

**JOÃO RAFAEL SILVA SOARES**

**MODELOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA CULTIVOS DE SOJA E *Chrysodeixes*  
*includens* MEDIANTE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**

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

Orientador: Marcelo Coutinho Picanço

Co-orientadores: Ricardo Siqueira da Silva  
Rodrigo Soares Ramos

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2020**

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

T

S676m  
2020

Soares, João Rafael Silva, 1992-  
Modelos espaço-temporais para cultivos de soja e  
*Chrysodeixes includens* mediante mudanças climáticas globais /  
João Rafael Silva Soares. – Viçosa, MG, 2020.  
72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Marcelo Coutinho Picanço.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. *Chrysodeixis includens*. 2. Nicho (Ecologia). 3. Insetos  
(Populações). 4. Mudanças climáticas. 5. Soja. I. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de  
Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.

CDD 22. ed. 595.78

JOÃO RAFAEL SILVA SOARES

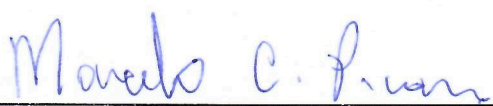
**MODELOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA CULTIVOS DE SOJA E *Chrysodeixes*  
*includens* MEDIANTE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**

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

APROVADA: 19 de fevereiro de 2020.

Assentimento:

  
João Rafael Silva Soares  
Autor

  
Marcelo Coutinho Picanço  
Orientador

Em especial à minha mãe, Sônia Martinha, o qual sempre me apoiou e me ensinou que é através do estudo que se atingem os objetivos e torna o mundo melhor.

À minha família, cuja confiança a mim depositada, me deram forças e determinação para concluir mais esta etapa da vida.

*A vocês, dedico.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar! Pela vida, e por todas as oportunidades e desafios a mim concedidos.

Agradeço aos meus pais Francisco Lino e Sônia Martinha, que sempre empenharam e apoiaram em minhas conquistas; além da dedicação, paciência e companheirismo em todos os momentos, sempre me mostrando que tudo é possível se for realizado com amor. Aos meus irmãos, Jaqueline, Gabriel e Jeany, que sempre estiveram do meu lado e torceram pelo meu crescimento profissional e pessoal.

À minha esposa, Graziela Valini, pela cumplicidade, amizade, e amor incondicional, fazendo os meus dias mais felizes.

Agradeço a Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela oportunidade de realizar meu mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos professores, em especial o professor Marcelo Picanço pela orientação, conhecimento e pelas oportunidades de crescimento profissional e pessoal. Acredito que estou nesta posição de hoje graças a dedicação deste homem em transformar nossas vidas.

À família MIP por todos os momentos de amizade, descontração e aprendizado, muitas vezes sob o sol árduo dos campos de Viçosa, Coimbra e Tocantins. Obrigada pelo apoio, ensinamentos e companheirismo.

*A todos vocês, meu muito obrigado!*

## RESUMO

SOARES, João Rafael Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **MODELOS ESPAÇO-TEMPORAIS PARA CULTIVOS DE SOJA E *Chrysodeixes includens* MEDIANTE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS.** Orientador: Marcelo Coutinho Picanço. Coorientadores: Ricardo Siqueira da Silva e Rodrigo Soares Ramos.

A soja (*Glycine max* L.) é a leguminosa mais cultivada nas Américas, onde Estados Unidos, Brasil e Argentina ocupam posições como principais produtores mundiais. O comércio mundial desta cultura vem crescendo rapidamente desde 1990, reflexo da melhora da dieta da população. A soja é atacada por um complexo de pragas desfolhadoras, sendo *Chrysodeixis includens* um dos mais importantes lepidópteros deste grupo. *C. includens* é um inseto-praga polífago, com hábitos migratórios e distribuição atual limitada às Américas. A disponibilidade de alimentos e a influência dos elementos climáticos estão diretamente relacionados com a distribuição deste inseto. O clima atua diretamente em insetos fitófagos em razão de sua fisiologia ectotérmica, além de permitir o cultivo de plantas hospedeiras, como a soja. Estas características poderão ser alteradas no futuro em razão das mudanças climáticas, onde prevê-se que a emissão de gases de efeito estufa resultarão em mudanças nos padrões de temperatura e precipitação da superfície terrestre. No entanto, ainda há poucas informações sobre a influência desses fatores sobre o crescimento populacional de *C. includens*, especialmente de locais onde possuem características climáticas semelhantes, em caso de uma possível invasão deste inseto fora das Américas. Uma forma de avaliar os efeitos do clima sobre a distribuição espaço-temporal de espécies é através de modelos de nicho ecológico. Os modelos de nicho ecológico estimam a adequabilidade climática de determinado local utilizando parâmetros biológicos da espécie e variáveis preditoras ambientais. Dessa forma, nesta dissertação foram elaborados modelos de nicho ecológico para a soja e *C. includens* considerando o clima atual e mediante mudanças climáticas. Estes modelos foram elaborados para determinar a distribuição potencial, identificar o principal fator climático influenciando a distribuição de ambas as espécies e determinar locais com adequação climática para *C. includens* considerando a soja como hospedeiro principal. Foi utilizado o programa CLIMEX para construção dos modelos. Os modelos indicam reduções na adequação climática ao cultivo de soja mediante às mudanças climáticas em países produtores como Brasil e Índia. As áreas anteriormente inadequadas para o cultivo de soja provavelmente se tornarão adequadas em países e regiões localizados em latitudes mais elevadas, como o Canadá e a Europa Ocidental. Os modelos gerados para *C. includens* confirmam adequabilidade climática favorável para esta praga em grandes proporções das Américas. O modelo espaço-temporal indica que grandes proporções da América Central e do Sul são adequadas para

crescimento de *C. includens* na durante o ano todo. Em regiões de latitudes mais elevadas, condições para sua sobrevivência se tornam favoráveis entre os meses de abril e outubro/novembro. Além do continente americano, outras regiões com adequação climática a *C. includens* estão localizadas em zonas tropicais dos continentes Africano e Asiático. Os modelos confeccionados elucidam áreas novas a serem exploradas e servem para o desenvolvimento de estratégias para mitigar com os impactos das mudanças climáticas sobre cultivo da soja e para a criação de barreiras fitossanitárias visando a interceptação de *C. includens* em locais sob risco de introdução desta espécie.

Palavras-chave: Aquecimento global. Dinâmica populacional. Falsa medideira. Modelagem de nicho ecológico.

## ABSTRACT

SOARES, João Rafael Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **SPATIO-TEMPORAL MODELS FOR SOYBEAN CROPPING AND *Chrysodeixes includens* MEDIATED BY GLOBAL CLIMATE CHANGE.** Advisor: Marcelo Coutinho Picanço. Co-advisors: Ricardo Siqueira da Silva and Rodrigo Soares Ramos.

Soybeans (*Glycine max* L.) is the most cultivated legume in the Americas, where the United States, Brazil and Argentina occupy positions as the leading world producers. World trade in this culture has been growing rapidly since 1990, reflecting the improvement in the population's diet. A defoliating pest complex attacks soybeans, and *Chrysodeixis includens* is one of the most critical lepidopterans in this group. *C. includens* is a polyphagous insect pest, with migratory habits and current distribution limited to the Americas. The availability of food and the influence of climatic elements are directly related to the distribution of this insect. The climate acts directly on phytophagous insects due to their ectothermic physiology, besides allowing to grow host plants, such as soybeans. These characteristics may change in the future due to climate change, where it is expected that the emission of greenhouse gases will result in changes in the temperature and precipitation patterns of the earth's surface. However, there is still little information about the influence of these factors on the population growth of *C. includens*, especially in places where they have similar climatic characteristics in the event of a possible invasion of this insect outside the Americas. One way to assess the effects of climate on the spatio-temporal distribution of species is through ecological niche models. Ecological niche models estimate the climatic suitability of a given location using biological parameters of the species and environmental predictor variables. Thus, in this dissertation, ecological niche models were developed for soybeans and *C. includens* considering the current climate and climate change scenarios. These models were elaborated to determine the potential distribution, to identify the principal climatic factor influencing the distribution of both species and to determine places with climatic suitability for *C. includens* considering soybeans as the primary host. The CLIMEX program was used to build the models. The models indicate reductions in the climate suitability for soybean cultivation through climate change in producing countries such as Brazil and India. Areas previously unsuitable for soybeans cropping are likely to become suitable in countries and regions located at higher latitudes, such as Canada and Eastern Europe. The models generated for *C. includens* confirm favourable climatic suitability for this pest in large proportions in the Americas. The spatio-temporal model indicates that large proportions of Central and South America are suitable for *C. includens* growth throughout the year. In regions of higher latitudes, conditions for their survival become favourable between

April and October/November. In addition to the American continent, other regions with climatic suitability to *C. includens* are located in tropical areas of the African and Asian continents. The models reveal new areas to be explored and assist in developing strategies to mitigate the impacts of climate change on soybean cultivation and to create phytosanitary barriers aiming at the interception of *C. includens* in places at risk of introducing this species.

**Keywords:** Climate change. Ecological niche modelling. Population dynamics. Soybean looper. Soybean.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO I

- Fig. 1 (A)** A distribuição global de cultivos de soja (*Glycine max* L.), **(B)** o Índice Ecoclimático (IE) para o cenário climático atual e **(C)** áreas de cultivos de soja fornecidos pelo MAPSpam ..... 42
- Fig. 2** O Índice Ecoclimático (IE) das condições climáticas futuras da soja (*Glycine max* L.) sob o modelo CSIRO-M.k 3.0 e cenário SRES A2 (semelhante ao RCP 8.5): clima atual e previsões para 2030, 2050 e 2070..... 43
- Fig. 3** Projeções de estresse por umidade para: **(A)** clima atual; **(B)** 2030 **(C)** 2050 e **(D)** 2070. .... 44
- Fig. 4** Projeções de estresse por calor para: **(A)** clima atual; **(B)** 2030 **(C)** 2050 e **(D)** 2070.. 45
- Fig. 5** Projeções de estresse por frio para: **(A)** clima atual; **(B)** 2030 **(C)** 2050 e **(D)** 2070.... 46
- Fig. 6** Projeções de estresse por seca para: **(A)** clima atual; **(B)** 2030 **(C)** 2050 e **(D)** 2070... 47

### CAPÍTULO II

- Fig. 1 (a)** Distribuição geográfica atual, **(b)** Índice Ecoclimático (IE), **(c)** Índice de Crescimento anual ( $IC_A$ ) de *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) para o clima atual – não adequado ( $EI = 0$ ), marginal ( $0 < EI \leq 10$ ), adequação média ( $10 < EI \leq 30$ ), altamente adequado ( $EI > 30$ ). Cores mais claras no mapa de  $IC_A$  **(c)** representam áreas com menores probabilidades de sobrevivência de *C. includens* a longo prazo..... 67
- Fig. 2** Curvas de sazonalidade e Curvas do Índice de Crescimento semanal ( $IC_S$ ) de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) para seis regiões do estado de Mato Grosso – Brasil, utilizadas para a validação do modelo espaço-temporal. Abaixo estão descritos a janela de plantio de dois hospedeiros cultivados em larga escala nestas regiões, exemplificando o sincronismo de crescimento (condições favoráveis) entre o inseto e seus hospedeiros..... 68
- Fig. 3** Variabilidade mensal do  $IC_S$  (escalonado de 0 a 1) para *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) nas Américas em 2014. Cores vermelhas representam alto  $IC_S$  para o período avaliado. .... 69
- Fig. 4** Mapa da adequabilidade de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) em outros continentes considerando a soja como hospedeiro principal: sobreposição dos mapas de adequabilidade climática favorável para cultivos de soja (regiões com  $IE \geq 10$ ) e *C. includens* (adequabilidade marginal:  $IE > 0$  e  $< 10$ ; adequabilidade média:  $IE \geq 10$  e  $< 30$ ; adequabilidade alta:  $IE \geq 30$ ). .... 71

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

**Tabela 1** Valores dos parâmetros utilizados para modelagem da distribuição da soja (*Glycine max* L.) no CLIMEX..... 40

**Tabela 2** Variação das áreas de adequação climática da soja projetadas para os cinco principais produtores do mundo nas condições climáticas atuais e mediante mudanças climáticas para 2030, 2050 e 2070 no cenário A2 SRES..... 41

### CAPÍTULO II

**Tabela 1** Valores dos parâmetros biológicos utilizados para modelagem da distribuição de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) no CLIMEX ..... 65

**Tabela 2** Valores da análise de sensibilidade para *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) no CLIMEX..... 66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>13</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>20</b>
	<b>RESUMO</b> .....	<b>21</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
4.1	CLIMEX.....	25
4.2	Dados de distribuição de cultivos de soja.....	26
4.3	Dados e cenários climáticos.....	26
4.4	Parâmetros usados no CLIMEX.....	27
4.4.1	Parâmetros de crescimento.....	27
4.4.2	Parâmetros de estresse.....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>30</b>
5.1	Validação do modelo.....	30
5.2	Cenário atual.....	30
5.3	Projeções futuras.....	31
5.4	A situação dos principais países produtores de soja do mundo.....	31
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>48</b>
	<b>RESUMO</b> .....	<b>49</b>
	<b>ABSTRACT</b> .....	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
9.1	CLIMEX.....	52
9.2	Distribuição de <i>Chrysodeixis includens</i> .....	53
9.3	Parâmetros usados no software CLIMEX.....	53
9.3.1	Índices de Temperatura.....	53

9.3.2	Índices de umidade .....	53
9.3.3	Estresses .....	54
9.4	Validação do modelo .....	55
9.5	Análise de sensibilidade .....	55
9.6	Determinação de padrão espaço-temporal de <i>C. includens</i> nas Américas.....	55
9.7	Avaliação da adequabilidade climática para <i>C. includens</i> a partir da soja fora das Américas.....	56
<b>10</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
10.1	Validação e análise de sensibilidade .....	57
10.2	Adequabilidade climática para <i>C. includens</i> nas Américas.....	57
10.3	Dinâmica espaço-temporal de <i>C. includens</i> .....	57
10.4	Adequabilidade climática a <i>C. includens</i> fora do continente americano.....	57
<b>11</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* L.) está entre as culturas mais importantes do mundo, sendo utilizada como fonte de proteína vegetal e animal em países desenvolvidos e em desenvolvimento (PAGANO & MIRANSARI, 2016; SILVA *et al.*, 2017). Nos últimos 20 anos, o comércio mundial de soja aumentou vertiginosamente, e a expectativa é a de que ainda continue a crescer nos próximos anos (CHANG *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2016). Esse aumento é reflexo do crescimento da renda e à urbanização das populações (ALEXANDRATOS & BRUINSMA, 2012). Graças aos programas de melhoramento genético, hoje é possível genótipos altamente adaptados a regiões tropicais de cultivo, suprimindo essa demanda progressiva (FARIAS *et al.*, 2007; LU *et al.*, 2017).

Esta cultura é uma das espécies hospedeiras de *C. includens* mais cultivada nas Américas, onde Estados Unidos, Brasil e Argentina são os principais produtores mundiais desta leguminosa (FAO, 2017). Este inseto também pode atacar outras culturas de importância econômica, como o feijão, algodão, fumo e girassol, tornando-se uma praga-chave nestas culturas (ANDRADE *et al.*, 2016; BALDIN *et al.*, 2014; SPECHT *et al.*, 2015). Entretanto, a soja é uma das melhores fontes nutricionais para o desenvolvimento de *C. includens*, o que acelera crescimento populacional desta praga (ANDRADE *et al.*, 2016).

Além de atacar plantas cultivadas, esta praga pode se alimentar de hospedeiros alternativos, como plantas daninhas e vegetação nativa circundante (SPECHT *et al.*, 2015). Devido ao seu alto grau de polifagia, plantas cultivadas e vegetação espontânea constituem fontes de alimento potenciais (ANDRADE *et al.*, 2016). Este fato é ainda mais proeminente nos agro ecossistemas tropicais, onde o clima favorece o cultivo de plantas hospedeiras em sucessão ao longo do ano e a vegetação circundante poderá servir como hospedeiro alternativo até o estabelecimento de novas lavouras (LIMA *et al.*, 2018).

No entanto, a presença da espécie hospedeira não garante a ocorrência de *C. includens*. Em função de sua fisiologia ectotérmica, insetos apresentam variações da densidade populacional conforme alterações climáticas (CHOWN & TERBLANCHE, 2006; COLINET *et al.*, 2015). A influência dos elementos climáticos afeta diretamente ou indiretamente parâmetros biológicos (sobrevivência, tempo de desenvolvimento, reprodução) das pragas (COLINET *et al.*, 2015). Em uma faixa de temperatura ótima, o ciclo de vida deste inseto varia entre 27 a 34 dias, e cada fêmea pode ovipositar entre 500 a 1.300 ovos (CANERDAY & ARANT, 1967; MITCHELL, 1967). A variação de condições climáticas durante as estações ajudam a explicar a flutuação da densidade populacional em relação ao espaço e o tempo, e

norteiam voos migratórios deste inseto (ADDO-BEDIAKO *et al.*, 2000; EICHLIN & CUNNINGHAM, 1978; HERZOG, 1980; HODGSON *et al.*, 2011). Além disso, as condições climáticas favoráveis para insetos-praga também o são para hospedeiros (FARIAS *et al.*, 2007). No caso da soja, esta cultura é cultivada em períodos quentes e úmidos, permitindo a sincronização com *C. includens* (MOSCARDI *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas ainda podem influenciar a distribuição de espécies por aumentar ou limitar a distribuição geográfica em algumas regiões (DUKES & MOONEY, 1999; DYNESIUS *et al.*, 2000). Estas mudanças são baseadas em alterações na temperatura da superfície da terra e precipitação no futuro, e podem exercer efeitos diretos e indiretos sobre os insetos (BELLARD *et al.*, 2016; BOGGS, 2016; COLINET *et al.*, 2015). Alguns efeitos diretos e indiretos de maiores temperaturas sobre insetos podem estar relacionadas à aceleração em seu tempo de desenvolvimento e alterar a disponibilidade de hospedeiros (BELLARD *et al.*, 2016; BOGGS, 2016; COLINET *et al.*, 2015). Por exemplo, um aumento da temperatura na superfície terrestre pode mudar locais onde pragas sobrevivem em períodos desfavoráveis e sobretudo afetar seus padrões de migração a longa distância (ZENG *et al.*, 2020). Consequentemente, poderá haver uma alteração na sazonalidade e a distribuição geográfica destas espécies, normalmente com maiores números de gerações no decorrer do ano, resultando em maiores perdas (RAMOS *et al.*, 2019; ZENG *et al.*, 2020).

Atualmente a distribuição de *C. includens* é restrita ao continente americano (ALFORD & HAMMOND, 1982; EICHLIN & CUNNINGHAM, 1978). A espécie tem ocorrência generalizada em países da América Central e do Sul, onde sobrevive primordialmente em condições tropicais e são incapazes de sobreviver no inverno continental dos Estados Unidos (EICHLIN & CUNNINGHAM, 1978; HERZOG, 1980). Porém, *C. includens* tem a estratégia adaptativa de migrar para regiões de latitude elevadas (ALFORD & HAMMOND, 1982). A partir de regiões de invernos amenos (ilhas caribenhas da América Central e sul da América do Norte), as populações desta praga podem voar dezenas de quilômetros em busca de alimento, e de temperaturas mais favoráveis, podendo alcançar regiões próximas ao Canadá (HERZOG, 1980).

Embora a distribuição de *C. includens* esteja limitada às Américas, esta espécie põe em risco a segurança alimentar de outros países além de seu nicho natural. Casos de introduções recentes de noctuídeos invasores, que apresentam características bioecológicas semelhantes a *C. includens*, são exemplos destes riscos. Em 2016 *Spodoptera frugiperda* invadiu a África e esta praga continua avançar no momento na China (GOERGEN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020; TAY *et al.*, 2013). Em 2013, *Helicoverpa armigera* foi introduzida no Brasil, e adaptou-se

muito bem com as condições do país (GOERGEN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020; TAY *et al.*, 2013). Em ambos os casos, estas pragas se dispersaram rapidamente no novo hábitat e causaram prejuízos milionários (GOERGEN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020; TAY *et al.*, 2013). Portanto, identificar áreas potencialmente adequadas para *C. includens* pode evitar que esta praga seja introduzida em outros continentes.

Neste sentido, estudos de modelagem de nicho ecológico são úteis para determinar áreas potenciais para a ocorrência de um organismo. Estes modelos estimam a relação entre as espécies nos locais e as características ambientais e/ou espaciais em uma escala local ou global (FRANKLIN & MILLER, 2010). Através desses modelos, são extraídas informações sobre as áreas potenciais para a ocorrências das espécies, permitindo estabelecer diretrizes e princípios para implementar medidas de prevenção e controle no que concerne a espécies pragas (DA SILVA *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2018). Além disso, é possível avaliar as possibilidades de importar agentes de controle biológico e avaliar interações de espécies exóticas e endêmicas e verificar o impacto das mudanças climáticas sobre estes organismos (BYEON *et al.*, 2018).

Entre esses algoritmos, o CLIMEX é um dos *softwares* mais recomendados para a modelagem de nicho ecológico e tem como vantagem em relação a outros *softwares*/algoritmos a observação do padrão espaço-temporal semanal da adequabilidade climática para as espécies e permite o mapeamento de estresses atuantes (DA SILVA *et al.*, 2017; JUNG *et al.*, 2016; KRITICOS *et al.*, 2017; SZYNISZEWSKA *et al.*, 2020). Ele é capaz de combinar modelos inferenciais e dedutivos para descrever as respostas de uma espécie ao clima, a fim de projetar a sua distribuição potencial (KRITICOS *et al.*, 2015). É possível também descrever a distribuição espacial potencial futura das espécies por meio de uma combinação do clima de ocorrência da espécie e suas respostas climáticas em função das previsões futuras (KRITICOS *et al.*, 2015).

Apesar de haver conhecimentos sobre condições de cultivo adequadas para o cultivo de soja e sazonalidade de *C. includens* em escala local, existem poucas informações sobre a influência de elementos climáticos sobre a praga e seu hospedeiro em escala mundial. Assim, esta dissertação foi dividida em dois capítulos. No primeiro foi desenvolvido modelos de distribuição para a soja e no segundo para *C. includens*. Em ambos organismos foi utilizado o programa CLIMEX para execução dos modelos, considerando a distribuição geográfica e sazonalidade destes organismos.

No capítulo 1, os resultados dos modelos foram usados para determinar a distribuição potencial da soja, identificar áreas potenciais para cultivo, os principais fatores climáticos influenciando sua distribuição e como as mudanças climáticas afetará a distribuição desta

cultura no futuro. No capítulo 2 também foi determinado a distribuição potencial de *C. includens*, o padrão espaço-temporal de condições climáticas favoráveis ao seu desenvolvimento, e a adequabilidade climática para *C. includens* fora do continente americano considerando a soja como hospedeiro principal.

## REFERÊNCIAS

- ADDO-BEDIAKO, A.; CHOWN, S. L.; GASTON, K. J. Thermal tolerance, climatic variability and latitude, **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 267, n. 1445, p. 739-745, 2000.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**, FAO, Rome, 2012.
- ALFORD, R. A.; HAMMOND, A. M., Jr. Plusiinae (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Louisiana soybean ecosystems as determined with loop lure-baited traps, **Journal of Economic Entomology**, v. 75, n. 4, p. 647-650, 1982.
- ANDRADE, K.; BUENO, A. d. F.; DA SILVA, D. M.; STECCA, C. d. S.; PASINI, A.; DE OLIVEIRA, M. C. N. Bioecological characteristics of *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) fed on different hosts, **Austral Entomology**, v. 55, n. 4, p. 449-454, 2016.
- BALDIN, E. L. L.; LOURENÇÃO, A. L.; SCHLICK-SOUZA, E. C. Outbreaks of *Chrysodeixis includens*, **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 458-465, 2014.
- BELLARD, C.; LEROY, B.; THUILLER, W.; RYSMAN, J. F.; COURCHAMP, F. Major drivers of invasion risks throughout the world, **Ecosphere**, v. 7, n. 3, p. e01241-e01241, 2016.
- BOGGS, C. L. The fingerprints of global climate change on insect populations, **Current Opinion in Insect Science**, v. 17, p. 69-73, 2016.
- BYEON, D.-h.; JUNG, S.; LEE, W.-H. Review of CLIMEX and MaxEnt for studying species distribution in South Korea, **Journal of Asia-Pacific Biodiversity**, v. 11, n. 3, p. 325-333, 2018.
- CANERDAY, D. T.; ARANT, F. S. Biology of *Pseudoplusia includens* and notes on biology of *Trichoplusia ni*, *Rachiplusia ou*, and *Autographa biloba*, **Journal of Economic Entomology**, v. 60, n. 3, p. 870-871, 1967.
- CHANG, W.-S.; LEE, H.-I.; HUNGRIA, M. Soybean production in the Americas. In: LUGTENBERG, B. (Ed.). **Principles of plant-microbe interactions**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 393-400.
- CHOWN, S. L.; TERBLANCHE, J. S. Physiological diversity in insects: ecological and evolutionary contexts, **Advances in Insect Physiology**, v. 33, p. 50-152, 2006.
- COLINET, H.; SINCLAIR, B. J.; VERNON, P.; RENAULT, D. Insects in fluctuating thermal environments, **Annual Review of Entomology**, v. 60, n. 1, p. 123-140, 2015.

DA SILVA, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; DA SILVA, E. M.; DA SILVA GALDINO, T. V.; PICANÇO, M. C. Spatio-temporal dynamic climate model for *Neoleucinodes elegantalis* using CLIMEX, **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 5, p. 785-795, 2017.

DUKES, J. S.; MOONEY, H. A. Does global change increase the success of biological invaders?, **Trends in Ecology & Evolution**, v. 14, n. 4, p. 135-139, 1999.

DYNESIUS, M.; JANSSON, R.; HUEY, R. B.; SHELDON, K. S.; GHALAMBOR, C. K.; HAAK, D. C.; MARTIN, P. R. Evolutionary consequences of changes in species' geographical distributions driven by Milankovitch climate oscillations, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 97, n. 16, p. 9115-9120, 2000.

EICHLIN, T. D.; CUNNINGHAM, H. B. **The Plusiinae (Lepidoptera: Noctuidae) of America North of Mexico, emphasizing genitalic and larval morphology**, United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service, p. 131, 1978.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAOSTAT**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 04/05/2019.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMALER, N. **Ecofisiologia da soja**, Londrina, PR, p. 9-9, 2007.

FRANKLIN, J.; MILLER, J. A. **Mapping species distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge University Press, 2010. 320 p.

GOERGEN, G.; KUMAR, P. L.; SANKUNG, S. B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa, **PLoS ONE**, v. 11, n. 10, p. e0165632., 2016.

HERZOG, D. C. Sampling soybean looper on soybean. *In*: KOGAN M. e D.C., H. (Ed.). **Sampling methods in soybean entomology**. New York, NY: Springer, 1980. cap. 7, p. 141-168.

HODGSON, J. A.; THOMAS, C. D.; OLIVER, T. H.; ANDERSON, B. J.; BRERETON, T. M.; CRONE, E. E. Predicting insect phenology across space and time, **Global Change Biology**, v. 17, n. 3, p. 1289-1300, 2011.

JUNG, J.-M.; LEE, W.-H.; JUNG, S. Insect distribution in response to climate change based on a model: review of function and use of CLIMEX, **Entomological Research**, v. 46, n. 4, p. 223-235, 2016.

KRITICOS, D. J.; KEAN, J. M.; PHILLIPS, C. B.; SENAY, S. D.; ACOSTA, H.; HAYE, T. The potential global distribution of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, a critical threat to plant biosecurity, **Journal of Pest Science**, v. 90, n. 4, p. 1033-1043, 2017/09/01 2017.

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

- LEE, T. S.; HANSEN, J.; ASH, M. **Major factors affecting global soybean and products trade projections.** 2016. Disponível em: [https://ageconsearch.umn.edu/record/244273/files/http\\_ers\\_usda\\_gov\\_amber-waves\\_2016-may\\_major-factors-affecting-global-soybean-and-products-trade-projections.aspx\\_V8CBL8VrUHA\\_pdfmyurl.pdf](https://ageconsearch.umn.edu/record/244273/files/http_ers_usda_gov_amber-waves_2016-may_major-factors-affecting-global-soybean-and-products-trade-projections.aspx_V8CBL8VrUHA_pdfmyurl.pdf). Acesso em: 05/05/2019.
- LI, X.-J.; WU, M.-F.; MA, J.; GAO, B.-Y.; WU, Q.-L. *et al.* Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach, **Pest Management Science**, v. 76, n. 2, p. 454-463, 2020.
- LIMA, C. H. O.; SARMENTO, R. A.; GALDINO, T. V. d. S.; PEREIRA, P. S.; SILVA, J.; SOUZA, D. J.; DOS SANTOS, G. R.; COSTA, T. L.; PICANÇO, M. C. Spatiotemporal dynamics of whitefly *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in commercial watermelon crops, **Journal of Economic Entomology**, v. 111, n. 4, p. 1895-1903, Apr 16 2018.
- LU, S.; ZHAO, X.; HU, Y.; LIU, S.; NAN, H. *et al.* Natural variation at the soybean J locus improves adaptation to the tropics and enhances yield, **Nature Genetics**, v. 49, n. 5, p. 773-779, 2017.
- MITCHELL, E. R. Life history of *Pseudoplusia includens* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae), **Journal Georgia Entomological Society**, v. 2, p. 53-57, 1967.
- MOSCARDI, F.; BUENO, A. d. F.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; ROGGIA, S.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; FARHAT, A.; CORSO, P. I. C.; YANO, S. A. C. Artrópodes que atacam as folhas da soja. In: HOFFMANN-CAMPO, C. B.; CÔRREA-FERREIRA, B. S., *et al* (Ed.). **Soja: manejo integrado de insetos e outros artrópodes-praga**. 1st ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. cap. 4, p. 213-334.
- PAGANO, M. C.; MIRANSARI, M. The importance of soybean production worldwide. In: MIRANSARI, M. (Ed.). **Abiotic and biotic stresses in soybean production**. San Diego: Academic Press, 2016. v. 1, cap. 1, p. 1-26.
- RAMOS, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; DA SILVA, R. S.; DE ARAÚJO, T. A.; PICANÇO, M. C. Climate model for seasonal variation in *Bemisia tabaci* using CLIMEX in tomato crops, **International Journal of Biometeorology**, v. 63, n. 3, p. 281-291, 2019.
- SANTANA, P. A.; KUMAR, L.; DA SILVA, R. S.; PICANÇO, M. C.; SILVA, R. S. D.; PICANÇO, M. C. Global geographic distribution of *Tuta absoluta* as affected by climate change, **Journal of Pest Science**, v. p. 1-13, 2018.
- SANTOS, S. R. d.; SPECHT, A.; CARNEIRO, E.; PAULA-MORAES, S. V. d.; CASAGRANDE, M. M. *et al.* Interseasonal variation of *Chrysodeixis includens* (Walker, [1858]) (Lepidoptera: Noctuidae) populations in the Brazilian savanna, **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 61, n. 4, p. 294-299, 2017.
- SILVA, F. C. d. S.; SEDIYAMA, T.; OLIVEIRA, R. d. C. T.; BORÉM, A.; DA SILVA, F. L.; BEZERRA, A. R. G.; DA SILVA, A. F. Economic importance and evolution of breeding. In: LOPES DA SILVA, F.; BORÉM, A., *et al* (Ed.). **Soybean Breeding**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1-16.

SPECHT, A.; DE PAULA-MORAES, S. V.; SOSA-GÓMEZ, D. R. Host plants of *Chrysodeixis includens* (Walker) (Lepidoptera, Noctuidae, Plusiinae), **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 59, n. 4, p. 343-345, 2015.

SZYNISZEWSKA, A. M.; LEPPLA, N. C.; MANOUKIS, N. C.; COLLIER, T. C.; HASTINGS, J. M.; KRITICOS, D. J.; BIGSBY, K. M. CLIMEX and MED-FOES models for predicting the variability in growth potential and persistence of mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) populations, **Annals of the Entomological Society of America**, v. n. saz065, 2020.

TAY, W. T.; SORIA, M. F.; WALSH, T.; THOMAZONI, D.; SILVIE, P.; BEHERE, G. T.; ANDERSON, C.; DOWNES, S. A brave new world for an old world pest: *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil, **PLOS ONE**, v. 8, n. 11, p. e80134, 2013.

ZENG, J.; LIU, Y.; ZHANG, H.; LIU, J.; JIANG, Y.; WYCKHUYS, K. A. G.; WU, K. Global warming modifies long-distance migration of an agricultural insect pest, **Journal of Pest Science**, v. 93, n. 2, p. 569-581, 2020/03/01 2020.

## 2 CAPÍTULO I

### **Modelagem da distribuição de cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) mediante mudanças climáticas**

João Rafael Silva Soares<sup>1\*</sup>, Ricardo Siqueira da Silva<sup>2</sup>, Rodrigo Soares Ramos<sup>3</sup>, Marcelo Coutinho Picanço<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Depto de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, MG, 36570-900, Brazil

<sup>2</sup>Depto de Agronomia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 39100-000, Brazil

<sup>3</sup>Depto de Entomologia, Universidade Federal de Viçosa, MG, 36570-900, Brazil

**Correspondência:** joao.rafael@ufv.br/ +55 31 3612 5322

**Número ORCID:** 0000-0001-8738-7743

**Conflito de interesse:** Os autores declaram que eles não têm conflito de interesse.

## RESUMO

A soja é uma das leguminosas mais cultivadas e importantes do mundo, sendo utilizada como fonte de proteína vegetal e animal nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Dada a sua importância, é essencial compreender a diferença da adequação climática para o cultivo de soja diante das mudanças climáticas. A modelagem de nicho ecológica tem sido uma ferramenta útil para avaliar possíveis mudanças na distribuição regional/global de espécies. Neste estudo, conduzimos modelos de nicho ecológico para a soja, coletando dados de ocorrência de cultivos em sequeiro. Utilizamos o CLIMEX e dados climáticos do CliMond em resolução espacial de 10' para modelar a distribuição climática potencial atual e futura da soja, aplicando o modelo de circulação geral CSIRO-Mk3.0 e assumindo um cenário de emissões A2 para 2030, 2050 e 2070. Nós analisamos mudanças na adequação climática das áreas sob diferentes projeções climáticas em nível global, e demos destaque para os principais países produtores de soja (EUA, Brasil, Argentina, China e Índia). No futuro poderão haver impactos positivos e negativos à adequação climática para o cultivo de soja em diferentes regiões do mundo. Os modelos sugerem que as áreas climáticas adequadas para o cultivo de soja provavelmente aumentarão em países e regiões localizados em latitudes mais elevadas no futuro, como o Canadá e a Europa Ocidental. Por outro lado, países localizados em áreas tropicais (por exemplo, Brasil) e Índia podem sofrer perdas significativas de área adequada até 2070. Nosso modelo de nicho ecológico foi aplicado globalmente e permite uma compreensão mais profunda de áreas passíveis de serem incorporadas no cultivo da soja e quais fatores de estresse reduzem a adequação climática da soja nos cenários atual e futuros.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, CLIMEX, modelos de nicho ecológico, distribuição de espécies.

## ABSTRACT

Soybean is one of the most cultivated and important legumes in the world, and it has been used as a source of vegetable and animal protein in developed and developing countries. Given its significance, it is essential to understand the difference in climate suitability for soybean cropping in the face of climate change. Ecological niche modelling has been a useful tool to assess possible changes in the regional/global species distribution. In this study, we conducted ecological niche models for soybean, collecting data on the occurrence of rainfed fields. We used CLIMEX and CliMond climate data in 10' spatial resolution to model the current and future potential climate distribution of soybeans, applying the general circulation model CSIRO-Mk3.0 and assuming an A2 emissions scenario for 2030, 2050 and 2070. We analyzed changes in the climatic suitability of areas under different climatic projections at a global level, and we highlighted the leading soybean producing countries (USA, Brazil, Argentina, China and India). In the future, there may be positive and negative impacts on climate suitability for soybean cultivation in different regions of the world. The models suggest that the climatic areas suitable for soybean cultivation are likely to increase in countries and regions located at higher latitudes in the future, such as Canada and Western Europe. On the other hand, countries located in tropical areas (for example, Brazil) and India can suffer significant losses in the suitable areas by 2070. Our ecological niche model has been applied globally and allows a deeper understanding of areas that can be incorporated in soybean cropping and which stress factors reduce soybean climatic suitability in the current and future scenarios.

Keywords: Climate change, CLIMEX, ecological niche models, species distribution.

### 3 INTRODUÇÃO

A soja está entre as culturas mais importantes do mundo, sendo utilizada como fonte de proteína vegetal e animal em países desenvolvidos e em desenvolvimento (PAGANO & MIRANSARI, 2016; SILVA *et al.*, 2017). É cultivada em uma área total estimada em mais de 123 milhões de hectares, produzindo aproximadamente 352 milhões de toneladas anualmente (FAO, 2017). A soja possui um alto teor de proteínas (cerca de 40%), boa qualidade nutricional e alto teor de óleo (cerca de 20%), sendo uma excelente alternativa para melhorar as dietas de milhares de pessoas nos países em desenvolvimento (CHANG *et al.*, 2015; JOHNSON *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2016; NGUYEN, 2018). Na esfera econômica, seus grãos e derivados são as mercadorias mais comercializadas, representando mais de 10% do valor total do comércio agrícola global (CENTER FOR AGRICULTURAL TRADE, 2018). Atualmente, a produção desta leguminosa é liderada pelos EUA, Brasil, Argentina, China e Índia. Os EUA e o Brasil sozinhos representam cerca de 60% da produção global e mais de 80% das importações da China (CENTER FOR AGRICULTURAL TRADE, 2018; FAO, 2017; LEE *et al.*, 2016).

O comércio global de soja e seus derivados aumentou rapidamente desde o início dos anos 90, e essa tendência deve continuar nos próximos anos (CHANG *et al.*, 2015; LEE *et al.*, 2016). Esse crescimento da demanda deve-se principalmente ao crescimento da renda e à urbanização das populações (ALEXANDRATOS & BRUINSMA, 2012; GASPARRI *et al.*, 2016). Como efeito positivo, as populações estão melhorando sua dieta, incluindo carne e outros produtos agrícolas de valor agregado, o que conseqüentemente estimula a produção de grãos e refeições proteicas, como a soja (BOEREMA *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2016). O aprimoramento genético da soja possibilitou esse crescimento em produção e produtividade, por exemplo, permitindo seu cultivo em regiões tropicais, uma vez que essa espécie é sensível ao fotoperíodo por ser uma planta de dia curto (FARIAS *et al.*, 2007; LU *et al.*, 2017).

No entanto, essa demanda crescente exerce pressão para a expansão agrícola em áreas florestais e a queima de combustíveis fósseis, resultando em emissões de carbono, que conseqüentemente exacerbam os efeitos das mudanças climáticas (BOEREMA *et al.*, 2016; GASPARRI *et al.*, 2016). Seca e ondas de calor são alguns exemplos de eventos extremos que aumentaram sua frequência devido às mudanças climáticas e, conseqüentemente, são limitações significativas na produção de alimentos em todas as principais áreas agrícolas do mundo (DERYNG *et al.*, 2014; MOHANTY *et al.*, 2015; QIN *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2014). Apesar dos principais países agrícolas se beneficiarem de investimentos na produção de gestão de alta tecnologia, o clima continua sendo um fator crítico na distribuição de lavouras e para a

produtividade de espécies (ABBERTON *et al.*, 2016; SCHLENKER & ROBERTS, 2009; SHABANI *et al.*, 2016). SCHLENKER & ROBERTS (2009) por exemplo, previram que um aumento de 6 °C na temperatura poderia reduzir a produtividade da soja em 49% nos Estados Unidos até 2100.

Por esses motivos, o impacto das mudanças climáticas na agricultura tem sido uma preocupação mundial em várias áreas de pesquisa (CAMPBELL *et al.*, 2016). Entre as diversas maneiras de investigar esses efeitos, a modelagem tem sido uma ferramenta útil. A modelagem de nicho ecológico tem sido usada para avaliar e indicar a distribuição potencial de espécies como insetos e plantas, pressupondo que as variáveis ambientais que compõem os nichos ecológicos podem ser usadas para descrever a adequação das regiões para determinada espécie (KRITICOS *et al.*, 2015; SHABANI *et al.*, 2016). Uma característica significativa dessa técnica é a possibilidade de associá-la aos modelos de circulação global (MCG) que ajudam a prever o impacto das mudanças climáticas na distribuição das espécies em nível local e mundial (KRITICOS *et al.*, 2015).

O *software* CLIMEX é caracterizado por ser um tipo de modelagem mecanicista, usada para estimar a abundância potencial e a distribuição geográfica de um organismo usando dados climáticos e biológicos das espécies (KRITICOS *et al.*, 2015). A modelagem CLIMEX é usada para modelar a adequação climática em níveis global e regional, fornecendo informações valiosas sobre a ecologia de espécies (KRITICOS *et al.*, 2015; MAGAREY *et al.*, 2018). Algumas vantagens disponíveis no CLIMEX são as respostas diárias e semanais das espécies às variáveis climáticas e a exploração dos efeitos das restrições abióticas, como estresses por calor, frio, umidade e seca (KRITICOS *et al.*, 2015; ROSENZWEIG *et al.*, 2014; SHABANI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017).

Apesar de ser uma cultura considerada adaptada ao local de cultivo, nossa hipótese é que a soja ainda pode ser explorada em novas áreas e que possivelmente poderá sofrer restrições de cultivo em regiões onde é cultivada, especialmente diante mudanças climáticas no futuro. Em nosso estudo, usamos o CLIMEX como uma ferramenta para avaliar áreas passíveis de expansão para cultivo de soja em cultivos de sequeiro, com base em mudanças na adequação climática para o período atual e em previsões para três períodos futuros (2030, 2050 e 2070). Em seguida, procuramos identificar as principais regiões atuais de cultivo de soja que provavelmente sofrerão impactos significativos como resultado das mudanças climáticas previstas e mapear os estresses atuantes nestas regiões. Nossos resultados permitiram observar quais locais possuem adequabilidade climática necessárias para a expansão do cultivo da soja o impacto das mudanças climáticas sobre esta cultura em nível global.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CLIMEX

O *software* CLIMEX permite prever e mapear a distribuição potencial usando parâmetros climáticos específicos que representam as respostas climáticas das espécies usando seus dados biológicos. Entre todos os algoritmos de modelagem, o CLIMEX é um dos poucos que permite o modelador visualizar a dinâmica espaço-temporal semanal da adequabilidade do clima para determinada espécie, através da integração de uma série temporal de dados climáticos (KRITICOS *et al.*, 2015). Ele funciona com base na ligação das respostas eco fisiológicas de uma espécie às variáveis ambientais e na previsão de possíveis mudanças na abundância e distribuição das (KRITICOS *et al.*, 2015; WEBBER *et al.*, 2011). Para o uso do CLIMEX, os parâmetros que descrevem a resposta de uma espécie ao clima são extraídos de estudos biológicos e ecológicos. Os parâmetros inferidos são usados para estimar a faixa potencial em novas áreas e em cenários climáticos atuais ou de mudanças climáticas (KRITICOS *et al.*, 2015). O CLIMEX assume que uma determinada população passa por duas fases. Sob condições climáticas favoráveis, a taxa de crescimento anual ( $IC_A$ ) descreve o potencial de crescimento populacional. Para determinar o valor dos índices  $IC_A$ , são usados os valores de temperatura (IT) e umidade (IU) que representam os requisitos para o crescimento das espécies. Por outro lado, períodos desfavoráveis não suportam o crescimento populacional e são representados por quatro índices de estresse: frio (EF), seca (ES), calor (EC), úmido (EU) e suas interações. Ao combinar índices de crescimento e estresses, o modelador pode estimar locais de adaptação climática a partir das funções de resposta de espécies no CLIMEX, gerando o Índice Ecoclimático (IE):

$$IE = [IT * IU] * \left[ \left(1 - \frac{EF}{100}\right) * \left(1 - \frac{ES}{100}\right) - \left(1 - \frac{EC}{100}\right) - \left(1 - \frac{EU}{100}\right) \right]$$

O IE é um índice anual geral de adequação climática, que descreve a adequação climática de um local para uma espécie, com escala de 0 a 100, e é uma medida geral da adequação climática para ocupação permanente das espécies-alvo (KRITICOS *et al.*, 2015). O IE não reflete o rendimento das culturas, mas sim a adequação climática da região para seu cultivo (KRITICOS *et al.*, 2015). A adequação climática, entre muitos outros fatores, é conhecida como uma das que mais influenciam o rendimento das culturas (KRITICOS *et al.*, 2015; LEITE-FILHO *et al.*, 2019; MOHANTY *et al.*, 2015; SITA *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2014).

Em nosso estudo, usamos a versão 4 do CLIMEX. Consideramos como um meio de categorização dos valores de IE para adequação climática iguais a 0 representando regiões

inadequadas; valores de IE's de 1 a 10 como representando regiões marginais; IE's entre 10 e 30 como locais indicativos onde grandes populações podem persistir (adequabilidade média); e valores de IE acima de 30 representando locais altamente adequados para espécies (adequabilidade alta) (KRITICOS *et al.*, 2015; SANTANA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2017).

#### 4.2 Dados de distribuição de cultivos de soja

Os dados de distribuição da soja foram coletados de bancos de dados online - americano CropScape (<https://nassgeodata.gmu.edu/CropScape/>); o brasileiro Soja Maps (<http://pesquisa.unemat.br/gaaf/sojamaps>) - e literatura publicada. Todas as coordenadas foram verificadas em detalhes para o cultivo de sequeiro no local. O banco de dados coletado e utilizado para o ajuste dos parâmetros consistiu em 875 pontos. Esses registros representam a distribuição geográfica global atual conhecida da soja e são mostrados na **Fig. 1-A**.

#### 4.3 Dados e cenários climáticos

Utilizamos dados climatológicos fornecidos pelo CLIMOND com resolução espacial em uma grade de 10' para modelar a distribuição atual e potencial da soja. Os dados foram baixados no formato que é possível de interpretação pelo CLIMEX, e contém as temperaturas médias máxima e mínima mensais, precipitação média mensal e umidade relativa do ar às 9:00 e 15:00 entre 1961 e 1990 (30 anos centrados em 1975) (KRITICOS *et al.*, 2012). Estas mesmas variáveis foram usadas para modelar o cenário futuro.

As distribuições globais para 2030, 2050 e 2070 foram modeladas no cenário de emissões (SRES) A2 usando o Modelo de Circulação Global (MCG) CSIRO-Mk3.0 (CS) do Center for Climate Research, Austrália.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC publicou o Quinto Relatório de Avaliação (AR5), descrevendo quatro trajetórias atualizadas de gases de efeito estufa (as vias de concentração representativas – RCP's) para substituir os cenários do SRES (PACHAURI *et al.*, 2014). As principais diferenças entre os RCP's e SRES são a concentração de CO<sub>2</sub> e o aumento da temperatura previstas. O cenário A2 SRES assume um aumento nas concentrações de CO<sub>2</sub> até o final do século para 846 ppm, enquanto o RCP 8.5 assume uma concentração na mesma época de 936 ppm. O aumento de temperatura previsto para o período de 2090 a 2099 para o A2 SRES é de aproximadamente 6°C, enquanto para o RCP 8.5 é de 7°C. Nesse sentido, selecionamos o GCM CSIRO-Mk3.0 porque ele fornece todas as variáveis necessárias para a modelagem CLIMEX, saída de resolução adequada e apresenta bom desempenho na modelagem em escala regional quando comparado a outros MCG's (KRITICOS *et al.*, 2012). Em termos de equivalência, o cenário A2 tem maior semelhança ao RCP 8.5 e baseia-se na consistência de suas premissas e na inclusão de fatores como aumento

populacional e nível tecnológico e financeiro relativo que influenciarão a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (GEE) (PACHAURI *et al.*, 2014).

#### **4.4 Parâmetros usados no CLIMEX**

Inicialmente, buscou-se determinar quais locais têm maior adequação climática (IE) para a soja no cenário atual, o que representa as melhores condições climáticas para o cultivo. Para esta tarefa, todos os ajustes de parâmetros utilizados no CLIMEX foram adotados de acordo com os dados ecofisiológicos para o cultivo de soja nas maiores regiões produtoras, a fim de criar um modelo realista. Os valores aplicados (**Tabela 1**) foram retirados de publicações científicas e boletins técnicos sobre soja e foram escolhidos para reproduzir um modelo o mais próximo possível da realidade.

##### **4.4.1 Parâmetros de crescimento**

###### **4.4.1.1 Índice de temperatura**

Este índice representa a resposta da cultura ao ciclo diário de temperatura, variando entre um limite inferior de temperatura (DV0) e um limite superior de temperatura (DV3). A temperatura ideal varia entre o limiar mínimo ótimo de temperatura (DV1) e a limiar superior ótimo de temperatura (DV2) (KRITICOS *et al.*, 2015). A soja cresce bem sob uma ampla faixa de temperaturas, embora regiões onde a temperatura média mensal no período mais quente de cultivo seja inferior a 20°C sejam consideradas inadequadas para o cultivo (FARIAS *et al.*, 2007). É importante ressaltar que a semeadura de soja não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20°C, pois a taxa de germinação e a emergência das plantas são reduzidas, prolongando seu ciclo (FARIAS *et al.*, 2007). A faixa de temperatura adequada para a semeadura varia de 20 a 30°C, sendo 29°C a temperatura ideal para emergências rápidas e uniformes. Nos principais países produtores, como EUA e Brasil, a temperatura ideal para o desenvolvimento da soja é de cerca de 30°C (FARIAS *et al.*, 2007). Locais com temperaturas iguais ou menores a 10°C não são adequados para o cultivo de soja, uma vez que o crescimento vegetativo e o desenvolvimento de grãos são zero, e a floração só é induzida em temperaturas acima de 13°C (ALSAJRI *et al.*, 2019; FARIAS *et al.*, 2007). Por outro lado, temperaturas acima de 40°C prejudicam a taxa de crescimento, causam aborto de flores e diminuem a retenção de vagens (CHEBROLU *et al.*, 2016; FARIAS *et al.*, 2007; JUMRANI *et al.*, 2018; SALEM *et al.*, 2007). Em nosso estudo, definimos 10°C como a limiar mínimo de temperatura (DV0). O DV1 foi fixado em 15°C e o DV2 em 32°C, uma vez que esta espécie possui ampla adaptação. Finalmente, estabelecemos a DV3 a 37°C, uma vez que o crescimento vegetativo é praticamente nulo e o abortamento de flores é mais proeminente (SALEM *et al.*, 2007; WAGLE *et al.*, 2017).

#### 4.4.1.2 Umidade do solo

As chuvas são a principal fonte de água para a maior parte da produção mundial de soja, uma vez que apenas um pequeno número de fazendas tem sistemas de irrigação para complementar as necessidades hídricas dessa cultura (PORTMANN *et al.*, 2010). Esse fato é aplicável principalmente a regiões tropicais que, apesar de terem temperaturas adequadas ao longo do ano, apresentam um regime hídrico caracterizado por períodos de seca e umidade (RAO *et al.*, 2016). A disponibilidade de água para a soja é crítica nos períodos de emergência da germinação e entre os períodos de floração e enchimento dos grãos, onde suas exigências podem atingir 7 a 8 mm dia<sup>-1</sup> (FARIAS *et al.*, 2007). Durante este período, o excesso ou o déficit hídrico são prejudiciais à emergência uniforme das plantas. Nesta fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder 85% da disponibilidade máxima de água e não deve ser inferior a 50% da capacidade de retenção de água do solo (FARIAS *et al.*, 2007). No entanto, o tempo de exposição, a intensidade, a duração e a frequência do déficit hídrico, além da diversidade de interações solo, planta e atmosfera, são fatores que influenciam as respostas de plantas de soja a esse estresse (FUGANTI-PAGLIARINI *et al.*, 2017). Dessa forma, definimos o limiar mínimo de umidade do solo (SM0) em 0,1 para representar o ponto de murcha permanente, que é consistente com o limiar de estresse por seca (SMDS). O limiar ótimo de umidade do solo (SM1) foi ajustado para 0,5, valor que representa 50% da capacidade de retenção do solo necessária para a germinação e emergência das plantas. O limiar ótimo superior de umidade ajustado (SM2) foi de 1,3. Esse valor permitiu o melhor ajuste para a atual distribuição de soja no sudeste da Ásia, onde a soja também é cultivada (LU *et al.*, 2017). Por outro lado, o excesso de água no solo por longos períodos leva à hipóxia na planta, causando sua mortalidade (TAIZ *et al.*, 2015). O limiar superior de umidade do solo (SM3) foi fixado em 1,5 a fim de manter a consistência com o limiar de estresse úmido (SMWS).

#### 4.4.2 Parâmetros de estresse

##### 4.4.2.1 Estresse por frio

O estresse pelo frio tem uma influência negativa significativa no crescimento e desenvolvimento das plantas em climas mais frios (SCHMIDT *et al.*, 2015). Esse tipo de estresse é predominante nas regiões temperadas produtoras, onde o período de crescimento da soja depende do derretimento da neve e do aquecimento do solo e do ar (MOURTZINIS *et al.*, 2019). Por esse motivo, o TTCS (limiar de temperatura de estresse por frio) e o THCS (taxa de acúmulo de estresse por frio) foram fixados em 10°C e 0,00001°C semana<sup>-1</sup>, respectivamente, para atender às regiões cultivadas de soja nos EUA, Canadá, Regiões da Europa e nordeste da China.

#### 4.4.2.2 Estresse por calor

Temperaturas extremamente altas também afetam a sobrevivência das espécies. Esse fator é modelado por um limiar de estresse por calor (TTHS) e sua taxa de acumulação semanal (THHS). O aumento da frequência de estresse de temperatura pode interromper os processos fisiológicos das plantas, resultando em inibição fotossintética, anabolismo reduzido de nitrogênio, aumento de catabolismo proteico e acúmulo de produtos de peroxidação lipídica (DAS *et al.*, 2017; SITA *et al.*, 2017). Temperaturas acima de 35°C induzem o aborto das flores e de 37°C inibe o crescimento da soja (CHEBROLU *et al.*, 2016; JUMRANI *et al.*, 2018). Assim, o TTHS foi ajustado para 37°C e o THHS para 0,001°C semana<sup>-1</sup>. Esse ajuste permitiu o mapeamento das regiões produtoras de soja na Índia.

#### 4.4.2.3 Estresse por seca

A falta de água leva a planta a uma série de alterações fisiológicas, entre elas o fechamento de estômatos e conseqüentemente a redução da assimilação de carbono (Nguyen *et al.* 2018). O estresse por seca (SMDS) começa a se acumular quando as condições estão muito secas para as espécies, e se acumula a uma taxa semanal específica (HDS). A soja é suscetível à seca, especialmente durante a germinação das sementes e o florescimento/enchimento de grãos, nos quais a falta de água pode causar perdas de quase 90% (CHEBROLU *et al.*, 2016; DAS *et al.*, 2017). Ajustamos o SMDS em 0,1 (representando o ponto de murcha permanente) a uma taxa de acumulação (HDS) de -0,006 semana<sup>-1</sup>.

#### 4.4.2.4 Estresse por umidade

A soja é intolerante ao excesso de umidade. Dependendo da quantidade e do tempo de exposição, o excesso de umidade pode induzir estresse nas raízes da soja. O estresse por umidade durante os estágios vegetativo e reprodutivo da soja pode causar perdas entre 17 a 40% e 40 a 57%, respectivamente (NGUYEN *et al.*, 2012). Condições hipóxicas retardam o crescimento, a fotossíntese, favorece o ataque de patógenos e pode até levar à morte (NGUYEN *et al.*, 2012; TAIZ *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017). Os danos ocorrem principalmente nas raízes devido ao acúmulo de bioprodutos tóxicos (TAIZ *et al.*, 2015; WU *et al.*, 2017). Esse estresse se acumula semanalmente quando a umidade do solo excede um limite de estresse úmido (SMWS) a uma determinada taxa semanal (HWS). Portanto, definimos o SMWS como 1,7 e sua taxa de acumulação (HWS) como 0,001 semana<sup>-1</sup>. Isso permitiu ajustar a distribuição da soja em regiões mais úmidas do sudeste da Ásia.

#### 4.4.2.5 Processo de validação

Os dados de ocorrência de cultivos de soja presentes nas Américas foram omitidos no processo de ajuste dos parâmetros a serem utilizados no processo de validação. Depois que o

parâmetro foi definido, a área de validação foi verificada para examinar o desempenho do modelo nessa região. Além disso, realizamos a validação cruzada usando um mapa da distribuição atual da soja fornecidos pelo MapSPAM (Modelo de Alocação de Produção Espacial) (INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE, 2019) (**Fig. 1-C**). O MapSPAM integra informações sobre culturas (por exemplo, estatísticas subnacionais de produção agrícola, dados de satélite sobre uso da terra, áreas irrigadas, avaliações biofísicas de adequação de culturas, densidades populacionais, intensidades e preços de culturas) e princípios de entropia cruzada para alocar cada cultura em pixels para formar um banco de dados. O resultado para cada pixel é a área de cultivo da soja em nível global (<http://mapspam.info>).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Validação do modelo

A distribuição potencial de soja no período atual tem uma boa coincidência com suas distribuições conhecidas. Nosso modelo mostrou concordância satisfatória com a atual distribuição de soja (**Fig. 1-A**) na área de validação (**Fig. 1-B**), contendo 100% dos pontos (419 ocorrências) dentro da área de validação (Brasil, EUA e Argentina majoritariamente). Considerando as categorias de adequabilidade climática, 395 ocorrências (94,27%) estão em áreas de adequabilidade alta e 24 ocorrências (5,73%) estão em áreas de adequabilidade média. A distribuição global de áreas de cultivo da soja (**Fig. 1-C**) usada para validação cruzada também mostrou concordância com o modelo proposto. Essas formas de validação confirmam satisfação do modelo atual e dos valores dos parâmetros utilizados.

### 5.2 Cenário atual

Nosso modelo indica adequabilidade climática média ( $10 \geq IE < 30$ ) e alta ( $IE \geq 30$ ) para a soja em todos os continentes. Entre os países produtores nas Américas, a porção central e oeste dos Estados Unidos, sul do Canadá, Brasil, Argentina, Paraguai, Bolívia e Uruguai têm áreas altamente adequadas para o desenvolvimento da soja. Alguns outros exemplos de regiões adequadas incluem países da África Central e do Sul, grande parte da Europa Ocidental, sul da Índia, leste da China e costa leste da Austrália. As regiões desérticas do Chile, Argentina, oeste dos EUA, Saara, Austrália central e a maior parte do Canadá, Mongólia e Rússia estão entre países ou territórios com condições inadequadas. Na Ásia, o Oriente Médio da China,

Bangladesh, Taiwan, Mianmar, Laos, Camboja, Vietnã, Malásia, Filipinas, Japão e Indonésia estão entre os locais com adequação (**Fig. 1-B**).

### 5.3 Projeções futuras

Cenários futuros projetam uma redução de áreas climáticas adequadas para o cultivo de soja no Brasil, Índia e Sudeste Asiático, mas uma expansão no hemisfério norte, principalmente na Europa e no Canadá (**Fig. 2 e Tabela 2**). No Brasil, provavelmente haverá mudanças nas áreas atuais consideradas altas e médias, transformando-se para áreas de adequação marginal de acordo com as projeções para o ano 2070. Por outro lado, poderá haver um aumento nas áreas de adequação marginal no Canadá. Na Europa, projeta-se que áreas de adequação climática para o cultivo de soja possam diminuir, com mudanças de adequação climática adequada para média na França e na Ucrânia. As áreas com adequabilidade média na Índia provavelmente se tornarão marginais, enquanto no sudeste da Ásia a maioria das áreas adequadas poderá mudar para adequabilidade média e marginal até 2050. Bangladesh, Mianmar, Tailândia, Laos, Camboja e Vietnã provavelmente terão uma redução nas áreas de adequabilidade alta e um aumento nas áreas de adequabilidade média.

Os quatro tipos de estresses foram mapeados para visualizar as mudanças no cenário atual sobre as projeções futuras. Espera-se que o estresse pelo frio diminua em latitudes mais elevadas, em escala global. Espera-se que o estresse por frio diminua no sul Canadá, sudeste da Rússia e nordeste da China até 2070, com mudanças mais extensas nas áreas de adequabilidade médias no Canadá e no sudeste da Rússia. O estresse por calor deve aumentar como resultado das mudanças climáticas, principalmente na Índia e a partir de 2050, no Brasil. Em relação ao estresse por seca, prevê-se um aumento global de áreas nesta situação, condição inversamente proporcional prevista para o estresse por umidade (redução do estresse por umidade). Os principais países afetados por esse estresse são o Brasil e a Índia e podem ser agravados de acordo com as projeções descritas.

### 5.4 A situação dos principais países produtores de soja do mundo

Os EUA, Brasil, Argentina e China contêm regiões significativas de adequação ideal, com o Brasil apresentando a maior área nessa categoria. Os EUA apresentam pouca variação em termos de áreas adequadas em todos os cenários, mas um aumento aproximado de 68% nas áreas de adequabilidade média até 2070. Entre 2050 e 2100, o Brasil pode sofrer uma redução drástica na adequação climática (redução de 36,4% da área da categoria ideal e um aumento de 329,5% da área da categoria média), devido a um aumento de estresses por seca e calor (**Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 e Fig. 6** Erro! Fonte de referência não encontrada.). A Argentina terá menor variação na adequabilidade de todos os países listados, aumentando sua área inadequada para a

soja em 5,1% em 2070 (**Tabela 2** e **Fig. 2**). Entre esses cinco países, a Índia possui a maior área com adequação média. A Índia provavelmente sofrerá mudanças mais significativa de acordo com nossas previsões, com um aumento de até 439% em áreas marginais e inadequadas em relação à distribuição atual. A China permanece semelhante às condições atuais, aumentando sua área em aproximadamente 3,1% em áreas com média e alta adequação. Para este país, os estresses por frio e por seca em cenários futuros podem diminuir e expandir ligeiramente as áreas ao norte próximas à Rússia, respectivamente.

## 6 DISCUSSÃO

Este estudo foi baseado em requisitos biológicos e climáticos que correspondem à adequação climática necessária para o cultivo da soja globalmente. Levando em consideração essas premissas, nosso modelo ajusta-se bem à distribuição atual da soja, incluindo as áreas utilizadas como validação (países americanos) (**Fig. 1-C**). Nosso modelo representou aproximadamente 96% dos registros de ocorrência em todo o mundo durante a fase de calibração e 100% dos registros de ocorrência na área de validação, combinando as áreas apropriadas para o cultivo de soja estimadas pela modelagem através do CLIMEX. Outras estratégias de validação adotadas como o mapa MapSPAM (**Fig. 1-C**) correspondem a distribuição atual da soja modelada nesta pesquisa. As áreas com altas condições de produção de soja no mapa MapSPAM concordam com as áreas de adequação alta do modelo elaborado, como o cinturão da soja nos EUA e a região centro-sul do Brasil. Além disso, estimativas de áreas cultivadas com soja fornecidas pela FAO e áreas de adequação climática média e alta para soja contidas na **Tabela 2** também apresentam boa concordância. Essas outras formas de validação confirmam a confiabilidade do nosso modelo, melhorando a consistência entre a distribuição geográfica potencial do modelo e a área de cultivo da soja fornecida pelo MapSPAM. Todas essas etapas fornecem um nível satisfatório de confiança no comportamento do modelo de soja para cenários climáticos atuais e futuros.

Nosso modelo destaca regiões com adequação climática favoráveis e desfavoráveis ao cultivo de soja em todo o mundo, enfatizando os principais estresses responsáveis por limitar a adequação climática da soja nas condições climáticas atuais e futuras. Estresses por frio e seca são as mais predominantes em todos os cenários, coincidindo com áreas de maior latitude (por exemplo, norte dos EUA, Canadá, norte da China) e regiões do Brasil, Índia, África e China, respectivamente (**Fig. 5** e **Fig. 6**). Como mencionado anteriormente, as plantas de soja podem sobreviver em ampla amplitude térmica, embora os tecidos das plantas sofram danos abaixo de 10°C ou acima de 37°C (CHEBROLU *et al.*, 2016; FARIAS *et al.*, 2007; SALEM *et al.*, 2007).

Em regiões frias, a soja é semeada na primavera, quando a neve derrete e a temperatura do solo é suficiente para permitir a germinação. Assim, regiões com temperaturas médias anuais do ar variando entre 10 e 37°C têm maior probabilidade de obter sucesso no cultivo de soja. Abaixo de 10°C, o crescimento das plantas será reduzido significativamente, enquanto em temperaturas acima de 37°C, elas reduzirão o crescimento vegetativo e reprodutivo das plantas (CHEBROLU *et al.*, 2016; FARIAS *et al.*, 2007; SALEM *et al.*, 2007).

De acordo com a FAO, os EUA, Brasil, Argentina, China e Índia são os principais produtores de soja no mundo (FAO, 2017). Considerando a média da produção total no período de 2007 a 2017, esses países representam aproximadamente 85% da produção mundial de soja, com os EUA e o Brasil produzindo mais da metade do total global. Sob as atuais condições climáticas, aproximadamente 33% da área global, com algum grau de adequação à soja, fica dentro dos territórios desses cinco importantes produtores.

Conforme projeções futuras, países produtores como EUA, China e Argentina podem ter poucas modificações na área de adequação ideal (**Tabela 2** e **Fig. 2**). Uma razão para isso é a mudança mínima nos estresses, como mostrado nas **Fig. 3**, **Fig. 4**, **Fig. 5** e **Fig. 6**. Por outro lado, a perda de adequação climática em áreas de cultivo tropical pode ser substancial e foi destacada em outros estudos para a soja (CAETANO *et al.*, 2018; ROSENZWEIG *et al.*, 2014). Em zonas tropicais, as principais regiões produtoras do Brasil provavelmente serão afetadas pelas mudanças climáticas. Outro país produtor que também pode ser significativamente afetado é a Índia. Nesse caso, grandes proporções de áreas com adequação média do principal estado produtor (Madhya Pradesh) provavelmente perderão a adequação ao longo das projeções, restringindo-se ao sul do país no cenário do ano 2070. Provavelmente os estresses devidos à seca e o calor serão predominantes e afetarão o cultivo de soja no Brasil e na Índia (**Fig. 4** e **Fig. 6**). Especialmente no Brasil, o estresse hídrico pode ter um impacto mais significativo e pode ser derivado de chuvas mal distribuídas, situações que já estão presentes no momento e tendem a se intensificar no futuro (LEITE-FILHO *et al.*, 2019; MARENGO *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2014). As principais consequências desses estresses são as mudanças na dinâmica dos metabólitos essenciais, que podem afetar o crescimento e desenvolvimento da soja (DAS *et al.*, 2017). Os efeitos do estresse por temperatura podem ser pronunciados e podem levar a reduções entre 51 e 61% no rendimento quando estão em um ambiente de 38 a 42°C durante o dia, embora existam genótipos disponíveis com maior tolerância ao calor (JUMRANI *et al.*, 2018). Além disso, altas temperaturas também podem influenciar o processo de fixação simbiótica de nitrogênio, onde os períodos de verão associados às ondas de calor afetam a

sobrevivência dos rizóbios e, assim, reduzem a adequação para a sobrevivência de ambas as espécies (SITA *et al.*, 2017).

Modelos para o cenário futuro têm implicações importantes para a segurança alimentar global. Os resultados permitem, por exemplo, que os governos definam políticas públicas de assistência ao produtor e distribuição de alimentos, aumentando a segurança alimentar e reduzindo os impactos ambientais em face do crescimento populacional esperado para os próximos anos (MOHANTY *et al.*, 2015; SHABANI *et al.*, 2016; SOFAER *et al.*, 2019). Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias e mudanças no manejo podem mitigar o impacto das mudanças climáticas no cultivo da soja (CERNAY *et al.*, 2015). O investimento em tecnologia agrícola tem sido crítico no aumento da produtividade das culturas, a fim de reduzir os efeitos adversos de doenças, pragas e mudanças climáticas (BYERLEE *et al.*, 2014). Por exemplo, o desenvolvimento de variedades tolerantes ao estresse pode reduzir as perdas devido ao calor, seca e frio em áreas onde as condições se tornam desfavoráveis e por meio de medidas de adaptação, como mudanças na data de plantio e técnicas de economia de água (por exemplo, plantio direto), que são algumas estratégias que podem e são empregadas (CERNAY *et al.*, 2015; HE *et al.*, 2016; MOURTZINIS *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2018; SINCLAIR *et al.*, 2016). As variedades atuais apresentam melhor controle transpiratório e menor mortalidade que as cultivares mais antigas quando submetidas a solos secos, por meio de melhor controle hormonal, abertura/fechamento de estômatos, maior osmorregulação e melhores relações hídricas, resultando em maior eficiência no uso da água e maior produtividade (HE *et al.*, 2016; SINCLAIR *et al.*, 2016).

O pressuposto central de funcionamento do CLIMEX é que a característica que determina o crescimento de uma espécie é o clima (KRITICOS *et al.*, 2015). Uma crítica ao uso do CLIMEX é que as estimativas encontradas não identificam áreas onde seria economicamente desejável cultivar a espécie. Além disso, o CLIMEX não incorpora certas limitações abióticas e bióticas, como tipo de solo e impactos de pragas e suas interações. A inclusão de outros fatores críticos não climáticos, como topografia, características físico-químicas e morfológicas do solo e uso da terra em um nível detalhado (nacional e estadual) são opções para refinar ainda mais esse modelo. Sobretudo, não consideramos o progresso genético potencial da soja que pode ocorrer nos próximos anos.

O uso do CLIMEX esclareceu países e regiões com clima adequados para serem utilizadas no cultivo da soja, e permitiu uma compreensão mais profunda dos fatores de estresse que reduzem a adequação climática da soja em cenários futuros. Os resultados apresentados neste estudo mostram impactos negativos potenciais oriundos do aumento das emissões de

gases de efeito estufa sobre a adequação climática ao cultivo de soja e, conseqüentemente, seu cultivo global. Nossos modelos indicam que as áreas climáticas adequadas para o cultivo de soja provavelmente aumentarão em países localizados em latitudes mais altas, como o Canadá e a Europa Oriental, devido à redução do estresse pelo frio. Por outro lado, os países localizados em áreas tropicais (Brasil) e a Índia podem perder grandes áreas adequadas até 2070. Os estresses de calor e seca são os principais fatores limitantes do crescimento da soja nesses países.

### **Agradecimentos**

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001 e foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### **REFERÊNCIAS**

ABBERTON, M.; BATLEY, J.; BENTLEY, A.; BRYANT, J.; CAI, H. *et al.* Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics, **Plant Biotechnology Journal**, v. 14, n. 4, p. 1095-1098, 2016.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**, FAO, Rome, 2012.

ALSAJRI, F. A.; WIJEWARDANA, C.; KRUTZ, L. J.; IRBY, J. T.; GOLDEN, B.; REDDY, K. R. Quantifying and validating soybean seed emergence model as a function of temperature, **American Journal of Plant Sciences**, v. 10, n. 1, p. 111-124, 2019.

BOEREMA, A.; PEETERS, A.; SWOLFS, S.; VANDEVENNE, F.; JACOBS, S.; STAES, J.; MEIRE, P. Soybean trade: balancing environmental and socio-economic impacts of an intercontinental market, **PLOS ONE**, v. 11, n. 5, p. e0155222-e0155222, 2016.

BYERLEE, D.; STEVENSON, J.; VILLORIA, N. Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation?, **Global Food Security**, v. 3, n. 2, p. 92-98, 2014.

CAETANO, J. M.; TESSAROLO, G.; DE OLIVEIRA, G.; SOUZA, K. d. S. e.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; NABOUT, J. C. Geographical patterns in climate and agricultural technology drive soybean productivity in Brazil, **PLOS ONE**, v. 13, n. 1, p. e0191273-e0191273, 2018.

CAMPBELL, B. M.; VERMEULEN, S. J.; AGGARWAL, P. K.; CORNER-DOLLOFF, C.; GIRVETZ, E. *et al.* Reducing risks to food security from climate change, **Global Food Security**, v. 11, p. 34-43, 2016.

CENTER FOR AGRICULTURAL TRADE. **Trade elasticities and trade disputes: new evidence from tariffs and relative preference margins**, 2018.

CERNAY, C.; BEN-ARI, T.; PELZER, E.; MEYNARD, J.-M.; MAKOWSKI, D. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas, **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 11171-11171, 2015.

CHANG, W.-S.; LEE, H.-I.; HUNGRIA, M. Soybean production in the Americas. *In*: LUGTENBERG, B. (Ed.). **Principles of plant-microbe interactions**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 393-400.

CHEBROLU, K. K.; FRITSCHI, F. B.; YE, S.; KRISHNAN, H. B.; SMITH, J. R.; GILLMAN, J. D. Impact of heat stress during seed development on soybean seed metabolome, **Metabolomics**, v. 12, n. 2, p. 28-28, 2016.

DAS, A.; RUSHTON, P.; ROHILA, J.; DAS, A.; RUSHTON, P. J.; ROHILA, J. S. Metabolomic profiling of soybeans (*Glycine max* L.) reveals the importance of sugar and nitrogen metabolism under drought and heat stress, **Plants**, v. 6, n. 4, p. 21-21, 2017.

DERYNG, D.; CONWAY, D.; RAMANKUTTY, N.; PRICE, J.; WARREN, R. Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures, **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 3, p. 034011-034011, 2014.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAOSTAT**. 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 04/05/2019.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMALER, N. **Ecofisiologia da soja**, Londrina, PR, p. 9-9, 2007.

FUGANTI-PAGLIARINI, R.; FERREIRA, L. C.; RODRIGUES, F. A.; MOLINARI, H. B. C.; MARIN, S. R. R. *et al.* Characterization of soybean genetically modified for drought tolerance in field conditions, **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 448-448, 2017.

GASPARRI, N. I.; KUEMMERLE, T.; MEYFROIDT, P.; LE POLAIN DE WAROUX, Y.; KREFT, H. The emerging soybean production frontier in southern Africa: conservation challenges and the role of south-south telecouplings, **Conservation Letters**, v. 9, n. 1, p. 21-31, 2016.

HE, J.; DU, Y. L.; WANG, T.; TURNER, N. C.; XI, Y.; LI, F. M. Old and new cultivars of soya bean (*Glycine max* L.) subjected to soil drying differ in abscisic acid accumulation, water relations characteristics and yield, **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 202, n. 5, p. 372-383, 2016.

INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. Global spatially-disaggregated crop production statistics data for 2000 version 3.0.7. 2019.

JOHNSON, L. A.; WHITE, P. J.; GALLOWAY, R. (ed.). **Soybeans: chemistry, production, processing, and utilization**. Urbana, Illinois: AOCS Press, 2015. 850 p.

JUMRANI, K.; BHATIA, V. S.; PANDEY, G. P. Screening soybean genotypes for high temperature tolerance by in vitro pollen germination, pollen tube length, reproductive efficiency and seed yield, **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 23, n. 1, p. 77-90, 2018.

KRITICOS, D. J.; MAYWALD, G. F.; YONOW, T.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; SUTHERST, R. **CLIMEX Version 4: exploring the effects of climate on plants, animals and diseases**. Canberra: CSIRO, 2015. 156 p.

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

LEE, T. S.; HANSEN, J.; ASH, M. **Major factors affecting global soybean and products trade projections**. 2016. Disponível em: [https://ageconsearch.umn.edu/record/244273/files/http\\_ers\\_usda\\_gov\\_amber-waves\\_2016-may\\_major-factors-affecting-global-soybean-and-products-trade-projections\\_aspx\\_V8CBL8VrUHA\\_pdfmyurl.pdf](https://ageconsearch.umn.edu/record/244273/files/http_ers_usda_gov_amber-waves_2016-may_major-factors-affecting-global-soybean-and-products-trade-projections_aspx_V8CBL8VrUHA_pdfmyurl.pdf). Acesso em: 05/05/2019.

LEITE-FILHO, A. T.; SOUSA PONTES, V. Y.; COSTA, M. H. Effects of deforestation on the onset of the rainy season and the duration of dry spells in southern Amazonia, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 10, p. 5268-5281, 2019.

LU, S.; ZHAO, X.; HU, Y.; LIU, S.; NAN, H. *et al.* Natural variation at the soybean J locus improves adaptation to the tropics and enhances yield, **Nature Genetics**, v. 49, n. 5, p. 773-779, 2017.

MAGAREY, R.; NEWTON, L.; HONG, S. C.; TAKEUCHI, Y.; CHRISTIE, D. *et al.* Comparison of four modeling tools for the prediction of potential distribution for non-indigenous weeds in the United States., **Biological Invasions**, v. 20, n. 3, p. 679-694, 2018/03/01 2018.

MARENGO, C. A.; SELUCHI, J. A.; CUARTAS, M. E.; ALVES, L. A. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015, **Journal of Water Resource and Protection**, v. 8, p. 252-262, 2014.

MOHANTY, M.; SINHA, N. K.; LENKA, S.; HATI, K. M.; SOMASUNDARAM, J.; SAHA, R.; SINGH, R. K.; CHAUDHARY, R. S.; SUBBA RAO, A. Climate change impacts on rainfed soybean yield of central India: management strategies through simulation modelling. *In*. New Delhi: Springer India, 2015. p. 39-44.

MOURTZINIS, S.; SPECHT, J. E.; CONLEY, S. P. Defining optimal soybean sowing dates across the US, **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 2800-2800, 2019.

NGUYEN, H. (ed.). **Achieving sustainable cultivation of soybeans**. Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. 340 p.

NGUYEN, K. H.; MOSTOFA, M. G.; LI, W.; VAN HA, C.; WATANABE, Y.; LE, D. T.; THAO, N. P.; TRAN, L.-S. P. The soybean transcription factor GmNAC085 enhances drought tolerance in *Arabidopsis*, **Environmental and Experimental Botany**, v. 151, p. 12-20, 2018.

NGUYEN, V. T.; VUONG, T. D.; VANTOAI, T.; LEE, J. D.; WU, X.; MIAN, M. A. R.; DORRANCE, A. E.; SHANNON, J. G.; NGUYEN, H. T. Mapping of quantitative trait loci associated with resistance to and flooding tolerance in soybean, **Crop Science**, v. 52, n. 6, p. 2481-2481, 2012.

PACHAURI, R. K.; ALLEN, M. R.; BARROS, V. R.; BROOME, J.; CRAMER, W. *et al.* **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** IPCC, 2014. 169 p. 9291691437.

PAGANO, M. C.; MIRANSARI, M. The importance of soybean production worldwide. *In:* MIRANSARI, M. (Ed.). **Abiotic and biotic stresses in soybean production.** San Diego: Academic Press, 2016. v. 1, cap. 1, p. 1-26.

PORTMANN, F. T.; SIEBERT, S.; DÖLL, P. MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling, **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, n. 1, 2010.

QIN, W.; WANG, D.; GUO, X.; YANG, T.; OENEMA, O. Productivity and sustainability of rainfed wheat-soybean system in the North China Plain: results from a long-term experiment and crop modelling, **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 17514-17514, 2015.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; SANTO, C. M. E.; GAN, M. A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979-2011, **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291-302, 2016.

ROSENZWEIG, C.; ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A. C.; MÜLLER, C. *et al.* Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3268-3273, 2014.

SALEM, M. A.; KAKANI, V. G.; KOTI, S.; REDDY, K. R. Pollen-based screening of soybean genotypes for high temperatures, **Crop Science**, v. 47, n. 1, p. 219-219, 2007.

SANTANA, P. A.; KUMAR, L.; DA SILVA, R. S.; PICANÇO, M. C. Global geographic distribution of *Tuta absoluta* as affected by climate change., **Journal of Pest Science**, v. 92, n. 4, p. 1373-1385, 2019.

SCHLENKER, W.; ROBERTS, M. J. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 37, p. 15594-15598, 2009.

SCHMIDT, J.; MESSMER, M.; WILBOIS, K.-P. Beneficial microorganisms for soybean (*Glycine max* (L.) Merr), with a focus on low root-zone temperatures, **Plant and Soil**, v. 397, n. 1-2, p. 411-445, 2015.

SHABANI, F.; KUMAR, L.; NOJOUMIAN, A. H.; ESMAEILI, A.; TOGHYANI, M. Projected future distribution of date palm and its potential use in alleviating micronutrient deficiency, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 4, p. 1132-1140, 2016.

SILVA, F. C. d. S.; SEDIYAMA, T.; OLIVEIRA, R. d. C. T.; BORÉM, A.; DA SILVA, F. L.; BEZERRA, A. R. G.; DA SILVA, A. F. Economic importance and evolution of breeding. *In:* LOPES DA SILVA, F.; BORÉM, A., *et al* (Ed.). **Soybean Breeding.** Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1-16.

SILVA, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; PICANÇO, M. C. Assessing the impact of global warming on worldwide open field tomato cultivation through CSIRO-Mk3.0 global climate model, **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 03, p. 407-420, 2017.

SINCLAIR, T. R.; DEVI, J. M.; CARTER, T. E. Limited-transpiration trait for increased yield for water-limited soybean: from model to phenotype to genotype to cultivars. *In*: YINPAUL, X. e STRUIK, C. (Ed.). **Crop Systems Biology**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 129-146.

SITA, K.; SEHGAL, A.; HANUMANTHARAO, B.; NAIR, R. M.; VARA PRASAD, P. V. *et al.* Food legumes and rising temperatures: effects, adaptive functional mechanisms specific to reproductive growth stage and strategies to improve heat tolerance, **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1658-1658, 2017.

SOFAER, H. R.; JARNEVICH, C. S.; PEARSE, I. S.; SMYTH, R. L.; AUER, S. *et al.* Development and delivery of species distribution models to inform decision-making, **BioScience**, v. 69, n. 7, p. 544-557, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Plant physiology and development**. 6 ed. Sinauer Associates, 2015. 761 p.

WAGLE, P.; GOWDA, P. H.; ANAPALLI, S. S.; REDDY, K. N.; NORTHUP, B. K. Growing season variability in carbon dioxide exchange of irrigated and rainfed soybean in the southern United States, **Science of The Total Environment**, v. 593-594, p. 263-273, 2017.

WANG, Q.; WU, J.; LEI, T.; HE, B.; WU, Z. *et al.* Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale, **Quaternary International**, v. 349, p. 10-21, 2014.

WEBBER, B. L.; YATES, C. J.; LE MAITRE, D. C.; SCOTT, J. K.; KRITICOS, D. J.; OTA, N.; MCNEILL, A.; LE ROUX, J. J.; MIDGLEY, G. F. Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models, **Diversity and Distributions**, v. 17, n. 5, p. 978-1000, 2011.

WU, C.; ZENG, A.; CHEN, P.; HUMMER, W.; MOKUA, J.; SHANNON, J. G.; NGUYEN, H. T. Evaluation and development of flood-tolerant soybean cultivars, **Plant Breeding**, v. 136, n. 6, p. 913-923, 2017.

**Tabela 1** Valores dos parâmetros utilizados para modelagem da distribuição da soja (*Glycine max* L.) no CLIMEX

<b>Índice</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Acrônimo</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura</b>	Limiar mínimo de temperatura (°C)	DV0	10
	Limiar mínimo ótimo de temperatura (°C)	DV1	15
	Limiar superior ótimo de temperatura (°C)	DV2	32
	Limiar superior de temperatura (°C)	DV3	37
<b>Umidade</b>	Limiar mínimo de umidade do solo*	SM0	0,1
	Limiar mínimo ótimo de umidade do solo*	SM1	0,5
	Limiar superior ótimo de umidade do solo*	SM2	1,3
	Limiar superior de umidade do solo *	SM3	1,5
<b>Estresse por frio</b>	Limiar de temperatura de estresse por frio (°C)	TTCS	10
	Taxa de acumulação de estresse por frio (semana <sup>-1</sup> )	THCS	-0,00001
<b>Estresse por calor</b>	Limiar de temperatura para estresse por calor (°C)	TTHS	37
	Taxa de acumulação de estresse por calor (semana <sup>-1</sup> )	THHS	0,001
<b>Estresse por seca</b>	Limiar de estresse por seca*	SMDS	0,1
	Taxa de acumulação de estresse por seca (semana <sup>-1</sup> )	HDS	-0,006
<b>Estresse por umidade</b>	Limiar de estresse por umidade*	SMWS	1,7
	Taxa de acumulação de estresse por umidade (semana <sup>-1</sup> )	HWS	0,001

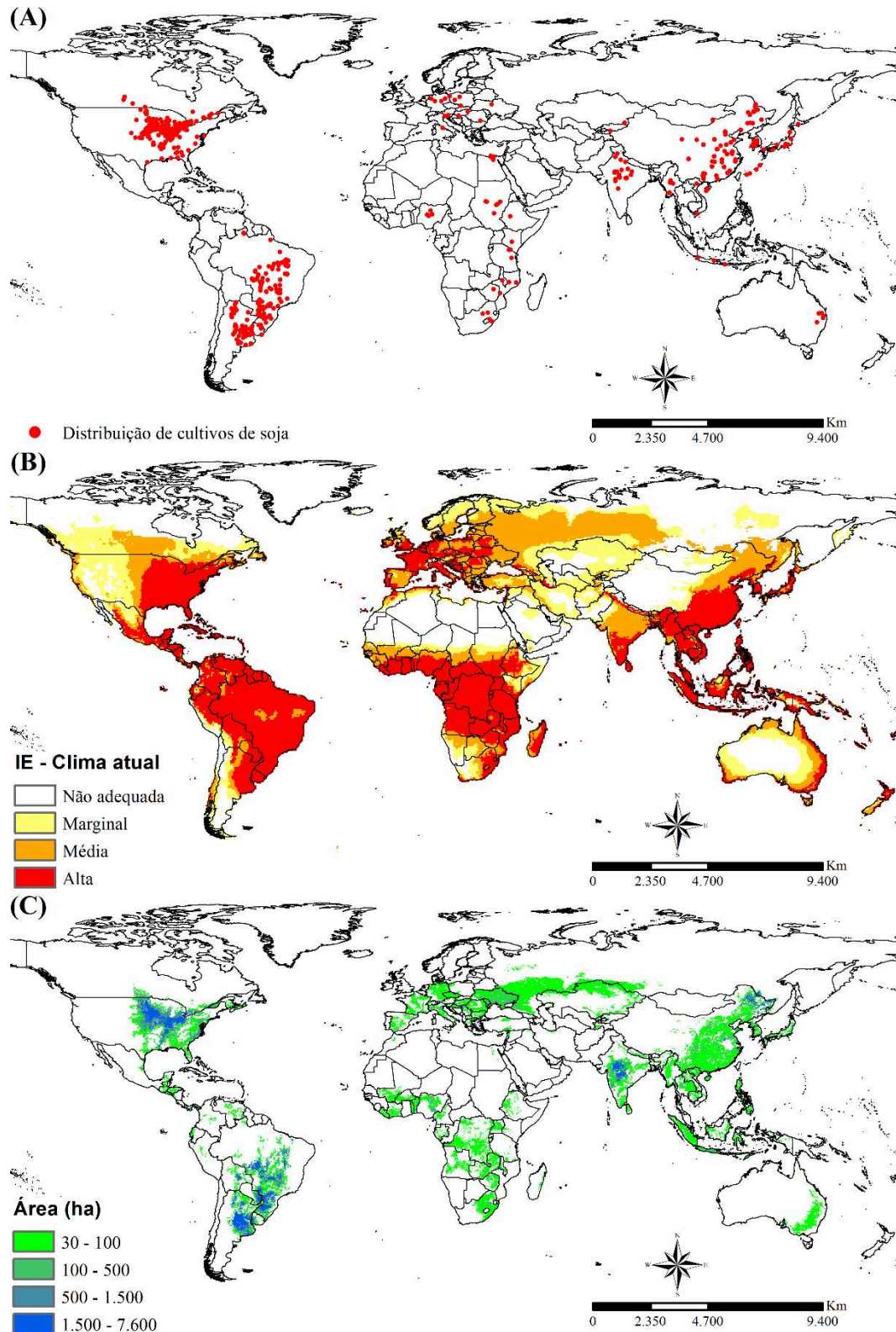
\*Valores sem unidades (umidade) são índices adimensionais e têm relação com a capacidade de retenção de umidade do solo.

**Tabela 2** Variação das áreas de adequação climática da soja projetadas para os cinco principais produtores do mundo nas condições climáticas atuais e mediante mudanças climáticas para 2030, 2050 e 2070 no cenário A2 SRES

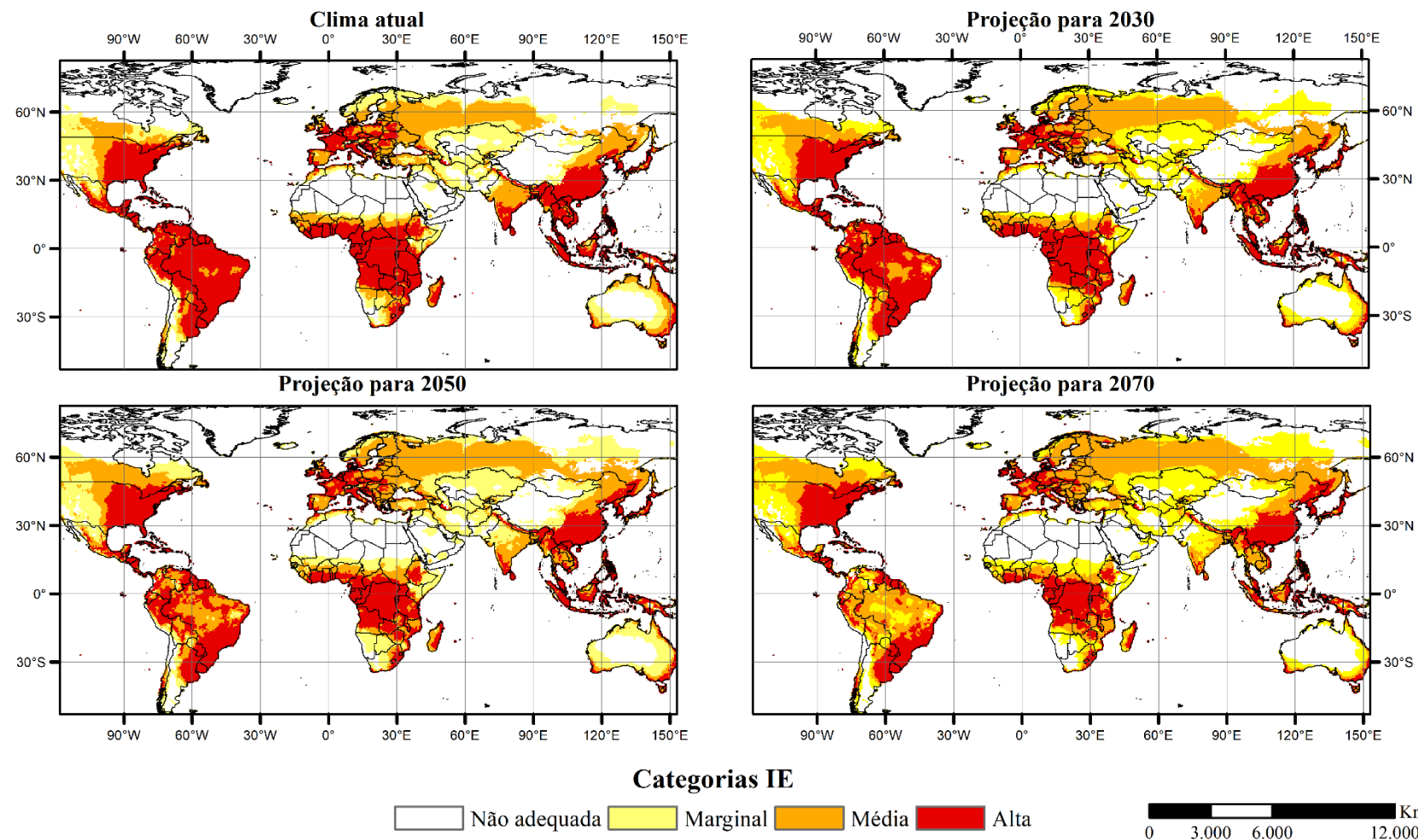
País	Área cultivada (km <sup>2</sup> )*	Adequabilidade climática	Modelo atual	Projeção para 2030	Projeção para 2050	Projeção para 2070
			-----Área (km <sup>2</sup> )**-----			
EUA	362,286.60	Não adequada	295,584.05	219,881.50	178,589.20	144,523.05
		Marginal	334,811.73	394,341.47	376,448.14	371,286.60
		Média	163,104.59	170,330.74	228,828.16	274,249.69
		Alta	385,738.90	394,685.57	395,373.77	389,179.93
Brasil	339,362.23	Não adequado	0.00	0.00	0.00	2,064.62
		Marginal	0.00	7,914.36	16,172.82	131,447.16
		Média	37,851.28	119,059.47	282,164.05	392,276.85
		Alta	716,077.30	626,954.76	455,591.71	228,139.96
Argentina	173,351.02	Não adequado	94,284.09	99,445.62	94,628.19	99,101.52
		Marginal	63,658.96	59,185.63	64,347.17	62,970.76
		Média	34,066.15	35,442.56	35,442.56	38,195.38
		Alta	99,789.73	97,725.11	97,381.01	91,531.27
China	73,439.63	Não adequado	416,708.13	387,115.31	358,554.81	323,800.45
		Marginal	96,004.60	112,177.42	134,544.08	159,663.56
		Média	187,191.76	189,256.38	185,127.15	192,353.30
		Alta	304,530.71	315,886.10	326,209.17	328,617.89
Índia	106,000.00	Não adequado	16,861.02	23,054.87	28,560.51	43,701.02
		Marginal	19,613.84	56,432.81	79,487.68	116,306.65
		Média	162,072.28	152,093.31	134,199.98	93,595.88
		Alta	93,939.98	60,906.14	50,238.97	38,883.58

\*Dados fornecidos pela FAO 2017.

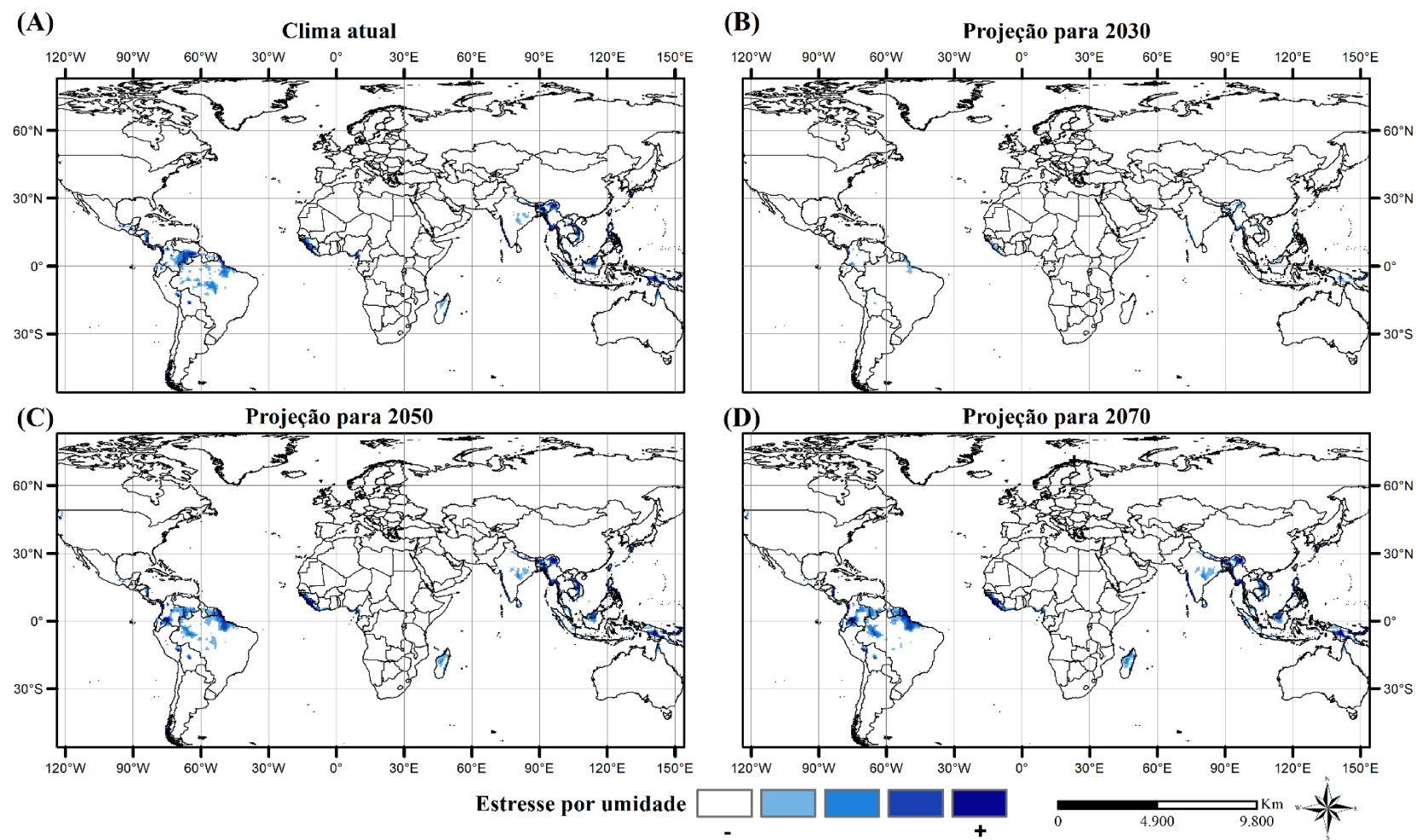
\*\*Estas áreas são projetadas e não representam áreas de cultivos de soja.



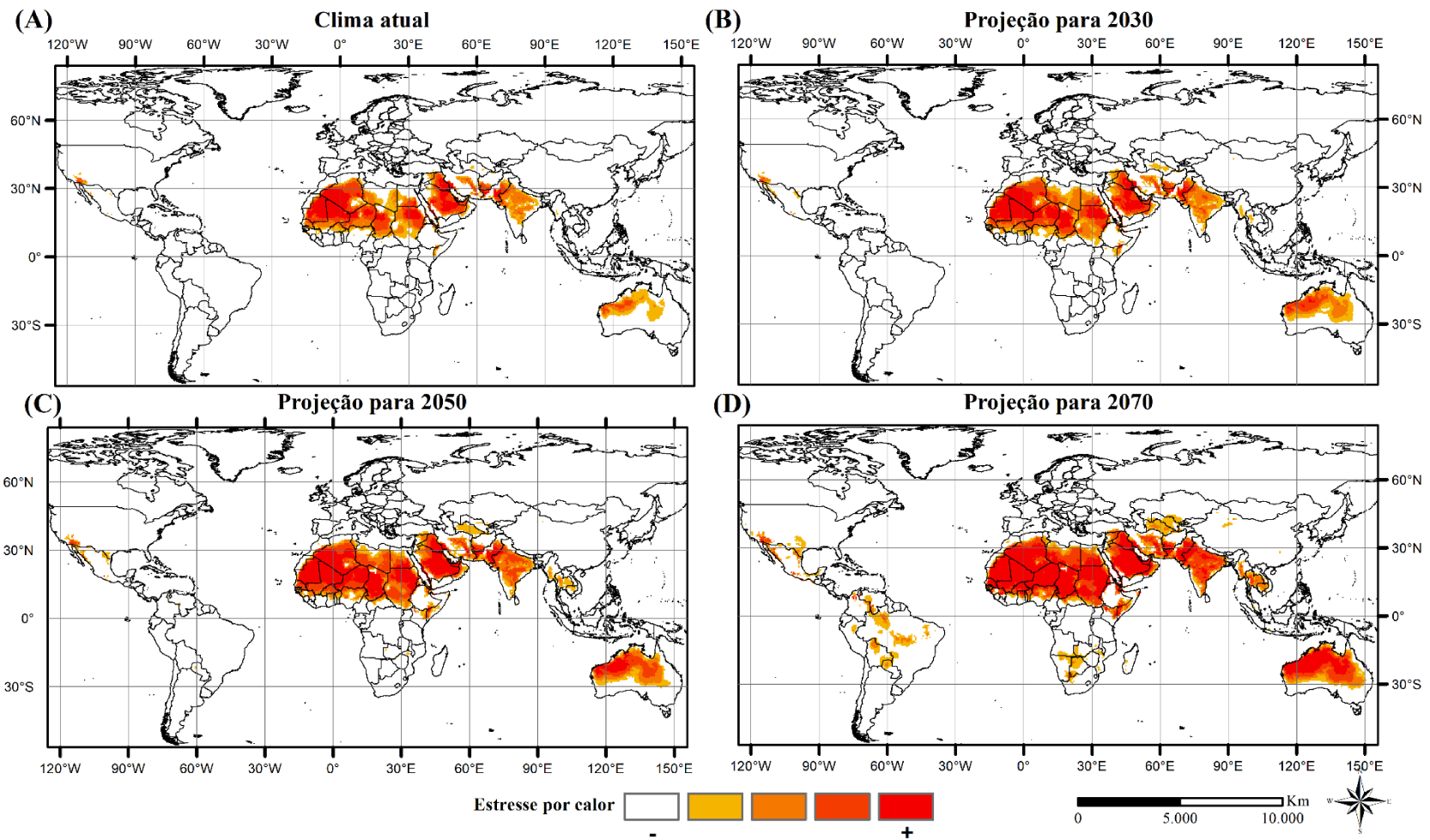
**Fig. 1** (A) A distribuição global de cultivos de soja (*Glycine max* L.), (B) o Índice Ecoclimático (IE) para o cenário climático atual e (C) áreas de cultivos de soja fornecidos pelo MAPSpam



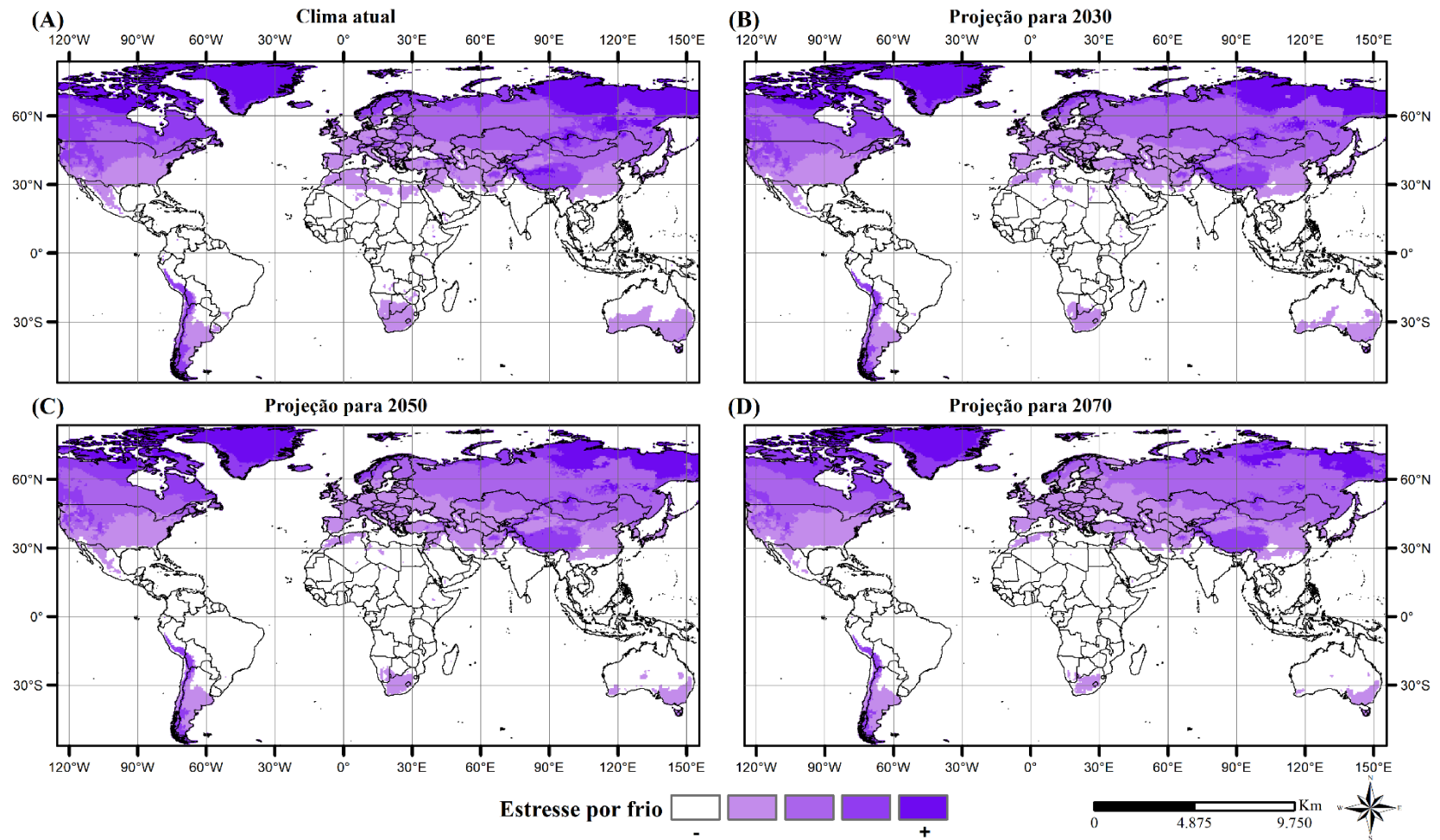
**Fig. 2** O Índice Ecoclimático (IE) das condições climáticas futuras da soja (*Glycine max* L.) sob o modelo CSIRO-M.k 3.0 e cenário SRES A2 (semelhante ao RCP 8.5): clima atual e previsões para 2030, 2050 e 2070.



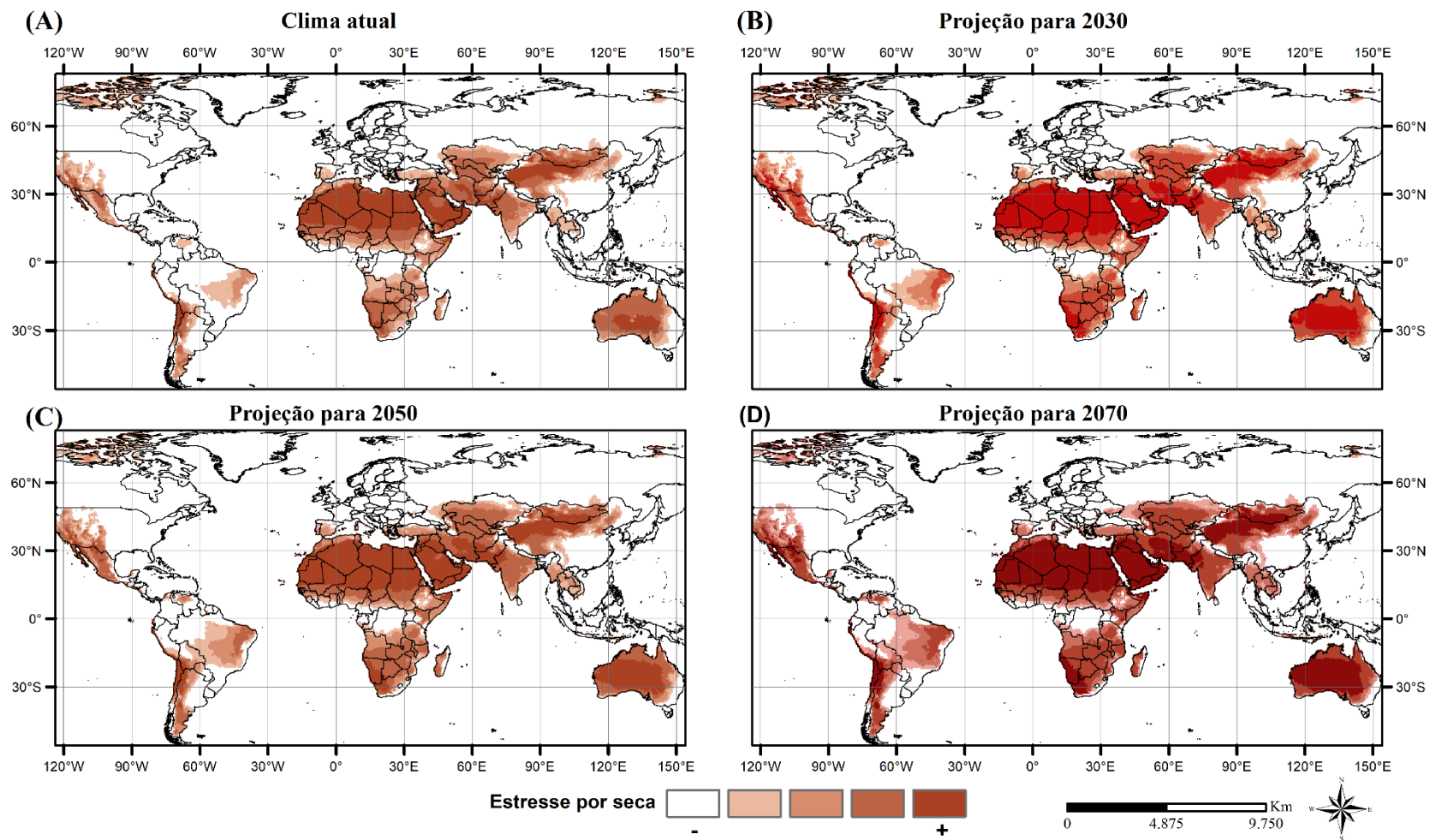
**Fig. 3** Projeções de estresse por umidade para: (A) clima atual; (B) 2030 (C) 2050 e (D) 2070.



**Fig. 4** Projeções de estresse por calor para: (A) clima atual; (B) 2030 (C) 2050 e (D) 2070.



**Fig. 5** Projeções de estresse por frio para: (A) clima atual; (B) 2030 (C) 2050 e (D) 2070.



**Fig. 6** Projeções de estresse por seca para: **(A)** clima atual; **(B)** 2030 **(C)** 2050 e **(D)** 2070.

## 7 CAPÍTULO II

### **Avaliação da adequabilidade climática para *Chrysodeixis includens* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae) além do continente americano**

João Rafael Silva Soares<sup>1\*</sup>, Ricardo Siqueira da Silva<sup>2</sup>, Rodrigo Soares Ramos<sup>3</sup>, Marcelo Coutinho Picanço<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Depto de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, MG, 36570-900, Brasil

<sup>2</sup>Depto de Agronomia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 39100-000, Brasil

<sup>3</sup>Depto de Entomologia, Universidade Federal de Viçosa, MG, 36570-900, Brasil

**\*Correspondência:** joao.rafael@ufv.br/ +55 31 3612 5322

**Número ORCID:** 0000-0001-8738-7743

**Conflito de interesse:** Os autores declaram que eles não têm conflito de interesse.

## RESUMO

*Chrysodeixis includens* é uma praga polífaga restrita ao continente americano e reconhecida por ter hábitos migratórios. A ocorrência de *C. includens* são aliadas, entre outros fatores, por condições favoráveis como temperatura e umidade, além da presença de hospedeiros. Consequentemente, estes fatores podem modular o sucesso de invasão deste inseto-praga em outros continentes. Neste trabalho executamos modelos de distribuição espaço-temporal global de *C. includens* utilizando o CLIMEX, de forma a compreender épocas e regiões favoráveis a ocorrência desta espécie e destacando países que possuem adequabilidade climática em caso de invasão por este inseto, considerando a soja como hospedeiro principal. Nossos resultados indicam adequabilidade climática favorável a *C. includens* em grande parte da América Central e do Sul ao longo do ano. Nosso modelo espaço-temporal confirma que regiões da América Central e Sul, sejam adequadas para crescimento de *C. includens* em todos os meses do ano, enquanto no hemisfério norte estas condições compreendem entre os meses de abril e outubro/novembro. Os países com maiores adequabilidades para *C. includens* fora do continente americano estão localizados no continente Africano e Asiático. Nossos resultados servem de alerta as autoridades para o desenvolvimento de estratégias de inspeção e interceptação de *C. includens* através de barreiras fitossanitárias, particularmente em regiões centrais da África, Índia, sul e sudeste asiático e nordeste da Austrália.

Palavras-chave: adequabilidade climática, falsa medideira da soja, migração, modelagem, quarentena, risco de invasão.

## ABSTRACT

*Chrysodeixis includens* is a polyphagous pest restricted to the American continent and recognized for having migratory habits. The occurrence of *C. includens* is allied, among other factors, by favourable conditions such as temperature, humidity and the presence of hosts. Consequently, these factors can modulate the successful invasion of this insect pest on other continents. In this work we build spatio-temporal ecological niche models at global level for the distribution of *C. includens* using CLIMEX, in order to understand times and regions favourable to the occurrence of this species and highlighting countries that have climatic suitability in case of invasion by this insect, considering soybeans as the primary host. Our results indicate high climatic suitability for *C. includens* in much of Central and South America throughout the year. Our spatio-temporal model confirms that regions of Central and South America are suitable for *C. includens* growth in all months of the year, while in the northern hemisphere these conditions range from April to October/November. The countries with the highest suitability for *C. includens* outside the American continent are located on the African and Asian continents. Our results suit as a warning to the authorities for the development of strategies for the inspection and interception of *C. includens* through phytosanitary barriers, particularly in central Africa, India, South and Southeast Asia and Northeast Australia.

Keywords: climatic suitability, migration, modelling, quarantine, risk of invasion; soybean looper.

## 8 INTRODUÇÃO

*Chrysodeixis includens*, conhecida como lagarta falsa-medideira, é uma praga polífaga restrita ao continente americano, com hábitos migratórios e ataca 174 espécies de plantas pertencentes a 39 famílias (HERZOG, 1980; SPECHT *et al.*, 2015). Nos últimos 15 anos, este inseto tem ocasionado perdas econômicas em cultivos de soja, feijão, algodão, fumo, girassol e tomate (BALDIN *et al.*, 2014), sendo considerado uma praga-chave para a soja nos EUA, Brasil e Argentina (BALDIN *et al.*, 2014; MOSCARDI *et al.*, 2012). Os custos para o seu controle são estimados em até US\$ 26 milhões por ano, geralmente associados a surtos populacionais deste inseto (BALDIN *et al.*, 2014; MUSSER *et al.*, 2012).

Surto de *C. includens* podem ser ocasionadas, entre outros fatores, por condições ambientais altamente favoráveis para seu desenvolvimento. A influência dos elementos climáticos afetam diretamente ou indiretamente parâmetros biológicos de insetos (CHOWN & TERBLANCHE, 2006; COLINET & HANCE, 2010; COLINET *et al.*, 2015). Os insetos são organismos particularmente sensíveis à alteração da temperatura, em especial as espécies que têm tolerâncias térmicas estreitas, como as de regiões tropicais (ADDO-BEDIAKO *et al.*, 2000; DYNESIUS *et al.*, 2000). Estas mudanças alteraram drasticamente parâmetros biológicos como a ocorrência, sobrevivência, desenvolvimento e reprodução destes organismos (ESTAY *et al.*, 2014; ROBINET & ROQUES, 2010; SANTOS *et al.*, 2017). Por esta razão, o sucesso de invasões de insetos-praga associadas ao clima têm sido foco de discussões nos últimos anos (BELLARD *et al.*, 2016; EARLY *et al.*, 2016; PAINI *et al.*, 2016).

O alcance potencial de uma espécie é essencial para as análises de risco de invasão que resultarão no estabelecimento de medidas sanitárias e fitossanitárias apropriadas (WEBBER *et al.*, 2011). Nesse sentido, os modelos de nicho ecológico são usados para estimar o alcance geográfico potencial das espécies (SUTHERST, 2014). Os modelos de distribuição de espécies estimam a relação entre as espécies nos locais e as características ambientais e/ou espaciais em uma escala local ou global (FRANKLIN & MILLER, 2010). A partir desta justaposição de informações, pode-se compreender melhor sobre a ocorrências de espécies, permitindo estabelecer diretrizes e princípios para implementar medidas de prevenção e controle para espécies pragas (JARNEVICH *et al.*, 2015; KRITICOS *et al.*, 2015).

Neste contexto, o CLIMEX é um algoritmo para modelagem de nicho bioclimático para estimar a distribuição potencial de espécies poiquilotérmicas, como os insetos (RAMIREZ-CABRAL *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2018; WEBBER *et al.*, 2011). No CLIMEX, é possível mapear a distribuição potencial através dos parâmetros climáticos que explicam a

resposta da espécie ao clima (KRITICOS *et al.*, 2015). O principal pressuposto do CLIMEX é que o clima é o fator determinante para a adequabilidade de uma região para espécies, uma vez que são espécies que dependem da temperatura para completar seu desenvolvimento (KRITICOS *et al.*, 2015). Assim são gerados índices que descrevem esta adequabilidade como os Índices de Crescimento semanal e anual (IC<sub>S</sub> e IC<sub>A</sub>, respectivamente). O Índice Ecoclimático (IE) fornece uma medida geral que descreve a adequação dos locais para o crescimento e sobrevivência de uma população. Este índice reflete as condições durante a estação de crescimento (Índice de Crescimento) combinadas com variáveis que descrevem os efeitos do acúmulo de estresses durante as estações não favoráveis (Índice de Estresses) (KRITICOS *et al.*, 2015).

Baseado na importância econômica de *C. includens* como praga em cultivos agrícolas e sua distribuição restrita nas Américas, a nossa hipótese é a de que existem outras regiões no mundo, similares às áreas de ocorrência, onde este inseto pode se estabelecer. Portanto, nós testamos esta hipótese através da elaboração de modelos de distribuição espaço-temporal de *C. includens* global utilizando o CLIMEX, de forma a compreender épocas e regiões favoráveis a ocorrência da espécie. Além disso, nossos resultados evidenciam países fora do continente americano que possuem adequabilidade climática para este inseto. Os modelos implementados permitem compreender a dinâmica de condições favoráveis para *C. includens* ao longo do ano, esclarecem sua distribuição potencial em locais onde é presente e em locais onde ainda é uma espécie quarentenária.

## 9 MATERIAL E MÉTODOS

### 9.1 CLIMEX

O CLIMEX mapeia distribuições potenciais de espécies utilizando parâmetros climáticos derivados de informações biológicas e dados de distribuição conhecidos (KRITICOS *et al.*, 2015). Como resultado, o algoritmo combina os índices de crescimento e estresse, gerando o IE. O IE representa um índice anual geral de aptidão climática, que descreve a adequação climática de um local para uma espécie e é calculado pela seguinte equação:

$$IE = [IT * IU] * \left[ \left(1 - \frac{EF}{100}\right) * \left(1 - \frac{ES}{100}\right) - \left(1 - \frac{EC}{100}\right) - \left(1 - \frac{EU}{100}\right) \right],$$

onde IT representa o índice de temperatura, IU o índice de umidade, EF o estresse por frio, ES por estresse por seca, EC por estresse por calor e EU por estresse por umidade. Este índice é escalonado de 0 a 100, onde 0 significa áreas impróprias para o desenvolvimento de espécies e

áreas com valores iguais ou acima de 30 são consideradas altamente adequadas (KRITICOS *et al.*, 2015).

## 9.2 Distribuição de *Chrysodeixis includens*

Um total de 544 ocorrências de *C. includens* foram coletados em literatura publicada e bancos de dados disponíveis (GBIF, 2018; LOTTIS & NABERHAUS, 2018) (<https://www.gbif.org/> e <https://www.butterfliesandmoths.org/>). Esses registros representam geograficamente a distribuição atual conhecida de *C. includens* (Fig. 1-a).

## 9.3 Parâmetros usados no software CLIMEX

O modelo para *C. includens* foi ajustado baseado em dados de registros de localização e dados biológicos de uma revisão de literatura (BUENO *et al.*, 2017) (Fig. 1-a e Tabela 1). Nesta etapa, usamos os dados climáticos em grade provenientes do banco de dados CliMond, com resolução espacial de 10'. A temperatura média mínima mensal (Tmin), a temperatura máxima mensal média (Tmax), a precipitação média mensal (Ptotal) e a umidade relativa às 09:00 h (RH09:00) e às 15:00 h (RH15:00) foram utilizadas para representar o histórico climático (dados de 1961 a 1990, com médias centradas em 1975). Assim, os valores foram ajustados de acordo com a precisão da predição pelo CLIMEX e os registros de localização da praga.

### 9.3.1 Índices de Temperatura

As exigências térmicas de sobrevivência para *C. includens* foram adquiridas através de BUENO *et al.* (2017), sendo a temperatura de limite inferior (DV0) de 10°C e temperatura limite superior (DV3) de 35°C. Uma faixa de temperatura entre 15°C a 32°C é sugerida como favorável para a sobrevivência, desenvolvimento e reprodução da praga (BUENO *et al.*, 2017; MASON & MACK, 1984), e por isto adotamos estes valores em nosso modelo (DV1= 15°C e DV2= 32°C).

### 9.3.2 Índices de umidade

Os maiores valores de GI em localidades com registros de *C. includens* foram baseadas em parâmetros derivados de distribuições em regiões tropicais úmidas. Maiores densidades desta praga no campo ocorrem no sul, sudeste e centro-oeste do Brasil durante estações de chuvas. Os picos populacionais de *C. includens* em soja no Brasil normalmente ocorrem em meses de maiores temperaturas, porém com baixa precipitação (por exemplo, em ocorrências de veranicos em janeiro e fevereiro) (ZULIN *et al.*, 2018). Por isso estabelecemos o limite inferior de umidade do solo (SM0) em 0,1 e o limite superior (SM3) em 1,5. Os valores para o limiar ótimo inferior (SM1) e o limite ótimo superior (SM2) de umidade do solo foram 0,7 e

0,9, respectivamente, adotados a partir de uma praga com características semelhantes (RAMIREZ-CABRAL *et al.*, 2017). Essas seleções permitiram melhor ajuste de acordo com os registros de localização de *C. includens* e com padrões observados de densidade da praga dentro das áreas monitoradas.

### **9.3.3 Estresses**

#### **9.3.3.1 Estresse por frio**

Por se tratar de uma espécie poiquilotérmica, *C. includens* não pode sobreviver onde o acúmulo térmico diário é insuficiente para manter seu metabolismo (Kriticos *et al.* 2015). Assim, a sobrevivência da espécie depende da ocorrência de um número limite de três dias em termos da temperatura limiar de desenvolvimento (DVCS). Este parâmetro é descrito como o limiar do grau de estresse de frio (DTCS) e é expresso em unidades de graus-dia. Esse estresse se acumula em uma taxa descrita como a taxa de graus-dia de estresse de frio e é expressa como unidades por semana (DHCS). Nós ajustamos nosso DTCS em 15°C e DHCS em -0,00001 semana<sup>-1</sup>. Estes valores foram baseados em (BUENO *et al.*, 2017). Essas seleções permitiram melhor ajuste de acordo com os registros de localização de *C. includens*.

#### **9.3.3.2 Estresse por calor**

A exposição excessiva a altas temperaturas pode ter impactos negativos no desenvolvimento das espécies. Os insetos podem ser tornar inférteis e seu desenvolvimento pode reduzir drasticamente (MASON & MACK, 1984). No CLIMEX, TTHS e THHS são definidos como parâmetro do estresse pelo calor e a taxa de acúmulo de estresse, respectivamente. O desenvolvimento embrionário de ovos de *C. includens* é comprometido acima de temperaturas 35°C (MASON & MACK, 1984). Assim, TTHS e THHS foram configurados para *C. includens* a 35°C e 0,001 semana<sup>-1</sup>, respectivamente.

#### **9.3.3.3 Estresse por seca**

As áreas de ocorrência de *C. includens* são em regiões úmidas. Desse modo, o nível de umidade do limiar de estresse a seca (SMDS) foi assim configurado a um valor de 0,1, e acumulação de estresse por seca (HDS) em uma taxa de 0,001 semana<sup>-1</sup>. Esta configuração é baseada no hospedeiro (soja) e permitiu melhor ajuste à distribuição de *C. includens* (dados Capítulo I).

#### **9.3.3.4 Estresse por umidade**

O estresse por umidade pode afetar negativamente a sobrevivência de uma espécie. Os insetos podem morrer devido a efeitos diretos e indiretos da alta precipitação. Os efeitos diretos estão relacionados ao impacto da gota da chuva sobre o corpo dos insetos e afogamento,

enquanto efeitos indiretos estão relacionados ao favorecimento de agentes entomopatógenos (fungos) como *Nomuraea rileyi* (CHAMUENE *et al.*, 2018; SOSA-GÓMEZ *et al.*, 2003). Assim, o parâmetro de estresse úmido (SMWS) foi fixado em 1,5 e a taxa de acumulação de estresse (HWS) em 0,001 semana<sup>-1</sup> para *C. includens*. Os valores listados mostraram uma correspondência satisfatória com as distribuições conhecidas para o inseto.

#### 9.4 Validação do modelo

Dados georreferenciados da América do Sul foram omitidos no ajuste dos parâmetros para validação do modelo. Após estes ajustes, calculamos a porcentagem dos pontos de ocorrência de *C. includens* que se enquadram dentro do modelo de predição de condições adequadas para *C. includens*. Essas observações foram usadas para avaliar a confiabilidade do nosso modelo. Através do Índice Ecoclimático (EI), as áreas adequadas para *C. includens* foram classificadas como inadequadas ( $EI = 0$ ), baixa adequabilidade ( $0 < EI < 10$ ), média adequabilidade ( $10 \leq EI < 30$ ) e altamente adequadas ( $EI \geq 30$ ) (KRITICOS *et al.*, 2015).

#### 9.5 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade avalia qual(is) variável(is) afetam a precisão do modelo final. Essas análises fornecem uma exposição abrangente de quais parâmetros podem ser úteis para ajustar os parâmetros do modelo, considerando categorias de adequação e regiões de acordo com a distribuição das espécies (DA SILVA *et al.*, 2018; SHABANI & KUMAR, 2014). As variáveis com impacto mais significativo no modelo são descritas como sensíveis, enquanto aquelas que não têm impacto no resultado do modelo são denominadas insensíveis (KRITICOS *et al.*, 2015; SHABANI & KUMAR, 2014).

#### 9.6 Determinação de padrão espaço-temporal de *C. includens* nas Américas

No CLIMEX é possível criar sequências de mapas que descrevem a dinâmica espaço-temporal da adequação climática por meio do índice de crescimento semanal ( $IC_s$ ), escalonado de 0 a 1, para descrever as condições favoráveis ao crescimento da população (KRITICOS *et al.*, 2015). Em condições favoráveis, o crescimento populacional é favorecido, enquanto em épocas desfavoráveis, o desenvolvimento é afetado. Dessa forma, durante um determinado período favorável ( $IC_s > 0$ ), uma espécie provavelmente pode crescer apenas durante essa semana. Os Índices de Temperatura (IT) e Umidade (IU) são usados na determinação do valor de  $IC_s$ , representando as necessidades de crescimento de uma espécie. Índices de estresse que representam os extremos de temperatura e umidade para sobrevivência permitem a determinação da distribuição, em termos de condições sazonais adversas (KRITICOS *et al.*,

2015). Assim, há a possibilidade de observar possíveis padrões migratórios de espécies, conforme condições adequadas de desenvolvimento iniciam.

Para a geração deste tipo de modelo no CLIMEX, é necessário usar uma série temporal mensal de dados climáticos. Nós utilizamos a série temporal (TS) CRU TS 1901-2017 Versão 4.02 fornecida pela Unidade de Pesquisa Climática (CRU), contendo dados de alta resolução (0.5x0.5 grau) em grade com variações do clima mês a mês. A CRU TS 4.02 possui todos os dados reformatados para as variáveis exigidas pelo CLIMEX, como precipitação, temperatura máxima e mínima diária média mensal e pressão de vapor, para o período de janeiro de 1901 a dezembro de 2017. Nesta série temporal, nós selecionamos o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015 para a execução do nosso modelo CLIMEX. Foi selecionado este período para que fosse possível o processo de validação. Nosso modelo foi validado comparando os mapas mensais com a densidade de mariposas de *C. includens* encontrados através de monitoramento semanais de cultivos de soja e algodão localizados no estado do Mato Grosso (principal polo sojicultor e agrícola brasileiro) e fornecidos através de boletins informativos do IMA (Instituto Mato-Grossense do Algodão), disponíveis no site <http://www.imamt.com.br/home/informativos/>. Estes dados de densidade representam diferentes regiões do estado e foram relacionados com o índice de crescimento semanal (IC<sub>S</sub>) referentes ao período amostrado. Os dados de densidade foram transformados em médias móveis considerando dados de duas amostragens prévias e duas posteriores em relação a cada data de amostragem.

### **9.7 Avaliação da adequabilidade climática para *C. includens* a partir da soja fora das Américas**

Os níveis de adequabilidade de *C. includens* e da soja (*Glycine max*) (Capítulo I) foram escolhidos para determinar quais áreas teriam adequabilidade para *C. includens* em outros continentes, separando-as em categorias de IE em alto, médio e marginal. Para isso, foi realizado a sobreposição de mapas de IE da soja e de *C. includens*. Definiu-se como meios de sobreposição de mapas: 1) zonas com adequabilidade climática alta: contém áreas com média a alta adequabilidade para a soja e alta adequabilidade para *C. includens*; 2) zonas com adequabilidade climática média: contém áreas com média a alta adequabilidade para a soja e média adequabilidade a *C. includens* e; 3) zonas com adequabilidade climática marginal: contém áreas com média a alta adequabilidade para a soja e baixa adequabilidade a *C. includens*. Todos os mapas foram gerados pelo programa ArcGIS versão 10.5 (<https://www.arcgis.com/index.html>).

## 10 RESULTADOS

### 10.1 Validação e análise de sensibilidade

O modelo ajustado gerado pelo CLIMEX teve uma correspondência consistente entre o EI da distribuição atual de *C. includens* nas Américas (**Fig. 1**). Na validação do modelo, aproximadamente 86% (36 ocorrências de 42) dos registros de *C. includens* na América do Sul estão dentro das categorias climáticas favoráveis, confirmando a confiança nos valores selecionados para os vários parâmetros no CLIMEX.

Considerando-se a adequabilidade climáticas para diferentes locais no estado do Mato Grosso, Brasil, percebe-se que o modelo proposto teve consistência com as curvas de flutuação populacional de mariposas coletadas nas armadilhas e o Índice de Crescimento semanal (IC<sub>S</sub>) (**Fig. 2**). Esta verificação demonstra estimativas realistas e confiáveis dos resultados do modelo.

### 10.2 Adequabilidade climática para *C. includens* nas Américas

*Chrysodeixis includens* tem alta adequabilidade climática em grande parte dos países da América Central e do Sul, e em menores proporções na América do Norte. Na América do Norte, as regiões favoráveis encontram-se em áreas litorâneas do leste e sul do México e EUA (**Fig. 1-b**). Além disso, nosso mapa de Índice de Crescimento anual (IC<sub>A</sub>) indica regiões favoráveis para o crescimento deste inseto próximas ao sul do Canadá (**Fig. 1-c**).

### 10.3 Dinâmica espaço-temporal de *C. includens*

Nós observamos que *C. includens* tem um padrão de adequabilidade climática variável ao longo do ano. As condições adequadas para crescimento variam conforme as estações mudam no hemisfério norte e sul. Somente na América Central e Sul este inseto possui condições favoráveis para seu desenvolvimento durante o ano todo (**Fig. 3**). No hemisfério norte, estas condições compreendem entre os meses de abril e vão até outubro/novembro, enquanto no Sul varia entre outubro e junho.

### 10.4 Adequabilidade climática a *C. includens* fora do continente americano

Os países com maior adequabilidade climática a *C. includens* estão localizados no continente Africano e Asiático. Na África, Guine, Serra Leão, Liberia, Gana, Togo, Benin, Nigéria, Camerão, Congo, sul do Suldão, Uganda, Tanzania, Malawi, Moçambique, Tanzania, Zimbábue, Zâmbia, Kênia, Angola e Madagascar são países com médio a alta adequabilidade climática. Na Ásia, locais com adequabilidade estão concentrados no sudeste asiático, especialmente em arquipélagos tropicais do Oceano Pacífico. Índia, Bangladesh, Myanmar, Tailândia, Laos, Combodia, Vietnam, sudeste da China, Malásia, Indonésia, Filipinas e demais

ilhas do Pacífico são locais sob risco. Demais regiões minoritárias favoráveis incluem norte e nordeste australiano (**Fig. 3**).

## 11 DISCUSSÃO

Em nosso estudo, nós modelamos a distribuição potencial de *C. includens* e avaliamos seu risco de invasão em outros continentes. O modelo apresentado possui um alto grau de confiabilidade, possuindo 86% dos pontos de ocorrências em áreas com algum grau de adequabilidade (**Fig. 1 a-b**). Além disso, a concordância entre as curvas de sazonalidade e Índice de Crescimento (IC<sub>s</sub>) (**Fig. 2**) também demonstram bom ajuste dos parâmetros do modelo.

A análise de sensibilidade (**Tabela 2**) sugere que a umidade limitante do solo (SM0) e o limiar de estresse por frio (TTCS) são os parâmetros que mais influenciam na distribuição desta espécie. Estes resultados indicam que estes parâmetros influenciam na sobrevivência direta e indiretamente, através da presença de hospedeiro ou no próprio desenvolvimento da espécie. A baixa umidade do solo por exemplo, restringe o cultivo de vários hospedeiros de *C. includens*, especialmente a soja (CAETANO *et al.*, 2018; FARIAS *et al.*, 2007) e baixas temperaturas por tempo prolongado têm impactos adversos na sobrevivência de espécies de insetos (TONINA *et al.*, 2016).

*Chrysodeixis includens* é reconhecida por ser uma espécie tipicamente tropical, e não há evidências mostrando que tenha diapausa. Portanto, é necessário a presença de plantas hospedeiras para sobreviver ao longo do ciclo de vida (ANDRADE *et al.*, 2016; SPECHT *et al.*, 2015). Nosso modelo espaço-temporal provavelmente indica isto ao demarcar regiões de média a alta adequabilidade em regiões quentes e úmidas, onde há presença de hospedeiros durante o ano todo (**Fig. 1 e Fig. 2**). No continente americano, especialmente América Central e grande parte da América do Sul, existem espécies hospedeiras (cultivadas e daninhas) que favorece o estabelecimento de *C. includens* durante épocas menos favoráveis (BALDIN *et al.*, 2014; SPECHT *et al.*, 2015). Por exemplo, no inverno subtropical, esta espécie já foi encontrado alimentando-se de rabanete (PALMA *et al.*, 2015). Por outro lado, os períodos mais favoráveis também o são para seu principal hospedeiro, a soja (SANTOS *et al.*, 2017).

No Brasil, a densidade de *C. includens* esteve sempre concentrada em um período típico da estação chuvosa (entre janeiro e março). Normalmente estes picos populacionais são atribuídos a fatores ambientais como temperaturas mais altas e a sincronização com o ciclo da soja, onde há maior incidência de ataques durante o início da fase reprodutiva das plantas (SANTOS *et al.*, 2017). Diante do cultivo de soja em larga escala e condições favoráveis, essas

populações se multiplicam rapidamente, sendo observados os surtos populacionais e migrações para outras culturas como o algodão e feijão (**Fig. 2**) (BALDIN *et al.*, 2014). Na América do Norte, Estados Unidos principalmente, o inseto apresenta um padrão de comportamento similar. Os maiores surtos ocorrem entre os meses de julho e setembro, momento em que a soja inicia formação de vagens (HERZOG, 1980; MUSSER *et al.*, 2012). A partir de regiões de inverno ameno, a espécie pode migrar para o norte dos Estados Unidos até o sul do Canadá, à medida que as condições climáticas vão se tornando favoráveis durante a estação, característica comprovada pelo nosso modelo através do Índice de Crescimento anual (IC<sub>A</sub>) e semanal (IC<sub>S</sub>) (**Fig. 1-c e Fig. 3**).

A distribuição atual de *C. includens* é limitada ao continente americano, embora nosso modelo tenha ilustrado áreas de adequabilidade em outros locais do planeta (Ásia, África e Oceania) (**Fig. 1-b**). Adicionalmente, nossos resultados condizem com os históricos de surtos que vem sendo observados em países da América do Sul (Brasil, Argentina, Colômbia, Peru e Equador), América Central (Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicarágua, Panamá, Antígua e Barbuda, Bahamas, Barbados, Cuba, Dominica, República Dominicana e sul do México) e várias regiões da América do Norte (norte do México, e sul do EUA) (BARRIONUEVO & SAN BLAS, 2016). Nós modelamos seu risco de introdução em cultivos agrícolas a partir da soja, um de seus hospedeiros preferenciais e de cultivo em larga escala no mundo. Na Ásia, há uma grande possibilidade de sucesso de introdução desta praga desde o sudeste chinês até o sul das ilhas indonésias. Na África, países localizados em zonas tropicais e subtropicais estão sob alto risco. Hoje estes países são apontados como novas fronteiras agrícolas para a expansão de cultivo da soja nos próximos anos (GASPARRI *et al.*, 2016; SINCLAIR *et al.*, 2014). Em 2016, *Spodoptera frugiperda*, outro noctuídeo polífago e de grande importância econômica, foi introduzido em países do oeste e centro da África, e recentemente na China, ocorrendo surtos de infestação graves e ameaçando a produção de pequenos produtores, com perdas entre 1 a 4 bilhões de dólares (GOERGEN *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2020). Portanto, há também um risco de introdução *C. includens* nestes países. A partir disto, nós confirmamos a hipótese de que regiões climaticamente similares (América Central e do Sul) as áreas atuais de ocorrência desta praga são adequadas para *C. includens*. Com base nestas informações e comportamento semelhante, *C. includens* deve ser uma praga de alta prioridade para barreiras quarentenárias nestes países.

De fato, a globalização é apontada como uma das principais causas de introdução de pragas (PAINI *et al.*, 2016). As taxas de espécies exóticas invasoras vêm aumentando na

Europa, China e América do Norte nas últimas décadas (EARLY *et al.*, 2016). Isto é devido ao aumento do comércio internacional entre nações através de acordos comerciais (BELLARD *et al.*, 2016; EARLY *et al.*, 2016; PAINI *et al.*, 2016). Baseado nisto, as formas de introdução de *C. includens* podem ser via transporte em mercadorias ou através de viajantes com plantas infestadas (contendo alguma fase do inseto como ovos, lagartas ainda pequenas e/ou pupas) (EARLY *et al.*, 2016). Uma espécie correlata à espécie de nosso estudo (*Chrysodeixis chalcites*) é reconhecida por ser uma praga nativa das regiões mediterrâneas e tropicais, e quarentenária nas Américas. Desde 1995 esta espécie invasora tem sido encontrada em vários produtos agrícolas nos Estados Unidos e Canadá, até ser considerada “estabelecida” (MURILLO *et al.*, 2013). Assim, caso não sejam estabelecidas medidas preventivas para evitar a entrada de *C. includens* em áreas sob alta adequabilidade, novos surtos e grandes perdas em cultivos podem ser registrados nas regiões indicadas neste estudo.

Algumas advertências quanto ao modelo proposto devem ser mencionadas. Nosso modelo é baseado somente em variáveis climáticas e na presença do hospedeiro, e, portanto, existem outros componentes que podem limitar a distribuição de insetos, tais como barreiras geográficas, inimigos naturais e outras plantas hospedeiras (LOBO, 2016). Além disso, em estudos de distribuições espaciais, existem algumas incertezas quanto aos dados climáticos desatualizados associados à parametrização do modelo (SANTANA *et al.*, 2018). Deve-se ressaltar também que insetos são seres com alta capacidade adaptativa, e por isso pode estabelecer em locais não previstos no modelo (SANTANA *et al.*, 2018), especialmente a espécie de nosso estudo, que possui ampla gama de hospedeiros e hábito migratório.

Este estudo explica a dinâmica espaço-temporal de *C. includens* nas Américas e destaca algumas áreas sob ameaça de invasão desta praga em outros continentes. Estes resultados são úteis aos governos de países que apresentam zonas de alto risco de estabelecimento deste inseto-praga. Além disso, nosso modelo alerta as autoridades para o desenvolvimento de estratégias de inspeção e interceptação de *C. includens*, particularmente em regiões centrais da África, Índia, sul e sudeste asiático e nordeste da Austrália. Mesmo em locais onde este inseto está presente, nossos modelos permitem compreender épocas e regiões favoráveis de ocorrência, auxiliando na previsão de surtos populacionais e no planejamento de estratégias para seu controle.

### **Agradecimentos**

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -

Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001. Agradecemos também ao Dr. Darren Kriticos por fornecer os dados das séries temporais da CRU e ao Instituto Mato Grossense de Algodão (IMA) por fornecer os dados de flutuação sazonal da *Chrysodeixis includens*.

## REFERÊNCIAS

ADDO-BEDIAKO, A.; CHOWN, S. L.; GASTON, K. J. Thermal tolerance, climatic variability and latitude, **Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 267, n. 1445, p. 739-745, 2000.

ANDRADE, K.; BUENO, A. d. F.; DA SILVA, D. M.; STECCA, C. d. S.; PASINI, A.; DE OLIVEIRA, M. C. N. Bioecological characteristics of *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) fed on different hosts, **Austral Entomology**, v. 55, n. 4, p. 449-454, 2016.

BALDIN, E. L. L.; LOURENÇÃO, A. L.; SCHLICK-SOUZA, E. C. Outbreaks of *Chrysodeixis includens*, **Bragantia**, v. 73, n. 4, p. 458-465, 2014.

BARRIONUEVO, M. J.; SAN BLAS, G. Redescription of immature stages of the soybean looper (Lepidoptera: Noctuidae: Plusiinae), **The Canadian Entomologist**, v. 148, n. 3, p. 247-259, 2016.

BELLARD, C.; LEROY, B.; THUILLER, W.; RYSMAN, J. F.; COURCHAMP, F. Major drivers of invasion risks throughout the world, **Ecosphere**, v. 7, n. 3, p. e01241-e01241, 2016.

BUENO, A. d. F.; BORTOLOTO, O. C.; BUENO, R. C. O. d. F.; HAMADA, E.; FAVETTI, B. M.; SILVA, G. V. Efeitos do aquecimento global sobre pragas de oleaginosas. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E., *et al* (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 14, p. 68-68.

CAETANO, J. M.; TESSAROLO, G.; DE OLIVEIRA, G.; SOUZA, K. d. S. e.; DINIZ-FILHO, J. A. F.; NABOUT, J. C. Geographical patterns in climate and agricultural technology drive soybean productivity in Brazil, **PLOS ONE**, v. 13, n. 1, p. e0191273-e0191273, 2018.

CHAMUENE, A.; ARAÚJO, T. A.; SILVA, G.; COSTA, T. L.; BERGER, P. G.; PICANÇO, M. C. Performance of the natural mortality factors of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) as a function of cotton plant variety and phenology, **Environmental Entomology**, v. 47, n. 2, p. 440-447, 2018.

CHOWN, S. L.; TERBLANCHE, J. S. Physiological diversity in insects: ecological and evolutionary contexts, **Advances in Insect Physiology**, v. 33, p. 50-152, 2006.

COLINET, H.; HANCE, T. Interspecific variation in the response to low temperature storage in different aphid parasitoids, **Annals of Applied Biology**, v. 156, n. 1, p. 147-156, 2010.

COLINET, H.; SINCLAIR, B. J.; VERNON, P.; RENAULT, D. Insects in fluctuating thermal environments, **Annual Review of Entomology**, v. 60, n. 1, p. 123-140, 2015.

DA SILVA, R. S.; KUMAR, L.; SHABANI, F.; PICANÇO, M. C. An analysis of sensitivity of CLIMEX parameters in mapping species potential distribution and the broad-scale changes

observed with minor variations in parameters values: an investigation using open-field *Solanum lycopersicum* and *Neoleucinodes elegantalis*, **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 135-144, 2018.

DYNESIUS, M.; JANSSON, R.; HUEY, R. B.; SHELDON, K. S.; GHALAMBOR, C. K.; HAAK, D. C.; MARTIN, P. R. Evolutionary consequences of changes in species' geographical distributions driven by Milankovitch climate oscillations, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 97, n. 16, p. 9115-9120, 2000.

EARLY, R.; BRADLEY, B. A.; DUKES, J. S.; LAWLER, J. J.; OLDEN, J. D. *et al.* Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities, **Nature Communications**, v. 7, n. 1, p. 12485-12485, 2016.

ESTAY, S. A.; LIMA, M.; BOZINOVIC, F. The role of temperature variability on insect performance and population dynamics in a warming world, **Oikos**, v. 123, n. 2, p. 131-140, 2014.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMALER, N. **Ecofisiologia da soja**, Londrina, PR, p. 9-9, 2007.

FRANKLIN, J.; MILLER, J. A. **Mapping species distributions: spatial inference and prediction**. Cambridge University Press, 2010. 320 p.

GASPARRI, N. I.; KUEMMERLE, T.; MEYFROIDT, P.; LE POLAIN DE WAROUX, Y.; KREFT, H. The emerging soybean production frontier in southern Africa: conservation challenges and the role of south-south telecouplings, **Conservation Letters**, v. 9, n. 1, p. 21-31, 2016.

GBIF. Global Biodiversity Information Facility. 2018.

GOERGEN, G.; KUMAR, P. L.; SANKUNG, S. B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in west and central Africa, **PLoS ONE**, v. 11, n. 10, p. e0165632., 2016.

HERZOG, D. C. Sampling soybean looper on soybean. *In*: KOGAN M. e D.C., H. (Ed.). **Sampling methods in soybean entomology**. New York, NY: Springer, 1980. cap. 7, p. 141-168.

JARNEVICH, C. S.; STOHLGREN, T. J.; KUMAR, S.; MORISETTE, J. T.; HOLCOMBE, T. R. Caveats for correlative species distribution modeling, **Ecological Informatics**, v. 29, p. 6-15, 2015.

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

LI, X.-J.; WU, M.-F.; MA, J.; GAO, B.-Y.; WU, Q.-L. *et al.* Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach, **Pest Management Science**, v. 76, n. 2, p. 454-463, 2020.

LOBO, J. M. The use of occurrence data to predict the effects of climate change on insects, **Current Opinion in Insect Science**, v. 17, p. 62-68, 2016.

LOTT, K.; NABERHAUS, T. Butterflies and moths of north America. 2018.

MASON, L. J.; MACK, T. P. Influence of temperature on oviposition and adult female longevity for the soybean looper, *Pseudoplusia includens* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae), **Environmental Entomology**, v. 13, n. 2, p. 379-383, 1984.

MOSCARDI, F.; BUENO, A. d. F.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; ROGGIA, S.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; FARHAT, A.; CORSO, P. I. C.; YANO, S. A. C. Artrópodes que atacam as folhas da soja. In: HOFFMANN-CAMPO, C. B.; CÔRREA-FERREIRA, B. S., *et al* (Ed.). **Soja: manejo integrado de insetos e outros artrópodes-praga**. 1st ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. cap. 4, p. 213-334.

MURILLO, H.; HUNT, D. W. A.; VANLAERHOVEN, S. L. First records of *Chrysodeixis chalcites* (Lepidoptera: Noctuidae: Plusiinae) for east-central Canada, **The Canadian Entomologist**, v. 145, n. 3, p. 338-342, 2013.

MUSSER, F. R.; CATCHOT, A. L.; JR, J. A. D.; JR, D. A. H.; LEONARD, B. R.; LORENZ, G. M.; REED, T.; REISIG, D. D.; STEWART, S. D. **2011 soybean insect losses in the southern US**, p. 12-24, 2012.

PAINI, D. R.; SHEPPARD, A. W.; COOK, D. C.; DE BARRO, P. J.; WORNER, S. P.; THOMAS, M. B. Global threat to agriculture from invasive species, **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 27, p. 7575-7579, 2016.

PALMA, J.; MAEBE, K.; GUEDES, J. V. C.; SMAGGHE, G. Molecular variability and genetic structure of *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae), an important soybean defoliator in Brazil, **PLOS ONE**, v. 10, n. 3, p. e0121260, 2015.

RAMIREZ-CABRAL, N. Y. Z.; KUMAR, L.; SHABANI, F. Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks, **The Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 08, p. 1219-1238, 2017.

ROBINET, C.; ROQUES, A. Direct impacts of recent climate warming on insect populations, **Integrative Zoology**, v. 5, n. 2, p. 132-142, 2010.

SANTANA, P. A.; KUMAR, L.; DA SILVA, R. S.; PICANÇO, M. C.; SILVA, R. S. D.; PICANÇO, M. C. Global geographic distribution of *Tuta absoluta* as affected by climate change, **Journal of Pest Science**, v. p. 1-13, 2018.

SANTOS, S. R. d.; SPECHT, A.; CARNEIRO, E.; PAULA-MORAES, S. V. d.; CASAGRANDE, M. M. *et al*. Interseasonal variation of *Chrysodeixis includens* (Walker, [1858]) (Lepidoptera: Noctuidae) populations in the Brazilian savanna, **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 61, n. 4, p. 294-299, 2017.

SHABANI, F.; KUMAR, L. Sensitivity analysis of CLIMEX parameters in modeling potential distribution of *Phoenix dactylifera* L, **PLoS ONE**, v. 9, n. 4, p. e94867-e94867, 2014.

SINCLAIR, T. R.; MARROU, H.; SOLTANI, A.; VADEZ, V.; CHANDOLU, K. C. Soybean production potential in Africa, **Global Food Security**, v. 3, n. 1, p. 31-40, 2014.

SOSA-GÓMEZ, D. R.; DELPIN, K. E.; MOSCARDI, F.; NOZAKI, M. d. H. The impact of fungicides on *Nomuraea rileyi* (Farlow) Samson epizootics and on populations of *Anticarsia gemmatalis* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae), on soybean, **Neotropical Entomology**, v. 32, p. 287-291, 2003.

SPECHT, A.; DE PAULA-MORAES, S. V.; SOSA-GÓMEZ, D. R. Host plants of *Chrysodeixis includens* (Walker) (Lepidoptera, Noctuidae, Plusiinae), **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 59, n. 4, p. 343-345, 2015.

SUTHERST, R. W. Pest species distribution modelling: origins and lessons from history, **Biological Invasions**, v. 16, n. 2, p. 239-256, February 01 2014. journal article.

TONINA, L.; MORI, N.; GIOMI, F.; BATTISTI, A. Development of *Drosophila suzukii* at low temperatures in mountain areas, **Journal of Pest Science**, v. 89, n. 3, p. 667-678, 2016.

WEBBER, B. L.; YATES, C. J.; LE MAITRE, D. C.; SCOTT, J. K.; KRITICOS, D. J.; OTA, N.; MCNEILL, A.; LE ROUX, J. J.; MIDGLEY, G. F. Modelling horses for novel climate courses: insights from projecting potential distributions of native and alien Australian acacias with correlative and mechanistic models, **Diversity and Distributions**, v. 17, n. 5, p. 978-1000, 2011.

ZULIN, D.; ÁVILA, C. J.; SCHLICK-SOUZA, E. C. Population fluctuation and vertical distribution of the soybean looper (*Chrysodeixis includens*) in soybean culture, **American Journal of Plant Sciences**, v. 09, n. 07, p. 1544-1556, 2018.

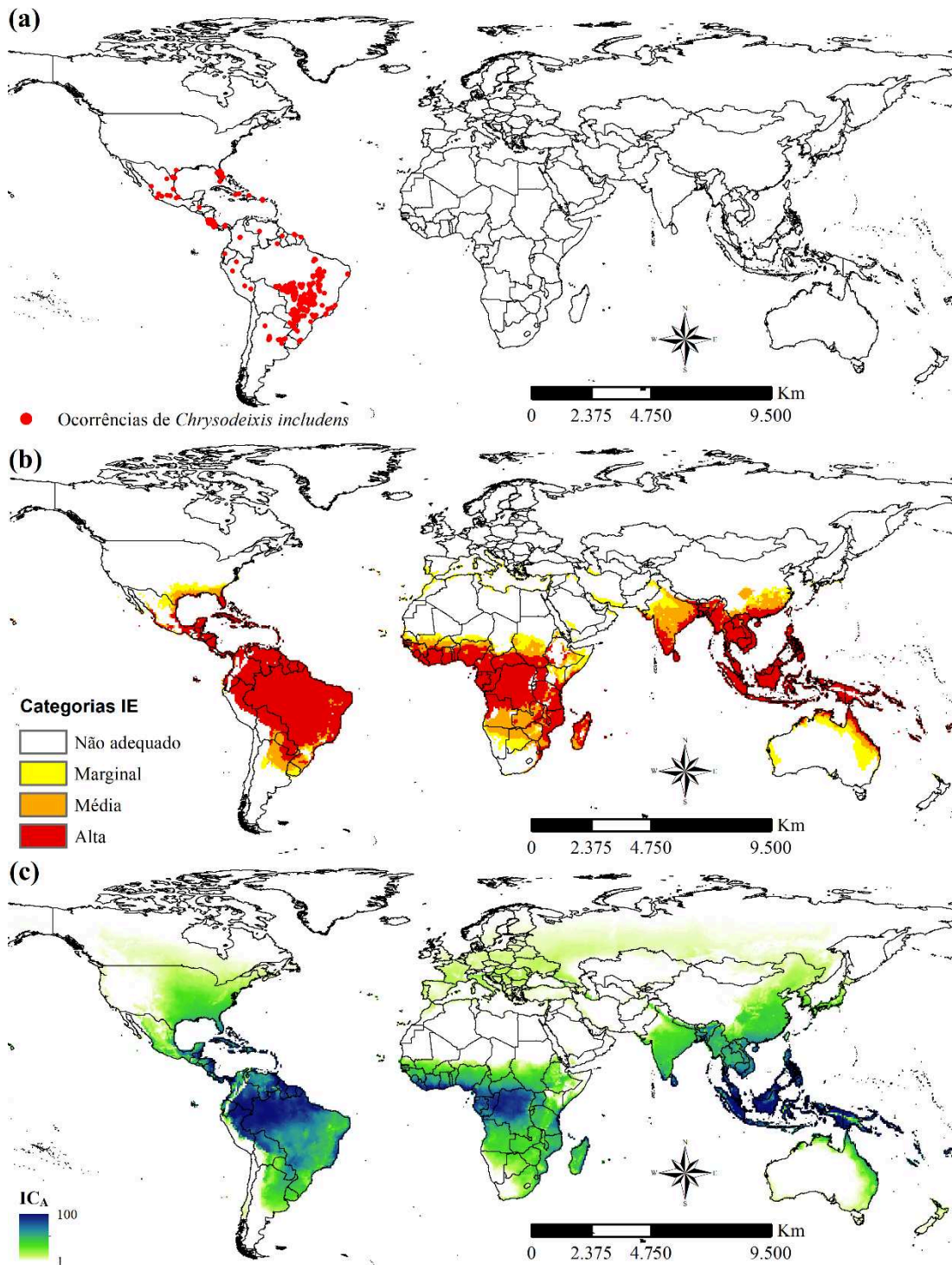
**Tabela 1** Valores dos parâmetros biológicos utilizados para modelagem da distribuição de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) no CLIMEX

Índice	Parâmetro	Valores
<b>Temperatura</b>	DV0 = Limiar mínimo de temperatura	10°C
	DV1 = Limiar mínimo ótimo de temperatura	15°C
	DV2 = Limiar superior ótimo de temperatura	32°C
	DV3 = Limiar superior de temperatura	35°C
<b>Umidade</b>	SM0 = Limiar mínimo de umidade do solo*	0,1
	SM1 = Limiar mínimo ótimo de umidade do solo*	0,3
	SM2 = Limiar superior ótimo de umidade do solo*	1,5
	SM3 = Limiar superior de umidade do solo*	1,6
<b>Estresse por frio</b>	TTCS = Limiar de temperatura de estresse por frio	15°C
	THCS = Taxa de acumulação de estresse por frio	-0,0002 semana <sup>-1</sup>
<b>Estresse por calor</b>	TTHS = Limiar de temperatura para estresse por calor	35°C
	THHS = Taxa de acumulação de estresse por calor	0,001 semana <sup>-1</sup>
<b>Estresse por seca</b>	SMDS = Limiar de estresse por seca*	0,1
	HDS = Taxa de acumulação de estresse por seca	-0,001 semana <sup>-1</sup>
<b>Estresse por umidade</b>	SMWS = Limiar de estresse por umidade*	1,6
	HWS = Taxa de acumulação de estresse por umidade	0,001 (semana <sup>-1</sup> )

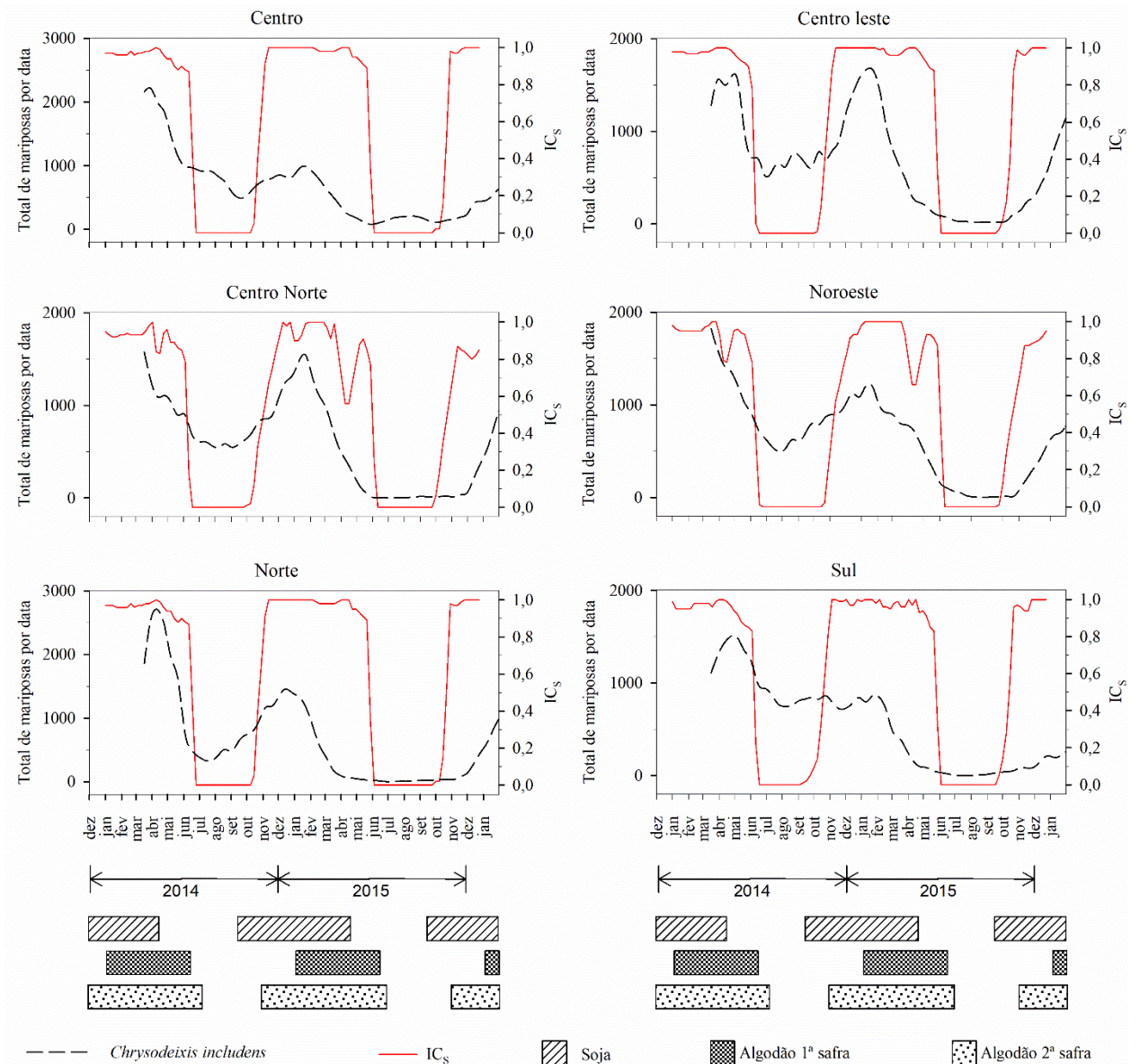
\*Valores sem unidades são índices adimensionais de um modelo de umidade do solo com caçamba única de 100 mm (0 = seco no forno, 1 = capacidade de campo).

**Tabela 2** Valores da análise de sensibilidade para *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) no CLIMEX

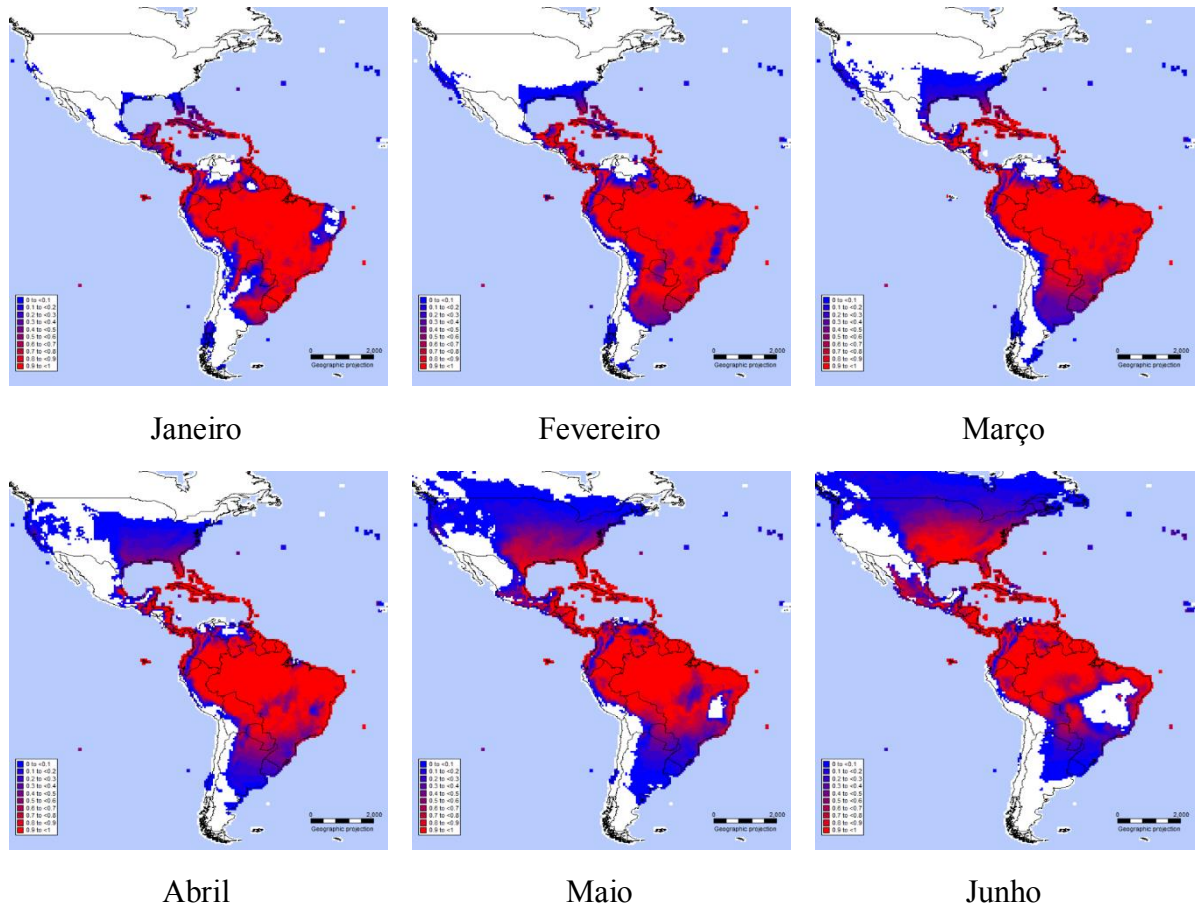
Parâmetros		Valores dos parâmetros			-----Mudança (%)-----									
		Baixo	Padrão	Alto	Extensão	EI	GI	MI	TI	Estresses				
										Frio	Calor	Seca	Umidade	
Limiar mínimo de umidade do solo	SM0	0,00	0,10	0,20	3,80	3,70	5,8	15,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar mínimo ótimo de umidade do solo	SM1	0,20	0,30	0,40	0,80	3,00	4,60	12,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar superior ótimo de temperatura	SM2	1,40	1,50	1,60	0,00	4,20	4,50	5,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar superior de temperatura	SM3	1,50	1,60	1,70	0,10	3,90	4,20	4,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar mínimo de temperatura	DV0	14,00	15,00	16,00	0,30	1,50	2,70	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar mínimo ótimo de temperatura	DV1	25,00	26,00	27,00	0,20	3,2	3,90	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar superior ótimo de temperatura	DV2	31,00	32,00	33,00	0,20	3,70	4,10	0,00	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar superior de temperatura	DV3	34,00	35,00	36,00	0,50	2,5	3,00	0,00	5,30	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar de estresse por seca	SMDS	0,00	0,10	0,20	0,30	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39,49	0,00	
Taxa de acumulação de estresse por seca	HDS	-0,0072	-0,0060	-0,0048	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,02	0,00	
Limiar de estresse por umidade	SMWS	1,60	1,70	1,80	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Taxa de acumulação de estresse por umidade	HWS	0,00080	0,0010	0,0012	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Limiar de temperatura de estresse por frio	TTCS	14,00	15,00	16,00	4,80	4,80	0,00	0,00	0,00	10,26	0,00	0,00	0,00	
Taxa de acumulação de estresse por frio	THCS	-0,00024	-0,0002	-0,00016	3,00	2,3	0,00	0,00	0,00	5,53	0,00	0,00	0,00	
Limiar de temperatura para estresse por calor	TTHS	34,00	35,00	36,00	1,30	2,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,10	
Taxa de acumulação de estresse por calor	THHS	0,00080	0,0010	0,0012	0,50	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	



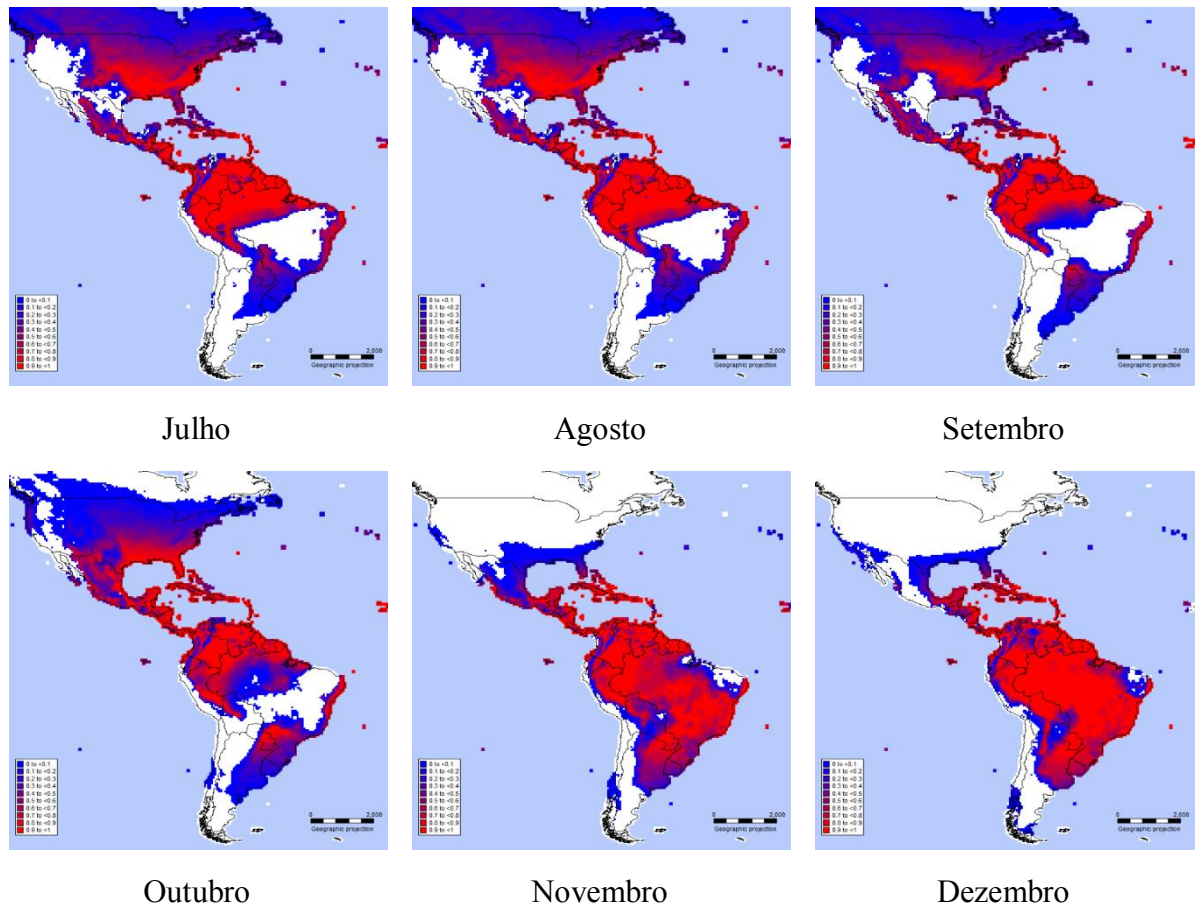
**Fig. 1** (a) Distribuição geográfica atual, (b) Índice Ecoclimático (IE), (c) Índice de Crescimento anual ( $ICA$ ) de *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae) para o clima atual – não adequado ( $EI = 0$ ), marginal ( $0 < EI \leq 10$ ), adequação média ( $10 < EI \leq 30$ ), altamente adequado ( $EI > 30$ ). Cores mais claras no mapa de  $ICA$  (c) representam áreas com menores probabilidades de sobrevivência de *C. includens* a longo prazo.



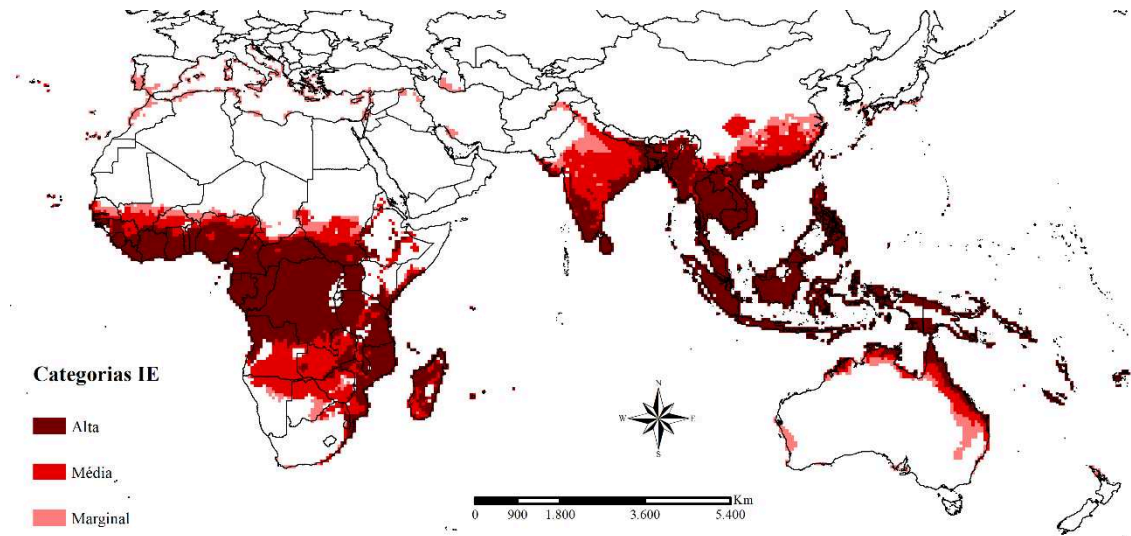
**Fig. 2** Curvas de sazonalidade e Curvas do Índice de Crescimento semanal (IC<sub>s</sub>) de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) para seis regiões do estado de Mato Grosso – Brasil, utilizadas para a validação do modelo espaço-temporal. Abaixo estão descritos a janela de plantio de dois hospedeiros cultivados em larga escala nestas regiões, exemplificando o sincronismo de crescimento (condições favoráveis) entre o inseto e seus hospedeiros.



**Fig. 3** Variabilidade mensal do ICs (escalonado de 0 a 1) para *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) nas Américas em 2014. Cores vermelhas representam alto ICs para o período avaliado.



**Fig. 3** Variabilidade mensal do ICs (escalonado de 0 a 1) para *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) nas Américas em 2014. Cores vermelhas representam alto ICs para o período avaliado (continuação).



**Fig. 4** Mapa da adequabilidade de *C. includens* (Lepidoptera: Noctuidae) em outros continentes considerando a soja como hospedeiro principal: sobreposição dos mapas de adequabilidade climática favorável para cultivos de soja (regiões com  $IE \geq 10$ ) e *C. includens* (adequabilidade marginal:  $IE > 0$  e  $< 10$ ; adequabilidade média:  $IE \geq 10$  e  $< 30$ ; adequabilidade alta:  $IE \geq 30$ ).

## 12 CONCLUSÕES GERAIS

Neste estudo foram construídos modelos para determinação da distribuição geográfica da soja e de *C. includens*. Os modelos têm o propósito de esclarecer novas regiões com clima adequado passíveis a serem incorporadas no cultivo de soja, elaborar estratégias para amenizar os efeitos das mudanças climáticas sobre cultivos de soja e para a criação de barreiras fitossanitárias visando a interceptação de *C. includens* em locais sob risco de introdução.

Em relação à soja, os modelos indicam possíveis consequências sobre a adequação climática de seu cultivo mediante às mudanças climáticas. Em países e regiões localizados em latitudes mais elevadas, como o Canadá e a Europa Ocidental, áreas antes consideradas impróprias para seu cultivo provavelmente se tornarão adequadas até 2070. No entanto, países produtores como Brasil e a Índia provavelmente terão reduções na adequabilidade climática considerando o mesmo período analisado.

Em seguida, os modelos gerados para *C. includens* comprovaram adequabilidade climática favorável para este inseto em grande parte da América Central e do Sul. Nosso modelo espaço-temporal demonstra que áreas tropicais situadas na América Central e Sul, são adequadas para crescimento de *C. includens* ao longo do ano, enquanto que em regiões de latitudes mais elevadas se tornam favoráveis entre os meses de abril e outubro/novembro. Locais que possuem adequabilidade climática para *C. includens* além do continente americano estão localizados em regiões tropicais no continente Africano e Asiático.