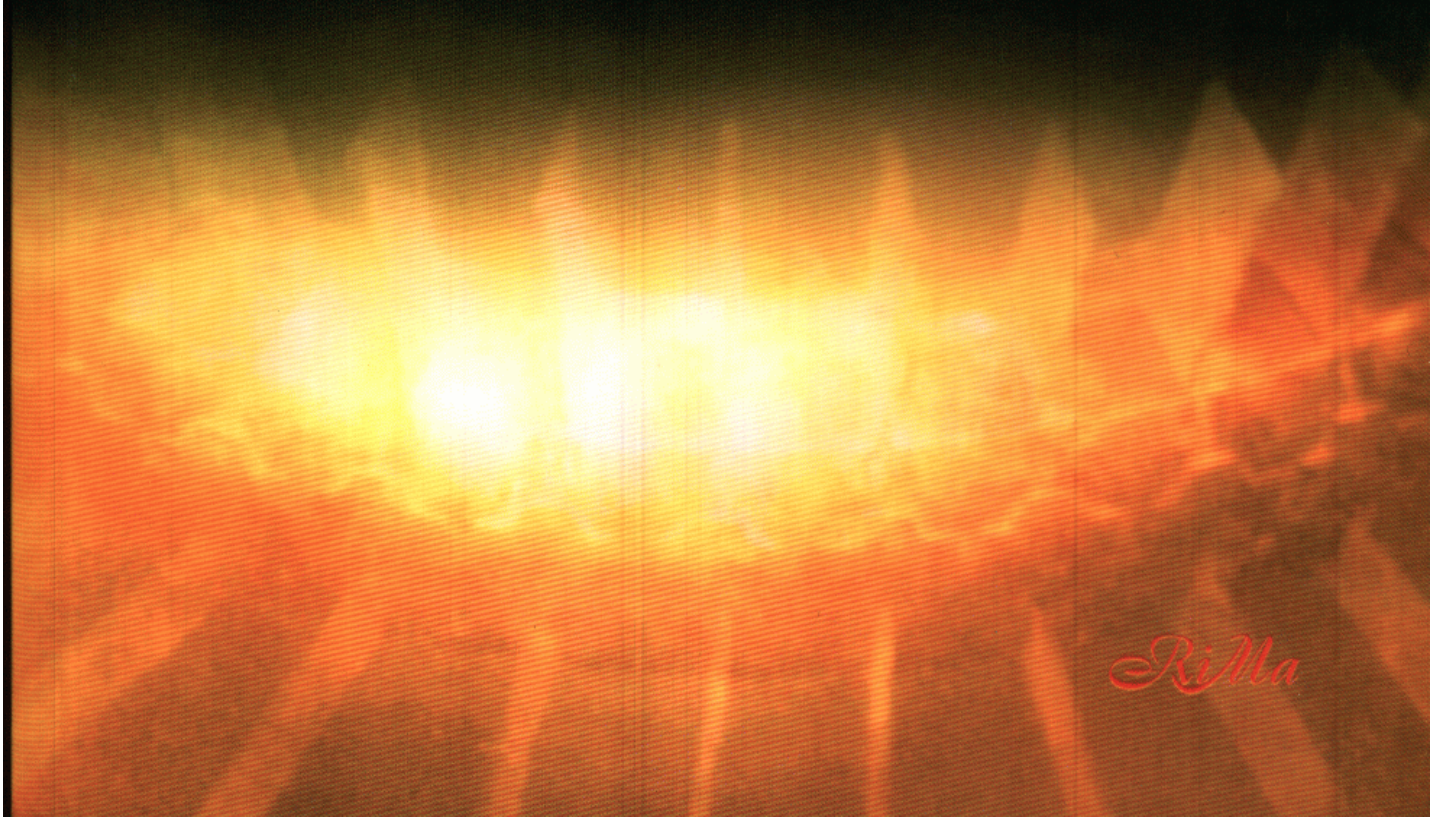
Editores:
Fábio Roland,
Dionéia Cesar e
Marcelo Marinho

LIÇÕES DE LIMNOLOGIA



RiMa

Bioindicadores Bentônicos

Marcos Callisto
José Francisco Gonçalves Jr.

Impactos Ambientais em Ecossistemas Aquáticos Continentais

A enorme biodiversidade da Terra engloba mais de 1,5 milhão de espécies descritas e identificadas, sendo os insetos o grupo mais abundante, cuja distribuição é bastante heterogênea. As modernas propostas de conservação da biodiversidade baseiam-se nos *hotspots* – áreas prioritárias do globo terrestre com base no número de espécies endêmicas e ameaçadas de extinção e remanescentes de ecossistemas preservados.

Como forma de sensibilizar a opinião pública para essa majestosa biodiversidade, atividades de ecoturismo têm sido desenvolvidas em diferentes regiões e são uma maneira de chamar a atenção da população para a necessidade de preservar (e valorizar) a vida silvestre, que reserva encantos naturais com formas imponentes, muitas vezes submersas, que explode em números, tendo nos ambientes aquáticos uma das mais magníficas formas de expressão.

Nas últimas décadas, a humanidade tem crescido em escala alarmante, utilizando de forma predatória os recursos naturais: sujando, produzindo lixo, colocando em risco os santuários ecológicos, derramando óleo, desmatando e até mesmo aumentando o buraco na camada de ozônio. Mas quando deseja, o homem é capaz de planejar seu crescimento, seja no desenvolvimento de atividades sustentáveis na agricultura, nas instalações industriais e na urbanização de grandes cidades onde áreas verdes são preservadas.

Impacto ambiental é hoje um tema atual em nosso cotidiano, fazendo parte dos noticiários dos meios de comunicação que cobrem a degradação dos recursos naturais. A qualidade da água no século XXI é um dos principais problemas da humanidade em decorrência de atividades de mineração, lançamentos de esgotos domésticos e industriais sem tratamento, utilização de agrotóxicos e pesticidas, retirada da vegeração ripária e depósito de lixo. Além disso, a introdução de espécies exóticas é hoje um sério problema em muitos ecossistemas lacustres, tendo como exemplos os moluscos *Melanoides tuberculatus*, *Achatina fulica*, *Limnoperna fortunei* e os peixes *Cichla* spp. (tucunaré), *Pygocentrus nattereri* (piranha), *Clarias gariepinus* (bagre africano) e *Tilapia rendalli* (tilápia) O desenvolvimento da Ecologia dentre as Ciências Biológicas tem contribuído com ferramentas de avaliação das taxas de extinção de espécies, identificando fatores de vulnerabilidade (Primack & Rodrigues, 2001) decorrentes da pressão antrópica sobre os ecossistemas naturais e oferecendo dois caminhos possíveis: a degradação ambiental ou o chamado uso sustentável de recursos naturais. Mudanças na tomada de atitudes

são necessárias e investimentos na implementação de estratégias preservacionistas e na melhoria da qualidade ambiental são a única garantia da sobrevivência do homem, que terá de viabilizar estratégias de gestão dos recursos naturais. Hoje observam-se algumas estratégias de conservação *ex-situ* (Primack & Rodrigues, 2001), que incluem jardins-zoológicos, aquários, jardins botânicos, bancos de sementes e a manutenção de coleções de referência.

Infelizmente, a existência de ecossistemas naturais é cada dia mais rara, sendo comum encontrarmos ecossistemas impactados por atividades antrópicas em todo o País e em todas as principais bacias hidrográficas. A legislação ambiental brasileira é clara e precisa: é proibido poluir e degradar e é obrigatório licenciar e atender às condicionantes da licença obtida. O meio ambiente é um bem de interesse público, um bem da coletividade! Segundo a resolução Conama 001 de 1986, poluição ambiental é qualquer alteração adversa de características químicas, físicas ou biológicas do meio ambiente (incluindo emissão, lançamento ou disposição que contrarie os limites da norma, causando danos à saúde e prejudicando as atividades sociais e econômicas, os recursos ambientais e os acervos histórico, cultural e paisagístico).

No âmbito da Política Nacional de Gestão de Recursos Hídricos, os limnólogos brasileiros têm importante papel no enquadramento dos corpos d'água em classes de qualidade, seguindo três fases de operação: (1) diagnóstico dos usos da água – levantamento dos usos prioritários da água; (2) avaliação da condição de qualidade das águas – comparação entre a classe atual e sua meta de qualidade; (3) efetivação do enquadramento – ações corretivas e preventivas, especificação de agentes poluidores/degradadores. Atividades como a avaliação integrada da qualidade de água, que analisa parâmetros físicos e químicos na coluna d'água, e a utilização de indicadores biológicos são ferramentas fundamentais nesses estudos.

Os chamados indicadores biológicos são organismos que refletem a integridade ecológica dos ecossistemas onde vivem, respondendo a diferentes agentes estressantes, refletindo o histórico de degradação e devendo, sempre que possível, fazer parte de Programas de Monitoramento Ambiental a Longo Prazo. Alguns dos principais métodos envolvem a avaliação da estrutura de comunidades, a identificação de espécies indicadoras, efeitos populacionais, estudos ecotoxicológicos e bioacumuladores. Além de macroinvertebrados bentônicos, organismos planctônicos, perifíticos, macrófitas aquáticas e peixes têm sido amplamente utilizados em diversos países europeus e na América do Norte. Desde o início da ciência Limnologia com os trabalhos de Thienemann, os limnólogos trabalham no sentido de identificar bioindicadores de qualidade de água e, no caso dos bentólogos, avaliar a tolerância de macroinvertebrados à poluição, classificando os organismos em tolerantes, medianamente tolerantes e intolerantes. De modo geral, estudando ambientes naturais e livres de influência antrópica, encontra-se alta diversidade de organismos bentônicos, em contraste à reduzida riqueza taxonômica observada em ecossistemas aquáticos impactados.

Bioindicadores e Biomonitoramento

Nos dias atuais, a sociedade humana enfrenta o início de uma grave crise de escassez de água, fruto de sua disponibilidade heterogênea, da deterioração de sua qualidade e da falta de percepção de gerentes e do público geral sobre a gravidade do problema. Mudanças globais no clima afetam a distribuição e a disponibilidade dos recursos hídricos. A disponibilidade de água de boa qualidade e a capacidade de conservação e proteção dos recursos hídricos influencia diretamente o desenvolvimento socioeconômico em diferentes regiões do globo terrestre. Como reflexo direto do aumento da população mundial e da taxa de urbanização, observa-se o aumento do consumo e a rápida deterioração da qualidade da água. Estimativas da ONU sobre a dinâmica do consumo de água apontam aumento exponencial em decorrência do incremento de atividades agrícolas, industriais e do armazenamento em represas e reservatórios urbanos, criados para aumentar o estoque para a demanda crescente.

Dentre as principais perspectivas e iniciativas para a conservação dos recursos hídricos destacam-se: atividades de recomposição de mata ciliar, proteção de nascentes, mudanças de atitudes cotidianas relacionadas à economia no uso da água (por exemplo, controle de vazamentos, instalação e manutenção de hidrômetros, reciclagem da água e avanços na agricultura, como a hidroponia), além de ampliação no número de estações de tratamento de esgotos (ETEs), iniciativas no re-uso da água e monitoramento da qualidade dos recursos hídricos (por meio de atividades de monitoramento de parâmetros físicos e químicos e de biomonitoramento).

Rosenberg & Resh (1993) definem biomonitoramento como o "uso sistemático de respostas biológicas para avaliar mudanças no ambiente com o objetivo de utilizar essas informações em um Programa de Controle de Qualidade Ambiental. Essas mudanças, na maioria das vezes, têm fontes antropogênicas". De maneira geral, um Programa de Monitoramento Ambiental deve responder a duas questões: (1) Qual o estado funcional atual do ecossistema e de onde os recursos serão retirados? e (2) Para que propósito é possível utilizar os recursos (e quanto?) sem modificar o funcionamento do ecossistema?

Historicamente, há um senso comum do que seja biomonitoramento. Mesmo pessoas leigas têm noção de que o odor de gás sulfídrico (H_2S) na margem de uma lagoa poluída com esgotos domésticos é um sinal claro de perda de qualidade ambiental relacionada ao processo de eutrofização artificial e produção de gases tóxicos. Da mesma forma, a alta mortandade de peixes em lagoas costeiras no verão é facilmente relacionada à diminuição de oxigênio dissolvido na coluna d'água. A contaminação por mercúrio das águas dos rios na Amazônia, especialmente em áreas de garimpo de ouro, tem destaque nos meios de comunicação. Desde o início da revolução industrial, canários eram utilizados em minas de carvão como indicadores de perda da qualidade do ambiente – no caso, presença de gases tóxicos no ar. Desde o início do século XX, os limnólogos têm trabalhado para identificar espécies indicadoras da degradação de rios e lagos e na classificação biológica de ecossistemas de água doce. No entanto, comparada

a outras ciências, como a bioquímica, a biologia molecular e a genética, a limnologia tem apresentado desenvolvimento lento.

A utilização de organismos bentônicos como bioindicadores de qualidade da água apresenta vantagens e dificuldades que devem ser consideradas (Rosenberg & Resh, 1993). As vantagens incluem: ciclo de vida longo quando comparados aos organismos planctônicos e perifíticos, permitindo respostas temporais; são organismos grandes, sésseis ou de pouca mobilidade; são de fácil amostragem; há técnicas padronizadas; o custo dos equipamentos é relativamente baixo; apresentam elevada diversidade biológica; a identificação taxonômica no nível de famílias e alguns gêneros é relativamente simples; são sensíveis a concentrações de poluentes e respondem à contaminação ambiental; e oferecem respostas a longa distância por toda a extensão das bacias hidrográficas. As dificuldades mais comuns são: amostragens quantitativas necessitam de grande número de amostras, que podem ter custo financeiro elevado; outros fatores, além da qualidade das águas, podem afetar sua distribuição e abundância de organismos; variações sazonais podem complicar interpretações de resultados e comparações ecológicas; a propensão de alguns grupos a serem transportados pela correnteza (movimentos de drift) pode se contrapor à natureza sedentária de várias espécies bentônicas; há muitos métodos disponíveis para sua análise; alguns grupos não são bem conhecidos taxonomicamente; e os macroinvertebrados bentônicos não são sensíveis a algumas perturbações, como patógenos humanos e elementos-traço de alguns poluentes.

Inúmeras ferramentas estatísticas têm sido utilizadas para avaliar a biodiversidade bentônica, incluindo índices de diversidade de Shannon-Wiener, estimativas de abundância e densidade de organismos, índices como BMWP e ASPT, classificações em grupos tróficos funcionais (por exemplo, coletores, herbívoros ou predadores), identificação de habitats preferenciais, estimativas das relações entre número de Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera (EPT) *versus* Chironomidae e Oligochaeta e estimativas de índices de integridade biótica.

Programas de Biomonitoramento Ambiental utilizando macroinvertebrados bentônicos devem amostrar antes e após a instalação de um projeto (o que é raro!) e a montante e a jusante da localização às margens de um rio. Em geral, as principais perguntas que devem ser respondidas são: As técnicas de manejo estão funcionando? As medidas de conservação são adequadas? Quando possível, é desejável buscar predizer os impactos ambientais *a priori* (antes que ocorram). Nesse sentido, merecem destaque as iniciativas de desenvolvimento de estudos a longo prazo, com duração de algumas décadas, capazes de detectar problemas ambientais quando estão começando. Em algumas situações, os estudos com macroinvertebrados bentônicos têm por meta avaliar a conformidade das medidas mitigadoras de impactos ambientais e oferecer respostas rápidas ante a legislação ambiental por meio de um controle de qualidade da água a longo prazo. Além disso, os macroinvertebrados podem ser utilizados para testar cargas poluidoras de efluentes (em experimentos de ecotoxicologia) e manter padrões antes e após a construção de um empreendimento.

Em estudos ecológicos é de fundamental importância contextualizar as escalas de tempo e espaço, delimitando a área de estudos considerando microhabitats (por exemplo, partículas individuais), mesohabitats, macrohabitats (seqüências de rápidos e remansos e trechos e seções de rios) e até bacias hidrográficas inteiras.

Utilizando o conceito de bacia hidrográfica como unidade de estudos, a preservação da mata ciliar ao longo dos rios está associada a uma série de funções críticas e de serviços ecológicos dos ecossistemas, incluindo a manutenção de estruturas de habitat, barreiras naturais a poluentes, condução e transporte de materiais, filtração e penetração seletiva e fonte de troca de materiais, energia e organismos entre o ecossistema aquático e os sistemas terrestres adjacentes. Em síntese, a largura da vegetação influencia o tamponamento (funções de filtração e barreira) de substâncias dissolvidas, como nitrogênio e fósforo, que apenas chegam ao corpo d'água por transporte superficial, absorção por raízes, argilas e matéria orgânica do solo.

Projetos de pesquisa que buscam avaliar a qualidade da água em bacias hidrográficas consideram a mensuração de parâmetros físicos e químicos, a utilização de macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores, a avaliação de bactérias com genes resistentes a antibióticos, os testes ecotoxicológicos e a utilização de indicadores microbiológicos. Nesse contexto, deve-se ainda avaliar a diversidade de habitats, o uso e ocupação do solo nas áreas de entorno e os processos ecológicos básicos, como produção primária e secundária, consumo em cadeias alimentares (por exemplo, avaliação dos grupos tróficos funcionais e a utilização de recursos alimentares disponíveis) e, eventualmente, o estudo de organismos-sentinela em experimentos de ecotoxicologia (bioacumuladores de substâncias tóxicas). Os resultados obtidos em inventários de biodiversidade são úteis na proposição de tipologias de comunidades, de habitats e de trechos de rios, podendo subsidiar discussões sobre possíveis relações entre diversidade taxonômica e produtividade de ecossistemas ao longo de gradientes altitudinais e longitudinais em bacias hidrográficas.

Por toda a extensão das bacias hidrográficas há uma grande variedade de ecossistemas lóticos e lênticos. Dentre estes, os lagos são o elemento central na paisagem, estando normalmente encaixados em um "buraco", e com uma fonte de água que está sempre em movimento, evaporando, precipitando, variando em nível e em área de inundação. Observando o output e o input, surgem questões sobre onde, de que forma e qual a quantidade dessas entradas e saídas de água. Diferentemente dos rios, os lagos não constroem sua própria bacia, estão inseridos na bacia hidrográfica. Os processos geomorfológicos que deram origem aos lagos são relacionados a movimentos da crosta terrestre, eventos que ocorreram durante ou após a última glaciação (Pielou, 1999).

Ao chegar à beira de um lago, o limnólogo se depara com um verdadeiro laboratório natural, onde toda a biodiversidade aquática reflete um amplo conjunto de variáveis abióticas e suas interações entre si e com o meio em que vivem, sustentadas pelos processos ecológicos mantenedores (produção, consumo e decomposição de matéria orgânica). Algumas perguntas vêm logo à mente (Pielou, 1999; Hauer & Lamberti, 1996): Qual deve ser a profundidade?; Há macrófitas aquáticas?; Como é a paisagem

em que o lago está inserido?; Qual a cor da água?; Qual o estado trófico do lago?; Quais organismos devem viver aqui?

Por todos esses fatores, as comunidades bentônicas que vivem em sistemas lênticos apresentam composição taxonômica e estratégias adaptativas totalmente distintas daquelas que vivem em sistemas lóticos. Os lagos são massas d'água umas sobre as outras, diferindo quanto à temperatura e teores de nutrientes, que influenciam diretamente a produtividade primária. As plantas verdes e as algas microscópicas (grande mistura de coleções de organismos fotossintéticos) não podem viver sem luz, os animais não podem viver sem oxigênio e todos os processos fisiológicos que ocorrem nos organismos vivos dependem do oxigênio e da temperatura (Pielou, 1999).

Decomposição como Ferramenta de Avaliação de Impactos Ambientais

A decomposição em ecossistemas aquáticos é um processo importante na ciclagem de nutrientes e de energia estocada na necromassa vegetal acumulada. Nos ecossistemas lóticos, a entrada de matéria orgânica alóctone recebe grande atenção, principalmente nas regiões de cabeceira, como proposto no conceito de contínuo fluvial (RCC de Vannote et al., 1980), constituindo a principal fonte de energia nesses ecossistemas.

O estudo do processo de decomposição de detritos foliares de origem alóctone é fundamental para a compreensão do fluxo de energia e manutenção do metabolismo em riachos (Benfield, 1997; Wallace et al., 1997; Henry et al., 1994). O modelo tradicional de decomposição de matéria orgânica em riachos é dividido em três fases (Figura 1): (1) Lixiviação – perda rápida das moléculas solúveis em água após a imersão, essa fase dura algumas horas; (2) Condicionamento – modificação da matéria orgânica por microorganismos (fungos e bactérias), transformando o substrato e tornando-o palatável para os invertebrados; (3) Fragmentação física – resultado da abrasão física e do estresse exercido pelo fluxo d'água e a atividade alimentar dos invertebrados. Essa seqüência de fases não deve ser vista apenas como um processo sucessional ou temporal, mas como eventos que ocorrem simultaneamente e que interagem durante a decomposição da matéria orgânica (Allan, 1995; Gessner et al., 1999; Esteves, 1998). Durante o processo de decomposição, alguns aspectos teóricos podem ser considerados, como: sucessão ecológica, ciclagem de nutrientes e modificações globais (como, por exemplo, aumento da concentração de CO_2 na atmosfera e efeito estufa).

Durante o processo de decomposição alguns fatores são capazes de modificar esse processo, como: (1) Físicos – temperatura, vazão e turbidez; (2) Químicos – na água, são o oxigênio, o pH, o nitrogênio, o fósforo e os metais pesados, e no detrito são a lignina, o fósforo, o nitrogênio, os lipídeos, os carboidratos e os fenóis; (3) Biológicos – são os invertebrados e os microorganismos (fungos e bactérias). Qualquer tipo de poluição que altere as condições naturais desses fatores modificará o tempo e a forma como ocorrerá a decomposição.

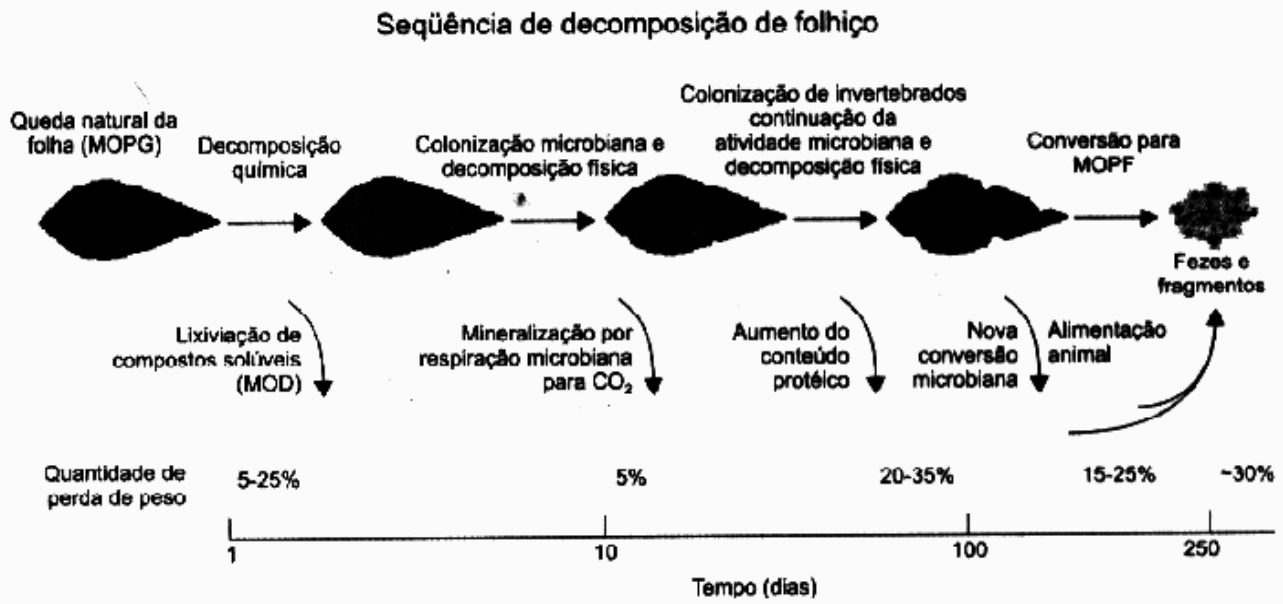


Figura 1 Esquema de decomposição de detritos foliares em córregos de altitude.

Os vários impactos antrópicos alteram de alguma forma os fatores listados anteriormente e, conseqüentemente, modificam o processo de decomposição de detritos. Diante desse fato, o trabalho publicado por Gessner & Chauvet (2002) propõe a utilização do processo de decomposição em estudos de impacto ambiental, avaliando a integridade ecológica de ecossistemas lóticos, por meio da utilização de uma abordagem funcional, que é recente e vem revelando bons resultados na investigação de impactos decorrentes de aumento de nitrogênio e fósforo (Gulis & Suberkropp, 2003) na avaliação de impactos decorrentes de esgoto e retirada da vegetação marginal (Moulton & Magalhães, 2003) e em atividades mineradoras (Niyogi et al., 2001).

A primeira pergunta que surge é: Por que utilizar essa abordagem visto que já há outras amplamente difundidas? A vantagem é que ao trabalhar com processos ecológicos passa-se a ter uma visão integrada do ecossistema. No processo de decomposição, a maior parte dos invertebrados é proveniente da comunidade bentônica. Além disso, a comunidade microbiana (bactérias e fungos) tem dependência direta do ecossistema terrestre e das condições físicas e químicas da água e do substrato orgânico em si, o que demonstra que qualquer alteração em um desses compartimentos poderá modificar a dinâmica da matéria orgânica e, assim, a principal fonte de energia e as trocas de materiais na ciclagem de nutriente em todo o ecossistema aquático.

Dentro desse contexto, propõem-se algumas formas de utilizar o processo de decomposição como abordagem de avaliação de impacto ambiental (Tabela 1). Naturalmente, a decisão dependerá de fatores relacionados ao orçamento disponível, ao treinamento da equipe, à infra-estrutura, ao tempo e ao foco adotado.

Tabela 1 Propostas de dois protocolos de avaliação de decomposição de detritos em rios submetidos a impactos ambientais.

Parâmetros mensuráveis	Proposta 1	Proposta 2
Abordagem	Rápida	Monitoramento
Tempo de duração	3 meses	> 2 períodos sazonais
Identificação de espécies	Desejável	Necessário
De vegetação ripária e estudo da dinâmica de MO	Desejável	Necessário
Avaliação da taxa de decomposição (k)	Sim	Sim
Identificação de invertebrados	Família	Gêneros e/ou espécies
Comunidade microbiana	Sim	Sim
1 – Taxas de respiração	Se possível	Recomendável
2 – Biomassa total (por ATP) e hifomicetos (por Ergosterol)	Se possível	Recomendável
3 – Atividade reprodutiva por esporulação	Se possível	Recomendável

O grande resultado da integração vivenciada durante o minicurso ministrado foi a troca de endereços eletrônicos e uma web page sobre ecologia e taxonomia de organismos bentônicos que está sendo organizada e em breve será disponibilizada na internet.

Referências Bibliográficas

ALLAN, D. J. *Stream ecology*: structure and function of running waters. Londres: Chapman & Hall, 1995. 388 p.

BENFIELD, E. F. *Comparison of litterfall imput streams*. Stream Organic Matter Budgets, 1997.

ESTEVES, F. A. *Fundamentos de limnologia*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editor Interciência: FINEP, 1998. 575 p.

GESSNER, M. O.; CHAUVET, E.; DOBSON, M. A perspectiveon leaf litter breakdown in stream. *Oikos*, v. 85, p. 377-384, 1999.

GESSNER, M. O.; CHAUVET, E. A case for using litter breakdown to assess functional stream integrity. *Ecological application.*, v. 12, n. 2, p. 498-510, 2002.

GULIS, V.; SUBERKROPP, K. Interactions between stream fungi and bacteria associated with decomposing leaf litter at different levels if nutrient availability. *Aquatic Microbial Ecology*, v. 30, p. 149-157, 2003.

HAUER, F. R.; LAMBERTI, G. A. *Methods in stream ecology*. Ed. Academic Press, 1996. 674 p.

HENRY, R.; UIEDA, V. S.; AFONSO, A. A. de O.; KIKUCHI, R. M. Imput of allochthonous matter and structure of fauna in a brazilian headstrem. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, v. 25, p. 1866-1870, 1994.

MOULTON, T. P.; MAGALHÃES, S. A. P. Responses of leaf processing to impacts in streams in atlantic rain florest, Rio de Janeiro, Brazil – a test of the biodiversity-ecosystem functioning relationship? *Brazilian journal of Biology*, v. 63, n. 1, p. 87-95, 2003.

NIYOGI, D. K.; LEWIS, W. M. Jr.; McKNIGHT, D. M. Litter breakdown in mountain streams affected by mine drainage: biotic mediation of abiotic controls. *Ecological Application*, v. 11, n. 2, p. 506-516, 2001.

PIELOU, E. C. FRESHWATER. Chicago: The University of Chicago, 1998. 275 p.

PRIMACK, R. B.; RODRIGUES, E. *Biologia da conservação*. Londrina: Ed. Primack, 2001. 327p.

ROSENBERG, D. M.; RESH, V. H. *Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates*. New York: Chapman & Hall, 1993. 488 p.

VANOTTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, v. 37, p. 130-137, 1980.

WALLACE, J. B.; EGGERT, S. L.; MEYER, J. L.; WEBSTER, J. R. Multiple trophic levels of a forest stream linked to terretrial litter imputs. *Science*, v. 277, p. 102-104, 1997.