



Impacto de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *Ilex paraguariensis*

Impact of climate change on the potential geographical distribution of Ilex paraguariensis

Mariéle Alves Ferrer da Silva¹, Pedro Higuchi^{1,2} & Ana Carolina da Silva¹

Resumo

Foi modelado o nicho climático e avaliamos o impacto de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *Ilex paraguariensis*. Esta espécie apresenta elevada importância sociocultural, econômica e ecológica na porção sul da Floresta Atlântica. As áreas de ocorrência foram definidas por meio das coordenadas geográficas das localidades onde a espécie foi registrada. Foram consideradas oito variáveis climáticas obtidas a partir da base de dados do WorldClim. A modelagem do nicho climático da espécie foi realizada por meio de dez algoritmos. A predição da área de adequabilidade climática, contemporânea e futura (2070) da espécie, foi realizada a partir do consenso dos ajustes com boa performance (TSS > 0,40). Para predições futuras, foram considerados cenários de mudanças climáticas otimista (RCP4.5) e pessimista (RCP8.5), com base no quinto relatório do IPCC. Verificou-se que a espécie ocorre, predominantemente, no domínio Atlântico. Enquanto que no cenário otimista, *I. paraguariensis* apresentou redução de 65,8% de sua área de adequabilidade climática, no cenário mais pessimista, a redução foi de 82,1%, sendo as perdas concentradas nas áreas periféricas das projeções de ocorrência.

Palavras-chave: clima presente e futuro, erva-mate, modelagem de nicho ecológico, ocorrência geográfica.

Abstract

We modelled the climatic niche and evaluated the impact of climate changes on the potential geographic distribution of *Ilex paraguariensis*. This species has high social-cultural, economic and ecological importance in the southern portion of the Atlantic Forest. The occurrence areas were defined by the geographical coordinates of the localities where the species was recorded. Eight climatic variables were obtained from the WorldClim database. The species climatic niche modelling was performed using ten algorithms. The predictions of contemporary and future (2070) areas of climatic suitability were carried out from the consensus of TSS > 0.40 fits. For future predictions, an optimist (RCP4.5) and pessimist (RCP8.5) scenarios were considered, based on the fifth IPCC report. We observed that the species occurs predominantly in the Atlantic Domain. While in the optimistic scenario *I. paraguariensis* presented a reduction of 65.8% of its area of climatic suitability, in the most pessimistic scenario the reduction reached 82.1%, being the range losses concentrated in peripheral areas of occurrence projections.

Key words: present and future climate, mate herb, ecological niche modelling, geographic occurrence.

Introdução

Entender a distribuição geográfica de espécies florestais é importante para subsidiar estratégias de conservação e de uso sustentável das mesmas, assim como para auxiliar na previsão dos impactos que poderão ser causados à vegetação natural devido às

mudanças climáticas futuras (Higuchi *et al.* 2013). Isto ocorre porque todas as espécies apresentam exigências climáticas específicas, definindo, assim, os seus respectivos nichos ecológicos, que muitas vezes são filogeneticamente conservados (Manen *et al.* 2010; Morales *et al.* 2014).

Veja material suplementar em <<https://figshare.com/s/246b6d526e35c3454f95>>

¹ Universidade do Estado de Santa Catarina, Depto. Engenharia Florestal, Av. Luiz de Camões 2090, 88520-000, Lages, SC.

² Autor para correspondência: higuchip@gmail.com

Destaca-se que, ao longo da história evolutiva do planeta, uma das respostas das espécies frente aos vários eventos de mudanças do clima, como os que ocorreram durante o Quaternário (Davis & Shaw 2001), foi a alteração das suas distribuições geográficas. Normalmente, as espécies deixam de existir nos locais que passam a ter um clima inóspito, e passam a ocupar as áreas com clima favorável. Um padrão de resposta amplamente observado é o de mudanças da distribuição geográfica ao longo de gradientes latitudinais e altitudinais, de forma que esta dinâmica de clima x vegetação tem moldado paisagens naturais e definido a composição de espécies de diferentes regiões (Behling 2002). Porém, deve ser enfatizado que a influência das mudanças climáticas sobre as espécies é resultado de um processo complexo, não apenas relacionado à eficiência de dispersão ou migração, mas também das diferentes respostas a nível de organismos (genética, fisiológica e fenológica), de populações (dinâmica) e de comunidades (relações inter-específicas) (Bellard *et al.* 2012), de forma que a adaptação a novas condições ambientais não pode ser descartada.

No último século, as atividades de origem antrópica têm alterado profundamente o funcionamento dos ecossistemas em escala global (Crutzen 2006). Dentre as consequências mais evidentes do impacto das atividades antrópicas, estão as mudanças climáticas, que têm ocorrido em elevada velocidade no contexto da história evolutiva da Terra (Davis & Shaw 2001), e que, associadas às alterações do uso do solo, tornam as respostas das espécies uma incógnita. Neste sentido, com o propósito de fomentar pesquisas que procuram avaliar o impacto das atividades humanas sobre a biosfera, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu quinto relatório de avaliação (AR5), apresentou diferentes cenários de mudanças climáticas chamados de Percursos de Concentração Representativos (RCPs) (Symon 2013). Enquanto que nos cenários otimistas espera-se grandes mudanças em termos de matriz energética e tecnológica, de forma a reduzir a emissão de gases de efeito estufa, no cenário mais pessimista assume-se que nenhuma política climática será adotada e ocorrerá o aumento populacional no planeta.

Diante deste contexto, a modelagem do nicho ecológico de espécies tem-se destacado como uma das principais ferramentas para a investigação da relação entre as espécies e o clima, permitindo análises que possam contribuir para a proteção e a

conservação da biodiversidade, para a escolha das espécies visando a restauração de ecossistemas (Gastón *et al.* 2014; López-Tirado & Hidalgo 2016) e no entendimento dos padrões de distribuição geográfica em uma análise regional (Siqueira & Durigan 2007; Rodrigues *et al.* 2015).

Como objeto de estudo, algumas espécies arbóreas, por apresentarem elevada importância econômica, social e ecológica, são de particular interesse para serem investigadas por meio desta abordagem, uma vez que as consequências de eventuais mudanças climáticas podem causar grande impacto sócio-econômico e ambiental. Dentre estas, destaca-se a erva-mate (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.), que na porção sul da Floresta Atlântica tem grande significado sócio-cultural, uma vez que a bebida produzida a partir de suas folhas, consumida na forma de chimarrão, é muito apreciada pela população, sendo considerada parte da identidade cultural da região. Do ponto de vista econômico, *I. paraguariensis* é um dos principais produtos não madeiros em áreas de Floresta Ombrófila Mista (Balzon *et al.* 2004), tendo sido amplamente explorado e utilizado pela indústria para a produção de diversos produtos, como bebidas, alimentos, cosméticos e produtos de higiene e de limpeza (Dallabrida *et al.* 2016). Em relação à sua importância ecológica, destaca-se o fato de *I. paraguariensis*, que é uma espécie dióica, polinizada por insetos das ordens Himenoptera, Coleoptera, Hemiptera e Diptera (Pires *et al.* 2014), ser uma das mais frequentes em áreas de Floresta Ombrófila Mista no Sul do Brasil (Jarenkow & Budke 2009) e desempenhar importante papel como fonte de alimento para a avifauna (Colussi & Prestes 2011).

Considerando o que foi até aqui exposto, o presente trabalho procurou investigar o nicho climático e o impacto de diferentes cenários de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *I. paraguariensis*. Assumiu-se que esta espécie não apresenta limite de dispersão, uma vez que este tipo de abordagem pode produzir bons resultados (Engler *et al.* 2009), além dos frutos da mesma serem amplamente procurados pela avifauna, o que sugere uma boa dispersão. Com isso, espera-se gerar informações que possam ser relevantes para a conservação desta espécie em diferentes cenários de mudanças climáticas, a partir de inferências sobre as áreas que permanecerão com o clima propício ao desenvolvimento da mesma, consideradas refúgios climáticos, e as áreas que passarão a ter um clima inóspito.

Material e Métodos

Os locais de ocorrência de *Ilex paraguariensis* foram obtidos a partir de coordenadas geográficas, que foram extraídas de trabalhos publicados na literatura científica (Suplemento Digital <<https://figshare.com/s/246b6d526e35c3454f95>>) e de pontos de georreferenciamento de ocorrência da espécie do banco de dados SpeciesLink (<<http://splink.cria.org.br/>>), do Centro de Referência em Informação Ambiental (CRIA 2014). Ressalta-se que os dados utilizados são de domínio público, disponíveis de forma livre. Os dados de distribuição da espécie passaram por uma checagem rigorosa, para verificar a existência de dados duplicados e incoerências relacionadas à distribuição geográfica, provocadas, por exemplo, por erros de digitação de coordenadas, como proposto por Hijmans & Elith (2015).

Como variáveis explicativas para a modelagem do nicho climático, foram consideradas 19 variáveis climáticas, que foram obtidas do banco de dados do WorldClim (<<http://www.worldclim.org/>>) (Hijmans *et al.* 2005), na resolução de 2,5 minutos (Suplemento Digital <<https://figshare.com/s/246b6d526e35c3454f95>>). Para fins de remoção de problemas relacionados à multicolinearidade das variáveis explicativas climáticas (Graham 2003), foram determinados os Fatores de Inflação da Variância (VIF) para as mesmas, sendo removidas aquelas altamente autocorrelacionadas entre si (VIF > 10) (Dormann *et al.* 2013). O valor de VIF é dado por $1/(1-r_i^2)$, sendo que r_i^2 representa o coeficiente de determinação da variável preditora, em relação às demais variáveis (Dormann *et al.* 2013).

Conforme sugerido por Varela *et al.* (2014), foi realizada uma filtragem ambiental dos pontos de ocorrência geográfica de *Ilex paraguariensis*. Segundo os mesmos autores, a filtragem ambiental é mais eficiente do que a filtragem espacial para aumentar a performance de modelos. Para isso, as variáveis climáticas explicativas sem multicolinearidade (VIF < 10) para cada local de ocorrência geográfica de *I. paraguariensis* foram ordenadas por meio de uma Análise de Componentes Principais (PCA). Em seguida, os *scores* nos dois primeiros eixos da ordenação, que explicam a maior parte da inércia total dos dados, foram extraídos para serem utilizados na filtragem ambiental. Este procedimento foi realizado por meio da função R *envSample* (Varela *et al.* 2014). Os dados ambientalmente filtrados passaram por uma conferência quanto à existência de ocorrências de espécimes cultivados, considerando o possível

impacto da presença das mesmas na modelagem. Esta verificação se deu por meio da identificação de qualquer tipo de observação nos dados primários que fizesse referência que os espécimes fossem plantados ou cultivados.

Para a predição do impacto de mudanças climáticas no ano de 2070, com base no quinto relatório do IPCC, foram considerados os cenários: RCP4.5, por ser o cenário mais realista entre os três cenários mais otimistas, e o RCP8.5, por ser o mais pessimista. No cenário otimista (RCP4.5), assume-se a adoção, a nível global, de políticas de mitigação de emissão de gases causadores do efeito estufa. No cenário pessimista (RCP8.5), considera-se que a humanidade não adotará estratégias para a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa e que estas continuarão crescentes. Para as projeções destes cenários, utilizou-se o modelo de circulação atmosférica HADGEM2-ES, do MET OFFICE do Reino Unido, que faz parte do Coupled Model Intercorporation Project Phase 5 (CMIP5). Os dados climáticos das projeções futuras foram obtidos do WorldClim (Hijmans *et al.* 2005).

Considerando que o resultado preditivo da modelagem pode ser influenciado pela natureza do algoritmo utilizado (Thuiller 2004), representando uma fonte de incerteza, optou-se por usar uma abordagem pluralista. Assim, foram testados diferentes algoritmos, com o propósito de buscar um consenso daqueles com maior qualidade preditiva (Thuiller 2004). Para isto, o nicho climático da espécie foi modelado por meio dos dez principais algoritmos utilizados na atualidade, sendo eles Modelo Linear Generalizado (GLM) (Guisan *et al.* 2002; Dobson & Barnett 2008), Modelo de Impulsão Generalizado (GBM) (Freund & Schapire 1997), Modelo Aditivo Generalizado (GAM) (Hastie & Tibshirani 1990), Árvore de Classificação (CTA) (Breiman *et al.* 1984), Rede Neural Artificial (ANN) (Venables & Ripley 2002), BIOCLIM (BC) (Busby 1991; Araujo & Peterson 2012), Análise Discriminante Flexível (FDA) (Hastie *et al.* 1994), Regressão Adaptativa Multivariada por Splines (MARS) (Friedman & Silverman 1989), Floresta Aleatória (RF) (Breiman 2003) e Máxima Entropia (Maxent) (Phillips *et al.* 2006). Para os modelos que requerem dados referentes a ausências, foram geradas 100 pseudo-ausências para cada observação da espécie (Lobo & Tognelli 2011), que foram distribuídas, três vezes, de forma aleatória em um *buffer* com raio de 500 km (VanDerWal *et al.* 2009), no entorno de cada observação. Os dados foram subdivididos em dois

grupos: uma parte composta por 70% dos dados para a calibração (treino) dos ajustes e os 30% restantes para a avaliação (teste) dos ajustes, conforme sugerido por Thuiller (2003). Para cada um dos dez algoritmos e das distribuições de pseudo-ausências, foram realizadas duas réplicas de calibração e teste, totalizando 60 ajustes (10 algoritmos \times três distribuições de pseudo-ausências \times duas réplicas de calibração e teste).

A performance dos modelos foi avaliada por meio da estatística TSS, que varia de -1 a 1 (Allouche *et al.* 2006), sendo que o valor 1 representa um ajuste perfeito. Foram construídas curvas de respostas entre a estimativa de adequabilidade climática para a espécie (0–100) e as variáveis mais explicativas, de acordo com o modelo e o ajuste de melhor performance. Assim, com o propósito de reduzir as incertezas preditivas inerentes a cada modelo, foi determinada, a partir de um consenso dos ajustes com uma boa acurácia (TSS > 0,40) (Landis & Koch 1977), a estimativa de adequabilidade climática para a ocorrência de *I. paraguariensis*, tanto para o presente, quanto para o futuro (2070). O consenso foi construído por meio da média das estimativas de adequabilidade climática dos diferentes ajustes utilizados (TSS > 0,40). A projeção, contemporânea e futura, foi realizada para parte da América do Sul, com destaque para a porção sul e sudeste da Floresta Atlântica, que representa a maior parte da área de ocorrência natural da espécie. Além disso, foi quantificada a incerteza das projeções por meio da espacialização do coeficiente de variação. Para as projeções consensuais para o presente e o futuro, foram construídos mapas binários considerando áreas adequadas para a ocorrência da espécie aquelas cuja estimativa de adequabilidade tenha sido maior do que 50%. Em seguida, foram determinadas a proporção de pixels (área de adequabilidade climática) perdidos, ganhos e estáveis para a espécie estudada, por meio da função BIOMOD_RangeSize, do pacote Biomod2 (Thuiller *et al.* 2014), da linguagem de programação estatística R (R Core Team 2016). Todas as demais análises também foram realizadas no R, junto com os pacotes USDM (Naimi 2015), dismo (Hijmans *et al.* 2015), raster (Hijmans 2015) e biomod2 (Thuiller *et al.* 2014).

Resultados

A partir dos dados de ocorrência geográfica de *Ilex paraguariensis*, foi possível verificar que a espécie apresenta uma distribuição ampla no Brasil, podendo ser encontrado do Rio Grande do Sul até a Bahia, ocorrendo, inclusive, no

Brasil Central (Fig. 1a). Após a remoção de colinearidade entre as variáveis explicativas da área de adequabilidade climática da espécie, foram selecionadas oito variáveis climáticas,

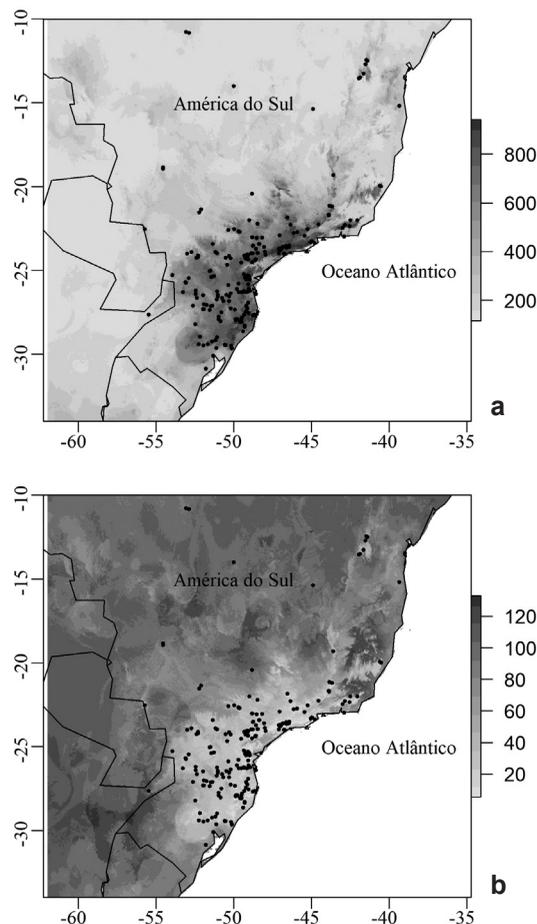


Figura 1 – a. Localização das ocorrências de *Ilex paraguariensis*, projeção da estimativa de adequabilidade climática. b. Projeção do coeficiente de variação da estimativa de adequabilidade climática, em função do consenso dos modelos com TSS > 0,40. [Tons de cinza, de mais escuro para mais claro, representam o gradiente de maior a menor adequabilidade climática para a espécie (a) e de maiores a menores valores do coeficiente de variação para as estimativas de adequabilidade climática para a espécie (b)].

Figure 1 – a. Occurrence location of *Ilex paraguariensis* and projection of the estimated climate suitability. b. Projection of the coefficient of variation of the estimated climate suitability (b), according to the consensus of the models with TSS > 0.40. [Gray shades, from darker to lighter, represent the gradient from high to low climatic suitability for the species (a) and the gradient from high to low values of coefficient of variation for species climatic suitability estimation (b)].

Tabela 1 – Variáveis bioclimáticas utilizadas como preditoras da distribuição geográfica de *Ilex paraguariensis*, após remoção de colinearidade. VIF = Fator de Inflação da Variância.

Table 1 – Variables used as predictors of the geographical distribution of *Ilex paraguariensis*, after removal of collinearity. VIF = Variance Inflation Factor.

Sigla	Variável	VIF
bio2	Média da amplitude térmica diária	1,528030
bio3	Isotermalidade	6,002698
bio8	Temperatura média do trimestre mais úmido	6,725791
bio9	Temperatura média do trimestre mais seco	5,828980
bio10	Temperatura média no trimestre mais quente	8,110192
bio12	Precipitação anual	1,720836
bio18	Precipitação do trimestre mais quente	1,543085
bio19	Precipitação do trimestre mais frio	2,898199

sendo cinco relacionadas à temperatura (média da amplitude térmica diária, isotermalidade, temperatura média no trimestre mais úmido, temperatura média no trimestre mais seco e temperatura média no trimestre mais quente) e três relacionadas à precipitação pluviométrica (precipitação anual, precipitação no trimestre mais quente e precipitação no trimestre mais frio) (Tab. 1). Do total de pontos de ocorrências obtidos (306), após procedimentos de conferências e de filtragem ambiental, sobraram 111, que foram utilizados para as modelagens do nicho climático.

Dos 60 ajustes gerados para os dez algoritmos utilizados nas modelagens, 52 apresentaram uma boa performance (TSS > 0,40). Apenas o algoritmo BIOCLIM produziu ajustes (quatro) com baixa performance (TSS < 0,40) (Tab. 2).

As variáveis mais explicativas em relação à área de adequabilidade climática de *I. paraguariensis* para o modelo melhor ajustado (GBM, com TSS = 0,76) foram, respectivamente, temperatura no trimestre mais quente e precipitação no trimestre mais frio. Ao se analisar as curvas de estimativa de adequabilidade climática em função

Tabela 2 – Quantidade de modelos (NM) ajustados para a distribuição geográfica de *Ilex paraguariensis*, em função de variáveis climáticas, com boa performance (TSS > 0,40). Valores de TSS representam as médias dos ajustes com boa performance, com seus respectivos desvios-padrão (entre parênteses).

Table 2 – Number of models (NM) with good performance (TSS > 0.40) fitted in function of climatic variables for the geographic distribution of *Ilex paraguariensis*. TSS values represent the averages of the good performance fits, with their respective standard deviations (in parentheses).

Algoritmos	NM	TSS
Modelo Linear Generalizado (GLM)	6	0,69 (0,04)
Modelo de Impulsão Generalizado (GBM)	6	0,70 (0,05)
Modelo Aditivo Generalizado (GAM)	6	0,60 (0,07)
Árvore de Classificação (CTA)	6	0,66 (0,06)
Rede Neural Artificial (ANN)	6	0,57 (0,05)
BIOCLIM (BC)	2	0,42 (0,01)
Análise Discriminante Flexível (FDA)	6	0,62 (0,06)
Regressão Adaptativa Multivariada por Splines (MARS)	6	0,66 (0,06)
Floresta Aleatória (RF)	6	0,62 (0,06)
Máxima Entropia (MaxEnt)	6	0,69 (0,04)

das variáveis mais explicativas, observa-se que *I. paraguariensis* apresentou distribuição geográfica associada a áreas cujo verão tenha temperaturas mais amenas ($< 24^{\circ}\text{C}$) e inverno chuvoso (> 100 mm) (Fig. 2).

A distribuição predita demonstrou que *I. paraguariensis* tem sua ocorrência geográfica

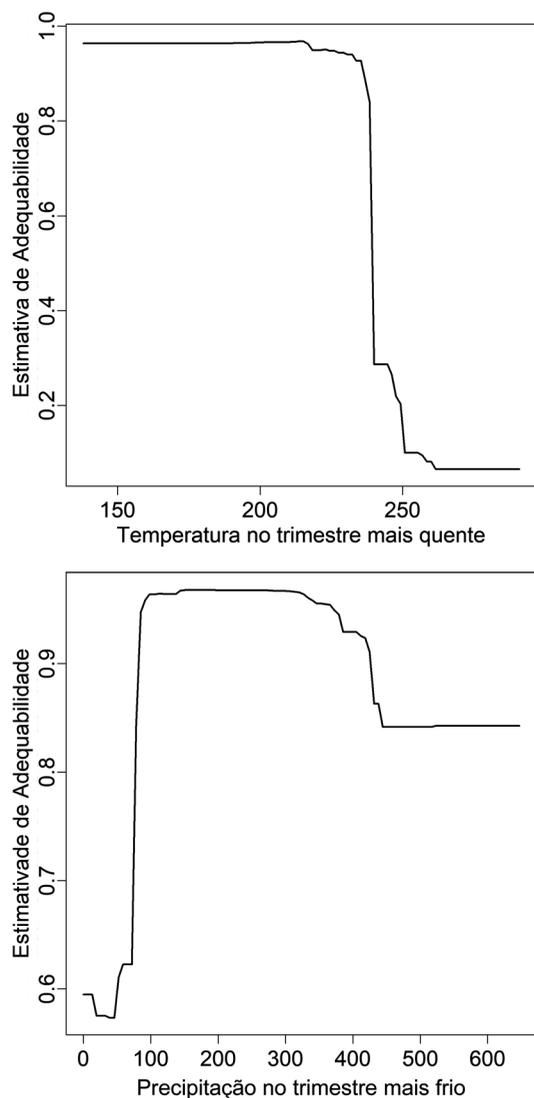


Figura 2 – Estimativa de adequabilidade climática para *Ilex paraguariensis*, ao longo dos gradientes climáticos de maior contribuição (temperatura no trimestre mais quente, em $^{\circ}\text{C} \times 10$, e precipitação no trimestre mais frio, em mm), de acordo com o modelo melhor ajustado (GBM, com $\text{TSS} = 0,76$).

Figure 2 – Climatic suitability estimative for *Ilex paraguariensis* along climatic gradients of greater contribution (mean temperature of warmest quarter, in $^{\circ}\text{C} \times 10$, and precipitation of coldest quarter, in mm), according to the best fitted model (GBM with $\text{TSS} = 0.76$).

potencial que se sobrepõe, em grande parte, a porção sul e sudeste da Floresta Atlântica (Fig. 1a). Foi possível observar que a espécie apresenta uma elevada estimativa de adequabilidade climática nas áreas de maior elevação da região, representadas pelo Planalto Meridional, Serra Geral e Serra do Mar. Quanto à espacialização do coeficiente de variação para a predição consensual da adequabilidade climática (Fig. 1b), observa-se, de forma geral, valores baixos (cores mais claras), especialmente para a região sul e sudeste do Brasil, indicando elevada concordância dos ajustes utilizados para a construção do consenso.

Foi possível verificar uma mudança na distribuição geográfica potencial da espécie diante dos diferentes cenários de mudanças climáticas, em repostas ao seu nicho climático (Fig. 3). As perdas das áreas com adequabilidade ocorreram, predominantemente, de forma periférica, concentradas nos locais de menor altitude. As áreas de elevada altitude das regiões Sul e Sudeste do Brasil permaneceram com adequabilidade climática, caracterizando-se como áreas estáveis. Já as áreas que passaram a apresentar inadequabilidade climática foram praticamente inexistentes para ambos os cenários ($\text{RCP4.5} = 0,7\%$; $\text{RCP8.5} = 0,0\%$). Desta forma, observa-se uma redução estimada de 65,8% e 82,1% da área de distribuição potencial diante, respectivamente, do cenário otimista (RCP4.5) e pessimista (RCP8.5) de mudanças climáticas.

Discussão

Os resultados demonstraram que a espécie ocorre em domínio predominantemente Atlântico, com uma distribuição ampla em sua porção sul e sudeste. De fato, estudos têm demonstrado uma distribuição ampla para *Ilex paraguariensis*, que foi classificado como uma espécie comum para a Floresta Atlântica Úmida, entre o Espírito Santo e Rio Grande do Sul, por Caiafa & Martins (2010). Desta forma, a projeção contemporânea das estimativas de adequabilidade climática, a partir da modelagem realizada para a espécie, está coerente com os padrões descritos na literatura.

Variáveis climáticas que indicam sazonalidade e fatores ambientais extremos ou limitantes, como a temperatura no trimestre mais quente e a precipitação no trimestre mais frio, demonstraram ser importantes elementos ecológicos na determinação da área de ocorrência de *I. paraguariensis*. De forma geral, os resultados sugerem que a espécie tem um caráter não tropical

e é intolerante à seca no inverno, o que pode explicar sua preferência de ocorrência no Sul e Sudeste do Brasil.

Destaca-se que o ancestral mais antigo de todas as espécies de *Ilex* existiu no Hemisfério

Norte (América do Norte ou Leste Asiático), durante o Mioceno, onde, a partir de vários eventos de dispersão, o gênero se dispersou para outras partes do mundo (Manen *et al.* 2010). Na América do Sul, *Ilex* passou por um processo

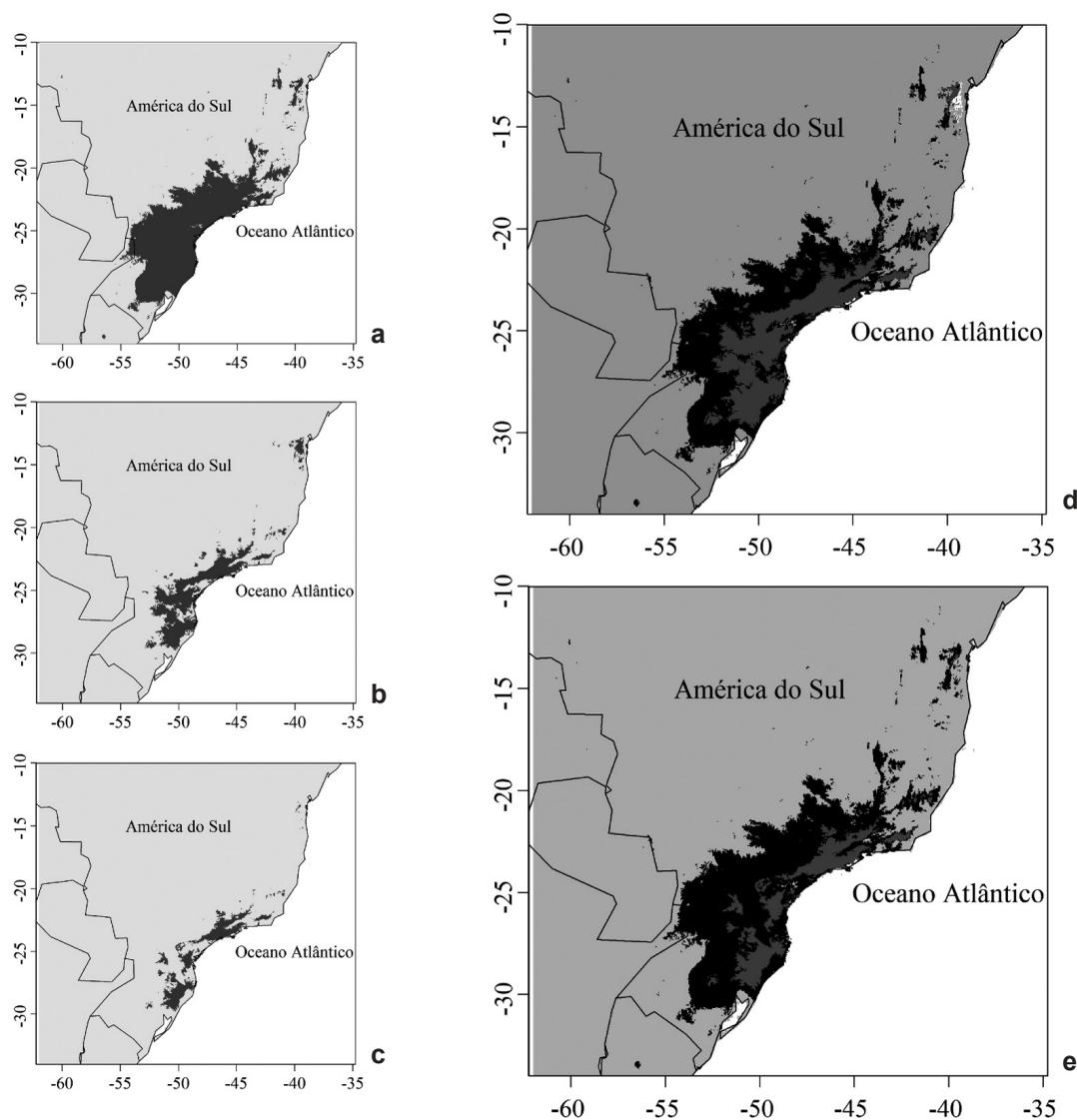


Figura 3 – Áreas com clima favorável (cinza escuro) à ocorrência de *Ilex paraguariensis* para o presente (a) e para o futuro (2070), de acordo com os cenários RCP4.5 (b) e RCP8.5 (c) do IPCC, com indicação dos padrões de mudanças, conforme cenários otimista (d) e pessimista (e). Cinza escuro (d, e): áreas estáveis, que apresentam o clima favorável no presente e continuarão apresentando a adequabilidade climática no futuro; cinza claro (d, e): áreas estáveis, que não apresentam o clima favorável e continuarão não apresentando no futuro; preto (d, e): áreas instáveis, que deixarão de apresentar condições favoráveis para a ocorrência da espécie; branco (d): áreas instáveis, que passarão a apresentar condições climáticas favoráveis. **Figure 3** – Areas with suitable climate (dark gray) for *Ilex paraguariensis* occurrence in the present (a) and in the future (2070), according to IPCC RCP4.5 (b) and RCP8.5 scenarios (c), indicating the change patterns, according to optimistic (d) and pessimistic (e) scenarios. Dark gray (d, e): stable areas which have suitable climate and will continue presenting climatic suitability in the future, light gray (d, e): stable areas, which do not have suitable climate and will not present in the future; Black (d, e): unstable areas, which will no longer provide favorable conditions for the occurrence of the species; White (d): unstable areas, which will provide favorable climatic conditions.

de grande diversificação, de forma que a região é considerada, junto com o Leste Asiático, a área de maior diversidade do gênero (Cuénoud *et al.* 2000). *I. paraguariensis* apresenta maior proximidade filogenética com espécies de ocorrência no sudeste norte-americano (*Ilex vomitoria* Sol. ex Aiton), nas montanhas da América Central (*Ilex toluicana* Hemsley) e nos Andes colombiano (*Ilex laurina* Kunth), que com espécies do leste da América do Sul (e.g., *Ilex microdontha* Reissek, *Ilex theezans* Mart. ex Reissek e *Ilex brevicuspis* Reissek) (Cuénoud *et al.* 2000). Este padrão sugere que as espécies do gênero apresentam elevada capacidade de dispersão e baixo isolamento reprodutivo (Manen *et al.* 2010).

Além de fatores ecológicos, não se pode ignorar a capacidade da influência humana sobre o padrão de distribuição geográfica das espécies arbóreas. Neste contexto, Reis *et al.* (2014) e Bitencourt & Krauspenhar (2006) argumentam que a Floresta Ombrófila Mista, na qual *I. paraguariensis* é uma das espécies mais frequentes, representa uma formação florestal que tem sido influenciada por práticas antrópicas há milênios, de forma que a sua área de ocorrência natural pode ser considerada como uma paisagem cultural. No caso de *I. paraguariensis*, este é um aspecto que potencialmente apresenta grande importância, uma vez que o seu uso como estimulante, medicinal e xamânico foi uma prática comum entre os povos pré-colombianos (Klanovicz *et al.* 2008; Contini *et al.* 2012), o que pode estar relacionado com a sua distribuição mais ampla.

Quanto ao impacto dos diferentes cenários de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *I. paraguariensis*, o presente estudo demonstrou uma tendência de alterações ao longo de gradientes altitudinais, de forma que locais de menor altitude deixarão de ter condições mais favoráveis à sua ocorrência. Estudos têm demonstrado que este processo ocorre atualmente de forma muito rápida, em função de mudanças climáticas recentes (Hickling *et al.* 2006; Kelly & Goulden 2008; Lenoir *et al.* 2008; Chen *et al.* 2011). Estas circunstâncias, associadas a outros fatores de natureza antrópica, como a alteração do uso solo, são inéditas no planeta (Davis & Shaw 2001), o que aumenta a incerteza quanto às predições futuras de ocorrência geográfica de espécies.

Apesar de Lenoir *et al.* (2008) terem verificado na Europa que o impacto das mudanças

climáticas em espécies vegetais atinge tanto as áreas marginais quanto as áreas centrais de ocorrência, no presente estudo foi observada a concentração de perdas apenas nas áreas marginais, de forma que os padrões de respostas podem ser dependentes de aspectos relacionados à geografia da região avaliada (e.g., relevo, continentalidade, latitude). Como na região de estudo a espécie avaliada já ocupa pisos altitudinais elevados, observou-se que as áreas com adequabilidade climática ficarão restritas aos locais de maior altitude. Estes resultados sugerem o potencial de áreas de maior altitude em funcionarem como refúgios climáticos para diversas espécies.

O presente estudo reforça a ideia de que a elaboração de planos para a proteção da biodiversidade frente às mudanças do clima deve se tornar prioritária em países megadiversos, como o Brasil. Em se tratando de *Ilex paraguariensis*, uma espécie da Mata Atlântica de grande importância sociocultural, econômica e ecológica, fica evidente a necessidade de adoção de estratégias que tenham com propósito a mitigação dos possíveis impactos de mudanças climáticas. Com base no trabalho de Hoegh-Guldberg *et al.* (2008), destacam-se as seguintes possibilidades: i) a manutenção, a expansão e a criação de novas Unidades de Conservação em áreas estratégicas, que permanecerão com boa adequabilidade climática, como aquelas situadas nos locais de maior altitude; ii) melhorar a conectividade da paisagem, para facilitar o fluxo da espécie para áreas que funcionarão como refúgios climáticos; iii) a utilização de técnicas de melhoramento genético, para a seleção de variedades mais tolerantes às condições climáticas futuras; iv) o resgate de populações de áreas que passarão a ter clima inadequado, para a conservação ex-situ; e v) a dispersão assistida, por meio de transferência de propágulos para áreas que permanecerão com adequabilidade climática.

Conclui-se que *I. paraguariensis* apresenta uma distribuição geográfica associada, principalmente, ao Domínio Atlântico, e com um caráter subtropical e temperado úmido. As áreas de maior altitude da região Sul e Sudeste do Brasil podem ser consideradas como estratégicas para a conservação e manejo sustentável da espécie, uma vez que apresentaram os maiores valores de estimativa de adequabilidade climática para *I. paraguariensis* e podem funcionar como refúgios climáticos em um cenário de aquecimento global. Ressalta-se, ainda, que, predominantemente em

regiões periféricas de sua ocorrência, é predita elevada perda das áreas com adequabilidade climática, de forma que estas são prioritárias para os resgate de populações, para a criação de bancos de germoplasma, com intuito de preservação da variabilidade genética da espécie. Nos cenários otimista e pessimista de mudanças climáticas, estima-se uma redução, respectivamente, de 65,8 a 82,1% da área de sua ocorrência geográfica potencial.

Material suplementar

O suplemento digital disponível em <<https://figshare.com/s/246b6d526e35c3454f95>> contém uma listagem de trabalhos utilizados para a extração das coordenadas geográficas de *Ilex paraguariensis*.

Agradecimentos

À FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina), a concessão de bolsa de Mestrado em Engenharia Florestal à primeira autora do trabalho. Ao CNPq, a concessão de bolsa de Produtividade para o segundo e o terceiro autores e apoio financeiro por meio do Edital CTI/CNPQ/Universal 14/2014.

Referências

- Allouche O, Tsoar A & Kadmon R (2006) Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43: 1223-1232.
- Araujo MB & Peterson AT (2012) Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* 93: 1527-1539.
- Balzon DR, Silva JCGL & Santos AJ (2004) Aspectos mercadológicos de produtos florestais não madeiros - análise retrospectiva. *Revista Floresta* 34: 363-371.
- Behling H (2002) South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 177: 19-27.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W & Courchamp F (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters* 15: 365-377.
- Bitencourt ALV & Krauspenhar PM (2006) Possible prehistoric anthropogenic effect on *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Kuntze expansion during the late holocene. *Revista Brasileira de Paleontologia* 9: 109-116.
- Breiman L (2003) Manual on settings up, using and understanding random forest. Vol. 4. University of California Berkeley, Statistics Department, Berkeley. 33p.
- Breiman L, Friedman JH, Olshen RA & Stone CJ (1984) Classification and regression trees. Wadsworth and Brooks/Cole, Monterey. 358p.
- Busby JR (1991) BIOCLIM - a bioclimatic analysis and prediction system. *In: Margules CR & Austin MP (eds.) Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*. CSIRO, Canberra. Pp. 64-68.
- Caiafa AN & Martins FR (2010) Forms of rarity of tree species in the southern Brazilian Atlantic rainforest. *Biodiversity and Conservation* 19: 2597-2618.
- Chen IC, Hill JK, Ohlemüller R, Roy DB & Thomas CD (2011) Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333: 1024-1026.
- Colussi J & Prestes NP (2011) Frugivoria realizada por aves em *Myrciaria trunciflora* (Mart.) O. Berg. (Myrtaceae), *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) e *Ilex paraguariensis* St. Hil. no norte do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ornitologia* 19: 48-550.
- Contini AZ, Castilho MA & Costa RB (2012) A erva-mate e os Kaiowá e Guarani: da abordagem etnobotânica à promoção do desenvolvimento local. *Interações* 13: 161-168.
- CRIA (2014) SpeciesLink. Disponível em <<http://splink.cria.org.br/>>. Acesso em 9 junho 2014.
- Crutzen PJ (2006) The "Anthropocene". *In: Ehlers E & Krafft T (eds.) Earth System Science in the Anthropocene*, New York. Pp. 13-18.
- Cuénoud P, Martinez MADP, Loizeay PA, Spichiger R, Andrews S & Manen JF (2000) Molecular phylogeny and biogeography of the genus *Ilex* L. (Aquifoliaceae). *Annals of Botany* 85: 111-122.
- Dallabrida VR, Dumke CI, Molz S, Furini V & Giacomelli MBO (2016) Com erva-mate não se faz só chimarrão! Situação atual e perspectiva de inovação no setor ervateiro do planalto norte catarinense. *Revista Eletronica do Programa de Mestrado em Desenvolvimento Regional da Universidade do Contestado* 6: 247-273.
- Davis MB & Shaw RG (2001) Range shifts and adaptive responses to quaternary climate change. *Science* 292: 673-679.
- Dobson AJ & Barnett A (2008) An introduction to generalized linear models. 3rd ed. Chapman and Hall, London. 320p.
- Dormann CF, Elith J, Bache S, Buchmann C, Carl G, Carré G, Marquéz JRG, Gruber B, Lafourcade B, Leitão PJ, Münkemüller T, McClean C, Osborne PE, Reineking B, Schröder B, Skidmore AK, Zurell D & Lautenbach S (2013) Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36: 27-46.
- Engler R, Randin CF, Vittoz P, Czaka T, Beniston M, Zimmermann NE & Guisan A (2009) Predicting

- future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter? *Ecography* 32: 34-45.
- Freund Y & Schapire RE (1997) A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of Computer and System Sciences* 55: 119-139.
- Friedman JH & Silverman BW (1989) Flexible parsimonious smoothing and additive modeling. *Technometrics* 31: 3-21.
- Gastón A, García-Viñas JI, Bravo-Fernández AJ, López-Leiva C, Ollier JA, Roig S & Serrada R (2014) Species distribution models applied to plant species selection in forest restoration: are model predictions comparable to expert opinion? *New forests* 45: 641-653.
- Graham MH (2003) Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology* 84: 2809-2815.
- Guisan A, Edwards Jr TC & Hastie T (2002) Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling* 157: 89-100.
- Hastie T & Tibshirani R (1990) *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall, London. 352p.
- Hastie T, Tibshirani R & Buja A (1994) Flexible discriminant analysis by optimal scoring. *Journal of the American statistical association* 89: 1255-1270.
- Hickling R, Roy DB, Hill JK, Fox R & Thomas CD (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology* 12: 450-455.
- Higuchi P, Silva AC, Budke JC, Mantovani A, Bortoluzzi RLC & Ziger AA (2013) Influência do clima e de rotas migratórias de espécies arbóreas sobre o padrão fitogeográfico de florestas na região sul do Brasil. *Ciência Florestal* 23: 539-553.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG & Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hijmans RJ (2015) raster: geographic data analysis and modeling. R package version 2.3-40. Disponível em <<https://cran.r-project.org/package=raster>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Hijmans RJ & Elith J (2015) Species distribution modeling with R. Disponível em <<https://cran.r-project.org/web/packages/dismo/vignettes/sdm.pdf>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Hijmans RJ, Phillips S, Leathwick J & Elith J (2015) dismo: species distribution modeling. R package version 1.0-12. Disponível em <<https://cran.r-project.org/package=dismo>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Hoegh-Guldberg O, Hughes L, McIntyre S, Lindenmayer DB, Parmesan C, Possingham HP & Thomas CD (2008) Assisted colonization and rapid climate change. *Science* 321: 345-346.
- Jarenkow JA & Budke JC (2009) Padrões florísticos e análise estrutural de remanescentes florestais com *Araucaria angustifolia* no Brasil. In: Fonseca CSD, Souza AF, Zanchet AML, Dutra T, Backes A & Ganade GMS (eds.) *Floresta com Araucária: ecologia, conservação e desenvolvimento sustentável*. Holos, Ribeirão Preto. Pp. 113-126.
- Kelly AE & Goulden ML (2008) Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Pnas* 105: 11.823-11.826.
- Klanovicz J, Fert Neto J & Mafra AL (2008) Southern Brazilian indigenous populations and the forest: towards an environmental history. *Ekonomika i Ekohistorija* 4: 94-103.
- Landis JR & Koch GG (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159-174. DOI: <<http://dx.doi.org/10.2307/2529310>>.
- Lenoir J, Gégout JC, Marquet PA, de Ruffray P & Brisse H (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320: 1768-1771.
- Lobo JM & Tognelli MF (2011) Exploring the effects of quantity and location of pseudo-absences and sampling biases on the performance of distribution models with limited point occurrence data. *Journal for Nature Conservation* 19: 1-7.
- López-Tirado J & Hidalgo PJ (2016) Ecological niche modelling of three Mediterranean pine species in the south of Spain: a tool for afforestation/reforestation programs in the twenty-first century. *New forests* 47: 411-42.
- Manen JF, Barriera G, Loizeau PA & Naciri Y (2010) The history of extant *Ilex* species (Aquifoliaceae): evidence of hybridization within a Miocene radiation. *Molecular phylogenetics and evolution* 57: 961-977.
- Morales M, Wulff AF, Fortunato RH & Poggio L (2014) Chromosome studies in southern species of *Mimosa* (Fabaceae, Mimosoideae) and their taxonomic and evolutionary inferences. *Plant Systematics and Evolution* 300: 803-817.
- Naimi B (2015) usdm: uncertainty analysis for species distribution models. R package version 1.1-15. Disponível em <<https://cran.r-project.org/package=usdm>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Phillips SJ, Anderson RP & Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Pires EZ, Stedille LIB, Machado S, Mantovani A & Bortoluzzi RLC (2014) Biologia reprodutiva de erva-mate (*Ilex paraguariensis* A.St. Hill.) em remanescentes de Floresta Ombrófila Mista Altomontana. *Revista de Ciências Agroveterinárias* 13: 171-180.
- R Core Team (2016) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for

- Statistical Computing. Disponível em <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Reis MS, Ladio A & Peroni N (2014) Landscapes with Araucaria in South America: evidence for a cultural dimension. *Ecology and Society* 19: 43.
- Rodrigues PMS, Silva JO, Eisenlohr PV & Schaefer CEGR (2015) Climate change effects on the geographic distribution of specialist tree species of the Brazilian tropical dry forests. *Brazilian Journal of Biology* 75: 679-684.
- Siqueira MF & Durigan G (2007) Modelagem da distribuição geográfica de espécies lenhosas de cerrado no estado de São Paulo. *Revista brasileira de Botânica* 30: 233-243.
- Symon CC (2013) Mudanças do clima: ação, tendências e implicações para o mundo empresarial. Quinto relatório de avaliação do IPCC, grupo de trabalho 1. Universidade de Cambridge. Disponível em <<http://www.cnseg.org.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=485C88E7424C61FD0142DDCA73D41743>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Thuiller W (2003) BIOMOD - optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9: 1353-1362.
- Thuiller W (2004) Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* 10: 2020-2027.
- Thuiller W, Georges D & Engler R (2014) biomod2: Ensemble platform for species distribution modeling. R package version 3.1-64. Disponível em <<https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/index.html>>. Acesso em 27 agosto 2016.
- Varela S, Anderson RP, García-Valdés R & Fernández-González F (2014) Environmental filters reduce the effects of sampling bias and improve predictions of ecological niche models. *Ecography* 37: 1084-1091.
- VanDerWal J, Shoo LP, Graham C & Williams SE (2009) Selecting pseudo-absence data for presence-only distribution modeling: how far should you stray from what you know? *Ecological Modelling* 220: 589-594.
- Venables WN & Ripley BD (2002) *Modern applied statistics with S*. 4th ed. Nova York, Springer. 495p.

Editor de área: Dr. Bruno Rosado

Artigo recebido em 27/08/2016. Aceito para publicação em 21/11/2017.



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.