

Efeito das mudanças climáticas sobre padrões acoplados de distribuição geográfica de espécies vegetais do Cerrado

Lorena Mendes Simon¹, Guilherme de Oliveira², Bruno de Souza Barreto³, João Carlos Nabout⁴, José Alexandre Felizola Diniz Filho⁵

¹Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. CEP 74001-970

E-mail: lores_bio@hotmail.com; diniz@icb.ufg.br

PALAVRAS-CHAVE: envelope bioclimático; projeção combinada; incerteza.

Introdução

A partir da década de 1990 a comunidade científica tem abordado o impacto das mudanças climáticas causadas por gases de efeito estufa sobre a biodiversidade (IPCC 2001). Nesse contexto, essas mudanças climáticas globais também vêm sendo investigadas no que diz respeito à sua influência na ocorrência e distribuição potencial futura de espécies (e.g. Thuiller 2007). Para isso, uma das ferramentas mais utilizadas tem sido a modelagem de distribuição geográfica de espécies (Hijmans & Graham 2006; Botkin et al. 2007). Essas técnicas utilizam diferentes cenários climáticos para estimar a extensão de ocorrência das espécies (Beaumont et al. 2007) e, dessa forma, possibilitam avaliar o impacto que as mudanças climáticas terão sobre a biodiversidade (Hijmans & Graham 2006; Botkin et al. 2007).

Nesse sentido, estudos recentes, tanto em escala local (Parmesan, 2006) quanto em escala global (Kerr et al. 2007), vêm tentando identificar e mapear as mudanças futuras na heterogeneidade espacial do clima (Ackerly et al. 2010), pois esse fator tende a trazer implicações imprescindíveis à projetos conservacionistas pela influência direta sobre a

Revisado pelo Prof. Dr. José Alexandre Felizola Diniz Filho.

¹ Aluna de Graduação do curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Goiás, bolsista PIBIC do laboratório de Ecologia Teórica e Síntese.

² Dr. Pelo Programa de Pós-Graduação Ecologia e Evolução da Universidade Federal de Goiás.

³ Doutorando pelo Programa de Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás.

⁴ Prof. Dr. da Universidade Estadual de Goiás.

⁵ Prof. Dr. do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Goiás.

persistência das espécies. A popularização da utilização de modelos bioclimáticos aumentou o número de trabalhos nessa área nos últimos anos, e vários modelos, com formas de análises diferentes, surgiram a partir de então.

Contudo, muito tem sido discutido a respeito das incertezas nos resultados dos modelos bioclimáticos (Pearson & Dawson, 2003). Para minimizar o impacto dessas incertezas Araújo & New (2007) sugeriram a utilização de vários modelos e parâmetros em uma projeção combinada (*Ensemble Forecast*), esperando que dessa forma os resultados fossem mais informativos e robustos. Baseado nos resultados desse trabalho, recentemente têm sido avaliada e mapeada a importância individual de cada fonte de variação (i.e. método, cenário, parâmetros) em dados de assembleias (Diniz-Filho et al. 2009) ou com uma única espécie (Diniz-Filho et al. 2010), permitindo uma melhor avaliação das incertezas nas previsões.

Para esse trabalho seguimos a proposta de Diniz-Filho et al. (2010), que sugerem três fases para a realização de estudos com projeção combinada (*ensembles*) em plantas de ocorrência no Cerrado. A Fase I seria a realização de um mapa de consenso da distribuição geográfica da espécie utilizando diferentes modelos, dados e métodos. A Fase II envolve, uma avaliação das diferenças entre os mapas utilizando análise estatística multivariada. Finalmente a Fase III faz uma avaliação quantitativa das fontes de variação que influenciam os resultados. Essa avaliação é importante porque, historicamente, o Cerrado vem sendo alvo de ameaças causadas por ações antrópicas, tais como agricultura e a pecuária, intervenções essas que já degradaram grande parte desse bioma. Graças ao elevado número de espécies endêmicas que o compõem, e em função de todas essas peculiaridades o Cerrado é hoje considerado um *hotspot* para a conservação mundial (sensu Myers et al. 2000). Além de todos os fatores de risco já conhecidos, que fragilizam e tornam esse bioma prioritário para a conservação, as expectativas de que as crescentes mudanças climáticas podem gerar ainda mais mudanças na composição de espécies (*turnover*), tem levado pesquisadores a tentarem prever quais ameaças ainda podem ser esperadas para o Cerrado (Oliveira & Marquis, 2002).

As espécies de plantas utilizadas nesse trabalho são de importância histórica e cultural para o Cerrado, pois têm sido de utilidade econômica, ornamental, alimentícia para a população humana ao longo de décadas de ocupação dessa região (Almeida et al. 1998). Assim, além da importância global que o bioma tem, há também uma preocupação regional

no sentido de perda dessas espécies, que ainda são amplamente utilizadas e fazem parte da cultura de desenvolvimento de comunidades beneficiadas por essa biodiversidade.

Objetivos

Baseado na necessidade de avaliar o efeito das mudanças climáticas em plantas do Cerrado, os objetivos desse trabalho foram: i) avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica de espécies do Cerrado utilizando diferentes métodos de modelagem, modelos de circulação gerais (GCM) e cenário climáticos; ii) e quantificar a importância de cada fonte de variação (i.e. método, GCM e cenário) sobre as taxas de substituição de espécies (*turnover*) resultantes dessa projeção combinada.

Metodologia

As informações sobre as 110 espécies de plantas do Cerrado foram adquiridas de Almeida et al. (1998), que descreve a ocorrência e utilização (e.g. econômica, ornamental, medicinal e outras) de espécies vegetais úteis. Os dados de ocorrência dessas espécies foram obtidos pelo sítio do Centro de Referência em Informação Ambiental (CRIA; www.cria.org.br), pela Flora Integrada da Região Centro Oeste (Florescer; www.florescer.unb.br) e a partir da literatura científica compiladas dos portais ISI (apps.isiknowledge.com) e do Scielo (www.scielo.org).

A região do bioma Cerrado foi sobreposta por uma malha com 181 células, com células de 1° de latitude por 1° de longitude. Os dados de ocorrência das espécies foram obtidos pela sobreposição dos pontos de ocorrência nessa malha, que por sua vez foram associados às variáveis ambientais para modelar a distribuição das espécies e projetá-las no futuro.

Foram utilizadas as seguintes variáveis ambientais: I) temperatura mínima II) temperatura máxima III) precipitação IV) temperatura no trimestre mais frio V) temperatura no trimestre mais quente VI) precipitação no trimestre mais seco VII) precipitação no trimestre mais úmido. As variáveis ambientais futuras são derivadas de três modelos de circulação gerais (GCMs): CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis), CSIRO (Australia's Common wealth Scientific and Industrial Research's General

Organisation), HadCM3 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research's General Circulation Model). Para cada um dos GCMs utilizou-se projeções climáticas em dois cenários de emissão de gases de efeito estufa: pessimista (A2a) e otimista (B2a) (ver Karl & Trenberth 2005). Os dados climáticos atuais e de cenários futuros (projetados para 2080) foram obtidos do sitio do WORDCLIM (www.worldclim.org).

Os dados de ocorrência das espécies foram modelados utilizando os seguintes métodos: BioClim (Busby 1991), Distância Euclidiana e Mahalanobis (Farber & Kadmon 2003), GARP (Stockwell & Noble 1992), Maxent (Phillips et al. 2006) e Distância de Gower (Gower, 1971). Dessa forma, a distribuição geográfica das espécies (atual e futuro) gerou um mapa consenso (Ensemble Fase I), agrupando informação de diferentes técnicas de modelagem (6), diferentes modelos climáticos globais (3) e cenários futuros (2). Para gerar esse mapa consenso foi utilizada a plataforma computacional BioEnsembles (Rangel et al. 2009, Diniz et al. 2009).

Em um segundo momento (Ensemble Fase II) foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) dos mapas consenso de turnover para avaliar a diferença entre os parâmetros utilizados na projeção combinada. E por ultimo, a fim de avaliar as fontes de variação que afetam essa projeção, foi feita uma análise de variância com dois fatores (ANOVA) (Ensemble Fase III).

Resultados

A plataforma BioEnsembles gera uma grande quantidade de resultados de projeções, entre eles a extensão de ocorrência das espécies, riqueza de espécies e mudança de composição de espécies, (*turnover*). Para o presente trabalho foram utilizados os resultados referentes ao *turnover*, já que ele faz uma previsão da mudança na composição de espécies futura da área referente ao Cerrado atual.

Nesse sentido, os mapas consenso do *turnover*, tanto para o cenário de emissão de carbono otimista quanto para o pessimista, mostraram uma alta porcentagem de mudança na composição florística do Cerrado no futuro, atingindo 100% numa grande extensão da área estudada (figura 1). Em contrapartida, a região sudeste e parte da região nordeste da área apresentaram valores bem menores de *turnover* (atingindo 0%).

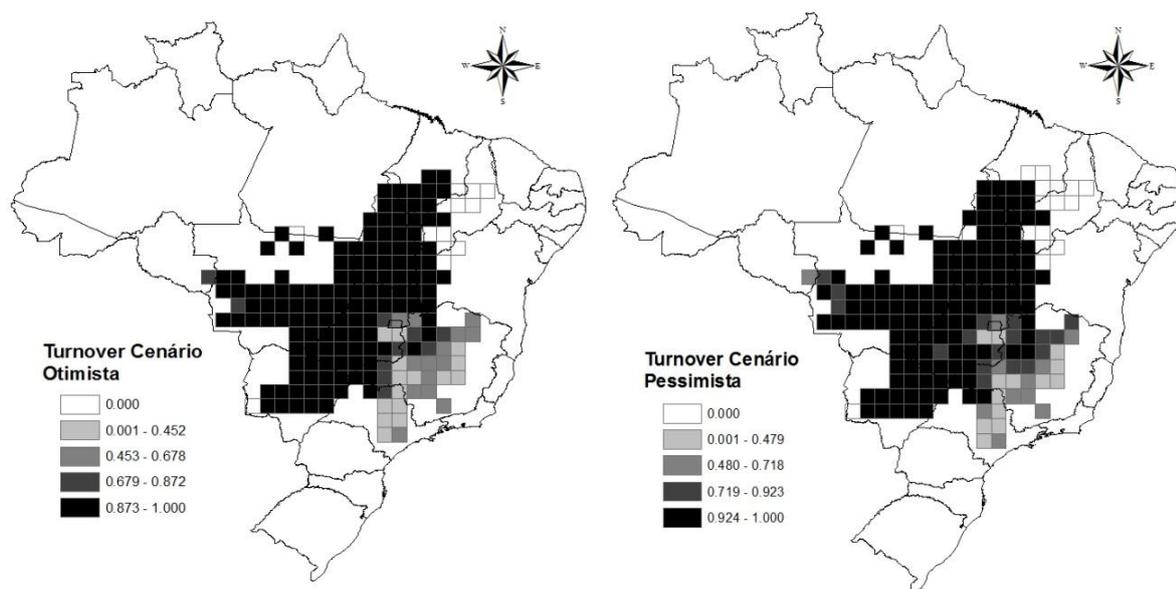


Figura 1: Padrão consenso do turnover de espécies para os dois cenários de emissão de carbono, que varia de 0 a 1. Aonde 1 representa 100% de mudança.

Na análise de componentes principais feita para os 36 resultados de turnover, o primeiro fator explica apenas 37,5% da variação nos resultados, enquanto que, os quatro primeiros fatores explicaram 73,9% dessa variação. Pode-se observar que os principais responsáveis por essa variação foram os modelos e os GCMs, e que os cenários de emissão de carbono pouco influenciaram nos resultados (figura 2). Quanto aos modelos de distribuição, o BioClim, a distância Euclidiana e a distância de Gower apresentaram resultados muito similares, enquanto que o MAXENT apresentou diferença considerável em relação aos outros modelos.

Na ANOVA com dois fatores, usando os modelos e os GCMs como principais indicadores de fonte de variação, o resultado foi que 90% da variação entre os *turnovers* é em função dos modelos. A interação entre os modelos e os GCMs explicou apenas 6,7% dessa variação e o efeito dos GCMs sozinho foi só de 1,2%. Os resultados da ANOVA reafirmaram aquilo que pode ser observado na figura 2, onde se percebe que a maior diferença entre os valores dos *loadings* foi referente aos diferentes modelos usados, com algumas diferenças entre os GCMs (especialmente para os métodos Mahal, GARP e MAXENT, o que explica a interação).

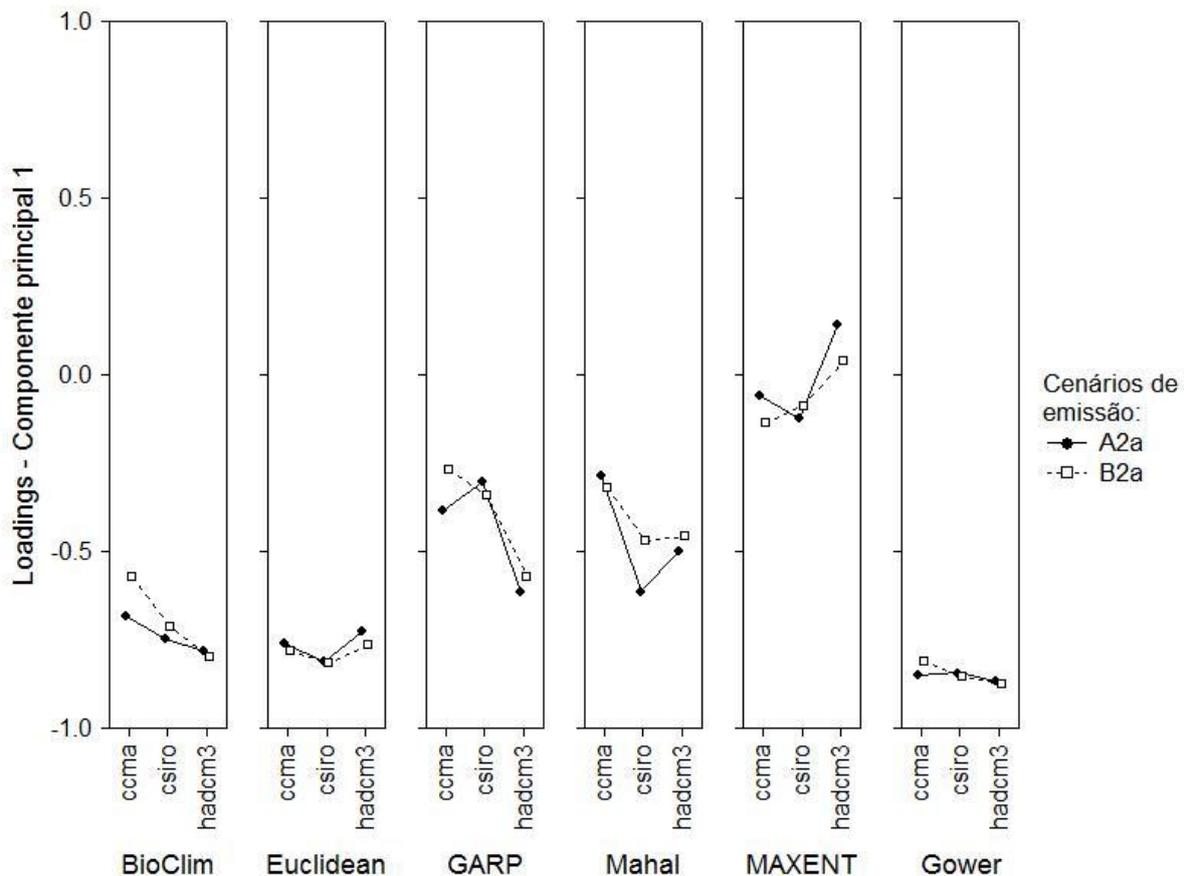


Figura 2: Gráfico realizado com os loadings do componente principal 1 da PCA realizada com a matriz de turnover de espécies projetada com diferentes modelos, GCMs e cenários de emissão de carbono.

Discussão

Os resultados do presente trabalho, baseados em *turnover* de espécies, indicaram um padrão acentuado de mudança na composição em grande parte do bioma Cerrado até 2080. Apenas a região sudeste e parte da região nordeste apresentaram certa estabilidade no padrão de ocorrência das espécies de plantas estudadas. Esses resultados podem indicar uma tendência de deslocamento do envelope bioclimático do Cerrado, e quando se trata de escolhas de área de preservação é imprescindível levar em consideração essas possíveis mudanças na heterogeneidade espacial do clima, já que o local adequado para a persistência das espécies pode ser completamente diferente no futuro (Araújo et al. 2004).

Os mapas de consenso gerados com os resultados das previsões de mudança na composição florística do cerrado até 2080, foram praticamente iguais para os dois cenários climáticos e para os diferentes GCMs. Há poucas diferenças entre os cenários, otimista

pessimista, ou seja, segundo esses resultados, a incerteza na mudança esperada para o futuro parece ser independente da quantidade e emissão de carbono por fatores antrópicos, quando comparada à incerteza gerada pela construção dos mapas de distribuição obtidos utilizando diferentes métodos. Isso mostra os problemas nesses métodos, e de fato. Muitos trabalhos têm discutido a respeito das incertezas nas previsões de distribuição de espécies frente às mudanças climáticas (Diniz-Filho et al. 2009, Araújo et al. 2005, Pearson & Dawson 2003). Apesar disso os modelos bioclimáticos ainda são as ferramentas mais utilizadas para uma aproximação das possíveis consequências dessas mudanças climáticas.

A utilização de uma análise de componentes principais sugerida por alguns autores (Diniz-Filho et al. 2010, Araújo et al. 2005b) foi importante para revelar a contribuição de cada fonte de variação (modelos, GCMs, cenários climáticos) nos mapas resultantes da projeção combinada. Nos *loadings* dessa PCA (figura 2) foi observada uma alta similaridade entre os cenários de emissão de carbono, como já era esperado. A maior variação foi vista entre os modelos, esse resultado coincidiu com o de outros trabalhos que também encontraram como principal fonte de incerteza a diferença entre os modelos (Araújo et al. 2005a, b, Diniz-Filho et al. 2009). Porém, os resultados qualitativos não podem afirmar com precisão a contribuição de cada fonte de incerteza nos resultados (Diniz-Filho et al. 2010), logo a ANOVA com dois fatores mostrou quantitativamente que os modelos foram responsáveis por 90% da variação entre os resultados de *turnover* da projeção.

Já é amplamente discutido que os modelos tendem a ser diferentes entre si na predição da distribuição de espécies, tanto no cenário atual quanto no futuro (Diniz-Filho et al. 2009). Nos resultados do presente trabalho (Figura 2), ficou claro que os modelos baseados em distância e o BIOCLIM tiveram resultados similares, sendo que essa coincidência pode estar associada ao fato de que esses modelos são mais simples no modo de realizarem suas análises. O modelo que mais se diferenciou foi o MAXENT (com os valores de *loadings* mais altos), que de fato é bem mais complexo em relação aos outros, e tem sido muito utilizado na literatura por ter se tornado muito popular nos últimos anos.

Também segundo os resultados da ANOVA, os cenários climáticos globais (GCMs) foram responsáveis por apenas 1,2% da incerteza nos resultados, e a interação entre os modelos e os GCMs por 6,7%. No trabalho de Diniz-Filho et al. 2009 ficou claro que a influência das fontes de incerteza nos resultados variavam de acordo com a região geográfica da área estudada graças à heterogeneidade climática. Logo, é possível que a influência dos

cenários climáticos tenha sido baixa no presente trabalho porque a análise das fontes de incerteza foi feita para toda a extensão do mapa não considerando a particularidade climática de cada região.

Conclusão

As análises do presente trabalho mostraram que há um padrão de mudança do envelope bioclimático do cerrado até 2080, com muitas conseqüências para a distribuição de espécies. As mudanças na distribuição de espécies de importância econômica, além disso, mostram que há necessidade de adaptação das populações locais e de toda a estrutura comercial/econômica relacionada com essas espécies (e.g. Nabout et al. 2010). Contudo, há a necessidade de avaliar melhor as incertezas geradas pelos modelos bioclimáticos utilizados para a realização da projeção combinada, afim de que os resultados dessa projeção sejam confiáveis e possam ser utilizados na realização de projetos de escolhas de áreas de conservação.

Referências Bibliográficas

Ackerly, D. D. et al. 2010. The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16, 476–487.

Almeida, S. P. et al. 1998. Cerrado: espécies vegetais úteis. Planaltina: Embrapa-CPAC, p. 156-161.

Araújo, M. B. & New, M. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 42–47.

Araújo, et al. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology* 10, 1618–1626.

Araújo, et al. 2005a. Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11, 1504–1513.

Araújo, et al. 2005b. Reducing uncertainty in projections of extinction risk from climate change. *Global Ecology and Biogeography, (Global Ecol. Biogeogr.)* 14, 529–538.

- Beaumont, L. J. et al. 2007. Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global change biology* 13:1368-1385.
- Botkin, D. B. et al. 2007. Forecasting the effects of global warming on biodiversity. *Bioscience* 57:227-236.
- Busby, J. R. 1991. BIOCLIM: a bioclimate analysis and prediction system. In: conservation: cost effective biological surveys and data analysis (Eds.: Margules CR & Austin MP) Nature. CSIRO, pp. 64-68.
- Diniz-Filho, et al. 2010. The three phases of the ensemble forecasting of niche models: geographic range and shifts in climatically suitable areas of *Utetheisa ornatrix* (Lepidoptera, Arctiidae). *Revista Brasileira de Entomologia* 54(3): 339–349.
- Diniz-Filho, et al. 2009. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography*.
- Farber, O. & Kadmon, R. 2003. Assessment of alternative approaches for bioclimatic modeling with special emphasis on the Mahalanobis distance. *Ecological Modeling* 160: 115-130.
- Gower, J. C. 1971. A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. *Biometrics*, Vol. 27, No. 4, pp. 857-871.
- Hijmans, R. J. & Graham, C. H. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology* 12:2272-2281.
- IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment Report*, ed. JJ McCarthy, OF Canziani, NA Leary, DJ Dokken, KS White. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- Karl, T. R. & Trenberth, K. E. 2005. What is Climate Change? In: *Climate Change and Biodiversity* (Eds.: Lovejoy JE & Hannah LJ), New Haven: Yale University Press. pp. 15-30.
- Kerr, J. T. et al. 2007. The Macroecological Contribution to Global Change Solutions. *Science* 316, 1581.
- Myers, N. et al. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853-858.

- Nabout J. C. et al. 2011. Global Climate Change and the Production of “Pequi” Fruits (*Caryocar brasiliense*) in the Brazilian Cerrado. *Natureza & Conservação* 9(1):1-5.
- Oliveira, P. S., Marquis, R. J. 2002. The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna. Columbia University Press New York, pp. 329-347.
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37:637–690.
- Pearson, R. G. & Dawson, T. P. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography* 12, 361–371.
- Phillips, S. J. et al. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Rangel, T. F. L. V. B., Diniz-Filho, J. A. F., & Araújo M.B. 2009. Bioensembles - Software for computer intensive ensemble forecasting of species distributions under climate change.
- Stockwell, D. R. B. & Noble, I. R. 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data: A robust and informative method of data analysis. *Mathematics and Computers in Simulation* 33:385-390.
- Thuiller, W. 2007. Biodiversity - Climate change and the ecologist. *Nature* 448:550-552.