

Novos conceitos sobre a eutrofização

JOSE MARTINIANO DE AZEVEDO NETTO

Engenheiro-consultor, membro do corpo de especialistas da ONU.

Depois de décadas de preocupação com a crescente degradação dos corpos d'água, muitos sanitaristas ainda se concentram em apenas alguns aspectos da questão, deixando de lado outros dados que podem assumir maior relevância, como por exemplo as contaminações bacteriológica e radioativa e a ocorrência de substâncias tóxicas.

Há cerca de vinte anos, no início da década de 60, embora já existisse notória preocupação com a crescente degradação de corpos d'água, eram raros os técnicos que podiam distinguir as conseqüências da poluição em geral, dos efeitos da eutrofização. Esse estado de confusão ocorria em todo o mundo, e no Brasil um exemplo típico foi dado pelo sistema de disposição dos efluentes urbanos de Brasília, concebido sem se considerar o fenômeno da eutrofização.

Até hoje muitos sanitaristas, ao abordar as questões de poluição das águas, incluindo o levantamento e a avaliação de poluentes e o estudo e projeto de estações depuradoras, concentram-se apenas em alguns aspectos do problema e de um modo geral com o balanço de Oxigênio, cuja formulação matemática, após o aporte de Streeter e Phelps, tornou-se muito a gosto dos engenheiros.

Na realidade, em que pesem os efeitos das demandas de Oxigênio, existem outros aspectos da poluição que podem assumir maior relevância, como por exemplo as contaminações bacteriológica e radioativa, a ocorrência de substâncias tóxicas e carcinogênicas e até mesmo a presença de nutrientes.

A disposição das águas residuárias da Região Metropolitana de São Paulo, que vem sendo estudada e discutida há muitos anos, constitui uma das questões mais sérias, no gênero, em todo o mundo. Situada em um altiplano, de onde fluem rios de um extremo para o litoral, e de outro lado para o interior, a Grande São Paulo oferece essas alternativas para o destino final dos seus efluentes urbanos: ou o encaminhamento através do reservatório Billings em direção ao estuário de Santos, ou em direção ao Baixo Tietê, ao longo de uma seqüência de represas de grande porte. Em ambos os casos as águas alimentarão lagos artificiais onde os problemas de eutrofização certamente se apresentarão em grande intensidade.

A otimização da solução, sob o ponto de vista de proteção lacustre, requer uma avaliação completa das cargas eutrofizantes e a fixação da sua repartição, ou seja, o balanço mais conveniente, tendo em consideração aqueles dois destinos possíveis.

Apresenta-se, pois, uma oportunidade ímpar para o estudo aprofundado da questão, com real proveito para a região e para a nossa tecnologia.

O QUE É A EUTROFIZAÇÃO

Literalmente *eutrofização* significa o processo de tornar bem alimentado (com excesso de certos nutrientes básicos). Atualmente o termo se aplica à fertilização excessiva, permanente e contínua de um corpo d'água, da qual pode resultar o desenvolvimento massivo e indesejado de plantas aquáticas tais como algas e macrofitas. A eutrofização tem maior gravidade no caso de lagos, reservatórios e lagoas naturais, mas também ocorre com freqüência no ambiente marinho, em estuários e

até mesmo em cursos d'água, particularmente nos de pequena velocidade.

Há dois tipos de eutrofização a se considerar: a eutrofização natural ou secular, que ocorre muito lentamente, em função de fatores naturais, e a eutrofização cultural ou acelerada, causada pelas atividades humanas e que é devida ao lançamento de nutrientes nos corpos d'água.

A eutrofização, como fenômeno natural relacionado com o envelhecimento dos corpos de água, tem pouco interesse em face do processo acelerado que causa prejuízos num período relativamente curto. Uma vez que se estabeleçam as condições de fertilização das águas rompe-se o equilíbrio biológico causando transformações relativamente rápidas.

A COMPLEXIDADE DO FENÔMENO

A presença excessiva de fósforo, nitrogênio e seus componentes é reconhecida como a principal causa do fenômeno. Entretanto, outras substâncias, tais como a matéria orgânica e microelementos, podem contribuir para o processo. Convém assinalar que todos os "ingredientes" necessários à promoção do fenômeno estão presentes nos esgotos domésticos e agrícolas, e de uma forma mais restrita, nas águas de escoamento superficial e em muitos resíduos líquidos industriais.

Além disso é preciso que se diga que a eutrofização não se deve somente à presença expressiva de nutrientes mas também é influenciada por muitos outros fatores ou condições relativas à qualidade da água, a aspectos ecológicos, a características físicas e morfológicas dos corpos d'água, à velocidade de escoamento ou de renovação, ao tempo de residência, a condições climáticas como intensidade de ventos, temperatura, etc. A profundidade dos lagos, por exemplo, exerce uma reconhecida influência no fenômeno.

EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A eutrofização é um fenômeno que acompanha a sociedade humana desde os tempos imemoriais; entretanto, o processo apenas começou a ser observado há pouco mais de 100 anos.

Os primeiros relatórios de degradação trófica dos lagos foram escritos em fins do século passado sobre alguns lagos alpinos. Em 1825, o lago Morat apresentou um espetacular florescimento aquático, fenômeno que ocorreu posteriormente e com menos intensidade nos lagos Balgegg (1887) e Zurich (1898).

Saturnino de Brito, sem ter abordado especificamente o assunto, mencionou os aspectos de fertilização das águas em seu trabalho sobre o rio Tietê.

As primeiras observações sistemáticas sobre esse processo biológico foram, entretanto, devidas ao extraordinário professor Gordon Fair, ao analisar problemas relativos aos grandes lagos da América do Norte.

No Brasil, as primeiras manifestações registradas referem-se ao lago Paranoá (Brasília) e à lagoa Rodrigo de Freitas (Rio de Janeiro).

Por sugestão e orientação do professor O. Jacy, do EA-WAG, a OECD realizou, em 1967, um levantamento bastante completo de informações sobre a questão, que deu origem ao trabalho clássico *Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters with Particular References to Nitrogen and Phosphorous as Factors of Eutrophication*, elaborado pelo renomado especialista Dr. Richard A. Vollenweider.

EFEITOS DA EUTROFIZAÇÃO

O florescimento aquático excessivo causa a deterioração da qualidade da água, gera problemas de cheiro e gosto, altera a

cor e a turbidez, reduz o teor de Oxigênio Dissolvido, modifica a biota e as condições de vida para os peixes, provoca o enchimento e o entupimento de canais e vias navegáveis, podendo até mesmo concorrer para maior perda de água através da evapotranspiração.

Esses inconvenientes poderão atingir tal relevância que chegam a dificultar ou até mesmo impedir a utilização da água para certas finalidades. Os usos mais afetados pelo fenômeno são o abastecimento público e industrial, o paisagismo, o turismo, a fauna íctica, a alimentação de usinas elétricas e a navegação. Além disso tudo, a presença de certas algas tóxicas pode provocar a intoxicação de animais, tais como o gado.

As conseqüências da eutrofização, qualificadas como indesejáveis de um modo geral, podem, em certos casos, ser consideradas benéficas. As lagoas de estabilização, por exemplo, são corpos d'água altamente eutrofizados, que trazem grandes benefícios. A eutrofização, contribuindo também para a multiplicação de algas, reduz a sobrevivência de bactérias patogênicas.

Dentro de certos limites de equilíbrio, e em determinadas circunstâncias, a eutrofização controlada pode concorrer para maior produtividade de peixes. Deve-se mencionar, contudo, que a eutrofização "planejada", com vistas à maior produtividade, nem sempre tem sido bem-sucedida. Como é do conhecimento geral, a eutrofização altera substancialmente o plâncton e a população íctica, estabelecendo condições diversas de equilíbrio, com a substituição de espécies.

Por outro lado, a luta contra a presença de Fósforo jamais pode assumir aspectos radicais, pois é sabido que esse elemento exerce uma função primordial para garantir a vida em nosso planeta — basta considerar o papel do trifosfato de adenosina na reserva de energia indispensável à biossíntese e ainda a necessidade de fosfatos para a constituição de ácido nucleico.

Os efeitos negativos da eutrofização, muito mais conhecidos, podem ser resumidos da seguinte forma:

a — desenvolvimento excessivo e prejudicial de plantas aquáticas, incluindo florescimento de algas, proliferação de macrofitas etc.;

b — alterações profundas da biota, com a substituição de espécies de peixes e outros organismos;

c — decomposição orgânica, consumo e depressão de oxigênio dissolvido e anoxia;

d — degradação da qualidade da água, com alterações de composição, cor, turbidez, transparência etc.;

e — desprendimento de gases e produção de maus odores;

f — formação de depósitos bentais e reciclagem de nutrientes;

g — prejuízos consideráveis para o uso da água em abastecimento;

h — prejuízos para a irrigação e para aproveitamentos hidroelétricos;

i — prejuízos diversos para a recreação, turismo e paisagismo;

j — aumento da evaporação;

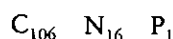
l — elevação de nível e entaves para o escoamento das águas;

m — produção de substâncias tóxicas e prejuízos eventuais para o gado;

n — condições propícias para a criação de mosquitos, larvas e outros vetores.

NUTRIENTES BÁSICOS

Para se ter uma primeira idéia básica da importância relativa dos diversos elementos para o desenvolvimento dos vegetais aquáticos, pode-se partir da composição média do fitoplâncton de água doce, que, segundo Uhlmann, é o seguinte:



Daí podem ser inferidas as razões naturalmente desejáveis entre os teores das três substâncias básicas. Existe sempre um elemento que é crítico entre os nutrientes presentes, pelo fato de limitar a produtividade dos lagos.

As medidas de controle deverão dar maior ênfase à redução das concentrações desse nutriente crítico, em relação aos demais. Na maioria dos casos o nutriente mais relevante é o Fósforo.

Além daqueles três elementos mais importantes, existem outras substâncias como o CO₂, o Cálcio e o Potássio, que podem tanto estimular como inibir a proliferação vegetal. (Uma lista mais completa dessas substâncias compreende, além dos chamados macronutrientes, que são P, N, C, K, S, Ca, Mg, O e H, os micronutrientes, que incluem: Fe, Zn, Cu, B, Mo, Mn, Co, Na e Cl).

O Fósforo e o Nitrogênio sempre estão presentes nos esgotos domésticos.

As águas de escoamento superficial originárias de regiões agrícolas podem apresentar teores consideráveis de Fósforo, mesmo no caso de terrenos pobres em compostos fosfóricos, isto devido ao crescente uso de fertilizantes à base de superfosfatos. Em muitos casos, o Fósforo oriundo do emprego de fertilizantes é do tipo particulado.

Na maioria dos casos o teor de Fósforo é o fator mais importante e limitante do desenvolvimento aquático, razão pela qual especialistas como o Dr. Richard A. Vollenweider estabeleceram critérios para reduzir e limitar as quantidades desse elemento que são conduzidas para os lagos:

$$L = L_0 + 0,01 \frac{Z}{t} \quad \text{onde:}$$

L = Quantidade limite, g/m² por ano

L₀ = 0,10 a 0,15

Z = profundidade média, m

t = período de detenção, ano

Outra expressão mais recente é a seguinte:

$$C = 10 (1 + \sqrt{t})$$

C = Concentração de Fósforo, microg/litro

t = período de detenção, ano

Sawyer, a partir de observações práticas, recomenda o limite de 15 microg/litro para evitar o aparecimento de problemas.

Os trabalhos mais recentes sobre o fenômeno da eutrofização, sobretudo os conduzidos pelo Grupo de Trabalho responsável pelas estratégias de controle de Fósforo (*Task Force Addressing Phosphorous Management Strategies*), da Comissão Mista Internacional Canadá-Estados Unidos, revelaram que não é suficiente considerar a presença de Fósforo em termos globais, sendo necessário desenvolver técnicas para diferenciar o Fósforo biodisponível (BAP), do Fósforo em forma não utilizável.

Com a presença de Fósforo, o Nitrogênio passa a ser o outro fator crítico ou limitante do crescimento vegetal. O Nitrogênio é capaz de transformações rápidas e geralmente forma compostos bastante solúveis e facilmente conduzidos ou transferidos. A forma em que se encontra o Nitrogênio é muito importante, porquanto o N mineral, ao contrário do orgânico, geralmente não causa grandes problemas.

A literatura técnica aponta casos em que o Carbono e outras substâncias têm sido fatores limitantes para o desenvolvimento de algas em vários lagos.

PROCEDÊNCIA DOS NUTRIENTES

Os nutrientes que são conduzidos para os corpos de água podem, conforme a sua origem, ser categorizados em:

a — Pontuais ou concentrados

b — Difusos ou dispersos

Os primeiros são caracterizados por pontos certos e fixos de lançamento, como são os devidos às descargas de sistemas de esgotos sanitários, galerias de águas pluviais, canalizações de despejos de resíduos industriais, etc.

As contribuições difusas são produzidas pelo escoamento superficial sobre áreas urbanas e rurais, incluindo áreas agrícolas e pastoris. A avaliação das contribuições difusas é sempre mais difícil, mas pode ser bastante significativa em certos casos.

Outra fonte de nutrientes é a precipitação atmosférica.

INDICADORES DA EUTROFIZAÇÃO

Além da própria presença de macro e micronutrientes, que pode ser determinada nas águas, existem certas características que refletem a qualidade do líquido sob o ponto de vista eutrófico e que podem dar uma indicação sobre o estágio do processo. Esses indicadores, embora apresentem níveis que podem diferir de uma situação para outra, servem como elementos de categorização para os corpos d'água.

Os indicadores mais comumente empregados são os seguintes:

- Oxigênio Dissolvido (requer sempre uma apreciação crítica);
- Plâncton (examinado ao longo do tempo, permite acompanhar a evolução do fenômeno);
- Transparência, medida pelo disco de Secchi (processo expedito);
- Turbidez (influi na penetração da luz e na sua disponibilidade para a fotossíntese);
- Clorofila a. (aplicável com restrição aos lagos rasos sempre que não se levar em conta a influência das macrófitas);
- Nitrogênio particulado.

CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA E NÍVEIS DE EUTROFIZAÇÃO

Tendo em consideração o estágio em que se encontram no processo de evolução trófica, os lagos são classificados em:

Oligotróficos: com águas límpidas, não eutrofizadas e pouco produtivas;

Mesotróficos: moderadamente fertilizados e moderadamente produtivos;

Eutróficos: em pleno processo de eutrofização;

Hipertrofos: em estágio avançado de eutrofização, com cargas elevadas.

As condições admissíveis para o fenômeno, relativas aos seus efeitos e relacionadas com as concentrações toleradas de nutrientes, variam de situação para situação, tendo em vista condições locais, clima, características físicas e morfológicas dos corpos d'água e, sobretudo, os usos atuais e previstos para as águas.

R. A. Vollenweider, em 1968, foi o primeiro especialista a fazer algumas indicações sobre concentrações limites ou críticas de nutrientes para lagos em diferentes estágios de eutrofização. Recentemente o ecologista H. F. H. Dobson, do Centro de Águas Interiores de Canadá, apresentou dados muito interessantes sobre os Grandes Lagos Americanos, com a tipologia observada no quadro A.

O CASO PARTICULAR DE RESERVATÓRIOS

Os reservatórios de acumulação, represas ou lagos artificiais apresentam características especiais quanto a forma, profundidade, variação de nível, condições de descarga, etc. A literatura técnica disponível sobre esses corpos de água é bastante volumosa, sob todos os aspectos.

QUADRO A

Classificação*	Fósforo Total microg/litro (na Primavera)	Clorofila "a" microg/litro (no Verão)	Nitrogênio Particulado microg/litro
Oligotrófico	Até 10	Até 2,0	Até 50,0
Mesotrófico	10-30	2,0-6,0	50-150
Eutrófico	30-90	6,0-18,0	Mais de 150
Hipertrofico	Mais de 90	Mais de 18,0	Mais de 150

(*) Considerada a qualidade da água na superfície. A experiência demonstra que esses valores são apenas indicativos e somente são aplicáveis nas situações a que eles correspondem.

Inicialmente os reservatórios apresentam uma água com características especiais, que pouco a pouco se alteram em decorrência do carreamento de impurezas do solo e das contribuições trazidas pelos cursos d'água formadores. A sedimentação que se processa e a descarga de substâncias para jusante são importantes fatores a considerar no balanço de nutrientes.

Um caso que exige considerações especiais é o de uma sequência de dois ou mais reservatórios em série, onde o primeiro deles funciona como um pré-sedimentador para o segundo e assim por diante.

Outro aspecto a considerar é a extensão da limpeza feita na bacia hidráulica, antes do enchimento.

Convém também assinalar que as represas de acumulação, além de estarem sujeitas à eutrofização, têm a sua vida dependente das condições de assoreamento (*Silting*).

ESGOTOS SANITÁRIOS

Os esgotos domésticos e determinados resíduos industriais (veiculados ou não pelos sistemas públicos) são as fontes mais frequentes de poluentes e nutrientes, os mais diversos.

São comuns os seguintes teores totais de Nitrogênio e Fósforo nas águas de esgotos:

Nitrogênio Total 15-35 mg/litro

Fósforo Total 12-15 mg/litro

O consumo elevado de detergentes com componentes de Fósforo contribui consideravelmente para elevar a carga em termos desse nutriente crítico.

O PROBLEMA ESPECIAL DOS DETERGENTES

Os detergentes de um modo geral contribuem consideravelmente para a deterioração da qualidade das águas receptoras, sobretudo pela ação de polifosfatos.

Na Suécia, medidas governamentais permitiram reduzir o teor de fosfatos em detergentes a cerca de 7%, o que constitui uma extraordinária redução.

No Brasil, o controle dos detergentes ainda ensaia os primeiros passos.

O PROBLEMA DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS

Os sistemas de águas pluviais coletam águas superficiais das vias públicas, parques, edificações e terrenos, conduzindo-as para os pontos mais próximos dos corpos receptores. Além dessas águas superficiais, existem frequentemente descargas de extravasores e de órgãos de alívio de sistemas que veiculam cargas orgânicas.

Existem ainda, com certa frequência, ligações clandestinas e ligações "erradas" de esgotos sanitários e até mesmo descargas autorizadas de efluentes de tanques sépticos.

Isto equivale a afirmar que essas águas são poluentes e que podem contribuir com cargas apreciáveis de nutrientes para os corpos d'água.

O PROBLEMA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

As águas que se infiltram no terreno e que conduzem impurezas dissolvidas para os lençóis subterrâneos, geralmente escoam lenta e demoradamente em direção aos vales, alimentando os corpos d'água. Como nesse trajeto há contatos com diferentes camadas do solo e oportunidades para reações químicas do Fósforo e outros elementos com substâncias do terreno, são formados compostos insolúveis que ficam retidos.

Por isso, freqüentemente a contribuição de macronutrientes através das águas subterrâneas é pouco significativa. É claro que nos períodos de seca a sua importância relativa torna-se maior.

Por outro lado não se deve esquecer que as águas subterrâneas podem veicular uma série de micronutrientes tais como o Fe, o Na, etc.

RESÍDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

As águas residuárias das indústrias que mais influenciam a eutrofização são aquelas originárias da transformação e elaboração de produtos agropecuários e da produção de adubos e fertilizantes. No entanto, muitos outros tipos de indústrias não devem ser subestimados sempre que estiverem contribuindo, através dos seus despejos, com microelementos capazes de coadjuvar no crescimento das plantas.

RESÍDUOS AGRÍCOLAS

Os esgotos domésticos produzidos no campo geralmente são pouco significativos, sobretudo nas regiões em que a população rural é pouco densa e minoritária, e onde seja comum a disposição de excreta e de efluentes no subsolo.

Os resíduos constituídos por excrementos de animais (gado vacum, suínos, etc.), mantidos em áreas confinadas, podem exercer uma influência marcante sobre a eutrofização. A população equivalente no caso de suínos, por exemplo, é muito maior do que a correspondente às contribuições de origem doméstica.

No Brasil, a criação de gado é feita em áreas de grande extensão, nas quais os excrementos ficam espalhados e sujeitos à digestão aeróbia, sendo aproveitados pelos capins.

O PROBLEMA DOS FERTILIZANTES AGRÍCOLAS

As áreas cultivadas e até mesmo as pastagens são fontes dispersas que contribuem com nutrientes para as águas correntes e dormentes, principalmente com Nitrogênio e Fósforo.

O comportamento dessas duas substâncias no solo é muito diferente. O Nitrogênio sob a forma de nitrato é muito solúvel e por isso é facilmente "lavado" e conduzido pelas águas que escoam superficialmente. Já os compostos de Fósforo são pouco "móveis", pois eles freqüentemente reagem com o Ferro e o Alumínio formando fosfatos insolúveis.

A erosão dos solos é o fator mais importante na condução de compostos, de P e N.

Investigações feitas por Vollenweider, em 1968, conduziram à conclusão de que se perdem de 10 a 25% do Nitrogênio aplicado ao solo sob a forma de fertilizantes e de 1 a 5% da quantidade de Fósforo. Nas regiões sujeitas à erosão intensa (freqüentes no Brasil) as perdas de Fósforo chegam a exceder 10kg/hectare por ano.

A CONTRIBUIÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES ATMOSFÉRICAS

As águas de chuva dissolvem gases, vapores e impurezas da atmosfera e também carregam partículas em suspensão. É bastante conhecido o problema das chamadas "chuvas ácidas".

Essas águas precipitadas constituem, por isso, uma fonte que também contribui com nutrientes para os corpos d'água. Há casos em que os nutrientes das precipitações atmosféricas se apresentam em quantidades superiores aos das demais fontes.

Nos países tropicais úmidos, essa é uma das fontes que pode trazer uma contribuição significativa para o balanço de nutrientes.

O PROBLEMA DOS SEDIMENTOS E DEPÓSITOS BENTAIS

Os lagos funcionam como excelentes decantadores, acumulando material precipitado no seu fundo (depósitos bentais). Com o decorrer dos anos a camada de lodo que se forma vai tendo a sua espessura aumentada.

Esses depósitos podem conter grandes quantidades de matéria orgânica devidas a despejos orgânicos, ou conseqüentes da morte e deposição de plantas aquáticas. Em tais casos apresenta-se uma zona desprovida de Oxigênio Dissolvido, onde se processa a digestão anaeróbia e a produção de gases.

Entre a massa de lodo e a câmara hídrica passam a ocorrer intercâmbios de substâncias, o lodo consumindo Oxigênio e contribuindo com minerais e gases para a fase líquida. Entre esses compostos que podem "circular" do lodo para o líquido e deste para o lodo, estão os compostos de Fósforo. Tais compostos passam para a camada líquida durante o período de desenvolvimento vegetal, podendo voltar posteriormente para o fundo, em conseqüência do decaimento vegetal.

A sedimentação de matéria inorgânica (argila e silte como exemplos) sobre a camada de lodo pode alterar muito essas condições de intercâmbio.

Para a recuperação de lagos e represas são empregadas técnicas especiais baseadas em dois sistemas usuais:

1. isolar ou inativar a camada bentálica, de lodo; ou
2. retirar o lodo por dragagem, depositando-o em escavações ou depressões do terreno ou até mesmo em locais marginais convenientes, mantendo-se cuidados para evitar o retorno de substâncias indesejáveis para o corpo d'água.

EUTROFIZAÇÃO E ALGAS

A presença de quantidades excessivas de algas em lagos e reservatórios pode causar efeitos múltiplos, conforme já foi exposto especificamente. Com respeito aos aspectos de saúde humana tem sido relatada a ocorrência de dermatites, manifestações alérgicas, inclusive asma, distúrbios intestinais e problemas de toxidez.

O desenvolvimento de algas mantém uma correlação com a disponibilidade de alimentos. Em lagos hipertróficos o crescimento passa a ser muito rápido, seguindo uma lei logarítmica, de tal maneira que durante a fase mais aguda o número de células chega a dobrar a cada 24 horas. Nessas condições, a massa d'água perde a sua transparência e adquire uma cor carregada, característica.

A ocorrência de algas com grande intensidade é designada pela expressão "florescimento aquático" (*blooms*). Os parâmetros usualmente adotados para indicar o grau de florescimento são:

- a — número de células por mililitro;
- b — volume de algas por metro cúbico de água
- c — peso de algas por metro cúbico de água (mg/m^3);
- d — teor de Clorofila "a" por metro cúbico de água

A título de exemplo, tomado de um caso relatado, é apresentado o quadro B.

QUADRO B
Exemplo: critérios adotados para lagos*

Classificação	Vol. de Algas cm ³ /m ³	Clorofila "a" mg/m ³	P Total mg/m ³	N Total mg/m ³
Oligotróficos	Até 1	0,3 - 3	Até 5	Até 250
Mesotróficos	1 - 3	2 - 15	5 - 30	250 - 1.000
Eutrófico	3 - 5	10 - 500	30 - 1.000	1.000 - 10.000

(*) Segundo Rosech Cullen e Bek, para os lagos Burley e Griffin (Austrália).

EUTROFIZAÇÃO E MACRÓFITAS

Outro grave inconveniente da eutrofização é a proliferação exagerada de plantas aquáticas flutuantes e emergentes, que chegam a cobrir inteiramente todo o espelho d'água, criando sérios problemas para a navegação, instalações de bombeamento e turbinagens e estabelecendo condições favoráveis para a procriação de mosquitos e outros vetores. São os problemas gerados pela presença maciça de macrófitas.

Entre as macrófitas mais comumente encontradas em águas eutrofizadas se encontram *Eichornia*, *Pistia*, *Potamogeton*, *Ceratophyllum*, *Mycrophyllum* e outras.

No Brasil e em muitos casos, a presença de aguapés ou jacintos de água (*Eichornia Crassipes*) tem causado inúmeros problemas. Essas plantas chegam a produzir massas muito grandes, tornando praticável o seu aproveitamento, seja para a produção de ração animal, seja para a produção de gás e adubo, a partir da biodigestão.

No caso de produções exageradas de fitomassas (acima de 250g de matéria seca por m³ em 24 horas, segundo o critério de Owens) poderão resultar efeitos negativos para o balanço de Oxigênio.

A expressão de Owen para a produção fotosintética de Oxigênio (P) é:

$$P = aC \cdot I^b$$

em que:

C = Biomassa presente
I = Irradiação
a, b = constantes

É importante assinalar que as plantas aquáticas podem exercer um papel importante na remoção de substâncias dissolvidas na água: elas são capazes de assimilar determinadas substâncias, incorporando-as à sua massa. Tal capacidade de assimilação pode, porém, atingir uma condição de saturação.

Os aguapés, por exemplo, são capazes de retirar quantidades consideráveis de fenóis, metais pesados e outras substâncias tais como 0,7mg de Cd e 0,5mg de Ni por grama de massa vegetal considerada em base seca.

Um hectare coberto por aguapés chega a reduzir 50kg de fenóis por dia, consumindo, em condições favoráveis, quantidades de Nitrogênio e Fósforo equivalentes àquelas que se apresentam nos esgotos domésticos de 800 pessoas.

Evidentemente, essas substâncias removidas retornariam às águas com a decomposição das plantas, caso não houvesse a sua colheita.

Os efeitos físicos do florescimento excessivo incluem a redução da secção de escoamento e conseqüente elevação do nível de água, o aumento das perdas de água por evapotranspiração, aumento este que em casos extremos chega a corresponder a 6 vezes a perda que se teria na ausência dessas plantas.

EUTROFIZAÇÃO E PEIXES

Embora a eutrofização seja considerada, de maneira geral, um processo indesejável, admite-se que um limitado e baixo grau de eutrofização possa trazer alguns benefícios.

A população íctica, por exemplo, depende essencialmente de nutrientes, reduzindo-se o número de peixes sempre que

declinar a quantidade de alimentos. A descarga de nutrientes em quantidades moderadas contribui para aumentar a piscosidade de certas áreas. Dependendo do nível de eutrofização pode, entretanto, ocorrer a substituição de espécies por outras menos desejadas.

Por outro lado a eutrofização pode contribuir para a remoção de algumas substâncias tóxicas.

EUTROFIZAÇÃO E O TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

São bastante conhecidos os prejuízos causados às águas dos mananciais quando sujeitas à presença excessiva de algas, de um modo geral, agravadas por cianófitas em particular. Além de cheiro desagradável e de gosto mau, as algas em grande quantidade podem interferir com os processos de coagulação e com a filtração, causando danos aos meios filtrantes.

Certos compostos orgânicos originários das algas interferem com a formação de flocos a partir do hidróxido de Alumínio, atuando como inibidores do processo de coagulação e afetando, ainda, o processo de desestabilização de partículas com cargas negativas, sujeitas à absorção.

Além disso, a matéria orgânica solúvel pode combinar-se com o Cloro para produzir clorofórmio, trihalometanos e outros compostos suspeitos como eventuais causadores de câncer.

Particularmente nocivas são as algas de cor azul-verde, cujos efeitos sobre o tratamento de água são mais graves.

TRATAMENTOS PARA REMOÇÃO DE NUTRIENTES

A tecnologia de tratamento de águas residuárias com o propósito de reduzir o teor de nutrientes básicos já está bem estabelecida, podendo ser aplicada às estações convencionais de tratamento de esgotos. As seguintes modalidades são adotadas:

- a — tratamentos independentes para a remoção de nutrientes (específicos);
- b — modificações nas próprias instalações e processos de tratamento por lodos ativados para reduzir os teores de P e N;
- c — tratamentos terciários e quaternários em seqüência aos tratamentos biológicos.

As ETEs convencionais que empregam o processo de lodos ativados reduzem de 10% a 20% o teor de fosfatos. Acrescentando-se, por exemplo, o processo da precipitação química mediante o emprego de coagulantes como o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico, podem ser obtidas remoções de 85% a 90% (Processo de E.A. Thomas, empregado em instalações suíças).

Na região do lado Zurich está sendo considerado o tratamento quaternário consistindo na floculação, filtração, tratamento biológico e remoção de fosfatos, o que pode proporcionar uma redução global de até 99%.

Nos países escandinavos a remoção de Fósforo geralmente é feita pelo tratamento químico, com o emprego de coagulantes férricos e de Alumínio.

O completo sistema de tratamento de Wahnbach (República Federal Alemã) adota a floculação seguida de filtração rápida

em unidades de três camadas. Os resultados obtidos mostram as seguintes eficiências:

Fósforo total	96,3%
Clorofila	94,9%
Turbidez	99,3%

POUCA EXPERIÊNCIA NAS REGIÕES TROPICAIS

O exame da literatura técnica disponível revela uma acentuada pobreza em observações, dados e pesquisas sobre a eutrofização nas regiões tropicais. No Brasil, pesquisas pioneiras sobre o plâncton foram realizadas por Klarecoper, em São Paulo, há cerca de 50 anos. Atualmente, a Escola de Engenharia de São Carlos, a Universidade Federal de São Carlos e a Caesb vêm desenvolvendo atividades nessa área. A Cetesb é outro órgão que se dedica à pesquisa nessa área.

Alguns países, como a Austrália e a África do Sul, já realizaram estudos e investigações interessantes, enquanto que outros não dispõem de informações ainda que sobre aspectos básicos.

Investigações feitas na Austrália mostram que as condições nas regiões tropicais são diferentes daquelas já conhecidas em outras áreas de águas mais frias. A presença de nutrientes em níveis mais elevados do que aqueles recomendados para regiões frias não chega a causar os problemas esperados. Os critérios e as recomendações sobre níveis e limites de concentração não são aplicáveis e os corpos d'água se comportam de maneira diversa. O critério de avaliação com base na presença de clorofila "a", por exemplo, não é aplicável quando não levar em conta a presença de macrófitas às quais podem se agregar e justapor algas em grande quantidade.

Além disso, os lagos muitas vezes apresentam águas turvas, com maior limitação para a penetração de luz, reduzindo, com isso, a produtividade. Outro aspecto importante é a movimentação da massa de água por efeitos térmicos, no interior dos lagos.

MONITORAMENTO E AMOSTRAGEM

Os resultados de um programa de controle da eutrofização dependem essencialmente do monitoramento e da amostragem bem conduzida. Muitos dados já foram quase totalmente perdidos devido à amostragem deficiente.

A questão envolve critérios estatísticos e técnicas de amostragem. Um aspecto muito importante é o da medição de vazões afluentes e efluentes dos lagos. Essas vazões devem ser medidas com a frequência necessária para a determinação dos regimes e sempre com maior frequência do que as determinações de concentrações.

Para bons resultados os programas de amostragem devem observar ou seguir as variações hidrológicas e não simplesmente o calendário civil.

PROGRAMAS DE CONTROLE

Os países ou Estados devem, de um modo geral, estabelecer diretrizes e iniciar programas de prevenção e controle de eutrofização, como parte fundamental do planejamento de recursos hídricos. Os programas de controle da eutrofização devem ter as seguintes características importantes:

- devem abranger e se basear em política regional;
- devem ser contínuas e de longa duração;
- devem se referir a uma estratégia de planejamento territorial (ocupação do solo).

O combate à eutrofização é feito através de providências aplicáveis fora dos corpos d'água e de medidas postas em práti-

ca diretamente sobre a massa eutrofizada.

A redução do aporte de nutrientes (providência externa) pode incluir uma série de ações, entre as quais:

- a- controle do uso de fertilizantes;
- b- controle da erosão;
- c- tratamento das águas residuárias;
- d- desvio ou "exportação" de águas poluídas;
- e- presedimentação em pré-represas;
- f- aproveitamento e reutilização de resíduos;
- g- controle de detergentes (redução do teor de fósforo na composição);
- h- localização cuidadosa ou relocação de certos complexos industriais;
- i- regularização de vazões e aumento das vazões mínimas.

O controle do uso de fertilizantes é considerado uma das medidas de mais fácil aplicação, mas que apenas traz resultados parciais.

O controle da erosão é indispensável para reduzir o carreamento de fertilizantes e outras matérias para os corpos d'água. No Brasil essa é medida de grande importância.

Sempre que for o caso, as estações de tratamento de esgotos devem ser projetadas de maneira a facilitar, no futuro, a sua adaptação para a remoção de nutrientes.

As medidas aplicáveis ao próprio corpo de água incluem:

- a- alteração do regime de descarga (alteração de níveis e *flushing*);
- b- movimentação e mistura das águas;
- c- aeração hipolinética;
- d- precipitação química (para sólidos e Fósforo);
- e- inativação do lodo (material sedimentado no bentos);
- f- remoção de sedimentos;
- g- colheita e remoção de biomassa;
- h- aplicação de substâncias tóxicas (herbicidas, algicidas etc.);
- i- introdução de peixes herbívoros.

A experiência internacional mostra que a eutrofização pode ser controlada, embora não existam regras fixas para as medidas a serem aplicadas e para os resultados a serem esperados. As palavras do conhecido especialista R. A. Vollenweider não devem ser esquecidas: "There is no single recipe that would cover equally well all cases of eutrophication. Each case requires careful study and diagnosis and a prescription that takes into account not only the ills but also the curative means that are best suited and readily available in any given situation".

CARÊNCIA DE DADOS EM NOSSO MEIO

Os dados disponíveis sobre corpos d'água sujeitos à eutrofização em nossa terra, inclusive casos de considerável importância, ainda são limitados e na maioria das vezes insuficientes para o adequado exame da situação.

Onde têm sido feitas observações e determinações de concentrações de nutrientes nem sempre a amostragem atende ou satisfaz a certas recomendações quanto à técnica de coleta, à frequência de amostras e ao condicionamento com referências aos aspectos hidrológicos.

As determinações feitas correspondem, na maioria das vezes, ao Fósforo e Nitrogênio totais, sem consideração para as formas particuladas. Além disso, nem sempre tem sido feito o emprego de indicadores disponíveis.

Na avaliação das fontes de nutrientes e das cargas que fluem para os corpos d'água geralmente faltam dados que permitam avaliar não só as contribuições concentradas, como as dispersas, bem como a influência das precipitações atmosféricas.

MODELOS

Nós estamos em uma época em que se dá muito valor para os modelos de simulação, como método de análise e avaliação de fenômenos dependentes de variáveis múltiplas. Para o estudo da eutrofização já foram propostos e aplicados alguns modelos específicos para otimização dos programas de controle.

Na República Democrática Alemã, por exemplo, tem sido aplicado o modelo denominado Salmo (*Simulation by means of an Analytical Lake Model*), desenvolvido em 1979-1980 pela Universidade de Dresden. No caso do reservatório Bautzen, esse modelo permitiu avaliar a influência de 9 fatores variáveis principais e os efeitos de medidas aventadas.

REPRESAS E LAGOS BRASILEIROS

Até este ponto o trabalho expõe o fenômeno consoante a tecnologia internacional. Nas regiões tropicais, menos investigadas, as condições são diversas e os dados mais carentes.

A eutrofização em lagos artificiais ou represas brasileiras tem sido objeto de estudos nas últimas décadas, principalmente em alguns casos de maior gravidade.

Nas represas, devido ao regime controlado de descargas, vazões e níveis, o comportamento se diferencia do caso de lagos naturais.

Um dos levantamentos mais completos foi realizado pelo especialista Aristides A. Rocha, em 1980, no Estado de São Paulo.

Os lagos artificiais mais estudados têm sido o Paranoá, em Brasília, e a Represa Billings, na Capital paulista. No Distrito Federal, investigações realizadas em vários lagos mostraram que algumas represas vêm recebendo cargas mais elevadas de Nitrogênio e Fósforo do que aquelas consideradas excessivas, segundo o critério de Vollenweider e que, não obstante, não demonstram os inconvenientes que poderiam ser esperados.

Essa maior tolerância talvez seja explicada pelos níveis mais elevados de radiação solar das regiões tropicais e pelas temperaturas mais altas, no decorrer de cada ano inteiro.

Os conhecidos especialistas brasileiros Samuel M. Branco e Aristides A. Rocha publicaram recentemente um trabalho com valiosas observações sobre o assunto, indicando as particularidades do nosso meio (V. a revista *Acta Limnológica Brasileira*, Vol. 1, 1986).

Outras referências nacionais podem ser mencionadas:

— Amaral e Silva, C.C., *Poluição das águas e eutrofização*, Faculdade de Saúde Pública, USP, 1972;

— Branco, S.M., *Análise de alguns aspectos e soluções prováveis para o Lago Paranoá*, revista DAE, 36 (109), 1976.

— Duarte, R.G., *Eutrofização da represa do Lobo*, Faculdade de Saúde Pública, USP, 1952;

— Vieira, J.F. e C.A. Moraes, *Qualidade das Águas e Eutrofização*, revista *Saneamento*, 50(2), abril-junho, 1976.

REFERÊNCIAS

- 1 — Vollenweider, R.A., *Eutrophication — A global Problem*
- 2 — Suess, M.J., *Health Aspects of Eutrophication*
- 3 — Forsberg, C., *Strategies and Measures to Protect Waters from Eutrophication in Scandinavia*
- 4 — Benndorf, J., D. Uhmman e K. Putz, *Strategies for Water Quality Management in Reservoirs in the German Democratic Republic*
- 5 — Bernhardt, H., e J. Clasen, *Oligotrophication of the Wahnbach Reservoir*
- 6 — Cullen, P e I. Smalls, *Eutrophication in Semi-arid Areas: The Australian Experience*
- 7 — Ryder, R.A., *Eutrophication Effects on Fisheries: The Horn of a Dilemma*

- 8 — Barabas, S., *Eutrophication can be controlled*
- 9 — Barica, J., *Hypereutrophy — The Ultimate Stage of Eutrophication*
- 10 — Holtan, H., *Eutrophication of Lake Mjosa and its Recovery*
- 11 — Weise, G. e W. Jorga, *Aquatic Macrophytes — A Potential Resource*
- 12 — Schanz, F., e E.A. Thomas, *Reversal of Eutrophication in Lake Zurich*
- 13 — Ambühl, H., *Eutrophication and its Control in Alpine Lakes*
- 14 — Schmidhe, N.W., *Phosphorous and Nitrogen Control Technologies at Treatment Plants: Present and Future*
- 15 — Tilche, A., *Agricultural and Animal Wastes — A Growing Problem in Eutrophication*
- 16 — Gavilan, J. G., *Study of Water Quality in San Roque Reservoir*
- 17 — Wrobel, S., *Inorganic Fertilization and Eutrophication of Waters*
- 18 — Dobson, H., *Trophic Conditions and Trends in the Laurentian Great Lakes*
- 19 — OECD (Secretariado), *An International Programme on Eutrophication Sponsored by OECD.*

Observação: Estes trabalhos foram publicados em conjunto, em dois números especiais da revista *Water Quality Bulletin*, Vol. 6, N.ºs 3 e 4, julho e outubro de 1981.

