

# A macrofisiologia e sua importância em estudos sobre mudanças climáticas

Macrophysiology and their importance in studies on climate change

**Pedro Leite Ribeiro\* e Carlos Navas**

*Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo*

**Resumo.** O clima na Terra está mudando numa velocidade sem precedentes com conseqüências ainda desconhecidas para a fauna, de forma que novas abordagens de estudos comparativos se fazem necessárias para complementar o entendimento dos possíveis efeitos das mudanças climáticas causadas pelo homem. O desafio transcende as teorizações que podem ser feitas a partir do estudo comparativo de diversas populações e espécies viventes em diferentes ambientes. A macrofisiologia estuda e compara a variação fisiológica ao longo de marcados gradientes geográficos (por exemplo, biomas), e tem por objetivo complementar a classe de estudos comparativos já consagrados na literatura. O foco inicial é entender até que ponto a evolução em determinados biomas modula ou limita grandes padrões de variação fisiológica.

**Palavras-chave.** *Macrofisiologia, mudanças climáticas, diversidade fisiológica.*

**Abstract.** The Earth's climate is changing at an unprecedented rate with unknown consequences for the fauna, so that new approaches of comparative studies are needed to supplement the understanding of the possible effects of climate change caused by Human being. The challenge goes beyond the theories that can be made from the comparative study of different populations and species living in different environments. The macrophysiology, which studies and compares the physiological variation along marked geographical gradients (eg, biomes), aims to complement the class of comparative studies already established in the literature. The initial focus is to understand the extent to which evolution in specific biomes limits or modulates large physiological variation patterns.

**Keywords.** *Macrophysiology, Climate change, Physiological diversity.*

## Mudanças climáticas

O fato que o clima da Terra está mudando numa velocidade sem precedentes é motivo de preocupação de todos os setores da sociedade, acadêmicos ou não. Na academia é um assunto que chama atenção de todas as áreas do conhecimento, desde meteorologistas que buscam entender como essas mudanças estão acontecendo e podem propor cenários preditivos, até pesquisadores que investigam as possíveis conseqüências sociais, econômicas, políticas e biológicas de tais mudanças (Buckeridge, 2008). Entre as diversas disciplinas envolvidas nesta importante discussão, a biologia faz a sua contribuição ao perguntar quais as conseqüências das mudanças climáticas sobre a biota, e ao abordar essa pergunta em diferentes níveis de organização, desde efeitos sobre a distribuição e características dos biomas (Salazar, Nobre e col., 2007; Taggart e Cross, 2009), até o impacto sobre comunidades, populações e indivíduos (Altwegg e Anderson, 2009; Shevtsova, Graae e col., 2009).

A importância das respostas para a família de perguntas acima transcende a justificável curiosidade científica sobre o que talvez seja o maior experimento involuntário de biologia jamais feito. Ao interesse no conhecimento

per sé, soma-se a necessidade de preocuparmo-nos com o impacto antrópico sobre outras espécies e nas maneiras de mitigar tal impacto. Um dos mais importantes desafios para a comunidade científica vinculada às ciências biológicas é precisamente usar todas as ferramentas de investigação disponíveis para tentar prever as conseqüências que as mudanças climáticas podem causar na diversidade, riqueza e distribuição da fauna e da flora. Essa preocupação é refletida no grande número de estudos recentes que lidam com o tema usando diferentes abordagens (Bartha, Campetella e col., 2008; Flenner e Sahlen, 2008; Woodward e Kelly, 2008; Cochrane e Barber, 2009; Davies, Purviset e col., 2009; Feehan, Harleyet e col., 2009; Heino, Virkkalae col., 2009; Lee e Chown, 2009; McCallum, McCallumet e col., 2009; Singh e Sharma, 2009; Costa e col., 2012; Katzenbergeret e col., 2012; Cassemiro e col., 2012), pois dada a magnitude e velocidade das mudanças climáticas contemporâneas é necessário colecionar o maior número de respostas no menor tempo possível (Buckeridge, 2008).

**Desafio teórico do entendimento das conseqüências das mudanças climáticas**

Contato do autor:

pedrolribeiro@gmail.com

Recebido 10abr11

Aceito 28fev12

Publicado 21jun2012

Os efeitos das mudanças climáticas sobre a fauna e a flora foram inicialmente estudados em imediata identificação com a área de ecologia, salientando as associações e correlações entre mudanças climáticas e padrões da distribuição da biota. Por exemplo, Lawler e colaboradores (2009) sugerem que num cenário otimista, de baixas emissões de gases do efeito estufa, pelo menos 10% da fauna de vertebrados da América do Norte e do Sul podem desaparecer, e que ambientes de tundra da América central e dos Andes podem sofrer uma mudança de 90% na composição de sua fauna. Outros estudos prevêem, por exemplo, mudanças na fauna aquática, aumento de espécies exóticas, impactos no zooplâncton e colapso de ecossistemas de mar profundo (Stempniewicz, Blachowlak-Samolyk e col., 2007; Cassagne, Spiegelberger e col., 2008; Mohammed e Coppard, 2008; Sprules, 2008; Walker, Degnan e col., 2008; Yasuhara, Cronin e col., 2008; Cumberlidge, e col., 2009; Lasram e Mouillot, 2009). Contudo, e como será discutido na continuação, a abordagem ecológica, mesmo se essencial, não pode ser a única, pois ela é pouco informativa no que tange aos mecanismos mediante os quais mudanças no clima afetam o desempenho ecológico dos indivíduos.

Muitos dos cenários usados para se investigar efeitos de mudanças climáticas sobre a fauna assumem relações de diversos tipos entre as condições abióticas apropriadas para uma espécie e a sua distribuição presente. No entanto, o entendimento dos mecanismos mediante os quais variáveis abióticas afetam os seres vivos, e o escopo dos ajustes possíveis como resposta a mudanças em tais variáveis, transcendem a ecologia e requerem também outras abordagens experimentais. A ecofisiologia é a disciplina que tradicionalmente tem abordado este tipo de pergunta combinando dados descritivos com uma abordagem experimental. De fato, questões associadas aos efeitos do clima sobre a fauna já eram alvo da disciplina na sua origem na década dos 1970s, por exemplo, múltiplos estudos investigaram o efeito da latitude e da temperatura no metabolismo de ectotermos (Dillon e col., 2010; Morley e col., 2007; Spicer e Gaston., 1999).

O marco teórico-conceitual para estudar efeitos do clima sobre a fauna sob a perspectiva dos efeitos individuais foi construído muito antes das mudanças climáticas serem o preocupante assunto de hoje em dia. Tal marco continua a progredir em termos da integração com outras disciplinas, avanços recentes nas ciências fisiológicas, e novas abordagens e possibilidades técnicas. Então, os efeitos de mudanças no conjunto de variáveis físicas às quais animais individuais estão expostos seriam mais bem explicados por uma disciplina que poderia ser denominada Eco-Fisiologia Comparada. Independente do nome, a abordagem fisiológica, em contexto ecológico e comparativo, parece ideal para entender as conseqüências de diferentes pressões seletivas provocadas por ambientes com características diferentes. Só que agora, com as mudanças climáticas, a abordagem comparativa, então proposta, ganha uma nova dimensão de importância (Somero, 2012).

## A macrofisiologia

A discussão sobre o papel da ecofisiologia comparativa no contexto das mudanças climáticas requer também algumas considerações sobre diversidade fisiológica. Atualmente, a pesquisa em fisiologia explora sistemas-modelo como o da mosca da fruta (*Drosophila melanogaster*) num nível invejável de detalhe que inclui aspectos moleculares, genéticos, micro-evolutivos, fisiológicos e ecológicos (Gilbert e Huey, 2001; Hoffmann, Anderson e col., 2002; Hoffmann, Sorensen e col., 2003; Overgaard, Tomcala e col., 2008). Mesmo no contexto da abordagem comparativa, existe certa especialização em modelos não-convencionais. Por exemplo, a enorme maioria da literatura sobre biologia termal de animais ectotérmicos salienta o caso de pequenos lagartos heliotérmicos, e os antigos gêneros *Rana* e *Bufo* (*Lithobates*, *Rhinella* e *Rhaebo*) que reúnem a maior parte do conhecimento fisiológico sobre anuros, e é clara uma especialização dos fisiologistas comparados em certos grupos sistemáticos (Navas e Freire, 2007). Ninguém discutiria que o conhecimento detalhado de táxons considerados sistemas-modelo é absolutamente indispensável, mas o conhecimento integrado em fisiologia comparativa requer também estudos horizontais direcionados a entender a magnitude, escopo, causas e conseqüências da diversidade fisiológica. Quando analisada desta ótica, estudos em fisiologia comparada tornam-se mais completos com a incorporação de conceitos em biodiversidade, essa integração é essencial para uma visão abrangente do significado ecológico da variação fisiológica (como postulado por F. Bozinovic e S. Chown nas suas palestras magistrais “Physiologicalmechanismssupportpatternsofbiodiversityatdifferenthierarchicallevels” e “Linking molecular mechanisms to population dynamics: challenges for evolutionaryphysiologists” respectivamente proferidas no 7o ICCPB – Brazil “IntegrativePhysiologymeetsBiodiversity 2007”).

As considerações acima são essenciais na discussão sobre uma convergência de subáreas da biologia (evolução, sistemática, ecologia, fisiologia comparada, eco-fisiologia e biodiversidade), resultando na chamada Macrofisiologia, que visa a investigação comparativa da variação fisiológica ao longo de gradientes geográficos e filogenéticos de grande escala (Jumbam, Jackson e col., 2008). Alguns dos objetivos da Macrofisiologia incluem a investigação e comparação do grau de diversidade fisiológica entre grandes divisões ecológicas tais como biomas, que pela sua vez diferem em média e variância de variáveis físicas (ver próximo parágrafo). A abordagem macrofisiológica pode trazer perspectivas únicas para se entender a influência das mudanças climáticas sobre a fauna de biomas com características contrastantes em termos da magnitude e escala temporal da variação ambiental (Scheffer, Carpenter e col., 2001; Scheffer e Carpenter, 2003; Genkai-Kato, 2007). Adicionalmente, ao manter o contexto comparativo em Macrofisiologia, o pesquisador tem a oportunidade de investigar linhagens com histórias evolutivas diferentes (Spicer e Gaston, 1999) e indagar se o ambiente pôde, por meio da seleção natural, modificar as características fisiológicas da fauna (Houniet, Thuiller e col., 2009; Mceachern, Thomson e col., 2009), favorecen-

do em contextos específicos a evolução de linhagens mais ou menos sensíveis à variações ambientais associadas a um provável evento de aquecimento global e aos eventos climáticos extremos.

### O contexto brasileiro

A discussão levantada acima é muito importante no contexto brasileiro, pois os biomas terrestres do país diferem notoriamente na média e variância de diversos parâmetros relevantes, como temperatura, umidade, precipitação (segundo dados do INPE <http://www.inpe.br/>). Além disso, no Brasil as avaliações do IPCC indicam que haverá mudanças climáticas em todos os biomas, mas não necessariamente de maneira simétrica. As projeções atuais apontam para aumentos nas temperaturas médias da Terra e nas suas variâncias, com a previsão de mudanças na configuração dos biomas que incluem possíveis aumentos nas áreas de savanas, diminuição das áreas de floresta e uma tendência de aumento de biomas secos em detrimento de biomas com maior umidade (Giorgi e Mearns, 1991; Walther, Post e col., 2002; Franks, Hooper e col., 2005). Além disso, os cenários antecipam mudanças paulatinas no regime de chuvas e aumento da frequência de anos atípicos, como foi o 2004 para o Nordeste brasileiro: nos 15 primeiros dias de janeiro daquele ano choveu 600% mais do que a média histórica para o mesmo período (Buckeridge, 2008). Portanto, além de prováveis alterações nas médias de temperatura e precipitação em todos os biomas brasileiros é esperado também um aumento de frequência de eventos climáticos extremos bem como o aumento da intensidade dos mesmos (Jones, New e col., 1999; Buckeridge, 2008). Então, estudos sobre variação fisiológica de linhagens dentro e entre biomas, particularmente da perspectiva da tolerância a eventos climáticos extremos, parecem extremamente relevantes para se entender as conseqüências das mudanças climáticas em escala macroecológica, ou seja entre biomas. Adicionalmente, o estudo da variação fisiológica ao longo de gradientes geográficos pode ser a melhor ferramenta disponível para entendermos possíveis efeitos de variações ecológicas ao longo do tempo (Donnelly e Martha, 1998), tais como as derivadas de mudanças climáticas globais.

Fica claro que o estado atual do conhecimento apresenta uma importante lacuna no referente às causas e conseqüências da diversidade fisiológica, e que existe uma proposta de abordagem, a Macrofisiologia, que visa preencher esse vazio conceitual. A abordagem macrofisiológica parece um complemento necessário para a construção do conhecimento no que tange à compreensão do universo de possibilidades de ajuste fisiológico e de seus limites especialmente no cenário de aquecimento global.

### Agradecimentos

Agradecemos as revisoras deste artigo Tiana Kohlsdorf e Melissa B. Closel pelos importantes comentários e correções que melhoraram a qualidade deste manuscrito.

### Referências

- Altwegg R, Anderson MD (2009) Rainfall in arid zones: possible effects of climate change on the population ecology of blue cranes. *Functional Ecology* 23(5): 1014-1021.
- Bartha S, Campetella G, Ruprecht E, Kun A, Hazi J e col. (2008) Will interannual variability in sand grassland communities increase with climate change? *Community Ecology* 9: 13-21.
- Buckeridge M (2008) *Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil*: Rima.
- Cassagne N, Spiegelberger T, Cecillon L, Juvy B, Brun JJ (2008) The impact of soil temperature increase on organic matter and faunal properties in a frozen calcareous scree in the French Alps. *Geoderma* 146(1-2): 239-247.
- Casemiro F, Gouveia S, Diniz-Filho, J (2012) Distribuição de *Rhinella granulosa*: integrando envelopes bioclimáticos e respostas ecofisiológicas. *Revista da Biologia* 8, 38-44.
- Cochrane MA, Barber CP (2009) Climate change, human land use and future fires in the Amazon. *Global Change Biology* 15(3): 601-612.
- Costa T, Carnaval A, Toledo L, (2012) Mudanças climáticas e seus impactos sobre os anfíbios brasileiros. *Revista da Biologia* 8, 33-37.
- Cumberlidge N, Ng PKL, Yeo DCJ, Magalhaes C, Campos MR e col. (2009) Freshwater crabs and the biodiversity crisis: Importance, threats, status, and conservation challenges. *Biological Conservation* 142(8): 1665-1673.
- Davies TJ, Purvis A, Gittleman JL (2009) Quaternary Climate Change and the Geographic Ranges of Mammals. *American Naturalist* 174(3): 297-307.
- Dillon, M. E., Wang, G. e Huey, R. B. (2010). Global metabolic impacts of recent climate warming. *Nature* 467, 704-U88.
- Donnelly M, Martha C (1998) Potential Effects of Climate Change on Two Neotropical Amphibian Assemblages. *Climatic Change*.
- Feehan J, Harley M, van Minnen J (2009) Climate change in Europe. 1. Impact on terrestrial ecosystems and biodiversity. A review (Reprinted). *Agronomy for Sustainable Development* 29(3): 409-421.
- Flenner I, Sahlen G (2008) Dragonfly community re-organisation in boreal forest lakes: rapid species turnover driven by climate change? *Insect Conservation and Diversity* 1(3): 169-179.
- Franks NR, Hooper J, Webb C, Dornhaus A (2005) Tomb evaders: house-hunting hygiene in ants. *Biology Letters* 1(2): 190-192.
- Genkai-Kato M (2007) Regime shifts: catastrophic responses of ecosystems to human impacts. *Ecological Research* 22(2): 214-219.
- Gibert P, Huey RB (2001) Chill-coma temperature in *Drosophila*: Effects of developmental temperature, latitude, and phylogeny. *Physiological and Biochemical Zoology* 74(3): 429-434.
- Giorgi F, Mearns LO (1991) Approaches to the Simulation of Regional Climate Change - a Review. *Reviews of Geophysics* 29(2): 191-216.
- Heino J, Virkkala R, Toivonen H (2009) Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future

- trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews* 84(1): 39-54.
- Hoffmann AA, Anderson A, Hallas R (2002) Opposing clines for high and low temperature resistance in *Drosophila melanogaster*. *Ecology Letters* 5(5): 614-618.
- Hoffmann AA, Sorensen JG, Loeschcke V (2003) Adaptation of *Drosophila* to temperature extremes: bringing together quantitative and molecular approaches. *Journal of Thermal Biology* 28(3): 175-216.
- Houniet DT, Thuiller W, Tolley KA (2009) Potential effects of predicted climate change on the endemic South African Dwarf Chameleons, *Bradypodion*. *African Journal of Herpetology* 58(1): 28-35.
- James RS, Kohlsdorf T, Cox VM, Navas CA (2005) 70 mg caffeine treatment enhances in vitro force and power output during cyclic activities in mouse extensor digitorum longus muscle. *European Journal of Applied Physiology* 95(1): 74-82.
- Jones PD, New M, Parker DE, Martin S, Rigor IG (1999) Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics* 37(2): 173-199.
- Jumbam KR, Jackson S, Terblanche JS, McGeoch MA, Chown SL (2008) Acclimation effects on critical and lethal thermal limits of workers of the Argentine ant, *Linepithema humile*. *J Insect Physiol* 54(6): 1008-1014.
- Katzenberger M, Tejedro M, Duarte M e col. (2011) Tolerância e sensibilidade térmica em anfíbios.
- Lasram FB, Mouillot D (2009) Increasing southern invasion enhances congruence between endemic and exotic Mediterranean fish fauna. *Biological Invasions* 11(3): 697-711.
- Lawler JJ, Shafer SL, White D, Kareiva P, Maurer EP e col. (2009) Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology* 90(3): 588-597.
- Lee JE, Chown SL (2009) Temporal development of hull-fouling assemblages associated with an Antarctic supply vessel. *Marine Ecology-Progress Series* 386: 97-105.
- McCallum ML, McCallum JL, Trauth SE (2009) Predicted climate change may spark box turtle declines. *Amphibia-Reptilia* 30(2): 259-264.
- McEachern AK, Thomson DM, Chess KA (2009) Climate alters response of an endemic island plant to removal of invasive herbivores. *Ecological Applications* 19(6): 1574-1584.
- Mohammed SWC, Coppard SE (2008) Ecology and distribution of soft-sediment benthic communities off Viti Levu (Fiji). *Marine Ecology-Progress Series* 371: 91-107.
- Morley, S. A., Peck, L. S., Tan, K. S., Martin, S. M. e Portner, H. O. (2007). Slowest of the slow: latitudinal insensitivity of burrowing capacity in the bivalve *Laternula*. *Marine Biology* 151, 1823-1830.
- Navas CA, Freire CA (2007) Comparative biochemistry and physiology in Latin America over the last decade (1997-2006). *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular & Integrative Physiology* 147(3): 577-585.
- Overgaard J, Tomcala A, Sorensen JG, Holmstrup M, Krogh PH e col. (2008) Effects of acclimation temperature on thermal tolerance and membrane phospholipid composition in the fruit fly *Drosophila melanogaster*. *J Insect Physiol* 54(3): 619-629.
- Salazar LF, Nobre CA, Oyama MD (2007) Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* 34(9).
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413(6856): 591-596.
- Scheffer M, Carpenter SR (2003) Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology & Evolution* 18(12): 648-656.
- Shevtsova A, Graae BJ, Jochum T, Milbau A, Kockelbergh F e col. (2009) Critical periods for impact of climate warming on early seedling establishment in subarctic tundra. *Global Change Biology* 15(11): 2662-2680.
- Sinervo B, Mendez-de-la-Cruz F, Miles DB, Heulin B, Bastiaans E e col. Erosion of Lizard Diversity by Climate Change and Altered Thermal Niches. *Science* 328(5980): 894-899.
- Singh SP, Sharma CM (2009) Tropical ecology: an overview. *Tropical Ecology* 50(1): 7-21.
- Somero, G. N. (2012). Comparative physiology: a "crystal ball" for predicting consequences of global change. *American Journal of Physiology-Regulatory Integrative and Comparative Physiology* 301, R1-R14.
- Spicer J, Gaston K (1999) *Physiological Diversity*.
- Sprules WG (2008) Ecological change in Great Lakes communities - a matter of perspective. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65(1): 1-9.
- Stempniewicz L, Blachowlak-Samolyk K, Weslawski JM (2007) Impact of climate change on zooplankton communities, seabird populations and arctic terrestrial ecosystem - A scenario. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 54(23-26): 2934-2945.
- Taggart RE, Cross AT (2009) Global greenhouse to icehouse and back again: The origin and future of the Boreal Forest biome. *Global and Planetary Change* 65(3-4): 115-121.
- Walker SJ, Degnan BM, Hooper JNA, Skilleter GA (2008) Will increased storm disturbance affect the biodiversity of intertidal, nonscleractinian sessile fauna on coral reefs? *Global Change Biology* 14(11): 2755-2770.
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C e col. (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416(6879): 389-395.
- Woodward FI, Kelly CK (2008) Responses of global plant diversity capacity to changes in carbon dioxide concentration and climate. *Ecology Letters* 11(11): 1229-1237.
- Yasuhara M, Cronin TM, deMenocal PB, Okahashi H, Linsley BK (2008) Abrupt climate change and collapse of deep-sea ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(5): 1556-1560.