



# FONTES DE ENERGIA

Isótopos estáveis indicam  
origens do carbono que mantém  
diversidade do ambiente aquático

FOTOS: GEDONAS FEIJÓ/AUTOR





*Conhecidos pelas variações do fluxo de água ao longo do ano e pela diversidade de espécies que os habitam, os rios intermitentes do semiárido nordestino têm grande importância para a ciência. Suas características peculiares os tornam excelentes para o teste de hipóteses e teorias ecológicas. Estudo recente analisou a concentração de isótopos estáveis de alguns elementos (carbono e nitrogênio) em materiais orgânicos presentes na água e em organismos para determinar de que fontes os animais aquáticos obtêm sua energia. A pesquisa, pioneira no semiárido brasileiro, indicou que a fauna dos rios utiliza como combustível mais o carbono produzido dentro do próprio sistema (por algumas plantas aquáticas e algas filamentosas) do que o carbono da matéria orgânica que chega à água do ambiente externo (em folhas caídas e outros materiais), ao contrário do que se acreditava.*

## EM RIOS DO SEMIÁRIDO

### **Elvio Sergio F. Medeiros**

*Grupo de Ecologia de Rios do Semiárido,  
Centro de Ciências Biológicas e Sociais Aplicadas,  
Universidade Estadual da Paraíba*

### **Jean-Pierre Ometto**

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe),  
Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo*

### **Daniele Jovem da Silva**

*Departamento de Biologia,  
Universidade Estadual da Paraíba*

O rio Seridó, no Rio Grande do Norte, onde foram realizados os estudos sobre isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, apresenta grande variação do fluxo de água nos períodos de cheia (no alto) e de seca

**A**s relações alimentares entre os organismos que vivem em ambientes aquáticos tropicais são em geral complexas. Como descobrir qual a fonte mais importante do alimento consumido por um pequeno peixe, por exemplo? Uma forma de investigar essa origem é analisar a composição dos diferentes isótopos de alguns elementos químicos presentes em qualquer matéria orgânica. As concentrações desses isótopos em materiais orgânicos e seres vivos encontrados nos ambientes aquáticos permitem rastrear seu 'trajeto' na cadeia alimentar de um ambiente.

Todas as coisas, vivas ou não, são compostas por átomos de elementos diferentes, como carbono, oxigênio e nitrogênio. Uma característica dos elementos é sua massa, ou seja, o número de partículas (prótons e nêutrons) presentes no núcleo de seus átomos. O carbono, por exemplo, tem normalmente seis prótons e seis nêutrons no núcleo (carbono-12), mas alguns átomos desse elemento podem conter uma quantidade diferente de nêutrons no núcleo, o que altera sua massa. Os isótopos são as 'versões' de um mesmo elemento com massas diferentes. Alguns são instáveis (ou radioativos), mudando sua massa ao longo do tempo, mas outros não se alteram e são chamados de isótopos estáveis. ▶





Entrada de matéria orgânica particulada (A) de origem terrestre durante o período de chuvas e crescimento de plantas aquáticas dos gêneros *Ludwigia* (B) e *Ceratophyllum* (C) em áreas do rio Seridó, na localidade Poço dos Patos

fluencie na formação de moléculas, a massa atômica terá um efeito nas reações físicas e químicas que ocorrem na natureza e nas células dos organismos. Podemos dizer que, em geral, os isótopos mais leves reagem mais rapidamente que os mais pesados. Portanto, as reações químicas que ocorrem no interior de um organismo alteram a razão entre os isótopos encontrada no alimento, gerando uma razão diferente nos tecidos desse organismo. Essa mudança na abundância relativa dos isótopos é conhecida como fracionamento isotópico.

Na fotossíntese, por exemplo, o carbono passa por várias reações físicas e químicas até ser transformado em substância metabólica (açúcar) ou estrutural (celulose, lignina). Da entrada na folha, em moléculas de  $\text{CO}_2$ , até os produtos finais, os isótopos de carbono sofrem fracionamento, porque o carbono-13 (mais pesado) é discriminado nas reações. Assim, a planta acumula em seus tecidos uma proporção maior de carbono-12 que o ar atmosférico. Na sequência da cadeia alimentar, o animal que se alimenta da planta terá isótopos leves e pesados em proporções ligeiramente diferentes das encontradas na planta, já que o fracionamento também ocorre em seu metabolismo. Nos animais, porém, a proporção de isótopos pesados é ligeiramente maior que em sua dieta. Isso acontece porque em sua respiração e excreção eles perdem uma proporção maior de isótopos leves. No 'balanço isotópico' total, incluindo alimentação, respiração e excreção, os animais apresentam maior proporção de isótopos pesados que aquela encontrada em seus alimentos.

A alteração das proporções relativas dos isótopos também ocorre com outros elementos, como nitrogênio, oxigênio e fósforo. Ao passar por variados processos, no ambiente e nos organismos, esses elementos também sofrem fracionamento. Assim, o 'sinal isotópico' é transferido e transformado ao longo da cadeia alimentar, compondo o tecido dos animais e vegetais.

Sabendo-se quais as reações envolvidas no metabolismo de um organismo e as características e fracionamento dos isótopos, é possível 'rastrear' um elemento, ou seja, determinar seu percurso na natureza. Como a relação entre isótopos estáveis varia de modo previsível, eles podem ser utilizados como marcadores de processos ambientais. Cada organismo, ao ingerir e assimilar um alimento, reflete esse alimento na proporção de isótopos em seus tecidos. Assim, medindo essa proporção nos tecidos de um animal e em suas possíveis fontes de alimento, é possível descobrir de onde este tira sua energia, acumulada no corpo na forma de carbono. Estudos desse tipo fornecem importantes informações qualitativas sobre as contribuições relativas de cada uma dessas fontes.

Elementos como o carbono e nitrogênio têm apenas dois isótopos estáveis: carbono-12 e carbono-13, nitrogênio-14 e nitrogênio-15. Outros elementos podem ter vários isótopos estáveis, como o enxofre (enxofre-32, 33, 34 e 36).

## ISÓTOPOS LEVES E PESADOS

Apesar das variações na massa atômica, os isótopos estáveis integram as mesmas moléculas. O gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), por exemplo, pode ter em sua molécula o carbono-12 ou o carbono-13. Como o termo 'massa atômica' sugere, isótopos estáveis com mais nêutrons são mais pesados. Assim, o carbono-13 é mais pesado que o 12. Embora isso não in-



## FONTES TERRESTRES OU AQUÁTICAS

Em ambientes aquáticos, a diversidade de animais (peixes, anfíbios, insetos e outros) e vegetais (algas e plantas) é elevada. Os animais podem se alimentar diretamente de vegetais ou de outros animais que os consomem. Existem, no entanto, apenas duas fontes 'iniciais' de nutrientes e, em consequência, da energia disponível para os consumidores, nos ambientes de água doce.

Os nutrientes podem ter origem nos materiais vegetais mortos que se acumulam no sedimento. Esses materiais são decompostos e consumidos por micro-organismos (bactérias e fungos) e insetos aquáticos, tornando-se disponíveis para consumidores (como peixes) que se alimentam desses organismos. Uma segunda via de nutrientes para organismos aquáticos está não nas profundezas, mas na superfície da água, onde algas microscópicas (fitoplâncton) servem de alimento para pequenos organismos consumidores (zooplâncton), e estes, por sua vez, tornam-se fonte de nutrientes para consumidores maiores.

Em rios, a produção de fitoplâncton, algas e plantas aquáticas é reduzida por causa do fluxo constante da água e em muitos casos por sua turbidez, que dificulta a fotossíntese. Nesse caso, a principal fonte de nutrientes seria a matéria orgânica morta no sedimento. Como é pequena a produção vegetal no próprio meio aquático, a origem principal da matéria orgânica morta no sedimento é terrestre: vem das plantas e folhas que caem no rio ou são trazidas até ele pelo vento e pelas enxurradas.

Alguns estudos, porém, têm sugerido que a produção de fitoplâncton, algas e plantas aquáticas é importante em rios, e que, em alguns casos, esta seria a principal fonte energética para os animais. Em rios de regiões secas, por exemplo, estudos têm mostrado que, apesar da grande quantidade de carbono terrestre disponível, não há evidências de que este contribua significativamente para a produção animal aquática. As principais fontes de energia para os consumidores seriam, nesses casos, as algas que crescem no litoral raso em lagos marginais e o fitoplâncton. Alguns desses estudos foram feitos em rios de regiões secas da Austrália, nos quais a alta turbidez da água limita a produção primária a áreas próximas das margens, onde são mais rasos e menos turvos.



Outros pontos de coleta de amostras para o estudo sobre a origem do carbono assimilado pelos peixes do rio Seridó foram as localidades de Riacho da Serra (A) e Caturerê (B). Essa última caracteriza-se pela ausência de vegetação marginal e baixa ocorrência de plantas aquáticas



No caso de rios do semiárido brasileiro, a produção de algas e plantas aquáticas é alta, principalmente após a fase de cheias, quando as rasas poças temporárias apresentam baixa turbidez e permitem o crescimento rápido de algas e vegetação aquática. Esse fato dá suporte à hipótese de que o combustível mais importante para os consumidores viria de fontes aquáticas, e não terrestres.

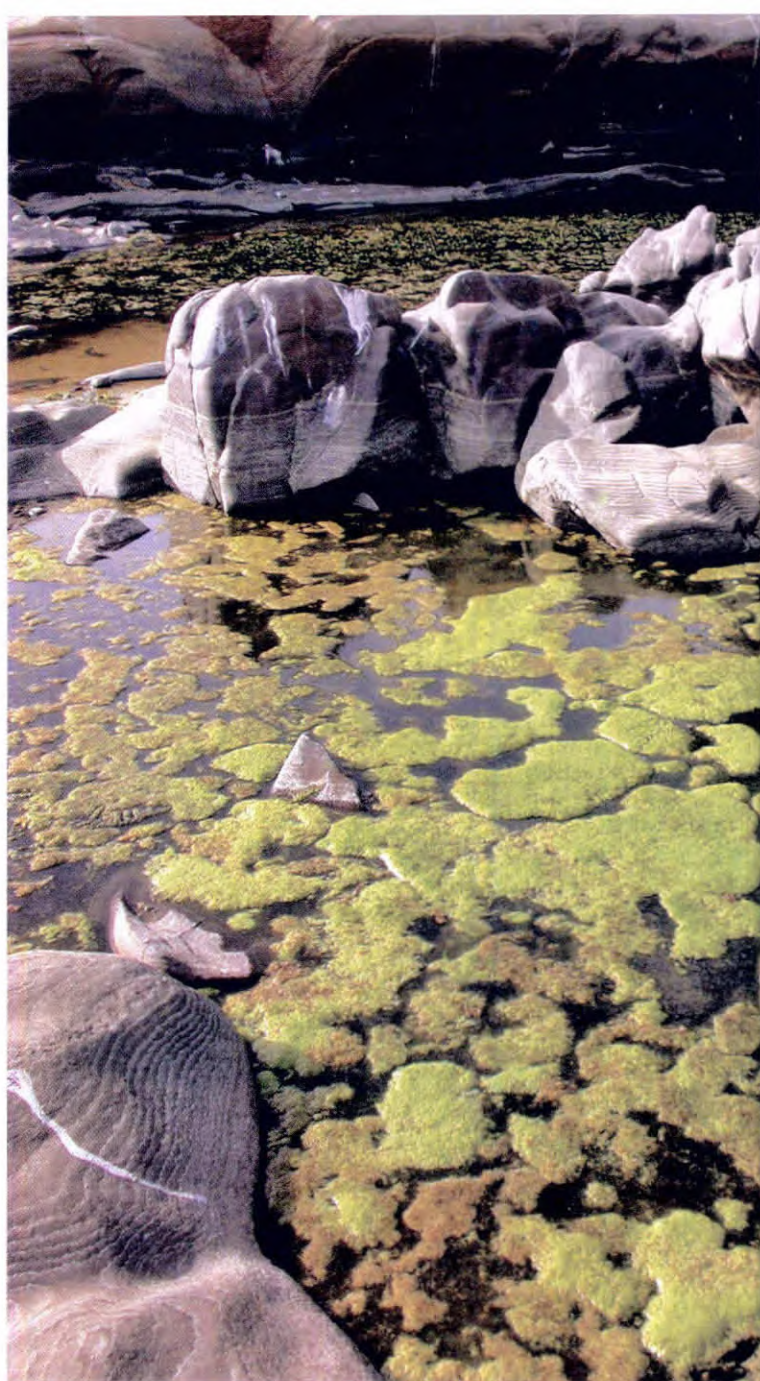
## ISÓTOPOS EM RIOS DO SEMIÁRIDO

Para desvendar como ocorre o fluxo de energia em rios intermitentes, este estudo, pioneiro para o semiárido brasileiro, usa isótopos estáveis de carbono e nitrogênio para determinar as fontes energéticas usadas por vários grupos de organismos aquáticos (como plantas, insetos e peixes) e identificar sua origem, se terrestre ou aquática. Os primeiros resultados indicam que os animais (principalmente peixes) não dependem fortemente do carbono terrestre originado na matéria orgânica produzida nas margens (ou seja, folhas e galhos que caem no rio e matéria orgânica particulada carregada pela água das chuvas).

Os resultados fornecem ainda indicações de que os organismos aquáticos usam como combustível o carbono produzido dentro de seu ambiente por algumas plantas aquáticas e algas filamentosas. São necessárias pesquisas para avaliar como os consumidores têm acesso a essas fontes de energia: por consumo direto ou por meio de consumidores intermediários, como o zooplâncton (que se alimenta de uma fonte primária de nutrientes não avaliada neste estudo, o fitoplâncton) ou os insetos aquáticos (que consomem algas e matéria orgânica particulada).

Os dados foram coletados ao longo do rio Seridó, no Rio Grande do Norte. Esse rio intermitente (embora com trechos perenizados) situa-se na região do Seridó, área de reconhecida importância ecológica por apresentar elevada diversidade animal e vegetal. A pesquisa, financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), coletou amostras em três localidades ao longo do leito principal do rio: Catureré, Riacho da Serra e Poço dos Patos.

Foram medidas as chamadas razões isotópicas (proporções entre isótopos leves e pesados) em diversos componentes do sistema aquático: peixes, vegetação marginal, diferentes plantas aquáticas, matéria orgânica particulada, material orgânico disperso na água (este, chamado de 'sseton', inclui fitoplâncton e zooplâncton), algas, capim e insetos predadores (estágios aquáticos de libélulas). Os peixes estudados representam as espécies mais comuns na região e que podem se alimentar dos componentes coletados, citados acima. Essas espécies sobrevivem em poças que demoram mais tempo para secar e em reservatórios, dispersando-se no período de cheias.



O capim foi analisado em separado porque utiliza um processo de fotossíntese (denominado  $C_4$ ) diferente da rota usada por outras plantas ( $C_3$ ), o que gera valores isotópicos também diversos. Entre as plantas aquáticas, também há diferenças, porque algumas (como as dos gêneros *Ludwigia* e *Nymphaea*) têm folhas na superfície e, portanto, acesso ao carbono atmosférico, enquanto outras (como as do gênero *Ceratophyllum*) obtêm esse elemento no ambiente aquático.

Para cada componente, foram calculados, nos três pontos de coleta do estudo, os desvios das razões isotópicas em relação a um padrão internacionalmente aceito para os isótopos leves e pesados do carbono e do nitrogênio. Apesar de o fracionamento do carbono ser muito pequeno em cadeia alimentar, espera-se que um organismo tenha uma



Crescimento de algas filamentosas em poça temporária do rio Seridó, na localidade Poço dos Patos. As algas estão entre as possíveis fontes de carbono para os peixes desse rio intermitente do semiárido nordestino

proporção do isótopo mais pesado semelhante ou levemente superior que a encontrada nos componentes de sua dieta. O mesmo se aplica ao nitrogênio, mas nesse caso com fracionamento maior.

Embora os consumidores de topo, representados pelos peixes, tenham apresentado razões isotópicas do carbono intermediárias entre algas (produzidas no próprio rio) e matéria orgânica particulada trazida de fora do sistema, o estudo indica que essa matéria orgânica e folhas de árvores coletadas nas margens do rio não estão entrando na 'dieta' desses consumidores de topo. As razões isotópicas do carbono em folhas e na matéria orgânica (principalmente nesta) são pouco variáveis entre os pontos de coleta e pobres em nitrogênio-15, enquanto os valores dos peixes apresentam certa variação na razão isotópica do carbono e são ricos em nitrogênio-15. Isso indica assimilação de carbono de outra fonte, possivelmente as algas e a planta aquática do gênero *Ceratophyllum*, que em algumas localidades apresentaram valores de carbono semelhantes aos dos peixes.

Uma explicação para isso seria que a matéria orgânica particulada entra no meio aquático já em adiantado estado de decomposição, o que dificulta sua assimilação por consumidores como peixes e insetos aquáticos. Já a matéria orgânica

originada nas plantas aquáticas (*Ceratophyllum*) e nas algas filamentosas é processada mais facilmente pelos organismos aquáticos e incorporada mais rapidamente aos tecidos dos peixes. Isso é confirmado pela semelhança dos valores isotópicos de folhas da vegetação marginal e da matéria orgânica particulada. Tal semelhança indica que essas folhas estão sendo processadas por micro-organismos e transformadas nessa matéria. Como esta é de difícil assimilação, tem um valor menor em termos de fornecimento de carbono para os peixes.

Outro resultado importante é que algumas plantas aquáticas, em especial as que são enraizadas dentro d'água, mas cujas folhas atingem a superfície (tendo, portanto, acesso ao CO<sub>2</sub> atmosférico), também contribuem pouco para o carbono assimilado pelos peixes. O capim apresenta valores isotópi-

cos de carbono diferentes dos obtidos nos demais componentes, e portanto não deve ser uma fonte importante nas relações de alimentação estudadas. Já o papel do 'seston' (do qual faz parte o zooplâncton) precisa ser mais bem avaliado, pois apresentou razões isotópicas de carbono e nitrogênio bastante variáveis entre os três pontos de coleta.

O estudo realizado no rio Seridó apresenta os primeiros dados desse tipo para rios intermitentes do semiárido brasileiro. Como as características desses ecossistemas variam muito no espaço e no tempo, a pesquisa continua a ser realizada, visando confirmar os primeiros resultados ou obter dados que permitam aprimorar ou modificar as hipóteses iniciais. Outros dados vêm sendo coletados nas bacias do rio Ipanema, em Pernambuco, e nas cabeceiras do rio Paraíba, no estado de mesmo nome.

As aplicações dos resultados desse tipo de estudo são variadas, já que as hipóteses testadas podem ajudar a definir estratégias de conservação e manejo de rios do semiárido nordestino. No campo teórico, os principais modelos para rios de áreas tropicais dizem que a fauna aquática é sustentada por fontes de energia de origem terrestre (vegetação marginal ou matéria orgânica particulada originada na cabeceira dos rios). Mas esses modelos baseiam-se em cursos d'água perenes, não existindo informação sobre rios intermitentes tropicais, como os do semiárido do Brasil, onde a baixa turbidez da água, após as inundações, pode favorecer o crescimento de fontes internas de carbono orgânico, como algas e algumas plantas aquáticas.

Do ponto de vista de conservação e manejo, levantamentos existentes da fauna do semiárido indicam áreas relevantes para a conservação de espécies de importância ecológica (peixes, por exemplo). No entanto, não há informação sobre como esses ambientes sustentam sua fauna ou como as espécies ali presentes interagem entre elas. Assim, a sobrevivência de determinada espécie em uma área não depende, necessariamente, apenas da preservação dessa área, mas também da manutenção dos recursos que ela utiliza e das fontes desses recursos. ■

#### Sugestões para leitura

- FORSBERG, B. R.; ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. & BONASSI, J. A. 'Autotrophic carbon sources for fish of the central Amazon', in *Ecology*, v. 74, nº 3, p. 643, 1993.
- MALTCHIK, L. & MEDEIROS, E. S. F. 'Conservation importance of semi-arid streams in north-eastern Brazil: implications of hydrological disturbance and species diversity', in *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 16, nº 7, p. 665, 2006.
- MANETTA, G. I. & BENEDITO-CECILIO, E. 'Aplicação da técnica de isótopos estáveis na estimativa da taxa de turnover em estudos ecológicos: uma síntese', in *Acta Scientiarum: Biological Sciences Maringá*, v. 25, nº 1, p. 121, 2003.
- MARTINELLI, L. A.; OMETTO, J. P. H. B.; FERRAZ, E. S.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B. & MOREIRA, M. Z. *Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis*. São Paulo, Oficina de Textos, 2009.