

SEMINÁRIO INTERNACIONAL

BIOMANIPULAÇÃO E REABILITAÇÃO DE LAGOAS



Ponta Delgada, 1 de Março de 2004

LIVRO DE RESUMOS

Editor: José Manuel N. Azevedo

ÍNDICE

Gary Schafran

Fontes de nutrientes endógenas e exógenas e a sua influência na qualidade da água em lagos	1
Watershed and within-lake sources of nutrients and their influence on lake water quality.....	

Maynard Schaus

Nutrientes produzidos por peixes bentívoros, e a sua importância nos lagos	
Nutrient loading by sediment-feeding fish and its importance in a reservoir system	

Brian Moss

Arte e filosofia da reabilitação de lagos.....	
Art and philosophy of lake restoration	

Harry Hosper

Reabilitação de lagos nos Países Baixos: do controlo de nutrientes à gestão dos ecossistemas lacustres.....	
Lake restoration in The Netherlands: from nutrient control towards the management of lake ecosystems	

Erik Jeppesen (com Martin Søndergaard, Jens Peder Jensen, Torben Lauridsen e Susanne L. Amsinck)

O papel dos peixes na qualidade da água em lagos: dados de monitorização, de experiências e de paleontologia do sedimento	
The role of fish for water quality in lakes: evidence from monitoring data, experiments and biological fossils in the sediment	

Ellen van Donk

Efeitos a curto e longo prazo da remoção de peixes zooplanctonívoros no lago Zwemlust: 15 anos de dados.....	
Short- and long-term effects of zooplanktivorous fish removal in Lake Zwemlust: a synthesis of 15 years of data	

Martin Søndergaard (com Erik Jeppesen)

Reabilitação de lagos na Dinamarca: resultados e experiência.....	
Lake restoration in Denmark: results and experience	

Fontes de Nutrientes Externas e Internas e a sua Influência na Qualidade da Água

Gary C. Schafran

Civil and Environmental Engineering Department, Old Dominion University
Norfolk, VA , U.S.A.

A saúde de um ecossistema lacustre está fortemente ligada à sua bacia hidrográfica. Esta relação existe porque a maioria da água que entra num lago tem origem em precipitação que primeiro se infiltra no solo e depois atravessa a superfície da bacia hidrográfica antes de chegar ao lago. Em bacias hidrográficas em que a actividade humana é pouco intensa, a vegetação natural é geralmente capaz de reter a maioria dos nutrientes. Em consequência, a concentração de nutrientes (principalmente fósforo e azoto) é baixa na água que drena dessas bacias e nos lagos que recebem essa água. Uma vez que esses nutrientes são essenciais para o crescimento das plantas aquáticas e dos animais, as suas baixas concentrações limitam a abundância da flora e fauna aquáticas e isto resulta tipicamente em lagos com uma elevada qualidade da água. Estes são ainda caracterizados por baixas concentrações de micro-algas (fitoplâncton), pouca ou nenhuma vegetação submersa (macrófitos), e águas bem oxigenadas e muito transparentes, nas quais a luz pode penetrar até profundidades consideráveis.

As actividades humanas na bacia hidrográfica resultam muitas vezes numa perturbação deste equilíbrio e resultam no aumento da entrada de nutrientes para o lago, e no aumento da respectiva concentração dentro dele. Este aumento da concentração de nutrientes (eutrofização) é em regra devido aos dois nutrientes cujo aumento é mais frequentemente observado: o azoto e o fósforo. Nestas condições, aumenta também a abundância do fitoplâncton, dos macrófitos e dos organismos aquáticos dos níveis mais elevados da cadeia trófica, surgindo muitas vezes espécies menos desejáveis. O fitoplâncton é muitas vezes dominado por espécies de algas azuis (cianobactérias), que flutuam perto da superfície e produzem problemas de cheiro e de sabor. Os macrófitos muitas vezes enchem as áreas menos profundas junto às margens, podendo tornar-se prejudiciais do ponto de vista recreativo ou de segurança. Tendem a desenvolver-se também espécies de peixes que se alimentam no fundo (bentívoras), as quais têm menos valor para a pesca desportiva. No verão podem produzir-se condições em que as águas mais profundas fiquem desprovidas de oxigénio, causando perda de habitat para peixes e a libertação a partir do sedimento de nutrientes e outras substâncias indesejáveis. Devido a todas estas alterações a transparência dos lagos decresce e a qualidade estética geral do lago decresce.

O fósforo é muitas vezes o nutriente limitante, o que quer dizer que está presente em concentrações baixas, que limitam o crescimento biológico que pode ocorrer no lago. Aumentos e diminuições da concentração deste nutriente limitante provocam, em geral, o aumento ou diminuição do crescimento biológico no lago. Por causa desta relação, muitos dos esforços de gestão são dirigidos ao controle da entrada de fósforo na água. Essa entrada provém basicamente de duas fontes: da bacia hidrográfica, quer por escorrência superficial (e.g. ribeiras) quer por infiltração subterrânea, e da libertação no interior do próprio lago, quer dos sedimentos quer dos organismos nele existentes.

Nem todas as actividades numa bacia hidrográfica contribuem igualmente para a libertação de nutrientes, e a localização das actividades que geram ou libertam nutrientes influencia fortemente o modo como estes chegam ao lago. As fontes de nutrientes mais importantes ligadas à actividade humana são as águas residuais humanas e animais (ambas ricas em fósforo e azoto), fertilizantes aplicados em actividades agrícolas, e a perturbação de solos que podem ser ricos em fósforo. Todas estas fontes têm maior impacto no enriquecimento nutritivo de um lago quando ocorrem perto das suas margens ou perto de ribeiras que descarregam directamente no lago. Isto acontece porque os nutrientes são transportados rapidamente para o lago, antes que os processos naturais na bacia hidrográfica possam absorvê-los. O reconhecimento deste fenómeno levou ao desenvolvimento do conceito de "faixas tampão" enquanto ferramentas de gestão da bacia hidrográfica. As faixas tampão são áreas terrestres adjacentes aos ecossistemas aquáticos nas quais se determinou que os nutrientes nelas gerados são rapidamente transportados para a água. Consequentemente, as actividades humanas e animais nessas áreas são minimizadas, de modo a reduzir a entrada de nutrientes nos lagos.

Os nutrientes dissolvidos na água e transportados para um lago podem ser absorvidos pelo fitoplâncton e pelos macrófitos e integrar-se na teia alimentar, como referido anteriormente. O fósforo também pode entrar num lago suspenso em partículas e assentar no sedimento do fundo. Na teia alimentar os nutrientes são absorvidos e libertados (i.e. reciclados) durante os processos normais de alimentação, crescimento, reprodução e morte, que ocorrem numa base contínua. Em períodos em que a actividade biológica é maior (e.g. verão), a reciclagem e absorção de nutrientes ocorrem a uma taxa mais elevada e a concentração de nutrientes dissolvidos na água (i.e., que não está retida no material celular) está tipicamente no seu ponto mais baixo. Uma fracção do material celular, e do fósforo e azoto nele contidos, é removida da coluna de água quando os organismos mortos assentam no fundo do lago. Uma parte dos nutrientes deste material pode ser libertada do sedimento, enquanto o restante é retido e eventualmente enterrado.

Em muitos lagos, a libertação de fósforo dos sedimentos é uma fonte de fósforo para a coluna de água suficientemente importante para contribuir para a diminuição da qualidade

da água. Estes lagos são normalmente aqueles que recebem grandes entradas de fósforo da bacia hidrográfica, ao longo de muitos anos, e que têm taxas baixas de renovação. Os esforços de reabilitação nestes sistemas requerem muitas vezes a diminuição das entradas de fósforo, e a redução da quantidade deste elemento no sedimento. É normal referir que a manutenção da oxigenação da água ao nível da interface água-sedimento favorece a retenção do fósforo no sedimento, mas nem sempre tal é observado em circunstâncias experimentais. Quando ocorre perturbação do sedimento por peixes bentívoros, que nele se alimentam, criam-se condições para que o fósforo seja recolocado na coluna de água, ficando disponível para estimular a produção biológica. Consequentemente, espera-se que a minimização da presença desses peixes, através da alteração das condições da água do lago ou da sua remoção selectiva, resulte numa menor libertação de fósforo do sedimento.

A entrada e reciclagem na coluna de água, e a retenção e re-libertação de nutrientes dos sedimentos lacustres são processos dinâmicos, intrincadamente relacionados com os processos hidrológicos, biológicos e geoquímicos que ocorrem nos lagos. Através de um estudo detalhado é possível determinar a contribuição em nutrientes das diferentes fontes potenciais, desenvolvendo depois estratégias de reabilitação que possam ser efectivas na diminuição da entrada de nutrientes para a água. Só através de um controlo efectivo das entradas de nutrientes pode ser melhorada a qualidade da água num lago eutrofizado.

Watershed and Within Lake Sources of Nutrients and Their Influence on Water Quality

Gary C. Schafran

Civil and Environmental Engineering Department, Old Dominion University
Norfolk, VA, U.S.A.

The health of a lake ecosystem is strongly linked to its watershed. This relationship exists because the majority of water that enters a lake originates from precipitation that first travels through the soils and across the watershed land surface before reaching the lake. In watersheds where few human activities occur, forests or grasslands are usually capable of retaining most of the nutrients that are found in precipitation. As a consequence, the concentrations of nutrients (primarily phosphorus and nitrogen) are low in the waters that drain from these watersheds and in the lakes that receive these waters. Since these

nutrients are essential for the growth of aquatic plants and animals, their low concentrations limit the abundance of aquatic flora and fauna and this typically results in lakes with high water quality. Characteristic of lower nutrient concentrations are low concentrations of algae (phytoplankton), little or no rooted aquatic vegetation (macrophytes), well-oxygenated lower waters, and generally very transparent lake water where sunlight can penetrate to deeper depths.

Human activities in a watershed often disturb the balance between a watershed and a lake and result in increased nutrient inputs to and concentrations within a lake. The two nutrients that are most commonly observed to increase in concentration when lakes are undergoing nutrient enrichment (eutrophication) are nitrogen and phosphorus. When concentrations of nitrogen and/or phosphorus increase in a lake the abundance of phytoplankton, macrophytes, and aquatic organisms higher up the food web typically increase and often change to less desirable species. Phytoplankton species often shift to blue-green algae (cyanobacteria) species that often produce taste and odor problems and float near or at the lake surface. Macrophytes often fill the shallow depths of near-shore regions of lakes to high density and can become a recreational nuisance and a safety hazard. Fish species, from a recreational sport fishing perspective, often shift to less desirable species including bottom feeders. Dissolved oxygen in the bottom waters often is completely removed during the summer causing loss of fish habitat and the release of nutrients from the sediment as well as other undesirable substances. Because of these many changes the transparency of lakes typically decreases and the overall aesthetic quality of the lake is lower when nutrient enrichment occurs.

Phosphorus is often the limiting nutrient, meaning it is present at concentrations that limit the amount of biological growth that can occur in a lake. Increases or decreases in the concentration of the limiting nutrient generally directly cause the increase or decrease in the amount of biological growth in a lake. Because of this relationship, many lake management efforts are directed toward controlling the inputs of phosphorus to lake waters. The inputs to the water column in a lake come primarily from two sources: from the watershed both drainage water (e.g. streams, rivers) and groundwater and within the lake the release of nutrients from sediments and from biological organisms.

Within watersheds not all activities contribute equally to nutrient release and the location at which nutrient generating or releasing activities occur strongly influences whether nutrients will reach a lake. Within most watersheds where human activities occur, the most significant sources of increased nutrients to lakes are human and animal wastes (both rich in nitrogen and phosphorus), fertilizers applied to agricultural fields, and the disturbance of soils that may be rich in phosphorus. All of these sources have a greater impact on nutrient enrichment in a lake when they occur adjacent to the lake or adjacent to streams that

discharge directly to a lake. Nutrient generating sites near aquatic systems have a greater impact on nutrient enrichment in lakes due to the quick transport that can occur to the aquatic system before natural processes in the watershed are capable of taking up the nutrients. This condition is largely responsible for the development of the watershed management tool referred to as buffer strips. Buffer strips are land areas adjacent to aquatic systems where it has been determined that nutrients generated in these areas would be quickly transported to a lake. With buffer strips, human and animal activities in these land areas are minimized which leads to lower nutrient inputs to lakes.

Nutrients dissolved in water and transported to a lake can be taken up by phytoplankton and macrophytes and become a part of the food web (as noted above). Phosphorus may also enter a lake suspended to particles and the phosphorus may settle to the bottom or be available to some species of phytoplankton. Within the food web, nutrients are typically taken up and released (i.e. cycled) during the normal processes of feeding, growing, reproducing, and dying and occur on a continuous basis. During biologically active periods (e.g. summer) nutrient cycling and uptake occurs at a much higher rate and the dissolved nutrient concentration in the water column (i.e. that not present as cellular material) is typically at its lowest concentration. A fraction of cellular material and the nitrogen and phosphorus contained within this material is removed from the water column when dead organisms settle to the bottom of a lake. A portion of the nutrients from this material may be released from the sediment while the remainder is retained and eventually buried.

In many lakes, the release of phosphorus from the sediments is a significant source of phosphorus to the lake water column and sufficient to be an important contribution to poor water quality. These lakes are typically ones that have received large watershed inputs of phosphorus over many years and have slow rates of water flushing. Lake remediation efforts in systems such as these often require both decreases in watershed inputs and lowering of sediment phosphorus release to improve water quality. Maintenance of dissolved oxygen concentrations in the water column at the sediment-water interface is generally reported as favoring phosphorus retention in the sediments, though not always observed when implemented. Where sediment disturbance by bottom feeding fish occurs, these fish can increase the release of phosphorus back to the water column where it is available for stimulating biological production. Consequently, minimizing the presence of these fish through alteration of lake water conditions or their selective removal is expected to result in lower release of sediment phosphorus to the water column.

The input and cycling within the water column and the retention and re-release of nutrients from lake sediments are dynamic processes and intricately related to the hydrologic, biological, and geochemical processes that occur in lakes. Through detailed study it is possible to determine the contribution of nutrients from the different potential

sources and to develop remediation strategies that can be effective in lowering nutrient inputs to a lake's water column. Only by effectively controlling nutrient inputs to a lake's water column can a lake that is currently nutrient enriched be returned to a condition of higher water quality.

Nutrientes Produzidos por Peixes Bentívoros, e a sua Importância nos Lagos

Maynard Schaus

Virginia Wesleyan College, Department of Biology
Norfolk, VA, U.S.A.

A importância da entrada de nutrientes na determinação da produtividade de um lago está bem estabelecida. Mais recentemente, os investigadores têm procurado examinar os modos pelos quais os consumidores influenciam a abundância e/ou a produtividade do fitoplâncton. Verifica-se que os consumidores podem alterar a biomassa do fitoplâncton e a produtividade alterando a configuração da teia alimentar através de mecanismos "top-down", mediados pela predação. Neste mecanismo, alterações de abundância no nível trófico superior provocam alterações de abundância no nível trófico imediatamente inferior, descendo em cascata a cadeia trófica até afectar o fitoplâncton. Com base neste efeito, colocou-se a hipótese de a biomaniplulação dos peixes poder ser usada para reduzir a biomassa de fitoplâncton e assim melhorar a transparência da água. Outros investigadores notaram que alterações na biomassa dos consumidores afectam simultaneamente as taxas com que estes reciclam os nutrientes. Deste modo, os consumidores podem fornecer directamente ao fitoplâncton os nutrientes que estimulam a produtividade algal e aumentam a biomassa, através de um mecanismo "bottom-up", mediado pelos recursos.

As implicações desta fonte de nutrientes para o fitoplâncton lacustre depende dos hábitos alimentares dos peixes. Quando estes se alimentam de zooplâncton na coluna de água, reciclam os nutrientes de volta para o fitoplâncton mas não proporcionam uma nova fonte de nutrientes para a coluna de água. Assim, não se esperaria que os peixes zooplanctonívoros aumentassem o conteúdo de nutrientes na coluna de água. Pelo contrário: funcionam como sorvedouros desses nutrientes, ao reterem-nos na sua própria biomassa. Em contraste, os peixes bentívoros (que se alimentam do fundo) podem aumentar a carga de nutrientes na coluna de água ao alimentarem-se de itens colhidos no

fundo (detritos, invertebrados bênticos, etc.) e excretando uma parte dos respectivos nutrientes na coluna de água. Ao transportar nutrientes do habitat bêntico para o pelágico, os peixes que se alimentam do sedimento representam uma fonte de nutrientes para o habitat pelágico que pode ser comparada à entrada de nutrientes provenientes do exterior do próprio lago.

Em colaboração com colegas da Miami University (Oxford, Ohio, U.S.A.) quantifiquei directamente a libertação de nutrientes por um peixe bentívoro, o sável-de-papo (*Dorosoma cepedianum*). Extrapolei depois os nutrientes fornecidos por esta espécie para a escala de todo o lago através de estimativas da população, e comparei esta fonte de nutrientes com aqueles recebidos da bacia hidrográfica. No verão, o sável-de-papo excretam quantidades substanciais de azoto (N) e fósforo (P), sendo a carga de N excretada de aproximadamente 1/3 da recebida via bacia hidrográfica, enquanto a carga de P era aproximadamente 10 vezes superior à das fontes externas deste elemento. A importância relativa desta fonte de nutrientes é maior quando as entradas via bacia hidrográfica são reduzidas.

Experiências feitas em áreas fechadas examinaram directamente o papel da alimentação no sedimento e do tamanho dos peixes no transporte de nutrientes do bentos e o subsequente impacto no fitoplâncton. O sável-de-papo apenas estimulou o crescimento do fitoplâncton quando os animais se conseguiam alimentar directamente do sedimento, e aumentaram o P total e os sólidos suspensos não-voláteis na coluna de água ao transportarem nutrientes dos sedimentos para a coluna de água numa forma solúvel. Para além disso, os peixes pequenos tiveram um impacto maior no fitoplâncton do que os peixes maiores, para a mesma biomassa total de peixe, devido à sua taxa de excreção superior.

Medições da biomassa de peixes mostraram uma redução substancial da biomassa do sável-de-papo na primavera e início do verão de 1996. Nesta altura o zooplâncton aumentou substancialmente, o fitoplâncton diminuiu e a transparência da água aumentou muito. Contudo, durante este tempo, os sáveis-de-papo passaram a alimentar-se do abundante zooplâncton (uma fonte alimentar de qualidade muito superior), o que levou a taxas de crescimento superiores e um subsequente aumento da biomassa deste peixe. Com base nestas observações e nos resultados experimentais parece que esta espécie pode ter um impacto importante no fitoplâncton através dos dois tipos de interacções: "top-down" e "bottom-up". Quando os sáveis-de-papo são muito abundantes inibem o zooplâncton e libertam nutrientes que estimulam o crescimento do fitoplâncton. Quando os sáveis-de-papo são raros, o fitoplâncton passa de ser limitado pelos nutrientes para o ser pela predação por zooplâncton. Este último estado pode, contudo, ser de novo alterado por modificações das taxas de crescimento dos peixes.

Os resultados deste e de outros estudos em lagos de baixa profundidade sugerem que mudanças em abundância dos peixes podem ter um impacto substancial no fitoplâncton

e na turbidez. As hipóteses de sucesso da biomanipulação serão maiores se as reduções da biomassa de peixes bênticos não levarem a condições que favoreçam o retorno aos níveis anteriores, como quando bentívoros omnívoros se passam a alimentar de zooplâncton.

Nutrient loading by sediment-feeding fish and its importance in a reservoir system

Maynard Schaus

Virginia Wesleyan College, Department of Biology
Norfolk, VA, U.S.A.

The importance of nutrient loading in determining lake productivity has been well established. More recently, investigators have examined the ways in which consumers interact to influence the abundance and/or productivity of phytoplankton. Consumers may alter phytoplankton biomass and productivity by altering food web configuration via "top-down" (predation-based) mechanisms whereby shifts in the abundance of the top trophic level alter the abundance of the next lower trophic level, ultimately cascading down the food chain to impact phytoplankton. As a result, it has been hypothesized that fish biomanipulation may ultimately be utilized to reduce phytoplankton biomass and improve water clarity. Other investigators have noted that shifts in consumer biomass simultaneously impact the rates and/or ratios at which consumers recycle nutrients. In this way, consumers directly supply phytoplankton with nutrients that can stimulate algal productivity and biomass through "bottom-up" (resource-based) mechanisms.

The implications of this supply of nutrients for lake phytoplankton depend upon the feeding habits of the fish. When fish feed on zooplankton within the water column, they are capable of recycling nutrients back to phytoplankton, but do not provide a new source of nutrients to the water column. Thus, planktivorous fishes would not be expected to increase the total nutrient content of the water column, and they may serve as nutrient sinks by sequestering nutrients into their own biomass. In contrast, benthic-feeding fishes can increase the total nutrient content of the water column by feeding on benthic food items (sediment detritus, benthic invertebrates, etc.) and excreting a portion of these nutrients into the water column. By transporting nutrients from benthic to pelagic habitats, sediment-feeding fish represent a net source of nutrients to pelagic habitats, which is best compared with external nutrient loading.

In conjunction with collaborators at Miami University (Oxford, Ohio, U.S.A.), I directly quantified nutrient release by a sediment-feeding fish, the gizzard shad (*Dorosoma cepedianum*). I then extrapolated nutrients supplied by gizzard shad to the whole-lake scale based on gizzard shad population estimates, and compared this source of nutrients with nutrients transported by the watershed. In summer, gizzard shad were found to excrete substantial quantities of nitrogen (N) and phosphorus (P), with N loading approximately 1/3 that of the watershed and P loading approximately 10 times that of the watershed. The relative importance of this nutrient source is greatest when watershed inputs are reduced.

Enclosure experiments directly examined the role of sediment feeding and fish size on nutrient transport from the benthos and its subsequent impacts on the phytoplankton. Gizzard shad only stimulated phytoplankton when they were able to directly feed on sediments, and sediment-feeding fish were able to increase total water column P and non-volatile suspended solids (NVSS) by transporting sediment nutrients up into the water column in soluble form. In addition, small fish had a greater impact on phytoplankton than did larger fish, due to greater mass-specific excretion rates by an equivalent biomass of small fish.

Fish biomass measurements documented a substantial reduction in gizzard shad biomass during spring through mid-summer 1996. During this time, zooplankton increased substantially, phytoplankton decreased, and water clarity was greatly increased. However, during this time, gizzard shad switched to feed on abundant zooplankton (a much higher quality food source), leading to markedly increased fish growth rates and a large subsequent increase in gizzard shad biomass. Based upon lake-wide changes observed and the results of enclosure experiments, it appears that this species can greatly impact phytoplankton by both "top-down" and "bottom-up" interactions. Abundant gizzard shad simultaneously suppress zooplankton and release nutrients that stimulate phytoplankton growth. When gizzard shad are rare, phytoplankton appear to shift from nutrient limitation to grazer limitation. However, this state can be subsequently impacted by changes in fish growth rates.

The results of these studies and others in shallow lakes suggest that the shifts in the abundance of fish can substantially impact algae and turbidity in lakes. Biomaniplulation will likely be most successful if reductions in benthic-feeding fish biomass do not lead to conditions which favor subsequent rebounding of the fish population biomass, such as if omnivorous benthivores switch to feed on abundant zooplankton.

A Arte e a Ciência da Reabilitação de Lagos

Brian Moss

University of Liverpool, School of Biological Sciences, UK

Os lagos são componentes estéticos da paisagem, importantes para o abastecimento de água, conservação da natureza e turismo. Contudo, eles não subsistem isolados. Por receber água que escorre da região envolvente, a qualidade de um lago depende de como a bacia hidrográfica é usada e gerida. Os lagos são para a bacia hidrográfica o que o balde do lixo é para uma casa. Se o balde está cheio de lixo, o estilo de vida da casa pode ser demasiado extravagante. Se um lago tem problemas, isso deve-se muitas vezes ao uso pouco prudente da bacia hidrográfica.

Os lagos têm dois grupos principais de comunidades interligadas: o plâncton na massa de água, que determina a respectiva limpidez e quanto custa preparar a água para poder ser bebida, e as comunidades da margem, ou zona litoral. Estas contêm a maior parte da biodiversidade e são normalmente dominadas por plantas. A zona litoral afecta o que acontece no plâncton por causa dos movimentos dos peixes e de outros animais. Um lago de baixa profundidade (cerca de 3 m) terá a maior parte do seu fundo coberta de plantas, e estas dominarão o funcionamento do lago. Os nutrientes provindos da bacia hidrográfica, especialmente os compostos de azoto e fósforo, determinarão a produção potencial de plâncton, mas o grau com que esse potencial será realizado depende de processos biológicos controlados pelas comunidades litorais.

Muitos dos problemas dos lagos são causados por um aumento do fluxo normal de nutrientes (um processo designado eutrofização). Estes nutrientes podem provir de águas residuais, da agricultura, ou de ambas as fontes. Num lago profundo, em que a zona litoral é pequena e relativamente pouco influente, processos simples de controlo do fósforo podem ser suficientes para prevenir ou minimizar os problemas, mas num lago pouco profundo, onde o litoral é muito importante, a situação pode ser muito mais complexa.

Nos lagos pouco profundos, as primeiras fases da eutrofização são marcadas por um aumento da biomassa vegetal, e natureza das plantas muda, de plantas pequenas para espécies maiores e mais vigorosas, como os nenúfares. Contudo, se ocorrerem impactes negativos, as plantas podem desaparecer completamente e a água ficar turva devido ao florescimento das micro-algas. Estes impactes, designados interruptores negativos, podem incluir dano por corte, herbicidas, barcos, certas aves e peixes, especialmente espécies não-nativas, pesticidas, alterações do nível da água ou da salinidade. Todos estes factores podem perturbar os mecanismos biológicos (tampões) que estabilizam a comunidade

vegetal e mantêm a água limpa e a biodiversidade elevada. Se o lago muda para um estado dominado por micro-algas e sem plantas, a respectiva reabilitação e gestão terá que envolver mais do que simplesmente reduzir a entrada de nutrientes. Envolverá remover os interruptores negativos, controlar a entrada de nutrientes, manipular as comunidades de peixes de modo a favorecer os pequenos animais (zooplankton) que se alimentam das micro-algas e finalmente, nalguns casos, a reintrodução e protecção das plantas.

A ecologia deste sistema é bem conhecida, mas os resultados das tentativas de reabilitação são muitas vezes desapontadores. A comunidade vegetal que se desenvolve pode não ser muito diversa e o lago reverter em pouco tempo para um estado dominado por micro-algas. A razão para isto é muitas vezes um controlo insuficiente dos nutrientes. Pode ser necessário controlar tanto o azoto como o fósforo, mas normalmente é apenas o fósforo que é controlado. Muitas vezes, também, prestou-se pouca atenção ao lago no contexto da bacia hidrográfica: o âmbito de intervenção foi demasiado restrito. Para a reabilitação ser bem sucedida é necessária uma abordagem que envolva toda a bacia hidrográfica, e isto pode ter implicações importantes ao nível político e de gestão. De facto, as questões envolvidas na reabilitação bem sucedida de um lago são um pequeno reflexo daquelas que são necessárias para resolver os problemas ambientais mais gerais na Europa e no Mundo.

The Art and Science of Lake Restoration

Brian Moss

University of Liverpool, School of Biological Sciences, UK

Lakes are beautiful parts of the landscape, important for water supply, nature conservation and tourism. They do not stand alone, however. They are supplied by water that drains from their catchments and the quality of the lake depends on how the catchment is used and managed. Lakes are to their catchments what the trash can is to the house. If the can is full of rubbish, the lifestyle of the house may be too extravagant. If the lake has problems, it is often because the catchment is not being used wisely.

Lakes have two main groups of linked communities. There is the plankton of the open water, which determines how clear the water is and how expensive it is to prepare the water for drinking water, and there are the communities of the edge or littoral zone. These contain most of the biodiversity and are usually dominated by plants. The littoral zone affects what happens in the plankton because of movements of fish and other animals. A shallow lake

(perhaps about 3m mean depth) will generally have plants over most of its bottom and these will dominate the functioning of the lake. Nutrient supply from the catchment, especially of nitrogen and phosphorus compounds, will determine the potential production of the plankton, but the extent to which this production is achieved will depend on biological processes controlled by the littoral community.

Problems arise in lakes often because of increased flows of nutrients from the catchment (a process called eutrophication). These can come from wastewater disposal or agriculture or both. In a deep lake, where the littoral zone is small and relatively uninfluential, simple control of phosphorus may be enough to prevent or minimise problems, but in a shallow lake, where the littoral is very important, the situation may be much more complex.

Shallow lakes, if eutrophicated, will at first have increased plant growth and the nature of the plants will change from small species to taller, more vigorous species such as water lilies. However, if one or more of a number of other impacts occur, the plants may be lost completely and the water will become thick with algal growths. These impacts, called forward switches, might include damage by cutting, herbicides, boats, certain birds and fish, especially non-native species, pesticides, changing water levels or greatly changing salinity. All of these factors may upset the biological mechanisms (buffers) that stabilise the plant community and maintain clear water and high biodiversity. If the lake switches to a state dominated by algae and lacking plants, restoration and management will involve more than just reducing nutrient inputs. It will involve removing forward switches, nutrient control, manipulation of the fish communities to favour small animals (zooplankton) that feed on the algae, and then sometimes reintroduction and protection of the plants.

The ecology of this system is well understood but the results of restoration attempts are often disappointing. The plant community that develops may not be diverse and the lake may soon revert to an algal dominated state. The reasons are usually that there has been insufficient nutrient control. It may be necessary to control both nitrogen and phosphorus and usually only phosphorus is controlled. Often there has been too little attention to the lake in its catchment: the scheme has been too small. Successful restoration needs a whole-catchment approach and this may have wide management and political implications. Indeed successful lake restoration is just one small reflection of solving the wider environmental problems of Europe and the World.

Reabilitação Lacustre nos Países Baixos: do Controlo de Nutrientes ao Controlo dos Ecossistemas Lacustres

Harry Hoesper

Ecology Department, RIZA, The Netherlands

Os ecossistemas lagunares de baixa profundidade que sofrem de "blooms" algais tendem a tornar-se extremamente resistentes à recuperação, e a redução da carga externa de nutrientes parece ser insuficiente para restaurar as condições de água limpa e a biodiversidade. Por isso, o âmbito da estratégia de reabilitação de lagos nos Países Baixos ampliou-se gradualmente do controlo das fontes pontuais de fósforo para uma abordagem englobando todo o ecossistema, incluindo medidas como a biomaniplulação e, mais recentemente, a gestão do nível da água.

A estratégia para a reabilitação de lagos eutróficos de baixa profundidade (média 1-2 m) nos Países Baixos baseia-se na hipótese dos "estados estáveis alternativos", que sugere que, para níveis moderados de nutrientes, os lagos de baixa profundidade podem ocorrer em dois estados estáveis alternativos: um estado de água turva, dominado por fitoplâncton, e um estado de água limpa, rico em macrófitos submersos.

A primeira etapa na reabilitação de um lago é a redução da carga externa de nutrientes. Contudo, como o estado de turbidez é muito estável, podem ser necessárias medidas adicionais para inclinar a balança para um novo estado de equilíbrio com água limpa. Uma perturbação forte do sistema de água turva, através da redução drástica do stock de peixes planctonívoros e bentívoros, deve desencadear uma mudança para o estado de águas limpas em que os macrófitos submersos dominam. Este tipo de biomaniplulação mostrou ser um instrumento com sucesso em vários tipos de lagos nos Países Baixos.

Em resumo, pode dizer-se que a política de reabilitação de lagos nos Países Baixos inclui os seguintes passos:

1. Definir uma Qualidade Ecológica Boa (segundo os objectivos da Directiva-Quadro da Água). Procura-se obter um estado de águas limpas dominado por macrófitas, em que estas cubram 30-50% do fundo do lago. Tendo em vista a utilização do lago para recreio, são preferidas espécies de pequeno porte, como as Carófitas. A comunidade de peixes consiste em herbívoros, planctonívoros e piscívoros, com aproximadamente 20 kg/ha de cada grupo.

2. Controlo de nutrientes: primeiro, e acima de tudo, a carga externa deve ser reduzida, de modo a obter-se concentrações de fósforo total na massa de água de 50-100 mg/m³.

3. Biomaniplulação: deve ser efectuada uma redução drástica (mais de 75%) do stock de peixes planctonívoros e bentívoros. Em lagos interligados ou que tenham um nível elevado de nutrientes, a redução da biomassa de peixes numa base mais regular pode também ser bem sucedida.

4. Gestão do nível da água: a dinâmica natural do nível da água (baixa no verão, alta no inverno) contribui para o desenvolvimento da vegetação litoral emergente e assim para a estabilidade do estado de água limpa. Por razões ligadas à drenagem e irrigação, a gestão do nível da água actualmente nos Países Baixos tem o objectivo oposto: alto no verão e baixo no inverno.

Lake restoration in The Netherlands: from nutrient control to the management of lake ecosystems

Harry Hosper

Ecology Department, RIZA, The Netherlands

Shallow lake ecosystems suffering from algal blooms tend to be extremely resistant to recovery and solely reducing of the external nutrient loading appeared to be insufficient for restoring clear water conditions and biodiversity. Therefore, the scope of the lake restoration strategy in The Netherlands gradually broadened from controlling point sources of phosphorus towards a more comprehensive and ecosystem-based approach, including measures such as biomanipulation and more recently water level management.

The strategy for the restoration of shallow (mean depth 1-2 m), eutrophic lakes in The Netherlands is based on the hypothesis of 'alternative stable states', suggesting that at moderate nutrient levels in shallow lakes two alternative stable states may exist: a turbid water state dominated by phytoplankton and a clear water state rich in submerged macrophytes.

First of all the external nutrient loading should be reduced in lake restoration. However, as the turbid water state is extremely stable, additional measures may be necessary to tip the balance towards a new stable equilibrium of clear water. A major disturbance of the turbid water system by a drastic reduction of the fish stock, both

planktivores and benthivores, would trigger a shift from the algae-dominated turbid water state, into the macrophyte-dominated clear water state. Such a biomanipulation proved to be a successful tool in several types of lakes in The Netherlands.

Summarizing it may be said that the shallow lake restoration policy in The Netherlands includes the following steps:

1. Define Good Ecological Status (targets according to EU Water Framework Directive): We strive for a stable macrophyte-dominated clear water state, with a submerged vegetation cover of 30-50 % of the lake bottom. With an eye on recreational lake users, low-growing species such as Charophytes are preferred. The fish stock consists of benthivores, planktivores and piscivores, with roughly 20 kg/ha of each group.

2. Nutrient control: First and foremost external loading should be reduced, down to TP lake values of 50-100 mg/m³.

3. Biomanipulation: Drastic fish stock reduction of planktivores and benthivores (>75%) in one single operation is preferred. In interconnected lakes or lakes with a relatively high nutrient level, fish reduction on a more regular basis could possibly be successful.

4. Water level management: Natural water level dynamics (low in summer, high in winter) will contribute to the development of emergent littoral vegetation and therefore to the stability of the clear water state. For drainage and irrigation purposes, water level management in the Netherlands nowadays aims for the opposite: 'summer high' and 'winter low'.

O Papel dos Peixes na Qualidade da Água em Lagos: Dados de Monitorização, de Experiências e de Paleontologia do Sedimento

Erik Jeppesen

com Martin Søndergaard, Jens Peder Jensen, Torben Lauridsen e Susanne L. Amsinck

National Environmental Research Institute
Silkeborg, Denmark

Nos últimos séculos, o aumento da urbanização e da descarga de águas residuais, a regularização de zonas húmidas e de rios, e práticas agrícolas mais intensivas, aumentaram a entrada de nutrientes para muitos lagos em todo o mundo, sobretudo nos países industrializados. Este facto resultou em mudanças importantes na estrutura e dinâmica desses lagos, e numa mudança de um estado de água limpa para um de água turva. No

topo da teia alimentar ocorreram alterações importantes nas comunidades de peixes. Uma sucessão típica para lagos temperados de baixa profundidade na Europa é a seguinte. Em concentrações baixas de nutrientes, peixes predadores como a perca (*Perca fluviatilis*), o lúcio (*Esox lucius*) ou o sandre (*Stizostedion lucioperca*) dominam a comunidade de peixes. Quando a carga de nutrientes aumenta, a biomassa de peixe aumenta também. Contudo, observa-se uma mudança, com a dominância de ciprinídeos, especialmente o ruivo (*Rutilus rutilus*), a brema (*Abramis brama*) e, na Europa meridional, também a carpa comum (*Cyprinus carpio*).

O ruivo e a brema são parcialmente zooplânctonívoros. Por isso, a predação sobre o zooplâncton aumenta o que, por sua vez, resulta numa diminuição da pressão predatória sobre o zooplâncton. Mudanças na estrutura das populações de peixes zooplânctonívoros, com o aumento do número de indivíduos de menores dimensões, aumentam ainda mais a pressão sobre o zooplâncton. Para além disso, e por causa da competição, as percas raramente atingem o tamanho em que se tornam piscívoras e alimentam-se por isso predominantemente de zooplâncton e de invertebrados bênticos. Por causa desta predação intensa, a razão entre a biomassa de zoo e fitoplâncton diminui de 0,5-0,8 em lagos mesotróficos para menos de 0,2 quando as concentrações de fósforo estão acima de 0,10-0,15 mgP l⁻¹. Este valor é tão baixo que faz com que o zooplâncton não seja capaz de controlar o fitoplâncton, cuja taxa de renovação pode ser de 0,5-2 dias. Com a diminuição da pressão predatória e o aumento da concentração de nutrientes, a biomassa do zooplâncton aumenta, resultando na redução da transparência da água, medida por exemplo com um disco de Secchi. Para além disso, o zooplâncton é dominado pelas formas de menores dimensões, as quais são predadores menos eficientes do fitoplâncton maior. Nestas condições, as cianobactérias, grandes e muitas vezes filamentosas, prosperam.

Um aumento da predação por peixes também reduz a abundância de gastrópodes, que se alimentam dos epífitos das plantas. Empobrecem-se assim as condições de crescimento das plantas submersas, e a fonte de alimento para um grande número de aves é reduzido. O resultado é um lago dominado por elevadas biomassas de ruivos e bremas, abundância de fitoplâncton, poucas ou nenhuma plantas aquáticas e uma densidade de aves muito reduzida, dominadas pelas espécies que se alimentam de peixe. As carpas e as bremas também são bentívoras, alimentando-se de invertebrados no sedimento. Ao fazê-lo, perturbam o sedimento, o que pode contribuir para turvar a água e libertar nutrientes, estimulando ainda mais o processo de eutrofização e podendo desencadear a mudança para o estado de água turva. Esta história da eutrofização é evidente em dados contemporâneos (os quais por vezes são escassos) mas também no registo fóssil no sedimento.

Em décadas recentes têm sido desenvolvidos, em muitos países europeus e na América do Norte, esforços para combater a eutrofização através da redução das entradas de fósforo. Esses esforços levaram em muitos casos à redução significativa das fontes de fósforo de águas residuais e da indústria.

Muitos lagos responderam rapidamente e positivamente a essas reduções; os florescimentos algais incómodos diminuíram, a abundância de peixes plancti-bentívoros diminuiu, a percentagem de piscívoros aumentou, as plantas submersas reapareceram a água tornou-se mais transparente. Um estudo de 14 lagos em recuperação na Dinamarca mostrou que a biomassa de peixes e de fitoplâncton diminuiu de uma forma geral, originando uma relação zooplâncton: fitoplâncton superior, o que sugere que um aumento da predação sobre o fitoplâncton leva a maior transparência da água. Para além disso, a biomassa de peixes planctonívoros diminuiu e a fracção de potenciais piscívoros aumentou, o que resultou num melhor controlo das populações de planctonívoros. Em consequência, nalguns (mas não em todos) lagos, aumentou a fracção de zooplânctontes de grandes dimensões como as *Daphnia* spp., que são particularmente sensíveis à predação por zooplânctonívoros, assim como aumentou o peso corporal das *Daphnia* e cladóceros em geral. Isto resulta num melhor controlo do fitoplâncton.

As melhorias da qualidade da água são portanto o resultado de dois factores: uma diminuição da disponibilidade de nutrientes para o fitoplâncton e um melhor controlo dos peixes planctonívoros, o qual se reflecte ao nível do fitoplâncton através de um efeito em cascata que tem os zooplânctontes de grandes dimensões como intermediários. A resposta surpreendentemente rápida dos peixes à redução da carga de nutrientes também tem sido vista em vários projectos de reabilitação à escala mundial e pode fazer reconsiderar a ideia de ser necessária a biomaniplulação. Contudo, para acelerar o processo de recuperação, a manipulação das populações de peixes pode ser uma ferramenta útil nalguns casos.

The Role of Fish for Water Quality: Evidence from Monitoring Data, Experiments and Biological Fossils in the Sediment

Erik Jeppesen

with Martin Søndergaard, Jens Peder Jensen, Torben Lauridsen and Susanne L. Amsinck

National Environmental Research Institute
Silkeborg, Denmark

During the past centuries, increased urbanization and sewage disposal, regulation of wetlands and streams and more intensive farming practices have increased the nutrient loading to many shallow lakes world-wide, not least in the industrialized part of the world. This has resulted in major changes in the biological structure and dynamics of the lakes and often in a shift from a clearwater to a turbid state. At the top of the food web major changes have occurred in the fish community. A typical succession from temperate lakes in Northern Europe is as follows. At low nutrient concentrations, predatory perch (*Perca fluviatilis*), pike (*Esox lucius*) or pikeperch (*Stizostedion lucioperca*) dominate the fish community. When the nutrient loading increases, the biomass of fish increases. However, a shift occurs to dominance of cyprinids, especially roach (*Rutilus rutilus*), bream (*Abramis brama*) and in mid-Europe also common carp (*Cyprinus carpio*).

Roach and bream are partly zooplanktivorous. Therefore, the predation pressure on zooplankton increases which, in turn, results in a lower grazing pressure on phytoplankton. Changes in the size structure of zooplanktivorous fish towards dominance of small specimens further enhance the predation pressure on zooplankton. In addition, due to competition, perch more rarely reach the size of piscivory and therefore instead mainly predate on zooplankton and benthic invertebrates. Due mainly to the high fish predation, the biomass ratio of zooplankton to phytoplankton decreases from 0.5-0.8 in mesotrophic lakes to less than 0.2 when phosphorus concentrations are above 0.10-0.15 mg P l⁻¹, the latter figure being so low that zooplankton are not capable of controlling the phytoplankton whose turnover time in eutrophic lakes may be 0.5-2 days. With a decreasing grazing pressure by zooplankton and increased nutrient supply, the biomass of phytoplankton increases, resulting in reduced Secchi depth. In addition, the zooplankton become dominated by small forms, which are less efficient grazers on large phytoplankton. Large phytoplankton, like filamentous cyanobacteria, therefore thrive in man nutrient-enriched lakes.

An increase in fish predation may also reduce snail abundance and thus grazing of epiphytes on plants, which also impoverishes the growth conditions for submerged plants. The plants disappear and the food source for a large number of birds is diminished. The result is a lake with a high roach and bream biomass, high abundance of phytoplankton, few

or no submerged plants and a greatly reduced density of birds dominated by fish-eating species. Carp and bream are also benthivores, feeding on invertebrates in the sediment. During feeding they disturb the sediment, which may create turbid water and nutrient release, which further stimulates the eutrophication process and may trigger a shift to turbid water conditions. This eutrophication story is evident from both contemporary data – though often scarce – and the sediment record of biological remains.

In recent decades large efforts have been devoted to combat eutrophication by reducing the external loading of phosphorus in many Western European countries and in North America. Accordingly, loading from sewage and industry sources has been reduced significantly in Europe, North America and other industrial countries since the 1970s.

Several lakes respond rapidly and positively to loading reductions; nuisance algal blooming decreases, plankti-benthivorous fish abundance declines, the percentage of piscivores increases as does water clarity and submerged plants reappear. A study of 14 recovering lakes in Denmark showed that the phytoplankton and fish biomass generally declined, leading to an overall higher zooplankton:phytoplankton ratio, which suggest that an enhanced grazing pressure on phytoplankton leads to clearer water. Moreover, the biomass of planktivorous fish declined and the share of potential piscivores increased, most likely resulting in a higher control by piscivores of planktivores. Accordingly, in some but not all lakes, the share of the large-bodied zooplankton *Daphnia* spp., which are particularly sensitive to predation by zooplanktivorous fish, and the body weight of *Daphnia* spp. and cladocerans generally increased, which further enhances the grazer control of phytoplankton.

The improvements in lake water clarity are therefore a result of both enhanced resource control of phytoplankton (lower availability of nutrients) and of enhanced predator control of planktivorous fish, cascading to the phytoplankton level via an enhanced grazer control by large-bodied zooplankton. The surprisingly fast response of fish to loading reduction has recently also been seen in several lake restoration project world-wide and may challenge the idea of need for biomanipulation. However, to speed up the recovery process, fish manipulation may still be a useful restoration tool in some cases.

Efeitos a Curto e Longo Prazo da Remoção de Peixes Zooplanctonívoros no Lago Zwemlust: 15 Anos de Dados

Ellen van Donk

NIOO-KNAW-Center for Limnology
Nieuwersluis, The Netherlands

A biomaniplulação no lago Holandês Zwemlust é um bem conhecido exemplo de um projecto de reabilitação bem sucedido. A remoção completa dos peixes zooplanctívoros, por esvaziamento do lago na Primavera de 1987, teve consequências drásticas. Antes desta medida, os macrófitos estavam ausentes e ocorriam florescimentos da cianobactéria *Microcystis* durante o Verão. Depois da biomaniplulação, a água tornou-se mais clara e a partir de 1988 os macrófitos tornaram-se mais abundantes. Esta situação manteve-se relativamente estável entre 1988 e 1995. No entanto, nos anos seguintes a vegetação diminuiu e, com o aumento da densidade dos peixes, reapareceram os florescimentos de micro-algas. Em 1998 os macrófitos desapareceram completamente, e a situação era comparável à que existia antes da biomaniplulação, com a importante diferença de que agora a biomassa dos peixes era dominada pelo "rudd" em vez da brema. Concluiu-se que a biomaniplulação no Lago Zwemlust teve bons resultados a curto prazo (5-10 anos), verificando-se que a situação não era estável a longo prazo devido às elevadas cargas de nutrientes que se verificavam. Consequentemente, a biomaniplulação nestes sistemas não deve ser vista como uma medida definitiva de reabilitação, devendo ser repetida regularmente, de modo a manter a água limpa.

Assim, decidiu-se aplicar a biomaniplulação mais uma vez no lago Zwemlust e, na Primavera de 1999, foi feita uma tentativa de esvaziamento do lago para retirar todos os peixes zooplanctívoros. Devido a problemas logísticos, a redução do "stock" de peixe foi de somente 50%. Apesar disto, os efeitos a curto prazo foram comparáveis aos da primeira biomaniplulação. Em ambos os casos (1987 e 1999) a água do lago estava extremamente limpa nos Verões que se seguiram à medida de restauração, notando-se a ausência de macrófitos. As concentrações de oxigénio foram muito baixas durante longos períodos. Apesar da extremamente baixa concentração da biomassa algal, a biomassa do zooplâncton esteve em elevadas concentrações durante todo o ano, sendo maioritariamente dominada por *Daphnia* de grandes dimensões.

Na Primavera e Verão de 1988 os macrófitos tornaram-se novamente abundantes. Em quase todo o Verão de 2000, as algas filamentosas foram abundantes, cobrindo os sedimentos e impedindo o desenvolvimento dos macrófitos. No fim do Verão de 2000 a

abundância das algas filamentosas era extremamente reduzida, o que permitiu o reaparecimento dos macrófitos ainda que em pequena escala (baixa biomassa).

A redução repetida do "stock" de peixes parece ser uma estratégia apropriada para manter a água limpa no lago Zwemlust.

Short- and Long-Term Effects of Zooplanktivorous Fish Removal in Lake Zwemlust: 15 Years of Data

Ellen van Donk

NIOO-KNAW-Center for Limnology
Nieuwersluis, The Netherlands

The biomanipulation in the Dutch lake Zwemlust is a very well known example of a successful lake restoration project. The complete removal of zooplanktivorous fish by emptying the lake in the spring of 1987 had very dramatic effects. Before this measure, macrophytes were absent and *Microcystis* blooms occurred throughout the summer. After biomanipulation, the water became very clear and from 1998 macrophytes became very abundant. This situation was more or less stable from 1988-1995; however, in the subsequent years the vegetation declined, and algal blooms re-occurred, with increasing fish densities. In 1998 the macrophytes had completely disappeared, and the situation was comparable to before the biomanipulation with the important difference that now the fish biomass was dominated by rudd instead of bream. It was concluded that biomanipulation in Zwemlust gave good results in the short term (5-10 years), but the situation is not stable in the long term due to high nutrient loadings. Biomanipulation in this system should therefore not be seen as a permanent restoration measure, but should be repeated regularly to keep the lake in the clear situation.

It was therefore decided to apply biomanipulation once more in lake Zwemlust, and in the spring of 1999 another attempt was made to empty the lake and remove all zooplanktivorous fish. Due to logistic problems the fish stock reduction was only ca. 50% this time. In spite of this, the short-term response of the lake to the new measure is quite comparable to the first biomanipulation. In both cases (1987 and 1999) the lake was extremely clear in the summer following the restoration measure, with no macrophytes. Oxygen concentrations were very low during extended periods. Despite the extremely low

algal biomass the zooplankton biomass was very high throughout the year, and dominated by large *Daphnia*.

In the spring and summer of 1988 the macrophytes took over again. In the summer of 2000 filamentous algae were abundant during most of the summer, covering the sediments and preventing macrophytes to develop. By the end of the summer of 2000 the filamentous algae were greatly reduced, and macrophytes re-appeared, but still at very low biomass.

Repeated fish stock reduction appears to be a suitable strategy to maintain clear water in lake Zwemlust.

Reabilitação de Lagos na Dinamarca: Resultados e Experiência

Martin Søndergaard

com Erik Jeppesen

National Environmental Research Institute, Department of Freshwater Ecology
Silkeborg, Denmark

A maioria dos lagos dinamarqueses são baixos e eutróficos. A profundidade média é de menos de 1,6 m em 50% dos lagos e o fósforo total acima de 0,15 mg P l⁻¹ (média de verão). O lago mais profundo é o Lago Fure, com uma profundidade máxima de 38 m.

Para combater a má qualidade da água da maioria dos lagos dinamarqueses, nos últimos 20-30 anos tem sido reduzida a carga de nutrientes recebida pelos lagos com cargas mais elevadas. Isto levou a reduções da concentração de fósforo, embora não tão significativas como esperado. Isto deveu-se à libertação de fósforo do sedimento, onde se acumulou uma grande quantidade durante o período de grande carga externa. A redução da carga pode ser também insuficiente para desencadear mudanças significativas da qualidade da água porque as concentrações de nutrientes continuam elevadas.

Acresce que durante o período de eutrofização se estabeleceu uma comunidade de peixes dominada por espécies zooplanctonívoras e bentívoras (sobretudo ruivos, *Rutilus rutilus*, e brema, *Abramis brama*). Estas comunidades desenvolvem-se bem em condições eutróficas, e não respondem necessariamente com rapidez à redução da carga de nutrientes. Por isso, mantêm uma elevada pressão predatória sobre o zooplankton de grandes dimensões (particularmente *Daphnia*), assim reduzindo as possibilidades de controlo do fitoplankton. O resultado é que os lagos continuam turvos e com biomassas fitoplanctónicas elevadas.

Nos lagos dinamarqueses têm sido utilizadas técnicas de reabilitação físicas e químicas. Contudo, o método mais frequentemente utilizado é a biomaniplulação com a finalidade de reduzir a pressão sobre o zooplâncton e assim aumentar o crescimento do zooplâncton de grandes dimensões.

Mais de 40 lagos têm sido biomaniplulados até ao presente, quer por remoção dos peixes zooplânctonívoros quer pela adição de piscívoros (sobretudo o lúcio, *Esox lucius*). A intensidade da manipulação tem variado muito: a quantidade de peixe removido variou entre 10 a 80% do stock, ou de 10 a 80 g m⁻². Também a duração da remoção dos peixes tem variado significativamente, de 1 a mais de 5 anos, enquanto a introdução de juvenis de lúcio variou entre menos de 100 por hectare a mais de 3 000 por hectare.

A remoção dos peixes tem sido feita através de várias técnicas. As mais frequentes têm sido as armadilhas, redes de cerco e de arrasto, mas também têm sido utilizadas redes de emalhar e pesca eléctrica. O método a utilizar depende fortemente das condições locais e da experiências dos agentes no local, dependendo também da morfologia do lago (profundidade, tamanho, etc.)

Outro método utilizado tem sido a introdução de juvenis de lúcio na primavera, ao longo das margens, para assegurar uma elevada densidade de piscívoros e reduzir o recrutamento e a sobrevivência dos juvenis do ano dos peixes planctonívoros.

Os resultados das biomaniplulações variam muito devido à diferente intensidade da remoção dos peixes e provavelmente também ao nível de nutrientes do lago. Na maioria dos lagos em que o stock de peixes zooplânctonívoros ou bentívoros foi muito reduzido, ocorreram mudanças importantes na comunidade ictiológica restante, que se propagaram aos restantes níveis tróficos. Quando se estabeleceram condições de água limpa, as concentrações de azoto e fósforo decresceram, enfatizando a importância da transparência da água para a reciclagem interna dos nutrientes.

Um efeito importante da remoção intensa dos peixes bentívoros foi o maior crescimento das percas (*Perca fluviatilis*). As percas beneficiam da redução da competição pelos invertebrados bênticos como fonte de alimento, e mais facilmente atingem um tamanho predatório.

A estabilidade a longo termo da biomaniplulação ainda não está suficientemente elucidada. Contudo, casos como os do Lago Vaeng, no qual existe um registo de 15 anos desde uma intervenção de biomaniplulação, indicam que esta tem que ser repetida se os macrófitos submersos e outros estabilizadores não se fixarem permanentemente. Outro factor importante pode ser o evitar a resuspensão interna do fósforo, que leva a concentrações elevadas na água.

Ao usar a biomaniplulação como técnica de reabilitação em lagos onde o "stock" de peixes é desequilibrado e dominado por espécies zooplânctonívoras e bentívoras, é

importante remover uma parte importante desse "stock": a experiência dinamarquesa sugere valores acima dos 70-80%. Em lagos eutróficos, a biomassa de peixes deve ser reduzida para menos de 100 kg por hectare. A remoção dos peixes deve ser efectuada num período de tempo curto, de preferência em 1-2 anos, para evitar que o "stock" remanescente compense essa remoção através do crescimento e da reprodução. Ao introduzir juvenis de lúcio, é importante fazê-lo em densidades elevadas (<1 000 juvenis por hectare) para causar um impacto significativo nos juvenis do ano das espécies-alvo.

Para concluir, os dados dinamarqueses indicam que a carga de nutrientes em lagos de baixa profundidade deve ser reduzida para 50-100 $\mu\text{g P l}^{-1}$ em condições de equilíbrio, para se conseguir uma melhoria estável da qualidade da água. Em lagos mais profundos as concentrações de nutrientes devem ser ainda mais reduzidas.

Lake Restoration in Denmark: Results and Experience

Martin Søndergaard

com Erik Jeppesen

National Environmental Research Institute, Department of Freshwater Ecology
Silkeborg, Denmark

Most Danish lakes are shallow and eutrophic. Mean water depth is below 1.6 m in 50 % of the lakes and total phosphorus above 0.15 mg P l^{-1} (summer average). The deepest lake in Denmark is Lake Fure with a maximum depth of 38 m.

In order to combat the impoverished water quality of most Danish lakes, the loading of nutrients has been reduced for the past 20-30 years to many of the lakes suffering from high loading. This has led to reduced phosphorus concentrations; however, the reduction has often not been as significant as expected. This is due to internal loading of phosphorus from the sediment where a large phosphorus pool has been accumulated during the period with high external loading. The loading reduction may also be insufficient to trigger any changes of significance in water quality because the nutrient concentrations remain too high.

In addition, a fish structure dominated by zooplanktivorous and benthivorous species (mainly roach, *Rutilus rutilus*, and bream, *Abramis brama*) have been established during eutrophication. These species thrive in the eutrophic water, and do not necessarily respond immediately to reduced loading. Therefore, a high predation pressure persists on large-sized

zooplankton (particularly *Daphnia*), thus reducing the chances of grazing control of the algae. Consequently, the lakes remain turbid and exhibiting a large phytoplankton biomass.

Both physical and chemical restoration techniques have been used in Danish lakes. However, the far most frequently utilized method is biomanipulation with the purpose of reducing fish predation pressure on zooplankton and thus enhance the growth potential of large-sized zooplankton.

More than 40 lakes have been biomanipulated so far, either by removing zooplanktivorous fish or by adding piscivores (mainly pike (*Esox lucius*)). The intensity of the conducted biomanipulations varies greatly; thus, the amount of fish removed has varied from less than 10 % to about 80 % of the total fish stock, or from 10 to 80 g m⁻². Also the duration of fish removal has varied significantly, from 1 year to more than 5 years, and the stocking of pike fingerlings has ranged from less than 100 per hectare to more than 3,000 per hectare.

Fish removal has been conducted using a variety of techniques. Fish traps, seine nets and trawling are the most frequently used methods, but also gill nets and electrofishing have been employed. Choice of methods depends strongly on local conditions taking into account local experience. The most appropriate method also depends on lake morphology (depth, size, etc.).

Another method used is pike stocking involving adding of pike fingerlings in spring along the shore line to ensure high piscivore density and reduce the recruitment and survival of YOY (young-of-the-year) planktivorous fish.

The results of the biomanipulation measures vary greatly due to the different intensity of fish removal and probably also to the lakes' nutrient level. In most of lakes where a large part of the zooplankti- and benthivorous fish stock was reduced, marked changes occurred in the remaining fish stock and at the other trophic levels. When clear water conditions were established, the lake water concentrations of nitrogen and phosphorus decreased, emphasizing the importance of clear-turbid water for the internal nutrient cycling.

An important effect observed at extensive removal of benthivorous fish was increased growth of perch (*Perca fluviatilis*). Perch benefits from the reduced competition on benthic invertebrates as a food source and thus more easily reaches a predatory size.

Long-term stability following biomanipulation is still not elucidated sufficiently; however, case stories like that on Danish Lake Væng, on which a 15 year time record exist following a biomanipulation event, indicate that biomanipulation may have to be repeated if submerged macrophytes or other stabilizers do not become permanently established. Another important factor may be to avoid internal loading of phosphorus leading to high lake water concentrations.

When using biomanipulation as a restoration technique in lakes where the fish stock is "unbalanced" and dominated by zooplankti- and benthivorous species, it is important to

remove a large part of the fish stock; Danish experience says preferably more than 70-80%. In eutrophic lakes, the fish biomass should be reduced to below 100 kg per hectare. The fish removal should be completed within a short time period, preferably 1-2 years to prevent the remaining fish stock from compensating for the fish removal by increased growth and reproduction. When stocking pike fingerlings, it is important to stock in high densities (> 1,000 pike fingerlings per hectare) to establish a sufficiently high impact of YOY fish.

In summary, Danish data indicate that lake nutrient loading in shallow lakes should be reduced to at least 50-100 $\mu\text{g P l}^{-1}$ under equilibrium conditions to achieve successful and stable improvement. In deep lakes the nutrient concentrations should probably be even further reduced.