Characterization and damage patterns of different bark beetle species associated with mango sudden death syndrome in Punjab, Pakistan. *Pakistan Entomologist*, v.30, p.163-168. 2008.
- Masood, A.; Saeed, S.; Sajjad, A.; Ali, M. Life cycle and biology of mango bark beetle, *Hypocryphalus mangiferae* (Stebbing), a possible vector of mango sudden death disease in Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, v.41, n.4, p.281-288. 2009.
- Matheron, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v.58, n.8, December 1, 1963, p.1246-1266. 1963.
- Navas-Cortés, J. A.; Landa, B. B.; Mercado-Blanco, J.; Trapero-Casas, J. L.; Rodríguez-Jurado, D.; Jiménez-Díaz, R. M. Spatiotemporal Analysis of Spread of Infections by *Verticillium dahliae* Pathotypes Within a High Tree Density Olive Orchard in Southern Spain. *Phytopathology*, v.98, n.2, p.167-180. 2008.
- Oliveira, L. S. S.; Guimarães, L. M. S.; Ferreira, M. A.; Nunes, A. S.; Pimenta, L. V. A.; Alfenas, A. C. Aggressiveness, cultural characteristics and genetic variation of *Ceratocystis fimbriata* on *Eucalyptus* spp. *Forest Pathology*, p.n/a-n/a. 2015a.

- Oliveira, L. S. S.; Harrington, T. C.; Ferreira, M. A.; Damacena, M. B.; Al-Sadi, A. M.; Al-Mahmooli, I. H. S.; Alfenas, A. C. Species or Genotypes? Reassessment of Four Recently Described Species of the *Ceratocystis* Wilt Pathogen, *Ceratocystis fimbriata*, on *Mangifera indica*. *Phytopathology*, v.105, n.9, p.1229-1244. 2015b.
- Oliver, M. A. & Webster, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, v.4, n.3, p.313-332. 1990.
- Oliver, M. A. *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Dordrecht: Springer Netherlands. 2010
- Pereira, R. M. Identificação e distribuição de coleobrocas em mangueiras com seca causada por *Ceratocystis fimbriata*. Department of Entomology, Federal University of Viçosa, Viçosa, 2013. 29 p.
- Phillips, M. A. & Croteau, R. B. Resin-based defenses in conifers. *Trends in Plant Science*, v.4, n.5, p.184-190. 1999.
- Rijal, J. P.; Brewster, C. C.; Bergh, J. C. Spatial Distribution of Grape Root Borer (Lepidoptera: Sesiidae) Infestations in Virginia Vineyards and Implications for Sampling. *Environmental Entomology*, v.43, n.3, p.716-728. 2014.
- Robertson, G. P. *GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences: GS+ User's Guide*
- Rosado, J. F.; Picanço, M. C.; Sarmiento, R. A.; Pereira, R. M.; Pedro-Neto, M.; Galdino, T. V. S.; De Sousa Saraiva, A.; Erasmo, E. a. L. Geostatistics as a tool to study mite dispersion in physic nut plantations. *Bulletin of Entomological Research*, v.105, n.04, p.381-389. 2015a.
- Rosado, J. F.; Picanço, M. C.; Sarmiento, R. A.; Silva, R. S.; Pedro-Neto, M.; Carvalho, M. A.; Erasmo, E. a. L.; Silva, L. C. R. Seasonal variation in the populations of *Polyphagotarsonemus latus* and *Tetranychus bastosi* in physic nut (*Jatropha curcas*) plantations. *Experimental and Applied Acarology*, v.66, n.3, p.415-426. 2015b.
- Rossetto, C. J. & Ribeiro, I. J. A. Mango wilt. XII. Recommendations for control. *Revista de Agricultura (Piracicaba)*, v.65, n.2, p.173-180. 1990.
- Schowalter, T. D. *Insect Ecology: An Ecosystem Approach*: Elsevier Science. 2006
- Sciarretta, A. & Trematerra, P. Geostatistical characterization of the spatial distribution of *Grapholita molesta* and *Anarsia lineatella* males in an agricultural landscape. *Journal of Applied Entomology*, v.130, n.2, p.73-83. 2006.
- Sciarretta, A. & Trematerra, P. Geostatistical tools for the study of insect spatial distribution: practical implications in the integrated management of orchard and vineyard pests. *Plant protection science*, v.50, n.2, p.97-110. 2014.

- Silveira, S. F.; Harrington, T. C.; Mussi-Dias, V.; Engelbrecht, C. J. B.; Alfenas, A. C.; Silva, C. R. *Annona squamosa*, a new host of *Ceratocystis fimbriata*. *Fitopatologia Brasileira*, v.31, p.394-397. 2006.
- Six, D. L. & Wingfield, M. J. The Role of Phytopathogenicity in Bark Beetle–Fungus Symbioses: A Challenge to the Classic Paradigm. *Annual Review of Entomology*, v.56, n.1, p.255-272. 2011.
- Software: Plainwell, Gamma Design. 2008
- Souza, A. G. C.; Maffia, L. A.; Murta, H. M.; Alves, Y. H.; Pereira, R. M.; Picanço, M. C. First Report on the Association Between *Ceratocystis fimbriata*, an Agent of Mango Wilt, *Xyleborus affinis*, and the Sawdust Produced During Beetle Colonization in Brazil. *Plant Disease*, v.97, n.8, p.1116-1116. 2013.
- Trapp, S. & Croteau, R. Defensive Resin Biosynthesis in Conifers. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v.52, n.1, p.689-724. 2001.
- Van Wyk, M.; Al Adawi, A. O.; Khan, I. A.; Deadman, M. L.; Al Jahwari, A. A.; Wingfield, B. D.; Ploetz, R.; Wingfield, M. J. *Ceratocystis manginecans* sp. nov., causal agent of a destructive mango wilt disease in Oman and Pakistan. *Fungal Diversity*, v.27, p.213-230. 2007.
- Van Wyk, M.; Al-Adawi, A. O.; Wingfield, B. D.; Al-Subhi, A. M.; Deadman, M. L.; Wingfield, M. J. DNA based characterization of *Ceratocystis fimbriata* isolates associated with mango decline in Oman. *Australasian Plant Pathology*, v.34, n.4, p.587-590. 2005.
- Warrick, A. W. & Myers, D. E. Optimization of sampling locations for variogram calculations. *Water Resources Research*, v.23, n.3, p.496-500. 1987.
- Webster, R. & Oliver, M. A. *Geostatistics for environmental scientists*: John Wiley & Sons. 2007
- Webster, R. K. & Butler, E. E. A Morphological and Biological Concept of the Species *Ceratocystis fimbriata*. *Canadian Journal of Botany*, v.45, n.9, p.1457-1468. 1967.
- Zhang, H.; Lan, Y.; Lacey, R. E.; Huang, Y.; Hoffmann, W. C.; Martin, D.; Bora, G. Analysis of variograms with various sample sizes from a multispectral image. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v.2, n.4, p.62-69. 2010.

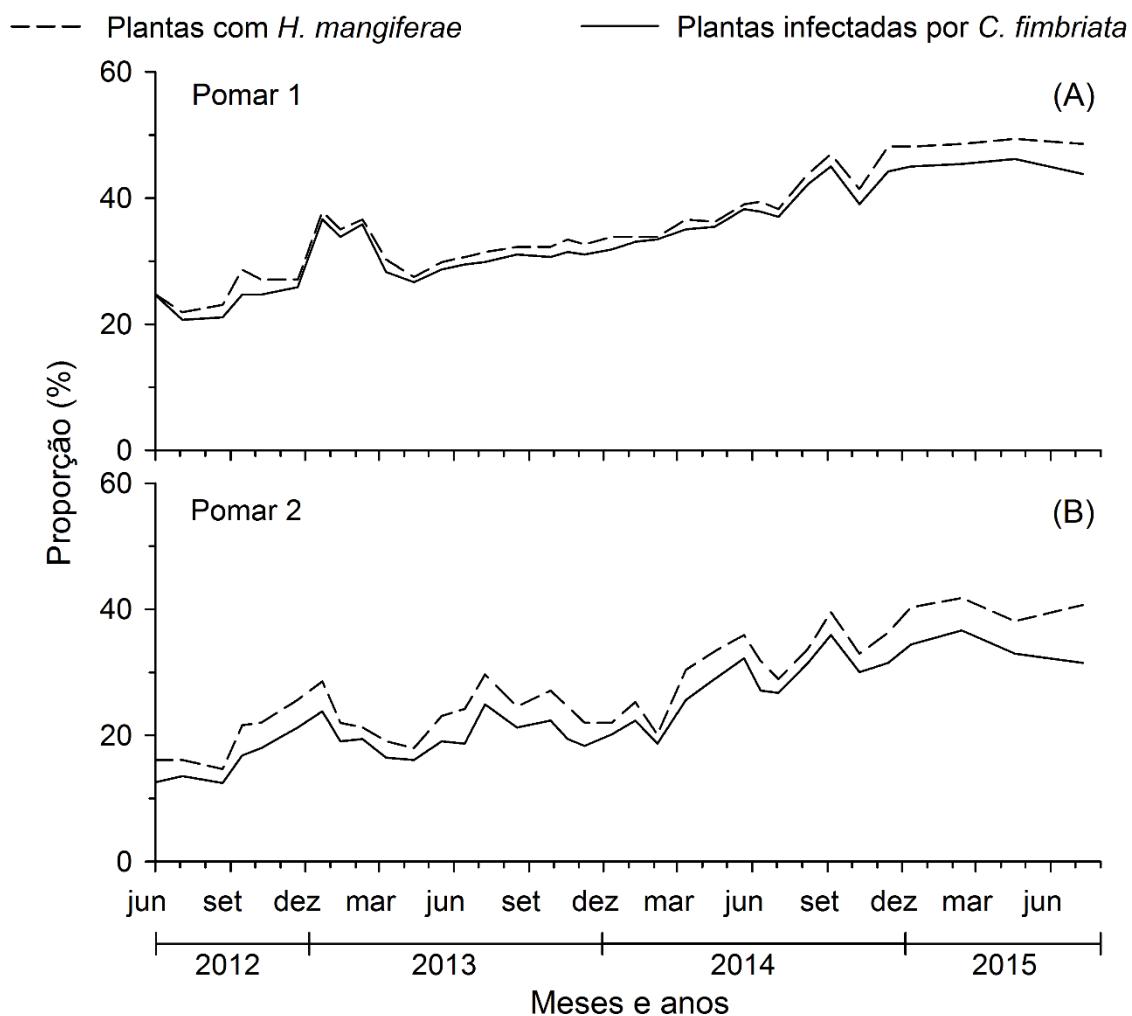


Figura 1. Variação da percentagem de mangueiras atacadas pelo besouro *Hypocryphalus mangiferae* e infectadas com o fungo *Ceratocystis fimbriata* no (A) pomar 1 e (B) pomar 2.

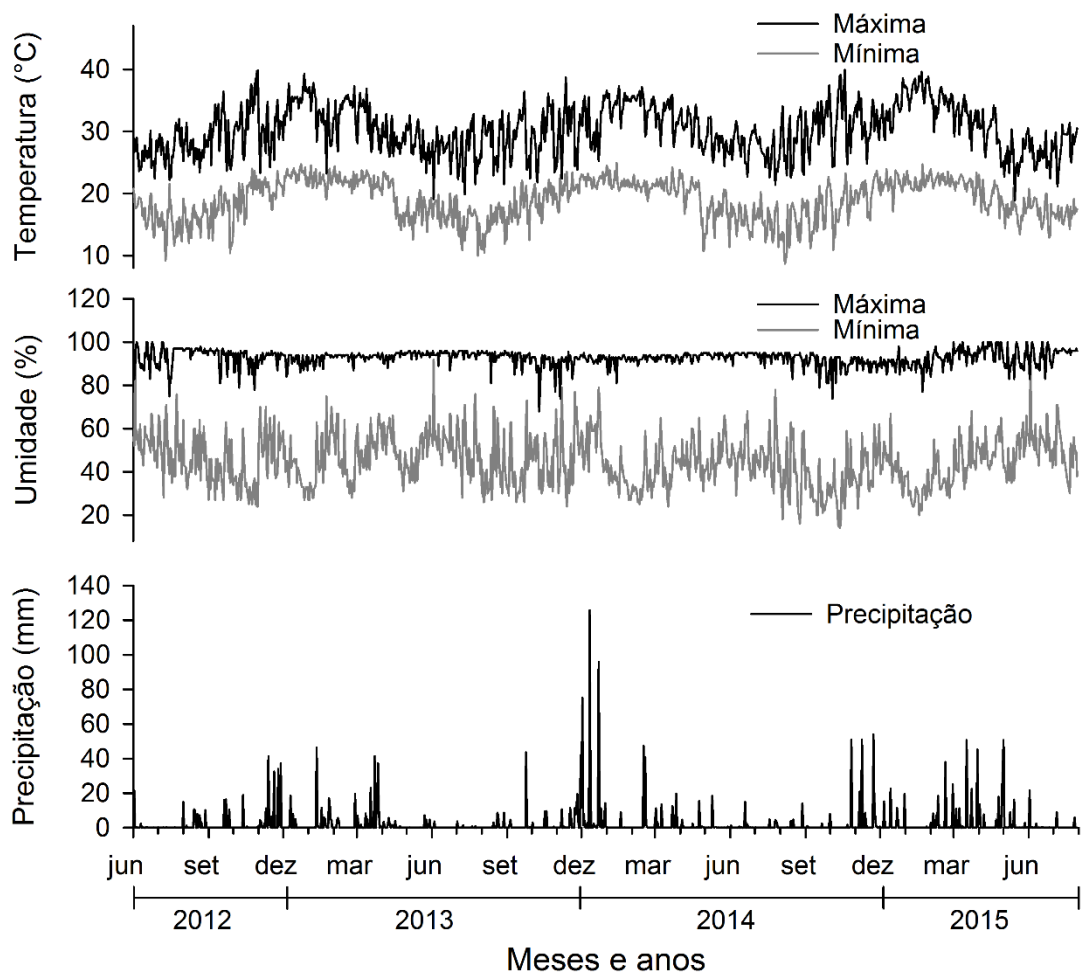


Figura 2. Variação diária da temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica na região onde se encontra pomares de manga durante o período deste trabalho.

Tabela 1. Características dos modelos selecionados das distribuições espaciais de *Hypocryphalusmangiferae* *Ceratocystisfimbriata* no pomar 1.

| Espécie | Ano | Estação do ano | Características do modelo de geoestatística selecionado* | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------|----------------|--|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|--------|------|------|
| | | | Modelo | β_1 | β_0 | SQR | C_0 | C_0+C | A_0 | R^2 | GDE | |
| <i>H. mangiferae</i> | 2012 | Inverno | Exponencial | 0,27 | 1,17 | 47,10 | 11,52 | 21,86 | 198,52 | 0,55 | 0,53 | |
| | 2012 | Primavera | Gaussiano | 0,56 | 1,46 | 700,00 | 32,70 | 67,73 | 183,05 | 0,62 | 0,48 | |
| | 2013 | Verão | Exponencial | 0,35 | 2,63 | 685,00 | 26,07 | 90,56 | 168,37 | 0,41 | 0,29 | |
| | 2013 | Outono | Exponencial | 0,32 | 2,86 | 458,00 | 30,36 | 95,46 | 178,34 | 0,56 | 0,32 | |
| | 2013 | Inverno | Gaussiano | 0,67 | 1,79 | 1130,00 | 90,71 | 121,85 | 204,50 | 0,49 | 0,74 | |
| | 2013 | Primavera | Gaussiano | 0,57 | 2,70 | 1569,00 | 97,77 | 215,73 | 263,89 | 0,86 | 0,45 | |
| | 2014 | Verão | Exponencial | 0,63 | 2,40 | 1219,00 | 76,08 | 170,52 | 208,82 | 0,66 | 0,45 | |
| | 2014 | Outono | Exponencial | 0,65 | 2,24 | 1760,00 | 66,04 | 172,21 | 214,29 | 0,60 | 0,38 | |
| | 2014 | Inverno | Exponencial | 0,68 | 2,11 | 1731,00 | 73,68 | 163,84 | 208,82 | 0,51 | 0,45 | |
| | 2014 | Primavera | Exponencial | 0,72 | 1,97 | 1672,00 | 75,10 | 156,72 | 183,46 | 0,52 | 0,48 | |
| | 2015 | Verão | Exponencial | 0,73 | 1,93 | 1549,00 | 78,01 | 156,19 | 211,83 | 0,54 | 0,50 | |
| | 2015 | Outono | Exponencial | 0,74 | 1,96 | 686,00 | 66,60 | 133,30 | 141,90 | 0,55 | 0,50 | |
| | 2015 | Inverno | Exponencial | 0,77 | 1,67 | 327,00 | 84,56 | 145,60 | 216,81 | 0,77 | 0,58 | |
| | <i>C. fimbriata</i> | 2012 | Inverno | Gaussiano | 0,63 | 5,68 | 82547,00 | 1033,23 | 1542,72 | 184,37 | 0,75 | 0,67 |
| | | 2012 | Primavera | Gaussiano | 0,67 | 6,46 | 85282,00 | 1216,11 | 1886,70 | 175,93 | 0,86 | 0,64 |
| 2013 | | Verão | Gaussiano | 0,67 | 6,78 | 84604,00 | 1225,73 | 1885,82 | 167,91 | 0,86 | 0,65 | |
| 2013 | | Outono | Gaussiano | 0,66 | 7,58 | 49915,00 | 964,11 | 1992,74 | 200,96 | 0,86 | 0,48 | |
| 2013 | | Inverno | Gaussiano | 0,80 | 5,03 | 77339,00 | 1471,00 | 2252,86 | 150,47 | 0,94 | 0,65 | |
| 2013 | | Primavera | Gaussiano | 0,83 | 4,77 | 28506,00 | 1538,75 | 2538,45 | 182,01 | 0,98 | 0,61 | |
| 2014 | | Verão | Gaussiano | 0,86 | 4,19 | 49722,00 | 1504,54 | 2670,87 | 178,54 | 0,98 | 0,56 | |
| 2014 | | Outono | Gaussiano | 0,90 | 3,21 | 15641,00 | 1516,00 | 3033,00 | 234,17 | 0,99 | 0,50 | |
| 2014 | | Inverno | Gaussiano | 0,91 | 3,20 | 17183,00 | 1515,00 | 3044,00 | 230,54 | 0,99 | 0,50 | |
| 2014 | | Primavera | Gaussiano | 0,91 | 3,70 | 17654,00 | 1461,00 | 3008,00 | 200,92 | 0,99 | 0,49 | |
| 2015 | | Verão | Gaussiano | 0,92 | 3,05 | 24994,00 | 1463,00 | 3040,00 | 193,82 | 0,99 | 0,48 | |
| 2015 | | Outono | Gaussiano | 0,93 | 2,73 | 29589,00 | 1518,00 | 3545,00 | 226,90 | 0,99 | 0,43 | |
| 2015 | | Inverno | Gaussiano | 0,93 | 3,14 | 12869,00 | 1549,00 | 3642,00 | 222,39 | 0,99 | 0,43 | |

No cabeçalho: β_0 e β_1 são o intercepto e a inclinação da curva da validação cruzada da krigagem, respectivamente. SQR = soma dos quadrados do resíduo, C_0 = efeito pepita, $C+C_0$ = patamar, A_0 = alcance (m), R^2 = coeficiente de determinação e GDE = grau de dependência espacial.

Tabela 2. Características dos modelos selecionados das distribuições espaciais de *Hypocryphalusmangiferae* *Ceratocystisfimbriata* no pomar 2.

| Espécie | Ano | Estação do ano | Características do modelo de geoestatística selecionado* | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------|----------------|--|-------------|-----------|--------|---------|---------|--------|-------|------|------|
| | | | Modelo | β_1 | β_0 | SQR | C_0 | C_0+C | A_0 | R^2 | GDE | |
| <i>H. mangiferae</i> | 2012 | Inverno | Exponencial | 0,35 | 0,87 | 12,30 | 16,59 | 29,90 | 54,96 | 0,71 | 0,55 | |
| | 2012 | Primavera | Exponencial | 0,30 | 1,57 | 73,60 | 55,47 | 70,75 | 138,41 | 0,28 | 0,78 | |
| | 2013 | Verão | Exponencial | 0,40 | 1,06 | 35,00 | 20,39 | 32,78 | 57,78 | 0,16 | 0,62 | |
| | 2013 | Outono | Exponencial | 0,32 | 1,16 | 33,80 | 20,69 | 33,91 | 81,31 | 0,44 | 0,61 | |
| | 2013 | Inverno | Exponencial | 0,33 | 1,54 | 115,00 | 43,51 | 69,79 | 111,04 | 0,65 | 0,62 | |
| | 2013 | Primavera | Exponencial | 0,10 | 2,62 | 116,00 | 33,00 | 66,01 | 42,60 | 0,67 | 0,50 | |
| | 2014 | Verão | Exponencial | 0,36 | 1,94 | 58,10 | 43,55 | 61,78 | 40,64 | 0,23 | 0,70 | |
| | 2014 | Outono | Exponencial | 0,23 | 2,33 | 38,90 | 32,29 | 46,81 | 78,75 | 0,38 | 0,69 | |
| | 2014 | Inverno | Exponencial | 0,20 | 2,57 | 49,30 | 37,35 | 56,29 | 69,97 | 0,55 | 0,66 | |
| | 2014 | Primavera | Exponencial | 0,17 | 3,14 | 101,00 | 47,59 | 69,01 | 60,04 | 0,51 | 0,69 | |
| | 2015 | Verão | Exponencial | 0,22 | 3,40 | 106,00 | 53,01 | 72,59 | 62,09 | 0,38 | 0,73 | |
| | 2015 | Outono | Exponencial | 0,24 | 3,26 | 120,00 | 56,66 | 74,04 | 58,31 | 0,20 | 0,77 | |
| | 2015 | Inverno | Exponencial | 0,15 | 4,20 | 200,00 | 47,17 | 74,51 | 63,73 | 0,52 | 0,63 | |
| | <i>C. fimbriata</i> | 2012 | Inverno | Exponencial | 0,44 | 4,59 | 10952 | 572,88 | 899,35 | 87,17 | 0,56 | 0,64 |
| | | 2012 | Primavera | Exponencial | 0,45 | 5,35 | 11832 | 609,03 | 989,29 | 71,18 | 0,67 | 0,62 |
| 2013 | | Verão | Exponencial | 0,53 | 4,75 | 11442 | 720,04 | 1068,98 | 79,23 | 0,66 | 0,67 | |
| 2013 | | Outono | Exponencial | 0,54 | 5,31 | 12394 | 827,84 | 1207,20 | 101,28 | 0,65 | 0,69 | |
| 2013 | | Inverno | Exponencial | 0,52 | 5,77 | 13684 | 910,97 | 1263,45 | 83,37 | 0,66 | 0,62 | |
| 2013 | | Primavera | Exponencial | 0,68 | 3,82 | 32284 | 970,65 | 1303,81 | 68,87 | 0,43 | 0,74 | |
| 2014 | | Verão | Exponencial | 0,69 | 3,87 | 39466 | 976,20 | 1365,70 | 58,72 | 0,53 | 0,71 | |
| 2014 | | Outono | Exponencial | 0,51 | 7,37 | 51342 | 1037,76 | 1377,25 | 52,29 | 0,37 | 0,75 | |
| 2014 | | Inverno | Exponencial | 0,48 | 8,25 | 51379 | 1046,80 | 1430,48 | 51,91 | 0,34 | 0,73 | |
| 2014 | | Primavera | Exponencial | 0,55 | 7,74 | 64418 | 1112,03 | 1583,81 | 45,44 | 0,34 | 0,70 | |
| 2015 | | Verão | Exponencial | 0,61 | 7,04 | 37233 | 1261,48 | 1624,54 | 49,48 | 0,46 | 0,78 | |
| 2015 | | Outono | Exponencial | 0,57 | 8,02 | 93574 | 1235,55 | 1726,82 | 67,78 | 0,35 | 0,72 | |
| 2015 | | Inverno | Exponencial | 0,60 | 7,78 | 95136 | 1175,79 | 1772,89 | 52,92 | 0,48 | 0,66 | |

No cabeçalho: β_0 e β_1 são o intercepto e a inclinação da curva da validação cruzada da krigagem, respectivamente. SQR = soma dos quadrados do resíduo, C_0 = efeito pepita, $C+C_0$ = patamar, A_0 = alcance (m), R^2 = coeficiente de determinação e GDE = grau de dependência espacial.

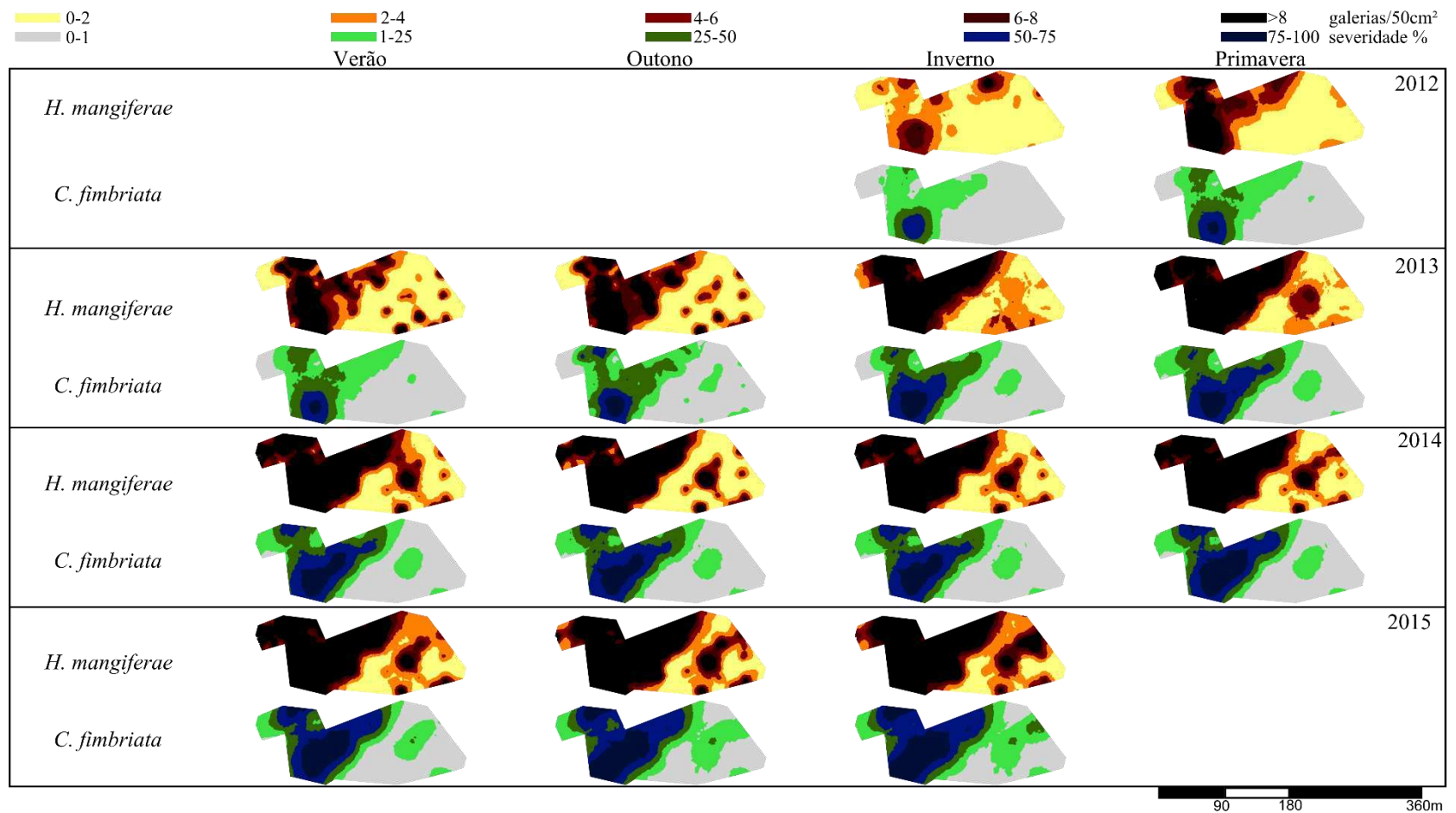


Figura 3. Mapas das distribuições espaciais de *Hypocryphalus mangiferae* e *Ceratocystis fimbriata* nas estações de quatro anos no pomar 1.

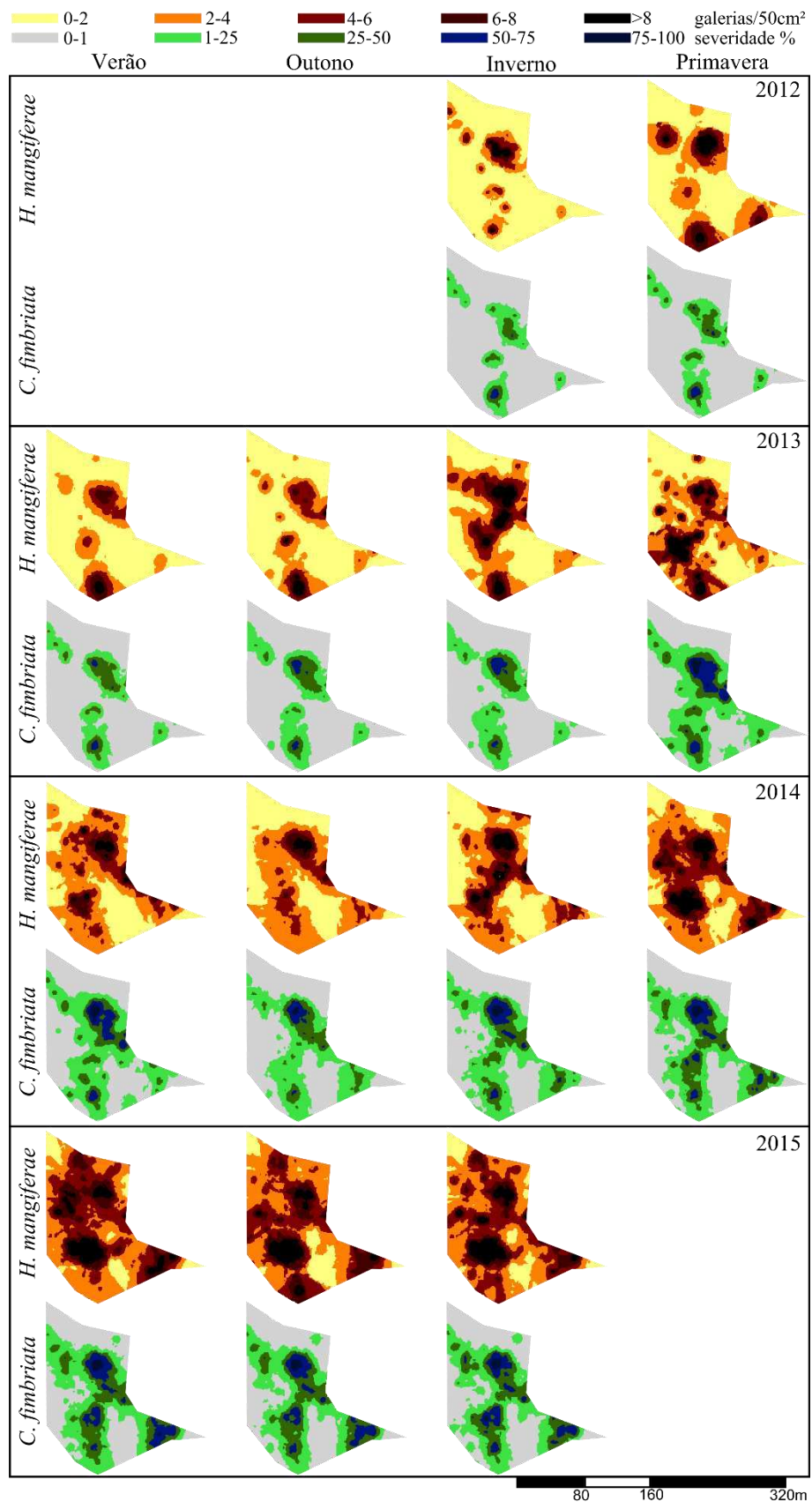


Figura 4. Mapas das distribuições espaciais de *Hypocryphalus mangiferae* e *Ceratocystis fimbriata* nas estações de quatro anos no pomar 2.

MAPPING GLOBAL POTENTIAL RISK OF MANGO SUDDEN DECLINE DISEASE CAUSED BY FUNGUS *Ceratocystis fimbriata*

ABSTRACT

Mango Sudden Decline (MSD), sometimes referred to as mango wilt, is an important disease of mango. This disease is mainly disseminated by the mango bark beetle, *Hypocryphalus mangiferae* (Stebbing), and the infested soils where it is able to survive for long periods. The best way to prevent losses due to MSD is to prevent its establishment in mango production areas. Therefore, our objectives in this study were to: (1) predict the global potential distribution of MSD, (2) identify the mango growing areas that are under potential risk of MSD establishment, and (3) identify climatic factors associated with MSD distribution. Occurrence records were collected in all countries where the disease is currently known to occur in mango. We used the correlative maximum entropy based model (MaxEnt) algorithm to assess the global potential distribution of MSD. The MaxEnt model predicted suitable areas in countries where the disease does not already occur in mango, but where mango is grown. Among these areas are the largest mango producers in the world including India, China, Thailand, Indonesia, and Mexico. The Mean annual temperature (54.3 %), precipitation of coldest quarter (13.7 %), precipitation seasonality (12.9%), and precipitation of driest month (7.2%) were the climatic variables that most contributed to MSD disease potential distribution. The vector mango bark beetle is known to occur beyond the locations where MSD currently occurs and where the model predicted suitable areas, thus showing a high likelihood for disease establishment in areas predicted by our model. This information can be used in designing strategies to prevent introduction and establishment of MSD disease,

and in preparation of efficient Pest Risk Assessment and monitoring programs by mango producing countries.

INTRODUCTION

Several species of fungi, including beneficial and harmful, can be found colonizing a single plant. Among these, approximately 8,000 species of fungi are known to cause problems in plants, leading up to 100% loss of production (Ellis *et al.*, 2008). The fungus *Ceratocystis fimbriata* (Ellis and Halsted) is considered one of the most important species causing disease in woody plants, particularly in several species of agronomic and forestry importance (Oliveira *et al.*, 2015a; Oliveira *et al.*, 2015b). This fungus has different strains infecting many different hosts such as mango, eucalyptus, sweet potato, coffee, cocoa and pomegranate (Montoya & Wingfield, 2006; Harrington *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015a; Oliveira *et al.*, 2015b). Each strain seems to be specific for one host or to have low levels of aggressiveness against the secondary ones (Oliveira *et al.*, 2015a).

On mango (*Mangifera indica* L.), the fungus *C. fimbriata* is the causal agent of the Mango Sudden Decline (MSD) disease, sometimes referred to as mango wilt, an important disease that can lead to plant death in periods as short as two months after the initial infection (Fig 1) (Al Adawi *et al.*, 2006; Masood *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2015b). MSD was first reported in Brazil in 1939 (Al Adawi *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2006). The disease was later observed in Pakistan (Fateh *et al.*, 2006) and the Sultanate of Oman in 1999 (Al Adawi *et al.*, 2006). In these countries MSD has become one of the biggest causes of mango crop losses (Rossetto & Ribeiro, 1990; Litz, 2009; Masood *et al.*, 2012b; Mohsin *et al.*, 2014). In Oman an estimated 60% of the production was lost in the fifth year after MSD introduction (Al Adawi *et al.*, 2003), and around 13% of the trees had to be removed to prevent the spread (Al Adawi *et al.*, 2006). The disease killed over 200,000 mango trees in Oman, and in spite of these

measures by the Ministry of Agriculture and Fisheries in Oman, the spread of MSD disease continued (Al Adawi *et al.*, 2013). In Pakistan, the losses vary between 20 and 60% of the production depending on the part of the country reporting MSD losses (Al Adawi *et al.*, 2006; Masood *et al.*, 2012b).

The most important vectors of MSD are infested soils and the mango bark beetle *Hypocryphalus mangiferae* (Curculionidae: Scolytinae) (Fig 1A) (Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2007; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013). These beetles have mycangia in elytra and mouthparts and therefore are capable of carrying fungal structures over long distances (Pereira, 2013). In the soil, the fungus produces aleurioconidias that works as structures of resistance that enable it to survive for long periods even without the presence of the host (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005). Infestations in new areas usually begin in the branches of the trees where the beetles normally initiate attacks (Pereira, 2013). Through the time the fungus may infect other parts of the plant, such as trunk and root, and after this become present in the soil (Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005; Al Adawi *et al.*, 2013). Once the soil is infested with the fungus, it becomes unsuitable for mango cultivation and can result in the loss of an entire orchard. The best way to avoid losses due to MSD is to prevent its establishment in mango production areas. Prevention can be achieved by pruning and burning the branches or the whole trees immediately after the appearance of the first symptoms of the disease or attack by the beetles. This normally stops the process of the disease establishment by avoiding the fungus to infect other parts of the plant and consequently infest the soil (Rossetto & Ribeiro, 1990; Masood *et al.*, 2014).

Multiple reasons can limit the establishment of pathogens in different locations in the world, including competition from other species, lack of host, lack

of vector, hostile climate, and natural barriers (Elith & Leathwick, 2009; Elith & Franklin, 2013). Climate is one of the factors that most influences the global distribution of a species (Elith & Leathwick, 2009; Mcdowell *et al.*, 2014). Ecological niche models (ENMs) based on the quantitative relationship between environmental variables and species occurrences are among the tools used to predict locations of possible introduction, establishment, and spread of a species (Elith & Leathwick, 2009; Guisan *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014a; Kumar *et al.*, 2014b; Kumar *et al.*, 2014c). One type of ENMs are correlative models which are built by integrating species occurrences with spatial environmental variables of the study area (Bogosian *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2014c).

Recent studies have demonstrated the predictive performance of ENM models (Austin, 2002; Peterson *et al.*, 2007; Kumar *et al.*, 2009; Kumar & Stohlgren, 2009; Kumar *et al.*, 2014b; Kumar *et al.*, 2014c; Kumar *et al.*, 2015a; Kumar *et al.*, 2015b; West *et al.*, 2015). Correlative models are widely used tools for assessing the risk of establishment of a variety of species including insects (Kumar *et al.*, 2014a; Kumar *et al.*, 2014b; Kumar *et al.*, 2014c; Kumar *et al.*, 2015a; Kumar *et al.*, 2015b), aquatic organisms (Kumar *et al.*, 2009; Mcdowell *et al.*, 2014), plants (Stohlgren *et al.*, 2010; West *et al.*, 2015), human diseases (Du *et al.*, 2014), vertebrates (Peterson *et al.*, 2007; Bogosian *et al.*, 2012; Boria *et al.*, 2014), and pathogens (Murray *et al.*, 2011; Flory *et al.*, 2012). The information on species' potential risk of establishment is helpful in developing a Pest Risk Assessment (PRA), since the countries normally impose quarantine measures simply based on host species' presence (Willett *et al.*, 2009).

Despite the importance of maintaining an area free of MSD for mango cultivation, many countries apparently do not consider the risk of introduction of the disease. This may be due to the fact that no information currently exists on the global potential distribution of MSD. With the availability of such information, existing phytosanitary restrictions may be re-evaluated and more attention given to the possibility of the introduction of the disease in other countries. Our objectives were to: (1) predict the global potential distribution of Mango Sudden Decline (MSD), (2) identify the mango growing areas that are under potential risk of MSD establishment, and (3) identify climatic factors associated with MSD distribution.

MATERIAL AND METHODS

Occurrence data

Species occurrence data for Brazil and Oman were collected in the field while conducting a study on phylogenetic analyses of *C. fimbriata* (Oliveira *et al.*, 2015b). These points correspond to places with the presence of mango trees with symptoms of branch death, wilting foliage, bark discoloration, small holes in the bark, or sap exudation which indicates the presence of MSD disease. At these places samples of the xylem showing discoloration (a characteristic of an infected tree; Fig. 1) were collected from diseased mango trees in plantations, small farms, gardens, and along streets and roads for further confirmation of *C. fimbriata* presence. For these countries a total of 219 sites had the confirmed presence of the pathogen (Oliveira *et al.*, 2015b). Since some of these sites were sampled more than once over the time, we removed repeated occurrences obtaining 80 unique points from Brazil and Oman. For Pakistan,

the MSD disease presence data were collected from published papers that provided the coordinates of the locations of the diseased trees (Masood *et al.*, 2008; Masood *et al.*, 2011; Masood *et al.*, 2012a). Thus, a total of 94 unique occurrence records were collected from three countries where the disease is currently known to occur in mango trees (Al Adawi *et al.*, 2006; Fateh *et al.*, 2006; Silveira *et al.*, 2006). These records were reduced to 54 after applying spatial filtering using `spThin`, an R package (version 3.1.0; R Core Team 2015) (R Core Team, 2015) to reduce spatial autocorrelation (Aiello-Lammens *et al.*, 2015). This method was chosen since it keeps the most localities possible and tends to perform better than other methods to reduce spatial autocorrelation (Boria *et al.*, 2014). Filtered occurrence datapoints were >10 km apart (Veloz, 2009; Boria *et al.*, 2014). This distance was used to ensure that each cell could have only one occurrence point.

Environmental data layers

For this study a total of 20 variables were considered, it included 11 variables derived from the monthly temperature, eight derived from the monthly precipitation, and the elevation above the sea level (Table 1). These variables were obtained from the WorldClim dataset (<http://www.worldclim.org/>) (Hijmans *et al.*, 2005) and had 30 arc-seconds spatial resolution (~1 km). Bioclimatic variables were resampled to ~5-km spatial resolution to account for potential spatial inaccuracies during digitization of climatic variables that happens mainly at global range scale as in our study (Daly, 2006; Elith & Leathwick, 2009). These variables were derived using monthly temperature and precipitation data covering a period from 1950 to 2000, and represent average temperature and precipitation, seasonal variables, and climatic extreme indices (Hijmans *et al.*,

2005). These variables are considered biologically more meaningful than annual means of temperature and precipitation (Hijmans *et al.*, 2005). Only one variable from a group of highly correlated variables was included in the models (Pearson correlation coefficient, $r \geq 0.70$) (Table S1 in Appendix S1). The decision to retain a variable between two highly correlated was based on its potential biological relevance to MSD distribution and ease of interpretation. For example, mean annual temperature (bio 1) was kept in a group of highly correlated variables since it is known to be very important for modeling different species distributions (Du *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2014b; West *et al.*, 2015). Thus, the final number of variables used for modelling MSD distribution was reduced to seven (Table 1; Table S1 in Appendix S1).

Model development and validation

We used the correlative maximum entropy based model or MaxEnt algorithm (version 3.3.3k) (Phillips *et al.*, 2006) to assess the global potential distribution of MSD. MaxEnt is a machine learning method and estimates the probability distribution of the maximum entropy for a species (Phillips *et al.*, 2006). We chose MaxEnt because it uses species presence and background data (absence data are not needed) and also works well with small sample sizes (Pearson *et al.*, 2007; Kumar & Stohlgren, 2009). MaxEnt is more appropriate than other modelling methods in this case because only presence data were available for *C. fimbriata* (Phillips *et al.*, 2006). MaxEnt estimates the probability of presence of a species based on presence records and randomly generated background points and generates probability of species' presence by finding the maximum entropy distribution (Phillips *et al.*, 2006). It produces an index of suitability that varies from 0 (unsuitable) to 1 (most

suitable). A total of 50,000 background points were randomly selected from areas where *C. fimbriata* currently occurs. We suspected a sampling bias because our data were collected near roads and more accessible areas and from sources that we could not have control of the sampling process. Thus, we generated a bias surface using a kernel density estimate using SDMTtoolbox (Brown, 2014; Jarnevich *et al.*, 2015).

We adjusted different settings in MaxEnt to find an optimal model for MSD disease potential distribution since default settings are not always the best (Merow *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014c; Jarnevich *et al.*, 2015). These adjustments consisted of different combinations of regularization multiplier (RM) and feature types. The RM controls the number of parameters and consequently the complexity of the model (Elith *et al.*, 2011; Merow *et al.*, 2013). The values used were 1.0, 1.5, and 2.0. An RM value below 1 generates models that are very restricted (not desired for world predictions) and values higher than 1 would result in simpler models with a broader potential distribution (Phillips *et al.*, 2006). These values were used in combination with different sets of MaxEnt features (i.e. linear [L], quadratic [Q], product [P], threshold [T], and hinge [H]). The 'fade-by-clamping' option was used to prevent extrapolations outside the environmental range of the training data (Owens *et al.*, 2013). The percent contribution and 'Jackknife' (leave-one-out) technique in MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) were used to estimate the predictive power of different environmental predictors. 'Jackknife' was used in MaxEnt to account for the importance of a variable over 10-fold-cross-validation. It is done by evaluating different models in two situations: using only the variable by itself and using all other variables excluding that one in question. The results are the training gain and AUC for each environmental variable for each situation. The MaxEnt

generated response curves were used to show the relationships between predicted probabilities of presence of the disease with respect to the variation within each environmental variable. These curves were analyzed and models showing complex curves (multimodal responses; biologically unrealistic) were not considered for further evaluations. We considered curves biologically unrealistic based on highly jagged or multimodal behavior which normally does not happen with species responses to environmental variables.

The evaluation metrics for ranking the models' performance were the AUC_{cv} (area under the receiver operating characteristic [ROC] curve) (Peterson *et al.*, 2008) and the test sensitivity at 0% and 10% training Omission Rates (OR) (Liu *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2015b). For that we ran a 10-fold cross-validation in MaxEnt to calculate AUC_{cv} and OR. The AUC_{cv} measures the ability of the model to discriminate presence from background. AUC_{cv} value of 0.5 shows that model predictions are not better than random; values below 0.5 are worse than random; between 0.5-0.7 indicate poor performance; between 0.7-0.9, reasonable or moderate performance; and values higher than 0.9 indicate high performance (Peterson *et al.*, 2011). For the OR, the expected value of test omission rate at 0% training OR is 0, whereas at 10% training OR threshold it is 0.10; higher than expected omission rates show poor performance of the models (Boria *et al.*, 2014). The best models were ranked based on 10% training OR, 0% training OR, and AUC_{cv} , respectively (Liu *et al.*, 2013; Merow *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014b).

To identify the mango growing areas that are under potential risk of MSD establishment we first obtained mango yield data from the Earth Stat (<http://www.earthstat.org/>) (Monfreda *et al.*, 2008) with 10x10 km resolution. It represents the average yield of mango in tons per hectare for the period from

1997-2003. This data was reclassified to a binary map using Reclassify tool in ARC GIS, version 10.2 (ESRI, Redlands, CA). Cells with zero values and no data values were converted to zero, and cells with all other values were converted to one, thus generating a map with zero for cells where we do not have mango production and one for those where we have mango production reports . We further expanded this binary layer of mango production reports using the Expand tool in ArcGIS to reduce problems due to the fact that in some areas the reports were just single cells, they were difficult to visualize, and the data for some regions were of low accuracy (Monfreda *et al.*, 2008). Finally, we extracted the MaxEnt predicted output to mango production areas by multiplying it by the extended binary map of mango production, keeping the probability of occurrence of MSD disease in relation to the model in cells with mango production reports and converting places with no mango production to zero.

RESULTS

As per observed occurrences, MSD disease occurs in areas with mean annual temperature between 20.4-28.5°C, mean annual precipitation between 73-2093mm, and below 620m of elevation (Table1). The Mean annual temperature (54.3%), precipitation of coldest quarter (13.7%), precipitation seasonality (12.9%), and precipitation of driest month (7.2%) were the climatic variables that most contributed to MSD disease potential distribution (Table 1).

All 13 MaxEnt models evaluated to determine MSD disease potential distribution performed better than random, with test AUC_{cv} values higher than 0.5 (Table 2). Average AUC_{cv} values based on 10-fold cross validation varied from 0.94-0.97 (Table 2). These models also had low test omission rates, higher than expected omission rates show poor performance of the models, with values

at 0% training omission rate varying from 0.017-0.093 (expected value is 0), and at 10% training omission rate from 0.110-0.223 (expected value is 0.10) (Table 2). The best model included seven environmental variables, Linear, Quadratic, and Hinge (LQH) features, regularization multiplier=1.5, and had the lowest test omission rate, at 10% and 0% respectively (Table 2).

Predictions of the best MaxEnt model for MSD disease were closely related with its current known distribution (Figs 2 and 3A). The model predicted highly suitable areas in South America, southern North America, Central America, parts of Africa, northern Australia, Middle Eastern countries (e.g. Oman, Saudi Arabia, and United Arab Emirates) and parts of Asia (Figs 3, and S1-S4). This also includes countries such as Brazil, Oman, and Pakistan, where the disease already occurs in mango (Figs 3A, S1, and S4). Mango is grown in many countries in the world, including mainly those in tropical areas and some subtropical areas (Fig 3B). Almost all of these mango growing areas are suitable for MSD disease establishment except few areas in South Africa, Colombia, Ecuador, northeastern parts of China, northern Pakistan, and northern and northeastern parts, and Western Ghats of India (Fig 3C and Fig. S4).

The 'Jackknife' test of variable importance showed that the mean annual temperature had the most information that was not present in other variables contributing more to the model, with the highest regularized training gain and AUC for the variable alone (Figs 4A and 4B). The relationships between predicted probabilities of presence of the disease with respect to the variation within each environmental variable are presented in Figure 5. The highest probability for MSD disease presence is in areas with mean annual temperatures around 23°C, with the probability decreasing sharply with the

increasing or decreasing mean annual temperature, with no predictions of occurrence in temperatures below 10°C or above 30°C (Fig 5A). The probability of presence was higher in areas with low precipitation of coldest quarter (<1000 mm), decreasing with the increase in precipitation of coldest quarter (Fig 5B). The probability of MSD disease presence was low in areas with low precipitation seasonality (<50), with the probability increasing exponentially in areas where the precipitation seasonality is higher than 25, until reaching a plateau at 50 (Fig 5C). The probability of MSD presence was also higher in areas of low precipitation and zero in areas with precipitation over 150 mm during the driest month (Fig 5D).

DISCUSSION

In this study we mapped Mango Sudden Decline disease potential distribution on a global scale. The cross-validation procedure indicated that all of our models performed much better than would be expected at random and had a high validation statistic (AUC >0.9; Table 2; Fig 4). The potential distribution of the disease was closely related to its current known occurrences in mango plants in Brazil, Oman, and Pakistan (Figs 2, 3A, S1 and S4). The MaxEnt model predicted suitable areas in countries where the disease does not already occur in mango, but where mango is grown (Figs 3C, S1-S4). Among these areas are the largest mango producers in the world including India, China, Thailand, Indonesia, Mexico, Pakistan, and Brazil, which together corresponds to more than 85% of the world's mango production (Faostat, 2013). In addition, the model also predicted areas of high susceptibility beyond the current occurrence within the countries where the disease currently occurs; for example, Brazil, Oman, and Pakistan (Figs S1 and S4). In these countries,

the spread of the disease can also be a problem for other hosts such as eucalyptus, sweet potato, coffee, cocoa and pomegranate.

The occurrence of hosts and vectors is important for the establishment of a pathogen and may in some cases be one of the causes of failure in the colonization of new areas (Elith & Leathwick, 2009; Fodor, 2011). The MSD disease vector, the mango bark beetle *H. Mangiferae*, was present at all locations used in the MaxEnt model. Therefore, places predicted as susceptible to the occurrence of the disease may potentially have the occurrence of its vector, the mango bark beetle. This beetle is also known to occur beyond the location data we collected, including Florida, Mexico, Venezuela, Australia, and India (Wood, 1982; Al Adawi *et al.*, 2013). All of these sites were observed in our study as being susceptible to the establishment of MSD. As host and vector are very important to the establishment of the disease, this fate increases the likelihood that the disease may establish in areas predicted by our model; specifically, areas where the vector and the host already occur or may occur (Figs 2 and 3).

Mean annual temperature (bio1) was one of the most important variables associated with the distribution of the MSD disease (Table 1). Several studies have shown that mean annual temperature is among the factors that contributes most to species distribution (Du *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2015b; West *et al.*, 2015). The model predicted higher probability of MSD in locations where temperatures average 23°C, with a significant decrease in probability with a decrease or increase in the mean annual temperature. Studies with other strains of the same species of the fungus that infect other crops demonstrate that the optimum temperature for sporulation of the fungus under laboratory conditions is between 24 and 26°C, very close to the values estimated by our

model(Fig 5A) (Webster & Butler, 1967; Oliveira *et al.*, 2015a). The probability of presence was higher at lower elevations. Ecological niche modeling studies with other species demonstrate that the elevation has great influence on species distributions (Jones *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2015b). This may be explained by the relationship of elevation with humidity variations (Austin, 2002), which influences *C. fimbriata* sporulation (Masood *et al.*, 2012b). However, MSD disease was observed occurring in a wider range of precipitation levels (73-2093mm). The occurrence of the disease in low rainfall sites is only possible due to irrigation in these areas (e.g., Oman and Pakistan), which makes development of the host possible and in turn, the disease. Furthermore, it was observed that the disease is more likely to occur in areas with well-defined dry and rainy seasons, since it is more likely to occur in areas with a high coefficient of variation in precipitation (i.e. precipitation seasonality; Fig 4C).

The climatic conditions found in this study for the disease are very close to ideal conditions for the mango tree development. The mango tree has optimum range of temperature ranging from 24 to 30°C, better development at elevations lower than 600m, and poor development in regions with high rainfall (> 2000mm) and small differences in precipitation between dry and rainy seasons (Litz, 2009). These factors indicate that the fungus has climatic requirements very similar to the host. This resulted in the model predictions for the occurrence of the MSD disease in almost all locations where mango is cultivated, which reinforces the quality of the model (Figs 3, and S1-S4).

Ceratocystis fimbriata is a soil-borne pathogen which can live in the soil for long periods of time, thus making it almost impossible to eradicate in infected areas (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005). We identified many areas across the globe that have suitable climatic conditions for

the establishment of MSD disease. These results can be used in Pest Risk Assessments (PRA) program by National Plant Protection Organizations (NPPOs) including *C. fimbriata* in the list of risk species and monitoring non-intentional introductions. Some pathways analyses show that introductions in new areas may occur through contaminated soil, infected tissue or even by the vector *H. mangiferae* which may carry some structures of the fungus in its mouthparts and digestive tract (Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2007; Al Adawi *et al.*, 2013; Pereira, 2013). Other studies have demonstrated that other bark beetle species, such as *Xyleborus affinis*, may be involved in the spread of the fungus, but does not seem to be as much important as *H. mangiferae* (Pereira, 2013; Souza *et al.*, 2013). There is no evidence that *C. fimbriata* can be carried through mango fruits, and we do not believe it to be possible as per our field observations. However, no studies have addressed this hypothesis. Thus, the training of farmers to identify symptoms of the disease in trees and the mango bark beetle vector are advisable before the disease enters the country. This can reduce the initial propagule pressure and thus make it easier to prevent its establishment in the country. It would be much worse if it reaches higher levels of infections or infests the soil (Accordi, 1989; Rossetto & Ribeiro, 1990; Van Wyk *et al.*, 2005; Colautti *et al.*, 2006).

Other strains of the fungus *C. fimbriata* occur in plants such as eucalyptus, sweet potato, coffee, cocoa and pomegranate (Montoya & Wingfield, 2006; Harrington *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015a; Oliveira *et al.*, 2015b). Since these fungal strains are the same species and the difference between them is the host, the areas identified in our study as susceptible to MSD disease are also likely to be suitable for the fungus *C. fimbriata* on other hosts. In some of the areas identified as susceptible to occurrence of the

disease in this study, such as India, China, Australia, Florida, and some countries in Africa, the fungus has also infected other crops but have not been reported causing problems in mango (Thorpe *et al.*, 2005; Harrington *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2015a; Oliveira *et al.*, 2015b).

On the other hand, the results of this study should be interpreted with caution. Correlative niche models like MaxEnt may have prediction uncertainties (Jarnevich *et al.*, 2015). These uncertainties are primarily due to the quality of occurrence data, sampling bias, resolution of spatial data layers, species characteristics, and spatial autocorrelation (Dormann *et al.*, 2008; Taylor & Kumar, 2012; Anderson, 2013; Elith & Franklin, 2013; Jarnevich *et al.*, 2015). The MaxEnt model has a very user friendly interface which makes the generation of results somewhat easier. However, several adjustments can be made, which can have a great influence on the model and consequently on its quality (Kumar *et al.*, 2014b; Jarnevich *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2015a; Kumar *et al.*, 2015b). These adjustments include selection of background points and extent, value of regularization multiplier, and selection of feature types (Phillips *et al.*, 2006). Considering these potential pitfalls in the modeling process, we took utmost care in model calibration and thus generating predictive models that are consistent with the current known distribution of the species (Figs 2 and 3). This can be observed in the quality of response curves (no highly jagged or multimodal response observed) and good validation results (Table 2; Figs 4 and 5).

Our study provides important information on the potential risk of establishment of MSD disease using a very strong MaxEnt model. Our results can be used in designing strategies to prevent introduction and establishment of MSD disease, and in preparation of efficient Pest Risk Assessment and

monitoring programs by countries where MSD disease currently occurs including other countries that are at risk.

REFERENCES

- Accordi, S. The survival of *Ceratocystis fimbriata* f. sp. platani in the soil. *Informatore Fitopatologico*, v.39, n.5, p.57-62. 1989.
- Aiello-Lammens, M. E.; Boria, R. A.; Radosavljevic, A.; Vilela, B.; Anderson, R. P. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, v.38, n.5, p.541-545. 2015.
- Al Adawi, A. O.; Al Jabri, R.; Deadman, M.; Barnes, I.; Wingfield, B.; Wingfield, M. J. The mango sudden decline pathogen, *Ceratocystis manginecans*, is vectored by *Hypocryphalus mangiferae* (Coleoptera: Scolytinae) in Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.135, n.2, p.243-251. 2013.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Al Maqbali, Y. M.; Al Jahwari, A. A.; Al Saadi, B. A.; Al Amri, I. S.; Wingfield, M. J. Aetiology and causal agents of mango sudden decline disease in the Sultanate of Oman. *European Journal of Plant Pathology*, v.116, n.4, p.247-254. 2006.
- Al Adawi, A. O.; Deadman, M. L.; Al Rawahi, A. K.; Khan, A. J.; Al Maqbali, Y. M. *Diplodia theobromae* associated with sudden decline of mango in the Sultanate of Oman. *Plant Pathology*, v.52, n.3, p.419-419. 2003.
- Anderson, R. P. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.1297, n.1, p.8-28. 2013.
- Austin, M. P. Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological Modelling*, v.157, n.2-3, p.101-118. 2002.
- Bogosian, V.; Hellgren, E. C.; Sears, M. W.; Moody, R. W. High-resolution niche models via a correlative approach: Comparing and combining correlative and process-based information. *Ecological Modelling*, v.237-238, p.63-73. 2012.
- Boria, R. A.; Olson, L. E.; Goodman, S. M.; Anderson, R. P. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling*, v.275, p.73-77. 2014.
- Brown, J. L. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, v.5, n.7, p.694-700. 2014.
- Colautti, R.; Grigorovich, I.; Macisaac, H. Propagule Pressure: A Null Model for Biological Invasions. *Biological Invasions*, v.8, n.5, p.1023-1037. 2006.
- Daly, C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology*, v.26, n.6, p.707-721. 2006.
- Dormann, C. F.; Porschke, O.; Márquez, J. R. G.; Lautenbach, S.; Schröder, B. Components of Uncertainty in Species Distribution Analysis: A Case Study of the Great Grey Shrike. *Ecology*, v.89, n.12, p.3371-3386. 2008.

- Du, Z.; Wang, Z.; Liu, Y.; Wang, H.; Xue, F.; Liu, Y. Ecological niche modeling for predicting the potential risk areas of severe fever with thrombocytopenia syndrome. *International Journal of Infectious Diseases*, v.26, p.1-8. 2014.
- Elith, J. & Franklin, J. Species Distribution Modeling. In: Levin, S. A. (Ed.). *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)*. Waltham: Academic Press, 2013. p.692-705
- Elith, J. & Leathwick, J. R. Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v.40, n.1, p.677-697. 2009.
- Elith, J.; Phillips, S. J.; Hastie, T.; Dudík, M.; Chee, Y. E.; Yates, C. J. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, v.17, n.1, p.43-57. 2011.
- Ellis, S. D.; Boehm, M. J.; Mitchell, T. K. Fungal and fungal-like diseases of plants. *Fact Sheet, Agriculture and Natural Resources*, The Ohio State University, v. PP401.07, p.1-4. 2008.
- FAO STAT. Food and Agriculture Organization of the United Nation. [Http://faostat3.fao.org/home/E](http://faostat3.fao.org/home/E). Accessed September 26th. 2013.
- Fateh, F. S.; Kazmi, M. R.; Ahmad, I.; Ashraf, M. *Ceratocystis fimbriata* isolated from vascular bundles of declining mango trees in Sindh, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, v.38, n.4, p.1257-1259. 2006.
- Flory, A. R.; Kumar, S.; Stohlgren, T. J.; Cryan, P. M. Environmental conditions associated with bat white-nose syndrome mortality in the north-eastern United States. *Journal of Applied Ecology*, v.49, n.3, p.680-689. 2012.
- Fodor, E. Ecological niche of plant pathogens. *Annals of Forest Research*, v.54, n.1, p.3-21. 2011.
- Guisan, A.; Tingley, R.; Baumgartner, J. B.; Naujokaitis-Lewis, I.; Sutcliffe, P. R.; Tulloch, A. I. T.; Regan, T. J.; Brotons, L.; Mcdonald-Madden, E.; Mantyka-Pringle, C.; Martin, T. G.; Rhodes, J. R.; Maggini, R.; Setterfield, S. A.; Elith, J.; Schwartz, M. W.; Wintle, B. A.; Broennimann, O.; Austin, M.; Ferrier, S.; Kearney, M. R.; Possingham, H. P.; Buckley, Y. M. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters*, v.16, n.12, p.1424-1435. 2013.
- Harrington, T. C.; Huang, Q.; Ferreira, M. A.; Alfenas, A. C. Genetic Analyses Trace the Yunnan, China Population of *Ceratocystis fimbriata* on Pomegranate and Taro to Populations on Eucalyptus in Brazil. *Plant Disease*, v.99, n.1, p.106-111. 2014.
- Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra, J. L.; Jones, P. G.; Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, v.25, n.15, p.1965-1978. 2005.
- Jarnevich, C. S.; Stohlgren, T. J.; Kumar, S.; Morisette, J. T.; Holcombe, T. R. Caveats for correlative species distribution modeling. *Ecological Informatics*, v.29, n.1, p.6-15. 2015.

- Jones, V. P.; Hilton, R.; Brunner, J. F.; Bentley, W. J.; Alston, D. G.; Barrett, B.; Van Steenwyk, R. A.; Hull, L. A.; Walgenbach, J. F.; Coates, W. W.; Smith, T. J. Predicting the emergence of the codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae), on a degree-day scale in North America. *Pest Management Science*, v.69, n.12, p.1393-1398. 2013.
- Kumar, S. & Stohlgren, T. J. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrca monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, v.14, p.94-98. 2009.
- Kumar, S.; Graham, J.; West, A. M.; Evangelista, P. H. Using district-level occurrences in MaxEnt for predicting the invasion potential of an exotic insect pest in India. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.103, p.55-62. 2014a.
- Kumar, S.; Lebrun, E. G.; Stohlgren, T. J.; Stabach, J. A.; McDonald, D. L.; Oi, D. H.; Lapolla, J. S. Evidence of niche shift and global invasion potential of the Tawny Crazy ant, *Nylanderia fulva*. *Ecology and Evolution*, v.5, n.20, p.4628-4641. 2015a.
- Kumar, S.; Neven, L. G.; Yee, W. L. Assessing the Potential for Establishment of Western Cherry Fruit Fly Using Ecological Niche Modeling. *Journal of Economic Entomology*, v.107, n.3, p.1032-1044. 2014b.
- Kumar, S.; Neven, L. G.; Yee, W. L. Evaluating correlative and mechanistic niche models for assessing the risk of pest establishment. *Ecosphere*, v.5, n.7, p.art86. 2014c.
- Kumar, S.; Neven, L. G.; Zhu, H.; Zhang, R. Assessing the Global Risk of Establishment of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) using CLIMEX and MaxEnt Niche Models. *Journal of Economic Entomology*, v.tov166, p.1708-1719. 2015b.
- Kumar, S.; Spaulding, S. A.; Stohlgren, T. J.; Hermann, K. A.; Schmidt, T. S.; Bahls, L. L. Potential habitat distribution for the freshwater diatom *Didymosphenia geminata* in the continental US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v.7, n.8, p.415-420. 2009.
- Litz, R. E. *The mango: botany, production and uses*: CABI. 2009
- Liu, C.; White, M.; Newell, G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, v.40, n.4, p.778-789. 2013.
- Masood, A.; Iqbal, S. S. N.; Ullah, M. A. Spatial and temporal infestation of mango bark beetle, *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae) found on mango sudden death trees in orchards. *Pakistan Journal of Zoology*, v.44, n.6, p.1545-1553. 2012a.
- Masood, A.; Saeed, S.; Erbilgin, N.; Jung Kwon, Y. Role of stressed mango host conditions in attraction of and colonization by the mango bark beetle *Hypocryphalus mangiferae* Stebbing (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) and in the symptom development of quick decline of mango trees in Pakistan. *Entomological Research*, v.40, n.6, p.316-327. 2010.

- Masood, A.; Saeed, S.; Sajjad, A. Characterization and damage patterns of different bark beetle species associated with mango sudden death syndrome in Punjab, Pakistan. *Pakistan Entomologist*, v.30, n.2, p.163-168. 2008.
- Masood, A.; Salman, M.; Saeed, S. Fungicide injection, an efficient management technique of mango sudden death disease in Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Phytopathology*, v.26, n.2, 2014-12-31, p.259-263. 2014.
- Masood, A.; Shafqat, S.; Asif, M.; Malik, S. A.; Nazim, H. Role of nutrients in management of mango sudden death disease in Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, v.44, n.3, p.675-683. 2012b.
- Masood, A.; Stoeckle, B. C.; Kuehn, R.; Shafqat, S. Cross species transfer of microsatellite loci in Scolytidae species mostly associated with mango (*Mangifera indica* L., Anacardiaceae) quick decline disease. *Pakistan Journal of Zoology*, v.43, n.2, p.411-414. 2011.
- Mcdowell, W. G.; Benson, A. J.; Byers, J. E. Climate controls the distribution of a widespread invasive species: implications for future range expansion. *Freshwater Biology*, v.59, n.4, p.847-857. 2014.
- Merow, C.; Smith, M. J.; Silander, J. A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, v.36, n.10, p.1058-1069. 2013.
- Mohsin, M.; Jamal, F.; Ajmal, F. Impact of Mango Orchard Diseases on Growers Economic Life in Ahmedpur East, Bahawalpur, Pakistan. *Academic Research International*, v.5, n.2, p.196-204. 2014.
- Monfreda, C.; Ramankutty, N.; Foley, J. A. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, v.22, n.1, p.1022. 2008.
- Montoya, M. M. & Wingfield, M. J. A Review of *Ceratocystis sensu stricto* with special reference to the species complexes *C. coerulescens* and *C. fimbriata*. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, v.59, n.1, p.3045-3375. 2006.
- Murray, K. A.; Retallick, R. W. R.; Puschendorf, R.; Skerratt, L. F.; Rosauer, D.; Mccallum, H. I.; Berger, L.; Speare, R.; Vanderwal, J. Assessing spatial patterns of disease risk to biodiversity: implications for the management of the amphibian pathogen, *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Journal of Applied Ecology*, v.48, n.1, p.163-173. 2011.
- Oliveira, L. S. S.; Guimarães, L. M. S.; Ferreira, M. A.; Nunes, A. S.; Pimenta, L. V. A.; Alfenas, A. C. Aggressiveness, cultural characteristics and genetic variation of *Ceratocystis fimbriata* on *Eucalyptus* spp. *Forest Pathology*, p.1-10. 2015a.
- Oliveira, L. S. S.; Harrington, T. C.; Ferreira, M. A.; Damacena, M. B.; Al-Sadi, A. M.; Al-Mahmooli, I. H. S.; Alfenas, A. C. Species or Genotypes? Reassessment of Four Recently Described Species of the Ceratocystis Wilt Pathogen, *Ceratocystis fimbriata*, on *Mangifera indica*. *Phytopathology*, v.105, n.9, p.1229-1244. 2015b.

- Owens, H. L.; Campbell, L. P.; Dornak, L. L.; Saupe, E. E.; Barve, N.; Soberón, J.; Ingenloff, K.; Lira-Noriega, A.; Hensz, C. M.; Myers, C. E.; Peterson, A. T. Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, v.263, p.10-18. 2013.
- Pearson, R. G.; Raxworthy, C. J.; Nakamura, M.; Townsend Peterson, A. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, v.34, n.1, p.102-117. 2007.
- Pereira, R. M. Identificação e distribuição de coleobrocas em mangueiras com seca causada por *Ceratocystis fimbriata*. Department of Entomology, Federal University of Viçosa, Viçosa, 2013. 29 p.
- Peterson, A. T.; Papeş, M.; Eaton, M. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, v.30, n.4, p.550-560. 2007.
- Peterson, A. T.; Papeş, M.; Soberón, J. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, v.213, n.1, p.63-72. 2008.
- Peterson, A. T.; Soberón, J.; Pearson, R. G.; Anderson, R. P.; Martínez-Meyer, E.; Nakamura, M.; Araújo, M. B. *Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49)*: Princeton University Press. 2011. 328 p.
- 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.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2015.
- Rossetto, C. J. & Ribeiro, I. J. A. Mango wilt. XII. Recommendations for control. *Revista de Agricultura (Piracicaba)*, v.65, n.2, p.173-180. 1990.
- Silveira, S. F.; Harrington, T. C.; Mussi-Dias, V.; Engelbrecht, C. J. B.; Alfenas, A. C.; Silva, C. R. *Annona squamosa*, a new host of *Ceratocystis fimbriata*. *Fitopatologia Brasileira*, v.31, n.4, p.394-397. 2006.
- Souza, A. G. C.; Maffia, L. A.; Murta, H. M.; Alves, Y. H.; Pereira, R. M.; Picanço, M. C. First Report on the Association Between *Ceratocystis fimbriata*, an Agent of Mango Wilt, *Xyleborus affinis*, and the Sawdust Produced During Beetle Colonization in Brazil. *Plant Disease*, v.97, n.8, p.1116-1116. 2013.
- Stohlgren, T. J.; Ma, P.; Kumar, S.; Rocca, M.; Morisette, J. T.; Jarnevich, C. S.; Benson, N. Ensemble Habitat Mapping of Invasive Plant Species. *Risk Analysis*, v.30, n.2, p.224-235. 2010.
- Taylor, S. & Kumar, L. Sensitivity Analysis of CLIMEX Parameters in Modelling Potential Distribution of *Lantana camara*. *PLoS ONE*, v.7, n.7, p.e40969. 2012.

- Thorpe, D. J.; Harrington, T. C.; Uchida, J. Y. Pathogenicity, Internal Transcribed Spacer-rDNA Variation, and Human Dispersal of *Ceratocystis fimbriata* on the Family Araceae. *Phytopathology*, v.95, n.3, p.316-323. 2005.
- Van Wyk, M.; Al Adawi, A. O.; Khan, I. A.; Deadman, M. L.; Al Jahwari, A. A.; Wingfield, B. D.; Ploetz, R.; Wingfield, M. J. *Ceratocystis manginecans* sp. nov., causal agent of a destructive mango wilt disease in Oman and Pakistan. *Fungal Diversity*, v.27, p.213-230. 2007.
- Van Wyk, M.; Al-Adawi, A. O.; Wingfield, B. D.; Al-Subhi, A. M.; Deadman, M. L.; Wingfield, M. J. DNA based characterization of *Ceratocystis fimbriata* isolates associated with mango decline in Oman. *Australasian Plant Pathology*, v.34, n.4, p.587-590. 2005.
- Veloz, S. D. Spatially autocorrelated sampling falsely inflates measures of accuracy for presence-only niche models. *Journal of Biogeography*, v.36, n.12, p.2290-2299. 2009.
- Webster, R. K. & Butler, E. E. A Morphological and Biological Concept of the Species *Ceratocystis Fimbriata*. *Canadian Journal of Botany*, v.45, n.9, p.1457-1468. 1967.
- West, A. M.; Kumar, S.; Wakie, T.; Brown, C. S.; Stohlgren, T. J.; Laituri, M.; Bromberg, J. Using High-Resolution Future Climate Scenarios to Forecast *Bromus tectorum* Invasion in Rocky Mountain National Park. *PLoS ONE*, v.10, n.2, p.e0117893. 2015.
- Willett, M. J.; Neven, L.; Miller, C. E. The occurrence of codling moth in low latitude countries: validation of pest distribution reports. *HortTechnology*, v.19, n.3, p.633-637. 2009.
- Wood, S. L. The Bark and Ambrosia Beetles of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae), a Taxonomic Monograph. Provo, Utah: Great Basin Naturalist Memoirs, v.6. 1982



Figure 1. Mango Sudden Decline disease. (A) Eggs, larvae and adult female of the vector mango bark beetle *Hypocryphalus mangiferae* in an opened gallery; inset shows an enlarged picture of the adult beetle. (B) Hyphae and perithecium with sticky ascospore masses of *Ceratocystis fimbriata*. (C) Section of a mango trunk showing the typical xylem discoloration caused by the fungal infection; entry and exit holes made by beetles on the surface of the bark are signs of infection (enlarged image in bottom left corner), and (D) A mango tree killed by Mango Sudden Decline disease.

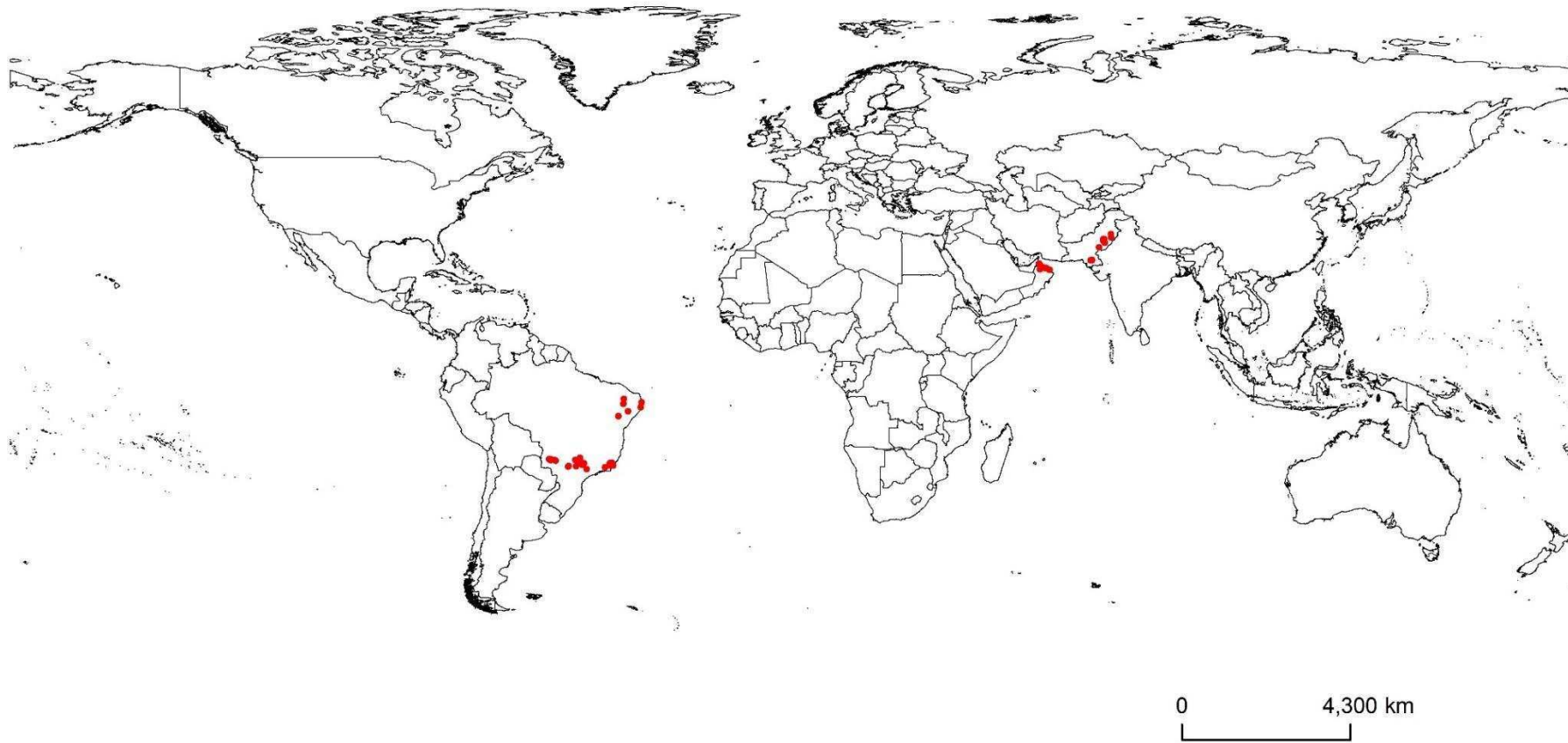


Figure 2.Global known occurrences of Mango Sudden Decline disease caused by *C. fimbriata* in mango trees.

Table 1. Environmental variables considered in *C. fimbriata* niche models, and average percent contribution of environmental variables in the Mango Sudden Decline disease best MaxEnt model. General statistics were calculated using all occurrences (n = 94).

| Variable | Percent contribution | Permutation importance | Min. | Max. | Mean | SD |
|---|----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| Mean annual temperature (bio1; °C) | 54.3 | 57.4 | 20.4 | 28.5 | 24.2 | 2.1 |
| Precipitation of coldest quarter (bio19; mm) | 13.7 | 4.1 | 9 | 821 | 116 | 154 |
| Precipitation seasonality (CV) (bio15) | 12.9 | 15.9 | 36 | 156 | 79 | 28 |
| Precipitation of driest month (bio14; mm) | 7.2 | 11.7 | 0 | 51 | 15 | 12 |
| Elevation (m) | 5.8 | 4.9 | 6 | 620 | 217 | 207 |
| Precipitation of wettest month (bio13; mm) | 4.2 | 5 | 20 | 319 | 164 | 90 |
| Mean diurnal range in temperature (bio2; °C) | 1.9 | 0.9 | 6.0 | 15.8 | 11.6 | 1.9 |
| Isothermality (bio3) | - | - | 39 | 74 | 57 | 11 |
| Temperature seasonality (SD x 100) (bio4) | - | - | 980 | 7917 | 3263 | 2028 |
| Maximum temperature of warmest month (bio5; °C) | - | - | 28.3 | 43.4 | 34.1 | 4.6 |
| Minimum temperature of coldest month (bio6; °C) | - | - | 4.5 | 20.9 | 12.8 | 3.6 |
| Temperature annual range (bio7; °C) | - | - | 8.9 | 38.5 | 21.3 | 6.9 |
| Mean temperature of wettest quarter (bio8; °C) | - | - | 20.2 | 34.4 | 25.6 | 3.4 |
| Mean temperature of driest quarter (bio9; °C) | - | - | 17 | 33.5 | 22.5 | 4.5 |
| Mean temperature of warmest quarter (bio10; °C) | - | - | 22.9 | 34.8 | 27.9 | 3.9 |
| Mean temperature of coldest quarter (bio11; °C) | - | - | 13.5 | 26.2 | 19.6 | 2.3 |
| Mean annual precipitation (bio12; mm) | - | - | 73 | 2093 | 893 | 565 |
| Precipitation of wettest quarter (bio16; mm) | - | - | 49 | 914 | 429 | 254 |
| Precipitation of driest quarter (bio17; mm) | - | - | 0 | 178 | 61 | 46 |
| Precipitation of warmest quarter (bio18; mm) | - | - | 0 | 685 | 342 | 232 |

Values were averaged across 10 replicate runs. Min. is minimum, Max. is maximum, and SD is standard deviation. Note: Bold font indicates variables in the final model. Source of data: WorldClim (<http://www.worldclim.org/bioclim>; Hijmans et al., 2005)

Table 2. Summary of performance statistics of *C. fimbriata* MaxEnt models. The model with the highest performance is highlighted in bold.

| Model No. | Variables | MaxEnt settings | | Test AUC _{cv} (±SD) | Test OR | | Model Rank ^a |
|-----------|--|-----------------|------------|------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | | Features | RM | | 0% | 10% | |
| 1 | bio1, bio2, bio13, bio14, bio15, bio19, Elevation | LQH | 1.5 | 0.97 ± 0.01 | 0.017 | 0.110 | 1 |
| 2 | Same as above | LQH | 2.0 | 0.97 ± 0.01 | 0.037 | 0.133 | 6 |
| 3 | Same as above | LQPTH | 1.5 | 0.97 ± 0.01 | 0.093 | 0.150 | 10 |
| 4 | Same as above | LQPTH | 2.0 | 0.96 ± 0.02 | 0.090 | 0.200 | 11 |
| 5 | Same as above | LQP | 1.0 | 0.95 ± 0.02 | 0.057 | 0.130 | 4 |
| 6 | Same as above | LQP | 1.5 | 0.94 ± 0.02 | 0.033 | 0.143 | 8 |
| 7 | Same as above | LQP | 2.0 | 0.93 ± 0.02 | 0.020 | 0.110 | 2 |
| 8 | Same as above | LH | 1.5 | 0.97 ± 0.01 | 0.020 | 0.133 | 5 |
| 9 | Same as above | LH | 2.0 | 0.96 ± 0.01 | 0.033 | 0.150 | 9 |
| 10 | Same as above | LQPT | 1.5 | 0.95 ± 0.02 | 0.057 | 0.223 | 13 |
| 11 | Same as above | LQPT | 2.0 | 0.94 ± 0.02 | 0.040 | 0.220 | 12 |
| 12 | Same as above | LQPH | 1.5 | 0.97 ± 0.01 | 0.070 | 0.137 | 7 |
| 13 | Same as above | LQPH | 2.0 | 0.96 ± 0.01 | 0.053 | 0.110 | 3 |

Note: See Table 1 for variables' full names. L, Q, P, T and H are linear, quadratic, product, threshold and hinge features, respectively. RM is regularization multiplier, and SD is standard deviation. OR is test omission rate. Test AUC_{cv} is MaxEnt 10-fold cross-validation Area Under the ROC curve.

^aThe model with the highest performance is highlighted in bold.

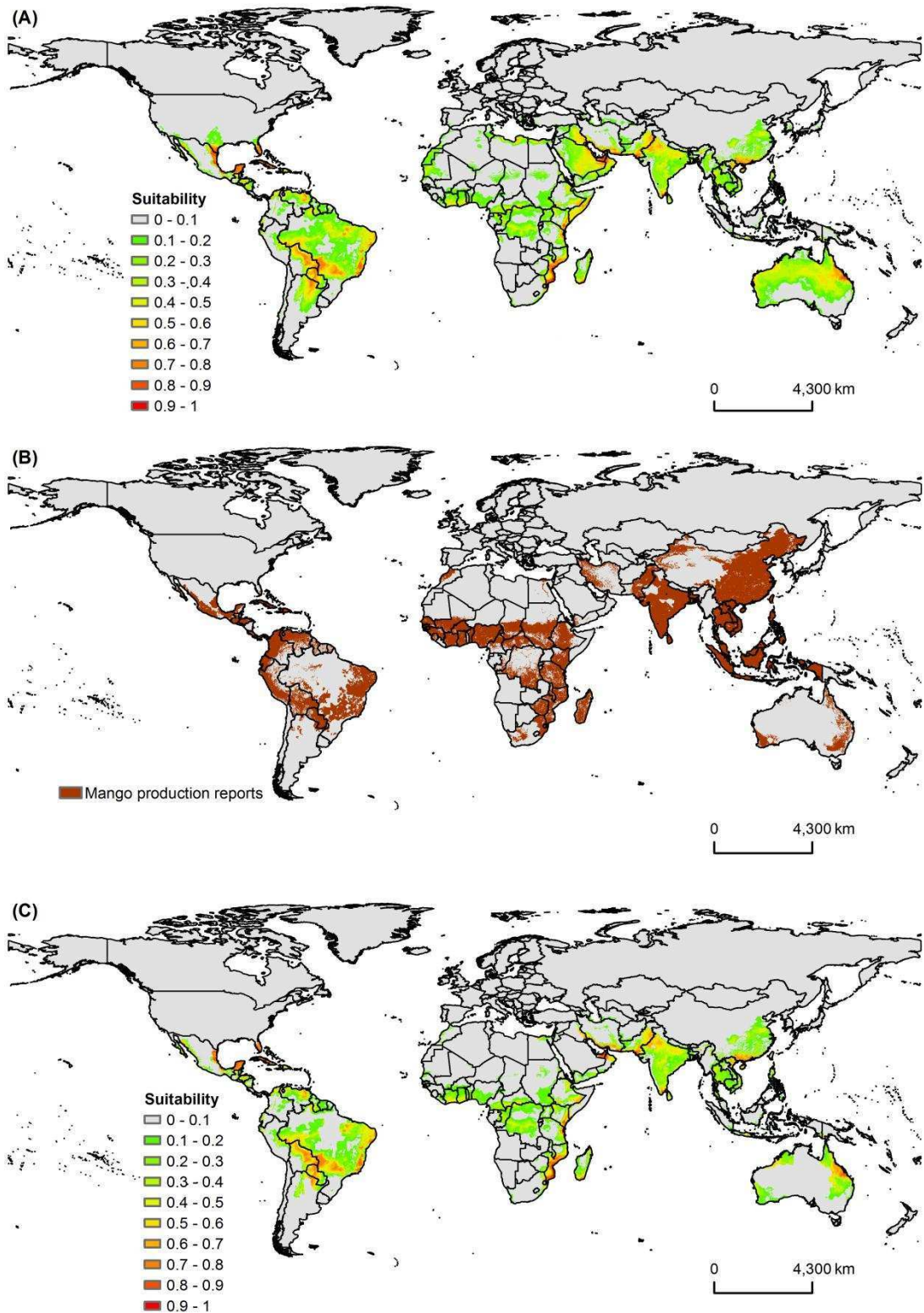


Figure 3. Maps of (A) global potential distribution of *C. fimbriata* using MaxEnt model, (B) global mango growing areas (source of data: Earth Stat, <http://www.earthstat.org/>; Monfredaet al., 2008), and (C) potential distribution of *C. fimbriata* in mango growing areas.

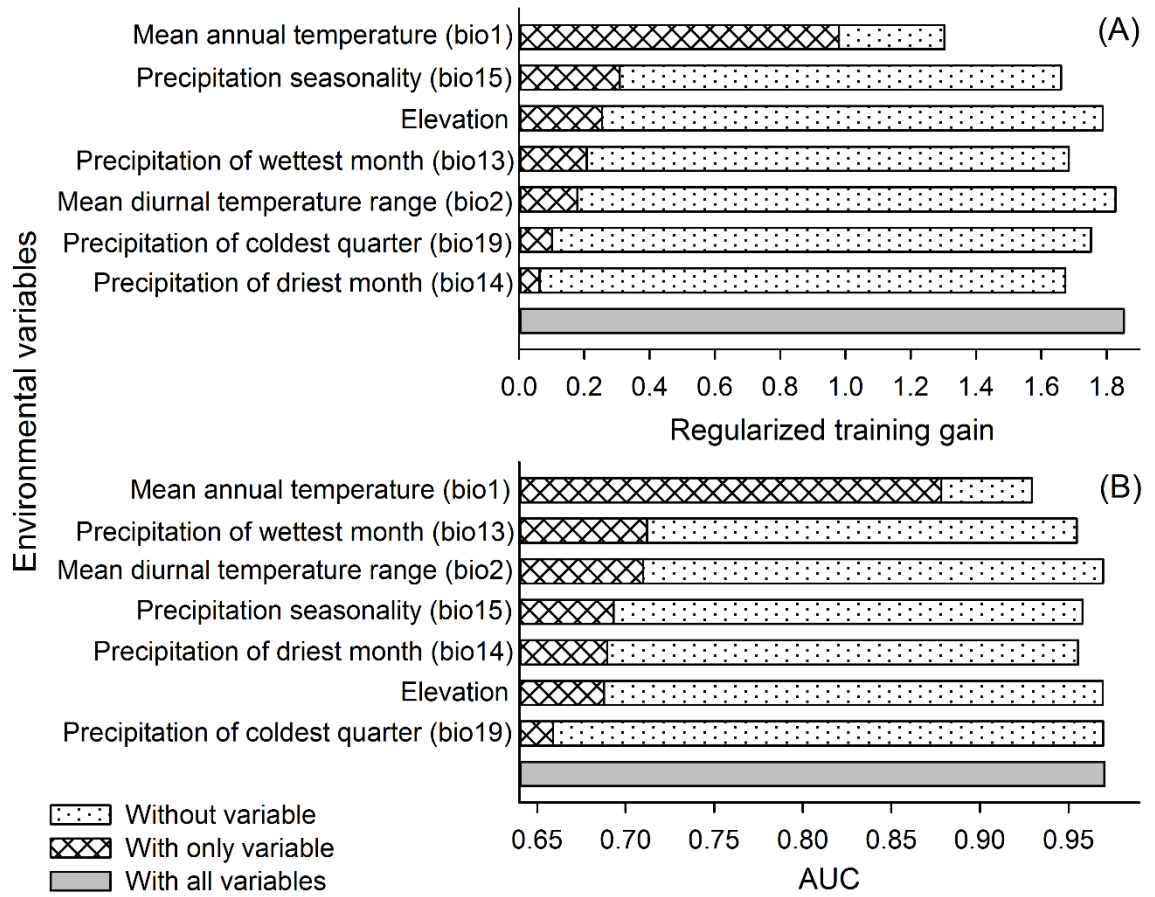


Figure 4. Relative importance of the environmental variables based on the Jackknife test. The figures show each variable's contribution to (A) regularized training gain, and (B) AUC in *C. fimbriata* model.

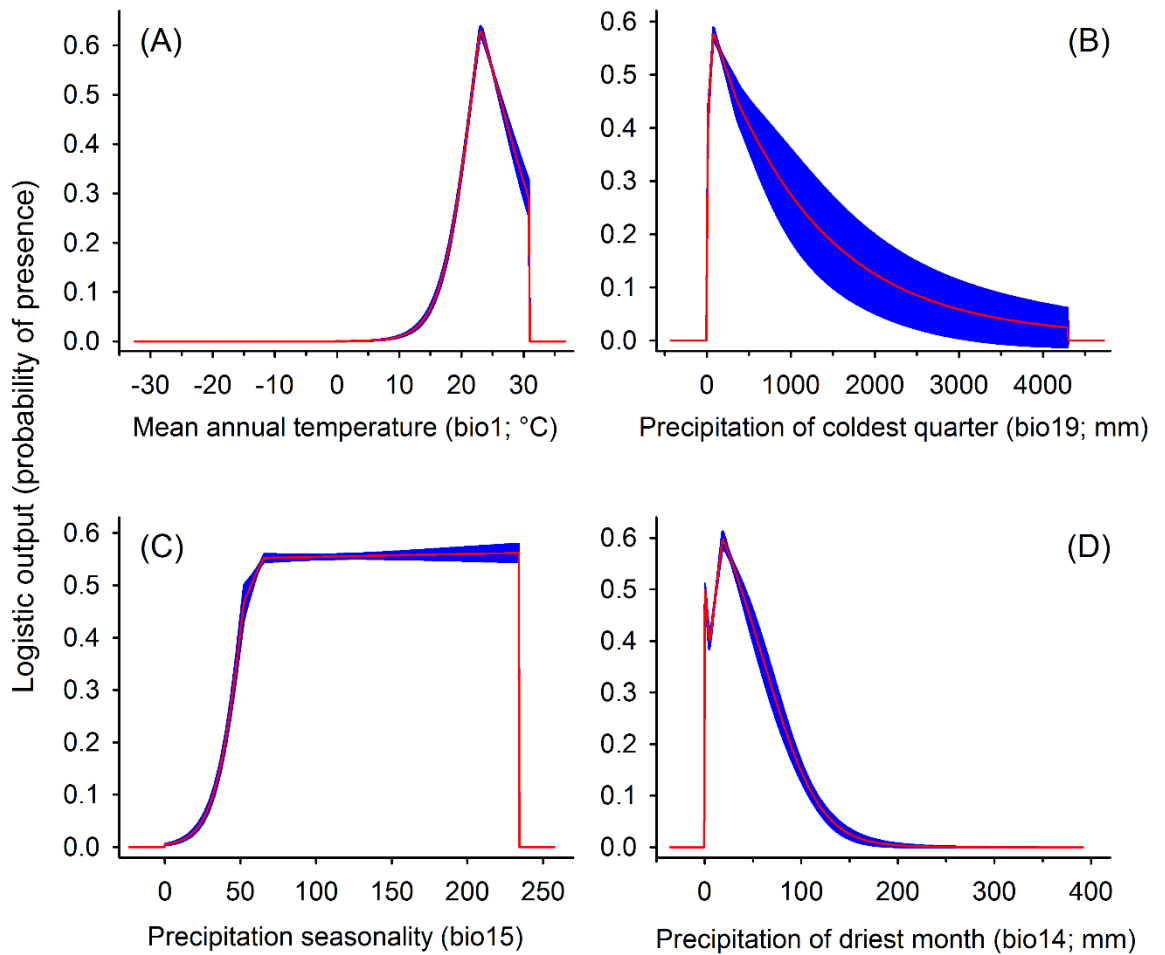


Figure 5. Response curves of the best predictors of *C. fimbriata* in the best model. (A) mean annual temperature (bio1; °C), (B) precipitation of coldest quarter (bio19; mm), (C) precipitation seasonality (Coefficient of variation; bio15), and (D) precipitation of driest month (bio14; mm).

SUPPORTING INFORMATION

Table S1. Cross-correlation (Pearson correlation coefficient, *r*) among environmental variables.

| | bio1 | bio2 | bio3 | bio4 | bio5 | bio6 | bio7 | bio8 | bio9 | bio10 | bio11 | bio12 | bio13 | bio14 | bio15 | bio16 | bio17 | bio18 | bio19 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| bio2 | 0.525 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio3 | 0.838 | 0.391 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio4 | -0.833 | -0.217 | -0.893 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio5 | 0.896 | 0.708 | 0.611 | -0.513 | | | | | | | | | | | | | | | |
| bio6 | 0.968 | 0.361 | 0.888 | -0.936 | 0.765 | | | | | | | | | | | | | | |
| bio7 | -0.732 | 0.006 | -0.829 | 0.972 | -0.360 | -0.876 | | | | | | | | | | | | | |
| bio8 | 0.811 | 0.534 | 0.635 | -0.500 | 0.844 | 0.703 | -0.387 | | | | | | | | | | | | |
| bio9 | 0.938 | 0.444 | 0.808 | -0.860 | 0.792 | 0.948 | -0.782 | 0.607 | | | | | | | | | | | |
| bio10 | 0.935 | 0.624 | 0.657 | -0.584 | 0.989 | 0.825 | -0.455 | 0.864 | 0.831 | | | | | | | | | | |
| bio11 | 0.980 | 0.431 | 0.891 | -0.926 | 0.796 | 0.996 | -0.848 | 0.730 | 0.950 | 0.847 | | | | | | | | | |
| bio12 | 0.374 | -0.244 | 0.564 | -0.551 | 0.115 | 0.482 | -0.613 | 0.248 | 0.370 | 0.194 | 0.450 | | | | | | | | |
| bio13 | 0.452 | -0.103 | 0.580 | -0.566 | 0.228 | 0.524 | -0.588 | 0.367 | 0.409 | 0.298 | 0.508 | 0.896 | | | | | | | |
| bio14 | 0.049 | -0.375 | 0.216 | -0.238 | -0.145 | 0.160 | -0.339 | -0.071 | 0.101 | -0.082 | 0.116 | 0.705 | 0.388 | | | | | | |
| bio15 | 0.370 | 0.515 | 0.285 | -0.194 | 0.429 | 0.273 | -0.074 | 0.449 | 0.263 | 0.412 | 0.320 | -0.172 | 0.140 | -0.518 | | | | | |
| bio16 | 0.441 | -0.123 | 0.581 | -0.567 | 0.210 | 0.519 | -0.594 | 0.349 | 0.404 | 0.281 | 0.501 | 0.922 | 0.993 | 0.425 | 0.095 | | | | |
| bio17 | 0.076 | -0.372 | 0.251 | -0.269 | -0.126 | 0.190 | -0.370 | -0.049 | 0.128 | -0.060 | 0.146 | 0.741 | 0.425 | 0.994 | -0.516 | 0.463 | | | |
| bio18 | 0.216 | -0.203 | 0.348 | -0.332 | 0.019 | 0.275 | -0.385 | 0.249 | 0.145 | 0.093 | 0.259 | 0.795 | 0.742 | 0.552 | -0.103 | 0.761 | 0.576 | | |
| bio19 | 0.245 | -0.241 | 0.429 | -0.401 | 0.053 | 0.353 | -0.472 | 0.071 | 0.304 | 0.109 | 0.313 | 0.751 | 0.581 | 0.668 | -0.273 | 0.607 | 0.696 | 0.369 | |
| Elevation | -0.189 | 0.172 | 0.017 | -0.049 | -0.294 | -0.143 | -0.013 | -0.340 | -0.101 | -0.322 | -0.121 | -0.085 | -0.064 | -0.068 | 0.149 | -0.064 | -0.070 | -0.017 | -0.089 |

Note: Bold font indicates variables in the final model. Only one variable from a group of highly correlated variables was included in the models (Pearson correlation coefficient, $r \geq |0.70|$)

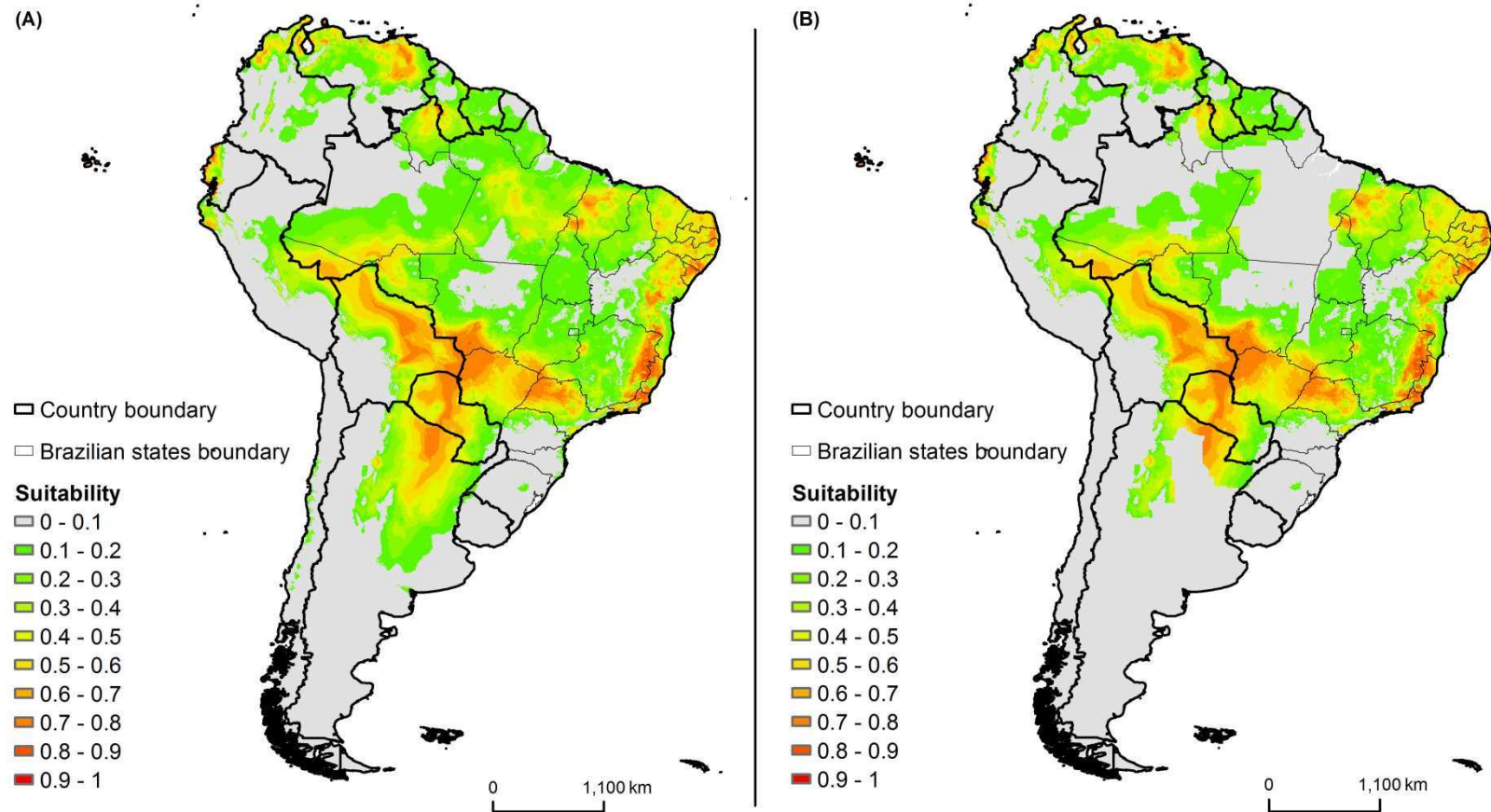


Figure S1. Enlarged maps. (A) potential distribution using MaxEnt model, and (B) potential distribution in mango growing areas of *C. fimbriata* in South America.

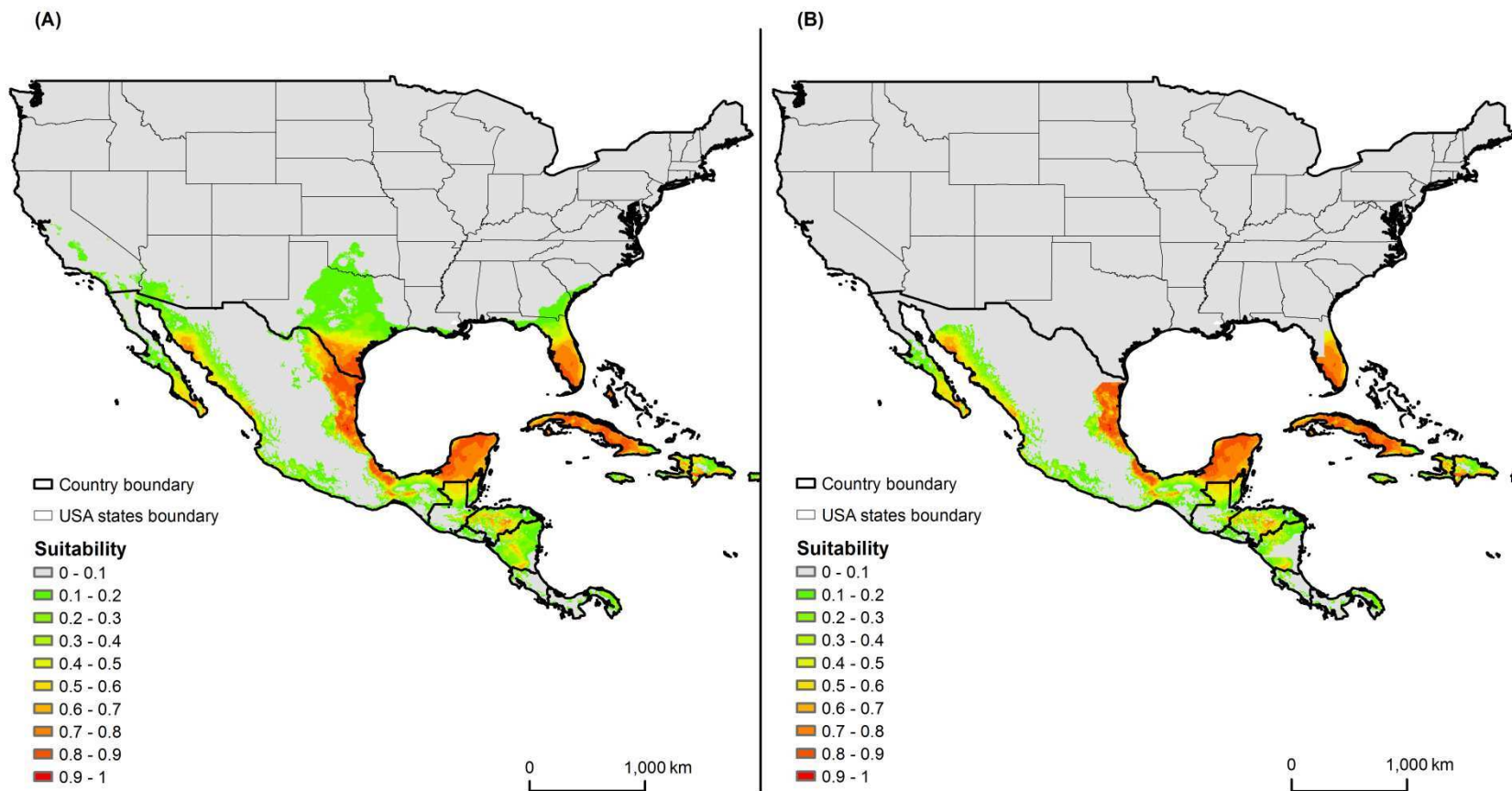


Figure S2. Enlarged maps. (A) potential distribution using MaxEnt model, and (B) potential distribution in mango growing areas of *C. fimbriata* in the biggest mango producers in North America.

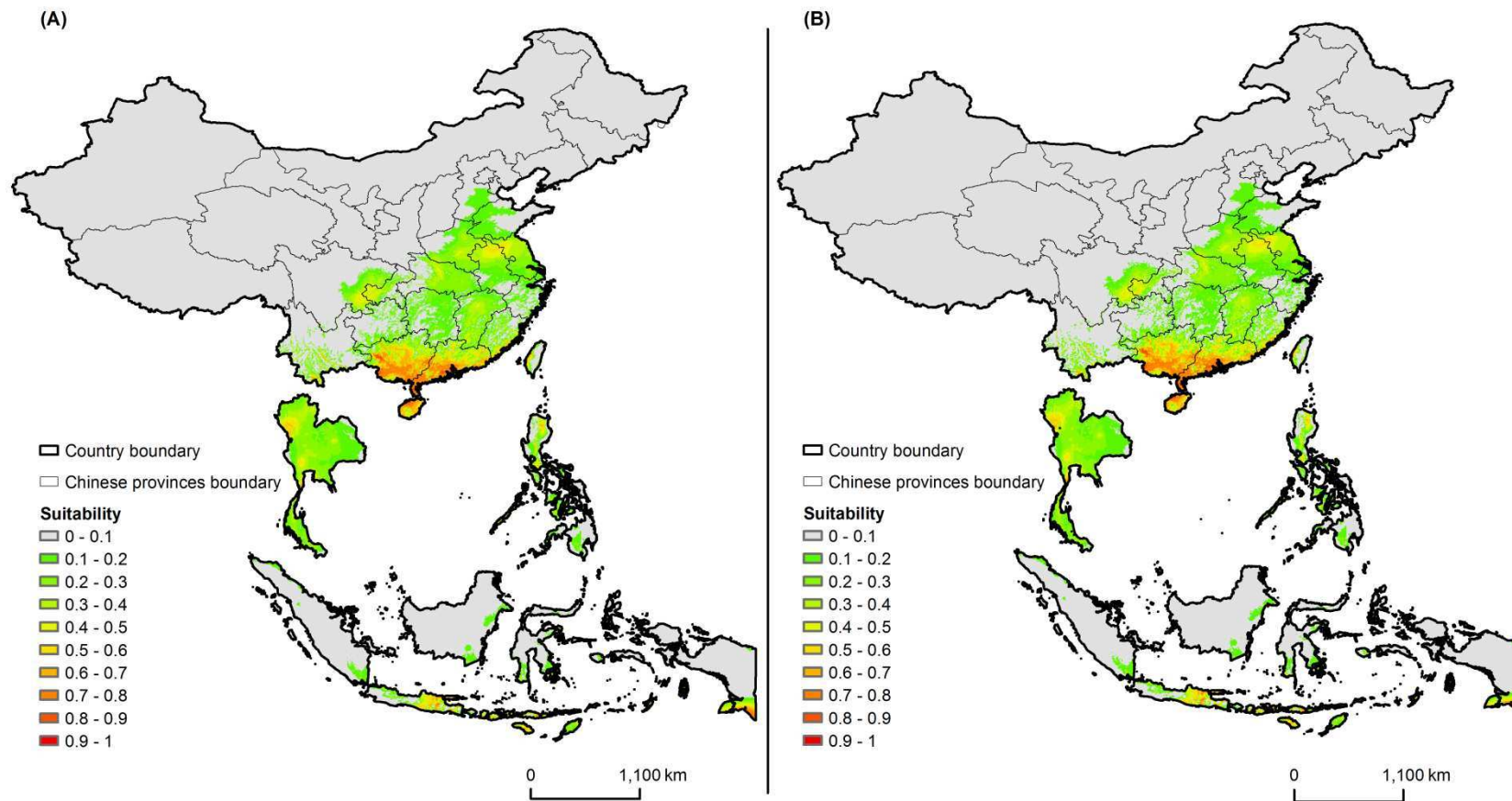


Figure S3. Enlarged maps. (A) potential distribution using MaxEnt model, and (B) potential distribution in mango growing areas of *C. fimbriata* in China, Indonesia, Philippines, Thailand, and Taiwan.

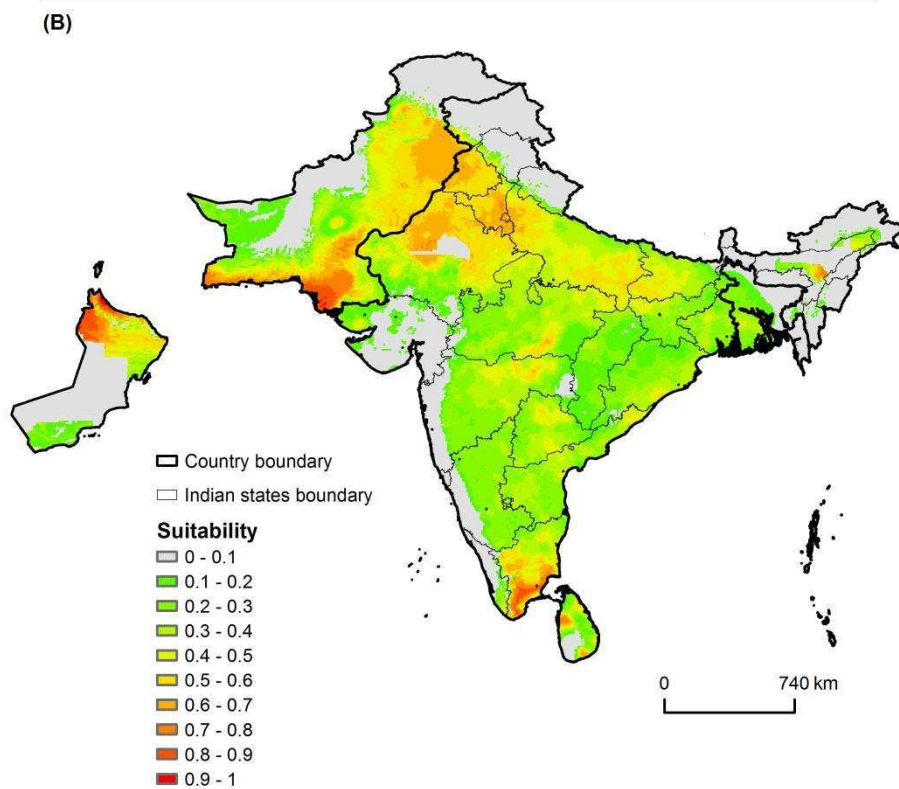
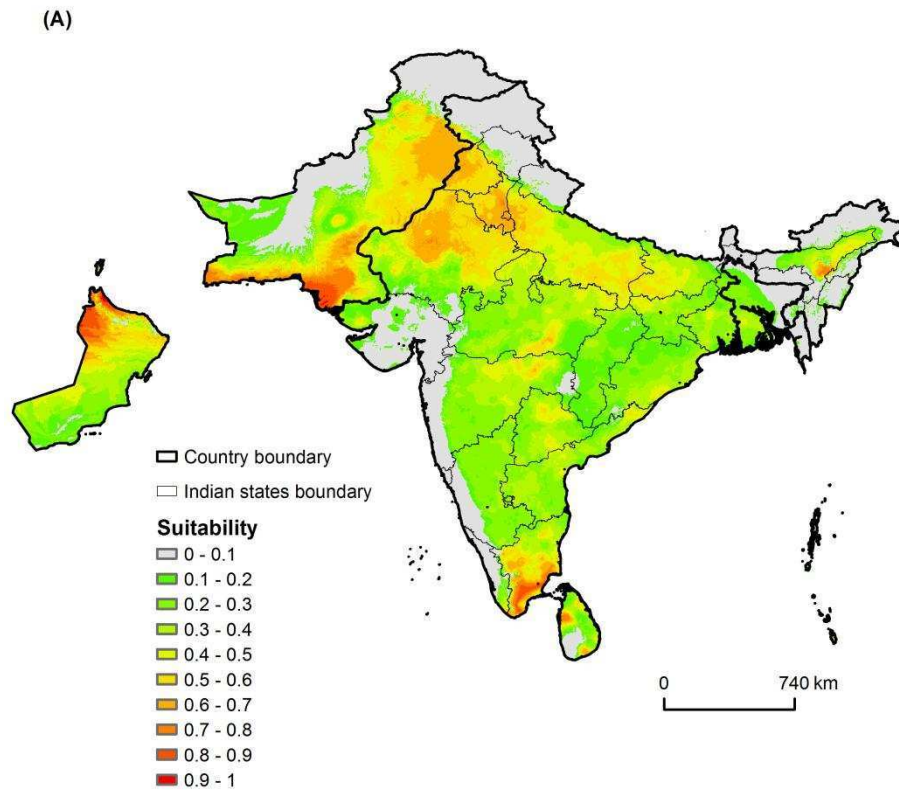


Figure S4. Enlarged maps. (A) potential distribution using MaxEnt model, and (B) potential distribution in mango growing areas of *C. fimbriata* in Pakistan, Oman, India, Bangladesh, and Sri Lanka.

CONCLUSÕES GERAIS

A partir do exposto observa-se que atualmente a seca da mangueira ocorre em locais com temperatura média anual ente 20,4 e 28,5 °C e altitudes inferiores a 620m acima do nível do mar. Diversas áreas do globo estão sob risco da introdução da seca da mangueira. Dentre essas áreas estão os maiores produtores mundiais de manga como Índia, China, Tailândia, Indonésia, México, Paquistão e Brasil. A temperatura média anual (54,3 %), precipitação durante o trimestre mais frio do ano (13,7 %), sazonalidade da precipitação (12,9%), e precipitação no mês mais seco do ano (7,2%) são as variáveis climáticas que mais contribuem para a probabilidade de ocorrência da seca da mangueira em um determinado local.

A infestação de novas plantas pela seca da mangueira é normalmente precedida pelo ataque dos besouros. A colonização de novas mangueiras nos pomares pelo besouro e pelo fungo ocorre de duas formas. A primeira é pelo surgimento de novas plantas atacadas distantes daquelas já atacadas. A segunda pelo surgimento de novas plantas atacadas próximas a aquelas anteriormente atacadas. Em ambos os casos *H. mangiferae* desempenha importante papel na dispersão do fungo. Os novos focos de plantas atacadas pelo fungo, sejam distantes ou próximas das já atacadas, surgem em locais onde anteriormente o besouro tinha iniciado seu ataque. Ao contrário do que se supõe até o momento, esse trabalho indica que não são os besouros que vão em busca de plantas doentes, mas sim eles que carregam o fungo levando ao aumento dessas.