

3. EUTROFIZAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA

3.1. CONCEITUAÇÃO DO FENÔMENO

As plantas aquáticas podem ser classificadas dentro das seguintes duas categorias bem amplas (Thomann e Mueller, 1987):

- *plantas que se movem livremente com a água* (plantas aquáticas planctônicas): incluem o fitoplâncton microscópico, plantas flutuantes e certos tipos de plantas, como as algas cianofíceas, que podem flutuar na superfície e mover com a corrente superficial;
- *plantas fixas* (aderidas ou enraizadas): incluem as plantas aquáticas enraizadas de diversos tamanhos e as plantas microscópicas aderidas (algas bênticas).

As algas são, portanto, uma designação abrangente de plantas simples, a maior parte microscópica, que incluem tanto as plantas de movimentação livre, o fitoplâncton e as algas bênticas aderidas. Em todos os casos, as plantas obtêm a sua fonte de energia primária da energia luminosa através do processo de fotossíntese.

A eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água (Thomann e Mueller, 1987). Como será visto no presente capítulo, o principal fator de estímulo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente *nitrogênio* e *fósforo*.

Neste capítulo enfoca-se, como corpo d'água, principalmente lagos e represas. O processo de eutrofização pode ocorrer também em rios, embora seja menos frequente, devido às condições ambientais serem mais desfavoráveis para o crescimento de algas e outras plantas, como turbidez e velocidades elevadas.

A descrição a seguir ilustra a possível sequência da evolução do processo de eutrofização em um corpo d'água, como um lago ou represa (ver Figura 3.1). O nível de eutrofização está usualmente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica.

EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO DE UM LAGO OU REPRESA

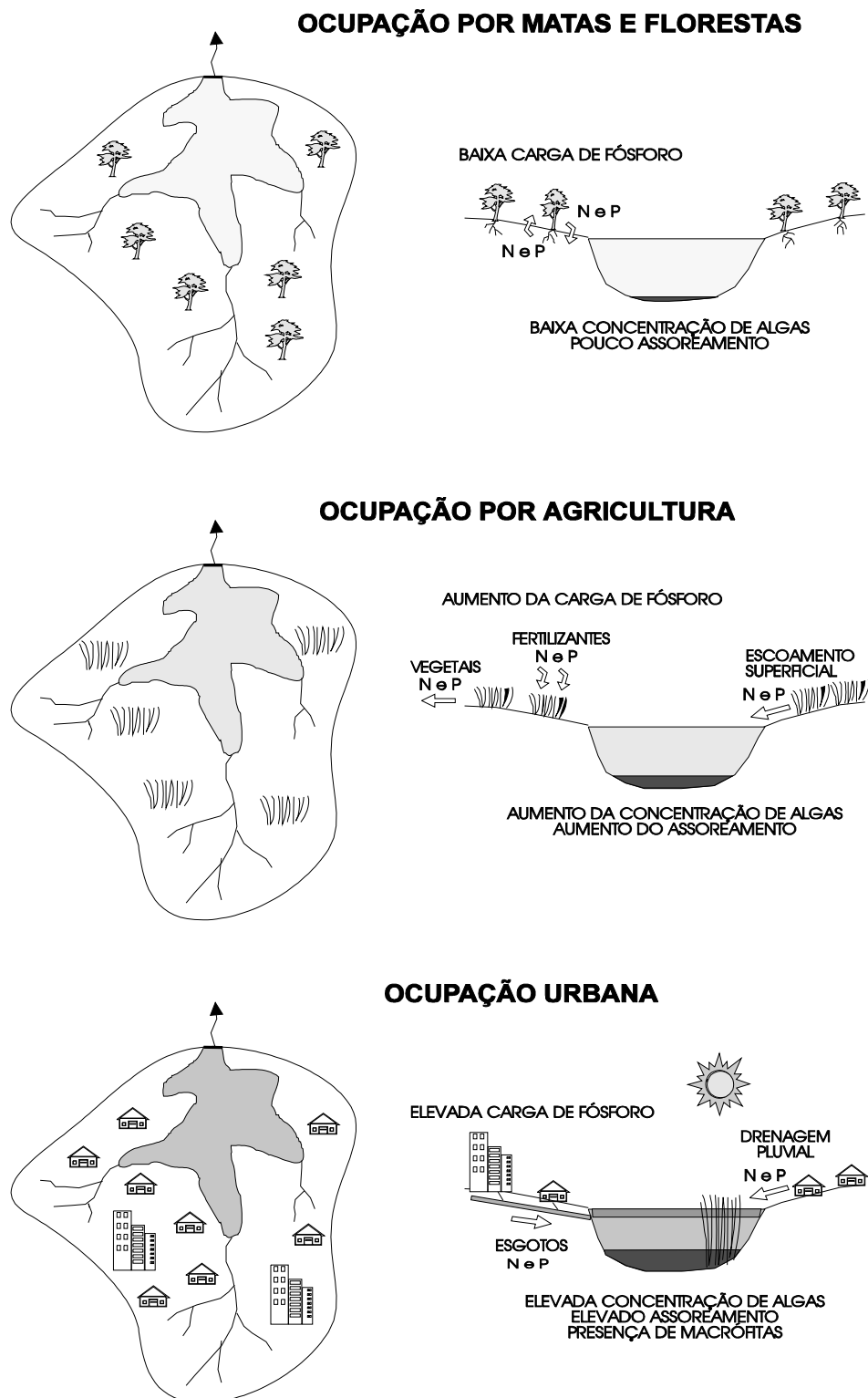


Fig. 3.1. Evolução do processo de eutrofização em um lago ou represa.
Associação entre o uso e ocupação do solo e a eutrofização.

a) Ocupação por matas e florestas

Um lago situado em uma bacia de drenagem ocupada por matas e florestas apresenta usualmente uma baixa produtividade, isto é, há pouca atividade biológica de produção (síntese) no mesmo. Mesmo nestas condições naturais e de ausência de interferência humana, o lago tende a reter sólidos que se sedimentam, constituindo uma camada de lodo no fundo. Com os fenômenos de decomposição do material sedimentado, há um certo aumento, ainda incipiente, do nível de nutrientes na massa líquida. Em decorrência, há uma progressiva elevação na população de plantas aquáticas na massa líquida e, em consequência, de outros organismos situados em níveis superiores na cadeia alimentar (cadeia trófica).

Na bacia hidrográfica, a maior parte dos nutrientes é retida dentro de um ciclo quase fechado. As plantas, ao morrerem e caírem no solo, sofrem decomposição, liberando nutrientes. Numa região de matas e florestas, a capacidade de infiltração da água de chuva no solo é elevada. Em consequência, os nutrientes lixiviam pelo solo, onde são absorvidos pelas raízes das plantas, voltando a fazer parte da sua composição, e fechando, desta forma, o ciclo. O aporte de nutrientes ao corpo d'água é reduzido.

Pode-se considerar que o corpo d'água apresente ainda um nível trófico bem incipiente.

b) Ocupação por agricultura

A retirada da vegetação natural da bacia para ocupação por agricultura representa, usualmente, uma etapa intermediária no processo de deterioração de um corpo d'água. Os vegetais plantados na bacia são retirados para consumo humano, muito possivelmente fora da própria bacia hidrográfica. Com isto, há uma retirada, não compensada naturalmente, de nutrientes, causando uma quebra no ciclo interno dos mesmos. Para compensar esta retirada, e para tornar a agricultura mais intensiva, são adicionados artificialmente, fertilizantes, isto é, produtos com elevados teores dos nutrientes nitrogênio e fósforo. Os agricultores, visando garantir uma produção elevada, adicionam quantidades elevadas de N e P, frequentemente superiores à própria capacidade de assimilação dos vegetais.

A substituição das matas por vegetais agricultáveis pode causar também uma redução da capacidade de infiltração no solo. Assim, os nutrientes, já adicionados em excesso, tendem a escoar superficialmente pelo terreno, até atingir, eventualmente, o lago ou represa.

O aumento do teor de nutrientes no corpo d'água causa um certo aumento do número de algas e, em consequência, dos outros organismos, situados em degraus superiores da cadeia alimentar, culminando com os peixes. Esta elevação relativa da produtividade do corpo d'água pode ser até bem-vinda, dependendo dos usos previstos para o mesmo. O balanço entre os aspectos positivos e negativos dependerá, em grande parte, da capacidade de assimilação de nutrientes do corpo d'água (a ser detalhada posteriormente neste capítulo).

c) Ocupação urbana

Caso se substitua a área agricultável da bacia hidrográfica por ocupação urbana, uma série de consequências irá ocorrer, desta vez em taxa bem mais rápida.

- Assoreamento. A implantação de loteamentos implica em movimentos de terra para as construções. A urbanização reduz também a capacidade de infiltração das águas no terreno. As partículas de solo tendem, em consequência, a seguir pelos fundos de vale, até atingir o lago ou represa. Aí, tendem a sedimentar, devido às baixíssimas velocidades de escoamento horizontal. A sedimentação das partículas de solo causa o assoreamento, reduzindo o volume útil do corpo d'água, e servindo de meio suporte para o crescimento de vegetais fixos de maiores dimensões (macrófitas) próximos às margens. Estes vegetais causam uma evidente deterioração no aspecto visual do corpo d'água.
- Drenagem pluvial urbana. A drenagem urbana transporta uma carga muito maior de nutrientes que os demais tipos de ocupação da bacia. Este aporte de nutrientes contribui para uma elevação no teor de algas na represa.

- Esgotos. O maior fator de deterioração está, no entanto, associado aos esgotos oriundos das atividades urbanas. Os esgotos contêm nitrogênio e fósforo, presentes nas fezes e urina, nos restos de alimentos, nos detergentes e outros subprodutos das atividades humanas. A contribuição de N e P através dos esgotos é bem superior à contribuição originada pela drenagem urbana.

Há, portanto, uma grande elevação do aporte de N e P ao lago ou represa, trazendo, em decorrência, uma elevação nas populações de algas e outras plantas. Dependendo da capacidade de assimilação do corpo d'água, a população de algas poderá atingir valores bastante elevados, trazendo uma série de problemas, como detalhado no item seguinte. Em um período de elevada insolação (energia luminosa para a fotossíntese), as algas poderão atingir superpopulações, constituindo uma camada superficial, similar a um caldo verde. Esta camada superficial impede a penetração da energia luminosa nas camadas inferiores do corpo d'água, causando a morte das algas situadas nestas regiões. A morte destas algas traz, em si, uma série de outros problemas. Estes eventos de superpopulação de algas são denominados floração das águas.

3.2. PROBLEMAS DA EUTROFIZAÇÃO

São os seguintes os principais efeitos indesejáveis da eutrofização (Arceivala, 1981; Thomann e Mueller, 1987; von Sperling, 1994):

- *Problemas estéticos e recreacionais*. Diminuição do uso da água para recreação, balneabilidade e redução geral na atração turística devido a:
 - frequentes florações das águas
 - crescimento excessivo da vegetação
 - distúrbios com mosquitos e insetos
 - eventuais maus odores
 - eventuais mortandades de peixes
- *Condições anaeróbias no fundo do corpo d'água*. O aumento da produtividade do corpo d'água causa uma elevação da concentração de bactérias heterotróficas, que se alimentam da matéria orgânica das algas e de outros microrganismos mortos, consumindo oxigênio dissolvido do meio líquido. No fundo do corpo d'água predominam condições anaeróbias, devido à sedimentação da matéria orgânica, e à reduzida penetração do oxigênio a estas profundidades, bem como à ausência de fotossíntese (ausência de luz). Com a anaerobiose, predominam condições redutoras, com compostos e elementos no estado reduzido:
 - o ferro e o manganês encontram-se na forma solúvel, trazendo problemas ao abastecimento de água
 - o fosfato encontra-se também na forma solúvel, representando uma fonte interna de fósforo para as algas
 - o gás sulfídrico causa problemas de toxicidade e maus odores.
- *Eventuais condições anaeróbias no corpo d'água como um todo*. Dependendo do grau de crescimento bacteriano, pode ocorrer, em períodos de mistura total da massa líquida (inversão térmica) ou de ausência de fotossíntese (período noturno), mortandade de peixes e reintrodução dos compostos reduzidos em toda a massa líquida, com grande deterioração da qualidade da água.
- *Eventuais mortandades de peixes*. A mortandade de peixes pode ocorrer em função de:
 - anaerobiose (já comentada acima)
 - toxicidade por amônia. Em condições de pH elevado (frequentes durante os períodos de elevada fotossíntese), a amônia apresenta-se em grande parte na forma livre (NH_3), tóxica aos peixes, ao invés de na forma ionizada (NH_4^+), não tóxica.

- *Maior dificuldade e elevação nos custos de tratamento da água.* A presença excessiva de algas afeta substancialmente o tratamento da água captada no lago ou represa, devido à necessidade de:
 - remoção da própria alga
 - remoção de cor
 - remoção de sabor e odor
 - maior consumo de produtos químicos
 - lavagens mais frequentes dos filtros
- *Problemas com o abastecimento de águas industrial.* Elevação dos custos para o abastecimento de água industrial devido a razões similares às anteriores, e também aos depósitos de algas nas águas de resfriamento.
- *Toxicidade das algas.* Rejeição da água para abastecimento humano e animal em razão da presença de secreções tóxicas de certas algas.
- *Modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial*
- *Redução na navegação e capacidade de transporte.* O crescimento excessivo de macrófitas enraizadas interfere com a navegação, aeração e capacidade de transporte do corpo d'água.
- *Desaparecimento gradual do lago como um todo.* Em decorrência da eutrofização e do assoreamento, aumenta a acumulação de matérias e de vegetação, e o lago se torna cada vez mais raso, até vir a desaparecer. Esta tendência de desaparecimento de lagos (conversão a brejos ou áreas pantanosas) é irreversível, porém usualmente extremamente lenta. Com a interferência do homem, o processo pode se acelerar abruptamente. Caso não haja um controle na fonte e/ou dragagem do material sedimentado, o corpo d'água pode desaparecer relativamente rapidamente.

3.3. GRAUS DE TROFIA

De forma a se poder caracterizar o estágio de eutrofização em que se encontra um corpo d'água, possibilitando a tomada de medidas preventivas e /ou corretivas, é interessante a adoção de um sistema classificatório. Usualmente, tem-se os seguintes níveis de trofia:

- *oligotrófico* (lagos claros e com baixa produtividade)
- *mesotrófico* (lagos com produtividade intermediária)
- *eutrófico* (lagos com elevada produtividade, comparada ao nível natural básico)

De forma a se caracterizar com uma particularidade ainda mais elevada os corpos d'água, há outras classificações com outros níveis tróficos, tais como: ultraoligotrófico, oligotrófico, oligomesotrófico, mesotrófico, mesoeutrotófico, eutrotófico, eupolitrotófico, hipereutrotófico (listados da menor para a maior produtividade).

Uma caracterização qualitativa entre os principais graus de trofia pode ser como apresentada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Caracterização trófica de lagos e reservatórios

Item	Classe de trofia				
	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Biomassa	Bastante baixa	Reduzida	Média	Alta	Bastante alta
Fração de algas verdes e/ou cianofíceas	Baixa	Baixa	Variável	Alta	Bastante alta
Macrófitas	Baixa ou ausente	Baixa	Variável	Alta ou baixa	Baixa
Dinâmica de produção	Bastante baixa	Baixa	Média	Alta	Alta, instável
Dinâmica de oxigênio na camada superior	Normalmente saturado	Normalmente saturado	Variável em torno da supersaturação	Frequentemente supersaturado	Bastante instável, de supersaturação à ausência
Dinâmica de oxigênio na camada inferior	Normalmente saturado	Normalmente saturado	Variável abaixo da saturação	Abaixo da saturação à completa ausência	Bastante instável, de supersaturação à ausência
Prejuízo aos usos múltiplos	Baixo	Baixo	Variável	Alto	Bastante alto

Adaptado de Vollenweider (apud Salas e Martino, 1991)

A quantificação do nível trófico é, no entanto, mais difícil, especialmente para lagos tropicais. Von Sperling (1994) apresenta uma coletânea de diversas referências, em termos de concentração de fósforo total, clorofila *a* e transparência, a qual ressalta a grande amplitude das faixas propostas por diversos autores. Além disso, a referência citada apresenta ainda outros possíveis índices a serem utilizados, sempre com a ressalva da dificuldade de se generalizar dados de um corpo d'água para outro. Deve-se ter em mente ainda que corpos d'água tropicais apresentam uma maior capacidade de assimilação de fósforo que corpos d'água de climas temperados. Uma interpretação da síntese relatada por von Sperling pode ser como apresentado no Quadro 3.2, em termos da concentração de fósforo total.

Quadro 3.2. Faixas aproximadas de valores de fósforo total para os principais graus de trofia

Classe de trofia	Concentração de fósforo total na represa (mg/m ³)
Ultraoligotrófico	< 5
Oligotrófico	< 10 - 20
Mesotrófico	10 - 50
Eutrófico	25 - 100
Hipereutrófico	> 100

Fonte: tabela construída com base nos dados apresentados por von Sperling (1994)

Nota: a superposição dos valores entre duas faixas indica a dificuldade no estabelecimento de faixas rígidas

O estabelecimento da classe de trofia com base apenas no fósforo é por uma questão de conveniência na modelagem matemática. Da mesma forma que nos outros tópicos de poluição das águas foram escolhidas variáveis representativas, como oxigênio dissolvido (poluição por matéria orgânica) e coliformes (contaminação por patógenos), adota-se neste capítulo o fósforo como representativo do grau de trofia.

3.4. DINÂMICA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

O perfil vertical de temperatura em lagos e reservatórios varia com as estações do ano. Esta variação de temperatura afeta a densidade da água e, em decorrência, a capacidade de mistura e estratificação do corpo d'água.

Durante o verão e os meses mais quentes do ano, a temperatura da camada superficial é bem mais elevada que a temperatura do fundo, devido à radiação solar. Devido a este fato, a densidade da água superficial torna-se inferior à densidade da camada do fundo, fazendo com que haja camadas distintas no corpo d'água:

- *epilímnio*: camada superior, mais quente, menos densa, com maior circulação

- *termoclina*: camada de transição
- *hipolímnio*: camada inferior, mais fria, mais densa, com maior estagnação

A diferença de densidades pode ser tal, que cause uma completa estratificação no corpo d'água, com as três camadas não se misturando entre si. Esta estratificação tem uma grande influência na qualidade da água. Dependendo do grau de trofia do corpo d'água, poderá haver uma ausência completa de oxigênio dissolvido no hipolímnio. Em decorrência, nesta camada tem-se a predominância de compostos reduzidos de ferro, manganês e outros.

Com a chegada do período frio, há um resfriamento da camada superficial do lago, causando uma certa homogeneização na temperatura ao longo de toda a profundidade. Com a homogeneização da temperatura, tem-se também uma maior similaridade entre as densidades. A camada superior, subitamente resfriada, tende a ir para o fundo do lago, deslocando a camada inferior, e causando um completo revolvimento do lago. A este fenômeno dá-se o nome de inversão térmica. Em lagos que apresentam uma maior concentração de compostos reduzidos no hipolímnio, a reintrodução destes na massa d'água de todo o lago pode causar uma grande deterioração na qualidade da água. A redução da concentração de oxigênio dissolvido, devido à demanda introduzida pelos compostos orgânicos e inorgânicos reduzidos, bem como à ressuspensão da camada anaeróbia do fundo, pode causar a mortandade de peixes.

A Figura 3.2 apresenta um perfil típico de temperatura e OD nas condições de estratificação e de inversão térmica.

DINÂMICA DE ESTRATIFICAÇÃO E MISTURA DE LAGOS

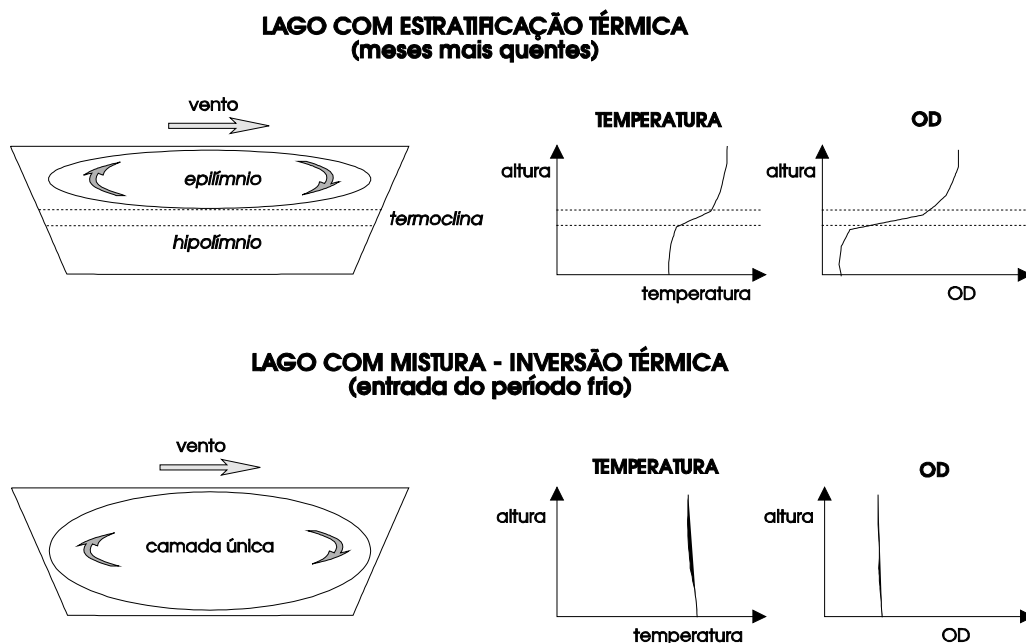


Fig. 3.2. Perfis de um lago em condições de estratificação e de inversão térmica

3.5. NUTRIENTE LIMITANTE

Nutriente limitante é aquele, sendo essencial para uma determinada população, limita seu crescimento. Em baixas concentrações do nutriente limitante, o crescimento populacional é baixo. Com a elevação da concentração do nutriente limitante, o crescimento populacional também aumenta. Essa situação persiste até o ponto em que a concentração desse nutriente passa a ser tão elevada no meio, que um outro

nutriente passa a ser o fator limitante, por não se apresentar em concentrações suficientes para suprir os elevados requisitos da grande população. Esse novo nutriente passa a ser o novo nutriente limitante, pois nada adianta aumentar a concentração do primeiro nutriente, que a população não crescerá, pois estará limitada pela insuficiência do novo nutriente limitante.

Thomann e Mueller (1987) sugerem o seguinte critério, com base na relação entre as concentrações de nitrogênio e fósforo (N/P), para se estimar preliminarmente se o crescimento de algas em um lago está sendo controlado pelo fósforo ou nitrogênio:

- grandes lagos, com predominância de fontes não pontuais: $N/P \gg 10$: *limitação por fósforo*
- pequenos lagos, com predominância de fontes pontuais: $N/P \ll 10$: *limitação por nitrogênio*

De acordo com Salas e Martino (1991), a maioria dos lagos tropicais da América Latina são limitados por fósforo. Um outro aspecto é o de que, mesmo que se controle o aporte externo de nitrogênio, há algas com capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, que não teriam a sua concentração reduzida com a diminuição da carga afluyente de nitrogênio. Por estas razões, *prefere-se dar uma maior prioridade ao controle das fontes de fósforo quando se pretende controlar a eutrofização em um corpo d'água*. O presente texto segue esta abordagem.

3.6. ESTIMATIVA DA CARGA DE FÓSFORO AFLUENTE A UM LAGO OU REPRESA

As principais fontes de fósforo a um lago ou represa são, em ordem crescente de importância:

- *drenagem pluvial*
 - áreas com matas e florestas
 - áreas agrícolas
 - áreas urbanas
- *esgotos*

A drenagem pluvial de áreas com ampla cobertura vegetal, como matas e florestas, transporta a menor quantidade de fósforo. Nestas áreas, o fósforo não está superabundando no meio, já que o ecossistema se encontra próximo ao equilíbrio, não havendo nem grandes excessos, nem grandes faltas dos principais elementos.

A drenagem de áreas agrícolas apresenta valores mais elevados e, também, uma ampla variabilidade, dependendo da capacidade de retenção do solo, irrigação, tipo de fertilização da cultura e condições climáticas (CETESB, 1976).

A drenagem urbana apresenta valores mais elevados e com menor variabilidade.

Os esgotos domésticos veiculados por sistemas de esgotamento dinâmico são, na realidade, a maior fonte de contribuição de fósforo. Este encontra-se presente nas fezes humanas, nos detergentes para limpeza doméstica e em outros subprodutos das atividades humanas. Com relação aos esgotos industriais, é difícil a generalização da sua contribuição, em virtude da grande variabilidade apresentada entre distintas tipologias industriais, e mesmo de indústria para indústria em uma mesma tipologia.

O Quadro 3.3 apresenta valores típicos da contribuição unitária de fósforo, compilados de diversas referências nacionais e estrangeiras (von Sperling, 1986). A unidade de tempo adotada é “ano”, conveniente para modelagem matemática.

Quadro 3.3. Contribuições unitárias de fósforo típicas

Fonte	Tipo	Valores típicos	Unidade
Drenagem	Áreas de matas e florestas	10	kgP/km ² .ano
	Áreas agrícolas	50	kgP/km ² .ano
	Áreas urbanas	100	kgP/km ² .ano
Esgotos	Domésticos	1,0	kgP/hab.ano

3.7. ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO NO CORPO D'ÁGUA

A literatura apresenta uma série de modelos empíricos simplificados para se estimar a concentração de fósforo no corpo d'água, em função da carga afluyente, tempo de detenção e características geométricas. Os modelos empíricos podem ser utilizados com uma das seguintes duas aplicações principais:

- *Estimativa do nível trófico.* Uma vez estimada a concentração de fósforo, pode-se avaliar o nível trófico do lago, com base nas considerações do Item 3.3.
- *Estimativa da carga máxima admissível.* Pode-se estimar também a carga máxima admissível de fósforo ao lago, para que a concentração de fósforo resultante esteja dentro de um valor inferior ao da eutrofia.

A abordagem empírica tem sido mais utilizada do que a conceitual, devido à dificuldade em se elaborar modelos de base física para o fósforo em uma represa, bem como de se obter os valores dos coeficientes e dados de entrada necessários.

O modelo empírico mais conhecido mundialmente é o de Vollenweider (1976), desenvolvido predominantemente para lagos temperados. O modelo, apresentado de uma forma conveniente para as convenções do presente texto, é:

$$P = \frac{L \cdot 10^3}{V \cdot \left(\frac{1}{t} + K_s \right)} \quad (3.1)$$

onde:

P = concentração de fósforo no corpo d'água (gP/m³)

L = carga afluyente de fósforo (kgP/ano)

V = volume da represa (m³)

t = tempo de detenção hidráulica (ano)

K_s = coeficiente de perda de fósforo por sedimentação (1/ano)

Vollenweider obteve o valor de K_s por meio de análise da regressão em função do tempo de detenção na represa. O valor obtido foi:

$$K_s = 1 / \sqrt{t} \quad (3.2)$$

Castagnino (1982), ao analisar teoricamente a perda de fósforo por sedimentação em lagos tropicais, chegou a um valor de K_s igual a 2,5 vezes o valor de Vollenweider. Este coeficiente de majoração de 2,5 é um fator composto de 1,3 para a sedimentação facilitada pelas maiores temperaturas e 1,9 pela aceleração na taxa de crescimento de fitoplâncton (1,3x1,9 = 2,5). Segundo Castagnino, o valor de K_s, corrigido para as condições tropicais, é:

$$K_s = 2,5 / \sqrt{t} \quad (3.3)$$

Salas e Martino (1991), analisando dados experimentais de 40 lagos e reservatórios na América Latina e Caribe, obtiveram, por análise da regressão, a seguinte relação para K_s :

$$K_s = 2 / \sqrt{t} \quad (3.4)$$

Com os valores obtidos por Salas e Martino (1991), a equação do balanço de massa passa a ser:

Concentração de fósforo na represa:

$$P = \frac{L \cdot 10^3}{V \cdot \left(\frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)} \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 pode ser rearranjada, para se determinar a carga máxima admissível de fósforo a um lago, para que não seja suplantado um valor máximo para a concentração de fósforo no lago:

Carga de fósforo máxima admissível:

$$L = \frac{P \cdot V \cdot \left(\frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)}{10^3} \quad (3.6)$$

Para a utilização da Equação 3.6, deve-se estimar L para que P situe-se abaixo do limite da eutrofia. Segundo o Quadro 3.2, a faixa de concentração de fósforo em um corpo d'água eutrófico é de 25 a 100 mgP/m³, ou seja, 0,025 a 0,100 gP/m³. A fixação de um valor ideal de P, mais relaxado ou mais restritivo, deve ser feita caso a caso, analisando-se os usos múltiplos da represa e o seu grau de importância.

Devido ao fato de ter sido desenvolvido com base em dados regionais (inclusive brasileiros), acredita-se que o modelo empírico proposto por Salas e Martino (1991) deva ser o modelo utilizado para o planejamento e gerenciamento de lagos e represas em nossas condições. Naturalmente que deve estar sempre presente o espírito crítico e a experiência do pesquisador, para evitar distorções, dada a especificidade de cada represa ou lago em estudo

3.8. CONTROLE DA EUTROFIZAÇÃO

As estratégias de controle usualmente adotadas podem ser classificadas em duas categorias amplas (Thomann e Mueller, 1987; von Sperling, 1995):

- *medidas preventivas* (atuação na bacia hidrográfica)
 - redução das fontes externas
- *medidas corretivas* (atuação no lago ou represa)
 - processos mecânicos
 - processos químicos
 - processos biológicos

a) Medidas preventivas

As medidas preventivas, as quais compreendem a redução do aporte de fósforo através de atuação nas fontes externas, podem incluir estratégias relacionadas aos esgotos ou à drenagem pluvial. As estratégias de controle dos esgotos estão ilustradas na Figura 3.3.

Controle dos esgotos

- Tratamento dos esgotos a nível terciário com remoção de nutrientes
- Tratamento convencional dos esgotos e lançamento a jusante da represa
- Exportação dos esgotos para outra bacia hidrográfica que não possua lagos ou represas
- Infiltração dos esgotos no terreno

Controle da drenagem pluvial

- Controle do uso e ocupação do solo na bacia
- Faixa verde ao longo da represa e tributários
- Construção de barragens de contenção

ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DOS ESGOTOS

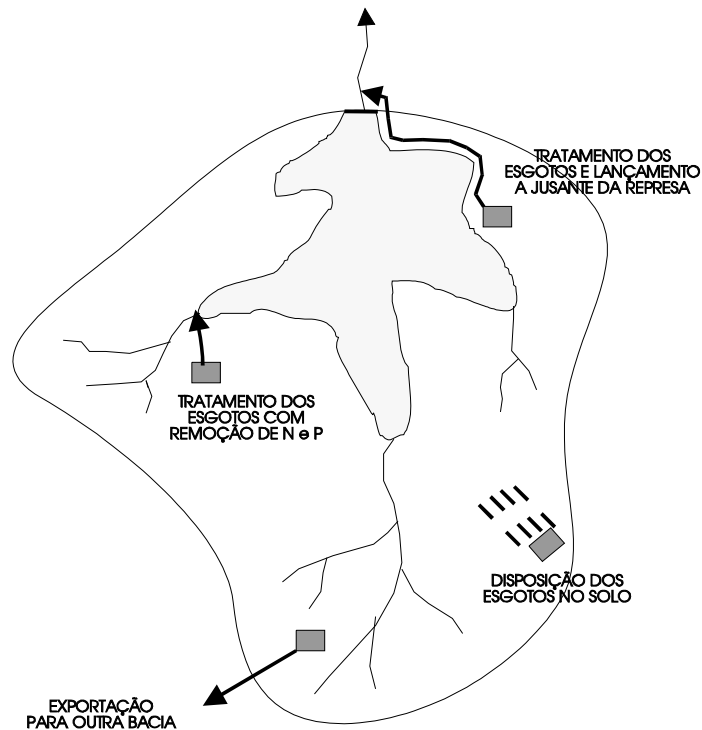


Fig. 3.3. Estratégias para o controle dos esgotos visando a prevenção do aporte de nutrientes na represa

Com relação ao tratamento dos esgotos com remoção de fósforo, esta pode ser efetuada por meio de processos biológicos e/ou físico-químicos.

A remoção avançada de fósforo no tratamento de esgotos por meio de *processos biológicos* foi desenvolvida há cerca de duas décadas, estando hoje bastante consolidada. O processo baseia-se na alternância entre condições aeróbias e anaeróbias, situação que faz com que um determinado grupo de bactérias assimile uma quantidade de fósforo superior à requerida para os processos metabólicos usuais. Ao se retirar estas bactérias do sistema, está-se retirando, em decorrência, o fósforo absorvido pelas mesmas. Com a remoção biológica de fósforo pode-se atingir efluentes com concentrações em torno de 0,5 mgP/l, embora seja mais apropriado considerar-se um valor mais conservador de 1,0 mgP/l.

A remoção de fósforo por *processos físico-químicos* baseia-se na precipitação do fósforo, após adição de sulfato de alumínio, cloreto férrico ou cal. O consumo de produtos químicos e a geração de lodo são elevados. O tratamento físico-químico após a remoção biológica de fósforo pode gerar efluentes com concentrações da ordem de 0,1 mgP/l.

b) Medidas corretivas

As medidas corretivas a serem adotadas podem incluir uma ou mais das seguintes estratégias (von Sperling, 1995):

Processos mecânicos

- Aeração

- Desestratificação
- Aeração do hipolímnio
- Remoção dos sedimentos
- Cobertura dos sedimentos
- Retirada de águas profundas
- Remoção de algas
- Remoção de macrófitas
- Sombreamento

Processos químicos

- Precipitação de nutrientes
- Uso de algicidas
- Oxidação do sedimento com nitratos
- Neutralização

Processos biológicos

- Biomanipulação
- Uso de cianófagos
- Uso de peixes herbívoros

Sempre que possível, deve-se dar grande ênfase aos *métodos preventivos*, usualmente mais baratos e eficazes.

3.9. EXEMPLO DA ESTIMATIVA DE FÓSFORO EM UMA REPRESA

Estimar o grau de trofia em um reservatório com base na concentração de fósforo. Caso sejam encontradas condições eutróficas, estimar a carga máxima admissível para que sejam evitadas condições eutróficas.

Dados:

- volume do reservatório: $10 \times 10^6 \text{ m}^3$
- vazão média afluyente (tributários + esgotos): $50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$
- área de drenagem: 60 km^2
 - área de matas: 40 km^2
 - área agrícola: 10 km^2
 - área urbana: 10 km^2
- população contribuinte (ligada ao sistema de esgotamento dinâmico): 8.000 hab
- características dos esgotos: esgotos domésticos brutos (sem tratamento)

a) Estimativa da carga de P afluyente ao reservatório

Adotando-se os valores de carga unitária propostos no Item 3.6 (Quadro 3.3), tem-se as seguintes cargas afluentes:

- esgotos domésticos brutos: $8.000 \text{ hab} \times 1,0 \text{ kgP/hab.ano} = 8.000 \text{ kgP/ano}$
- escoamento das áreas de matas: $40 \text{ km}^2 \times 10 \text{ kgP/km}^2.\text{ano} = 400 \text{ kgP/ano}$
- escoamento das áreas agrícolas: $10 \text{ km}^2 \times 50 \text{ kgP/km}^2.\text{ano} = 500 \text{ kgP/ano}$
- escoamento das áreas urbanas: $10 \text{ km}^2 \times 100 \text{ kgP/km}^2.\text{ano} = 1.000 \text{ kgP/ano}$

Carga total afluyente ao reservatório: $8.000 + 400 + 500 + 1.000 = 9.900 \text{ kgP/ano}$

b) Estimativa do tempo de detenção hidráulica

O tempo de detenção hidráulica é dado por:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{10 \times 10^6 \text{ m}^3}{50 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{ano}} = 0,20 \text{ anos}$$

c) Estimativa da concentração de fósforo no reservatório

Adotando-se o modelo de Salas e Martino (1991), Equação 3.5, tem-se:

$$P = \frac{L \cdot 10^3}{V \cdot \left(\frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)} = \frac{9.900 \times 10^3}{10 \times 10^6 \left(\frac{1}{0,20} + \frac{2}{\sqrt{0,20}} \right)} = 0,105 \text{ gP} / \text{m}^3 = 105 \text{ mgP} / \text{m}^3$$

d) Avaliação do grau de trofia do reservatório

Com base na concentração de P encontrada igual a 105 mgP/m³ e na interpretação do Quadro 3.2, tem-se que o reservatório está no limite entre eutrofia e hipereutrofia. São necessárias medidas de controle, para que o lago não se apresente em condições eutróficas.

e) Redução da carga afluyente de fósforo

Através da adoção de medidas preventivas de controle de esgotos e controle da drenagem pluvial pode-se reduzir drasticamente a carga de fósforo afluyente ao reservatório. A carga afluyente deve ser reduzida até um valor, abaixo do limite de eutrofia. Com base no Quadro 3.2, pode-se admitir um valor, não muito conservador, de 50 mgP/m³, como limite entre mesotrofia e eutrofia. Nestas condições, a carga máxima admissível de fósforo ao reservatório é dada pela Equação 3.6:

$$L = \frac{P \cdot V \cdot \left(\frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)}{10^3} = \frac{0,050 \times 10 \times 10^6 \cdot \left(\frac{1}{0,20} + \frac{2}{\sqrt{0,20}} \right)}{10^3} = 4.736 \text{ kgP} / \text{ano}$$

A carga afluyente terá de ser reduzida de 9.900 kgP/ano para 4.736 kgP/ano. A atuação integrada entre controle dos esgotos e controle do escoamento superficial pode alcançar esta redução facilmente.