

## ORGANISMOS AQUÁTICOS E DE ÁREAS ÚMIDAS EM UMA AMAZÔNIA EM TRANSIÇÃO

Maria Teresa Fernandez Piedade  
Vera Maria Fonseca de Almeida e Val  
Aline Lopes  
Helen Sadauskas Henrique  
Luciana Mara Lopes Fé  
Florian Wittmann

**A**s intervenções antrópicas como a construção de estradas, hidroelétricas, desmatamento e mineração de metais e petróleo modificam os ambientes naturais, demandando informações sobre as respostas das populações de plantas e animais a esses novos desafios ambientais, especialmente para subsidiar ações de mitigação e conservação ambiental e definir políticas públicas. De maneira geral, as perturbações antrópicas levam ao empobrecimento biológico resultante do desaparecimento de parte das espécies da área afetada, e induzem também a exploração forçada de características adaptativas por parte dos organismos presentes na região sob influência do impacto.

As adaptações desenvolvidas pelos organismos ao longo do processo evolutivo para enfrentar as modificações ambientais naturais levam à especialização. Embora vantajosa quando o ambiente é estável, a especialização pode ter efeitos negativos para a sobrevivência em face de desafios agudos, como aqueles causados por humanos (1; 2). O ponto crítico determinando o sucesso na permanência dos organismos em um dado ambiente modificado é sua capacidade adaptativa. Contudo, os ajustes desenvolvidos pelos vários tipos de organismos para permanecerem nos ambientes modificados ainda são pouco conhecidos.

É, pois, cada vez mais importante que se reconheçam as similaridades existentes entre os processos adaptativos dos organismos que resultam na sobrevivência ou extinção das espécies e na manutenção dos ecossistemas. Os mesmos mecanismos que promovem a adaptação a determinados ambientes podem ser utilizados por espécies invasoras, modificando completamente o caminho evolutivo das espécies e das comunidades de um determinado ecossistema. Processos adaptativos que ocorreram ao longo da história evolutiva podem ser prejudiciais a espécies que sofrem com alterações ambientais adversas.

As áreas alagáveis amazônicas possuem uma grande diversidade de árvores, palmeiras, arbustos e herbáceas aquáticas, reguladas pelo pulso de inundação (3). As plantas desses ambientes devem superar as restrições decorrentes da redução periódica do oxigênio e de luz (4). Assim, a adaptação das plantas ao regime de inundação resulta da resposta das espécies à interação entre frequência, magnitude e previsibilidade dos eventos que podem levar à mortalidade (5). Nos rios e em suas áreas alagáveis, as adaptações das plantas refletem res-

postas às mudanças físico-químicas resultantes das oscilações entre fases terrestres e aquáticas (6). Elas incluem adaptações morfológicas (redução do tamanho corpóreo), anatômicas (formação de tecidos aerênquima), fisiológicas (reduções de taxas de fotossíntese) e da fenologia, podendo ocorrer mudanças nos ciclos de vida e no crescimento e reprodução de espécies, devido à sincronia com o pulso de inundação (7).

Uma sucessão de eventos geológicos ocorreu após o levantamento dos Andes e definiu as condições básicas para uma espetacular radiação evolutiva de animais e plantas na Amazônia. A drenagem da bacia, inicialmente orientada para o oceano Pacífico voltou-se, aos poucos, para o oceano Atlântico, envolvendo uma área de captação que vai desde o rio Chamaya no Peru, 79°W, até o rio Palma, 46°W, e do rio Contingo, 5°N, até o alto Araguaia, 17°S. Esse imenso espaço não é homogêneo. São inúmeros rios de todos os tamanhos, lagos, paranás, igarapés, praias, várzeas e igapós que abrigam uma das mais ricas biotas aquáticas do planeta.

Entretanto, face às condições físicas, químicas e biológicas reinantes em muitas dessas formações aquáticas, somos levados a questionar, não raras vezes, o que permite a vida nesses ambientes. Entre as condições ambientais extremas destacam-se a hipoxia e mesmo a anoxia, pHs extremamente ácidos, águas com reduzida disponibilidade mineral, temperaturas elevadas, intensos processos de decomposição vegetal durante certos períodos do ano, intensos processos de competição interespecífica, presença de fungos, bactérias e vírus patogênicos, níveis elevados de dióxido de carbono, metano e gás sulfídrico, intensa variação nos níveis de água, impondo pulsos regulares de inundação, significativas variações temporais e espaciais (8). Algumas dessas variações ocorrem em curtos espaços de tempo, impondo desafios adicionais aos organismos aquáticos. Com certeza, não há um mecanismo único suficientemente forte para explicar a manutenção da diversidade biológica desses ambientes aquáticos, mas é muito provável que muitos organismos tenham moldado ajustes similares para interagir com essas condições ambientais extremas. Que ajustes são esses? Como são desencadeados? Como são regulados?

A respiração aérea obrigatória e facultativa desenvolvida por várias espécies de peixes, de famílias e mesmo de ordens diferentes, constitui-se em um exemplo a ser analisado com mais detalhes. Essa habilidade permite que muitos peixes permaneçam nos ambientes de várzea quando condições extremas se instalam. Interessantemente, ao mesmo tempo em que essa habilidade permite a sobrevivência em períodos de hipoxia e anoxia, permite que os animais não se intoxiquem com ácido sulfídrico e metano dissolvidos que ocorrem em períodos de intensa decomposição (8). Ainda, com relação à disponibilidade de oxigênio, várias espécies de peixes são capazes de reduzir drasticamente o metabolismo, como ocorre na espécie acará-açu (9), em espécies de plantas aquáticas e insetos. Respostas similares também são observadas para peixes insetos e plantas vivendo nas águas ácidas e ionicamente pobres do Rio Negro, onde precisam contornar os problemas com a potencial perda difusa de íons. Também intrigante é a habilidade que invertebrados de regiões alagáveis desenvolveram para se antecipar

à inundação, emigrando para posi es mais altas nas plan cias alagáveis, como as copas das  rvores (10; 11).

Com certeza, na medida em que estudos de características funcionais de organismos habitando esses ambientes extremos forem realizados, novos exemplos serão revelados, já que a descri o de novas espécies avança quase que exponencialmente relativamente aos estudos acerca da intera o orgânica, exatamente onde estão ocultas as informa es que permitem entender como funcionam esses ecossistemas complexos.

**OS AMBIENTES AMAZÔNICOS NATURAIS E SUAS MODIFICA ES** A bacia amazônica vive, anualmente, pulsos de inunda o que resultam no alagamento de uma grande extensão de florestas. Os ambientes formados periodicamente pelo avanço das águas brancas e pretas são denominados várzea e igapó, respectivamente. Os mecanismos de adapta o a essas áreas alagáveis podem representar uma das principais estratégias de sobrevivência às mudanças provocadas pelo homem. Conhecer tais mecanismos torna-se de grande importância quando se busca a conserva o ambiental.

Historicamente a coloniza o da Amazônia concentrou os povoados nas calhas dos rios, principalmente nas várzeas do rio Amazonas, devido   sua maior fertilidade, o que faz com que há décadas esses ambientes sejam utilizados para a pesca, agricultura e pecuária pelas popula es tradicionais. Contudo, com a política desenvolvimentista, em particular das décadas de 1960 e 1970, grandes projetos começaram a ser implantados na região, como a Zona Franca de Manaus. Com essa política, o número de indústrias, moradias e a popula o aumentaram nas cidades da Amazônia, especialmente em Belém (PA) e Manaus (AM). O preço dessa expansão econ mica e humana   evidenciado nos múltiplos impactos ambientais, especialmente nos corpos de água cortando as cidades. A constru o de casas e estradas e a concentra o populacional levaram também ao aumento da demanda energética, culminando com a constru o de barragens e prospec o de petróleo na Amazônia. Essas a es, além de contrib irem para o desmatamento, provocarem fragmenta o e perda de habitats, vêm comprometendo as áreas alagáveis ao longo dos grandes rios e suas popula es de animais e plantas, bem como as popula es humanas, particularmente os ribeirinhos.

### PRINCIPAIS TIPOS DE PERTURBA O E RESPOSTAS DOS ORGANISMOS

#### *Polui o urbana*

A instala o humana às margens dos rios acabou resultando em processos de urbaniza o intensos em algumas partes da Amazônia. O ambiente aquático   um dos mais afetados por atividades advindas da urbaniza o. Há produ o humana de resíduos que são descartados em ambientes aquáticos, lançados em águas interiores ou em ecossistemas marinhos. Portanto, a biota aquática   uma das mais afetadas pelo desenvolvimento urbano. Dentre as inúmeras fontes de polui o aquáticas podemos citar o lançamento de esgotos

domésticos e industriais em corpos d'água, o que compromete a qualidade da água de inúmeros mananciais. Além disso, a existência de aterros sanitários e lixões próximos a rios, riachos, igarapés, ou mesmo nascentes, pode representar uma fonte de contamina o bastante perigosa.

Por mais que existam políticas públicas e regulamenta o para a atividade de descarte do lixo urbano, um dos principais produtos da disposi o inadequada dos resíduos sólidos   o chorume, um líquido percolado gerado a partir da decomposi o do lixo, que apresenta alta toxicidade ao ambiente. Este líquido tem colora o escura e sua composi o   muito tóxica, contendo metais de transi o, hidrocarbonetos e substâncias recalcitrantes. A Agência de Prote o Ambiental destaca a existência de cerca de 100 espécies químicas perigosas ao ambiente e   saúde humana no chorume, como exemplo, ars nio, tetracloreto de carbono, metais de transi o e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Além de tóxico, o chorume não   facilmente biodegradável. Ele contamina solos e águas interiores, superficiais ou subterrâneas, como também os organismos aquáticos, diminuindo seus ciclos de vida e sua capacidade reprodutiva, causando muta es genéticas que podem resultar em perda de

fertilidade e fecundidade, além de ser altamente cancerígeno. Já foi comprovado que esse líquido tem a o citotóxica em peixes, além de provocar distúrbios respiratórios e i nicos, hiperglicemia, disfun es hepáticas e neuromusculares. Sua a o genotóxica depende do tempo de exposi o e da concentra o, mas há um risco enorme da biota aquática exposta a este líquido em ter seu material genético danificado ou modificado.

Outros estudos mostram que há mudanças na distribu o e diversidade de peixes e insetos em igarapés poluídos em ambiente urbanos como Manaus e que estes são diferentes daqueles

igarapés de reservas ambientais onde a a o do homem   praticamente inexistente (12). A polui o urbana, portanto, causa muitas altera es na fauna e flora presentes nos corpos d'água urbanos e também nos adjacentes. Como resultado, ocorrem altera es nos animais residentes, perda de tamanho populacional, podendo levar até   extin o das popula es. Após certo período, observa-se a instala o de outras espécies mais resistentes aos locais onde há interven o humana, modificando totalmente a paisagem ali existente anteriormente.

#### *Polui o por petróleo e seus derivados*

Os efeitos do petróleo sobre a fauna e flora em ambientes marinhos e terrestres são bem documentados, mas em ambientes aquáticos continentais os trabalhos são escassos. Na região amazônica há uma grande lacuna de estudos avaliando os efeitos do petróleo sobre a biota. Por isso, o derramamento de petróleo pode se tornar um sério problema para as áreas alagáveis expostas a esse risco (2; 13).

Derramamentos de petróleo de grande ou pequeno porte ocorrem em áreas continentais, costeiras ou nos manguezais. Em sua maioria eles geram efeitos negativos na flora e fauna das áreas atingidas (13-16). Na região amazônica já ocorreram derramamentos

**... MUDANÇAS NA  
DISTRIBUI O E  
DIVERSIDADE DE  
PEIXES E INSETOS  
EM IGARAPÉS  
POLUÍDOS  
EM AMBIENTE  
URBANOS**

de petróleo no Peru e Venezuela, porém, inexistem informações sobre seu impacto. Couceiro et al. (15) avaliaram os efeitos do derramamento de petróleo no Lago Cururu em Manaus (AM), em 1999, pelo rompimento de um oleoduto. A riqueza da entomofauna litoral no solo do lago poluído foi menor que em áreas não perturbadas pelos efeitos diretos e indiretos dos resíduos de petróleo. Entretanto, não foi possível avaliar os efeitos sobre as macrófitas aquáticas devido ao alto grau de eutrofização dos igarapés analisados, impossibilitando separar esse efeito daquele decorrente da contaminação (16; 17).

*Os impactos de petróleo nas macrófitas aquáticas da várzea amazônica*  
Se ocorrer um derramamento de petróleo, as áreas mais afetadas serão as planícies de inundação mais populosas e férteis, as várzeas dos rios Solimões/Amazonas e Urucu, onde a ciclagem de nutrientes depende do pulso de inundação (2-5), e onde os nutrientes e os poluentes são reincorporados ao ambiente a cada ciclo de inundação do rio. As várzeas concentram, ainda, a maior população rural, especialmente do estado do Amazonas, e sua contaminação prejudicará importantes atividades econômicas como a pesca, a agricultura e o turismo, esteios da economia das populações residentes.

O petróleo pode afetar fisicamente as plantas agindo como uma barreira sobre as folhas impedindo a penetração da luz, desencadeando efeitos químicos envolvidos na toxidez derivada de sua absorção pelas folhas e raízes (Figura 1). O petróleo de Urucu é considerado leve porque contém 15% de hidrocarbonetos aromáticos (pesados), 20,2% de compostos naftalênicos (médios) e 64,8% de compostos parafínicos (leves) (18). Os óleos leves atuam em nível celular, alterando a permeabilidade da membrana ou interrompendo vários processos do metabolismo da planta. Seus efeitos parecem ser imediatamente tóxicos às plantas, enquanto que óleos mais pesados causam danos físicos, provocando asfixia e impedindo a troca de gases (19).

Embora escassos, os estudos avaliando o impacto do petróleo de Urucu sobre as plantas aquáticas mostram sua alta toxicidade. Trabalhos foram feitos com algumas espécies “chave” das várzeas amazônicas, importantes pela produção de biomassa, e por repre-

sentarem os hábitos predominantes dentre as macrófitas aquáticas desses ambientes. São elas a gramínea emergente, *Echinochloa polystachya* (Poaceae), as espécies flutuantes *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) e *Pistia stratiotes* (Araceae), e a espécie submersa *Egeria densa* (Hydrocharitaceae) que, embora não ocorra no rio Solimões, também foi exposta ao petróleo de Urucu.

*Echinochloa polystachya* (canarana) é uma espécie fundamental ao ecossistema de várzea pelos altos valores de produtividade primária, e por servir de alimento e abrigo para diversas espécies de animais aquáticos (20). Experimentos foram realizados com *E. polystachya* para avaliar o efeito do óleo de Urucu na propagação vegetativa da espécie, fundamental em seu ciclo de vida. Foi também avaliada a rebrota em diferentes níveis de contaminação e períodos do ano. O petróleo de Urucu afetou a capacidade de reprodução vegetativa de *E. polystachya*, diminuindo em 50% seu rebrotamento, com uma dosagem de 0,46 L m<sup>-2</sup> (litros de petróleo por metro quadrado de solo) em relação ao controle. As plantas que rebrotaram reduziram em 50% a biomassa aérea no tratamento de 0,12 L m<sup>-2</sup> de solo em relação ao controle. O período de plantio também influenciou a rebrota da planta em solo contaminado; plântulas estabelecidas em temperaturas mais elevadas (setembro-novembro) apresentaram menores índices de rebrotamento e de biomassa que aquelas estabelecidas em temperaturas mais amenas (julho-setembro). Isso provavelmente deveu-se à redução da viscosidade do petróleo em função da temperatura, favorecendo sua absorção pelas plantas (21). Plantas jovens, com 30 dias de plantio, tiveram o desenvolvimento prejudicado, tendo sua DL<sub>50</sub> (dose necessária de uma dada substância para matar 50% dos organismos expostos) estimada em 0,47 L m<sup>-2</sup>, em 4 dias.

A herbácea aquática flutuante *E. crassipes* (mururu, aguapé) teve sua DL<sub>50</sub> estimada em 1,24 L m<sup>-2</sup> em 91 dias de exposição, o que levou à desagregação celular observada pela análise morfológica e anatômica da planta nos tratamentos de dosagens 5,29 e 15,89 L m<sup>-2</sup> de petróleo de Urucu (22). Esta espécie possui uma grande capacidade de estocar nutrientes em sua biomassa, sendo utilizada no tratamento de águas contaminadas com diversos tipos de poluentes. Embora *E. crassipes* tenha apresentado maior resistência que *E. polystachya*, ela foi bastante sensível, limitando seu uso como fitorremediadora a áreas com baixas quantidades de petróleo de Urucu (2).

A adição do petróleo de Urucu em meio contendo *Pistia stratiotes* (alface d’água) reduziu em aproximadamente 50% a biomassa após 21 dias de exposição, e levou à mortalidade de todos os indivíduos após 98 dias em dosagens de 0,30 L m<sup>-2</sup>, mostrando que *P. stratiotes* é mais sensível ao petróleo de Urucu que *E. crassipes*. Essa diferença de sensibilidade pode estar associada às características foliares de *P. stratiotes*, pois as folhas contêm cristais de oxalato de cálcio que podem facilitar a incorporação de metais tóxicos do petróleo (22).

Finalmente, estudando os efeitos do petróleo de Urucu em *Egeria densa* Victório et al. (23) observaram um aumento da biomassa total após a exposição por 20 dias a dosagens de petróleo de 0,06L m<sup>-2</sup> e 0,12 L m<sup>-2</sup>. Isto sugere que essa planta é beneficiada pela exposição, embora a fotossíntese tenha sido interrompida em concentrações de 0,12 L m<sup>-2</sup> de petróleo. O aumento da biomassa obtido para

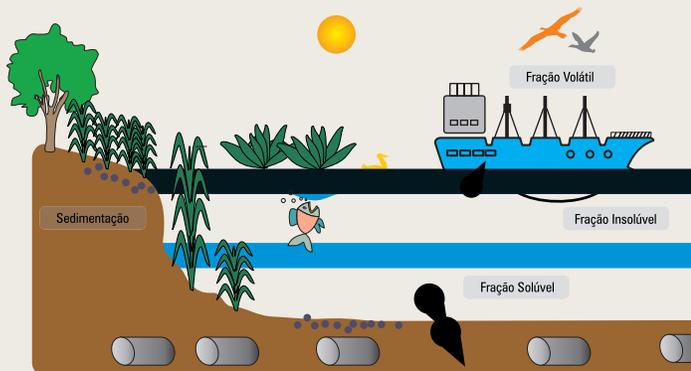


Fig. 1. Efeito do derramamento de petróleo e suas diferentes frações na fauna e flora aquática da Amazônia (Crédito: Aline Lopes).

*E. densa* pode estar relacionado a seu hábito submerso enraizado. Como o petróleo forma uma lâmina na superfície da água, a planta, além de não ter contato direto com o poluente, pode se beneficiar do enriquecimento do meio com carbono inorgânico. Entretanto, quando as fases solúveis do petróleo são liberadas no meio, os compostos tóxicos ocupam a coluna de água e os sedimentos, levando à redução metabólica.

#### *Os impactos de petróleo sobre peixes na Amazônia*

Como já mencionado, a descoberta e consequente mineração de petróleo na região de Urucu, estado do Amazonas, levaram pela primeira vez à análise das ações da indústria petrolífera em ambientes aquáticos interiores de regiões tropicais. Um desafio para a ciência, já que as informações disponíveis se referem, em sua quase totalidade, a ambientes marinhos. Em águas interiores, além da ação direta dos componentes primários, solúveis e insolúveis do petróleo, é necessário destacar o potencial efeito de compostos secundários e terciários, formados a partir da reação com compostos naturais existentes na água e de modificações estruturais causadas por exposição à radiação ultravioleta, mais intensa nos trópicos. Os efeitos já observados incluem profundos distúrbios respiratórios sobre os peixes, aumento das taxas de rebrotamento de plantas aquáticas e redução de infestação de peixes por fungos (1; 2).

Diversos estudos têm sugerido que alterações morfológicas no epitélio branquial podem representar estratégias adaptativas para a conservação de algumas funções biológicas quando o animal enfrenta mudanças ambientais, sejam elas naturais ou antrópicas (24). Alterações morfológicas nas brânquias tais como descolamento do epitélio causado por edema, diminuição da distância interlamelar e fusão parcial das lamelas promovidas pela hiperplasia das células epiteliais do filamento, foram observadas em duas espécies amazônicas: o tambaqui (*Colossoma macropomum*) e o tamoatá (*Hoplosternum littorale*), expostos durante 24 e 96 h a duas diferentes concentrações tanto da fração solúvel do petróleo (FSA) quanto da fração insolúvel do petróleo (FIA) de Urucu-AM (2,63 ml/L e 3,98 ml/L). Além disso, espécimes de *C. macropomum* expostos a FSA e FIA do petróleo de Urucu-AM durante 30 dias apresentaram alterações morfológicas branquiais mais severas e intensas, tais como fusão completa das lamelas secundárias e necrose local (Figura 2). Já, exemplares da espécie amazônica *Glyptoperichthys joselimaianus* (acari-bodó), expostos durante 11 dias a uma camada de 5 mm do óleo de Urucu-AM, também apresentaram alterações morfológicas severas nas brânquias, como hiperplasia e edema na lamela secundária, além da proliferação de células ricas em mitocôndrias ou células cloreto (25). A maioria das respostas observadas nessas espécies é de defesa (inflamatória) ou compensatória (proliferação celular), sendo que essas respostas podem ser progressivas de acordo com a dose e tempo de exposição aos compostos tóxicos do petróleo.

A desestruturação das brânquias em peixes expostos a poluentes como o petróleo pode ser explicada como uma adaptação para barrar a entrada de compostos tóxicos e evitar que os mesmos alcancem a

**(...) COMPOSTOS  
TÓXICOS  
OCUPAM A  
COLUNA DE ÁGUA  
E SEDIMENTOS,  
LEVANDO À  
REDUÇÃO  
METABÓLICA**

corrente sanguínea promovendo distúrbios na homeostase interna dos organismos (26). Contudo, essas alterações histopatológicas podem levar a distúrbios respiratórios e osmorregulatórios, que podem ser agravados com o tempo de exposição dos peixes aos poluentes. Como descrito anteriormente, grande parte das espécies de peixes da Amazônia desenvolveu adaptações morfológicas, bioquímicas, fisiológicas e comportamentais para manter a homeostase corpórea frente às variações naturais extremas da região. A contaminação dos corpos d'água da região por petróleo pode aumentar o contato com a FSA e FIA do petróleo em função das adaptações pré-existentes. Assim, espécies de respiração aérea facultativa, como o *Pterygoplichthys pardalis*, podem ficar mais expostas tanto à FSA quanto à FIA do petróleo em situações de hipóxia ambiental. Quando exposta durante 96 h a 38,86 mL/L do petróleo de Urucu-AM, essa espécie apresenta ajustes hematológicos que resultam no aumento do transporte de oxigênio para os tecidos, por meio do aumento de parâmetros sanguíneos como aqueles envolvidos com o aumento da concentração de hemoglobina. Em outro experimento realizado com essa mesma espécie, animais expostos a camadas de 0, 0,04 e 0,14 mm do petróleo de Urucu-AM por um período menor (24 h) não apresentaram diferenças significativas ( $P < 0,05$ ) nos parâmetros hematológicos, mas foram observadas alterações ionoregulatórias, ou seja, alteração da concentração plasmática dos íons de sódio e potássio ajustando o equilíbrio osmótico do animal.

Outro estudo realizado com a espécie *Hoplosternum littorale* resultou em aumento progressivo nos níveis de metahemoglobina após exposição a uma camada de óleo de 0,08 mm de espessura. Além disso, houve hemodiluição nos animais expostos a camadas de 0,08; 0,16; 0,64 e 2,56 mm, indicando também efeitos do petróleo de Urucu-AM nos parâmetros respiratórios dessa espécie (1). A hemodiluição do plasma pode ser resultado de uma alta perda de íons como sódio, potássio, cálcio, cloreto através dos tecidos (27).

Distúrbios nos mecanismos de transporte de sais e permeabilidade do epitélio branquial também foram descritos em peixes amazônicos expostos ao petróleo. Contudo, a forma pela qual as características naturais extremas dos corpos d'água da Amazônia, como a reduzida disponibilidade de sais dissolvidos, baixo pH e altas concentrações de substâncias húmicas (SH) afetam esses mecanismos e, conseqüentemente, o grau de toxicidade dos hidrocarbonetos do petróleo, ainda não foram esclarecidos. De fato, a quantidade de carbono orgânico dissolvido (COD) na água pode modificar o efeito do petróleo e outras substâncias sobre os peixes. COD é composto de substâncias húmicas, as quais podem tanto agir como quelantes e protetoras junto aos animais, como mais um agente poluente. Matsuo e colaboradores (28) avaliaram os efeitos tóxicos do petróleo de Urucu-AM em espécimes de *C. macropomum* expostos a uma concentração de 2,8% do óleo e 22 mgC.L<sup>-1</sup> de substâncias húmicas durante 24 h, e observaram por imunolocalização, que os animais expostos ao petróleo e ao petróleo + substâncias húmicas apresentaram maior indução de CYP1A, principal biomarcador de

HPAs, nas células pavimentosas e endoteliais das brânquias. Além disso, a indução da CYP1A ocorreu em animais expostos somente às substâncias húmicas. Dessa forma, o papel das substâncias húmicas ainda não está bem compreendido, uma vez que há quem sugira que essas substâncias promovem um fator estressante aditivo aos animais a elas expostos (28) e há quem sugira um papel protetor dessas substâncias a animais expostos a diversos poluentes (29). As águas dos rios da Amazônia apresentam concentrações variadas dessas substâncias conforme o tipo predominante de água. Rios de águas pretas são os que mais contêm substâncias húmicas combinadas, medidas por meio da concentração de carbono orgânico dissolvido (COD). O papel do COD nas respostas dos peixes expostos a metais como cobre (Cu) tem sido descrito em diferentes trabalhos realizados pela equipe do Laboratório de Ecofisiologia e Evolução Molecular (Leem) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa) e mostram que essas substâncias possuem papel protetor, sendo quelantes do metal no meio natural, diminuindo a biodisponibilidade do mesmo aos organismos a ele expostos.

Devido à crescente exploração do petróleo na região amazônica estudos sobre a disponibilidade, tomada, distribuição e toxicidade dos hidrocarbonetos são de extrema importância para o monitoramento da qualidade dos ambientes aquáticos, e para a elaboração de planos de contenção no caso de contaminação dos corpos d'água da região por hidrocarbonetos do petróleo. Contudo, os mecanismos pelos quais a grande heterogeneidade das características físicas e químicas dos ambientes aquáticos da Amazônia pode modular a disponibilidade e toxicidade dos hidrocarbonetos do petróleo necessitam ser mais bem compreendidos, visando à manutenção da qualidade e da enorme diversidade de organismos aquáticos da região.

### MUDANÇAS CLIMÁTICAS: PROGNÓSTICOS DOS EFEITOS EM GRUPOS DE ORGANISMOS AMAZÔNICOS

De acordo com as previsões do 4º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) de 2007, a temperatura média da superfície do planeta irá aumentar de 1,5 a 5,8° C em 2050. As previsões para a bacia amazônica apontam para um aumento na temperatura ao redor de 3°C, juntamente com uma redução na precipitação ao redor de 20% ao longo do século XXI. Esse aumento da temperatura irá provocar fortes perturbações nos atuais padrões de distribuições de plantas e animais em ecossistemas de áreas úmidas continentais e costeiras. Nas áreas alagáveis amazônicas, além do potencial efeito das mudanças climáticas na temperatura e nos níveis de dióxido de carbono, alterações marcantes ocorrerão na flutuação dos níveis da água, o que afetará adicionalmente a flora e a fauna (30; 31).

É importante salientar, também, que tais modelos climáticos projetados para o final do século XXI preveem uma série de mudanças nos sistemas geofísicos, biológicos e socioeconômicos (32). Contudo, a magnitude e as consequências do impacto mundial desses fatores implicam em ações preventivas urgentes e demandam estudos detalhados para avaliar os efeitos causados pela desordem climática global.

Estudos simulando os efeitos das condições de elevação de temperatura e de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) nas respostas de organismos po-

dem permitir compreender como os ecossistemas amazônicos irão responder a essas mudanças ambientais. A Amazônia possui um relevante papel no ciclo do carbono do planeta (33) sendo considerada uma das regiões mais vulneráveis do ponto de vista das influências das mudanças climáticas (34). Os impactos causados pelo aquecimento do clima global nos ecossistemas terrestres e aquáticos amazônicos são preocupantes, podendo alterar a precipitação pluviométrica, os regimes hidrológicos da bacia e a cobertura da vegetação.

**EXPERIMENTOS EM MICROCOSMOS** Experimentos em microcosmos (câmaras ou salas climatizadas onde o controle de temperatura, CO<sub>2</sub> e umidade relativa do ar é realizado em tempo real) vêm resultando em informações muito relevantes no que tange aos organismos aquáticos da Amazônia. Os cenários estudados provocam mudanças no metabolismo, taxa de crescimento, sobrevivência, grau de infestação por parasitas, alterações na conversão alimentar, alterações no ciclo de vida, dentre outras tantas características que podem resultar em mudanças profundas nas comunidades biológicas, biodiversidade e endemias. A seguir, descrevemos dois experimentos realizados que podem ser considerados exemplos dos efeitos que serão causados pelas mudanças climáticas, se não houver correção de rumos por parte do ser humano.

#### UM EXPERIMENTO EM MICROCOSMOS COM A HERBÁCEA AQUÁTICA *MONTRICHARDIA ARBORESCENS*

Para determinar os efeitos das variações de temperatura e concentrações de CO<sub>2</sub> atmosféricas sobre a germinação e crescimento inicial de uma macrófita aquática neotropical foi desenvolvido um trabalho com *Montrichardia arborescens* (Araceae), que cresce em estandes monoespecíficos nos igapós amazônicos. Sementes da espécie foram colocadas para germinar em vasos de plástico com água e substratos neutro, e acompanhadas por cinco meses em quatro microcosmos: T1: temperatura ambiente atual ( $\pm 30^\circ$  C) e condições de CO<sub>2</sub> ( $\pm 380$ ppm); T2: temperatura T1+1,5° C e CO<sub>2</sub> T1 +200 ppm; T3: Temperatura T1+ 2,5° C e CO<sub>2</sub> T1+400 ppm; T4: Temperatura T1 + 4,5° C e CO<sub>2</sub> T1 +850 ppm. Os resultados mostraram que a elevação de gás carbônico e da temperatura aceleraram o tempo de germinação no microcosmo mais enriquecido (T4; 45 dias), em relação ao controle (T1; 66 dias). A biomassa total dos tratamentos foi afetada em um padrão diferente: enquanto nos tratamentos T2 e T3 o crescimento foi estimulado, no microcosmo mais enriquecido, T4, o crescimento de *M. arborescens* foi limitado (34).

#### COMO DUAS ESPÉCIES CONGÊNERES SOBREVIVERIAM A MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS PREVISTAS PELO IPCC PARA 2100?

As espécies congêneres *Paracheirodon axelrodi* (cardinal tetra) e *P. simulans* (neon verde) são espécies de peixes ornamentais da Amazônia, sendo encontradas separadamente em campos alagados que apresentam características físico-químicas similares, mas que se distinguem quanto à temperatura. Portanto, na natureza, as populações de *P. simulans* estão aclimatizadas a temperaturas mais elevadas do que as populações de *P. axelrodi*. Considerando os cenários climáticos propostos para o ano de 2100, é provável que essa aclimatização tão peculiar

possa levar essas espécies a responder diferencialmente aos impactos das mudanças climáticas. Ao investigar o efeito dos cenários climáticos previstos pelo 4º Relatório de Avaliação do IPCC sobre a sobrevivência de cardinal tetra e neon verde, bem como sobre a expressão dos genes da enzima fermentativa lactato desidrogenase (LDH), mostramos que exemplares adultos de ambas as espécies, mantidos durante 30 dias nos microcosmos, sofreram mortalidade diferencial causada pela inabilidade de uma das espécies em alterar seu metabolismo anaeróbico de maneira a sustentar maiores taxas metabólicas impostas pelo aumento de temperatura e CO<sub>2</sub>. A exposição a tais condições comprometeu a sobrevivência da espécie cardinal tetra, enquanto que a espécie neon verde foi 100% tolerante quando exposta aos mesmos cenários. Esta sobrevivência diferencial está relacionada à aclimatização distinta em seus ambientes naturais e se baseia na capacidade de tolerar alterações metabólicas em temperaturas mais altas, ou seja, se baseia na plasticidade fenotípica de cada espécie.

**CONSIDERAÇÕES FINAIS** Acidentes com derramamento de petróleo poderão afetar a riqueza de espécies de macrófitas aquáticas das áreas alagáveis, que é da ordem de 400 espécies (4). Portanto, é importante que se ampliem os estudos sobre os efeitos do petróleo de Urucu sobre tais espécies. Considerando a ampla distribuição, produção de biomassa e papel ecológico das espécies até o presente estudadas, em particular *Echinochloa polystachya* e *Eichhornia crassipes*, alguns cenários podem ser previstos quanto a uma contaminação massiva dessas plantas.

Além de peixes como o *Arapaima gigas* (pirarucu), que possui respiração aérea obrigatória e pode se contaminar com a fração flutuante do óleo, alguns peixes da Amazônia se alimentam de invertebrados terrestres que ficam sobre as macrófitas aquáticas quando da inundação da várzea, como *Parauchenipterus galeatus* (cangati), *Mylossoma duriventre* (pacú-manteiga) e *Triportheus elongatus* (sardinha) (36). As raízes de muitas plantas aquáticas, como *Eichhornia crassipes* são importantes refúgios e fontes de alimento para assembleias de peixes da várzea amazônica (37). A morte massiva dessas plantas, ou sua contaminação por petróleo, pode comprometer populações de peixes. Outros animais, como o peixe-boi (*Trichechus inunguis*), utilizam *E. polystachya* (13,8%), *E. crassipes* (11,2%) e *Pistia stratiotes* (6,4%) na dieta alimentar, representando quase um terço da sua alimentação (38). A morte dessas plantas poderá reduzir a oferta de alimento para esse mamífero já vulnerável (39; 40). Assim, um derramamento de petróleo nas várzeas, além de causar sérios danos à flora, causará danos a inúmeros componentes da fauna desses ambientes.

Caso sejam confirmados para outras espécies de plantas aquáticas, os efeitos da elevação de CO<sub>2</sub> e temperatura já observados para as espécies estudadas, o cenário é preocupante. Apesar da maior quantidade de carbono disponível no ambiente, o desequilíbrio entre fotossíntese e respiração poderá levar à redução na capacidade de assimilação de carbono em relação à atual.

As respostas diferenciadas entre peixes congêneres já mostra o potencial efeito que tais mudanças poderão causar sobre a ictiodiversidade amazônica, uma das mais ricas do planeta. Outros estudos com espécies comerciais já evidenciam queda na taxa de crescimento

quando os animais são expostos aos cenários mais extremos. Assim, a perda de indivíduos, diminuição do tamanho médio e alteração em hábitos alimentares poderão levar a uma alteração na teia alimentar e, conseqüentemente, na dinâmica das populações de peixes, de grande importância para a população da região.

Portanto, os riscos causados pelos fatores mencionados acima podem ameaçar significativamente a diversidade biológica dos ecossistemas amazônicos, além de afetar diversos aspectos da vida humana, os quais devem ser levados em consideração caso o aquecimento do planeta persistir.

*Maria Teresa Fernandez Piedade* é pesquisadora titular do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa). Bióloga e líder do grupo MAUA, é também vice-coordenadora do INCT Adapta.

*Vera Maria Fonseca de Almeida e Val* é pesquisadora titular do Inpa. Bióloga e líder do grupo LEEM, é também coordenadora de programas aplicados do INCT Adapta.

*Aline Lopes* é doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ecologia do Inpa e está finalizando sua tese que aborda o estudo das adaptações de macrófitas aquáticas a modificações ambientais naturais e antrópicas.

*Helen Sadauskas Henrique* é doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Biologia de Água Doce e Pesca Interior do Inpa e está finalizando sua tese que aborda o estudo da influência do petróleo e seus derivados sobre espécies de peixes em ambientes naturais e sob condições controladas.

*Luciana Mara Lopes Fé* é mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Genética, Conservação e Biologia Evolutiva do Inpa, e sua dissertação baseou-se no efeito das mudanças climáticas sobre peixes ornamentais respondendo como duas espécies congêneres suportariam as mudanças climáticas previstas para o ano 2100.

*Florian Wittmann* é pesquisador do Instituto Max-Planck de Química, Departamento de Biogeoquímica, com atuação no Inpa. É geógrafo e faz parte do quadro dos pesquisadores de programas de pesquisa nacionais e internacionais, tais como Pronex, LBA, ATDN, e Unesco.

#### NOTA E REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brauner, C.J.; Ballantyne, C.L.; Vijayan, M.M.; Val, A.L. "Crude oil exposure affects air-breathing frequency, blood phosphate levels and ion regulation in an air-breathing teleost fish, *Hoplosternum littorale*". *Comp. Biochem. Physiol. C*, 1999; 123: 127-134.
2. Lopes, A. *Respostas relativas à dosagem do petróleo de Urucu (Coari-AM) sobre herbáceas aquáticas da Amazônia*, 2007; 113pp.
3. Junk, W. J.; Bayley, P. B. & Sparks, R. E. "The flood pulse concept in River Floodplain Systems". In: *Proceedings of the International Large River Symposium* (Dodge, D. P., ed.), 1989; 110-127.
4. Junk, W. J. & Piedade, M. T. F. "Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants". In: *The central Amazon floodplain: ecological studies* (Junk, W. J., ed.), 1997; 147-185.
5. Lytle, D. A & Poff, N. L. "Adaptation to natural flow regimes", *Trends Ecol. Evol.* 2004; 19: 94-100.
6. Nogueira, F. & Couto, E.G. "Amostragem em planícies de inundação". In: C.E. de M. Bicudo & D. de C. Bicudo (eds.). *Amostragem em limnologia*. São Carlos, RIMA, 2004: 281-293.
7. Piedade, M.T.F.; Worbes, M.; Junk, W.J. "Geo-ecological controls on elemental fluxes in communities of higher plants in Amazonian floodplains". In: McClain, M. E.; Victoria, R. L.; Richey, J. E. (Ed.) *The biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press, New York. 2001: 209-234.

8. Val, A. L. & Almeida Val, V. M. F. *Fishes of the Amazon and their environments. Physiological and biochemical features*, 1995; Heidelberg: Springer Verlag.
9. Sloman, K.A.; Wood, C.M.; Scoot, G.R.; Wood, S.; Kajimura, M.; Johannsson, O.E.; Almeida-Val, V.N.F. & Val, A.L. "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. 2006.
10. Piedade, M.T.F. & Junk, W.J. "Natural grasslands and herbaceous plants in the Amazon floodplain and their use". In: *The central Amazon floodplain: actual use and options for a sustainable management*. (Junk, W.J.; Ohly, J.J.; Piedade, M.T.F. & Soares, M.G.M., eds). 269-290. Leiden: Backhuys Publishers. 2000.
11. Zerm, M.; Walenciak, O.; Val, A. L. & Adis, J. "Evidence for anaerobic metabolism in the larval tiger beetle, *Phaeoxantha klugii* (Col. Cicindelidae) from a Central Amazonian floodplain (Brazil)". *Physiological Entomology*. 29: 483-488. 2004.
12. Comunicação pessoal com Efreim Gondim Ferreira e Neusa Hamada.
13. Val, A.L. & Almeida-Val, V.M.F. "Crude oil, copper and fish of the Amazon" In: *Behavior, physiology and toxicology interactions in fish*. VI International Congress on the Biology of Fish (Sloman, K.A.; Wood, C.M. & Mac Kinlay, D., eds.) 2004: 1-6.
14. Matsuo, A. Y. O. and Val A. L. "Acclimation to humic substances prevents whole body sodium loss and stimulates branchial calcium uptake capacity in cardinal tetras *Paracheirodon axelrodi* (Schultz) subjected to extremely low pH". *Journal of Fish Biology* 2007; 70: 989-1000.
15. Couceiro, S. R. M.; Forsberg, B. R.; Hamada, N. & Ferreira, R. L. "The effects of an oil spill and discharge of domestic sewage on the insect fauna of cururu stream, Manaus, AM, Brazil". *Brazilian Journal of Biology* 2006; 66: 35-44.
16. Lopes, A.; Piedade, M.T.F. "Estabelecimento de *Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock (Poaceae) em solo de várzea contaminado com petróleo de Urucu". *Acta Amazônica*; 2009, 39-3: 583-590.
17. Forsberg, B. R.; Hamada, N.; Ferreira, R.; Conserva, A.; Frickmann, F.; Couceiro, S.; Silva, J. *Avaliação da integridade da biota do ecossistema do Cururu após o vazamento de petróleo: relatório final*. Manaus: Fundação Djalma Batista, 2001, CD-rom.
18. Petrobrás. 1997. *Características do petróleo Urucu*. CNPES: Spsesq; Diqum: Setav Anexo V.
19. Pezeshki, S.R.; Hester, M.W.; Lin, Q.; Nyman, J.A. "The effect of oil spill and cleanup on dominant US Gulf coast marsh macrophytes: a review". *Environment Pollution*, v.180, p.129-139, 2000.
20. Piedade, M. T. F.; Junk, W. J.; Long, S. P. "The productivity of the C4 grass *Echinochloa polystachya* on the Amazon floodplain". *Ecology*, v.72, n.4, p. 1456-1463, 1991.
21. Lopes, A.; Piedade, M.T.F. "O período da contaminação com petróleo influencia a rebrota de *Echinochloa polystachya* (H.B.K.) Hitchcock em solo de várzea da Amazônia Central?" *Biota Neotropica* 2010, 10(4): 143-148.
22. Lopes, A.; Rosa-Osman, S. M.; Piedade, M. T. F. "Effects of crude oil on survival, morphology, and anatomy of two aquatic macrophytes from the Amazon floodplains". *Hydrobiology*, 2009; 636(1): 295-305.
23. Victorio, S. S.; Camargo, A. F. M.; Henry-Silva, G. G. "Influência de diferentes concentrações de petróleo sobre macrófita aquática submersa enraizada *Egeria densa*". Livro de Resumos da Reunião Anual de Avaliação PRH-ANP 2006 . p.117-120, 2006.
24. Laurent, P. and Perry, S. F. "Environmental effects on fish gill morphology". *Physiological Zoology* 1991; 64: 4-25.
25. Dados obtidos por M.R. Faria; O.F. Costa e Adalberto L. Val.
26. Wilson, J.M. & Laurent, P. "Fish gill morphology: inside out". *J. Exp. Zool.*, 2002; 293: 192-213.
27. Wood, C.M. "Flux measurements as indices of H+ and metal effects on freshwater fish". *Aquatic Toxicology*, 1992; 22: 239-264.
28. Matsuo, A.Y.O.; Woodin, B.R.; Reddy, C.M.; Val, A.L.; Stegeman, J.J. "Humic substances and crude oil induce cytochrome P450 1A expression in the amazonian fish species *Colossoma macropomum* (Tambaqui)". *Environmental Science & Technology* 2006; 40: 2851-2858.
29. Matsuo, A.Y.O. & Val, A.L. "Acclimation to humic substances prevents whole body sodium loss and stimulates branchial calcium uptake capacity in cardinal tetras *Paracheirodon axelrodi* (Schultz) subjected to extremely low pH". *Journal of Fish Biology*. 2007; 70: 989-1000.
30. Miles, L., Grainger, A. & Phillips, O. "The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia". *Global Ecology and Biogeography* 2004; 13: 553-565.
31. Piedade, M. T. F. ; Schöngart, J ; Wittmann, F ; Parolin, Pia ; Junk, W. "Impactos da inundação e seca na vegetação de áreas alagáveis amazônicas". In: Borma, L.S.; Nobre, C.. (Org.). *Secas na Amazônia: causas e consequências*. 1ed.São Paulo: Oficina de Textos, 2013: 268-305.
32. Schneider, B., Latif, M., & Schmittner, A. "Evaluation of different methods to assess model projections of the future evolution of the Atlantic meridional overturning circulation". *Journal of Climate*, 2007; 20(10): 2121-2132.
33. Salati E. "The climatology and hydrobiology of Amazonia". In: Prance GT, Lovejoy TE. Eds. *Key Environments Amazonia* Oxford:Pergamon Press 1985: 18-40.
34. Nobre, C.A.; Sampaio, G.; Salazar L. "Mudanças climáticas e Amazônia". *Ciência e Cultura* 2007; 59: 22-27.
35. Lopes, A.; Castro, N.; Pantoja, P.; Ferreira, A. B.; Piedade, M. T. F. "Effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on germination and initial growth of *Montrichardia arborescens* (L.) Schott (Araceae): a microcosm experiment". *Congresso Brasileiro de Limnologia*, Bonito-MS; 2013.
36. Claro-Jr, L.; Ferreira, E.; Zuanon, J.; Araújo-Lima, C. "O efeito da floresta alagada na alimentação de três espécies de peixes onívoros em lagos de várzea da Amazônia Central, Brasil." *Acta Amazônica*. 2004; 34(1): 133-137.
37. Sánchez-Botero, J. I.; Farias, M. L. de; Teresa, M. & Garcez, D. S. Kunth "Eichhornia crassipes ( Mart .) Solms . no lago Camaleão, Amazônia Central" , Brasil. *Sci. York*; 2003: 369-375 .
38. Colares, I. G.; Colares, E. P. "Food plants eaten by amazonian manatees (*Trichechus inunguis*, Mammalia: Sirenia)" *Brazilian Archives of Biology and Technology*; 45.1: 67-72, 2002.
39. MMA - Ministério do Meio Ambiente. "Instrução Normativa nº 11", de 17 de maio de 2005.
40. IUCN. "IUCN red list of threatened species". Version 2010.1; Disponível em: [www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org) acesso em 05/05/2010.