

TEMA 2.7B LIMNOLOGIA Y EUTROFICACION

CI41B Ingeniería Ambiental

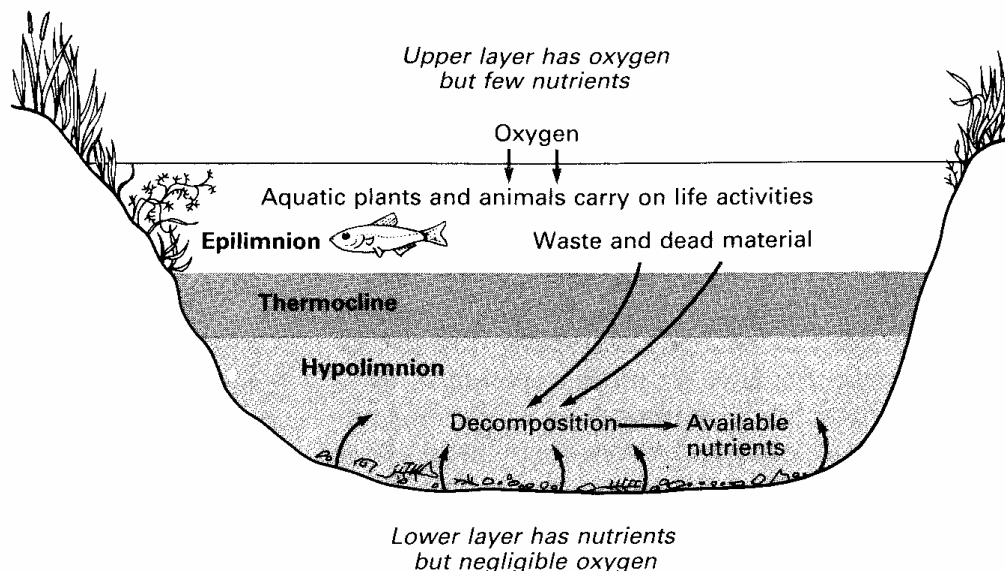
Profesores D. Rodríguez, R. Muñoz, J. Cornejo y C. Espinoza
Semestre Otoño 2004

1. INTRODUCCION

El estudio de las características, físicas, químicas y biológicas de ríos y lagos (i.e. agua fresca) se denomina **limnología**. Su contraparte, la que se relaciona con los océanos, se denomina **oceanografía**. Algunas definiciones importantes son las siguientes:

- **Limnología** es el estudio de las características físicas, químicas, y biológicas de ríos y lagos.
- El **epilimnio** es el nivel superior del agua en un lago.
- El **metalimnio** es el estrato de agua intermedio en un lago, donde la termoclina ocurre (temperatura y oxígeno se reducen rápidamente con la profundidad).
- El **hipolimnio** es el estrato inferior en un lago o laguna, el cual permanece a temperatura constante durante los meses de verano.
- La **zona eufótica** es aquel volumen de agua en el océano o lago que recibe suficiente luz como para llevar a cabo fotosíntesis.
- Un **organismo béntico** es una planta o animal que vive en o cerca del fondo de un lago, río, corriente, u océano.
- **Plancton** son pequeños organismos vivos que flotan en un cuerpo de agua; fitoplancton se refiere a la plantas (algas), y zooplancton a las especies animales (crustáceos, entre otros) que se alimentan de las otras formas de plancton.

Figura 1
Distribución Vertical en un Lago



2. CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA

Como un ecosistema, un lago o río por si mismos son unidades bastante artificiales en las cuales muchas de sus características son determinadas por la naturaleza, tamaño, y forma de la tierra que las rodea y de las aguas de drenaje que acceden a ellas. De esta manera, la unidad ecológica es el lago o río junto con su cuenca de drenaje. Lo anterior se conoce como el área de la cuenca aportante. La cantidad de agua que entra a un lago o río es determinada por la cantidad de precipitación sobre la cuenca aportante, por el tamaño de la cuenca de drenaje, y por la naturaleza de la vegetación y suelo que rodea a los cuerpos de agua.

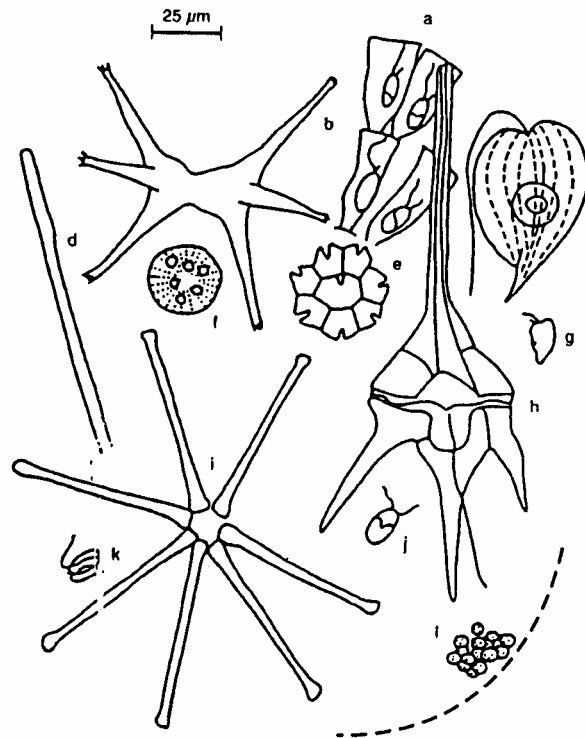
La calidad del agua superficial será afectada por la atmósfera a través de la cual la lluvia cae, por la naturaleza del suelo y vegetación sobre la cual el agua superficial escurre, y por las actividades humanas en la cuenca. La composición de las aguas que entran a ríos y lagos pueden ser cambiadas por gases que se mueven sobre la zona pero que provienen de lugares muy lejanos. La emigración de aves puede tener un efecto muy importante sobre la calidad de las aguas debido a las excretas depositadas en lagos o ríos. Ácidos húmicos, provenientes de áreas de bosques, pueden cambiar el color y apariencia del agua. La descarga de aguas residuales domésticas y residuos industriales pueden afectar severamente la calidad del agua, especialmente en cuanto a su contenido orgánico.

3. COMUNIDADES BIÓTICAS

Los organismos que viven suspendidos en una columna de agua se denominan **plancton**. En aguas muy agitadas estos organismos no tienen tiempo de desarrollar poblaciones significativas, pero a medida que la tasa de flujo se hace más lenta, las laderas de la cuenca se hacen más suaves, y el volumen del agua aumenta, ellos comienzan a desarrollar poblaciones animales y vegetales muy distintivas, las que se denominan **fitoplancton** y **zooplancton**, respectivamente. El fitoplancton es un grupo muy diverso de algas verdes microscópicas que provienen de docenas de grupos diferentes. El grupo predominante son las algas verdes unicelulares. Bajo condiciones favorables estas algas pueden desarrollar enormes poblaciones, lo que causa los denominados **algal blooms** (explosiones de algas), en las cuales ellas colorean el agua y pueden producir olores y sabores muy específicos. Ejemplos de fitoplancton se presentan en la Figura 2.

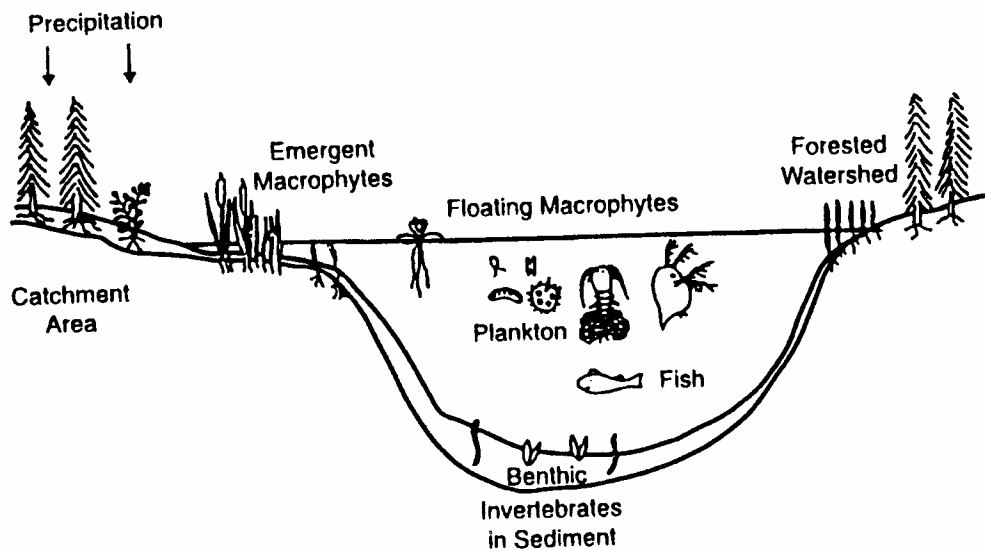
En agua fresca, el zooplancton incluye pequeños crustáceos. Muchos de ellos filtran grandes volúmenes de agua diariamente de la cual extraen fitoplancton y pequeños zooplancton y bacterias. El zooplancton puede variar en tamaño desde 70 a 3000 μm . Algunos de ellos tienen mecanismos de flotación específicos, los que incluyen bolsas de aire o de aceite. Muchos de estos organismos son bastante móviles, para lo cual poseen grupos de cilios o tentáculos. De esta manera ellos pueden perseguir a su presa y cambiar de posición vertical para mejorar sus posibilidades de alimentación o para evitar otros predadores.

Figura 2
Ejemplos de Fitoplancton



La disminución de la velocidad de la corriente en las zonas más bajas de las cuencas produce sedimentación del material arrastrado, lo que provee un medio bastante atractivo para grandes plantas acuáticas y un hábitat perfecto para criaturas que viven en el fango (ver Figura 3).

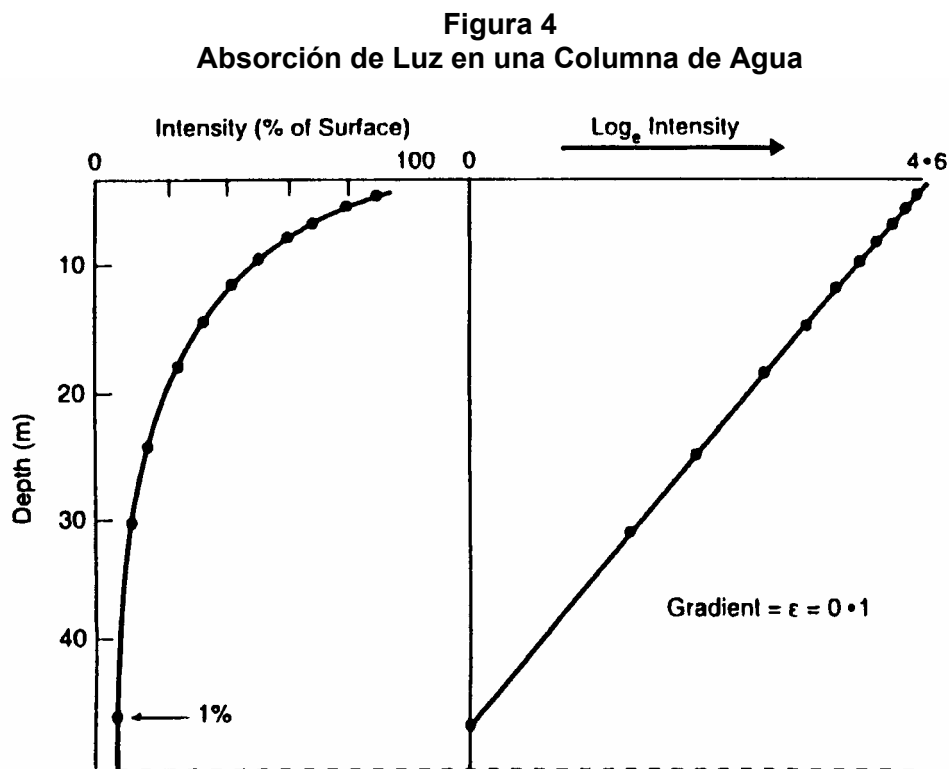
Figura 3
Diagrama Esquemático de un Lago



En el caso de los ríos, a medida que aumenta su tamaño y la velocidad disminuye, se comienzan a parecer cada vez más a lagos superficiales en términos de su biota. Arena, limo, y partículas de arcilla se acumulan, con la arcilla y el limo penetrando lentamente dentro del agua. Algas muertas y zooplancton se acumulan en forma estacional, junto con polen y las excretas de zooplancton y peces de los niveles superiores. Los bajos niveles de oxígeno reducen las tasas de descomposición de esta materia orgánica. Precipitación de hierro, manganeso, y fosfatos pueden ocurrir bajo estas condiciones anóxicas (anaeróbicas) y se incorporan en el sedimento.

4. LUZ EN LAGOS

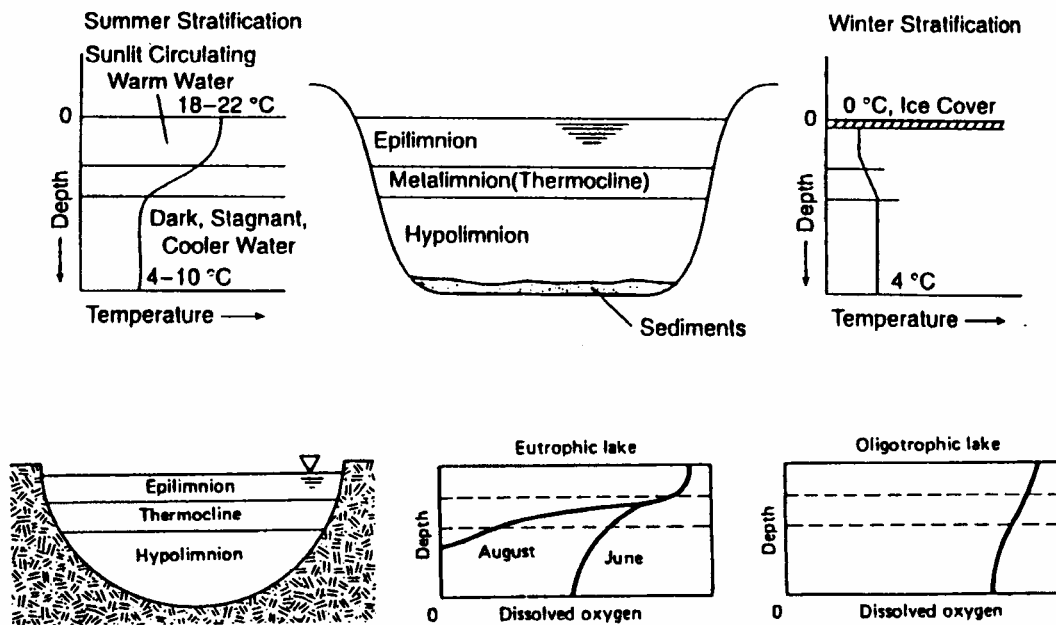
La cantidad de luz disponible en diferentes profundidades en lagos (on en ríos muy grandes) es importante para la ecología de estos cuerpos de agua. La luz visible es absorbida por el agua, por las sustancias disueltas, y por material particulado. Las longitudes de onda más largas y más cortas (azul y roja) son absorbidas preferencialmente, por lo que en el agua más profunda las longitudes de onda verde y amarilla son predominantes. Teóricamente, cada metro de profundidad que se desciende la luz se extingue en una proporción fija. De esta manera, a pesar que nunca desaparece por completo, alcanza valores indetectables visualmente, los que caen debajo de un 1% de intensidad (ver Figura 4). Por convención se define el límite de 1% de intensidad como aquel en el cual la fotosíntesis es capaz de satisfacer sólo la respiración de los microorganismos. Este punto se denomina **punto de compensación**. Bajo él, el crecimiento de algas no tiene lugar; sobre él se encuentra la denominada **zona eufótica**, en la cual las células de fitoplancton pueden crecer en forma exitosa. Algunas veces el fondo de los lagos está en la zona eufótica. En lagos muy claros esta zona puede tener 20 a 50 m, con una profundidad teórica máxima de 200 m.



5. TEMPERATURA Y ESTRATIFICACIÓN VERTICAL DE LAGOS

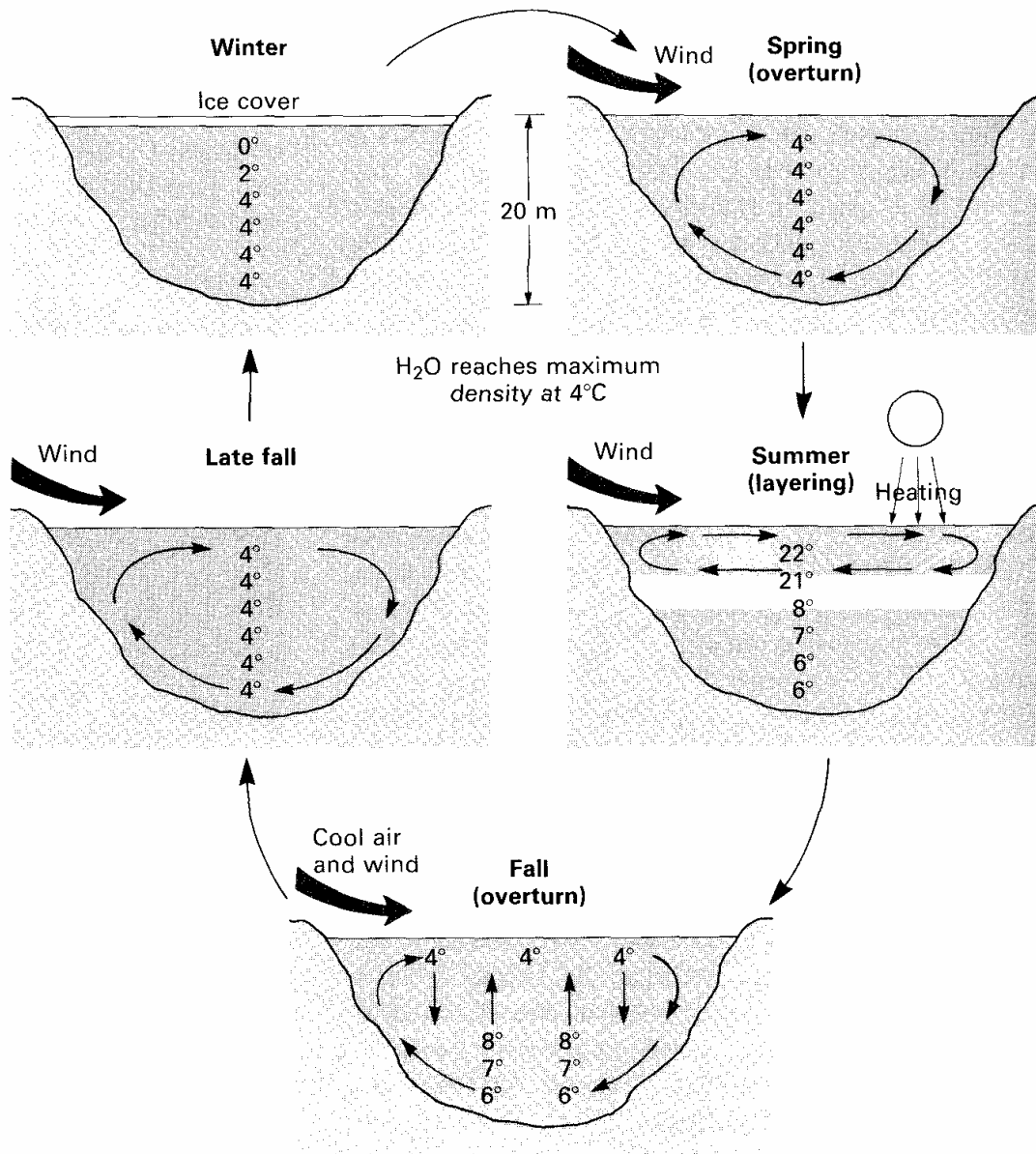
En flujos turbulentos como el de ríos, las aguas son continuamente mezcladas, por lo tanto no se desarrollan gradientes de temperatura durante los meses de verano. En ríos muy lentos y profundos, pero especialmente en lagos, las aguas superficiales tienden a calentarse más rápidamente que las aguas más profundas. Cuando el viento y las corrientes son insuficientes para mezclar las aguas de los lagos desde la parte alta hasta el fondo, lo que es muy común en sistemas muy profundos, un abrupto gradiente de temperatura se genera. El estrato más superficial, 1 o 2 metros, absorbe una gran cantidad de energía calórica. Este estrato más cálido se denomina **epilimnio**, y el estrato inferior, más denso y frío, es el **hipolimnio** (ver Figura 5). Entre ambos estratos existe una zona de transición llamada **metalimnio**. En esta zona transicional, la temperatura cambia rápidamente en un pequeño cambio de posición vertical. La ocurrencia de este rápido cambio vertical en temperatura con el desarrollo de estratificación se denomina **termoclina**.

Figura 5
Estratificación Termal en un Lago Profundo



La estratificación de un lago es afectada directamente por la estratificación térmica y la mezcla estacional. Lagos en las regiones templadas se estratifican durante el invierno y el verano y circulan cada otoño y primavera (ver Figura 5). Durante el invierno, hielo cercano a 0°C cubre la superficie de los lagos, mientras que agua más densa a 4°C (más precisamente 3.94°C, la temperatura en la cual la densidad del agua es máxima) se va hacia el fondo. La baja temperatura y la falta de radiación solar inhibe la productividad biológica. Durante el verano, a medida que el estrato superior se comienza a calentar, se forma un estrato de agua menos denso. Este epilimnio se desarrolla en forma continua durante el verano y permite el crecimiento de fitoplancton. La estratificación de un lago es afectada directamente por la estratificación térmica y la mezcla estacional. Lagos en las regiones templadas se estratifican durante el invierno y el verano y circulan cada otoño y primavera. La Figura 6 muestra un ejemplo de la circulación del agua.

Figura 6
Circulación del Agua en un Lago



La estratificación termal afecta la calidad del agua. El epilimnio permite abundante crecimiento de algas, mientras que el contenido de oxígeno disuelto disminuye en el hipolimnio de lagos eutróficos. Compuestos orgánicos de mal olor y fierro reducido son liberados desde sedimentos de fondo debido a las condiciones anaeróbicas.

6. EUTROFICACIÓN

La palabra **eutroficación** proviene de las palabras griegas; *eu* que significa *bueno* y *trofos* que significa *alimento*. De esta forma, el sentido literal de esta palabra es “rico en alimento”. Todos los lagos desarrollan un enriquecimiento natural con el tiempo. Sedimentos son arrastrados desde las cuencas aportantes y nutrientes solubles son lixiviados desde ellos. Esta **eutroficación natural** es un proceso lento desde un punto de vida humano, tomando un período del orden de miles de años. La descarga de aguas residuales e industriales no tratadas en un lago acelera este proceso en forma muy dramática. Este proceso acelerado se denomina **eutroficación cultural**. Lagos en los cuales el nivel de nutrientes es muy alto, los cuales se caracterizan por abundante vegetación en sus riberas y por la ocurrencia de **algal blooming** se denominan lagos **eutróficos**. Lagos con bajo nivel de nutrientes son llamados **oligotróficos**, mientras que lagos en un nivel intermedio de nutrientes se llaman **mesotróficos**.

La **eutroficación** es un proceso natural de enriquecimiento de nutrientes que ocurre en un cuerpo de agua. El crecimiento biológico que se produce en el epilimnio, principalmente algas, muere y se deposita hacia el hipolimnio donde es degradado, produciéndose el consumo del oxígeno disuelto en el agua. Eutroficación es uno de los más significativos y extendidos problemas de calidad de aguas a nivel mundial. Los más importantes problemas creados por la excesiva eutroficación se listan a continuación:

- El efecto negativo sobre la industria de pesca comercial y deportivo debido a los cambios en las especies de peces encontradas en lagos, lo que es causado por el bajo nivel de oxígeno encontrado en las aguas más profundas.
- El efecto en turismo y recreación debido al excesivo crecimiento de algas y otras plantas acuáticas. Las algas filamentosas son depositadas en las playas y riberas luego de tormentas produciendo pilas de material en descomposición.
- Los crecimientos explosivos de algas (algal blooming) que provocan problemas de olor y sabor en el agua y tapa los filtros de las plantas de tratamiento.

De esta manera, un lago biológicamente pobre es preferible a uno fértil desde el punto de vista de uso y recreación.

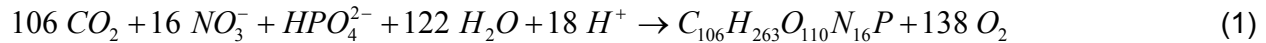
6.1 Factores que Controlan la Eutroficación

Hay muchos factores que controlan la tasa de producción de algas, incluyendo la disponibilidad de luz solar para producir las reacciones fotosintéticas y la concentración de nutrientes necesarios para el crecimiento.

La cantidad de luz se relaciona directamente con la transparencia del agua, la que es a su vez una función del nivel de eutroficación. Mientras que la cantidad de luz solar disponible puede ser un factor restrictivo en el crecimiento de algas, no es algo que podamos controlar con el propósito de evitar o reducir el proceso de eutroficación. Dado que la eutroficación cultural es producida por el aumento de nutrientes debido a una estimulación humana, parece de sentido común el perseguir la restricción de los nutrientes para reducir o eliminar este problema. La lista de nutrientes que controlan eutroficación incluye elementos tales como carbón, nitrógeno, fósforo, sulfuro, calcio, magnesio, potasio, sodio, fierro, manganeso, zinc, cobre, boro, y otros. Afortunadamente el proceso es más manejable si nos concentramos en un único nutriente, usualmente fósforo o nitrógeno.

En 1840 se formuló la idea que “el crecimiento de una planta depende de la cantidad de alimento que se le presenta”. De esta manera, existen algunos elementos esenciales que, al ser reducidos, limitarán el crecimiento potencial de algas en lagos. Así, se hace necesaria la identificación de aquellos elementos limitantes y posteriormente se debe reducir su concentración. En general, el único método práctico para reducir la eutroficación es reducir el fósforo en el agua, a pesar de que no sea un factor limitante inicialmente.

Para ilustrar las cantidades relativas de nitrógeno y fósforo que se requieren para el crecimiento de algas podemos considerar la siguiente representación de la fotosíntesis algal:



Usando un análisis estequiométrico muy simple podemos calcular la razón entre los pesos de nitrógeno y fósforo en esta alga:

$$\frac{N}{P} = \frac{16 \cdot 14}{1 \cdot 31} = 7.2 \quad (2)$$

De acuerdo a este ejercicio podemos ver que se requiere alrededor de 7 veces más nitrógeno que fósforo para producir una cantidad fija de algas. Sin embargo, debido a variaciones en la estequiometría de las plantas se utiliza una razón, N/P, de 20 para indicar que el fósforo es el factor limitante, y un valor igual a 5 para indicar aquellos sistemas en los cuales el nitrógeno es limitante. Algunos estudios sugieren que concentraciones de fósforo por sobre 0.015 mg/L y de nitrógeno sobre 0.3 mg/L son suficientes para causar el crecimiento acelerado de algas (blooming).

6.2 Clasificación de Cuerpos de Agua

El término eutroficación de cuerpos de agua se aplica a un fenómeno de evolución natural, que en términos simples puede resumirse de la siguiente forma:

- Un lago joven es oligotrófico: sus aguas son de alta transparencia, la profundidad es superior a 15 m, presenta alta concentración de oxígeno disuelto en el hipolimnion (zona profunda del lago) y la productividad biológica es baja.
- Al ir envejeciendo, el lago se enriquece en materia orgánica, a causa de su producción primaria fotosintética (algas) y eventualmente, de aportes externos de nutrientes; se hace entonces, sucesivamente, mesotrófico y después eutrófico pudiendo llegar a hipertrófico. Se observan en él los siguientes fenómenos: disminución de la profundidad por relleno progresivo; cambio de coloración de las aguas; reducción de la transparencia; ausencia de oxígeno en las capas profundas; productividad biológica alta y aparición de especies indicadoras de la eutroficación, principalmente algas planctónicas y cianofíceas.

El paso de una etapa a otra exige mucho tiempo, el que puede estimarse en millones de años. Sin embargo, este proceso natural, en algunos casos, puede ser acelerado hasta el punto que puede resultar perceptible en la escala de una vida humana, situación que es producto de la intensa actividad antrópica desarrollada en el entorno de los lagos, que aportan a éstos, materia orgánica y elementos nutrientes (N y P especialmente). El proceso de eutroficación artificial puede producir consecuencias graves para el turismo y la pesca y aumentar en forma significativa los costos, por ejemplo, de tratamiento del agua para uso potable.

La clasificación del nivel trófico de los sistemas lénticos no es tarea fácil por la complejidad de factores que interviene. Una clasificación inicial puede establecerse en base a los nutrientes fósforo (P) y nitrógeno (N), la transparencia y la productividad (Tabla 1). Esta clasificación ha sido elaborada a partir de antecedentes internacionales (Ryding y Rast, 1992) y experiencia de los autores.

Tabla 1
Clasificación Trófica de Sistemas Lénticos

CLASE TROFICA O INDICE DE EUTROFICACION	NUTRIENTES		Productividad Clorofila a (µg/L)	Transparencia Profundidad Secchi (m)
	Fósforo Total (µg/L)	Nitrógeno Total (µg/L)		
Oligotrófico	$P < 10$	$N < 700$	$CL < 2$	$H > 10$
Mesotrófico	$10 \leq P < 50$	$700 \leq N < 1000$	$2 \leq CL < 5$	$10 \geq H > 5$
Eutrófico	$50 \leq P < 100$	$1000 \leq N < 2000$	$5 \leq CL < 50$	$5 \geq H > 0.5$
Hipertrófico	$P \geq 100$	$N \geq 2000$	$CL \geq 50$	$H \leq 0.5$

6.3 Un Modelo de Fósforo

Supongamos que deseamos estimar la concentración de fósforo que sería posible encontrar en un lago completamente mezclado, bajo condiciones estacionarias, dadas ciertas combinaciones de fuentes y sumideros. De esta manera, podremos comparar estos valores con aquellos considerados aceptables para que no ocurran problemas derivados de la eutroficación de un lago.

Un modelo idealizado de un lago se muestra en la Figura 7. El fósforo puede entrar al lago en una variedad de formas, incluyendo los afluentes al mismo, escorrentía desde sectores aledaños y fuentes puntuales industriales o municipales.

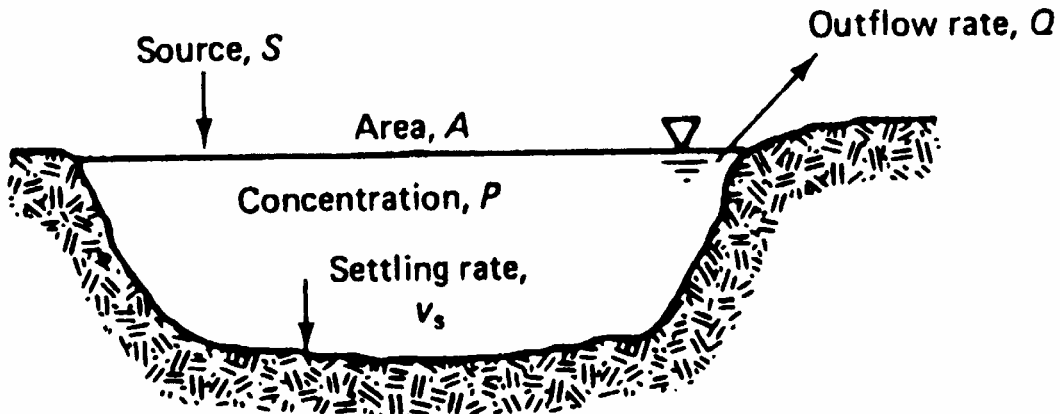
El fósforo es removido por sedimentación de sedimentos y por el flujo que deja el lago. De esta manera podemos escribir:

$$\text{tasa de incorporación de } P = \text{tasa de remoción de } P \quad (3)$$

lo que puede ser escrito como:

$$S = Q \cdot P + v_s \cdot A \cdot P \quad (4)$$

Figura 7
Modelo Idealizado de un Lago



donde: S es la tasa de incorporación de fósforo proveniente de todas las fuentes posibles, Q es el caudal de salida desde el lago, P es la concentración de fósforo en el lago, v_s es la tasa de sedimentación de fósforo, y A es el área superficial del lago. Al despejar la concentración de fósforo desde la ecuación (4) obtenemos:

$$P = \frac{S}{Q + v_s \cdot A} \quad (5)$$

La tasa de sedimentación del fósforo se determina en forma empírica. Su valor es muy incierto pero algunos autores sugieren un valor típico entre 3 a 30 m/año.

6.4 Control de la Eutroficación

Una serie de casos de lagos afectados por eutroficación cultural ha demostrado que ésta puede ser revertida si el flujo de nutrientes al lago es eliminado. Sin embargo, antes de tomar medidas específicas es necesario que se desarrollen campañas de terreno exhaustivas para demostrar el origen de los contenidos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) al lago: fuentes puntuales o difusas. Fuentes puntuales, tales como descargas municipales, son fácilmente controlables mediante métodos alternativos de descarga o mediante tratamientos terciarios que eliminen el nitrógeno y el fósforo contenido en los efluentes. Los nutrientes contenidos en fuentes difusas, como por ejemplo lixiviación agrícola, pueden ser controlados mediante mejoras en los métodos de riego y aplicación de fertilizantes.

Otros métodos alternativos de control son el uso de algicidas (sulfato de cobre) que sin embargo es útil sólo por breves períodos de tiempo. Otras alternativas son la aeración artificial de lagos y la cosecha de semillas y plantas acuáticas para evitar su proliferación.

EJEMPLO 1

Descarga de Fósforo en un Lago

Un lago con una superficie igual a $80 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ es alimentado por un río con un caudal promedio de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración de fósforo, también promedio, de 0.010 mg/L . Además, un efluente desde una planta de tratamiento agrega un caudal de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ con una concentración de 5.0 mg/L de fósforo. La tasa de sedimentación del fósforo se ha estimado igual a 10 m/año .

- a) Estimar la concentración promedio de fósforo en el lago.
- b) ¿Qué tasa de remoción de fósforo, a nivel de la planta de tratamiento, debiera ser necesaria para obtener una concentración aceptable en el lago?

EJEMPLO 2

Descarga de Residuos Industriales Líquidos a Lago

Una industria genera un residuo industrial líquido que contiene una elevada concentración de un nutriente que induce eutroficación en cuerpos de agua. En la actualidad esta industria descarga sus residuos líquidos a un lago, sin ningún tipo de tratamiento. Estudios realizados en el lago han permitido identificar señales de un problema incipiente de eutroficación por lo que es urgente tomar medidas preventivas para evitar que dicho problema escape de control.

Como parte de este problema se debe desarrollar un modelo conceptual (analítico) del efecto de este compuesto en el lago que actúa como cuerpo receptor de los residuos líquidos y estudiar el efecto de las variaciones estacionales de las variables hidrológicas sobre la calidad del lago.

El lago se puede conceptualizar como un cuerpo estratificado compuesto por dos zonas perfectamente identificables: una zona o estrato superior que recibe los flujos provenientes de cursos naturales y la descarga de la industria, y un estrato inferior en el cual se acumulan residuos debido a procesos combinados de sedimentación y resuspensión. La Figura E2.1 muestra un esquema con los principales procesos que se llevan a cabo en cada estrato del lago.

La Tabla E2.1 muestra un resumen con la información relevante para este problema correspondiente a dos épocas del año (invierno y verano).

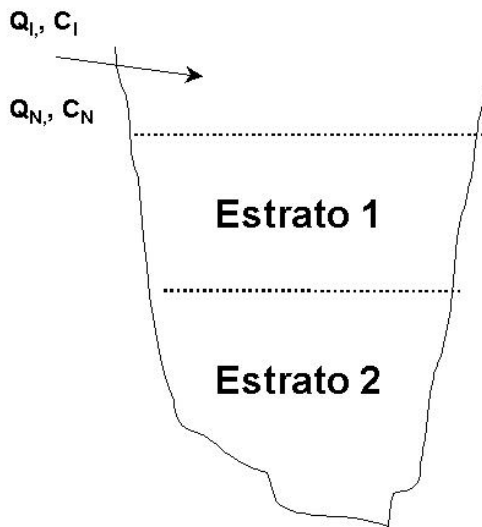
Sobre la base de lo anterior, y considerando que ambos estratos se pueden modelar como reactores de mezcla completa en régimen permanente:

- Desarrollar expresiones que permitan determinar las concentraciones de equilibrio, para el nutriente en estudio, en cada uno de los estratos que conforman el lago.
- Estudios han demostrado que una concentración del nutriente en el lago, igual o superior a $C_{\text{MAX}} = 15 \text{ } \mu\text{g/L}$, es indicativa de un problema incipiente de eutroficación. Bajo esas condiciones, ¿está el lago en esta situación?. ¿En qué época?
- Recomendaría un cambio (mejora) en el sistema de tratamiento de la industria. ¿Qué porcentaje de remoción sería necesario?. ¿En qué época?

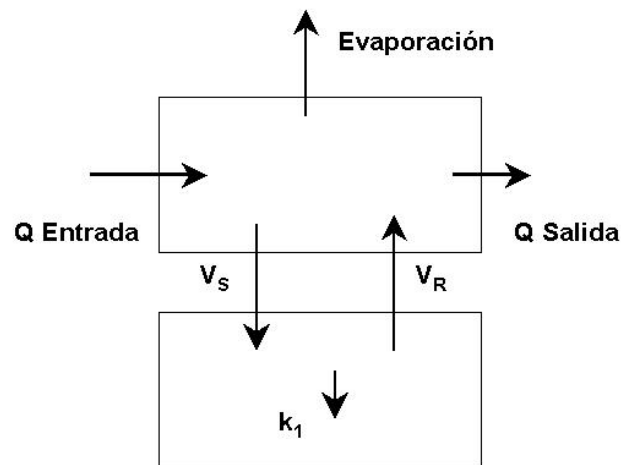
Tabla E2.1
Datos Básicos

Parámetro	Unidad	Invierno	Verano
Volumen Estrato 1, V_1	m^3	3.000.000	2.100.000
Volumen Estrato 2, V_2	m^3	2.000.000	1.000.000
Area Superficial Estrato 1, A_1	m^2	300.000	200.000
Area Superficial Estrato 2, A_2	m^2	300.000	200.000
Caudal Natural Afluente, Q_N	m^3/s	3.0	2.0
Concentración Natural Nutriente, C_N	$\mu g/L$	10.0	11.0
Caudal Industria, Q_I	m^3/s	0.1	0.1
Concentración Industria Nutriente, C_I	$\mu g/L$	50.0	50.0
Velocidad de Sedimentación, V_S	$m/año$	200.0	250.0
Velocidad de Resuspensión, V_R	$m/año$	20.0	0.0
Evaporación, E	$mm/día$	3.0	7.0
Decaimiento de Primer orden, k_1	$1/día$	0.05	0.06

Figura E2.1
Modelo Conceptual



Sistema Real



Modelo Conceptual