

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
UNIDADE UNIVERSITÁRIA DE CIÊNCIAS
EXATAS E TECNOLÓGICAS
MESTRADO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS SOBRE A PRODUTIVIDADE E
DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA SOJA NOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS

Jordana Moura Caetano

ANÁPOLIS – GO
JULHO DE 2013

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS SOBRE A
PRODUTIVIDADE E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA SOJA
NOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS**

JORDANA MOURA CAETANO
Engenheira Agrícola

Orientador: PROF. DR. JOÃO CARLOS NABOUT

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas de Anápolis como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, para obtenção do título de MESTRE.

ANÁPOLIS
GOIÁS
2013

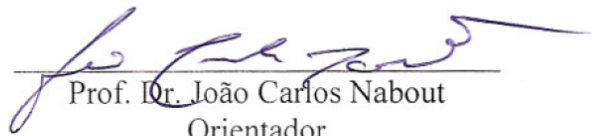
**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS SOBRE A
PRODUTIVIDADE E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DA SOJA NOS MUNICÍPIOS
BRASILEIROS**

Por

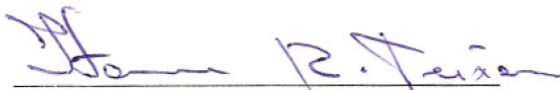
Jordana Moura Caetano

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

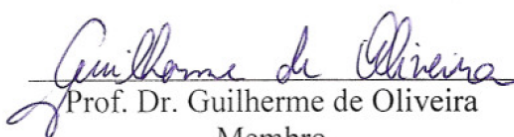
Aprovada em: 22/07/2013



Prof. Dr. João Carlos Nabout
Orientador
UEG / UnUCET



Prof. Dr. Itamar Rosa Teixeira
Membro
UEG / UnUCET



Prof. Dr. Guilherme de Oliveira
Membro
UFG / Instituto de Ciências Biológicas

Ao meu pai, Orlando (*in memoriam*),
dedico.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, me ajudaram no decorrer deste trabalho, pois sozinha não teria conseguido concluí-lo.

Agradeço, primeiramente, ao professor Dr. João Carlos Nabout, pela orientação, sabedoria e enorme paciência que teve comigo. Sou muita grata pelas oportunidades que me confiou e por toda a sua dedicação no projeto.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, sem o qual este trabalho não seria possível.

A realização do mestrado não é possível sem o trabalho e a dedicação dos professores que compõem o programa de pós-graduação, sendo assim, não poderia deixar de agradecê-los. E, em especial, ao ex-coordenador do programa, o professor Dr. Itamar Rosa Teixeira, e ao atual, professor Dr. Elton Fialho dos Reis, pela dedicação ao programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Além dos professores, agradeço à secretária Eliete pelo auxílio com os trâmites burocráticos.

A conclusão deste trabalho também se deve a todos os colegas do mestrado, os quais agradeço pela convivência. À Luciana e ao Rafael, agradeço pela nossa longa amizade, pelo companheirismo e carinho que têm por mim. Ao Ítalo e à Mariana, pelo convívio pessoal e amizade que construímos. À Úrsula, por sempre se mostrar disposta em me ajudar, além de sua agradável companhia, sou muito grata. E aos colegas do Laboratório de Biogeografia e Ecologia Aquática (BIOECOL), Pedro e Karine, que também sempre me prestaram ajuda.

Agradeço ao D.Sc. Guilherme de Oliveira, pela geração dos modelos utilizados neste trabalho, disponibilidade do espaço físico do Laboratório de Ecologia Teórica da Universidade Federal de Goiás e orientação na utilização do *software* Bioensembles. Agradeço-o, também, pelas sugestões e apoio intelectual no decorrer deste trabalho.

Sem minha família eu jamais alcançaria essa realização. Obrigada pelo amor que têm por mim. Agradeço especialmente à minha mãe, Maria Elena, e à minha irmã, Geórgia Bianka, por todo o seu amor, por serem o meu alicerce e, também, por todo o incentivo e apoio emocional que me oferecem. Sou extremamente grata e feliz por tê-las em minha vida e por poder compartilhar essa conquista com vocês. O meu amor por vocês é incondicional.

Agradeço ao meu amado companheiro Samuel, por seu carinho, amizade e paciência. Obrigada por sempre se disponibilizar em me ajudar e sempre fazer por mim o que está ao seu alcance. Sem você, com certeza, tudo seria mais difícil.

E jamais poderia deixar de agradecer a Deus. Ele é o grande responsável por essa vitória. Agradeço por minha vida e por tudo que confia a mim. Muito obrigada!

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO.....	1
REVISÃO DE LITERATURA	3
MATERIAL E MÉTODOS.....	8
Espécie	8
Produtividade da espécie	8
Modelos de nicho.....	8
Análise de dados	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
Produtividade da soja.....	12
Distribuição geográfica potencial	15
Relação adequabilidade climática e produtividade.....	19
Incerteza metodológica	21
CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE TABELAS**PÁGINA**

TABELA 1. Valores da média da soma de quadrado (SS) e soma de quadrado mínimo e máximo da ANOVA realizada para cada célula do Brasil	21
--	----

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
FIGURA 1. Mapa de produtividade média da soja nos municípios brasileiros para os anos de 1994 a 2010	12
FIGURA 2. Frequência de distribuição da produtividade média ($\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$) da soja em relação ao número de municípios que a produz	13
FIGURA 3. Frequência da correlação de Pearson entre a produtividade de soja e o ano (1994 – 2010), para cada município que a produz	14
FIGURA 4. Adequabilidade climática média dos modelos de nicho da soja para o cenário atual (A), cenário futuro (B) e mudanças de adequabilidade climática do cenário futuro (i.e., 2080) em relação ao cenário atual (C)	17
FIGURA 5. Frequência de distribuição dos valores de Δ da adequabilidade climática dos municípios produtores de soja	18
FIGURA 6. Relação entre a adequabilidade climática e a produtividade média da soja ($r = 0.319$; $P = <0,001$; com 2322 graus de liberdade e 123 graus de liberdade geograficamente efetivos) para todos os municípios brasileiros produtores.....	20
FIGURA 7. Mapas dos componentes de variância (soma de quadrado) para os métodos (A) e cenários climáticos (B) da modelagem da soja no Brasil.....	22

RESUMO

Impacto das mudanças climáticas globais sobre a produtividade e distribuição geográfica da soja nos municípios brasileiros

Modelos de nicho são uma importante ferramenta utilizada para compreender os limites geográficos de alcance das espécies e como esses limites se alteram em resposta às mudanças climáticas. Contudo, poucos trabalhos de modelagem de distribuição geográfica versam sobre as espécies agrícolas. Este trabalho teve por objetivo estimar os impactos das mudanças climáticas globais sobre a produtividade da soja no Brasil, investigar a relação entre a produtividade da espécie e sua adequabilidade climática e mapear as fontes de incerteza entre os modelos de nicho e os cenários climáticos, além de suas interações. Foram gerados mapas a partir da combinação de treze técnicas de modelos de nicho e cinco modelos climáticos, nos cenários atual e futuro (projetado para 2080). Assim, foi possível estimar e mapear a frequência de ocorrência da soja no Brasil e determinar quantitativamente as mudanças na adequação climática. A relação (produtividade e adequabilidade climática atual) foi investigada utilizando correlação de Spearman com graus de liberdade geograficamente efetivos. Para quantificar as fontes de incerteza das variáveis estudadas foi utilizada uma análise de variância de dois fatores. A projeção para ano 2080 mostrou que a adequabilidade climática para o cultivo da soja no Brasil tende a diminuir até 50% na região central enquanto o extremo sul apresentou condições mais favoráveis (aumento de 25% da aptidão climática). A produtividade da soja foi correlacionada positivamente com a adequabilidade climática atual ($r = 0,319$; $P = <0,001$). A análise de variância indicou que os métodos apresentaram maior incerteza nas previsões (i.e., 0,75) quando comparados com os cenários climáticos e sua interação, 0,02 e 0,23, respectivamente. Os resultados apontam para a necessidade de adoção de medidas mitigadoras para controlar os possíveis impactos econômicos que as mudanças climáticas possam acarretar.

Palavras-chave: adequabilidade ambiental; conjunto de previsões; *Glycine max* (L.) Merrill; modelo de nicho; mudanças climáticas.

ABSTRACT

Impact of global climate change on the yield and geographical distribution of soybean in Brazilian cities

Niche models are an important tool used to understand the limits of geographic range of the species and how these limits change in response to climate change. However, few studies of geographic distribution modeling that deal with the impact of climate change on agricultural species. This study aimed to estimate the impacts of global climate change on productivity of soybean in Brazil, to investigate the relationship between crop yield and climate suitability and map the sources of uncertainty among niche models and climate scenarios, and their interactions. Maps were generated from the combination of thirteen techniques niche models and five climate models, in scenarios current and future (projected for 2080). Thus, it was possible to estimate and map the frequency of occurrence of soybean in Brazil and quantitatively determine the changes in climatic suitability. The relationship (productivity and current climatic suitability) was investigated using Spearman correlation with geographically effective degrees of freedom. To quantify the sources of uncertainty of the variables was used an analysis of variance of two-way. The projection for 2080 showed that the climate suitability for cultivation of soybean in Brazil tends to decrease to 50% in the central region while the extreme south showed more favorable conditions (increase of 25% climate suitability). Soybean yield was positively correlated with the current suitability ($r = 0.319$, $P = <0.001$). The analysis of variance indicated that the methods presented more uncertainty in the forecasts (i.e., 0.75) when compared with the climate scenarios and their interaction, 0.02 and 0.23, respectively. The results point to the need to adopt mitigation measures to control the possible economic impacts that climate change might cause.

Key words: environmental suitability, ensemble forecasting, *Glycine max* (L.) Merrill, niche model, climate change.

INTRODUÇÃO

Estudos apontam que em um futuro próximo ocorrerão mudanças climáticas em todo planeta. Diante da maneira negativa que o aquecimento global afeta as populações, interferindo em seus habitats, pesquisadores de diversas áreas do conhecimento têm desenvolvido e utilizado os modelos de distribuição geográfica de espécies, ou modelos de nicho, que visam estimar a potencial ocorrência de quaisquer espécies considerando suas exigências ecológicas e prevendo, desta, as áreas adequadas em que as espécies possam ocorrer (SONG et al., 2013).

Várias são as técnicas de modelagem existentes, contudo esses modelos têm diferentes propriedades matemáticas e estatísticas e possuem diferentes capacidades de ajuste, o que podem restringir as previsões (HANBERRY et al., 2012). Para tornar-se mínima tal incerteza, propõe-se uma abordagem baseada em uma combinação de modelos e suas projeções (ARAÚJO e NEWS, 2007), construídos, por exemplo, sob diferentes conjuntos de dados, variáveis ambientais, modelos de distribuição de espécies e cenários de emissão.

Considerando a previsão de aumento da temperatura em nível global é provável que este fenômeno atinja diretamente o desempenho das espécies agrícolas, das quais poderão sofrer progressivas quedas em sua produção nos próximos anos, visto que a agricultura é uma das atividades econômicas mundiais mais vulneráveis às alterações climáticas.

Torna-se, então, necessário a avaliação dos efeitos das mudanças climáticas, obtidos por meio de modelos de nicho, sobre a produtividade dessas espécies, visto que, até o presente, são poucos os trabalhos que investigaram tal relação que carece de estudos, por exemplo, Nabout et al. (2011) investigaram o efeito das mudanças climáticas sobre a produção de pequi e concluíram que diversos municípios que produzem pequi perderão, no cenário futuro, condições climáticas; Nabout et al. (2012a) pesquisaram os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade média do milho e tiveram como resultado que haverá pouca redução da produtividade para o ano de 2050.

O clima é uma das variáveis mais importantes na produção agrícola, determinando a adequação da produção pela ocorrência de adversidades climáticas e pela definição das áreas onde se podem explorar as culturas. Possivelmente, com as mudanças climáticas, regiões que atualmente cultivam espécies importantes futuramente podem não ser mais aptas à produção,

pois é provável que estas áreas não apresentem condições climáticas adequadas, resultando em alto risco para o cultivo.

Países fortemente dependentes da atividade agrícola, como é o caso do Brasil, tendem a sofrer mais danos em sua economia com os efeitos das mudanças climáticas em relação aos países industrializados. Os produtos agropecuários brasileiros têm grande expressão no mercado mundial, destacando-se, entre as espécies agrícolas economicamente importantes, a soja.

Caso haja diminuição das áreas que apresentam adequabilidade climática para o cultivo da soja, o impacto econômico pode ser enorme para o Brasil. Assim, simulações de cenários futuros baseados em modelos de nicho podem contribuir para o planejamento de médio e longo prazo da agricultura brasileira, considerando as diferenças regionais quanto aos efeitos da mudança no clima.

Sabendo-se da importância da atividade agrícola para a economia brasileira e visto que as mudanças climáticas podem alterar o atual cenário agrícola, este trabalho teve por objetivo estimar a distribuição geográfica da soja no cenário atual e futuro (projetado para 2080), em todo o território nacional e relacionar a adequação climática da soja com a sua produtividade nos municípios brasileiros.

REVISÃO DE LITERATURA

As mudanças climáticas têm sido uma questão preocupante em nível mundial. Atualmente a manutenção da biodiversidade e da segurança humana está ganhando importância à medida que as populações são afetadas pelos resultados do aquecimento global e suas previsões futuras (GLEICK, 2010). De fato, o número de estudos sobre mudanças climáticas tem crescido acentuadamente nos últimos anos, sendo que, os primeiros estudos realizados na década de 80 objetivaram avaliar as causas das mudanças climáticas, ao passo que os estudos mais recentes têm investigado os efeitos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade e a segurança humana (NABOUT et al., 2012b).

Preocupados sobre este assunto, pesquisadores de diversos campos da ciência têm se aproximado de um conjunto de questões complexas relacionadas com a distribuição geográfica de espécies. Tais estudos consideram cenários passados e/ou atuais de distribuição de espécies e fazem projeções futuras a partir de perspectivas ecológicas (HIJMANS e GRAHAM, 2006; SANTANA et al., 2008). Portanto, uma abordagem para estimar a potencial ocorrência de quaisquer espécies deve considerar as suas exigências ecológicas, a fim de prever as áreas adequadas (ambientalmente) em que a espécie possa estar presente (JIMÉNES-ALFARO et al., 2012).

Uma das ferramentas mais promissoras desenvolvidas durante as últimas décadas são os modelos de distribuição geográfica de espécies, também conhecidas como modelos de nicho (GASTÓN e GARCÍA-VIÑAS, 2011; PETERSON et al., 2011). A modelagem de distribuição de espécies tem sido amplamente aplicada em várias áreas do conhecimento, sendo uma importante ferramenta para a compreensão de processos ecológicos e para orientar a conservação e o manejo de plantas e animais (SANTIKA e HUTCHINSON, 2009; SONG et al., 2013).

Esses modelos são baseados no pressuposto de que se uma espécie pode ser encontrada em certas condições climáticas, então ela deve ser capaz de sobreviver e se reproduzir em todas as áreas com as mesmas condições (SANTANA et al., 2008; HANSPACH et al., 2010). Tais modelos podem ser aplicados para avaliar o potencial das espécies invasoras (VÁCLAVÍK e MEENTEMEYER, 2009; OLIVEIRA et al., 2010), delinear rotas potenciais de infecções e doenças (VÁCLAVÍK et al., 2010), avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade (SIQUEIRA e PETERSON, 2003;

ALSOS et al., 2012) ou, especificamente, sobre espécies cultivadas (NABOUT et al., 2012a; BECK, 2013), entre outros.

Tecnicamente, os modelos de nicho necessitam de basicamente três dados para serem gerados: os pontos de ocorrência das espécies, as variáveis ambientais e os métodos analíticos (i.e., algoritmos ou simplesmente modelos). Os métodos analíticos são funções matemáticas e estatísticas que estabelecem a relação das variáveis ambientais com os dados de ocorrência das espécies para determinar seus nichos ecológicos (LIMA-RIBEIRO e DINIZ-FILHO, 2012).

A geração de modelos de distribuição de espécies é um processo computacional complexo, envolvendo uma variedade de dados, técnicas e pacotes de programas computacionais adaptados para ajuste dos modelos (SANTANA et al., 2008). Um problema com a utilização destas técnicas é devido à dificuldade encontrada para a seleção da metodologia mais adequada para atender a finalidade dos estudos, pois existe muita incerteza tanto nas técnicas quanto nos cenários climáticos (PEREIRA et al., 2010; HANBERRY et al., 2012). Análises recentes demonstraram também que ocorrem discrepâncias nos resultados entre diferentes técnicas, fazendo a escolha do modelo apropriado ainda mais difícil (THUILLER et al., 2009).

Visando minimizar os problemas quanto à avaliação dos modelos e suas aplicações, uma das soluções é utilizar um consenso de diferentes técnicas de modelagem, projeções climáticas e cenários de emissão que, apesar de serem fontes de incerteza durante o processo de modelagem de nicho, quando combinadas, suas previsões resultam em erro médio inferior a quaisquer previsões individuais que a compõem; ou seja, ao combinar duas ou mais previsões de diferentes técnicas de modelagem, projeções climáticas e cenários de emissão, pode-se obter resultados mais robustos ou com probabilidade de erro menor (ARAÚJO e NEWS, 2007). A ideia de combinar previsões é atraente ao passo que não há um único modelo que está mais próximo da “verdade” em todas as circunstâncias e que, apesar dos modelos serem falhos, fornecem informações úteis (SEGURADO e ARAÚJO, 2004).

Vários são os modelos citados em estudos de modelagem, dos quais os mais empregados foram utilizados na metodologia deste trabalho, sendo eles: *Bioclimatic envelope* (BIOCLIM), *Ecological Niche Factor Analysis* (ENFA), *Euclidian distance* (EuclidDist), *Flexible Discriminant Analysis* (FDA), *Generalized Additive Models* (GAM), *Genetic Algorithm for Rule Set Production* (GARP), *Generalizes Linear Models* (GLM), *Gower distance* (GowerDist), *Mahalanobis distance* (MahalanobisDist), *Multivariate Adaptive Regression Spline* (MARS), *Maximum Entropy* (MaxEnt), *Neural Networks* (NNet) e *Random*

Forest (RndFor), (para obter detalhes sobre os métodos ver ELITH e LEATHWICK, 2009; FRANKLIN, 2009; ELITH et al., 2010; PETERSON et al., 2011).

Em termos operacionais, os modelos podem ser divididos em dois grupos: (i) modelos que utilizam tanto dados de presença (locais onde a espécie foi observada) quanto de ausência das espécies (locais onde certamente a espécie não ocorre) para modelar sua distribuição no espaço, sendo conhecidos como modelos baseados em presenças e ausência (e.g., GLM, GAM, RndFor e MARS); e (ii) modelos que utilizam apenas dados de presença, sendo conhecidos como modelos baseados em presenças (e.g., EuclidDist, GowerDist, MahalanobisDist, BIOCLIM, ENFA, MaxEnt, GARP, NNet e FDA) (FRANKLIN, 2009).

Embora a idiossincrasia quanto aos tipos de modelos e variáveis utilizadas, atualmente as técnicas de modelagem de distribuição geográfica (i.e. modelos de nicho) são as mais confiáveis para avaliar, em ampla escala geográfica, a distribuição geográfica das espécies em cenários futuros de mudanças climáticas (PETERSON et al., 2011; HOF et al., 2012). Apesar disso, poucos estudos têm investigado o impacto das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica de espécies agrícolas (NABOUT et al., 2012b).

Jarvis et al. (2012), dentre outros objetivos, analisaram os impactos das alterações climáticas na produção de mandioca (*Manihot esculenta*) na África. Concluíram, com base nas mudanças projetadas no clima, que a mandioca terá adequação climática sendo impactada positivamente em todo o continente africano, conforme previsto pelo modelo.

Ramirez-Villegas et al. (2013), investigaram os efeitos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola do sorgo (*Sorghum bicolor* Moench) no continente africano. Concluiu-se no estudo que as áreas na África que atualmente têm os melhores índices de produção da espécie investigada terão futuramente condições climáticas ainda melhores para o cultivo de tal espécie e, provavelmente, ocorrerá redução na produção de sorgo em países onde seu cultivo é vulnerável. Relacionaram, ainda, o contexto das mudanças climáticas com a questão de segurança alimentar mundial.

Todos esses modelos têm empregado as técnicas de distribuição geográfica das espécies para investigar a sua distribuição geográfica em cenários futuros de mudanças climáticas, ou seja, o foco tem sido a distribuição geográfica e as condições climáticas futuras (SEQUEIRA et al., 2012). Contudo, poucos estudos até o presente investigaram o efeito da alteração da distribuição geográfica das espécies, como consequência das mudanças climáticas, sobre a produtividade.

Por exemplo, Nabout et al. (2011), investigaram o efeito das mudanças climáticas sobre a produção de pequi (*Caryocar brasiliense*), no qual, a produção foi relacionada com a

adequabilidade climática (proveniente do modelo de nicho), e o principal resultado foi que grande parte dos municípios perderão condições climáticas, o que afetará a produção de pequi em cenários futuros. Observa-se então que essa relação (produtividade com modelos de nicho), para espécies agrícolas, carece de estudos e são muito importantes, pois poderão fornecer cenários do efeito das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola do Brasil (NABOUT et al., 2012a).

Espera-se, com as mudanças climáticas, redução da produtividade agrícola, visto que a agricultura está entre as atividades mais vulneráveis às alterações do clima (RAMIREZ-VILLEGAS e CHALLINOR, 2012; BECK, 2013). É possível também que as áreas de plantio diminuam, acarretando decréscimo na produção nacional e, conseqüentemente, prejuízos para o agronegócio brasileiro (ASSAD et al., 2004; LANE e JARVIS, 2007).

A agricultura é uma das principais atividades econômicas do Brasil. Desde a década de 90, poucos países cresceram tanto no comércio internacional do agronegócio quanto o Brasil (IBGE, 2012). O país é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários. No início de 2010, 25% dos produtos do agronegócio em circulação mundial eram brasileiros, sendo que o Ministério da Agricultura projeta que, até 2030, este percentual alcance cerca de 34%, em função da crescente demanda por alimentos dos países asiáticos (BRASIL, 2012).

A produção agrícola brasileira vem crescendo nos últimos anos, sendo a soja uma das principais culturas grâníferas, juntamente com as culturas agrícolas de arroz e milho. Em relação ao ano anterior houve acréscimos, na área, de 9,7% para a soja e no que se referem à produção, os acréscimos foram de 26,3%, quando comparados a 2012 (IBGE, 2013).

Visto a importância da soja no mercado nacional e internacional e o crescente interesse de produzi-la em diversas áreas do país, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desenvolveu e hoje possui um sólido programa de pesquisas de melhoramento genético de soja que visa à busca de cultivares altamente produtivas, com estabilidade para cultivo em diferentes regiões do Brasil e, principalmente, com boa sanidade a doenças. Tem-se, assim, um amplo portfólio com 95 cultivares de soja que atendem as diferentes exigências regionais (ver EMBRAPA, 2010a; 2010b; 2011; 2013; ARANTES et al., 2010; MELO e TEIXEIRA, 2010; MOREIRA e PIPOLO, 2011; PEREIRA et al., 2011). Considerando a expectativa em relação às mudanças climáticas, o melhoramento genético tem importância no que diz respeito à produção de cultivares tolerantes a altas temperaturas e ao estresse hídrico, o que tende a minimizar o decréscimo de produtividade da espécie em áreas que perderão adequabilidade climática para o seu cultivo.

Em relação às necessidades ambientais da soja, sabe-se que a temperatura é um fator de grande importância na produção da espécie atuando diretamente em todas as fases da cultura. A soja se adapta melhor a temperaturas entre 20° e 30°C, sendo 30°C a temperatura ideal para seu desenvolvimento. Para a semeadura a faixa adequada de temperatura do solo varia de 20° a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para rápida e uniforme emergência das plântulas. A menos de 10°C o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo e acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuição da capacidade de retenção de vagens. A floração da soja somente ocorre em temperaturas acima de 13°C, havendo temperaturas altas pode ocorrer floração precoce, deixando a planta menor do que o habitual (EMBRAPA, 2009).

A disponibilidade de água é essencial, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação–emergência e floração–enchimento de grãos. No primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água prejudicam a obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento dos estômatos e o enrolamento das folhas. Para obtenção do rendimento máximo, a necessidade de água na cultura durante todo o ciclo, varia entre 450 a 800 mm (EMBRAPA, 2004).

MATERIAL E MÉTODOS

Espécie

A espécie investigada no estudo foi a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), que se destaca no cenário nacional como sendo uma das principais culturas do país, no qual o Brasil é o segundo maior produtor mundial e o maior da América Latina (LUDWIG et al., 2011). A estimativa de produção da soja no Brasil, safra 2012/2013, é de 83.424,3 mil toneladas em uma área de 27.645,9 mil hectares, com previsão de aumento de 13,8% da sua produtividade em comparação com a safra anterior (CONAB, 2013). A soja também ocupa papel importante na economia mundial, podendo ser cultivada em quase todas as regiões do mundo, o que confirma sua relevância para a humanidade (BIANCO et al., 2012).

Produtividade da espécie

Os dados de produtividade municipal da soja foram obtidos de maneira indireta, a partir da relação de produção (em toneladas) e área colhida (em hectares) de cada município brasileiro, em que os valores de produtividade são dados em toneladas por hectare (ton. ha^{-1}) no período de 1994 – 2010. Os valores de produção e área colhida foram adquiridos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em seu endereço eletrônico www.ibge.gov.br, utilizando o banco de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA).

As coordenadas geográficas (i.e., longitude e latitude) dos municípios brasileiros foram obtidas de arquivos vetoriais (em formato *shapefile*), dos quais foram adquiridos na página eletrônica do IBGE.

Modelos de nicho

Foi obtido um total de 2.324 pontos de ocorrência da soja, no qual os municípios brasileiros que apresentaram produtividade média maior do que zero foram considerados como dados de ocorrência. Os registros foram mapeados em células com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (longitude x latitude) sobre uma grid da região Neotropical da qual foram, posteriormente, retirados os dados.

Os dados climáticos para a modelagem de distribuição de espécie foram obtidos a partir de cinco diferentes modelos climáticos, sendo CCSM (*Community Climate System Model*, Estados Unidos), GISS (*Goddard Institute for Space Studies*, NASA, Estados Unidos),

IPSL (*Institut Pierre Simon Laplace*, França), MIROC (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*, Japão) e MRI (*Meteorological Research Institute*, Japão). Os modelos climáticos descrevem as ligações entre as variáveis que governam o clima global e permitem prever o que pode ocorrer sob certas hipóteses de mudança. Todos esses modelos são disponibilizados a partir do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), que tem por objetivo estudar e divulgar os fenômenos relacionados às mudanças climáticas.

Os modelos foram obtidos para os cenários atual e futuro com o cenário de emissão RCP 6.0 que está disponível para todos os modelos climáticos selecionados. Os RCPs (*Representative Concentration Pathways*) são oriundos de um banco de dados que, em geral, possui informações de forças radioativas disponíveis na literatura, e deve abranger o período que vai até o ano de 2100. Este banco de dados é o produto resultante da colaboração de diferentes grupos de modelagem. O cenário de emissão RCP 6.0 foi desenvolvido pela equipe de modelagem AIM (*Asia-Pacific Integrated Model*) do Instituto Nacional de Estudos Ambientais, no Japão, sendo considerado um cenário mediano (i.e., força radioativa de aproximadamente 6 W/m^2 e concentração de CO_2 de aproximadamente 850 p.p.m.) (MOSS et al., 2010; VAN VUUREN et al., 2011).

Para cada um dos modelos climáticos, juntamente com o cenário de emissão, foram obtidas cinco variáveis climáticas para os períodos pré-industrial (expressando o clima atual) e futuro (projetado para o ano de 2080). As variáveis climáticas utilizadas foram a temperatura média anual, extensão da temperatura anual, precipitação no mês mais úmido, precipitação no mês mais seco e precipitação no trimestre mais quente. Além dessas variáveis, utilizou-se também o pH do solo para a profundidade de 30-100 cm (dados disponibilizados pela *Harmonized World Soil Database* – versão 1.1, conforme TERRIBILE et al., 2012), assumindo-se constante no decorrer do período estudado. As cinco variáveis climáticas e o pH do solo foram utilizadas simultaneamente para prever as áreas geográficas da espécie soja.

Para modelar a soja foram gerados mapas a partir da combinação de treze técnicas de modelos de nicho: *Bioclimatic envelope* (BIOCLIM), *Ecological Niche Factor Analysis* (ENFA), *Euclidian distance* (EuclidDist), *Flexible Discriminant Analysis* (FDA), *Generalized Additive Models* (GAM), *Genetic Algorithm for Rule Set Production* (GARP), *Generalizes Linear Models* (GLM), *Gower distance* (GowerDist), *Mahalanobis distance* (MahalanobisDist), *Multivariate Adaptive Regression Spline* (MARS), *Maximum Entropy* (MaxEnt), *Neural Networks* (NNet) e *Random Forest* (RndFor). Na modelagem foi utilizado apenas os dados de presença da espécie agrícola, sendo que não foi necessário a seleção de pseudoausências por se tratar de um espécie cultivada.

Os métodos utilizados nos modelos de distribuição geográfica de espécies foram implementados no *software* BIOENSEMBLES (COLLEVATTI et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2012). Este *software* é uma plataforma computacional que possui alguns métodos diretamente implementados, como o BIOCLIM e os modelos baseados em distância, enquanto outros modelos são de diferentes fontes (e.g. GARP de *OpenModeler*, <http://openmodeller.sourceforge.net/>), integrados de *software* externo (e.g. MaxEnt usa o *software* original) ou métodos implementados no R (e.g. NNet, FDA) (ver THUILLER et al., 2009).

Os procedimentos para a modelagem utilizando o consenso foram realizados seguindo Diniz-Filho et al., (2009, 2010a). Os pontos de ocorrência da espécie foram divididos aleatoriamente em dois subconjuntos, de calibração e de validação, que compreende 75% e 25% do conjunto de dados, respectivamente. Inicialmente, os modelos foram calibrados utilizando um subconjunto de dados aleatórios e, posteriormente, foram avaliados pelo restante dos dados. Este procedimento foi repetido 50 vezes por meio de sorteio de diferentes combinações dos pontos de calibração/validação do conjunto de dados. Um total de 3.250 modelos (50 aleatorizações x 13 modelos de nicho x 5 cenários climáticos) foram gerados e avaliados pela *True Skill Statistics* (TSS) (ALLOUCHE et al., 2006). Os modelos foram combinados, a partir da média ponderada do valor de TSS dos próprios modelos, para gerar uma frequência da ocorrência da espécie em cada célula da região Neotropical, tanto para o cenário climático atual quanto para o futuro.

Fez-se, também, o mapa das perdas da adequabilidade climática da soja do cenário atual para o cenário futuro. Para gerar este mapa de variação subtraíram-se os valores de adequabilidade do cenário futuro pelos valores do cenário atual, o que resultou em um mapa aqui denominado Δ (delta) da adequabilidade climática. Valores de Δ negativos indicam que seus municípios perderão (no cenário futuro) condições climáticas adequadas para o cultivo de soja, enquanto que valores positivos de Δ traduzem a condição inversa. Valores iguais a zero sugerem que os municípios não alterarão seus valores de aptidão climática no cenário futuro em relação ao atual.

Análise de dados

Realizou-se a correlação de Pearson entre a produtividade da soja pelo ano (1994 – 2010) para cada município produtor, de modo que os valores positivos indicam aumento temporal da produtividade enquanto os valores negativos indicam perda de produtividade no

tempo. Portanto, essa estatística indica para cada município a tendência temporal da produtividade (TTP).

Investigou-se, também, a relação entre a produtividade média e a adequabilidade climática do cenário atual. Foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para avaliar o pressuposto de normalidade das variáveis (i.e., produtividade média e adequabilidade climática), no qual foi confirmado que tais variáveis não satisfizeram a hipótese relativa à normalidade (Produtividade média: $W = 0,94$; $P < 0,0001$; Adequabilidade climática: $W = 0,90$; $P < 0,0001$). Diante do resultado, utilizou-se o teste não-paramétrico do coeficiente de correlação de Spearman ($P < 0,05$) para a análise dos dados amostrais. A análise de correlação de Spearman foi também realizada para investigar a relação entre TTP (medida pelo coeficiente e Pearson) e a adequabilidade climática dos municípios.

Em dados espacialmente explícitos o pressuposto de independência das unidades amostrais pode ser violado, acarretando o aumento do Erro tipo I (i.e., rejeição da hipótese nula quando ela é verdadeira), o que induz a concluir que existe relação significativa entre as variáveis quando, de fato, não há. Portanto, a correlação das variáveis (i.e., produtividade média e adequabilidade climática) foi testada utilizando o teste t modificado baseado em graus de liberdade geograficamente efetivos (DUTILLEUL, 1993). Este teste t corrige os graus de liberdade, evitando que a chance de Erro tipo I seja inflada.

Uma análise de variância (ANOVA) com dois fatores para cada célula da grid foi utilizada para quantificar as fontes de variação estudadas (i.e. os métodos para a modelagem de nicho e os cenários climáticos) nos modelos de soja. A ANOVA proposta por Diniz-Filho et al. (2009), permite quantificar e avaliar as principais fontes de variação, mesmo sem replicação, de forma independente para cada célula (DINIZ-FILHO et al., 2010a). A soma dos quadrados calcula os componentes de variação, que é expresso como a porcentagem de explicação de cada uma das duas fontes principais e as suas interações (DINIZ-FILHO et al., 2010b). Desta forma, foi possível mapear cada componente de variância (i.e. método e cenário) e, então, identificar as regiões de alta e baixa incerteza e estimar as principais fontes para esta incerteza.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produtividade da soja

Os valores de produtividade média (i.e., 1994 – 2010) da soja são maiores na região Centro-Sul do país (Figura 1), destacando-se os Estados do Paraná, São Paulo e Rio Grande do Sul. A frequência de distribuição da produtividade média da soja em relação ao número de municípios que a produzem apresentou distribuição assimétrica (Figura 2). Destes municípios, 602 (cerca de 26% dos municípios investigados) têm produtividade média variando entre 2,01 e 2,50 ton. ha⁻¹, destacando-se os Estados do Paraná e São Paulo. São cinco os municípios que têm os maiores valores de produtividade média (3,01 a 3,50 ton. ha⁻¹), sendo todos do Estado do Paraná e, ainda, dos 329 municípios com produtividade média na faixa de 2,51 a 3,00 ton. ha⁻¹, 174 são deste Estado.

Os municípios que têm os menores valores de produtividade média (0,01 e 0,50 ton. ha⁻¹) somam um total de 357. Alguns destes municípios (24% do total) pertencem aos Estados das regiões Norte (i.e., Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará e Tocantins) e Nordeste (i.e., Bahia, Ceará, Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Alagoas), que são regiões que, em sua maioria, não possuem produtividade média acima de 1,50 ton. ha⁻¹.

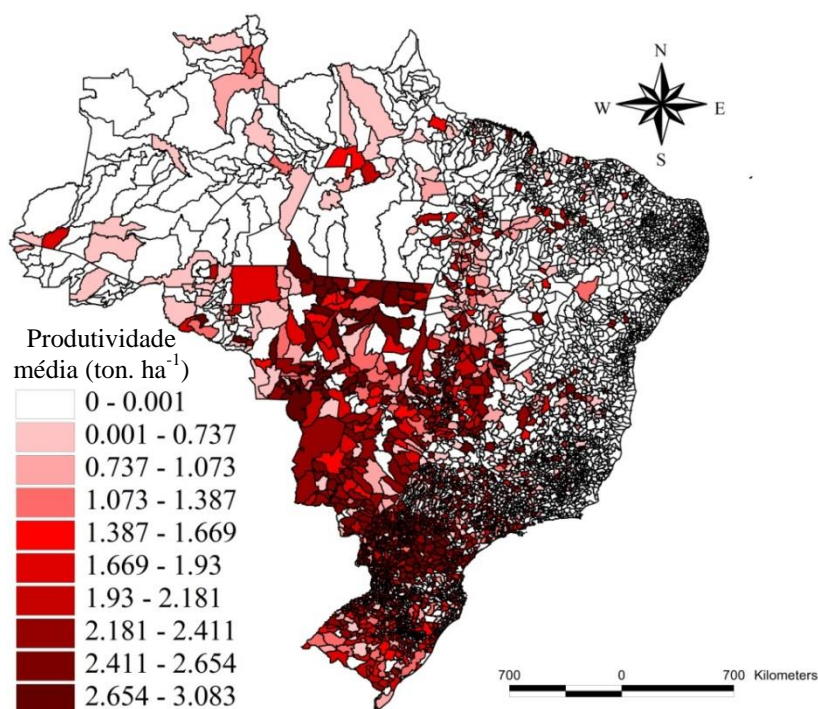


Figura 1. Mapa de produtividade média da soja nos municípios brasileiros para os anos de 1994 a 2010.

Tal comportamento (i.e., maiores valores de produtividade média da soja na região Sul do Brasil) pode ter sido influenciado devido à introdução da cultura no país. A soja chegou ao Brasil via Estados Unidos, em 1882. A partir de tal data, iniciaram-se os estudos de avaliação das cultivares introduzidas no país e em 1901 tem-se registro do primeiro cultivo de soja no Rio Grande do Sul, onde a cultura encontrou efetivas condições para se desenvolver e expandir, devido as condições climáticas predominantes no extremo sul do Brasil se assemelharem ao ecossistema de origem (sul dos EUA). Além das condições climáticas favoráveis, um programa oficial de incentivo à triticultura nacional na região Sul, em meados da década de 50, incentivou, igualmente, a cultura da soja, tida como melhor alternativa de verão para suceder a cultura do trigo plantada no inverno. Na década de 60 a soja se estabeleceu como cultura economicamente importante para o Brasil e, na década seguinte, como principal cultura do agronegócio brasileiro (EMBRAPA, 2004).

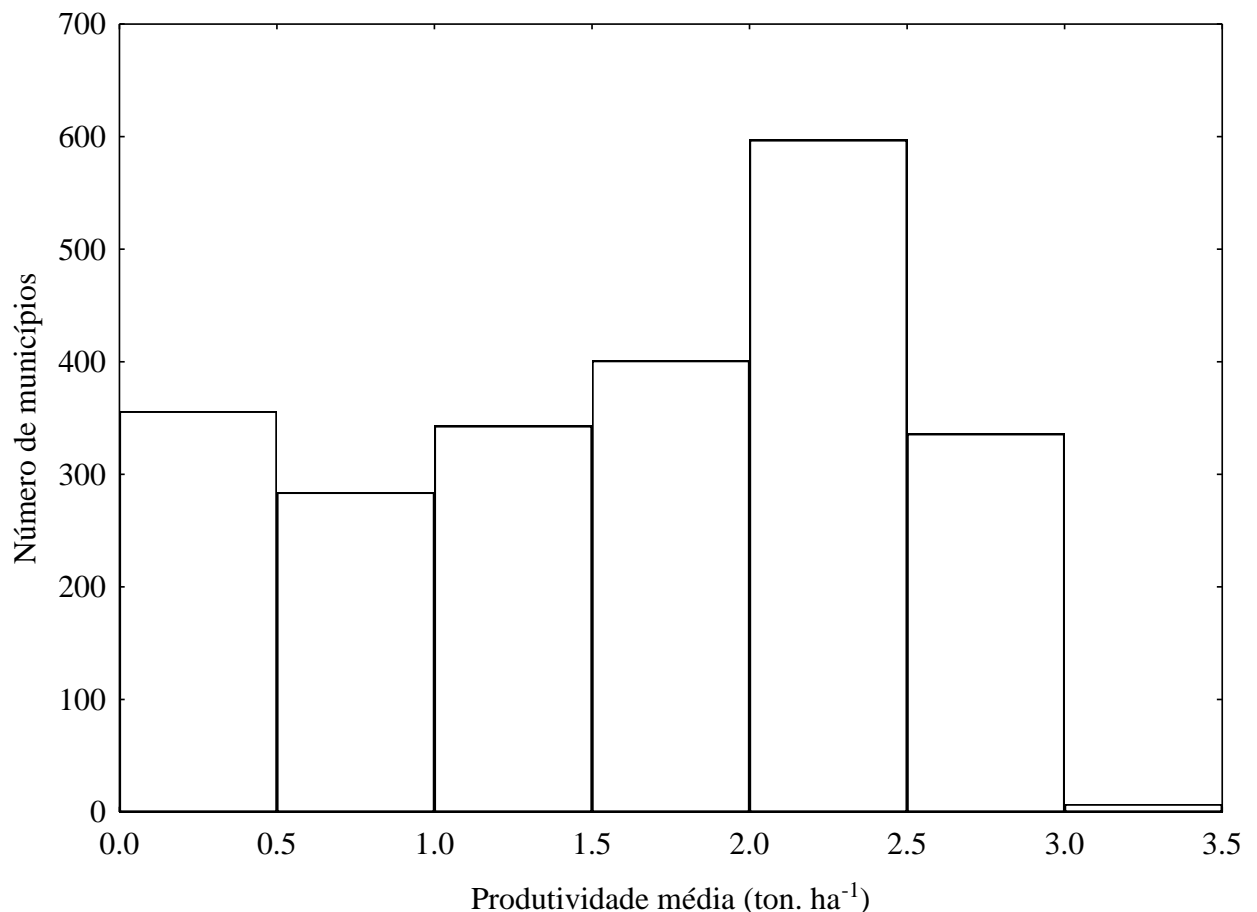


Figura 2. Frequência de distribuição da produtividade média (ton · ha⁻¹) da soja em relação ao número de municípios que a produz.

Ao se realizar a correlação de Pearson para averiguar a TTP de soja em cada município estudado, observou-se aumento da produtividade com o decorrer das safras para vários municípios (Figura 3).

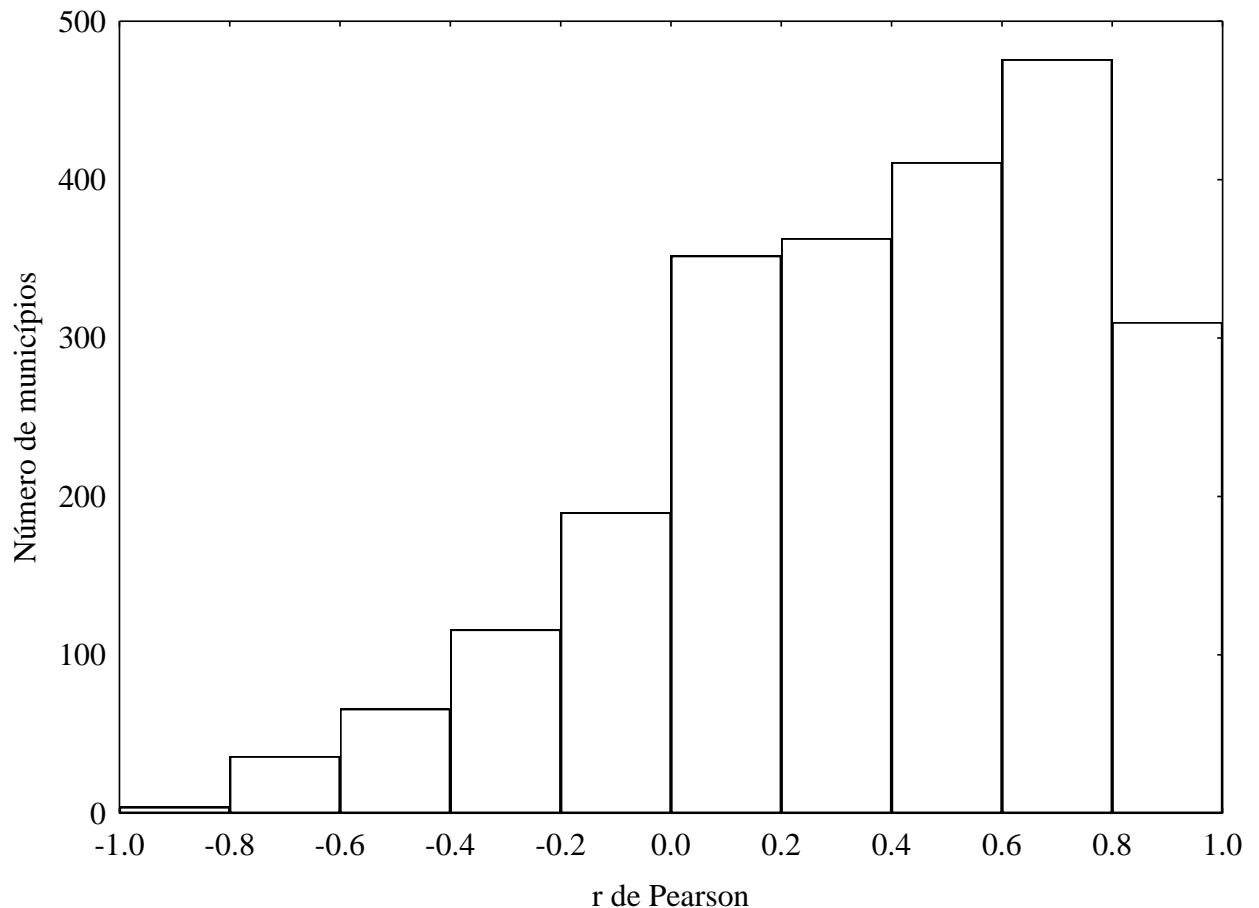


Figura 3. Frequência da correlação de Pearson entre a produtividade de soja e o ano (1994 – 2010), para cada município que a produz.

De maneira geral, os municípios apresentaram aumento nos seus valores de produtividade no tempo, sendo que em mais de 20% dos municípios foram observados valores de r (correlação de Pearson) positivos, variando entre 0,6 e 0,8. Para esta faixa, destacam-se os municípios da região Sul do Brasil, além dos pertencentes aos Estados de São Paulo e Goiás, respectivamente.

Dos 2.324 municípios produtores de soja, 329 (14% deste total) apresentaram valores de r superiores a 0,8, destacando-se os pertencentes aos Estados de Goiás e São Paulo, com 60 e 48 municípios, respectivamente. Enquanto que 402 municípios (i.e., 17% do total) apresentaram valores negativos de r , indicando perda temporal de produtividade. Os Estados

das regiões Norte e Nordeste foram os que mais perderam, proporcionalmente, em produtividade no período de 1994 a 2010.

Tal tendência pode ser justificada devido à trajetória de incorporação da cultura da soja no Brasil. Tal espécie agrícola encontrou excelentes condições para a sua rápida expansão, tanto de área como de produção. Diversos fatores contribuíram para a sua fixação e seu desenvolvimento. Inicialmente, nos Estados da região Sul do país, onde encontrou fácil adaptação das variedades e das técnicas de cultivo oriundas do sul dos Estados Unidos, sendo utilizada em sucessão ao trigo, possibilitando o aproveitamento da mesma área, das máquinas e equipamentos, dos armazéns e da mão de obra (EMBRAPA, 2004).

A participação de cooperativas nos processos de produção e comercialização e a geração de tecnologias adaptadas às diferentes condições do país possibilitaram ganhos em produtividade e expansão para novas regiões. A partir da década de 80 ocorreu um explosivo crescimento da produção na região tropical do Brasil, podendo ser explicado pelos incentivos fiscais disponibilizados para a abertura de novas áreas de produção agrícola, a aquisição de máquinas e construção de silos e armazéns; desenvolvimento de um bem sucedido pacote tecnológico para a produção de soja na região central do país; bom nível econômico e tecnológico dos produtores de soja desta região, oriundos, em sua maioria, da Região Sul, onde cultivavam soja com sucesso previamente à sua fixação na região tropical; e regime pluviométrico da região altamente favorável aos cultivos de verão (EMBRAPA, 2004).

Nas regiões Norte e Nordeste os locais de cultivo da soja situam-se em uma grande área geográfica, com significativas variações de temperatura e luminosidade. Essas variações afetam a produtividade das cultivares, segundo a época em que são semeadas, uma vez que o desenvolvimento da soja pode ser influenciado pelas estações de crescimento (i.e., clima), comprimento do dia (i.e., luminosidade), entre outros fatores. Determinadas épocas propiciam redução no porte das plantas e baixa inserção das vagens inferiores. Além dessa problemática, muitas vezes a ocorrência de veranicos ocasiona fracassos na produção (PEREIRA et al., 2011).

Distribuição geográfica potencial

No cenário atual (Figura 4A) os Estados que possuem melhor adequabilidade climática para o cultivo de soja são os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, com áreas atingindo valores de adequabilidade de 0,9. Os Estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul também apresentam áreas com adequabilidade climática favorável para o cultivo de soja, com valores em torno de 0,8. Em contrapartida, municípios

localizados ao norte do Brasil, nas regiões Norte e Nordeste, a cultura é pouco adequada climaticamente, com valores na faixa de 0,0 a 0,2.

A distribuição geográfica da soja prevista pelo modelo é semelhante com as áreas que apresentam condições climáticas (relativas a temperatura e precipitação) favoráveis ao seu cultivo, uma vez que a temperatura e a disponibilidade de água são fatores de grande importância na produção da soja, atuando diretamente em todas as suas fases. A cultura se adapta melhor a temperaturas entre 20° e 30°C. A menos de 10°C o crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo e acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuição da capacidade de retenção de vagens (EMBRAPA, 2009). A necessidade de água na cultura durante todo o ciclo, para obtenção do rendimento máximo, varia entre 450 a 800 mm (EMBRAPA, 2004).

Observa-se que, no cenário projetado para o ano de 2080 (Figura 4B), a adequabilidade climática tende a se deslocar para o extremo sul do país. Os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul apresentaram valores de adequabilidade climática próximos de 0,8. Enquanto que as regiões Norte e Nordeste tendem a aumentar o número de municípios que apresentam valores de aptidão climática igual a 0,0. De acordo com a dinâmica climática projetada, a tendência é de que ocorra uma migração da soja, que é uma espécie agrícola adaptada ao clima tropical, para áreas mais ao sul do país, para compensar o aumento de temperatura. Contudo, é possível que as áreas que terão ganhado em valores de aptidão climática não compensem, em valores de extensão territorial, as áreas que perderam tais condições.

Segundo Assad et al. (2004), os produtores tenderão a migrar para áreas onde ocorra melhor adequabilidade climática. A região Sul do Brasil, que é mais restrita às culturas adaptadas ao clima tropical por causa do alto risco de geadas, deve sofrer uma redução desse evento, ficando com mais áreas de baixo risco, o que poderá acarretar em aumento de produção. Contudo, tal evento pode provocar diminuição de áreas que atualmente são aptas ao plantio de culturas economicamente importantes para o agronegócio nacional. Sendo assim, a migração das espécies pode não compensar as perdas das áreas climaticamente favoráveis de demais regiões brasileiras, que sofrerão com o clima mais quente.

A mensuração da quantidade de municípios que ganharam ou perderam adequabilidade climática no cenário futuro (i.e., 2080) em relação ao cenário atual é possível a partir da verificação dos seus valores de Δ da adequabilidade climática (Figura 4C).

Foi previsto para a região central do Brasil perdas de adequabilidade climática de 0,5, enquanto as regiões que irão ganhar em adequabilidade (i.e., extremo sul da Bahia, algumas

áreas de Minas Gerais, Espírito Santo e a região Sul), terão um aumento no valor de, no máximo, 0,25.

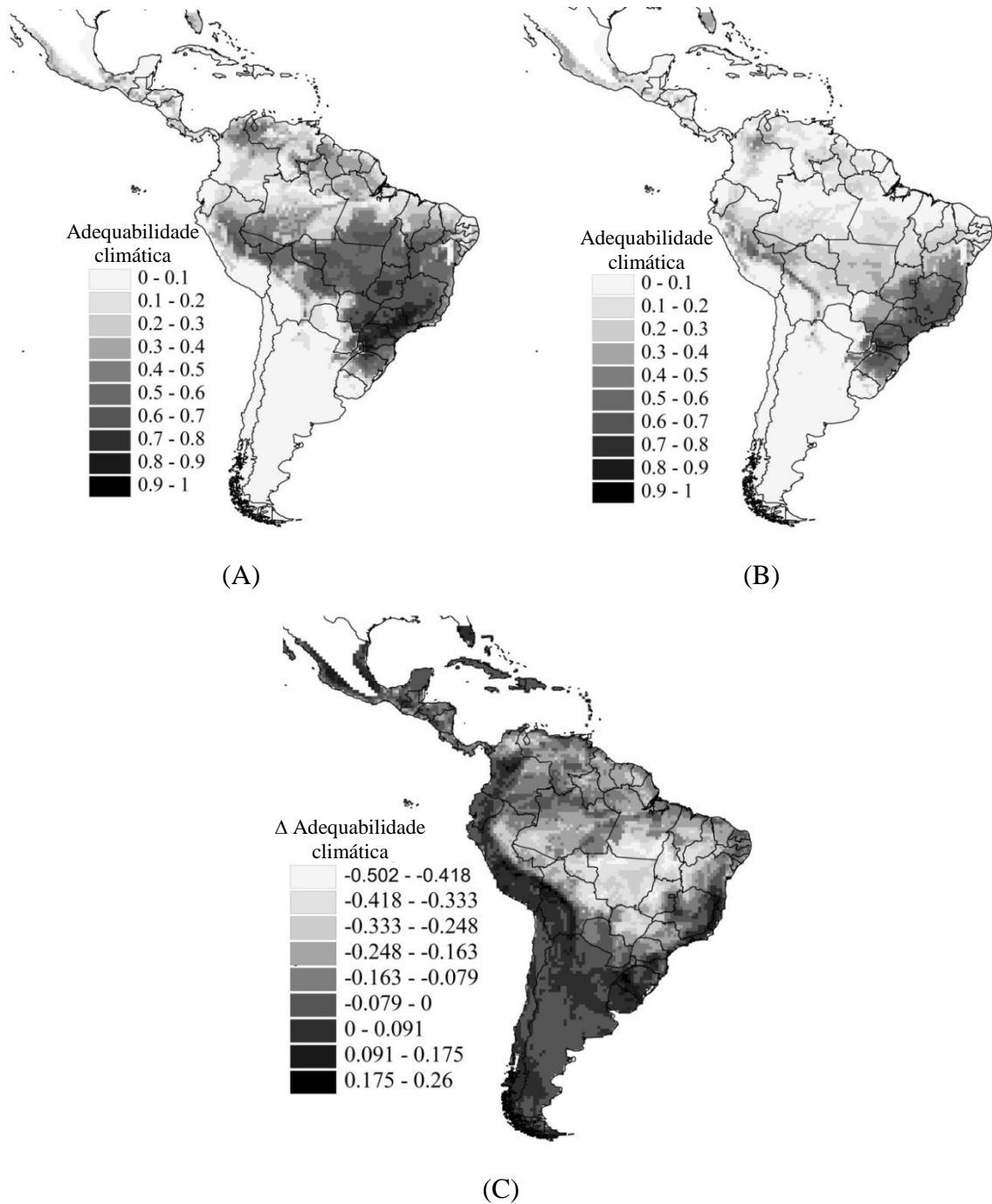


Figura 4. Adequabilidade climática média dos modelos de nicho da soja para o cenário atual (A), cenário futuro (B) e mudanças de adequabilidade climática do cenário futuro (i.e., 2080) em relação ao cenário atual (C).

Outro agravante é em relação ao número de municípios que irão ter perdas temporais em adequabilidade climática em comparação ao número de municípios que irão ganhar. Mais de 80% dos municípios poderão perder condições climáticas favoráveis para o cultivo de soja

no cenário futuro em relação ao cenário atual de mudanças climáticas (Figura 5). Com o decréscimo de áreas que possuem boas condições para o plantio da soja é possível que ocorra o decréscimo de sua produtividade, o que pode impactar o agronegócio nacional.

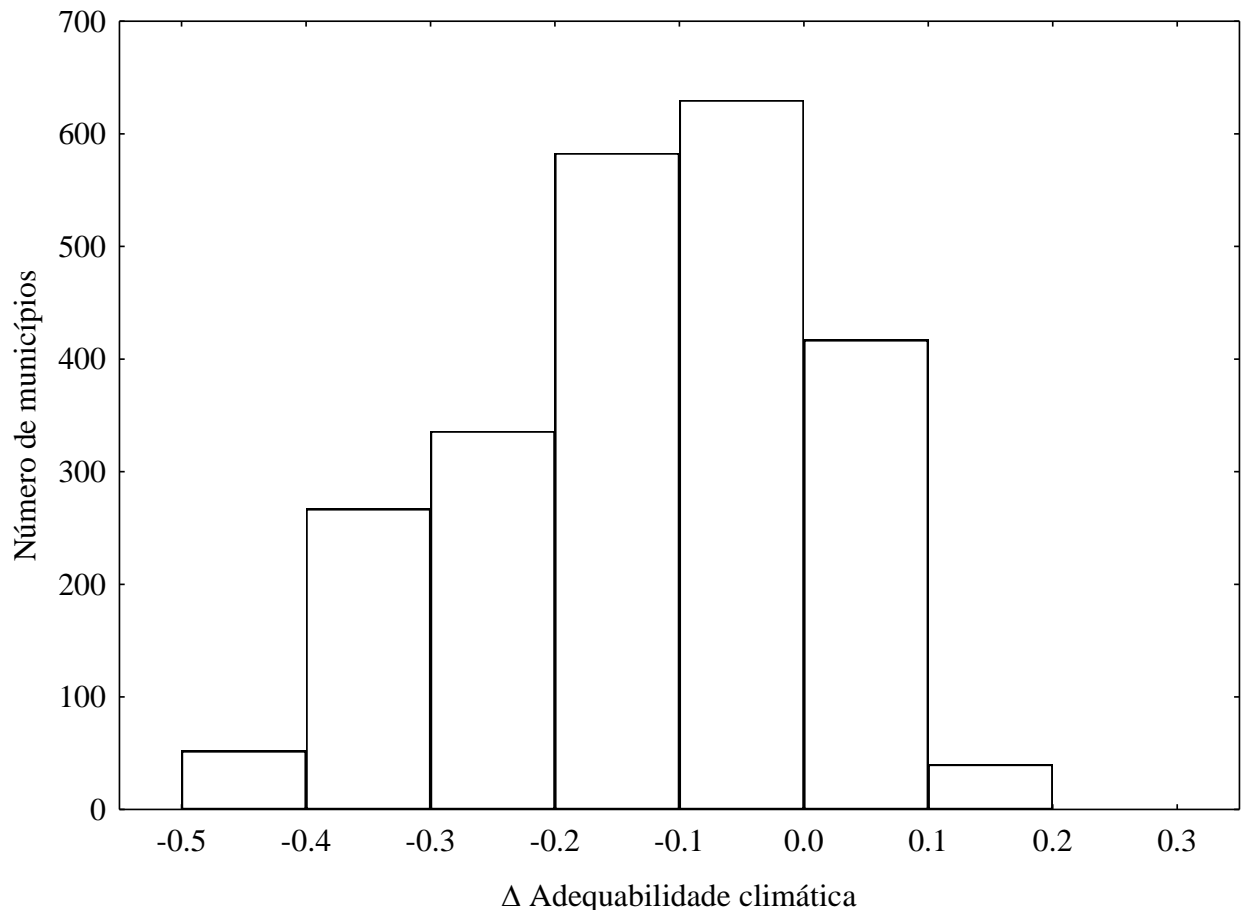


Figura 5. Frequência de distribuição dos valores de Δ da adequabilidade climática dos municípios produtores de soja.

Assad e Pinto (2008) investigaram o impacto das mudanças climáticas globais em nove espécies cultivadas do Brasil. Dentre as espécies estudadas tem-se a soja, no qual foi previsto que, até 2070, perderá cerca de 40% de suas áreas consideradas de “baixo risco” existentes hoje, sendo a região Sul e o Cerrado nordestino as áreas mais fortemente afetadas. No entanto, os autores utilizaram o modelo *Precis (Providing Regional Climates for Impact Studies)* como técnica de projeção, tornando a comparação entre os resultados dos trabalhos inapropriada.

Lane e Jarvis (2007) utilizaram o modelo mecanicista para projetar o impacto das mudanças climáticas sobre diversas culturas agrícolas e investigar quais áreas estarão

adequadas para o cultivo de tais culturas. Para a cultura da soja foi previsto, em geral, ganhos em áreas adequadas de 14% em escala global.

Nabout et al. (2012a) investigaram os impactos das mudanças climáticas sobre a produtividade média do milho (*Zea mays*) nos municípios brasileiros usando três diferentes técnicas de modelagem (i.e., modelos mecanicista, correlativo e híbrido). O modelo correlativo (Maxent), que se apresentou como melhor preditor entre os modelos desse estudo, indicou que haverá pouca redução na produtividade média do milho para o ano de 2050. Contudo, é importante ressaltar que os estudos citados acima não utilizaram um consenso de diferentes técnicas de modelagem e cenários climáticos.

Com a previsão de aumento de áreas vulneráveis, torna-se importante a adoção de estratégias para minimizar as perdas de produtividade antes que os impactos negativos sejam extremamente graves e onerosos para serem revertidos. Por exemplo, a semeadura tardia da espécie com o objetivo de evitar o estresse hídrico durante as fases iniciais de crescimento (SRIVASTAVA et al., 2010), a expansão de novas áreas agrícolas adequadas (RAMIREZ-VILLEGAS, 2013) e desenvolvimento de novas cultivares que tenham maior tolerância a estresses abióticos locais (e.g., secas e temperaturas extremas) (LANE E JARVIS, 2007).

Relação adequabilidade climática e produtividade

A relação entre a adequabilidade climática e a produtividade da soja é uma relação positiva, ou seja, os municípios com maior produtividade média estão em regiões de maior adequabilidade climática atual (Figura 6, $r = 0,319$; $P = <0,001$; graus de liberdade (gl) = 2.322; graus de liberdade de Dutilleul (glDutilleul) = 123).

Observou-se que o clima (i.e., adequabilidade climática) é responsável por 31,9% da produtividade média dos municípios, de acordo com a correlação de Spearman. Sendo que os municípios produtores de soja estão, em sua maioria (i.e., 76% do total de municípios produtores), concentrados em regiões que apresentam os maiores valores de aptidão climática (i.e., 0,6), enquanto que as regiões com menores valores de adequabilidade climática, apesar de apresentarem alguns municípios que possuem alta produtividade média, são pouco expressivos em quantidade de municípios produtores.

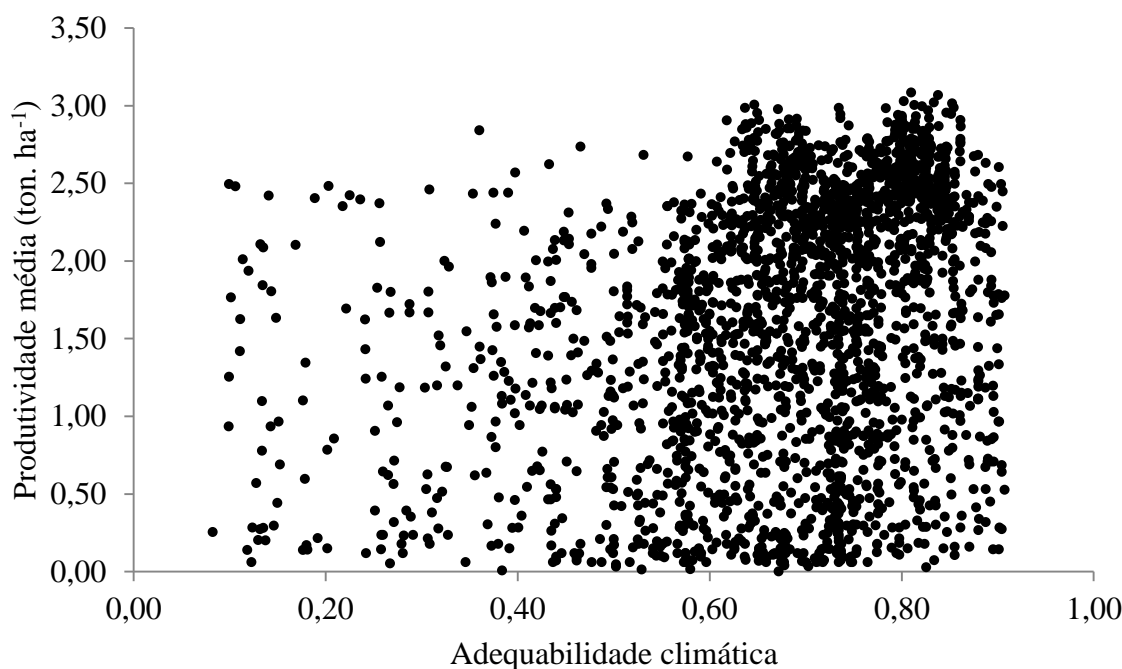


Figura 6. Relação entre a adequabilidade climática e a produtividade média da soja ($r = 0.319$; $P = <0,001$; com 2322 graus de liberdade e 123 graus de liberdade geograficamente efetivos) para todos os municípios brasileiros produtores.

Outros pesquisadores também têm investigado a relação entre a adequabilidade climática, obtida por meio dos modelos de nicho, e a produtividade média da espécie (NABOUT et al., 2012a), ou mesmo relacionando a adequabilidade com outras características, como a produção de frutos de plantas nativas (NABOUT et al., 2011) e densidade populacional (BECK e SIEBER, 2010). Em algumas das respostas dessas correlações foram encontrados envelopes de restrição (NABOUT et al., 2011; NABOUT et al., 2012a), ou seja, regiões com baixa adequação climática apresentam baixos valores da variável investigada (e.g., produtividade média) enquanto que as áreas com altos valores de adequabilidade climática podem apresentar valores altos ou baixos de tal variável. Assim, foi observado que os modelos de nicho têm sua capacidade de previsão reduzida, podendo não ser satisfatória, de tais características em regiões de alta adequabilidade climática.

A relação entre a TTP e a adequabilidade climática dos municípios não apresentaram correlação ($r = -0,056$; $P = 0,5$; $gl = 2.322$; $glDutilleul = 470$), ou seja, a variação da produtividade ao longo dos anos estudados, nos municípios produtores de soja, não foi influenciada pela adequabilidade climática.

Como comentado anteriormente, cerca de 24% dos municípios que apresentam baixos valores de produtividade média (0,01 e 0,50 ton. ha⁻¹) estão localizados nas regiões Norte e Nordeste do país, das quais não possuem condições climáticas ótimas para a produção de soja.

Além deste agravante, apenas no final da década de 90 as cultivares de soja, que eram desenvolvidas para essas regiões, começaram a ganhar expansão em sua recomendação de cultivo (ÁGUILA et al., 2005), o que contribui com o baixo rendimento de produção da espécie nessas áreas.

Os demais municípios que apresentam baixos valores de produtividade média (i.e., 276; 76% do total) estão localizados na região Centro-Sul do Brasil, que, segundo o modelo, apresentam boa aptidão climática para o cultivo da espécie agrícola. Desses municípios, 100 são de Minas Gerais e 76 de São Paulo, sendo os únicos Estados da região Sudeste produtores de soja. Estes Estados exploram outras espécies agrícolas que representam para a sua economia maior importância quando comparadas com a soja, destacando-se a cana-de-açúcar e o milho, o que justifica a baixa produtividade média da soja em algumas regiões. Sabe-se que outros fatores também contribuem para baixos valores de produtividade, como, por exemplo, a não utilização de sementes certificadas, adubação equilibrada e controle fitossanitário.

Incerteza metodológica

A ANOVA (Tabela 1) indica que os métodos (i.e., modelos de nicho) apresentaram maior incerteza nas previsões quando comparados com os cenários climáticos e sua interação, ou seja, as respostas de adequabilidade climática para o cenário futuro tiveram maior discrepância entre os métodos de modelagem do que entre os cenários climáticos. Verificou-se que, em média, cerca de 0,75 da variação é devido aos modelos de nicho, enquanto os efeitos de interação e cenário climático variaram 0,23 e 0,02, respectivamente.

Tabela 1. Valores da média da soma de quadrado (SS) e soma de quadrado mínimo e máximo da ANOVA realizada para cada célula do Brasil.

FONTE	SS MÉDIA	SS MÍNIMO - MÁXIMO
Método	0,7498	0,0998 – 0,9934
Cenário	0,0176	0,0000 – 0,1866
Interação	0,2326	0,0066 – 0,8826

A distribuição dessas incertezas diferiu geograficamente (Figura 7). A Figura 7A apresenta o mapa de incerteza do modelo de nicho e a Figura 7B a incerteza dos cenários climáticos para cada célula do Brasil.

O valor da produtividade média apresentou negativamente correlacionado com a incerteza dos métodos ($r = -0,287$; $P = 0,002$, $gl = 2.309$; $glDutilleul = 119$). Assim, as regiões que apresentam previsões com menores incertezas tendem a ocorrer nos municípios com maiores produtividades.

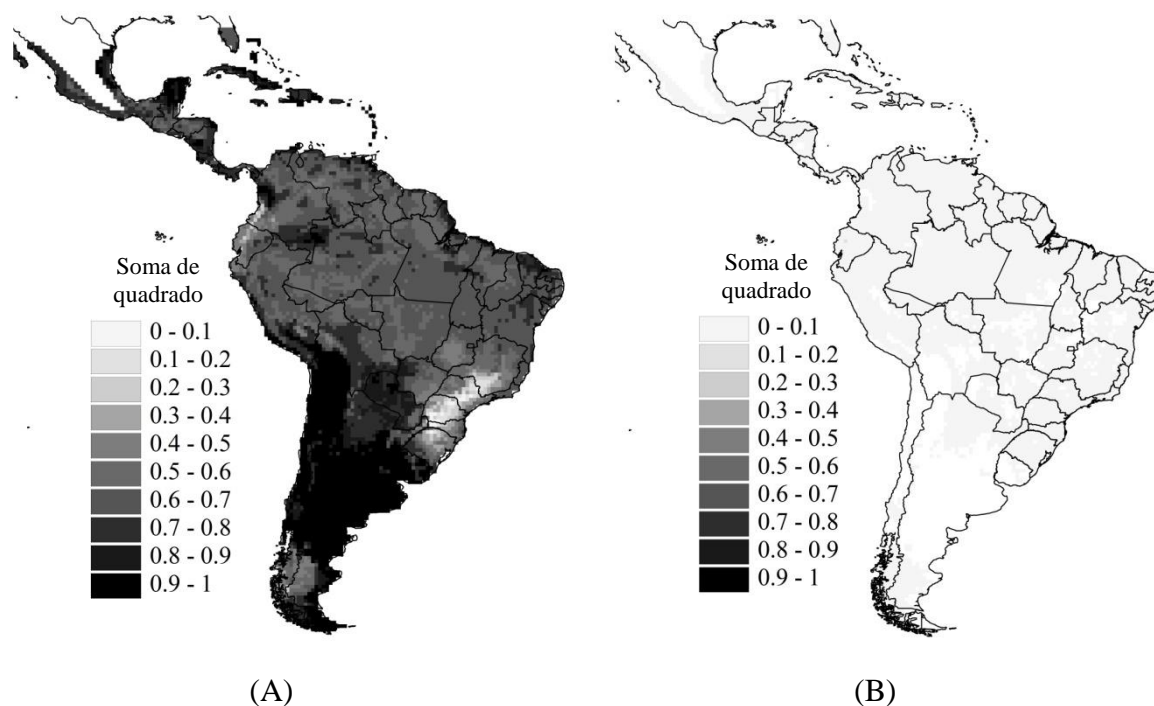


Figura 7. Mapas dos componentes de variância (soma de quadrado) para os métodos (A) e cenários climáticos (B) da modelagem da soja no Brasil.

A partir da Figura 7(A), é possível observar que os métodos diferiram entre si, em todo o território nacional, com amplitude de 0,0998 – 0,9934. Contudo, grande área do território nacional apresentou valores de incerteza em cerca de 0,6. A área que compreende o sul do Estado de Minas Gerais até o Paraná apresentou menores variações entre os modelos de nicho utilizados (0,10-0,35).

Os cenários climáticos apresentarem respostas de adequabilidade climática mais semelhantes quando comparados com os métodos, variando em média 0,025 (Figura 7B). Algumas áreas dos Estados do Paraná e Minas Gerais e, principalmente, do extremo norte do Brasil apresentaram variações próximas a 0,1.

Estudos anteriores (DINIZ-FILHO et al., 2009; TERRIBILE et al., 2012) obtiveram resultados semelhantes no que diz respeito aos componentes de variação das incertezas, em que os métodos se mostraram como maior fonte de incerteza quando comparados com as demais fontes de variação. E, ao se mapear essas fontes, foi possível observar que seus

valores são diferentes na extensão territorial estudada, ou seja, as incertezas não são necessariamente as mesmas em diferentes regiões.

Observou-se menor variação de incerteza dos métodos na região onde a produtividade da soja é maior, o que indica que nessa área pode-se optar em utilizar qualquer um dos modelos de nicho aqui empregados. Já para demais regiões, diferentes modelos de nicho podem produzir previsões diferentes de mudanças na distribuição geográfica de espécies sob as mudanças climáticas.

Este resultado mostra que a escolha dos modelos de distribuição de espécies contribui para a incerteza das previsões, quando comparado com os cenários climáticos. A discrepância nos resultados obtidos com o uso de diferentes modelos de distribuição geográfica de espécies leva a comparação de tais métodos, sendo objeto de estudo de alguns autores (e.g., OLIVEIRA et al., 2010; ELITH et al., 2010; NABOUT et al., 2012a) que têm como objetivo obter a melhor predição entre os modelos.

Ao fazer predições temporais ou espaciais, a incerteza é inevitável, e os erros de predição dependem tanto da qualidade dos dados quanto do algoritmo de modelagem utilizado. Especificamente, sobre os métodos de modelagem, a confiabilidade das previsões desses modelos tem sido questionada porque, muitas vezes, se baseiam em pressupostos sobre as mudanças climáticas que são insustentáveis. Como tentativa de minimização de erros e otimizar a precisão nas previsões, é comum a inclusão de variáveis preditoras (e.g., temperatura da água, oxigênio dissolvido, pH e sólidos totais suspensos; OLIVEIRA et al., 2010; condições do solo; BECK, 2013) na modelagem. E, apesar do uso de tais variáveis ser bem aceito, as previsões ainda não ficam isentos de incertezas, uma vez que são (as variáveis) consideradas constantes no tempo. No caso da variável preditora pH do solo, os resultados recentes sugerem que os solos em áreas agrícolas não são estáveis e que tal condição poderá não ser alcançada brevemente (QUINTON et al. 2010).

Diniz-Filho et al. (2009) acreditam que a tendência dos estudos que versam sobre as incertezas na modelagem é de conseguirem identificar os modelos de nicho e, até mesmo, os cenários climáticos responsáveis pela maior fonte de variação e descartá-los, o que reduziria as incertezas em torno das previsões.

CONCLUSÕES

As maiores produtividades médias da espécie agrícola estão concentradas na região Centro-Sul do país, coincidindo com os altos valores de adequabilidade climática obtidos através dos modelos de nicho.

Baseado nas perspectivas de mudanças climáticas projetadas, é provável que ocorra uma migração da soja para áreas mais ao sul do país, para compensar o aumento de temperatura. Contudo, a migração da espécie pode não compensar as perdas das áreas climaticamente favoráveis de demais regiões brasileiras, em especial a região Centro-Oeste, que sofrerão com o aumento das temperaturas.

A adequabilidade climática é positivamente correlacionada com a produtividade média dos municípios, sendo que tal aptidão climática corresponde a cerca de 32% dos valores de produtividade alcançados.

Os modelos de nicho são os maiores responsáveis pelas incertezas nas previsões, sendo que, ao se mapear as fontes de incerteza, foi observado que as técnicas de modelagem apresentam respostas semelhantes apenas na região que coincide com os maiores valores de produtividade média de soja.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUILA, R.M.; LAMBERT, E.S.; ALMEIDA, L.A.; KIIH, R.A.S.; EL-HUSNY, J.C.; GIANLUPPI, V.; MEYER, M.C.; SMIDERLE, O.J. **Cultivares de soja para as regiões Norte e Nordeste do Brasil**. Circular Técnica, 40. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2005. 6p.

ALLOUCHE, O.; TSOAR, A.; KADMON, R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). **Journal of Applied Ecology**, v.43, p.1223–1232, 2006.

ALSOS, I.G.; EHRICH, D.; THUILLER, W.; EIDSEEN, P.B.; TRIBSCH, A. Genetic consequences of climate change for northern plants. **Proceedings of the Royal Society B**, Londres, v.279, n.1735, p.2042-2051, 2012.

ARANTES, N.E.; ZITO, R.K.; ZANETTI, A.L.; FRONZA, V.; SÁ, M.E.L. **Cultivares de soja: Minas Gerais e Região Central do Brasil – Safra 2010/2011**. Londrina: Embrapa Soja, 1.ed. 2010. 48p.

ARAÚJO, M.B.; NEW, M. Ensemble forecasting of species distributions. **Trends in Ecology & Evolution**, v.22, n.1, p.42–47, 2007.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Brasília: Embaixada Britânica. 2008. 83p.

BECK, J. Predicting climate change effects on agriculture from ecological niche modeling: who profits, who loses? **Climatic Change**, v.116, n.2, p.177-189, 2013.

BECK, J.; SIEBER, A. Is the spatial distribution of mankind's most basic economic traits determined by climate and soil alone? **PLoS ONE**, v.5, n.5: e10416. 2010.

BIANCO, S.; CARVALHO, L.B.; BIANCO, M.S.; PITELLI, R.A. Acúmulo de massa seca e de macronutrientes por plantas de *Glycine max* e *Solanum americanum*. **Planta daninha**, Viçosa, v.30, n.1, p.87-95, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportação**. Brasília: MAPA, 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/exportacao>>. Acesso em: 30 abr. 12.

COLLEVATTI, R.G.; TERRIBILE, L.C.; LIMA-RIBEIRO, M.S.; NABOUT, J.C.; OLIVEIRA, G.; RANGEL, T.F.; RABELO, S.G.; DINIZ-FILHO, J.A.F. A coupled phylogeographical and species distribution modelling approach recovers the demographical history of a Neotropical seasonally dry forest tree species. **Molecular Ecology**, v.21, p.5845–5863, 2012.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**, quinto levantamento, fevereiro 2013 / Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_02_08_17_24_51_boletim_fevreiro_2013.pdf>. Acesso em: 12 fev. 13.

DINIZ-FILHO, J.A.F.; BINI, L.M.; RANGEL, T.F.; LOYOLA, R.D.; HOF, C.; NOGUÉS-BRAVO, D.; ARAÚJO, M.B. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. **Ecography**, v.32, p.897-906, 2009.

DINIZ-FILHO, J.A.F.; FERRO, V.G.; SANTOS, T.; NABOUT, J.C.; DOBROVOLSKI, R.; MARCO JR, P. The three phases of the ensemble forecasting of niche models: geographic range and shifts in climatically suitable areas of *Utetheisa oratrix* (Lepidoptera, Arctiidae). **Revista Brasileira de Entomologia**, v.54, n.3, p.339–349, 2010a.

DINIZ-FILHO, J.A.F.; NABOUT, J.C.; BINI, L.M.; LOYOLA, R.D.; RANGEL, T.F.; NOGUÉS-BRAVO, D.; ARAÚJO, M.B. Ensemble forecasting shifts in climatically suitable areas for *Tropidacris cristata* (Orthoptera: Acridoidea: Romaleidae). **Insect Conservation and Diversity**, v.3, p.213–221, 2010b.

DUTILLEUL, P. Modifying the t-test for assessing the correlation between two spatial processes. **Biometrics**, v.49, n.1, p.305-314, 1993.

ELITH, J.; LEATHWICK, J.R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. **Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics**, v.40, 677–697, 2009.

ELITH, J.; KEARNEY, M.; PHILLIPS, S. The art of modelling range-shifting species. **Methods in Ecology and Evolution**, v.1, p.330–342, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. A soja no Brasil. In:____. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil - 2004**. Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 1. 2004. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em: 18 mai. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Exigências climáticas. In:____. **Cultivo de soja no cerrado de Roraima**. Embrapa Roraima. Sistemas de Produção, 1. Versão Eletrônica, 1. ed. 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/CultivodeSojanoCerradodeRoraima/clima.htm>>. Acesso em: 24 mai. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Programa Soja Livre**. Cultivares de Soja Convencionais: Mato Grosso – Safra 2010/2011. Londrina: Embrapa Soja, 2010a. 31p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de soja: Regiões Sul e Central do Brasil – 2010/2011**. Londrina: Embrapa Soja, 2010b. 62p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de soja 2011/2012: Região Centro-Sul do país**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivares de soja**: Rio Grande do Sul. Passo Fundo: Embrapa Trigo. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/soja/cultivares/index.htm>>. Acesso em: 9 jul. 2013.

FRANKLIN, J. **Mapping species distributions**: spatial inference and predictions. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 329p.

GASTÓN, A.; GARCÍA-VIÑAS, J.I. Modelling species distributions with penalised logistic regressions: A comparison with maximum entropy models. **Ecological Modelling**, v.222, n.23-24, p.2037-2041, 2011.

GLEICK, P.H. Climate change and the integrity of science. **Science**, Nova York, v.328, n.5979, p.689-690, 2010.

HANSPACH, J.; KÜHN, I.; POMPE, S.; KLOTZ, S. Predictive performance of plant species distribution models depends on species traits. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v.12, n.3, p.219-225, 2010.

HANBERRY, B.B.; HE, H.S.; DEY, D.C. Sample sizes and model comparison metrics for species distribution models. **Ecological Modelling**, v.227, p.29–33, 2012.

HIJMANS, R.J.; GRAHAM, C.H. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. **Global Change Biology**, v.12, n.12, p.2272-2281, 2006.

HOF, A.R.; JANSSON, R.; NILSSON, C. The usefulness of elevation as a predictor variable in species distribution modeling. **Ecological Modelling**, v.246, p.86–90, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sala de imprensa**: Contas nacionais trimestrais - Indicadores de volume e valores correntes. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=2037&id_pagina=1>. Acesso em: 4 mai. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, v.26, n.1, p.1-83, 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201301.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2013.

JARVIS, A.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; CAMPO, B.V.H.; NAVARRO-RACINES, C. Is cassava the answer to African climate change adaptation? **Tropical Plant Biology**, Nova York, v.5, n.1, p.9-29, 2012.

JIMÉNES-ALFARO, B.; DRAPER, D.; NOGUÉS-BRAVO, D. Modeling the potential area of occupancy at fine resolution may reduce uncertainty in species range estimates. **Biological Conservation**, v.147, n.1, p.190-196, 2012.

JOHNSON, C.J.; GILLINGHAM, M.P.; Sensitivity of species-distribution models to error, bias, and model design: An application to resource selection functions for woodland caribou. **Ecological Modelling**, v.213, n.2, p.143-155, 2008.

LANE, A; JARVIS, A. Changes in climate will modify the geography of crop suitability: agricultural biodiversity can help with adaptation. **Journal of the Semi-Arid Tropics**, v.4, n.1, p.1-12, 2007.

LIMA-RIBEIRO, M.S.; DINIZ-FILHO, J.A.F. Modelando a distribuição geográfica das espécies no passado: uma abordagem promissora em paleoecologia. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v.15, n.3, p.371-385, 2012.

LUDWIG, M.P.; DUTRA, L.M.C.; LUCCA FILHO, O.A.; ZABOT, L.; JAUER, A.; UHRY, D. Populações de plantas na cultura da soja em cultivares convencionais e *Roundup Ready*TM. **Revista Ceres**, Viçosa, v.58, n.3, p.305-313, 2011.

MELO, C.L.P.; TEIXEIRA, M.R.O. **Cultivares de Soja para o Mato Grosso do Sul: Safra 2010/2011**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2010. 44p.

MOREIRA, J.U.V.; PIPOLO, A.E. **Cultivares de soja: Bahia – Safra 2011/2012**. Londrina: Embrapa Soja, 1.ed., 2011. 11p.

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

NABOUT, J.C.; OLIVEIRA, G.; MAGALHÃES, M.R.; TERRIBILE, L.C.; ALMEIDA, F.A.S. Global climate change and the production of “pequi” fruits (*Caryocar brasiliense*) in the Brazilian Cerrado. **Natureza e Conservação**, São Carlos, v.9, n.1, p.55-60, 2011.

NABOUT, J.C.; CAETANO, J.M.; FERREIRA, R.B.; TEIXEIRA, I.R.; ALVES, S.M.F. Using correlative, mechanistic and hybrid niche models to predict the productivity and impact of global climate change on maize crop in Brazil. **Natureza e Conservação**, v.10, n.2, p.177-183, 2012a.

NABOUT, J.C.; CARVALHO, P.; PRADO, M.U.; BORGES, P.P.; MACHADO, K.B.; HADDAD, K.B.; MICHELAN, T.S.; CUNHA, H.F.; SOARES, T.N. Trends and biases in global climate change literature. **Natureza e Conservação**, São Carlos, v.10, n.1, p.45-51, 2012b.

OLIVEIRA, M.D.; HAMILTON, S.K.; CALHEIROS, D.F.; JACOBI, C.M.; LATINI, R.O. Modeling the potential distribution of the invasive golden mussel *Limnoperna fortunei* in the Upper Paraguay River system using limnological variables. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v.70, n.3, p.831-840, 2010.

OLIVEIRA, G.; MIGUEL BASTOS ARAÚJO, M.B.; RANGEL, T.F.; ALAGADOR, D.; DINIZ-FILHO, J.A.F. Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change. **Biodiversity and Conservation**, v.21, p.2913–2926, 2012.

PEREIRA, H.M.; LEADLEY, P.W.; PROENÇA, V.; ALKEMADE, R.; SCHARLEMANN, J.P.W.; FERNANDEZ-MANJARRÉS, J.F.; ARAÚJO, M.B.; BALVANERA, P.; BIGGS, R.;

CHEUNG, W.W.L.; CHINI, L.; COOPER, H.D.; GILMAN, E.L.; GUÉNETTE, S.; HURTT, G.C.; HUNTINGTON, H.P.; MACE, G.M.; OBERDORFF, T.; REVENGA, C.; RODRIGUES, P.; SCHOLLES, R.J.; SUMAILA, U.R.; WALPOLE, M. Scenarios for Global Biodiversity in the 21st Century. **Science**, Nova York, v.330, n.6010, p.1496-1501, 2010.

PEREIRA, M.J.Z.; KLEPKER, D.; MOREIRA, J.U.V. **Cultivares de soja: Regiões Norte e Nordeste do Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 1.ed., 2011. 48p.

PETERSON, A.T.; SOBERÓN, J.; PEARSON, R.G.; ANDERSON, R.P.; MARTÍNEZ-MEYER, E.; MAKAMURA, M.; ARAÚJO, M.B. **Ecological niches and geographic distributions**. Princeton: Princeton University Press, 2011.

QUINTON, J.N.; GOVERS, G.; VAN OOST, K.; BARDGETT, R.D. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. **Nature Geoscience**, v.3, p.311-314, 2010.

RAMIREZ-VILLEGAS, J.; CHALLINOR, A. Assessing relevant climate data for agricultural applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.161, p.26-45, 2012.

RAMIREZ-VILLEGAS, J.; JARVIS, A.; LÄDERACH, P. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.170, p.67-78, 2013.

RANGEL, T.F.L.V.B.; DINIZ-FILHO, J.A.F.; BINI, L.M. Towards an integrated computational tool for spatial analysis in macroecology and biogeography. **Global Ecology and Biogeography**, v.15, p.321-327, 2006.

SANTANA, F.S.; SIQUEIRA, M.F.; SARAIVA, A.M.; CORREA, P.L.P. A reference business process for ecological niche modelling. **Ecological Informatics**, v.3, n.1, p.75-86, 2008.

SANTIKA, T.; HUTCHINSON, M.F. The effect of species response form on species distribution model prediction and inference. **Ecological Modelling**, v.220, n.19, p.2365-2379, 2009.

SEQUEIRA, A.; MELLIN, C.; ROWAT, D.; MEEKAN, M.G.; BRADSHAW, C.J.A. Ocean-scale prediction of whale shark distribution. **Diversity and Distributions**, v.18, n.5, p.504-518, 2012.

SEGURADO, P.; ARAÚJO, M.B. An evaluation of methods for modelling species distributions. **Journal of Biogeography**, v.31, p.1555-1568, 2004.

SIQUEIRA, M.F.; PETERSON, A.T. Consequences of global climate change for geographic distributions of Cerrado tree species. **Biota Neotropica**, Campinas, v.3, n.2, p.1-14, 2003.

SONG, W.; KIM, E.; LEE, D. LEE, M.; JEON, S.W. The sensitivity of species distribution modeling to scale differences. **Ecological Modelling**, v.248, p.113-118, 2013.

SRIVASTAVA, A., NARESH KUMAR, S., AGGARWAL, P.K. Assessment on vulnerability of sorghum to climate change in India. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.138, n.3-4, p.160–169, 2010.

TERRIBILE, L.C.; LIMA-RIBEIRO, M.S.; ARAÚJO, M.B.; BIZÃO, N.; COLLEVATTI, R.G.; DOBROVOLSKI, R.; FRANCO, A.A.; GUILHAUMON, F.; LIMA, J.S.; MURAKAMI, D.M.; NABOUT, J.C.; OLIVEIRA, G.; OLIVEIRA, L.K.; RABELO, S.G.; RANGEL, T.F.; SIMON, L.M.; SOARES, T.N.; TELLES, M.P.C.; DINIZ-FILHO, J.A.F. Areas of climate stability of species ranges in the Brazilian Cerrado: disentangling uncertainties through time. **Natureza e Conservação**, v.10, n.2, p.152-159, 2012.

THUILLER, W.; LAFOURCADE, B.; ENGLER, R.; ARAÚJO, M.B. BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions. **Ecography**, v.32, n.3, p.369-373, 2009.

VÁCLAVÍK, T.; MEENTEMEYER, R.K. Invasive species distribution modeling (iSDM): Are absence data and dispersal constraints needed to predict actual distributions? **Ecological Modelling**, v.220, n.23, p.3248-3258, 2009.

VÁCLAVÍK, T.; KANASKIE, A.; HANSEN, E.M.; OHMANN, J.L.; MEENTEMEYER, R.K. Predicting potential and actual distribution of sudden oak death in Oregon: Prioritizing landscape contexts for early detection and eradication of disease outbreaks. **Forest Ecology and Management**, v.260, n.6, p.1026-1035, 2010.

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