



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS  
EXATAS



Trabalho de Graduação  
Curso de Graduação em Geografia

ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA  
DISTRIBUIÇÃO DAS ESPÉCIES MONTANAS DO GÊNERO *BRACHYCEPHALUS*  
(AMPHIBIA: ANURA) ATRAVÉS DA MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICO

João Paulo Soares de Cortes

Prof. Dr. Célio Fernando Baptista Haddad (orientador)

Rio Claro SP  
Novembro - 2011

João Paulo Soares de Cortes

ESTIMATIVA DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS NA DISTRIBUIÇÃO DAS ESPÉCIES  
MONTANAS DO GÊNERO *BRACHYCEPHALUS*  
(AMPHIBIA: ANURA) ATRAVÉS DA MODELAGEM DE  
NICHOS ECOLÓGICOS

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências  
Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Bacharel em Geografia.

Comissão Examinadora

Célio Fernando Baptista Haddad (orientador)

Adler Guilherme Viadana

David Montenegro Lapola

Rio Claro, 6 de dezembro de 2011

---

João Paulo Soares de Cortes

---

Célio Fernando Baptista Haddad

574.9  
D278e De Cortes, João Paulo Soares  
Estimativas dos impactos das mudanças climáticas na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* (Amphibia: anura) através da modelagem de nicho ecológico / João Paulo Soares de Cortes. - Rio Claro : [s.n.], 2011  
48 f. : il., figs., gráfs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Célio Fernando Baptista Haddad

1. Animais e plantas – Distribuição geográfica. 2. Modelagem. 3. Biodiversidade. 4. Biogeografia. 5. Aquecimento global. 5. Herpetologia.  
I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

## AGRADECIMENTOS

À Dona Rosa, mãe e amiga, e aos meus irmãos, Ronaldo e Rodrigo, por terem me ensinado, através de grandes exemplos, muito do pouco que sei sobre o que seja a vida, e de como vivê-la em sua plenitude, aprendendo com seus vales e cumes.

À minha família, na qual eu incluo todas aquelas pessoas pelas quais, de diferentes maneiras, nutro laços de amor, carinho, respeito e amizade.

Aos amigos que a distância não foi capaz de separar, e que sempre guardaram com muito afinho, um lugar pra que eu pudesse voltar a qualquer momento e me sentir em casa, em especial Murilo e Macarrão.

À minha menina, Aline, por cada momento compartilhado. Que continuemos crescendo juntos, pois assim somos melhores.

Aos mestres que, na academia e/ou na vida, nunca hesitaram em “ensinar”, dando a este verbo todo o valor que o mesmo tem (ou deveria ter), entre eles o orientador deste trabalho Célio Haddad e minha co-orientadora Thaís Condez.

Aos integrantes das Repúblicas Fossa, Casa 1 e Trincheira, pelos anos de convivência nos quais nos aperfeiçoamos na arte de dividir das baladas às louças. Que os momentos que passamos juntos sejam lembrados em muitas ocasiões daqui pra frente e que possamos celebrar juntos cada nova conquista.

À Natália e à Celine, por estarem sempre presentes. Literalmente.

A todos os colegas do laboratório de herpetologia, pela disposição em compartilhar conhecimentos, idéias, cafés *y otras cositas más*.

Às demais amigadas feitas em Rio Claro, que tornaram a minha passagem por este lugar proveitosa não só do ponto de vista acadêmico, e que, como um sinal positivo, eu não conseguiria enumerar sem cometer “erros de omissão”.

A todas essas pessoas, que mesmo sem se darem conta, foram essenciais para que eu chegasse até aqui, deixo meus sinceros agradecimentos.

João Paulo

Novembro de 2011

## *A ESTALAGEM DA RAZÃO*

*“A meio caminho entre a fé e a crítica está a estalagem da razão. A razão é a fé no que se pode compreender sem fé, mas é uma fé ainda, porque compreender envolve pressupor que há qualquer coisa compreensível.”*

*Fernando Pessoa*

## RESUMO

O gênero *Brachycephalus* é endêmico da Mata Atlântica e está distribuído principalmente nas regiões sudeste e sul do Brasil. Atualmente possui 17 espécies reconhecidas, a maioria delas associadas com habitats montanos ao longo dos cumes das Serras do Mar e da Mantiqueira. Neste trabalho utilizamos uma abordagem de modelagem de nicho ecológico baseada em variáveis climáticas para avaliar o nicho potencial das espécies montanas desse gênero. O modelo gerado foi então projetado para cenários futuros, considerando o último relatório do IPCC, de modo a estimar os impactos das mudanças climáticas na distribuição dessas espécies. Os resultados mostram uma diminuição da área adequável para as espécies montanas de *Brachycephalus*, assim como tendências já observadas para outros organismos, como migração em direção os pólos e a maiores altitudes. Uma área ao sul do Planalto de Paranapiacaba torna se mais adequável a essas espécies. Sugerimos maiores esforços em novas prospecções e conservação na porção norte de sua distribuição, uma vez que esta parece ser a região mais afetada pelas mudanças climáticas nos cenários projetados.

**Palavras Chave** – Biogeografia, Mudanças Climáticas, Modelagem de Nicho Ecológico, *Brachycephalus*.

## ABSTRACT

The genus *Brachycephalus* is endemic to the Atlantic rainforest and is distributed mainly in the southeastern and southern Brazil. Currently, it has 17 recognized species, most of them, associated with mountainous habitats along the Serra do Mar and Serra da Mantiqueira ridges. Here we use an ecological niche modelling approach based on climatic variables, to assess the potential niche of the mountainous species of this genus. The model generated was then projected to future scenarios considering the last IPCC report, in order to estimate the impacts of climate changes on these species distribution. Results show a decrease in the total suitable area for the mountainous *Brachycephalus* species, as well as tendencies already observed for other organisms, such as, pole and upward migrations. A southern area on Planalto de Paranapiacaba increases in suitability for these species. We suggest special efforts on new surveys and conservation on the northern part of their distribution, once this seems to be the region more affected by climate changes on the projected scenarios.

**Keywords** – Biogeography, Climate Change, Ecological Niche Modeling, *Brachycephalus*.

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 Sobre o gênero <i>Brachycephalus</i> e seu habitat .....	8
1.2 Pressupostos acerca das mudanças climáticas considerados no presente estudo .....	11
1.3 A evolução do conceito de nicho e o desenvolvimento dos modelos de nicho ecológico .....	12
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1 O algoritmo de entropia máxima (Maxent) .....	17
3.2 Pontos de ocorrência .....	18
3.3 Variáveis Ambientais e inputs climáticos .....	18
3.4 Escolha das variáveis climáticas e teste do conjunto de dados .....	21
3.5 Definição do “ponto de corte” e análises em GIS .....	22
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>24</b>
4.1 Modelo de Nicho Ecológico no cenário presente (1950-2000) .....	24
4.2 Modelos de Nicho Ecológico nos cenários futuros (2020 e 2050) .....	26
4.3 Tendência à migração altitudinal .....	29
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
5.1 Tendências de alteração na distribuição das espécies montanas do gênero <i>Brachycephalus</i> (EMGB) apontadas pelos modelos de nicho ecológico .....	32
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>42</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>44</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espécies do gênero <i>Brachycephalus</i> ;	9
Figura 2 – Ambientes de ocorrência para as EMGB	11
Figura 3 – Representação do conceito de nicho de Hutchinson	14
Figura 4 – Regionalização Climática proposta por Ruosteenoja et al. (2003) e adotada pelo IPCC-AR4.	20
Figura 5 – Média entre a AUC das 10 réplicas geradas para teste do conjunto de dados.	22
Figura 6 – Transformação do resultado em escala logarítmica produzido pelo Maxent (A), em um mapa binário (adequável/não adequável) (B).	23
Figura 7 – MNE representando as áreas adequáveis no presente para ocorrência das espécies montanas do gênero <i>Brachycephalus</i> .	25
Figura 8 – MNE representando as áreas adequáveis em 2020 para ocorrência das espécies montanas do gênero <i>Brachycephalus</i> .	26
Figura 9 – MNE representando as áreas adequáveis em 2050 para ocorrência das espécies montanas do gênero <i>Brachycephalus</i> .	27
Figura 10 – Variação entre os MNEs projetados para os cenários Presente e 2050.	29
Figura 11 – Migração das áreas adequáveis às EMGB em direção às áreas mais altas.	30
Figura 12 – Projeção de anomalias de chuva para o verão (DJF) com referência ao período base 1961-90 para a América do Sul.	34
Figura 13 – Modelos de projeção dos impactos das mudanças climáticas na vegetação potencial da América do Sul.	35
Figura 14 – A) <i>Brachycephalus alipioi</i> , Vargem Alta - ES. B) <i>B. ephippium</i> Teresópolis - RJ.	36
Figura 15 – Distribuição das espécies do gênero <i>Brachycephalus</i> e sua relação com a compartimentação geomorfológica.	41

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES**

**AR4** – Fourth Assessment Report – (Quarto Relatório de Avaliação do IPCC)

**AUC** – Area Under the Curve – (Métrica gerada pelo Maxent para avaliar a acurácia do modelo gerado)

**CIAT** – Centro Internacional de Agricultura Tropical

**EMGB** – Espécies Montanas do Gênero *Brachycephalus*

**EGGB** – Espécies Generalistas do Gênero *Brachycephalus*

**GCM** – General Circulation Model (Modelo de Circulação Geral)

**GHG** – Greenhouse Gases (Gases Estufa)

**HadCM3** – Hadley Center Coupled Model, version 3

**IPCC** – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)

**MNE** – Modelo de Nicho Ecológico

**MTP** – Minimum Training Presence – Ponto de corte utilizado na conversão de modelos probabilísticos em modelos de presença/ausência

**SRES** – Special Report Emission Scenarios (Relatório Especial sobre Cenários de Emissão)

**SSA** – Southern South América (Sul da América do Sul)

**TAR** – Third Assessment Report (Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC)

**ZCIT** – Zona de Convergência Intertropical

## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1 Sobre o gênero *Brachycephalus* e seu habitat

A Mata Atlântica corresponde às florestas pluviais atlânticas que originalmente ocorriam em uma longa faixa de vegetação desde o estado do Rio Grande do Norte ao estado do Rio Grande do Sul, na região litorânea do Brasil, bem como em uma área interiorana que se estende por parte da porção oriental da Argentina e Paraguai. Trata-se de um mosaico botânico e faunístico, que apresenta claros gradientes latitudinais e principalmente de altitude (AB'SÁBER, 2003). De acordo com Myers et al. (2000), o bioma é considerado um hotspot mundial de biodiversidade, possuindo um grande número de espécies endêmicas. Entre os diversos biomas considerados hotspots globais, este é o que se apresenta mais degradado atualmente, tendo perdido cerca de 93% de seu habitat original (GALINDO LEAL, 2005), necessitando de maior urgência na conservação de suas paisagens e de sua biodiversidade (MORELLATO; HADDAD, 2000). Caracteriza-se também por englobar diferentes fitofisionomias, estas intimamente ligadas aos diferentes regimes climáticos predominantes nas zonas de ocorrência dessas florestas, e à variação altitudinal, que igualmente influi na distribuição das temperaturas e precipitação ao longo da área de ocorrência deste bioma. A devastação atual do bioma, no entanto, faz com que este esteja restrito a pequenas manchas espalhadas pela borda oriental brasileira, principalmente nas regiões sul e sudeste, bem como em uma relativamente expressiva área interior, na província argentina de Misiones. A conservação desses remanescentes é crucial para a manutenção da biodiversidade, tanto num contexto local e regional como num contexto global.

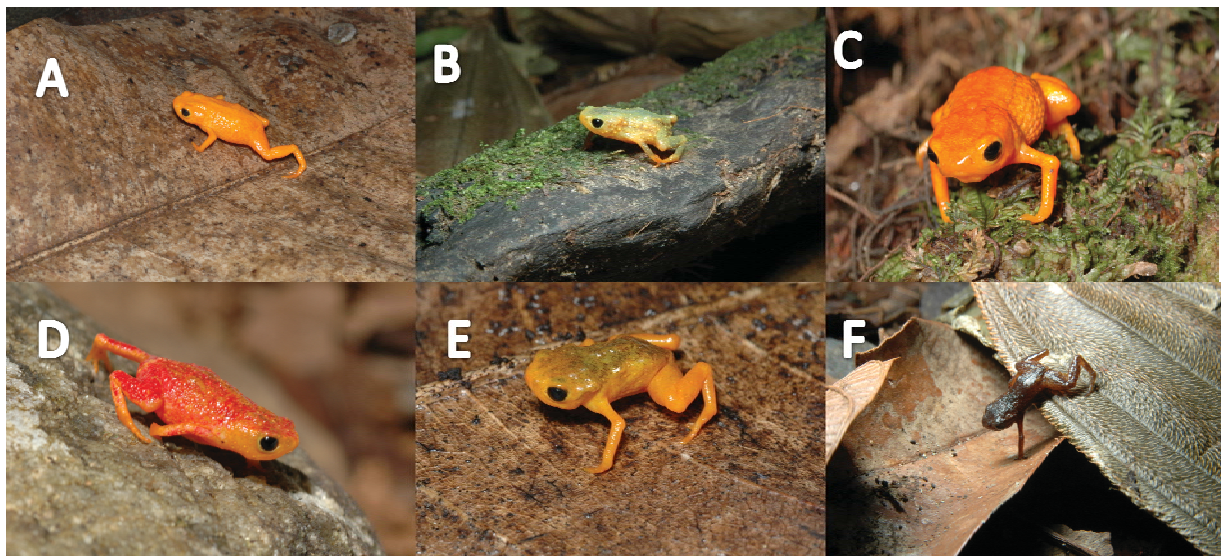
Entre as três ordens conhecidas de anfíbios (Caudata, Anura e Gymnophiona), os anuros são os mais comuns e diversificados ao longo do território brasileiro. Atualmente, 847 espécies de anfíbios anuros são encontradas no Brasil, dentre as mais de 5.900 espécies conhecidas no mundo (GAA, 2008). A Mata Atlântica possui mais de 400 espécies de anfíbios, mas o conhecimento de seus padrões de distribuição espacial ainda é superficial (HADDAD et al., 2008). Este bioma possui a maior riqueza e o maior número de espécies endêmicas de anfíbios anuros do mundo (DUELMANN, 1999). A importância de se ter uma idéia mais clara de como essas espécies estão distribuídas pelo bioma é justificada por propósitos de conservação e preservação de tamanha biodiversidade.

O gênero *Brachycephalus* Fitzinger, 1864, é composto por 17 espécies distribuídas na faixa montanhosa do Brasil oriental, desde o sul do estado da Bahia até o estado do Paraná já

na região Sul do país. As espécies pertencentes a esse gênero habitam a serapilheira de florestas ombrófilas densas, em especial nas Serras do Mar e da Mantiqueira (POMBAL JR., 2001). Possuem hábitos diurnos e maior atividade durante a estação úmida, apesar de também permanecerem ativas durante a estação seca. A maioria das espécies desse gênero ocorre na faixa de altitude entre os 600 e 1700 metros, com exceção de *Brachycephalus hermogenesi*, *B. didactyla* e *B. pulex*, que são encontrados de 0 a 700 metros de altitude. Essas três espécies também se diferem das demais por possuírem coloração conspícua.

As espécies do gênero *Brachycephalus* apresentam morfologia distinta por possuírem vestígios evolutivos de um processo de miniaturização (como redução dos dígitos e do número de artelhos), que faz com que figurem entre os menores vertebrados conhecidos, com indivíduos adultos medindo cerca de 20 milímetros de comprimento rostro-cloacal (NAPOLI et al., 2011). A figura 1 mostra algumas espécies do gênero. É possível observar o tamanho diminuto das mesmas se as compararmos com o ambiente em que estão (como os indivíduos caminhando sobre folhas na serapilheira em 1A, 1E e 1F).

**Figura 1 – Espécies do gênero *Brachycephalus*; A) *B. alipioi*, B) *B. sp aff bufonoides*, C) *B. garbeanus*, D) *B. pitanga*, E) *B. toby*, F) *B. sp aff didactylus*.**



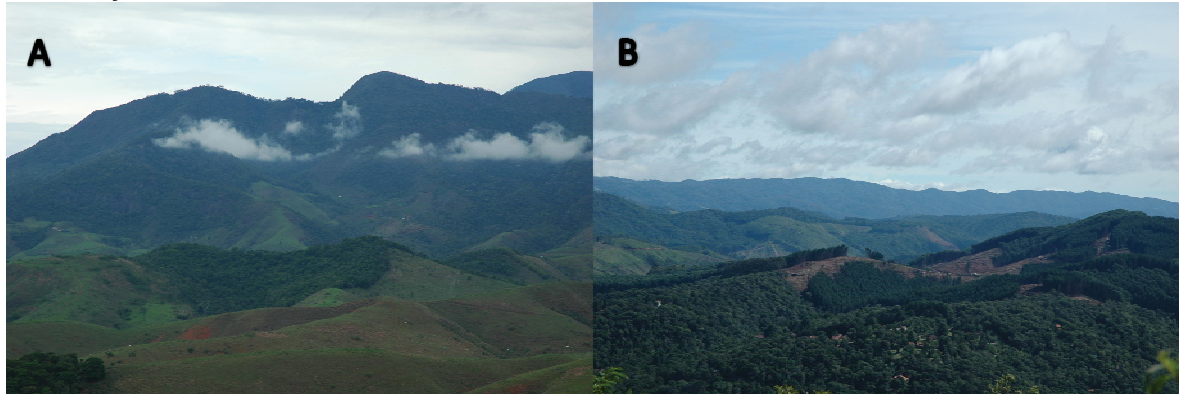
Fotos: Célio F. B. Haddad

Devido às diferenças na escolha do habitat entre as espécies mais escuras e de distribuição altitudinal menos restrita (*Brachycephalus hermogenesi*, *B. didactyla* e *B. pulex*) e as demais do gênero, consideraremos dois grupos de espécies distintos. O primeiro deles, foco deste trabalho, será chamado de “espécies montanas do gênero *Brachycephalus*” reportado no trabalho pela sigla EMGB. O grupo das EMGB contém as seguintes espécies; *B.*

*alipioi*, *B. atelopoide*, *B. bufonoides*, *B. brunneus*, *B. ephippium*, *B. ferruginus*, *B. garbeana*, *B. izecksohni*, *B. nodoterga*, *B. pernix*, *B. pitanga*, *B. pombali*, *B. vertebralis* e *B. toby*. O segundo grupo é composto pelas três espécies restantes (*B. hermogenesi*, *B. didactyla* e *B. pulex*), de coloração mais escura, e será chamado de “espécies generalistas do gênero *Brachycephalus*” (EGGB).

Registros recentes de declínios em comunidades e populações de anfíbios, e possíveis riscos de extinção associados a diversas causas têm alertado os pesquisadores sobre a necessidade de maior conhecimento dessas espécies, sua biologia e distribuição (YOUNG et al., 2001; ETEROVICK et al., 2005). Estes declínios que têm sido observados em escala global são comumente associados a mudanças climáticas, representadas pelo aumento nas temperaturas, aumento na incidência de raios ultravioleta-B (UV-B), alteração dos níveis de precipitação e conseqüente umidade do solo, vulnerabilidade de ambientes mais quentes à infestação por patogenias nocivas aos anfíbios, entre outras. Por outro lado estes declínios também estão ligados à degradação do habitat dessas espécies, como por exemplo, pela mudança no uso do solo para atividades antrópicas, como agricultura e pecuária, e todos os problemas decorrentes dos resíduos tóxicos gerados por insumos agrícolas (CORN, 2005), isso sem citar a problemática urbana como um fator de degradação dos habitats dessas espécies. Apesar de ser possível classificar as possíveis causas dos declínios populacionais em anfíbios em duas classes distintas, elas não atuam separadamente, e nem podem responder sozinhas por qualquer alteração na distribuição e abundância desses organismos. Na verdade as causas ligadas às mudanças ambientais provocadas por alterações nos padrões climáticos e aquelas provocadas por degradação de habitat atuam de maneira sinérgica (SCHNEIDER & ROOT, 2002), o que torna os esforços no sentido de identificar vulnerabilidades e estimar impactos futuros na distribuição dessas espécies mais que desejáveis. A figura 2 exemplifica os ambientes de ocorrência das EMGB, com destaque para: A) influência das nuvens na constituição do microclima apropriado a essas espécies; e B) mudanças no uso do solo como fator de ameaça ao habitat das EMGB.

**Figura 2 – Ambientes de ocorrência para as EMGB: A) influência das nuvens na constituição dos microhabitats apropriados a essas espécies, B) mudanças no uso do solo como fator de ameaça ao habitat das EMGB**



Fotos: Célio F. B. Haddad

## **1.2 Pressupostos acerca das mudanças climáticas considerados no presente estudo**

O terceiro relatório de avaliação (TAR) do IPCC (2001) com base em séries climáticas globais mostrou que a temperatura média da atmosfera tem aumentado em  $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  durante o último século. A década de 1990 foi a mais quente desde que as primeiras medições no fim do século XIX foram efetuadas. O aumento na temperatura é altamente consistente com o aumento nas concentrações de gases do efeito estufa (GHG) na atmosfera. As concentrações de  $\text{CO}_2$ , por exemplo, aumentaram de uma estimativa de 277 partes por milhão (ppm) em 1760 no início da revolução industrial, para 371 ppm no ano de 2001. Essa concentração, medida há 10 anos, já correspondia a mais alta dos últimos 420.000 anos, e provavelmente, dos últimos 20 milhões de anos, de acordo com os registros de amostras da atmosfera retiradas das geleiras da Antártica (MARENGO, 2007). Um implemento na resolução e desempenho dos modelos utilizados para simulação das interações oceano/atmosfera, aliado a um aumento na complexidade desses modelos, tem aumentado o nível de confiança ao se afirmar a relevância do componente antrópico nas mudanças climáticas observadas.

O quarto relatório de avaliação (AR4) do IPCC (2007) aponta, com um nível alto de confiança que, as evidências obtidas por meio de observações em todos os continentes e na maior parte dos oceanos mostram que muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, principalmente pelos aumentos de temperatura. Este fato foi comprovado com base em centenas de estudos que obtiveram sucesso em associar mudanças nestes sistemas com o aumento das temperaturas. Estes estudos apontaram tendências

primordiais de respostas dos sistemas naturais às alterações climáticas. Foi possível, por exemplo, afirmar com um nível muito alto de confiança que tendências de antecipação dos eventos da primavera, como emissão de folhas, migração de pássaros e postura de ovos, juntamente com tendências de deslocamento, em direção aos pólos e a maiores altitudes (uphill), da distribuição de espécies vegetais e animais estão diretamente relacionadas às mudanças climáticas observadas no último século (IPCC, 2007).

Com relação à América Latina, este mesmo relatório afirma que até meados do século, os aumentos de temperatura e as correspondentes reduções da água no solo acarretam uma substituição gradual da floresta tropical por savana no leste da Amazônia (SALAZAR et al., 2007). Esta tendência, no entanto, foi recentemente contestada por Lapola et al. (2009). Esses autores acrescentaram ao modelo utilizado por Salazar et al. (2007) variáveis relativas a um efeito do qual ainda pouco se sabe; o efeito de fertilização da floresta por CO<sub>2</sub>.

A vegetação semi-árida tenderá a ser substituída por vegetação de terras áridas. Há ainda, um risco de perda significativa de biodiversidade por causa da extinção de espécies em muitas áreas da América Latina tropical (IPCC, 2007).

Apesar de a quantidade de evidências ter aumentado bastante entre o terceiro e o quarto relatórios de avaliação do IPCC com relação aos efeitos das mudanças climáticas nos sistemas físicos e biológicos, há uma carência em estudos abordando este assunto em regiões tropicais, pois essas regiões na maior parte dos casos correspondem a nações em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. Dessa maneira, podemos afirmar que há incertezas sobre a aplicabilidade dos estudos sobre este tema, a maioria deles realizados no Hemisfério Norte, em regiões tropicais e subtropicais. Evidências sobre a resposta dos sistemas físicos e biológicos às mudanças em curso são de grande importância, portanto, para compreensão dos possíveis impactos, de modo a que possamos traçar estratégias de mitigação e adaptação mais conscientes e eficazes.

### **1.3 A evolução do conceito de nicho e o desenvolvimento dos modelos de nicho ecológico**

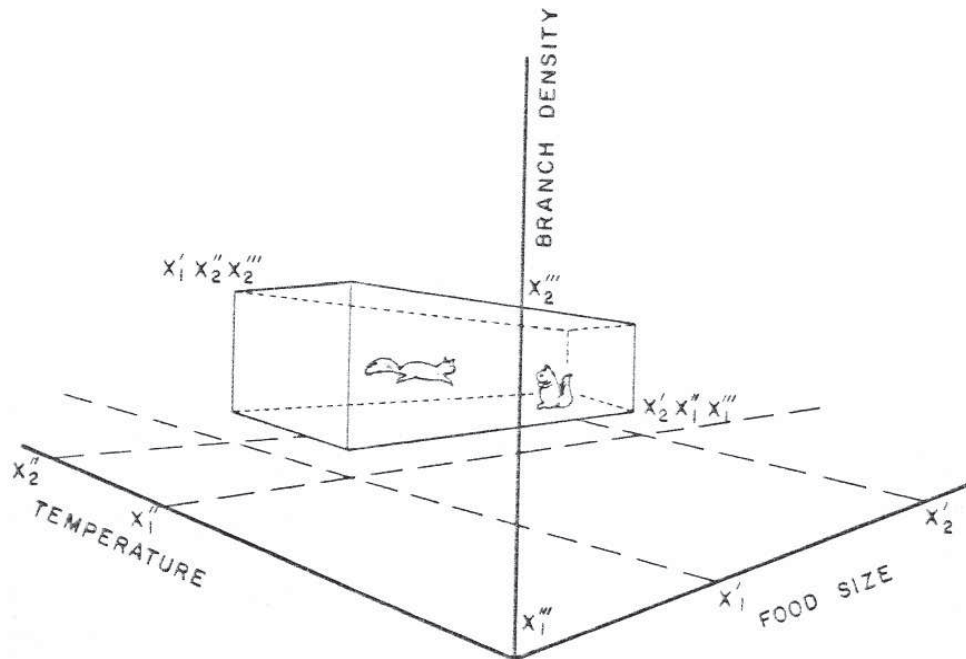
O conceito de nicho ecológico tem suas bases com Joseph Grinnell e Charles Elton, nas primeiras décadas do século XX (WIENS et al., 2009). Estes dois autores apresentaram visões diferentes sobre o conceito. Grinnell (1917) pensava o nicho de uma perspectiva biogeográfica por excelência, definindo o nicho de uma espécie como uma subdivisão do habitat contendo as características ambientais necessárias à sobrevivência de uma espécie.

Essas características determinam a distribuição dessa espécie, ou seja, “onde” esta pode ocorrer.

Pela perspectiva *Eltoniana*, o nicho seria definido por aspectos funcionais de uma espécie a nível de comunidade, em especial com relação à sua posição na cadeia alimentar. O “onde” neste caso é relacionado com a posição que esta espécie ocupa com relação às demais que dividem os mesmos recursos. Desta maneira as variáveis limitantes da distribuição de uma espécie, seriam mensuradas a nível trófico e local, com base nas atividades de indivíduos (SOBERÓN; NAKAMURA, 2009).

Os desdobramentos do conceito de nicho que mais tarde possibilitaram a evolução da Modelagem de Nicho Ecológico vieram pela perspectiva *Grinnelliana*, em especial a partir das contribuições de G. E. Hutchinson (1957), que proveram ferramentas conceituais essenciais para o entendimento dos limites de distribuição de uma espécie (HOLT, 2009). Hutchinson define o nicho de uma espécie como um hiperespaço n-dimensional, definido entre dois eixos, o primeiro composto de variáveis ambientais em larga escala (variáveis climáticas e topográficas, por exemplo) e o segundo composto de variáveis em pequena escala que afetam e são afetadas pela distribuição das espécies (variáveis na abundância de recursos ou interações interespecíficas). Este autor denominou as primeiras como variáveis “cenopoéticas” e as segundas como “bionômicas”. A figura 3 ilustra a idéia de nicho formulada por Hutchinson (1957) que é a base conceitual da modelagem de nicho ecológico.

**Figura 3 – Representação do conceito de nicho de Hutchinson (1957). O nicho de uma espécie deve ser pensado a partir da interação entre fatores bióticos (binomiais) e ambientais (cenopóéticos) dentro de um “hiperespaço n-dimensional”.**



Fonte: Meszéna & Szilágyi (2007)

Um segundo avanço conceitual veio da distinção entre o nicho fundamental e o nicho realizado de uma espécie. O nicho fundamental deve ser compreendido como o espaço dentro do qual os valores das  $n$  variáveis são adequáveis à sobrevivência de uma espécie, sem levar em consideração fatores limitantes dessa distribuição como barreiras geográficas ou interações interespecíficas. Já o nicho realizado é aquele em que a espécie de fato ocorre, ou seja, o nicho fundamental mais os fatores limitantes levados em consideração (HUTCHINSON, 1957).

Essa evolução conceitual permitiu que modelos estocásticos de correlação entre variáveis ambientais e pontos de ocorrência de espécies começassem a ser desenvolvidos com o intuito de avaliar o nicho ecológico de espécies, e de uma maneira indireta, sua distribuição potencial. Esses modelos tiveram uma rápida difusão nos últimos 15 anos graças à disponibilização de bancos de dados *online* de pontos de ocorrência, e de diferentes variáveis ambientais em resoluções cada vez melhores (SOBERÓN, 2010). Dentre as aplicações deste tipo de modelos podemos citar seu uso para levantar e testar hipóteses filogeográficas (WALTARI; GURALNICK, 2009), modelos aplicados ao inventariamento de novas áreas e

espécies (ELITH et al., 2002) e modelos preditores de risco potencial de espécies invasoras (KELLY et al., 2007), bem como trabalhos diretamente relacionados ao uso da modelagem para predição de impactos das mudanças climáticas sobre a biodiversidade (DINIZ-FILHO et al., 2009).

Entre a relação da teoria ecológica por trás dessa abordagem e os resultados obtidos, é importante lembrar que os Modelos de Nicho Ecológico (MNEs) refletem o nicho fundamental das espécies em favor do nicho realizado. Outro fato relevante é que atualmente o uso de variáveis ambientais (cenopoéticas) tem prevalecido na construção dos MNEs, isso porque em resoluções mais grosseiras (menor escala) essas variáveis têm obtido sucesso em prever a distribuição das espécies mesmo na ausência de variáveis representativas das interações bióticas (bionômicas) (SOBERÓN, 2010). O presente estudo se utilizará somente de variáveis climáticas (cenopoéticas) na construção dos MNEs necessários à estimativa dos impactos das mudanças climáticas nas espécies montanas do gênero *Brachycephalus* (EMGB).

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho busca avaliar os impactos das mudanças climáticas na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* (Amphibia, Anura). Alterações na distribuição predita destas espécies serão avaliadas em dois cenários futuros (2020 e 2050), a fim de verificar os impactos sobre sua ocorrência atual.

Para tanto serão confrontados os resultados das técnicas estatísticas e espaciais pertinentes à modelagem de nicho ecológico com as tendências apresentadas por estudos climatológicos oriundos tanto do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4), quanto da literatura referente às mudanças climáticas em regiões tropicais e seus impactos sobre a biodiversidade. Há também a intenção de se incorporar dados e informações advindas da literatura climatológica nos modelos de nicho ecológico (MNEs), de modo a integrar os conhecimentos gerados nos âmbitos das diferentes áreas do saber envolvidas em tal investigação, como a biogeografia, a ecologia e a climatologia.

Este esforço pretende, por um lado, minimizar as incertezas e ceticismos inerentes à idéia de modelagem em si (entendo-se um modelo como uma aproximação por demais simplista da realidade) em especial quando se pretende avaliar eventos futuros com base em premissas altamente factíveis de serem modificadas. Por outro lado, as informações advindas da literatura que trata de tendências explicitamente climatológicas serão utilizadas na validação dos próprios modelos gerados, a partir da simples concordância, ou não, destes modelos com os eventos já observados nas últimas décadas e reportados na cada vez mais ampla literatura referente ao tema aquecimento global.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de obter um modelo capaz de prever com precisão os impactos das mudanças climáticas na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus*, a escolha do algoritmo e variáveis utilizadas foi criteriosamente realizada. Detalhes sobre o algoritmo escolhido, a obtenção dos dados de ocorrência das espécies e dados climáticos utilizados, bem como das análises realizadas são apresentados a seguir.

#### 3.1 O algoritmo de entropia máxima (Maxent)

Dentre as diferentes abordagens disponíveis para geração de Modelos de Nicho Ecológico (MNEs), optamos por utilizar o algoritmo de Entropia Máxima implementado no executável Maxent (PHILLIPS et al., 2006). O algoritmo de Entropia Máxima tem sua base conceitual na segunda lei da termodinâmica. Em termos práticos, consideraremos aqui somente o aspecto do conceito de entropia que se aplica diretamente à construção de MNEs. A idéia é que a distribuição da máxima entropia corresponde à distribuição mais próxima da uniformidade na seleção de um evento. A informação disponível sobre a distribuição da espécie constitui um conjunto de valores tomados como verdades (oriundos dos dados de presença) e suas restrições são os valores esperados de cada valor para que correspondam às médias para o conjunto de dados tomados da distribuição alvo. Os valores reais correspondem aos valores dos pixels da área de estudo na qual a espécie está presente, ou seja, aos valores das camadas ambientais utilizadas nesses pixels (PHILLIPS et al., 2006). Sua vantagem sobre os demais algoritmos utilizados em outras abordagens de construção de MNEs está no fato de que este reconhece lidar com informações incompletas sobre a distribuição alvo.

Este algoritmo mostrou desempenho superior sobre os demais em estudos comparativos levando em conta a acurácia das predições (ELITH et al., 2006). Ao mesmo tempo em que equilibra a relação entre erros de omissão e sobreprevisão, mostrou-se menos vulnerável a efeitos indesejáveis, relacionados ao tamanho da área de calibragem e tamanho amostral (GIOVANELLI et al., 2010). Essas vantagens são devidas à sua base conceitual, e seu uso tem se tornado cada vez mais amplo entre os diversos propósitos que pode ter o processo de construção de MNEs.

### 3.2 Pontos de ocorrência

Pontos de ocorrência das 14 espécies montanas do gênero *Brachycephalus* foram obtidos de duas maneiras distintas. Primeiramente buscamos registros primários coletados em campo como parte dos projetos “Ecologia e biogeografia do gênero *Brachycephalus* Fitzinger, 1864 (Anura: Brachycephalidae)”, desenvolvido por Thais Helena Condez, aluna do curso de pós-graduação em Ciências Biológicas/Zoologia do Instituto de Biociências de Rio Claro e também do projeto temático “Especiação de Anfíbios Anuros em Ambientes de Altitude” coordenado por Célio F. B. Haddad. Em seguida foi feito um levantamento nas seguintes coleções científicas brasileiras: Coleção de anfíbios “Célio F. B. Haddad”, no Departamento de Zoologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Rio Claro (CFBH), Coleção Herpetológica do Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo – São Paulo (MZUSP) e Coleção Herpetológica do Museu Nacional – Rio de Janeiro (MNRJ). Dados adicionais foram obtidos através de consulta à base de dados SpeciesLink (<http://smlink.cria.org.br>, outubro de 2011), considerando as informações contidas na Coleção de anfíbios adultos da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - São José do Rio Preto (DZSJRP), Museu de Zoologia Prof. Adão José Cardoso, da Universidade Estadual de Campinas – Campinas (ZUEC), Museu de História Natural Capão da Imbuia - Paraná (MHNCI) e Museu de Biologia “Professor Mello-Leitão” – Espírito Santo (MBML)). No total 44 pontos de ocorrência representativos das espécies montanas do gênero foram compilados e utilizados no processo de modelagem.

### 3.3 Variáveis Ambientais e inputs climáticos

Variáveis preditoras derivadas de valores de precipitação e temperatura foram obtidas da base de dados Worldclim (HIJMANS et al., 2005) para o tempo presente representativas do período 1950-2000, com a resolução de 2,5 arc minutos (aproximadamente 7,5 km no equador). Projeções para os cenários de emissão SRES A1B nas fatias de tempo 2020 e 2050 foram obtidas da base de dados do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 2010) na mesma resolução. As projeções para os cenários futuros foram baseadas no Modelo de Circulação Geral (GCM) UK\_HadCM3, um dos 7 GCMs que integram as previsões dos relatórios do IPCC.

O cenário de emissão SRES - A1B prevê o máximo de dependência de recursos energéticos, previsão essa que já vem sendo confirmada desde o terceiro relatório do IPCC (2001) em detrimento dos cenários da família B pouco mais otimistas. Sobre os níveis de

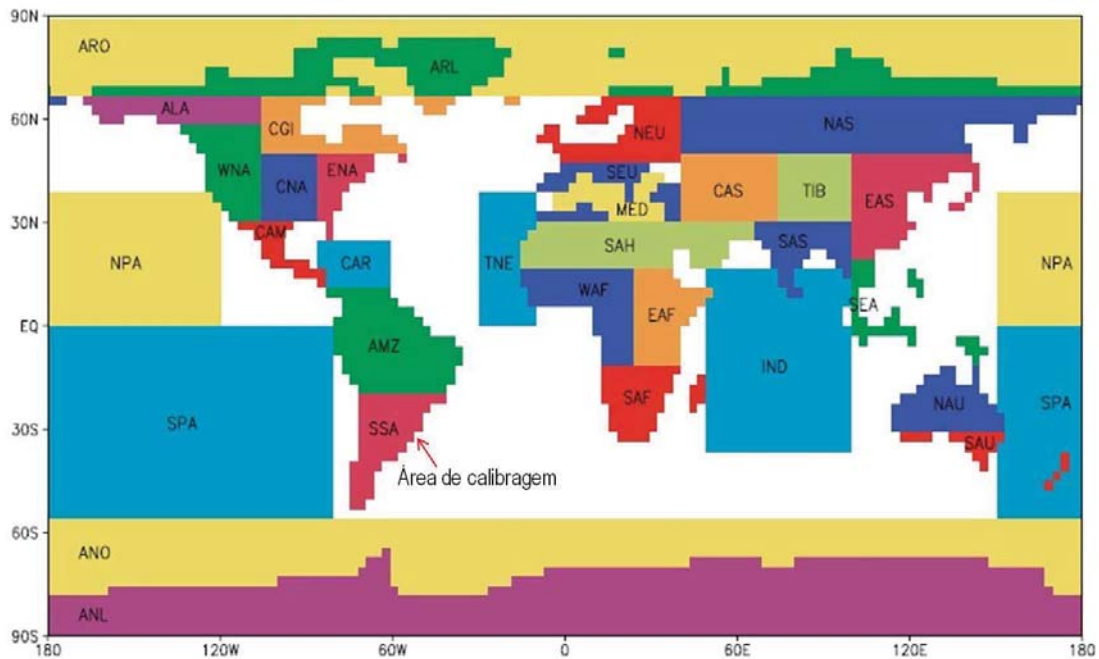
emissão considerados na estimativa dos cenários SRES, Rahmstorf et al. (2007) observam que os modelos atuais baseados em tais cenários, provavelmente já estejam sendo subestimados, de acordo com as concentrações de CO<sub>2</sub> observadas na atmosfera desde a disponibilização destes cenários pelo IPCC (2001) .

Outra característica do cenário de emissão SRES - A1B é a consideração de que haverá um equilíbrio entre fontes fósseis e não fósseis, estas baseadas em tecnologias menos agressivas ao sistema climático, como as fontes renováveis, por exemplo (NAKICENOVIC et al., 2000). Dessa maneira, consideramos que até o ano de 2050 haverá um desenvolvimento tecnológico no sentido de viabilizar novas fontes de energia, como já vem acontecendo, mas essa tendência a médio prazo não será suficiente para diminuir significativamente a dependência de nossa sociedade dos recursos energéticos, o que demandaria mudanças profundas na atual forma de organização social e relação com os recursos existentes.

A escolha do Modelo de Circulação Geral UK-HadCM3 é embasada pelo estudo de Marengo (2007) que aponta seu bom desempenho em simular os diferentes climas da América do Sul. É importante lembrar que as espécies consideradas neste estudo habitam uma região de grande heterogeneidade espacial (Serras do Mar e Mantiqueira ao longo da costa brasileira), o que influi negativamente na capacidade preditiva dos modelos climáticos. Dessa forma, é crucial que a escolha do Modelo de Circulação Geral (GCM) a embasar os modelos de nicho ecológico seja tão criteriosa quanto possível. No caso do HadCM3, há que se ressaltar ainda que as predições embasadas pelo mesmo, em comparação com os demais GCMs apresenta os resultados mais “pessimistas”. Desse modo, os resultados apresentados neste trabalho constituem uma resposta ao modelo que considera as alterações climáticas mais drásticas, quando comparado com os outros modelos que integram o AR4 (IPCC, 2007).

Tendo se definido o cenário de emissão, o Modelo de Circulação Geral, e as fatias de tempo a serem analisadas (presente, 2020 e 2050), partimos para a definição da área de calibração dos modelos de nicho ecológico (MNE), ou seja, a área sobre a qual arbitrariamente decidimos que será considerado o nicho das espécies em questão. Neste caso optamos por utilizar a área correspondente à décima segunda região de acordo com a regionalização proposta por Ruostenoja et al. (2003) e utilizada pelo Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC como SSA (Southern South América), localizada entre as latitudes 55 e 20 sul e entre as longitudes 75 e 40 oeste (figura 4).

**Figura 4 – Regionalização Climática proposta por Ruosteenoja et al. (2003) e adotada pelo IPCC-AR4. A sub-região SSA está apontada na figura.**



Fonte: Ruosteenoja et al., (2003)

Os critérios para definição da área de calibragem, escolha do GCM mais robusto para tal área, e definição do cenário de emissão SRES mais representativo das condições que já estão sendo observadas, foram cuidadosamente escolhidos com base no próprio AR4 e em outros trabalhos que lidaram com as deficiências inerentes à modelagem climática (ROOTS; SCHNEIDER, 2002) e possíveis maneiras de lidar com as mesmas. Dessa maneira, buscou-se amenizar as principais fontes de incerteza quando se trata de modelagem aplicada a cenários futuros do ponto de vista climático, apontadas por Beaumont et al. (2008) a saber:

- 1 – Incertezas com relação às emissões futuras e níveis de desenvolvimento social e tecnológico global, representadas pela definição dos cenários SRES;
- 2 – Incertezas com relação às diferentes maneiras pelas quais os GCMs calculam a interação entre os elementos que compõem o sistema climático.

Incertezas decorrentes da alteração de elementos naturais do sistema climático, como atividade vulcânica e solar também imprimem certo ceticismo a este tipo de análise. Estas, no entanto, apresentam grau muito menor de previsibilidade e não serão consideradas neste estudo.

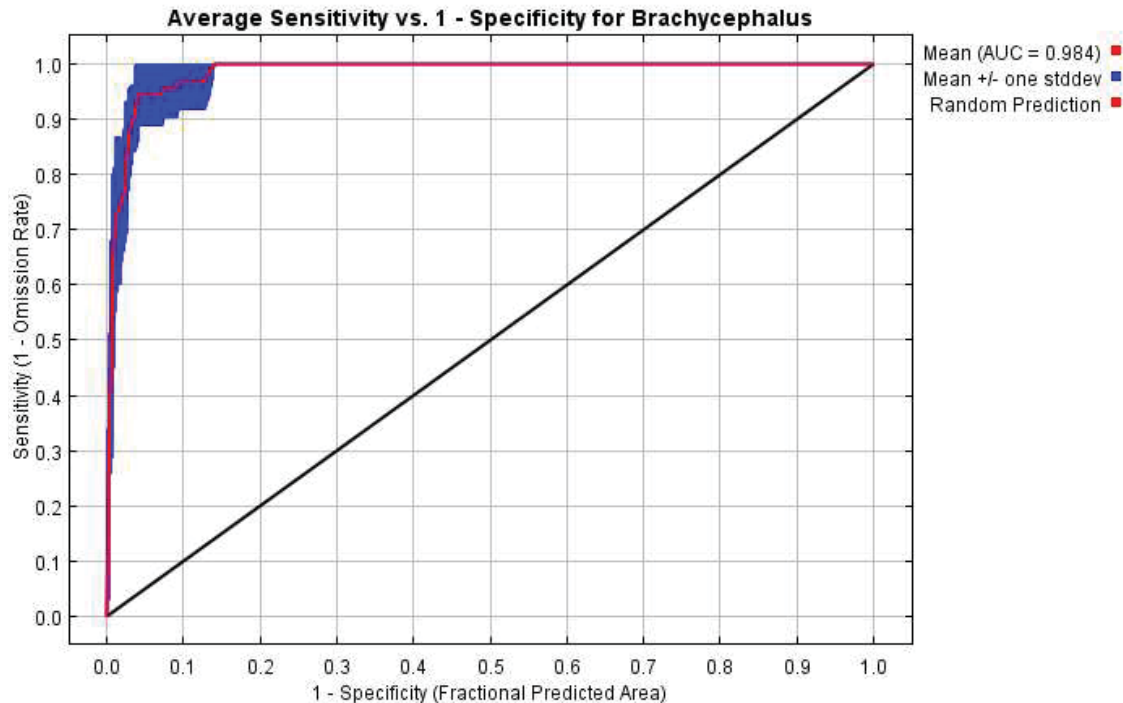
### 3.4 Escolha das variáveis climáticas e teste do conjunto de dados

Para a definição de quais variáveis deveriam ser usadas no modelo final, foram utilizados os resultados do teste de contribuição de cada variável no processo de modelagem, realizado pelo Maxent. Após ser gerado um modelo inicial, em que as 19 variáveis disponíveis na base de dados Worldclim (HIJMANS et al., 2005) foram utilizadas, foram excluídas do conjunto original aquelas que contribuíram em menos de 2% para o resultado obtido. Nove variáveis foram selecionadas dessa maneira para compor o conjunto final de variáveis a serem utilizadas na confecção do MNE final a ser extrapolado para os já citados cenários futuros. São elas: sazonalidade da temperatura, temperatura máxima do mês mais quente, variação anual da temperatura, isothermalidade, precipitação do mês mais seco, sazonalidade da precipitação, precipitação do trimestre mais úmido, precipitação do trimestre mais quente e precipitação do trimestre mais seco.

Dentre as nove variáveis constituintes do conjunto final, seis são concordantes com o conjunto utilizado por Giovanelli et al. (2010) na modelagem de diferentes anuros da Mata Atlântica, dentre eles espécies do gênero *Brachycephalus*. Estes autores utilizaram o critério de não correlação entre as variáveis para definir seu conjunto de dados, o que indica que além de biologicamente expressivas para explicar a distribuição das espécies em questão, como apontado pelo Maxent, o conjunto de dados utilizado neste trabalho também obteve sucesso em evitar a correlação entre as variáveis, evitando assim um excesso de complexidade (informações) que poderia comprometer o desempenho do algoritmo (BEAUMONT et al., 2005).

Uma vez definido o conjunto final de dados, tanto por parte das ocorrências, quanto por parte das variáveis, este foi submetido ao seguinte teste: foram geradas 10 réplicas destes modelos no Maxent utilizando o parâmetro de validação cruzada (crossvalidation), o qual reparte aleatoriamente o conjunto de ocorrências e o usa para teste do próprio modelo em cada uma das 10 réplicas. Dessa maneira foi possível avaliar a solidez do conjunto de ocorrências com relação ao conjunto de variáveis através dos índices de AUC (métrica gerada pelo Maxent para validação dos MNEs). A média entre os valores de AUC (Area Under the Curve) para as 10 réplicas foi de 0,984, um valor bastante expressivo uma vez que estes valores podem variar de 0,5, quando o modelo não é mais significativo que um modelo de distribuição aleatório até 1, quando o modelo obteve sucesso em captar os requerimentos ecológicos da espécie (ou grupo de espécies) em questão. (Figura 5)

**Figura 5 – Média entre as AUC das 10 réplicas geradas para teste do conjunto de dados. O alto valor obtido atesta a solidez na relação entre os pontos de ocorrência e as variáveis escolhidas.**

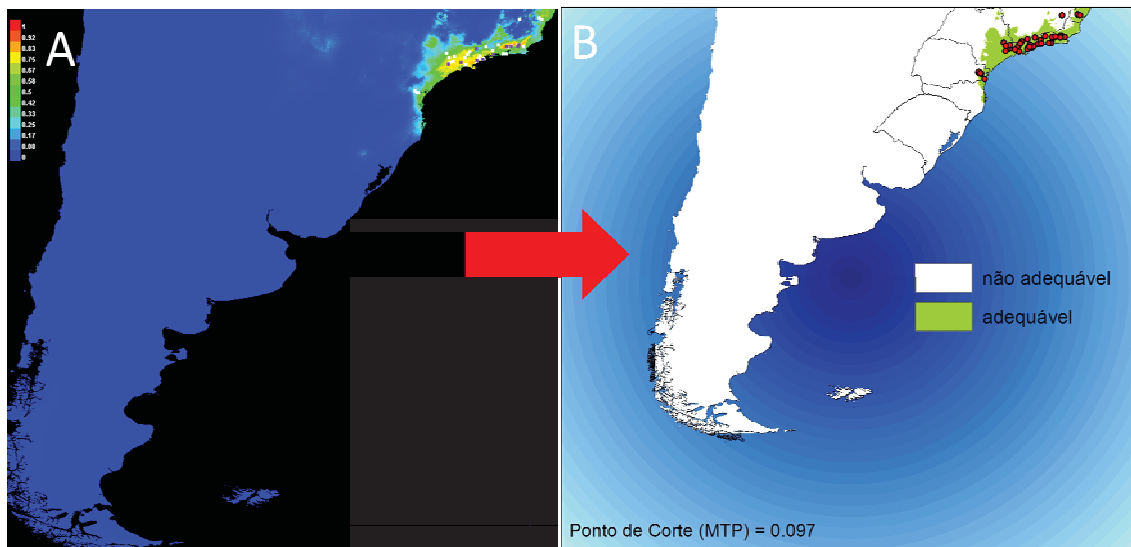


### 3.5 Definição do “ponto de corte” e análises em GIS

Os resultados da modelagem são gerados pelo Maxent em escala logarítmica (de probabilidades) por adequabilidade por pixel, variando de 0 (área não adequável) a 1 (área adequável). Os resultados neste formato são, no entanto, pouco informativos uma vez que normalmente os valores dos pixels são intermediários (entre 0 e 1). É necessário, portanto, estipular qual o valor limite (ponto de corte), que difere um pixel adequável de um não adequável, de modo a se obter um modelo mais “informativo”, e de fácil compreensão. Esta etapa tem sido amplamente discutida na literatura pertinente à construção de MNEs (FREEMAN; MOISEN, 2008) e o uso de diferentes pontos de corte pode alterar substancialmente os resultados obtidos (LIU et al., 2005). O ponto de corte utilizado neste trabalho tem sido amplamente utilizado, e é calculado automaticamente pelo Maxent a cada novo experimento. Trata-se do *Minimum Training Presence* (MTP), ou seja, o menor valor estipulado em que não há erros de omissão no modelo final. O valor obtido para este conjunto de dados foi de 0,097 e representa o menor valor dentro do qual todos os pontos de ocorrência utilizados no processo são preditos pelo modelo. Para transformação do output logístico em

um mapa mais simples e informativo de presença/ausência, o ponto de corte MTP foi aplicado com auxílio do programa ArcGis 9.3 (ESRI, 2008). Dessa maneira, os resultados que apresentamos a seguir estão representados de modo que todos os pixels abaixo do valor de MTP são considerados “não adequáveis” enquanto que os acima deste valor são considerados “adequáveis”. (figura 6).

**Figura 6 – Transformação do resultado em escala logarítmica produzido pelo Maxent (A), em um mapa binário (adequável/não adequável) (B). Ambos modelos representam o mesmo experimento com as EMGB.**



Além da aplicação do ponto de corte ilustrada pela figura 6, outros processos de tratamento dos dados e confecção dos mapas finais foram realizados em ambiente GIS através do software ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008). Análises da relação entre as variáveis climáticas com os pontos de ocorrência, utilizadas na discussão deste trabalho, foram efetuadas no software DIVA-GIS 5.4 (HIJMANS et al., 2002). Blocos diagrama e Modelos Digitais do Terreno, utilizados para testar a hipótese de migração altitudinal foram confeccionados com auxílio do software 3DEM disponibilizado gratuitamente no endereço <http://www.visualizationsoftware.com/3dem/download>.

## 4 RESULTADOS

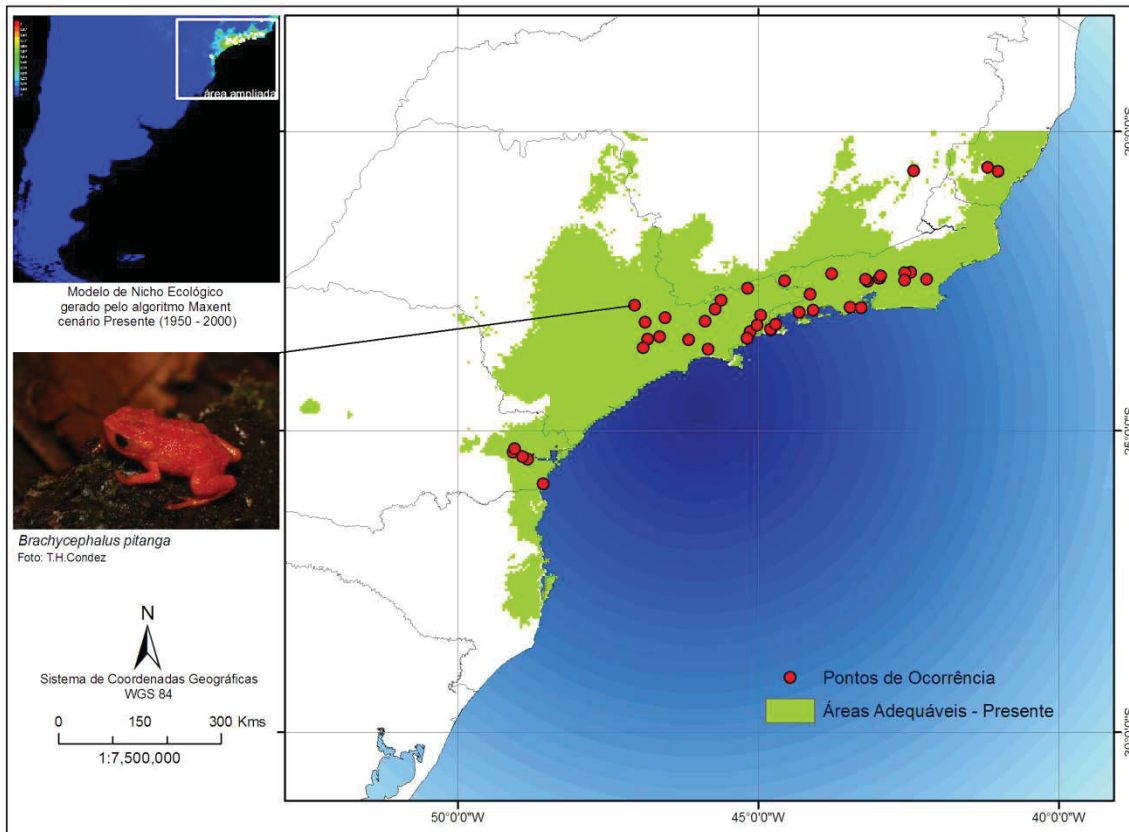
A escolha da área de calibragem restringiu a ocorrência de localidades tidas como adequáveis a norte da área considerada. Este fato deve ser, portanto, levado em consideração uma vez que acarreta em uma subpredição do nicho ecológico dessas espécies nessa região. Este efeito já era esperado, devido ao limite norte da área de calibragem (20° de latitude sul, ser quase coincidente com os registros mais setentrionais para estas espécies, sendo dois registros para *Brachycephalus alipioi* nos municípios de Vargem Alta e Castelo – ES e um terceiro para *B. ephippium* na Serra do Brigadeiro, município de Araponga – MG.

A área de calibragem escolhida (SSA) foi ainda assim mantida devido a dois fatores principais. O primeiro, de ordem metodológica, diz respeito à intenção de basear os critérios utilizados no processo de modelagem nas mesmas premissas do IPCC o tanto quanto possível, a fim de possibilitar comparações mais robustas. O segundo, de ordem geográfica, reside no fato de que o nicho das espécies de *Brachycephalus* consideradas aqui (EMGB), se restringe às cadeias orogênicas da borda leste brasileira, Serras do Mar e Mantiqueira, que são os ambientes propiciadores das condições montanas das quais dependem essas espécies. Essas serras, alongadas a NE, têm seus limites próximos aos mesmos 20° de latitude sul que corresponde ao limite norte de SSA. Dessa maneira, a quantidade de informação perdida é compensada pela possibilidade de se comparar os modelos de nicho ecológico com os modelos climáticos gerados pelo IPCC (2007).

### 4.1 Modelo de Nicho Ecológico no cenário presente (1950-2000)

A figura 7 contém os resultados do MNE gerado para o cenário presente em escala logarítmica na margem superior esquerda, variando das cores frias (menor adequabilidade) às quentes (maior adequabilidade). O retângulo destacado nessa figura corresponde ao mapa central, aonde já foi aplicado o ponto de corte (MTP = 0,097). As áreas em verde nesse mapa representam aquelas que contêm as condições propícias para ocorrência das espécies montanas de *Brachycephalus*. Os pontos em vermelho representam as localidades utilizadas na construção do MNE. A figura que mostra uma das espécies utilizadas no dataset (*B. pitanga*) é relacionada ao seu respectivo ponto de ocorrência no mapa. Detalhes de escala e projeção cartográfica são dispostos na margem inferior esquerda. Este mesmo modelo de layout será utilizado na apresentação dos MNEs para cada um dos cenários.

Figura 7 – MNE representando as áreas adequáveis no presente para ocorrência das espécies montanas do gênero *Brachycephalus*. (ver texto para maiores informações)



O modelo gerado para o cenário presente apresenta uma distribuição potencial que vai desde o estado de Santa Catarina até o limite da área de calibragem no estado do Espírito Santo. O limite norte potencial, apesar de não ser evidenciado neste trabalho, não extrapola em muito o limite de SSA. Este fato foi demonstrado em estudo prévio de modelagem para estas espécies, considerando uma área de calibragem mais ampla que a aqui utilizada (DE CORTES et al. 2011)

Podemos observar também a ausência de erros de omissão, ou seja, todos os pontos usados na construção do modelo são considerados como adequáveis. Esse fato é devido ao uso do ponto de corte MTP. Apesar de haver uma forte congruência entre as áreas preditas e áreas de maiores altitudes, algumas porções menos elevadas do terreno, que empiricamente sabemos serem inadequadas para ocorrência dessas espécies, também foram preditas como adequáveis, o que acarreta em erro de sobreprevisão. Este tipo de erro é menos prejudicial que o erro de omissão para o propósito do atual trabalho, mas deve igualmente ser levado em consideração como uma das limitações deste tipo de abordagem.

Em linhas gerais o MNE para o presente pode ser considerado satisfatório, com base em todos os cuidados prévios tomados durante a construção do mesmo, e guardadas as

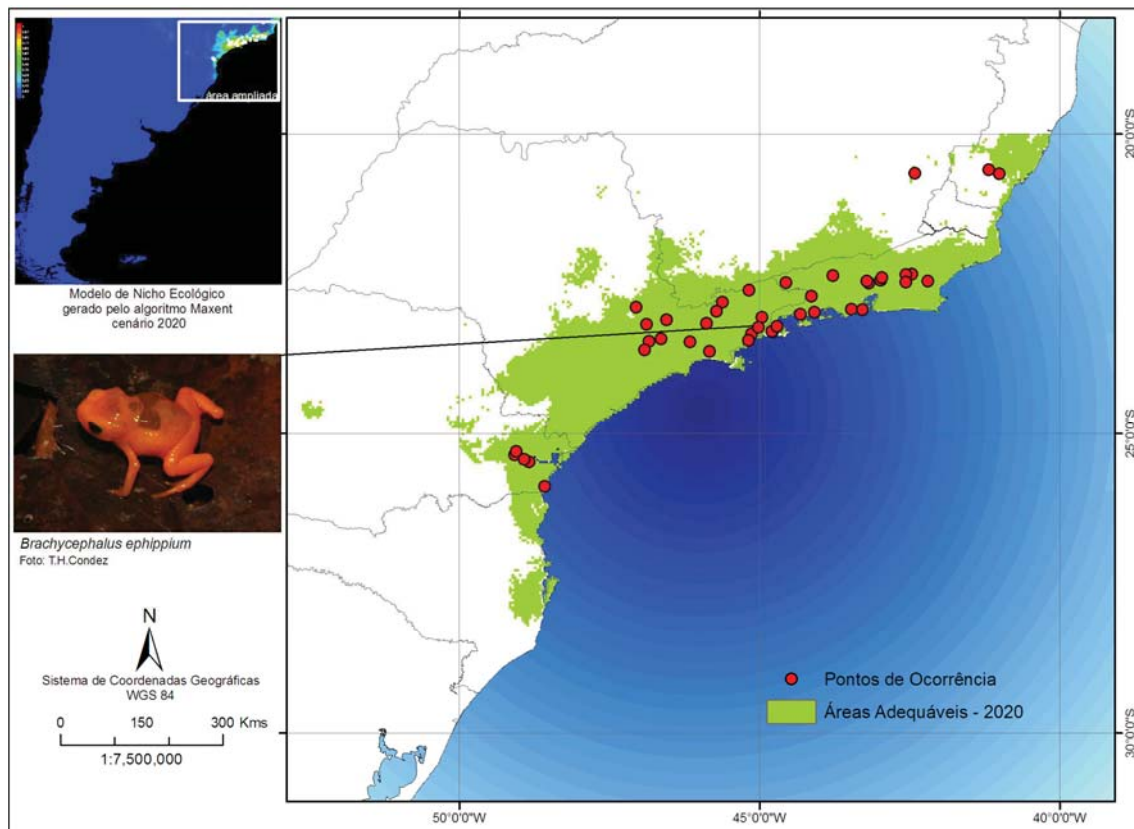
considerações pertinentes às limitações que são inerentes ao próprio método. Sendo assim, o nicho predito para as espécies montanas do gênero *Brachycephalus* definido através das variáveis climáticas já descritas, pelo algoritmo de entropia máxima, pôde ser projetado no cenário de emissão SRES A1B, para os períodos 2020 e 2050 com base no GCM UK-HadCM3.

É importante ressaltar que essa capacidade de extrapolar resultados com base em dados observados (climáticos) para cenários futuros hipotéticos, tem tornado o uso de MNEs recorrente para fins de conservação e gestão ambiental. Desta maneira, essa abordagem, além de figurar entre pouquíssimas com tal capacidade, é certamente a mais utilizada devida à sua habilidade em lidar com dados quase sempre imprecisos como são os relativos à distribuição da biodiversidade (GUISAN; THUILLER, 2005).

#### 4.2 Modelos de Nicho Ecológico nos cenários futuros (2020 e 2050)

O MNE projetado para 2020, com as especificações já explicitadas anteriormente apresentou uma diminuição de aproximadamente 25% nas áreas tidas como adequáveis, com relação ao MNE gerado com as características atuais (Figura 8).

**Figura 8 – MNE representando as áreas adequáveis em 2020 para ocorrência das espécies montanas do gênero *Brachycephalus*. Há uma diminuição de cerca de 25% no total de áreas adequáveis com relação ao cenário anterior (presente).**

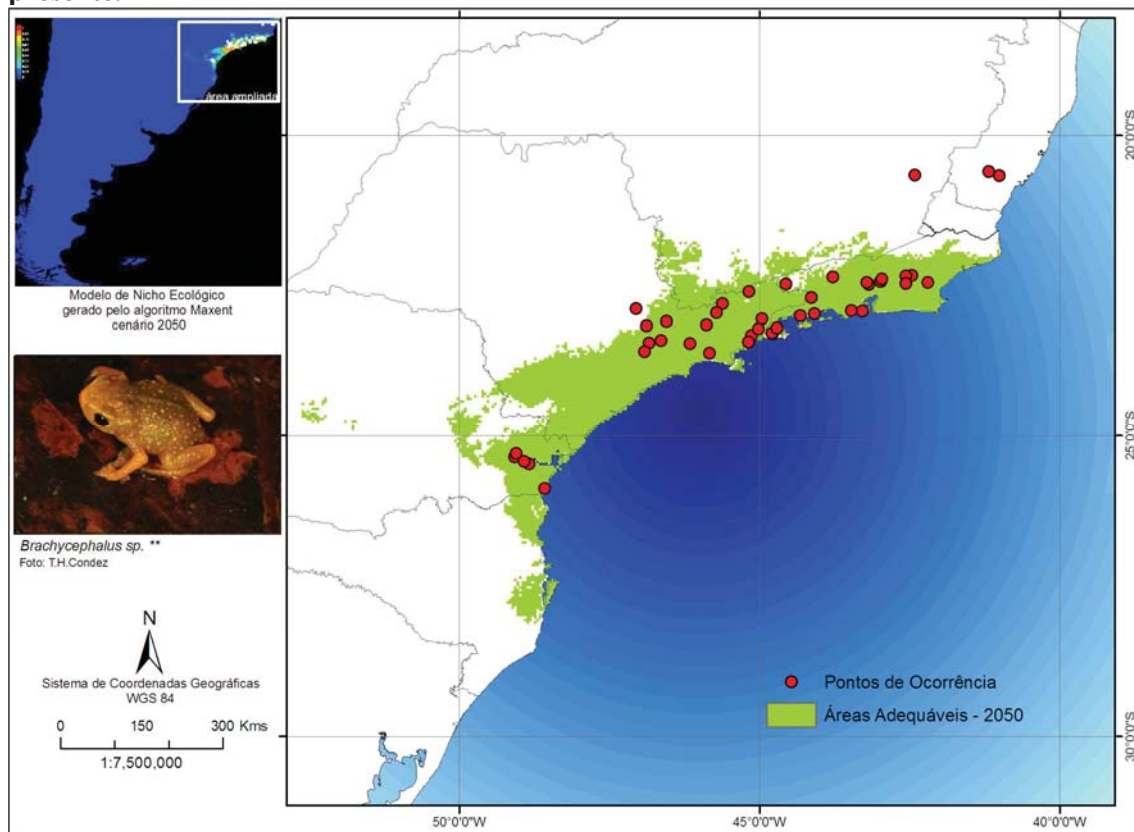


Neste cenário, o modelo já aponta impactos negativos na distribuição das espécies em questão. A diminuição em áreas adequáveis ocorre a princípio ao norte da distribuição. Uma grande área torna-se não adequável entre o norte do estado do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo. Áreas mais interioranas nos estados de Minas Gerais e São Paulo também são afetadas. A região da Serra do Brigadeiro em MG, onde há um registro de *B. ephippium*, e a região de Castelo – ES, (*B. alipioi*) tornam-se inapropriadas climaticamente para a permanência dessas espécies.

O primeiro indício das áreas de maior vulnerabilidade é apontado por este cenário. Dentre todos os pontos utilizados na construção do MNE, o da Serra do Brigadeiro é o mais distante do oceano e o de Castelo o localizado mais ao norte. É possível observar também uma pequena expansão do nicho potencial para áreas interioranas no estado do Paraná.

Com relação à projeção para o ano de 2050, há novamente uma diminuição de cerca de 25% com relação ao cenário anterior (2020), o que corresponde a uma queda de aproximadamente 50% no total de áreas preditas como adequáveis para o presente. A figura 9 mostra a distribuição potencial das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* no ano de 2050.

**Figura 9 – MNE representando as áreas adequáveis em 2050 para ocorrência das espécies montanas do gênero *Brachycephalus*. Há uma diminuição de cerca de 25% no total de áreas adequáveis com relação ao cenário anterior (2020) e de aproximadamente 50% com relação ao presente.**

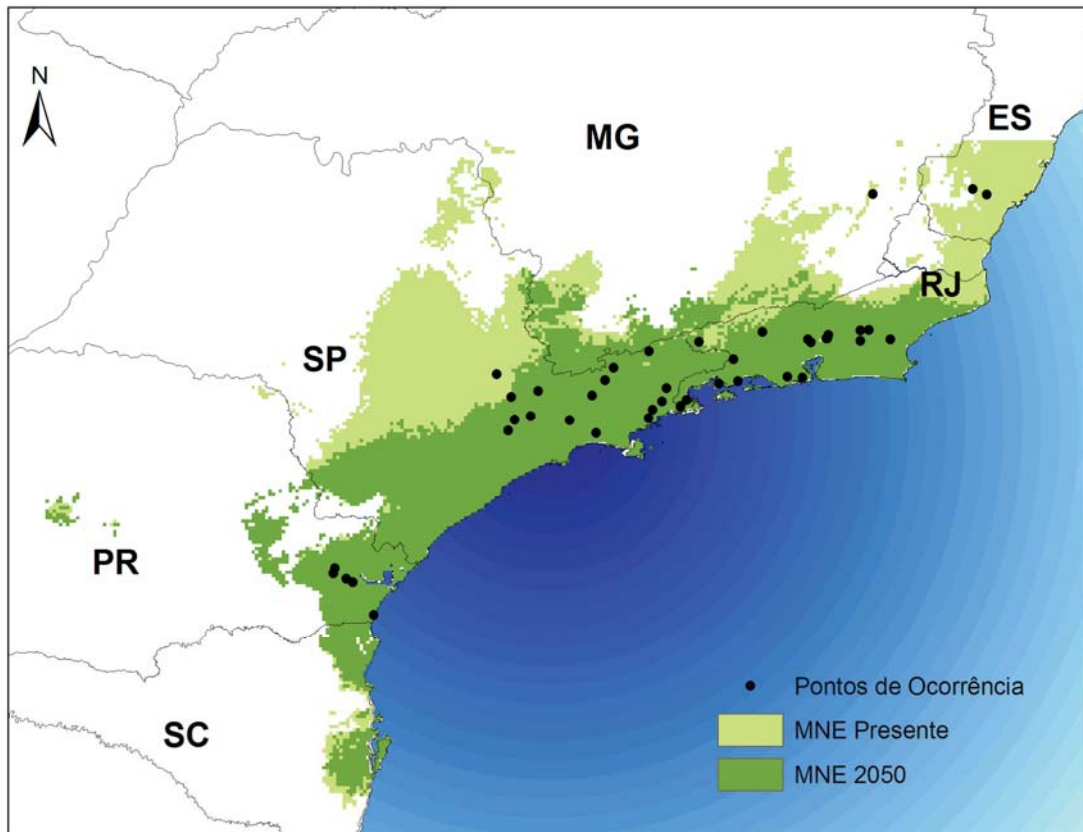


As tendências apresentadas no cenário anterior (2020) são mantidas e acentuadas em 2050. Neste cenário há uma forte contração no limite norte de distribuição das EMGB até a porção central do estado do Rio de Janeiro, de modo que ficam excluídas da distribuição predita para o cenário presente todas as áreas no estado do Espírito Santo, bem como áreas mais ao norte e interioranas no estado de Minas Gerais. De maneira geral, toda a porção norte das escarpas e reversos da Serra da Mantiqueira deixa de ser adequável neste último cenário. A restrição do modelo projetado para 2050 para regiões mais distantes da costa atinge com bastante intensidade também o estado de São Paulo, de modo que o ponto mais interiorano neste estado (representado pela ocorrência de *B. ephippium* em Campinas) também fica fora das áreas preditas como adequáveis neste cenário.

A tendência de expansão do nicho potencial dessas espécies na região sul do Brasil também é acentuada. Uma área bastante expressiva no interior do estado do Paraná adentrando o setor sul do Planalto de Paranapiacaba passa a ser adequável em 2050 com relação ao nicho predito para o presente. Com relação ao limite sul de distribuição dessas espécies, no estado de Santa Catarina, o modelo não prevê variações muito significativas.

A figura 10 sintetiza a variação predita pelo MNE na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus*, em uma comparação entre o cenário presente e o cenário 2050.

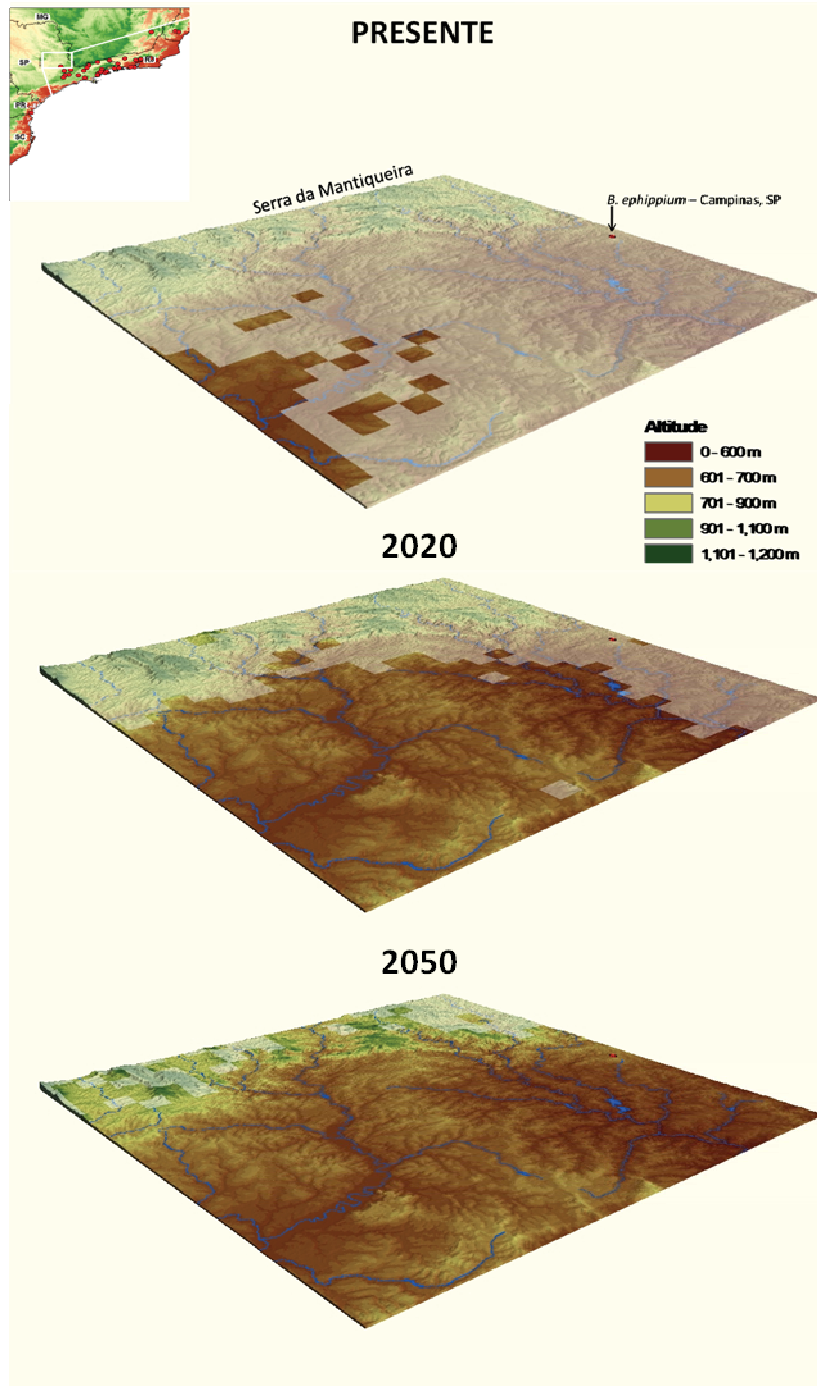
Figura 10 – Variação entre os MNEs projetados para os cenários Presente e 2050.



#### 4.3 Tendência à migração altitudinal

A fim de testar a hipótese de migração altitudinal para as espécies montanas do gênero *Brachycephalus* os resultados gerados pelos MNEs foram associados a Modelos Digitais do Terreno. A figura 11 mostra que este nicho sofre uma retração em áreas mais baixas na região analisada. Neste caso específico, em 2050 as áreas adequáveis se limitam aos cumes mais elevados da Serra da Mantiqueira. É possível observar que o ponto de ocorrência relativo à *B. ephippium* em Campinas-SP deixa de ser adequável no cenário de 2050.

Figura 11 – Migração das áreas adequáveis às EMGB em direção às áreas mais altas. A camada branca transparente sobre os modelos digitais do terreno representa os pixels tidos como adequáveis pelos MNEs. Nessa escala é possível perceber com a resolução dos pixels é relativamente grosseira.



## 5 DISCUSSÃO

Os resultados provenientes dos Modelos de Nicho Ecológico mostram cinco tendências principais de alteração no nicho das espécies de interesse neste estudo:

I – Diminuição da área total adequada aos requerimentos ecológicos dessas espécies,

II – Retração das áreas adequáveis em latitudes menores (mais próximas ao equador).

III – Retração do nicho em áreas mais interiores no continente.

IV – Migração altitudinal para áreas adequadas (*uphill*).

V – Adequação climática de áreas montanas no estado do Paraná, no setor sul do Planalto de Paranapiacaba.

A discussão dos resultados do presente trabalho será pautada por cada uma dessas tendências apontadas pelos MNEs, tentando-se levar em consideração diferentes dimensões envolvidas na estimativa das alterações na distribuição desses organismos relacionadas com mudanças nos padrões climáticos atuais. É preciso considerar por exemplo, as possíveis respostas ecológicas e fisiológicas dessas espécies a alterações climáticas. Devido a fatores tais como, permeabilidade da pele, ciclo de vida em duas fases distintas e baixa proteção dos ovos (ovos sem casca), anfíbios em geral são especialmente sensíveis a mudanças, mesmo que pequenas, no ambiente que ocupam (CAREY; ALEXANDER, 2003). Mudanças na biologia reprodutiva (interação entre o sistema de acasalamento do táxon e as diversas variáveis ambientais locais) já estão sendo observadas e relacionadas às mudanças climáticas (BEEBEE, 1995; BLAUSTEIN et al., 2001; GIBBS; BREISCH, 2001) para espécies de anfíbios no hemisfério norte, na forma da antecipação do comportamento reprodutivo. Outra maneira de estimar as respostas fisiológicas de espécies de anfíbios frente às alterações climáticas é com base em testes de resistência à temperatura, feitos com girinos e indivíduos adultos (DUARTE et al., 2011). Este tipo de correlação (respostas fisiológicas a mudanças ambientais), no entanto, deve sofrer variação de acordo com a espécie, hábitos reprodutivos, e outros fatores de âmbito ecológico, de modo que na ausência de estudos feitos para as EMGB, as inferências feitas nessa dimensão tornam-se relativamente limitadas. Há que se ressaltar que o próprio tamanho diminuto, a aparente baixa capacidade de migração e dependência de condições ambientais muito específicas sugerem uma grande vulnerabilidade por parte das EMGB frente às alterações no seu ambiente. Entre outros fatores que podem gerar mudanças na distribuição e abundância dessas espécies dentro da dimensão ecológica e fisiológica, pode se considerar, por exemplo, disponibilidade de habitat e micro-habitat, alimento, predação e competição com outras espécies.

Uma segunda dimensão que norteará a discussão das tendências mostradas pelos MNEs é a climática, no sentido de ter-se em mente, as limitações e possibilidades da modelagem climatológica e as características intrínsecas do Modelo de Circulação Geral (GCM) escolhido, bem como do cenário de emissão SRES. Desta maneira, utilizaremos as projeções climáticas para a região de interesse para avaliar o desempenho dos MNEs com base na literatura climatológica (HARVEY, 2000; IPCC, 2007; MARENGO, 2007; BUCKERIDGE, 2008). Por outro lado, a literatura climatológica será utilizada de maneira a justificar possíveis causas para as tendências apontadas pelos MNEs.

Por fim, é preciso considerar a dimensão metodológica relacionada ao uso e construção de MNEs. Avaliar o desempenho de modo a conhecer as potencialidades e limitações do modelo gerado é crucial para uma correta interpretação dos resultados. A sinergia entre as dimensões de análise a serem consideradas neste trabalho (dimensão ecológica e fisiológica, dimensão climatológica e dimensão metodológica) será, portanto, considerada na análise de cada uma das tendências de mudança de distribuição apontadas pelos MNEs. Dessa maneira, os resultados deste trabalho deverão superar a simples análise espacialmente explícita dos modelos gerados, como tem sido feito (ainda que com grande rigor estatístico) na maioria dos trabalhos que compartilham essa temática. Tomaremos os resultados dos MNEs como ponto de partida para uma discussão interdisciplinar mais profunda acerca dos possíveis impactos que mudanças climáticas teriam na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* em primeira instância, e no ambiente ocupado por essas espécies, por consequência.

## **5.1 – Tendências de alteração na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* (EMGB) apontadas pelos modelos de nicho ecológico**

### **I – Diminuição da área total que satisfaça os requerimentos ecológicos das EMGB**

A diminuição na área total predita nas projeções para os cenários futuros foi medida através do número de pixels considerados adequados à presença das EMGB. Como já exposto nos resultados, essa área diminuiu em cerca de 25% em cada uma das projeções, estando, portanto, aproximadamente 50% menor no cenário de 2050, com relação ao cenário presente. A tendência de diminuição na área adequada tem sido encontrada em diversos estudos envolvendo diferentes organismos. Com relação especificamente à herpetofauna, Araújo et al.

(2006), em estudo de modelagem feito com dados de 143 espécies de anfíbios e répteis para a Europa, concluíram que em um cenário em que as espécies possuem capacidade de dispersão ilimitada, os limites de distribuição tendem a aumentar. Por outro lado, no cenário em que as espécies são incapazes de dispersar os limites de distribuição são drasticamente afetados. Os efeitos das mudanças climáticas nessas espécies na verdade se situam seguramente entre estes dois cenários extremos de dispersão, porém com uma tendência maior ao segundo deles, de perda de habitat, uma vez que a maioria dos anfíbios possui baixa capacidade de dispersão (ARAÚJO et al., 2006). No caso das EMGB, a capacidade de dispersão parece ser especialmente limitada devido aos fatores já citados (tamanho diminuto dos indivíduos, alta dependência das condições existentes em seus microhabitats, dentre outros).

Em outra perspectiva, Haddad et al. (2008) compararam os efeitos das mudanças climáticas através de MNEs gerados para uma espécie de hábitos mais generalistas e distribuição ampla (*Hypsiboas bischoffi*) e espécies de distribuição restrita e hábitos mais especializados, pertencentes ao gênero *Brachycephalus*. Os resultados mostraram que enquanto a espécie de distribuição ampla e hábitos generalistas (tolerante inclusive a ambientes altamente antropizados) tende a expandir sua área de ocorrência, as espécies mais especializadas de *Brachycephalus* sofrem uma diminuição em áreas adequáveis, em um cenário de duplicação dos níveis de CO<sub>2</sub> para o ano de 2100, baseado no terceiro relatório de avaliação de impactos do IPCC (2001).

Um resultado encontrado no trabalho de Haddad et al. (2008), que é discordante do presente estudo, diz respeito às áreas mais vulneráveis ao aquecimento global. Os MNEs que embasaram o trabalho desses autores apontaram uma perda de habitat em áreas ao sul do país, ao contrário da tendência apontada pelos MNEs utilizados no presente estudo. Essa discordância serve bem para ilustrar como a escolha de diferentes parâmetros altera os resultados da modelagem e justifica a cautela aqui empregada perante a interpretação de tais resultados.

## **II – Retração das áreas adequáveis em latitudes menores (mais próximas ao equador)**

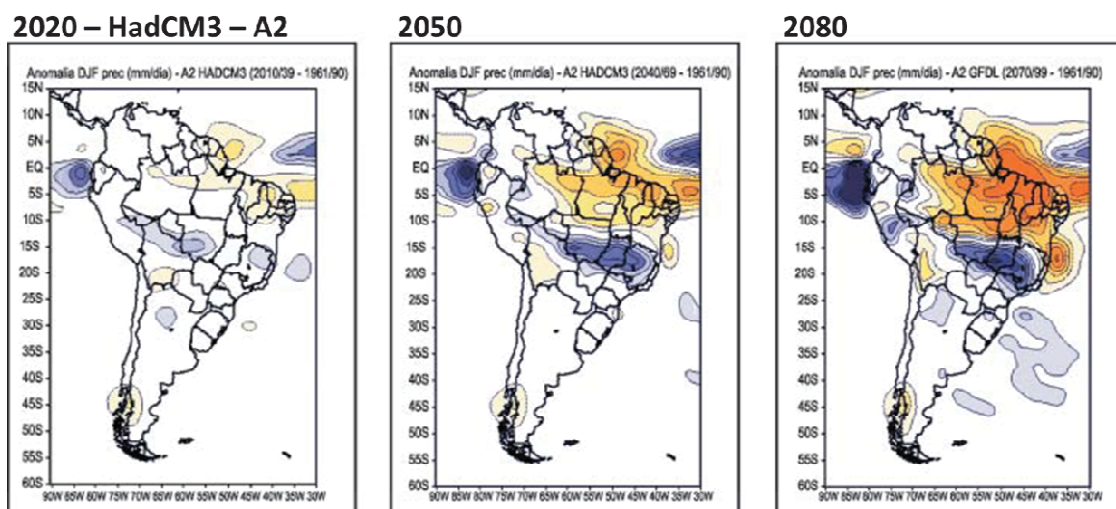
A retração nos limites a norte da área de distribuição das EMGB aparentemente é influenciada pelas tendências climáticas apontadas pelo GCM HadCM3, bem como pelo conjunto de variáveis utilizadas na construção dos MNEs.

Do total de nove variáveis climáticas utilizadas, cinco são representativas de padrões pluviométricos e as outras quatro de valores de temperatura. Estudos anteriores apontaram a

maior importância dos valores de precipitação, em detrimento dos de temperatura, para explicar a distribuição da biodiversidade e em mensurar os efeitos de alterações nestes padrões (BEAUMONT et al., 2005). No caso das EMGB, essa idéia é exacerbada pelo fato de que essas espécies estão associadas a ambientes montanos caracterizados por altos níveis de umidade provenientes da exposição praticamente constante à nebulosidade em camadas mais altas da atmosfera e foram justamente as mudanças nos padrões de precipitação que embasaram a hipótese levantada para compreensão desta tendência.

Uma análise mais pormenorizada das projeções dos GCMs que compõem o AR4 do IPCC (2007) para a América do Sul foi realizada por Marengo (2007) e foi de certa maneira concordante com os resultados obtidos pela Modelagem de Nicho Ecológico para as EMGB. Este autor observou que o modelo HadCM3 projeta um aumento na atuação na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), evento meso-atmosférico responsável por boa parte da precipitação de verão na América do Sul. É projetado também um deslocamento da ZCIT para norte, o que geraria anomalias negativas nos índices de precipitação para a região Nordeste e para a Amazônia (figura 12). Dessa maneira, a tendência a verões mais secos a NE e mais úmidos na região Sudeste pode ser associada com a predição dos MNEs, quando estes projetam uma perda de adequabilidade nas áreas mais ao norte da distribuição das EMGB.

**Figura 12 – Projeção de anomalias de chuva para o verão (DJF) com referência ao período base 1961-90 para a América do Sul.**



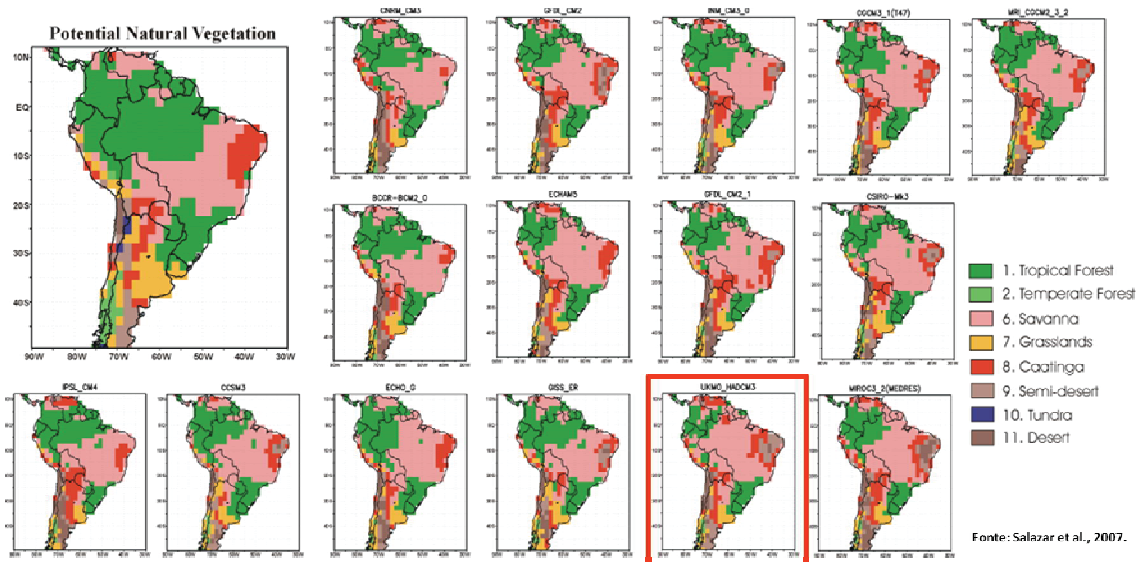
Fonte: Marengo (2006)

A figura 12 mostra a intensificação da ZCIT, representada pela faixa em azul na direção NW-SE. A escala de cores da imagem varia entre -3 e 3 mm de precipitação/dia (das cores mais quentes para as mais frias) de anomalia, com referência ao período 1961-90. Com

relação às projeções de pluviosidade do HadCM3 para os meses da primavera (SON), Marengo (2007) observa ainda que há uma “tendência a anomalias positivas na região Sudeste do Brasil, sugerindo um possível adiantamento da estação chuvosa”. Vale lembrar que um adiantamento na estação chuvosa pode ter efeitos negativos sobre os anfíbios, caso induza a antecipação do comportamento reprodutivo dessas espécies, como já tem sido observado em outras partes do mundo.

Modelos de vegetação potencial, utilizados para inferir os efeitos das mudanças climáticas nos biomas da América do Sul foram desenvolvidos por Salazar et al. (2007) e mostraram um resultado concordante com os aqui discutidos (figura 13).

**Figura 13 – Modelos de projeção dos impactos das mudanças climáticas na vegetação potencial da América do Sul. Cada modelo corresponde a um GCM. O modelo destacado em vermelho é o HadCM3. Os GCMs estão no cenário A2 para o período de 2090-2099.**

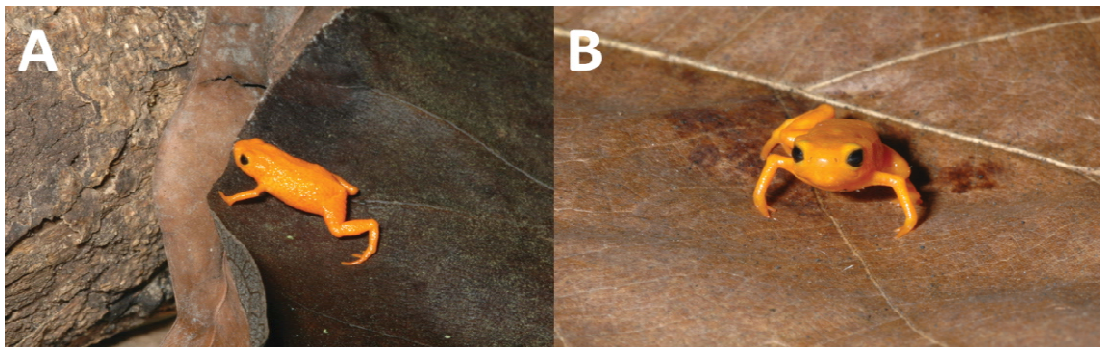


Fonte: Salazar et al., 2007

Podemos perceber que a maioria dos modelos de vegetação potencial desenvolvidos por Salazar et al. (2007) no cenário A2, período 2090-2099 demonstram a mesma tendência em aumento na aridez no Nordeste com a substituição da vegetação de caatinga por vegetação semi-desértica. De maneira análoga, as florestas tropicais de Sul e Sudeste mostram maior estabilidade. O GCM HadCM3 é também o que faz as previsões mais pessimistas para a região Amazônica. Vale lembrar que quando o efeito de fertilização da floresta tropical por CO<sub>2</sub> foi adicionado ao mesmo modelo utilizado por Salazar et al.(2007), estes efeitos de aridificação da Amazônia são amenizados (LAPOLA et al., 2009)

Dessa maneira, a tendência à retração das áreas mais a norte da distribuição das EMGB é consistente com estudos que utilizaram o mesmo GCM com outras finalidades. Essa tendência é ainda, a que mais afeta espécies isoladas, resultando na perda de adequabilidade na porção norte da Serra da Mantiqueira, o que inviabilizaria a sobrevivência de *B. alipioi* (figura 14 A) no estado do Espírito Santo e de uma população de *B. ephippium* (figura 14 B) na Serra do Brigadeiro, a leste de Minas Gerais. O caso de *B. alipioi*, parece ser o mais delicado em termos de conservação, pois essas populações encontram-se fora de Unidades de Conservação (UCs). A região mais ao norte da distribuição das EMGB, sendo a primeira a ser afetada pelas mudanças climáticas reforça a necessidade de uma estratégia de conservação mais eficaz ao longo da região serrana de Santa Teresa no Espírito Santo. Essa necessidade já foi apontada por Pombal Jr. e Gasparini (2006), de modo a mitigar ao menos as ameaças advindas da degradação do habitat impostas a essa espécie (*B. alipioi*).

**Figura 14 – A) *Brachycephalus alipioi*, Vargem Alta - ES. B) *B. ephippium* Teresópolis - RJ.**



Fotos: C. F. B. Haddad

A população de *B. ephippium* da Serra do Brigadeiro, que também sofreria essa perda de habitat, merece igual atenção. Apesar de esta serra estar protegida por legislação estadual (Parque Estadual da Serra do Brigadeiro) da perda de habitat por mudanças no uso do solo, a perda de habitat por degradação climática foge ao poder do estado em proteger esse ambiente e a sua biota. Além disso, *B. ephippium* não é uma espécie consensual, havendo a suspeita de que se trate na realidade de um grupo de espécies. Em termos gerais, a tendência à diminuição de áreas adequadas em menores latitudes aponta para a necessidade de se concentrarem os esforços em conservação na porção norte da Serra da Mantiqueira, que é onde se encontram estes dois casos de perda de habitat analisados para as EMGB. Esforços em inventariamento da biota também devem ser otimizados nessa região, em especial nos ambientes montanos, de maneira a evitar a perda do patrimônio biótico e genético antes mesmo de seu conhecimento.

### III – Retração do nicho em áreas mais interiores no continente

A tendência à retração do nicho das EMGB em regiões mais interioranas faz sentido dos pontos de vista climático e biológico, mas deve ser considerada com cautela. Isso porque grande parte das áreas preditas que deixam de ser adequáveis nas projeções futuras, em regiões no interior dos estados de Minas Gerais e São Paulo, correspondem na verdade, a áreas sobrepreditas pelos modelos. Os erros de sobreprevisão ocorrentes nessas áreas foram identificados pelo conhecimento prévio que se tem acerca da distribuição dessas espécies, o que nos permite afirmar que as EMGB não se encontram abaixo dos 600 metros de altitude, ou em áreas cobertas por vegetação semidecídua e formações mais abertas, por exemplo, como é o caso de muitas dessas áreas interioranas preditas pelo MNE inicial.

A previsão de perda de grandes áreas, em especial no interior de SP, foi, portanto, erroneamente predita pelos MNEs, devido a limitações decorrentes da resolução relativamente grosseira das variáveis, ou por falta de variáveis que representem outros atributos ambientais relativos à distribuição dessas espécies, como altitude, índices de vegetação e uso do solo. Este tipo de erro é preferível aos erros de omissão (quando um ponto sabidamente adequado à espécie é tido com não adequado pelo MNE) quando se pretende projetar os modelos em cenários climáticos alternativos, como neste trabalho. No entanto, a análise dos resultados deve levar em consideração, tanto quanto possível, o conhecimento de especialistas acerca da distribuição real da espécie, bem como da realidade dos ambientes em que ocorre. Dessa maneira, a chamada “expert driven analysis” é crucial de modo a se reconhecer na escala gerada pelos MNEs áreas realmente passíveis de serem habitadas (GUISAN & THUILLER, 2005), bem como aquelas que, por deficiências da própria abordagem ou do conjunto de dados utilizado, são preditas como adequáveis, apesar de não comportarem os organismos em questão.

Como já mencionado, esta tendência de retração de nicho em áreas interioranas, apesar de estar em parte relacionada aos erros de sobreprevisão discutidos, faz bastante sentido dos pontos de vista biológico e climatológico. Isso porque os ambientes aos quais essas espécies estão associadas, nas cadeias elevadas da costa brasileira (Serras do Mar e Mantiqueira) são altamente influenciados por efeitos de maritimidade, em favor dos de continentalidade, em sentido mais restrito. Em um sentido mais amplo, as características climáticas decorrentes da circulação oceânica e atmosférica no hemisfério sul, associadas à complexidade do terreno, conferem àquela região características climáticas singulares, com presença de altíssimos níveis de precipitação e grande variabilidade interna. Estas características, geográficas em

primeira instância, permitiram, por exemplo, que grande parte da costa brasileira fosse originalmente coberta pela extremamente biodiversa Mata Atlântica. Permitiu também, que este bioma fosse composto pela associação de diferentes fitofisionomias, reflexo da variabilidade climática interna, e que com certeza foram bastante relevantes na megadiversificação da sua biota. Em última instância, as características geográficas citadas permitiram que uma categoria de florestas ombrófilas montanas, associadas à presença quase constante da nebulosidade relacionada aos altos níveis de umidade nas vertentes escarpadas das Serras do Mar e da Mantiqueira, criasse condições favoráveis à sobrevivência de espécies adaptadas a um clima mais ameno e úmido em regiões tropicais, com no caso das EMGB.

É razoável pensar, portanto, que em um cenário de instabilidade climática, as áreas mais diretamente associadas com os ambientes montanos habitados pelas EMGB, que correspondem às cadeias costeiras orientais do Brasil, tenham maior capacidade de suportar os microhabitats necessários à permanência dessas espécies do que as regiões interioranas na bacia do Paraná (SP). Essas últimas com tendência a um relevo mais aplainado e com predominância de menores altitudes. A tendência de retração de nicho em áreas interioranas é complementar à de migração altitudinal descrita a seguir, devido à conformação geográfica da área de distribuição das EMGB.

#### **IV – Migração altitudinal (uphill) das áreas adequáveis**

A tendência à migração altitudinal, também chamada de “*uphill*” pela literatura, tem sido registrada como uma resposta de diferentes grupos de organismos frente às mudanças climáticas registradas no século passado e ainda em curso (WALTHER et al., 2002). A idéia básica por trás dessa tendência é bastante simples. Em geral, podemos assumir que os organismos que ocupam maiores altitudes, em regiões montanas, são aqueles adaptados a condições climáticas mais amenas que as registradas nos vales e planícies. Este tipo de distribuição pode ser entendido, portanto, como se os picos mais elevados se configurassem como “ilhas” ou “refúgios climáticos” em meio a climas mais quentes registrados nos vales (HILBERT et al., 2003). Dessa maneira, a maioria das espécies que apresenta distribuição montana, como é o caso das EMGB, já estejam em condições de isolamento populacional devido a fatores climáticos. Partindo desse princípio, é razoável se considerar que à medida que as temperaturas médias aumentam os climas mais quentes antes restritos a menores altitudes, passem a ocorrer em altitudes médias e altas, e que a biota acompanhe essa mudança na distribuição climática “montanha acima”. Walther et al.(2005) mostra um enriquecimento

da flora no cume dos Alpes suíços durante o século passado, comprovando essa mesma tendência. Por outro lado, à medida que a riqueza de espécies parece estar aumentando nos cumes, declínios populacionais têm sido observados em médias altitudes. Pounds et al. (1999) relacionaram o declínio observado em 20 de 50 espécies de anfíbios na floresta nebulosa de Monteverde na Costa Rica, com a elevação da linha de neblina, responsável por prover grande parte da umidade daquele ambiente. A constatação de que o declínio nessas populações, assim como o observado para algumas espécies de pássaros na mesma floresta, era relacionado com a frequência menor de dias de névoa no inverno mostra como os efeitos das mudanças climáticas podem afetar de maneira indireta a biodiversidade.

Apesar de aparentemente haver uma grande semelhança entre a floresta de Monteverde, na Costa Rica, e os ambientes habitáveis pelas EMGB (ambas florestas ombrófilas montanas diretamente influenciadas pela umidade proveniente de sistemas nebulares) a comparação direta entre os efeitos já observados nas espécies da Costa Rica e os possíveis efeitos das mudanças climáticas nas EMGB deve ser cautelosa, uma vez que certas características geográficas diferem bastante entre esses ambientes.

Se considerarmos, por exemplo, as tendências em eventos climáticos extremos observadas nas últimas décadas, a elevação da linha de neblina na floresta de Monteverde parece consistente com o aquecimento das águas do Atlântico, responsável pelo aumento na frequência de tornados e furacões naquela região. Já se tratando da região habitada pelas EMGB, a tendência apontada pelo modelo HadCM3, de intensificação da ZCIT no verão, parece estar se confirmando, o que pode estar relacionado com o aumento na frequência de eventos extremos de pluviosidade na região Sudeste do Brasil, bem como com a intensificação das secas no Nordeste. Neste caso, um aumento de umidade ao longo de grande parte da distribuição das EMGBs parece inconsistente com a diminuição na frequência de dias com névoa.

De qualquer maneira, se entendermos os cumes das serras onde se distribuem as EMGB como refúgios climáticos, devemos assumir que a tendência de deslocamento desses refúgios em direção aos picos dos morros (e conseqüente diminuição dessas áreas) é uma grave ameaça aos organismos diretamente dependentes das condições ambientais propiciadas por esses ambientes.

Um fator agravante deste tipo de tendência baseia-se no fato de que além de a área total adequável diminuir para essas espécies à medida em que é restringida aos cumes, essas novas áreas na maioria dos casos não possuem as características necessárias para suportar uma colonização por parte das EMGB. Tratam-se de áreas mais pedregosas, com solo menos

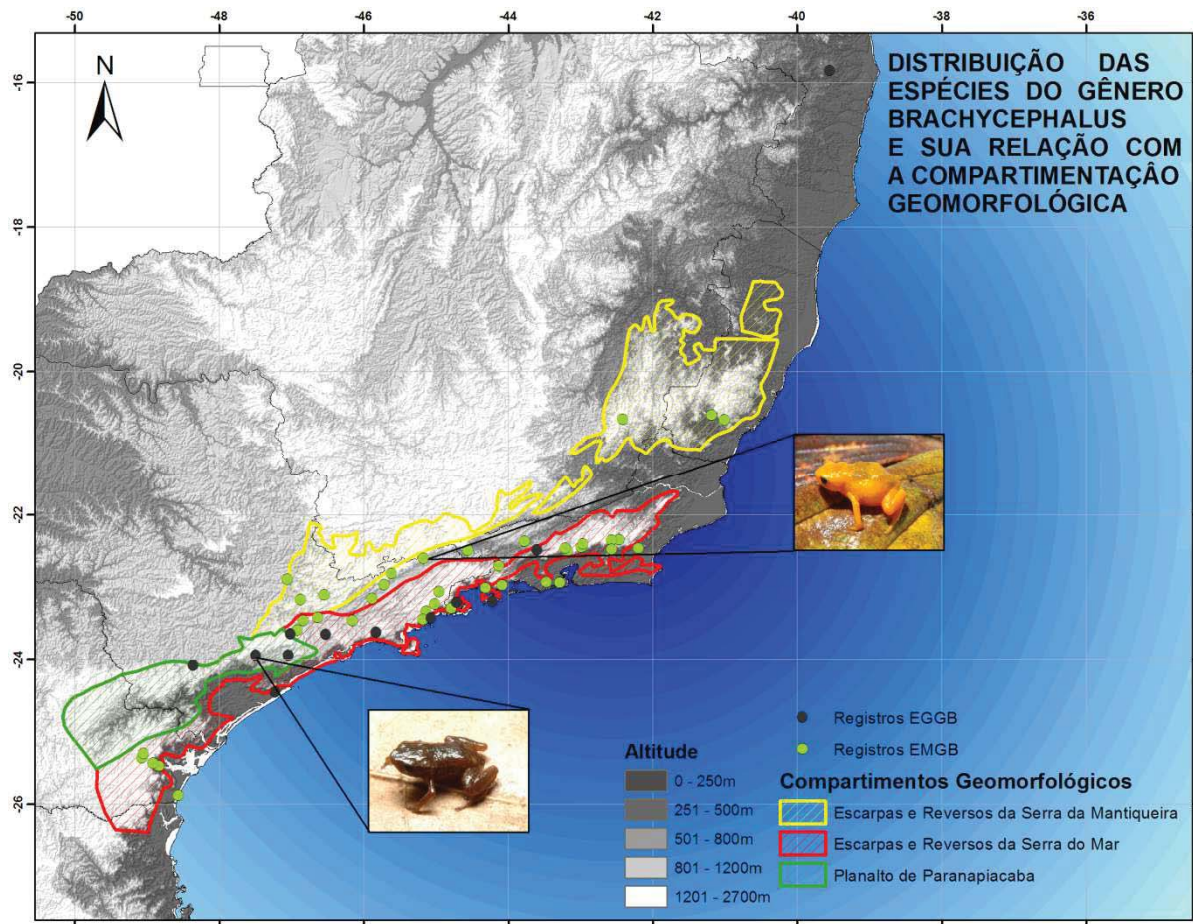
desenvolvido, e nos picos mais íngremes, coberta por vegetações abertas como campos de altitude. O tempo necessário para que condições favoráveis à manutenção dessas espécies (vegetação adequada, uma camada de serapilheira razoável) sejam “criadas” nessas novas áreas, parece ser maior do que o que as espécies poderiam tolerar em condições adversas.

#### **V – Adequação climática de áreas montanas no estado do Paraná, no setor sul do Planalto de Paranapiacaba**

Esta última tendência é também a única à expansão das áreas adequáveis para as EMGB. De acordo com as projeções dos MNEs, uma área considerável no setor sul do Planalto de Paranapiacaba deve tornar-se adequável a essas espécies. Atualmente existe registro de uma espécie do gênero *Brachycephalus* para este planalto (*B. hermogenesi*), porém esse registro não foi considerado em nossas análises por não pertencer ao grupo de espécies com ocorrência Montana (EMGB). *Brachycephalus hermogenesi* pertence a este segundo grupo de espécies que apesar de compartilhar várias características biológicas e ecológicas com as espécies montanas do gênero (tamanho diminuto, dependência de vegetação fechada, hábitos reprodutivos, atividade diurna e etc.), se difere por possuir distribuição geográfica ampla ocorrendo também em menores altitudes e coloração conspícua. Este segundo grupo de espécies, que compreende *B. hermogenesi*, *B. didactylus* e *B. pulex* (EGGB) pode ser encontrado em áreas com menores altitudes, sendo aparentemente mais tolerantes a outros tipos de ambientes.

A figura 15 mostra a distribuição das espécies do gênero *Brachycephalus* com relação aos principais compartimentos geomorfológicos a que estão associadas. As espécies são divididas em dois grupos, sendo um o foco deste trabalho (EMGB), e outro aqui chamado de EGGB (Espécies Generalistas do Gênero *Brachycephalus*) correspondendo às demais espécies desse gênero.

**Figura 15 – Distribuição das espécies do gênero *Brachycephalus* e sua relação com a compartimentação geomorfológica. O Planalto de Paranapiacaba esta contornado em verde.**



Além disso, é sabido que certas áreas deste planalto atendem aos atributos ecológicos requeridos para presença das EMGB, como florestas ombrófilas bem conservadas e altitudes elevadas que propiciam a interação freqüente dessas áreas com a alta umidade atmosférica. Desse modo, o hiato existente na distribuição das EMGB, justamente nessa região (sul de SP, norte do PR), é curioso. É possível que esforços mais intensivos de inventariamento nessa região resultem no conhecimento de novos registros para o gênero.

## 6 CONCLUSÕES

As tendências de alteração na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* que foram apontadas pelos Modelos de Nicho Ecológico nos permitiram estimar as maiores vulnerabilidades deste grupo de espécies com relação às mudanças climáticas. De modo geral, as áreas de limite de distribuição estão mais sujeitas aos impactos negativos das mudanças climáticas, enquanto as áreas centrais mostram maior estabilidade. Toda a porção norte da Serra da Mantiqueira perde adequabilidade para presença das EMGB no cenário 2050. Essa região seria, portanto, prioritária no sentido de novos inventariamentos de maneira a se conhecer melhor sua biota. O desenvolvimento de estratégias de conservação mais eficazes nessa região é desejável e os resultados obtidos neste estudo corroboram essa necessidade, já apontada por Pombal Jr. e Gasparini (2006). Uma segunda região de especial interesse é o Planalto de Paranapiacaba. O hiato existente na distribuição das EMGB, associado às características aparentemente favoráveis à ocorrência dessas espécies torna essa região um alvo potencial para prospecção de novos registros para o gênero. Os resultados dos MNEs igualmente corroboram este fato.

Em termos de conservação, *Brachycephalus alipioi*, parece ser a espécie mais ameaçada dentre as EMGB, pois sofre ameaças por parte das mudanças climáticas e de alterações de habitat por mudanças no uso do solo. Populações de *B. ephippium* também perdem habitat de acordo com nossos resultados, em áreas mais interioranas da distribuição em Campinas-SP e Arapongas-MG, esta última onde se encontra a Serra do Brigadeiro.

A tendência à migração altitudinal já observada para outros organismos como uma resposta frente ao aumento das temperaturas também foi apontada pelos MNEs para as EMGB, no entanto, mostramos que características geográficas particulares aos ambientes ocupados por cada espécie devem ser levadas em consideração ao se estimar mudanças na distribuição. Da mesma maneira, são as características climáticas referentes à circulação da atmosfera em meso escala, que parecem melhor explicar as tendências apontadas pelos MNEs, como a redução nas áreas em menores latitudes.

Foi possível observar também, que as tendências apontadas foram altamente influenciadas pelos parâmetros escolhidos na construção dos modelos. Isso mostra a importância de que estas decisões sejam tão criteriosas quanto possível. É desejável também que tenha uma base interdisciplinar, integrando conhecimentos advindos da climatologia, ecologia, geografia e biologia, de modo a subsidiar a análise crítica dos resultados.

Por fim, ressaltamos a importância da interdisciplinaridade na abordagem deste tipo de problema, em especial ao se lidar com ferramentas de modelagem. Ao longo deste trabalho percebemos que os limites entre modelos “bons” e “ruins” reside antes de tudo na capacidade do pesquisador em criticar os próprios resultados, e extrapolar os limites de sua própria ciência durante todas as etapas de preparação da modelagem, desde a coleta dos dados até a interpretação dos modelos gerados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ALVES A. C. R., et al., Two new species of *Brachycephalus* (Anura: Brachycephalidae) from the Atlantic forest in Paraná State, southern Brazil. **Herpetologica** 62, 221–233. 2006.
- ARAÚJO, M.B., THUILLER, W, PEARSON, R.G.. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. **J. Biogeogr.**, 33, 1712–1728. 2006.
- BEAUMONT, L. J., HUGHES, L., PITMAN, A. J., Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important?. **Ecology Letters**, 11: 1135–1146. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01231.x. 2008.
- BEAUMONT, L.J., L. HUGHES, M. POULSEN. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. **Ecological Modelling** 186: 250-269. 2005.
- BEEBEE, T. J. C.. Amphibian Breeding and Climate. **Nature** 374:219-220. 1995.
- BLAUSTEIN, A. R. et al.; Amphibian breeding and climate change. **Conservation Biology** 15:1804-1809. 2001.
- BUCKERIDGE, M. (Org.). **A biologia e as mudanças climáticas no Brasil**. 1 ed. São Carlos: RIMA, v. 1. 2008.
- CAREY, C.; ALEXANDER M. A.. Climate change and amphibian declines: is there a link? **Diversity and Distributions**, 9:111-121. 2003.
- CIAT, **Centro Internacional de Agricultura Intertropical**, 2010. Disponível em: [http://ccafs-climate.org/download\\_a1.html](http://ccafs-climate.org/download_a1.html), acesso em setembro de 2011
- CORN P.S., Climate change and amphibians. **Animal Biodiversity and Conservation**, 28, 59-67. 2005.
- COSTA, C. G. et al., Detecting the influence of climatic variables on species distributions: a test using GIS nichebased models along a steep longitudinal environmental gradient. **Journal of Biogeography**, 35, 637-646. 2008.
- DE CORTES, J. P., CONDEZ, T.H, HADDAD, C.F.B. **Projeção dos impactos das mudanças climáticas na distribuição das espécies montanas do gênero *Brachycephalus* através da modelagem de nicho ecológico**. In: Congresso Latino Americano de Herpetologia, 9, Curitiba, 2011: Anais, Sociedade Brasileira de Herpetologia.
- DINIZ-FILHO J.A.F., et al., Conservation biogeography and climate change in the Brazilian Cerrado. **Natureza Conservação**, 7, 100–112. 2009.

DUARTE, H., et al. Can amphibians take the heat? Vulnerability to climate warming in subtropical and temperate larval amphibian communities. **Global Change Biology**. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02518.x. 2011.

DUELLMAN, W.E. **Global distribution of amphibians**: patterns, conservation, and future challenges; pp. 1-30. In W.E. Duellman (ed.), *Patterns of Distribution of Amphibians: A Global Perspective*. Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore. 1999.

ELITH, J., BURGMAN, M.A., Predictions and their validation: rare plants in the Central Highlands, Victoria, Australia. In: Scott, J.M., Heglund, P.J., Morrison, M.L. (Eds.), **Predicting Species Occurrence**: Issues of Accuracy and Scale. Island Press, Washington, DC, pp. 303–314. 2002.

ELITH, J., et al., Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. **Ecography**, 29, 129–151. 2006.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. (ESRI). **ArcGIS**. Professional GIS for the desktop, version 9.3 CA. 2008.

ETEROVICK, P.C., et al., An overview of amphibian declines in Brazil with new records from Serra do Cipó, State of Minas Gerais. **Biotropica**, 37(2): 166-179. 2005.

FREEMAN, E.A., MOISEN, G., A comparison of the performance of threshold criteria for binary classification in terms of predicted prevalence and kappa. **Ecological Modelling**, 217 (1-2) 48-58. 2008.

GAA. **Global Amphibian Assessment**. Conservation International and Nature-Serve, Washington, DC, 2008. Disponível em: <http://www.globalamphibians.org>

GALINDO-LEAL, C., CÂMARA, I. G. **Mata Atlântica**: biodiversidade, ameaças e perspectivas. Belo Horizonte, Conservação Internacional, 2005.

GIBBS, J. P.; A. R. BREISCH. Climate warming and calling phenology of frogs near Ithaca, New York, 1900-1999. **Conservation Biology**. 15:1175-1178. 2008.

GRINNELL, J. The niche-relationships of the California thrasher. **The Auk**, 34:427–433. 1917.

GIOVANELLI, J. G. R., et al., Modeling a spatially restricted distribution in the Neotropics: How the size of calibration area affects the performance of five presence-only methods. **Ecol. Model.**, 221, 215-224. 2010.

GUISAN, A., THUILLER, W., Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. **Ecol. Lett.**, 8, 993–1009. 2005.

HADDAD, C.F.B.; GIOVANELLI, J.G.R.; ALEXANDRINO, J. O aquecimento global e seus efeitos na distribuição e declínio dos anfíbios. In: Marcos Buckeridge. (Org.). **A biologia e as mudanças climáticas no Brasil**. 1 ed. São Carlos: RIMA, v. 1, p. 195-206. 2008.

HARVEY, D.L.D., **Global warming**: the hard science. Toronto: Prentice Hall. 2000

HIJMANS, R.J., et al, Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **Int. J. Climatol**, 25, 1965–1978. 2005.

HIJMANS, R.J., GUARINO, L., ROJAS, E., **DIVA-GIS. A Geographic Information System for the Analysis of Biodiversity Data**—Manual. International Potato Center, Lima, Peru, 73 pp. 2002.

HILBERT, D. W., et al. Golden bowerbird (*Prionodura newtoniana*) habitat in past, present and future climates: predicted extinction of a vertebrate in tropical highlands due to global warming. **Biol. Conserv.** 2003.

HOLT, R.D. Bringing the Hutchinsonian niche into the 21st century: ecological and evolutionary perspectives. **Proc Natl Acad Sci. USA** 106:19659–65. 2009.

HUTCHINSON, G.E. **Concluding Remarks**. In: Cold Spring Harbour symposium on quantitative biology, Vol. 22, pp. 415-427. 1957.

IPCC, **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. 2007.

IPCC, **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp. 2001.

KELLY, M., GUO, Q., LIU, D., SHAARI, D., Modeling the risk of a new invasive forest disease in the United States: an evaluation of five environmental niche models. **Comput. Environ. Urban Syst.**, 31, 689–710. 2007.

LAPOLA, D.M., et al., Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: The role of CO<sub>2</sub> fertilization and seasonality. **Global Biogeochemical Cycles.**, 23. 2009.

LIU, C., BERRY, M. B., DAWSON, T. P., PEARSON R. G., Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. **Ecography.**, 28, 385-393. 2005.

MANEL S., WILLIAMS H.C., ORMEROD, S.J., Evaluating presence- absence models in ecology: the need to account for prevalence. **J. App. Ecology.**, 38, 921–931. 2001.

MARENGO, J.A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**. Brasília: MMA, 2007.

MESZÈNA, G.; SZILÁGYI, A., Lecture workshop "**Stochastic approaches to evolution**", Göteborg, 2007. disponível em: <http://evol.elte.hu/~geza/StochWS.pdf>

MORELLATO, L.P.C; C.F.H. HADDAD. The Brazilian Atlantic forest. **Biotropica**, 32(4b):786-792. 2000.

MYERS, N., et al., Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403, 853–858. 2000.

NAKIĆENOVIĆ, N.; SWART, R. Eds., **Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, 599 pp. 2000.

NAPOLI, M.F., et al., A new species of flea-toad, genus *Brachycephalus* Fitzinger (Amphibia: Anura: Brachycephalidae), from the Atlantic rainforest of southern Bahia, Brazil. **Zootaxa**, 2739: 33–40. 2011

PHILLIPS, S.J., ANDERSON, R.P., SCHAPIRE, R.E., Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecol. Model.**, 190, 231–259. 2006.

POMBAL, J. P., JR. A new species of *Brachycephalus* (Anura: Brachycephalidae) from Atlantic Rain Forest of southeastern Brazil. **Amphibia-Reptilia**, 22, 179–185. 2001.

POMBAL, J. P., JR., J. L. GASPARINI. A new *Brachycephalus* (Anura: Brachycephalidae) from the Atlantic Rainforest of Espírito Santo, southeastern Brazil. **South American Journal Herpetology**, 1, 87–93. 2006.

POMBAL, J. P., JR., E. M. WISTUBA, M. R. BORNSCHEIN. A new species of *Brachycephalus* (Anura) from the Atlantic Rain Forest of Brazil. **Journal of Herpetology**. 32, 70–74. 1998.

POUNDS, J. A., FOGDEN, M. P. L. & CAMPBELL, J. H. Biological response to climate change on a tropical mountain. **Nature**, 398, 611–615. 1999.

RAHMSTORF, S., et al., Recent climate observations compared to projections. **Science**, 316, 709. 2007.

RUOSTEENOJA, K., CARTER, T.R., JYLHÄ, K. AND TUOMENVIRTA, H. **Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios**. The Finnish Environment 644, Finnish Environment Institute, Helsinki, 83 pp. 2003.

SALAZAR, L.F.; NOBRE, C.A.; OYAMA, M.D., Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophys Res Lett**, 34: L09708 doi:10.1029/2007GL029695. 2007.

SCHNEIDER, S.H.; ROOT, T.L. **Wildlife responses to Climate Change: North American case studies**. Washington: Island Press. 2002.

SOBERÓN, J., Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. **Ecography**, 33, 159–167. 2010.

SOBERÓN, J.; NAKAMURA, M. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, 106, 19644–19650. 2009.

SPECIESLINK, **Centro de Referência em Informação Espacial (CRIA)**, disponível em: <http://slink.cria.org.br>. acesso em outubro de 2011

YOUNG, B., et al., Population declines and priorities for Amphibian conservation in Latin America. **Conservation Biology**, 15: 1213-1223. 2001.

WALTARI, E.; GURALNICK, R.P. Ecological niche modeling of montane mammals in the Great Basin, North America: examining past and present connectivity of species across basins and ranges. **Journal of Biogeography**, 36, 148–161. 2009.

WALTHER, G. et al., Ecological responses to recent climate change. **Nature**, 416, 389–395. 2002.

WALTHER, G.; BERGER, S.; SYKES, M.T. An ecological ‘footprint’ of climate change. **Proc R Soc Lond B**, 272: 1427–1432. 2005.

WIENS JA, ET AL., Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties. **Proc Natl Acad Sci, USA** 106:19729–19736. 2009.