

As mudanças climáticas e os peixes de água doce¹

Adalberto Luis Val²

INPA

O planeta vem experimentando um aumento significativo nos níveis atmosféricos dos gases de efeito estufa (GEE) desde a revolução industrial. Como resultado desse aumento, vem se observando um aquecimento geral do planeta com consequências biológicas ainda não devidamente dimensionadas. São vários os gases que causam esse efeito, mas o principal deles, pelo volume, é o dióxido de carbono oriundo, principalmente, de atividades antrópicas. Vejamos dois exemplos dessas fontes de dióxido de carbono. A biomassa vegetal, constituída basicamente de carbono aprisionado em diferentes tipos de compostos que constituem as plantas, quando queimada, libera para a atmosfera quantidades substanciais de carbono, representando uma importante fonte no contexto mundial. Assim, extensas queimadas de florestas tropicais representam uma importante fração das emissões mundiais de dióxido de carbono. Outro exemplo, refere-se a queima de combustíveis fósseis utilizada em um sem número de atividades relacionadas à vida moderna, como transporte, produção de energia elétrica, aquecimento, entre outros. O homem moderno desloca-se, quase sempre, por meio de um veículo movido a combustível fóssil que pesa cerca de quinze vezes o seu peso médio, o que representa uma produção desproporcional de dióxido de carbono gerada por meios ultrapassados de transporte. São necessárias ações imediatas para conscientização acerca dos efeitos desse comportamento e a adoção de uma nova postura. Nesses dois exemplos, as atividades do homem moderno aparecem de forma marcante e tem contribuído com o quadro recente de emissões de dióxido de carbono na atmosfera. Assim, nossas ações individuais serão fundamentais para reverter o quadro de mudanças climáticas que se desenha para as próximas décadas.

¹ O presente texto decorre de exposição realizada na Reunião da SBPC em Goiânia em 2011 e está baseado no INCT ADAPTA, que tem o suporte financeiro do CNPq e da FAPESP.

²A.L. Val, atual diretor do INPA, estuda adaptações ao ambiente aquático da Amazônia. É bolsista de produtividade 1A do CNPq. Tem participado dos estudos das causas e consequências dos desequilíbrios regionais em Ciência, Tecnologia e Educação. É membro titular da Academia Brasileira de Ciências e membro da Diretoria da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. E-mail: dalval@inpa.gov.br

Enquanto uma reversão não ocorrer, é necessário conhecer os efeitos dessas mudanças sobre a vida no planeta e, aqui no Brasil, por conta da vasta extensão continental, as águas interiores e seus habitantes merecem atenção especial. Entre estes habitantes estão os peixes, assunto desta nossa intervenção.

Os peixes de uma maneira geral são extremamente plásticos, tendo desenvolvido um amplo conjunto de adaptações, que ocorrem em todos os níveis da organização biológica, desde o nível molecular até o nível de populações e comunidades. Estas adaptações permitem a esses organismos se haver com os efeitos de mudanças naturais em seus habitats (SLOMAN *et al.* 2006; VAL 2000; VAL and ALMEIDA-VAL 1995). Adicionalmente, a plasticidade fenotípica também permite respostas a desafios ambientais causados pelo homem, exigindo ajustes que estão no limite da variação fisiológica natural. Entretanto, tais desafios causados pelo homem, com frequência, ocorrem numa velocidade dificilmente assimilável no tempo pelos processos biológicos responsáveis pela homeostase orgânica, o que por via de regra não resulta em processos adaptativos, mas em migração ou reorganização populacional. Vários são os estudos que claramente vem demonstrando que os sistemas biológicos já estão respondendo às mudanças climáticas causadas pelo homem, a partir da constatação de variações na distribuição geográfica de organismos pertencentes a vários grupos biológicos (CHEN *et al.* 2009; LENOIR *et al.* 2008; PARMESAN 2006; STELTZER and POST 2009; WALTHER *et al.* 2002).

Embora boa parte das espécies de peixes que hoje habitam nossos rios e lagos tenham enfrentado, no passado geológico, níveis ambientais de dióxido de carbono bem mais altos que os atuais (DUDLEY 1998), ainda são incipientes as informações sobre a capacidade fisiológica desses animais, e também de outros grupos, em responder às mudanças climáticas que estão atualmente em curso. Também são incipientes as informações disponíveis sobre os ajustes genéticos. É preciso ter em conta que essas variações estão acontecendo a uma velocidade bem maior que aquela registrada para o passado geológico por Dudley (1998). Vários dos últimos vinte anos, por exemplo foram se revelando sucessivamente os anos mais quentes desde que se começou a registrar a temperatura média do planeta. Além disso, mesmo que estabilizássemos as emissões de dióxido de carbono aos níveis daquelas do ano 2000, o aquecimento e mudanças decorrentes continuariam por um longo período. Os reflexos diretos ou indiretos dessas mudanças climáticas

tem sido experimentados em todos os lugares. Na Amazônia, as secas de 2005 e 2010, intercaladas pela cheia de 2009, a maior registrada, são exemplos desses efeitos. É importante realçar que os pulsos de cheia e seca na Amazônia são fenômenos naturais cujos extremos estão sendo ampliados nessas circunstâncias ambientais. Por representar a principal função de força na região (JUNK *et al.* 1989), extremos de cheia e vazante como os registrados nesses anos interferem com toda a vida na região, não só a vida aquática. Esses extremos não representam apenas uma pressão ambiental física, mas, também, química e biológica. Entender os efeitos desses extremos sobre a vida na região está entre os atuais desafios científicos, tendo em vista a diversidade ambiental e biológica existente na Amazônia.

Na Amazônia são mais de 3500 espécies de peixes, muitas delas endêmicas, que desenvolveram um vasto conjunto de adaptações às variações ambientais naturais que ocorrem em seus habitats (VAL and ALMEIDA-VAL 1991). Estas adaptações, no entanto, podem acentuar os efeitos das mudanças ambientais causadas pelo homem, como descrito abaixo. Por outro lado, é muito provável que boa parte dessas espécies de peixes tenha conservado informações genéticas relevantes que podem permitir-lhes enfrentar níveis mais altos de dióxido de carbono e ambientes mais quentes. Para conhecermos isso é necessário impor desafios climáticos controlados a esses animais e medir a expressão de genes pertinentes. Contudo, a análise de peixes expostos a desafios naturais amplificados pelas mudanças climáticas pode revelar informações relevantes acerca da capacidade adaptativa desse grupo de organismos. Há pelo menos seis efeitos biológicos decorrentes de eventos extremos: efeitos diretos, indiretos, interativos, aditivos, não-preditivos e sequenciais (ZEDLER 2010). Vejamos aqui dois desses efeitos.

Os efeitos diretos das mudanças climáticas sobre os peixes tropicais, isto é, efeitos que independem de outros fatores e provocam mudanças biológicas diretas, incluem, entre outros, as mudanças físicas de habitats, que determinam migrações de peixes para ambientes menos inóspitos (ANTUNES DE MOURA 2000; COX-FERNANDES 1989; WELCOME 1979), as mudanças na taxa de reprodução (STACEY 1984) e as consequências fisiológicas da exposição ao excesso de dióxido de carbono (BRAUNER and VAL 1996; CAMERON and IWAMA 1987; RANDALL and VAL 1993). Muitas dessas mudanças podem ampliar o intervalo adaptativo dos organismos ou levar parte dos organismos a buscar outros habitats e, se não conseguirem, reduzir drasticamente o tamanho populacional.

O desmatamento, como consequência direta ou indireta das mudanças ambientais, resultam numa maior incidência de radiação ultravioleta na superfície da coluna d'água o que pode ter efeitos dramáticos sobre várias espécies de peixes da Amazônia que dependem da interface ar-água quer seja para respirar, quer seja para alimentar-se, ou ambos, como é o caso do tambaqui, *Colossoma macropomum*. A análise dos efeitos da radiação ultravioleta (UV) sobre juvenis dessa espécie evidenciou significativos danos no material genético, mesmo quando os animais estiveram expostos a curtos períodos de tempo à radiação UV na intensidade que ocorre nas cercanias de Manaus (GROFF *et al.* 2009). A remoção da cobertura vegetal pode ter outros efeitos sobre a biologia dos peixes da Amazônia, como a fotomodificação de componentes do petróleo e lixiviação de metais para os corpos d'água.

A mineração e o transporte de petróleo de Urucu até Manaus trouxe um desafio novo para o ambiente aquático amazônico. Pouco se conhece sobre a mitigação dos efeitos do petróleo em águas doces, particularmente em um ambiente que muitas espécies de peixes, como dito, dependem da interface ar-água. Mas, um efeito de grande relevância e até então subdimensionado em ambientes tropicais é o efeito da radiação solar sobre diversos compostos presentes no petróleo, transformando-os em poluentes mais tóxicos. Esse aspecto foi estudado em tambaqui, que se revelou muito sensível aos compostos primários do petróleo, mas ainda mais sensível aos compostos fotomodificados, quando analisada a atividade da enzima GST, de enzimas hepáticas, as anormalidades nucleares eritrocíticas, os danos no DNA, a integridade celular e a expressão do gene *cyp1A* (OLIVEIRA 2010).

Com relação a lixiviação de metais para ambientes aquáticos da Amazônia, há um mundo a ser analisado. Com raras exceções, os peixes da região se mostram muito sensíveis ao aumento da concentração de metais tóxicos na água. Um exemplo recente é o estudo realizado com cobre (DUARTE *et al.* 2009). Este metal ocorre em concentrações baixas nas águas da Amazônia, exceção feita aos pontos sob influência antrópica, como pequenos igarapés urbanos, áreas de mineração, etc. Seus efeitos biológicos, entretanto, podem ser ampliados por aumentos da temperatura, redução de oxigênio dissolvido ou mudanças de pH (BEVILACQUA 2009), condições essas afetadas diretamente pelas mudanças climáticas em curso.

Mas é preciso ir além. É preciso entender como os peixes tropicais podem regular o seu genoma para enfrentar essas mudanças ambientais. Para

isso, desenhamos um experimento de grande porte por meio do Projeto ADAPTA (INCT Adapta - Adaptações da Biota Aquática da Amazônia, CNPq/FAPEAM) que prevê a incubação de várias espécies de peixes em salas especialmente desenhadas (microcosmos) para reproduzir as condições ambientais no que se refere aos níveis de dióxido de carbono, temperatura e umidade relativa. São quatro microcosmos que reproduzirão os cenários brando, intermediário e drástico previstos pelo IPCC para o ano 2100 e um no qual serão mantidas as condições atuais. Nestes “simuladores do futuro ambiental” queremos saber como peixes se comportam enfrentando os desafios ambientais previstos e como regulam o seu genoma para isso. Quais as semelhanças e diferenças biológicas entre as espécies quando enfrentam os desafios previstos. Além disso, a médio prazo, queremos saber como são os ajustes genéticos ao longo de sucessivas gerações. Por esse caminho, serão obtidas informações para desenhos mais efetivos de processos de adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre a vida no planeta.

Referências

- ANTUNES DE MOURA, N., 2000 Influência de fatores físico-químicos e recursos alimentares na migração lateral de peixes no lago Chocororé, Pantanal de Barão de Melgaço, estado de Mato Grosso, pp. 88 in *Programa de Pós Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais*. INPA/UFAM, Manaus, AM.
- BEVILACQUA, A. H. V., 2009 O uso do modelo do ligante biótico para a avaliação da contaminação por cobre em águas da Amazônia, pp. 36 in *Aquatic Biology and Continental Fisheries*. Brazilian National Institute for Research in the Amazon, Manaus.
- BRAUNER, C. J., and A. L. VAL, 1996 The interaction between O₂ and CO₂ exchange in the obligate air breather, *Arapaima gigas*, and the facultative air breather *Liposarcus pardalis*, pp. 101-110 in *Physiology and Biochemistry of the fishes of the Amazon*, edited by A. L. VAL, V. M. F. ALMEIDA-VAL and D. J. RANDALL. INPA, Manaus.
- CAMERON, J. N., and G. K. IWAMA, 1987 Compensation of progressive hypercapnia in channel catfish and blue crabs. *Journal of Experimental Biology* **133**: 183-197.
- CHEN, I. C., H. SHIU, S. BENEDICK, J. D. HOLLOWAY, V. CHEYE *et al.*, 2009 Elevation increases in moth assemblages over 42 years on a tropical mountain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **106**: 1479-1483.

- COX-FERNANDES, C., 1989 Estudo das migrações laterais de peixes do sistema lago do Rei (Ilha do Careiro), AM. Brasil, pp. PPG INPA/FUA. Manaus.
- DUARTE, R. M., A. C. L. MENEZES, L. RODRIGUES, V. M. F. ALMEIDA-VAL and A. L. VAL, 2009 Copper sensitivity of wild ornamental fish of the Amazon. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **72**: 693-698.
- DUDLEY, R., 1998 Atmospheric oxygen, giant paleozoic insects and the evolution of aerial locomotor performance. *The Journal of Experimental Biology* **201**: 1043-1050.
- GROFF, A., J. SILVA, E. NUNES, M. IANISTCKI, A. OLIVEIRA *et al.*, 2009 UVA/UVB induced lesion repair and genotoxicity in the Amazonian fishes *Colossoma macropomum* and *Arapaima gigas*. *Aquatic Toxicology* **in press**.
- JUNK, W. J., P. B. BAYLEY and R. E. SPARKS, 1989 The flood pulse concept in River-Floodplain Systems, pp. 110-127. in *Proceedings of the International Large River Symposium*, edited by D. P. DODGE. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., Canada.
- LENOIR, J., J. C. GÉGOUT, P. A. MARQUET, P. DE RUFFRAY and H. BRISSE, 2008 A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* **320**: 1768-1771.
- OLIVEIRA, C. P. F., 2010 Biomarcadores moleculares, genotóxicos e enzimáticos de efeitos do petróleo em tambaqui, *Colossoma macropomum*: subsídios para o monitoramento ambiental na Amazônia, pp. 158 in *Programa Multi-institucional de Pós-graduação em Biotecnologia*. Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- PARMESAN, C., 2006 Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* **37**: 637-669.
- RANDALL, D. J., and A. L. VAL, 1993 Carbon dioxide and acid transfer in teleost-fish. *Funktionsanalyse biologischer Systeme* **23**: 69-74.
- SLOMAN, K. A., C. M. WOOD, G. R. SCOTT, S. WOOD, M. KAJIMURA *et al.*, 2006 Tribute to R. G. Boutilier: The effect of size on the physiological and behavioural responses of oscar, *Astronotus ocellatus*, to hypoxia. *Journal of Experimental Biology* **209**: 1197-1205.
- STACEY, N. E., 1984 Control of the timing of ovulation by exogenous and endogenous factors, pp. 207-222 in *Fish reproduction: Strategies and tactics*, edited by G. W. POTTS and R. J. WOOTTON. Academic Press, New York.
- STELTZER, H., and E. POST, 2009 Seasons and life cycles. *Science* **324**: 886-887.
- VAL, A. L., 2000 Organic phosphates in the red blood cells of fish. *Comparative Biochemistry and Physiology* **125A**: 417-435.
- VAL, A. L., and V. M. F. ALMEIDA-VAL, 1991 Inositol pentaphosphate in erythrocytes of *Arapaima gigas*.
- VAL, A. L., and V. M. F. ALMEIDA-VAL, 1995 *Fishes of the Amazon and their environments. Physiological and biochemical features*. Springer Verlag, Heidelberg.

- WALTHER, G. R., E. POST, P. CONVEY, A. MENZEL, C. PARMESAN *et al.*, 2002
Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**: 389-395.
- WELCOME, R. L., 1979 *Fisheries and ecology of floodplain rivers*. Longman Inc.,
New York.
- ZEDLER, J. B., 2010 How frequent storms affect wetland vegetation: a preview
of climate-change impacts. *Frontiers in Ecology and the Environment* **8**:
540-547.