Unidad 11, 12, 13, 14

Calidad de agua en lagos y embalses

Amplificación biológica de pesticidas en cadena trófica de un estuario

Formación de lagos

Ecosistemas en lagos y embalses: Luz y Zonificación

Clasificación y tipos de lagos

Densidad del agua y estratificación térmica.

Perfiles de Temperatura del agua versus Profundidad.

Perfiles de Oxígeno Disuelto versus Profundidad.

Calidad de agua en lagos y embalses.

Tipos de Estratificación: Número de Froude para Lagos

Clasificación por Estabilidad: Número de Richardson

Ejemplo para establecer categoría de estratificación de un lago

Balance de Materia: Ejercicio sobre balance de fósforo en un lago

Principios de dilución en un cuerpo de agua

Ejercicios.

Amplificación biológica de pesticidas en cadena trófica de un estuario

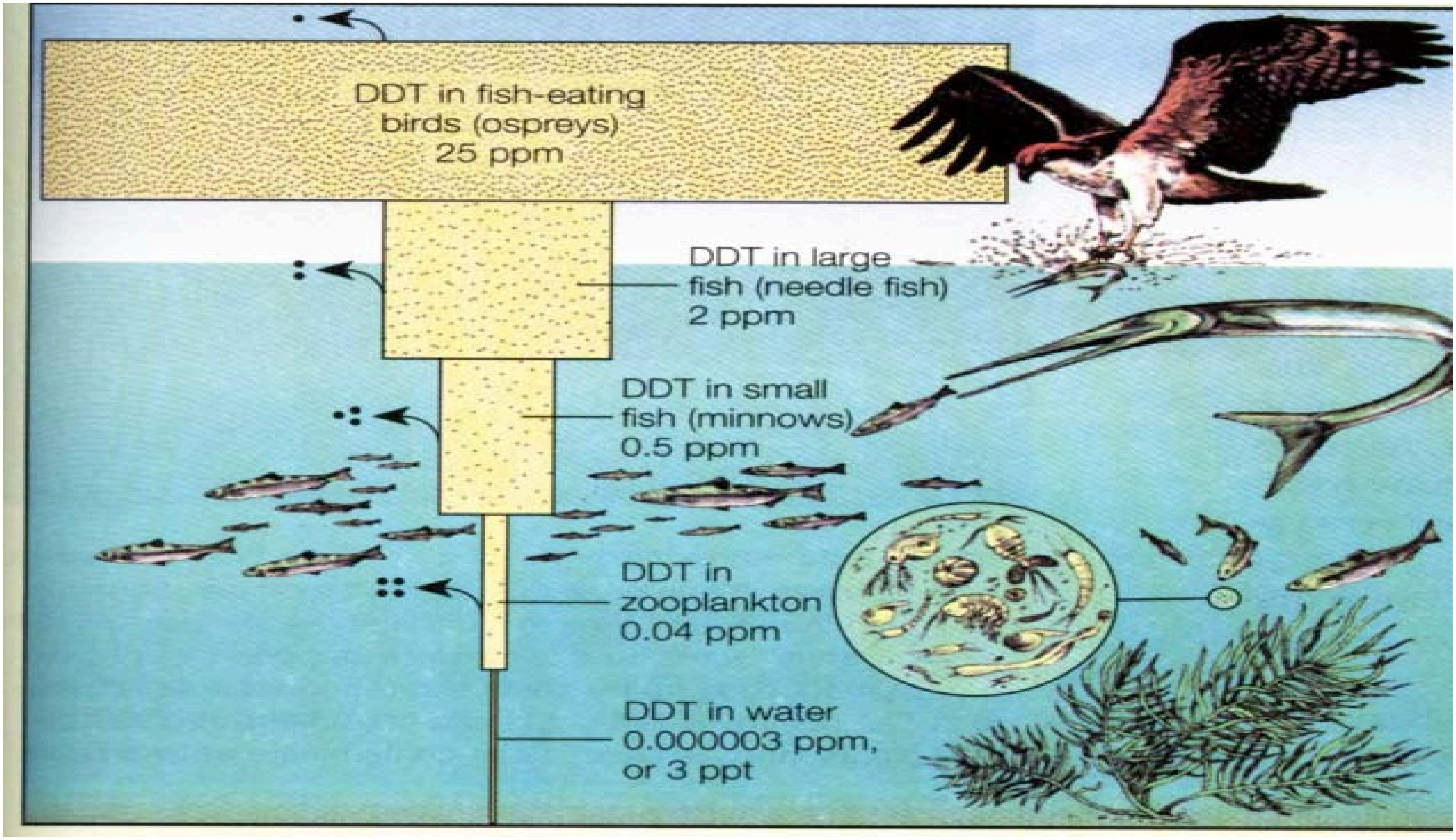
- **Bioacumulación:** Es el proceso mediante el cual una sustancia contaminante o tóxica es introducida en la cadena alimenticia.
- Dicha sustancia es retenida dentro del cuerpo del organismo que la consume y es concentrada en el siguiente nivel de la cadena biológica alimenticia que por lo general termina en el ser humano.
- **Bioacumulación** (acumulación en el organismo) y **biomagnificación** (pasar de nivel en la cadena trófica alimenticia).

En la figura siguiente se presenta un ejemplo de bioacumulación / biomagnificación por pesticidas (DDT) en la cadena trófica en un estuario.

Obsérvese cómo la concentración inicial del DDT en el agua y sedimento, del orden de 0,0000003 ppm, puede llegar a valores de cerca de 25 ppm, a nivel de los depredadores mayores que se alimentan de peces, en la cúspide esta cadena trófica.

Bioacumulación de Pesticidas en cadena Trófica de un Estuario

Referencia: T. Miller, 1995



Formación de los Lagos (1)

Fuente: USGS/ EPA, 2005

- Un lago es en realidad un componente más del agua superficial del planeta; es un lugar donde el agua superficial que procede de los escurrimientos de la lluvia, y de filtraciones del agua subterránea, se ha acumulado debido a una inclinación del terreno.
- Un depósito de agua es muy similar a un lago, aunque en realidad, es un lago hecho por el ser humano que se forma cuando se construye una represa en un río.
- El agua del río al acumularse detrás de la represa, forma un depósito o embalse.
- Obsérvese la represa de Chongón, ubicada en el Km. 25 de la vía a la Costa, con 280 Hm3 de capacidad de almacenamiento.

Emerald Bay, Lake Tahoe, CA. Photo by Dale Borland

Formación de los Lagos (2)

- Existe variedad de lagos de agua fresca, desde estanques de pesca hasta el lago llamado "Lake Superior" (el lago más grande del mundo), con una superficie de 83.000 Km2.
- La mayoría de los lagos contienen agua fresca, pero algunos pueden ser salobres, como aquellos que no tienen filtraciones hacia ríos.
- Aún más, algunos lagos como el Gran Lago Salado (Great Salt Lake) son más salobres que los océanos (EPA, 2005).
- La mayoría de los lagos tienen una gran cantidad de vida acuática, pero no el Mar Muerto, ya que es demasiado salobre para tener vida acuática.
- Los lagos que fueron formados por la fuerza erosiva de los antiguos glaciares, como los Grandes Lagos, pueden tener miles de pies de profundidad.
- Sin embargo, algunos lagos grandes pueden tener sólo unos metros de profundidad, como el lago Pontchartrain en la ciudad de New Orleáns del Estado de Louisiana que tiene una profundidad de alrededor de 5 m.

Ecosistemas en lagos y embalses

Luz y Zonificación

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

- La luz es un factor importante en el agua de lagos y ríos lentos.
- La incidencia de la radiación en estas aguas es pobre y por tanto puede ser un factor que limita la fotosíntesis.
- Las plantas acuáticas están restringidas a profundidades pequeñas y son dependientes de la claridad de esta agua.
- Por esa razón existe una zonificación clara de las plantas en los lagos.

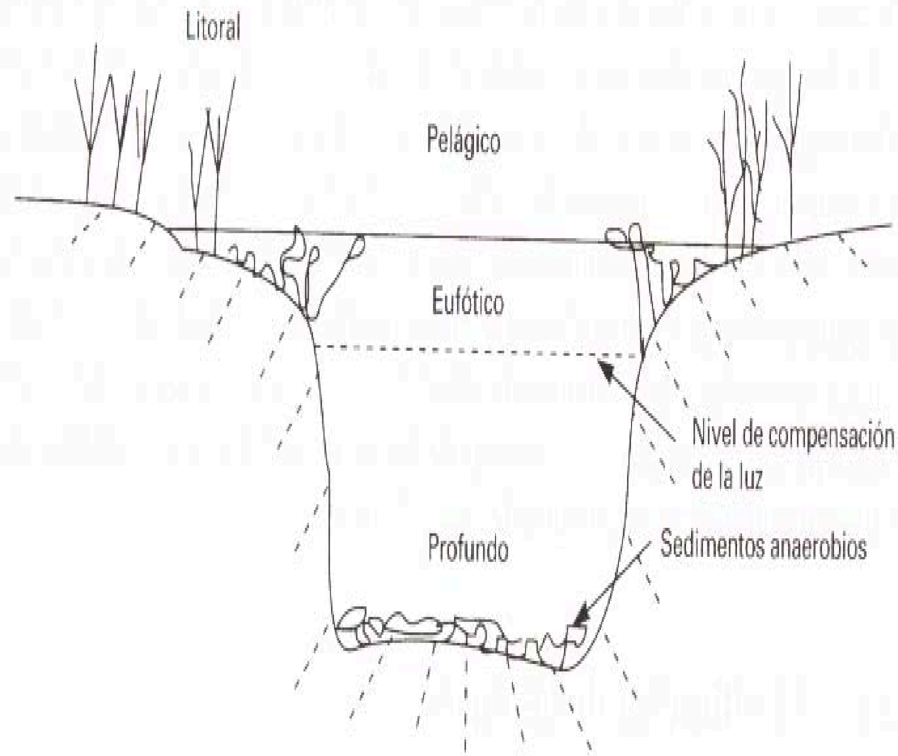


Figura 5.3. Zonificación de un lago mostrando las subdivisiones más importantes del ecosistema del lago.

Clasificación de lagos

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

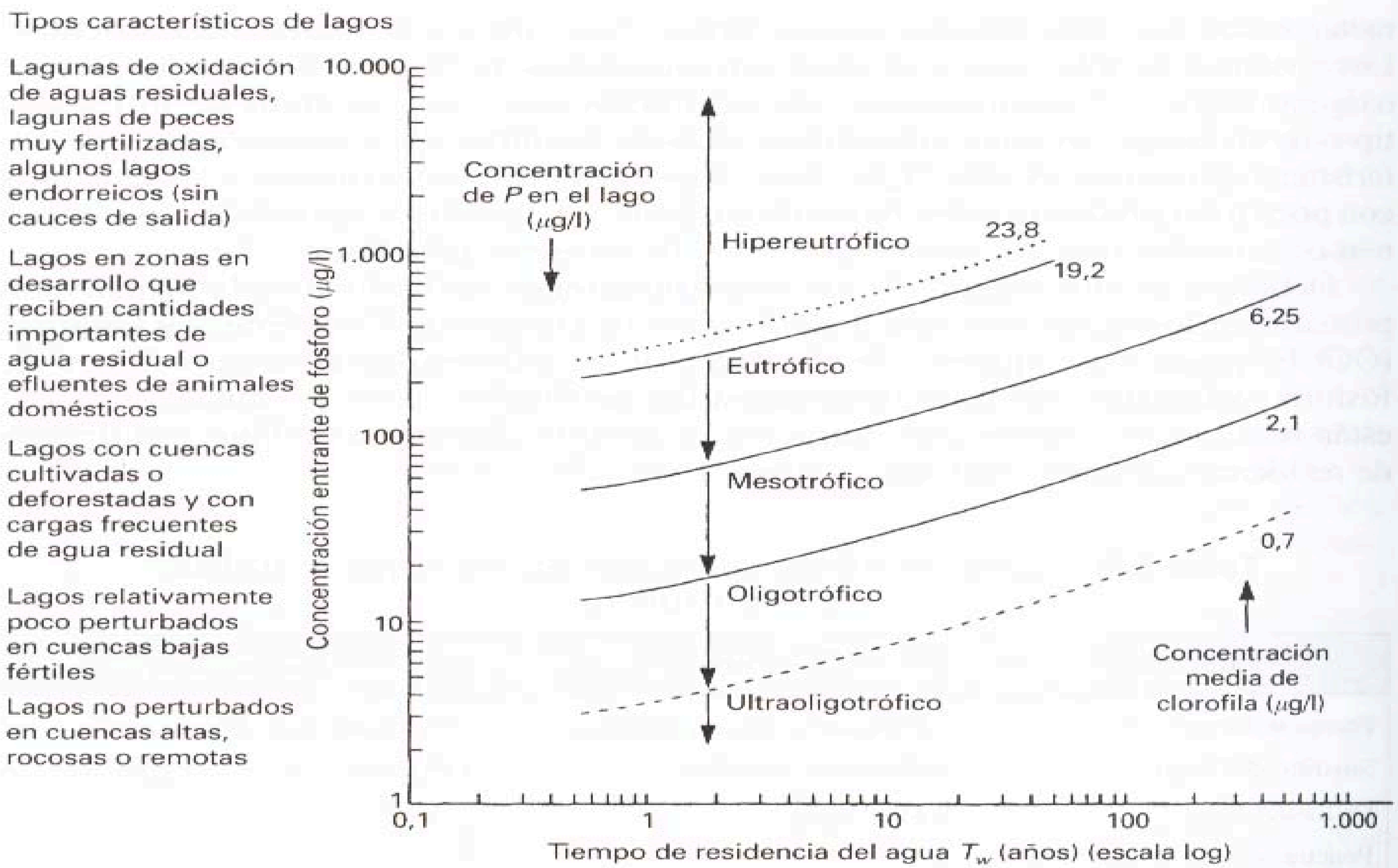
Tabla 5.2. Características generales de los lagos eutróficos y oligotróficos

Carácter	Eutrófico	Oligotrófico
Forma del lago	Extenso y poco profundo	Estrecho y profundo
Sustrato del lago	Sal fina orgánica	Piedras y sales inorgánicas
Orilla del lago	Herbácea	Pedregosa
Penetración de la luz hasta valor 1 % de la superficie (m)	–20	20-120
Color del agua	Amarillo y verde	Verde o azul
Producción primaria neta (g/m^2/año)	150-500	15-50
Concentración de clorofila (g/l)	–15+	0,3-2,5
Rango de alcalinidad (anual) (meq/l)	1+	hasta 0,59
P total (ppb)	10-30	< 1-5
N total (ppb)	300-650	< 1-200
Oxígeno	Alto en la superficie, escaso debajo del hielo o termoclina	Elevado
Macrofitas	Muchas especies abundan en las zonas poco profundas	Pocas especies, algunas en las aguas profundas
Fitoplancton	Pocas especies, número elevado	Muchas especies, número bajo
Zooplancton	Pocas especies, número elevado	Muchas especies, número bajo
Macroinvertebrados	Muchas especies, número elevado	Número de especies moderado, número bajo
Peces	Muchas especies	Pocas especies

Adaptado de Maitland 1990, y otras fuentes.

Tipos característicos de lagos

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.



Densidad del agua y Estratificación Térmica

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

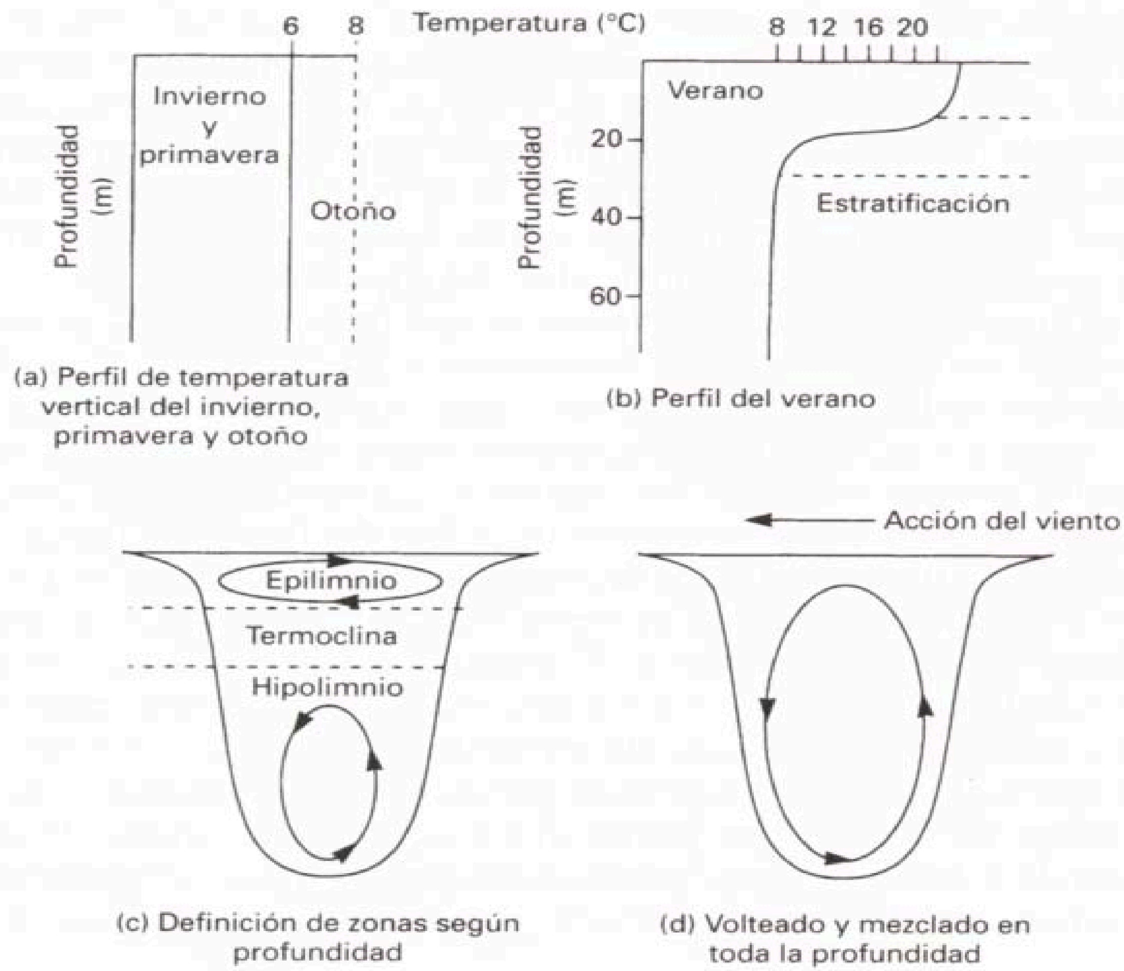


Figura 5.5. Diagrama que representa la estratificación térmica en un lago

Perfiles Temperatura vs. Profundidad

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

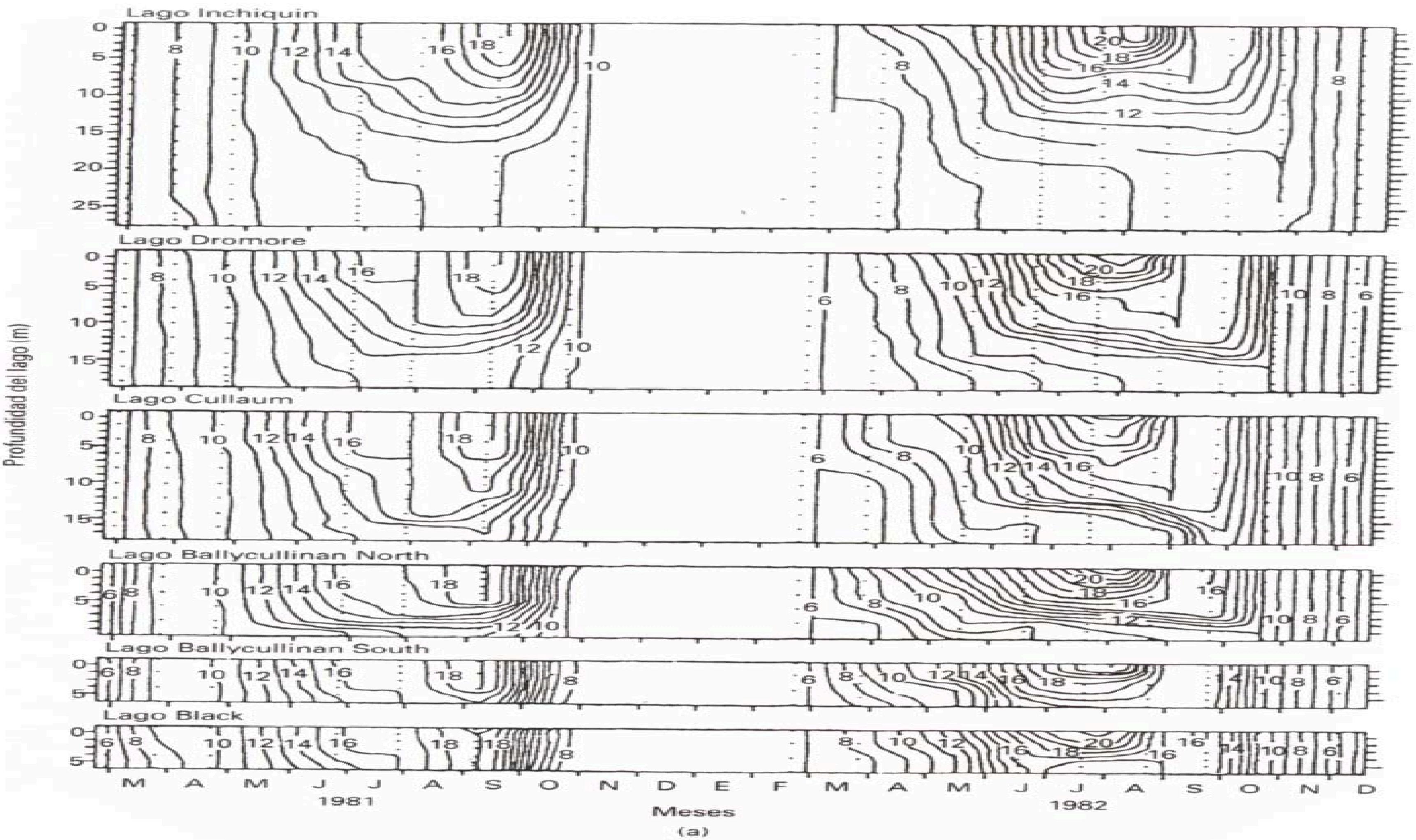


Figura 5.6. Perfiles de temperatura-profundidad (a) y oxígeno-profundidad (b) en seis lagos irlandeses. Nótese que la estratificación térmica es inestable en los lagos menos profundos y que partes del hipolimnion pueden llegar a estar anóxicas durante el verano (según Allott, 1986).

Perfiles Oxígeno Disuelto vs. Profundidad

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

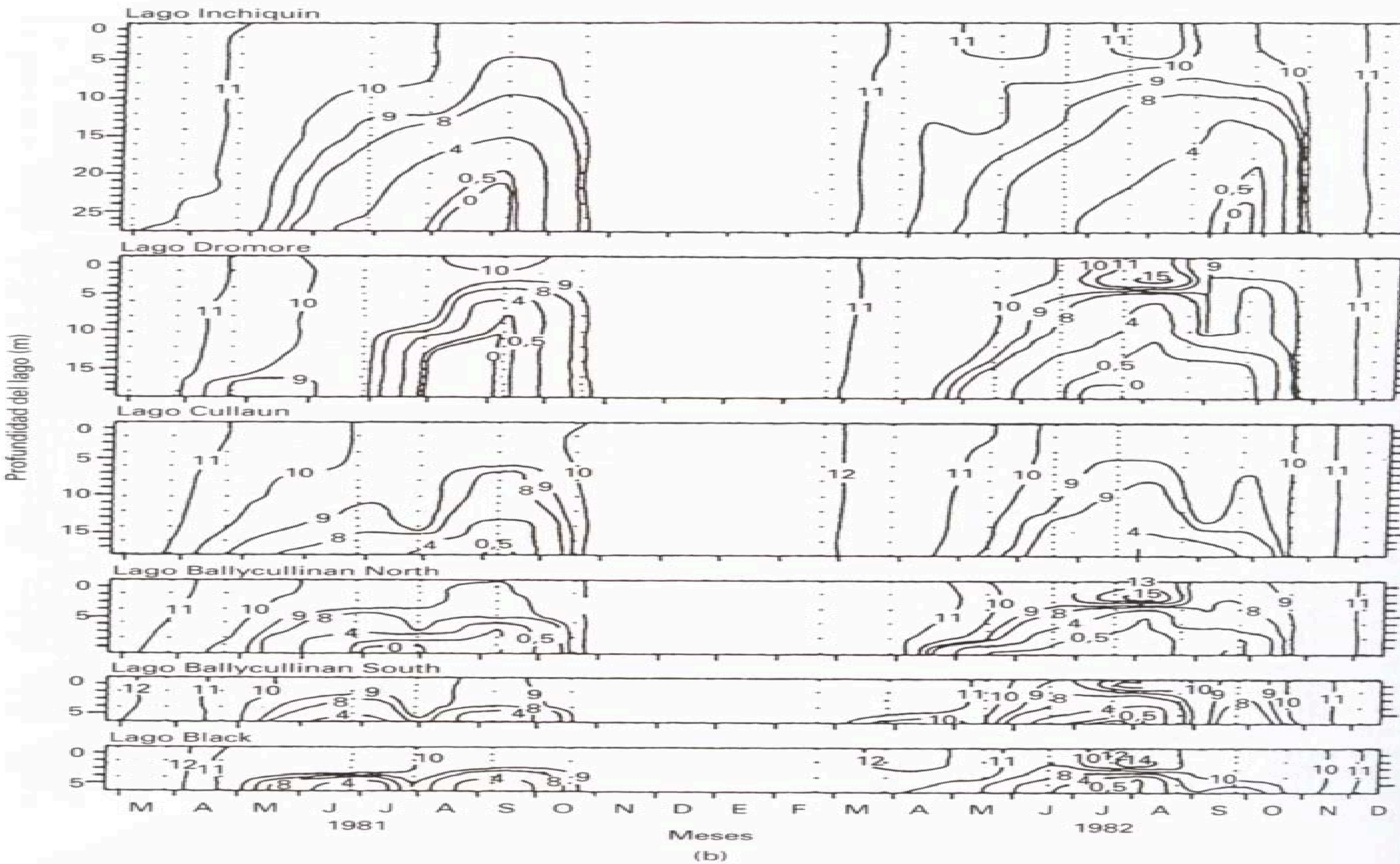


Figura 5.6 ***(continuación).*** Perfiles de temperatura-profundidad (a) y oxígeno-profundidad (b) en seis lagos irlandeses. Nótese que la estratificación térmica es inestable en los lagos menos profundos y que partes del hipolimnion pueden llegar a estar anóxicas durante el verano (según Allott, 1986).

Calidad de agua en lagos y embalses

Usualmente los problemas de calidad de agua en lagos y embalses son debidos a procesos de eutroficación que son causados por:

- Descargas de aguas residuales urbanas
- Descargas de aguas residuales industriales
- Escorrentía urbana
- Escorrentía agrícola con fertilizantes naturales o artificiales que producen altas cargas de nutrientes
- Biocidas procedentes de la acuicultura

Los parámetros físicos claves que afectan la calidad de agua en lagos son:

- Movimiento de los vientos
- Cambios de temperatura
- Aportes / descargas

Tendencias en nivel de agua, temperatura y radiación solar

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

440 INGENIERÍA AMBIENTAL

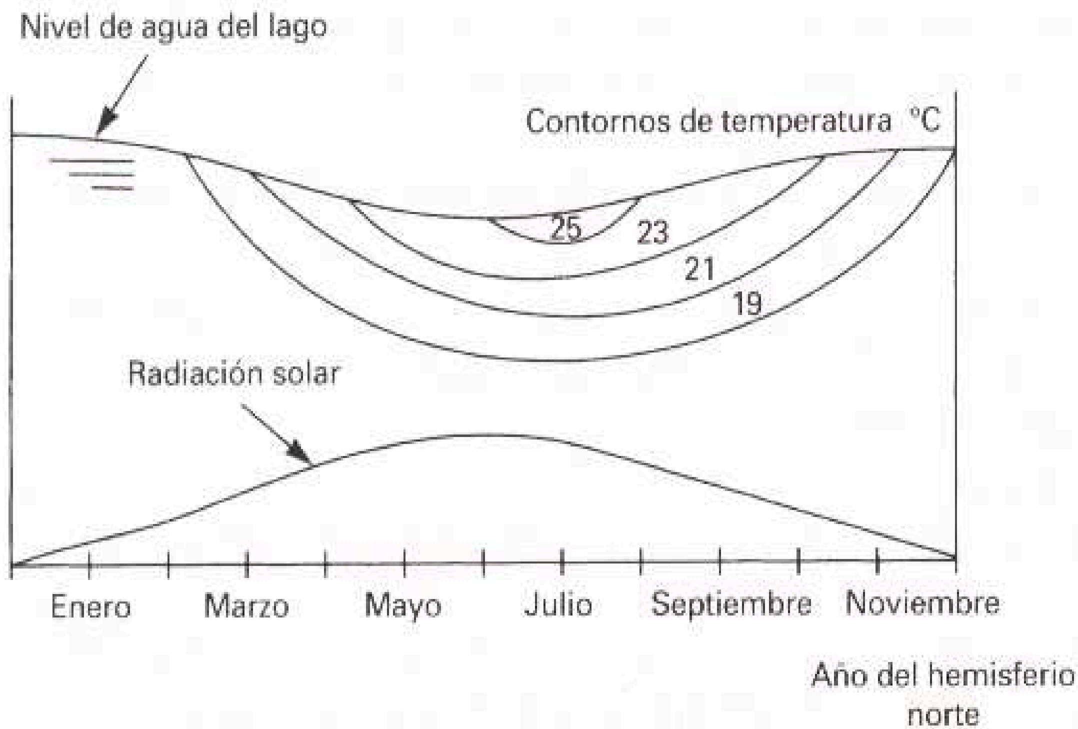


Figura 7.7. Esquema de las tendencias en nivel de agua, temperatura y radiación solar a lo largo del año en un lago moderadamente en reposo.

Tipos de Estratificación

Número de Froude para Lagos

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

Con respecto a esta estratificación se define el número densimétrico de Froude para los lagos:

$$\text{Número de Froude} = \frac{V}{\sqrt{Dg}} = \frac{\text{fuerza de inercia}}{\text{fuerza gravitatoria}} \qquad (7.56)$$

$$F \text{ densimétrica} = F_D = \frac{V}{\sqrt{\dfrac{\Delta\rho}{\rho_0} D_g}} \qquad (7.57)$$

donde ρ_0 = densidad de referencia

$\Delta\rho$ = la variación en densidad sobre una profundidad D (si $\Delta\rho > 0{,}01$ g/m^3 $\Rightarrow$ estratificación fuerte)

$$\text{Si } F_D > 0{,}32 \Rightarrow \text{estratificación nula}$$

$$0{,}01 < F_D < 0{,}32 \Rightarrow \text{estratificación moderada}$$

$$F_D < 0{,}01 \Rightarrow \text{estratificación severa}$$

Clasificación por Estabilidad

Número de Richardson

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

Los lagos también se clasifican respecto a la estabilidad por su número de Richardson:

$$N_R = \frac{EP}{EC} = \frac{-\frac{1}{2}g(\Delta\rho/\Delta Z)\Delta Z}{\frac{1}{2}\rho(\Delta u^2/\Delta Z)} = \frac{-g(\Delta\rho/\Delta Z)}{\rho(\Delta u^2/\Delta Z^2)} \qquad (7.58)$$

donde EP = energía potencial

EC = energía cinética

Si $\dfrac{\Delta\rho}{\Delta Z} = 0 \Rightarrow$ neutralmente estable (o metaestable)

Si $\dfrac{\Delta\rho}{\Delta Z} < 0 \Rightarrow$ estable

Si $\dfrac{\Delta\rho}{\Delta Z > 0} \Rightarrow$ no estable

donde ΔZ es la variación de la altura y u es una velocidad media

Perfiles de Temperatura en un lago estratificado

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

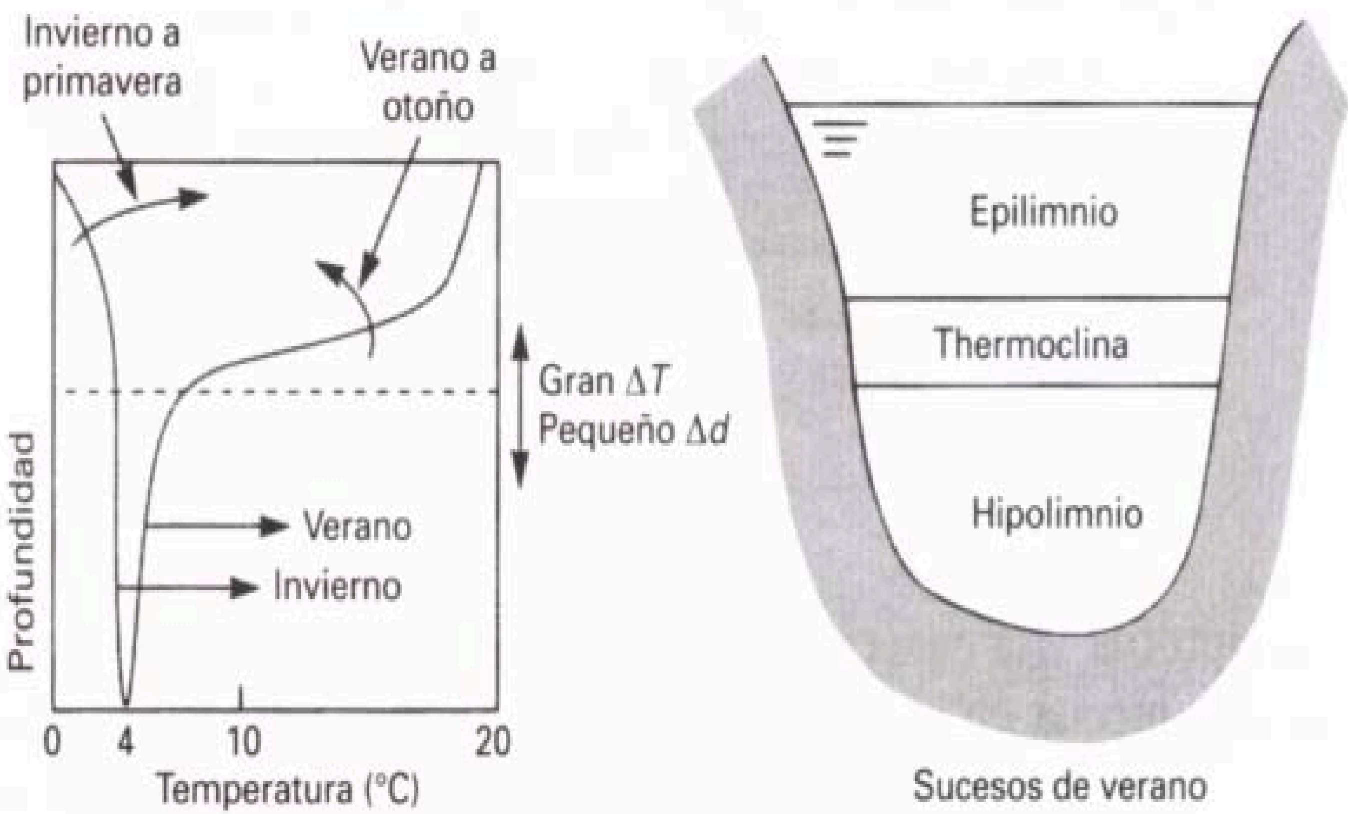


Figura 7.8. Perfiles de temperatura en un lago estratificado.

Ejemplo para establecer categoría de estratificación de un lago

- Determinar la categoría de estratificación de un lago si sus dimensiones de altura, ancho y profundidad son 10 Km., 2 Km. y 25 m respectivamente.
- El lago se vacía en verano a razón de un caudal = 10 m^3/s.
- La temperatura de la superficie en verano es de 25 ^oC.

- *Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999. Capítulo7, Ejemplo 7.10*

Desarrollo del problema *Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.*

Solución:

$$V = \frac{Q}{BD} = \frac{10}{2.000 \times 25} = 2 \times 10^{-4}\ \text{m/s}$$

$$\rho_{\text{superficial}} = 997\ \text{kg/m}^3$$

$$\rho_0 = 1.000\ \text{kg/m}^3$$

Por tanto

$$F_D = \frac{V}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)Dg}} = \frac{2 \times 10^{-4}}{\sqrt{[1.000 - 997)/1.000]25 \times 9{,}81}} = 2{,}3 \times 10^{-4} \ll 0{,}01$$

El lago por tanto se encuentra fuertemente estratificado (es decir $F_D < 0{,}01$).

Dependiendo del valor de varios parámetros la calidad del agua de los lagos tiene un estado trófico tal y como está indicado en la Tabla 7.4. La concentración total de fósforo está relacionada con la clorofila, uno de los pigmentos de color verde que intervienen en la fotosíntesis, por la siguiente expresión:

$$\log\ (\text{clorofila}) = -1{,}09 + 1{,}46P$$

Tabla 7.4. Calidad trófica de los lagos

Parámetro	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
P total, μg/l	<10	10-20	>20
Clorofila, μg/l	<4	4-10	>10
Profundidad seechi, m	>4	2-4	<2
Oxígeno en el hipolimnion, % O_2	>80	10-80	<10

Coeficiente de Difusión

Tabla 7.5. Coeficiente de difusión de los lagos

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión (cm^2/s)
Difusión de remolino	$10^{-2} - 10^{6}$
Difusión molecular	$10^{-5} - 10^{-4}$
Difusión térmica	$10^{-8} - 10^{-6}$

en donde la clorofila y la concentración total de fósforo poseen las unidades de mg/l. Se puede apreciar en la Tabla 7.4 que no existe una excesiva variación en los diferentes parámetros entre los lagos oligotróficos y los eutróficos. La clorofila y el fósforo total son parámetros de un interés significativo y así se incluyen en modelos matemáticos en el estudio de la dinámica de los lagos.

La difusión en los lagos varía significativamente y en la Tabla 7.5 se puede identificar el orden de magnitud de este fenómeno.

Balance de Materia

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

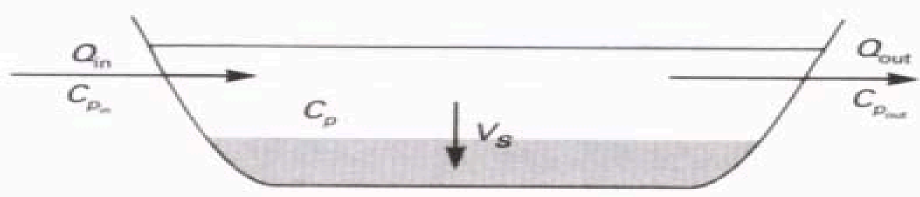
7.8.1. Balance sencillo de fósforo en un lago

Debido a que el fósforo es el nutriente más usual que limita el proceso de eutrofización en un lago, se han hecho muchos trabajos de investigación para cuantificar el mismo (Vollenwerder, 1975; Fischer *et al.*, 1979; Imberger, 1982; y Havis y Ostendorf, 1989). A continuación se define la ecuación para un balance de materia simple de fósforo ilustrándose también en la Figura 7.9:

entrada de material − salida de material − masa de P que sedimenta en el lago + + generación de masa = velocidad de acumulación

$$Q_{en}C_{p_{en}} - Q_{out}C_p - V_s A_s C_p + 0 = \frac{dM}{dt} \tag{7.59}$$

En este caso, se supone que no hay generación de fósforo en el interior del lago. Se suponen también condiciones de estado estacionario $\frac{dM}{dt} = 0$. También se supone que la concentración de fósforo de salida del lago es la misma que la del



Supuesto de lago bien mezclado
C_p = concentración de fósforo en el lago
V_s = velocidad de sedimentación
$C_p = C_{p_{out}}$

Figura 7.9. Balance de materia del fósforo en un lago.

Ecuación de Balance de Materia

Referencia: Ingeniería Ambiental, Gerard Kiely, Mc Graw Hill, 1999.

CALIDAD DEL AGUA EN RÍOS Y LAGOS: PROCESOS FÍSICOS **443**

propio lago y que el caudal de entrada es igual al caudal de salida. La Ecuación 7.59 se puede volver a escribir como:

$$QC_{p_{en}} = QC_p + V_sA_sC_p = C_p(Q + V_sA_s)$$

$$\text{Concentración de P en el lago } C_p = \frac{QC_{p_{en}}}{Q + V_sA_s} \tag{7.60}$$

Ejemplo 7.11. Un lago de 20 km^2 de superficie tiene un caudal de entrada de aportaciones de 10 m^3/s con $C_{p_{en}} = 0{,}01$ mg/l. Una depuradora de aguas residuales urbanas vierte el agua depurada con un caudal de 0,05 m^3/s y una $C_{p_{en}} = 10$ mg/l. Determinar la concentración de fósforo en estado estacionario dentro del lago. Se supone una velocidad de sedimentación de $V_s \sim 20$ m/año ($0{,}6 \times 10^{-6}$ m/s). Determinar la concentración permisible en el vertido de aguas residuales si la C_p máxima en el lago es 0,01 mg/l.

Solución:

$$\text{Ecuación (7.60)}\ C_p = \frac{QC_{p_{en}}}{Q + V_s A_s}$$

$$Q = 10 + 0{,}05 = 10{,}05\ \text{m}^3/\text{s}$$

$$QCC_{p_{en}} = 10 \times 0{,}01 + 0{,}05 \times 10 = 0{,}6\ \text{g/s}$$

$$V_s A_s = 0{,}6 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^6 = 12\ \text{m}^3/\text{s}$$

Por tanto

$$C_p = \frac{0{,}6}{10{,}05 + 12} = 0{,}027\ \text{g/m}^3 = 0{,}027\ \text{mg/l} > 0{,}01\ \text{mg/l}$$

Es necesaria una reducción en la concentración de P en el afluente de agua residual:

$$QC_{p_{en}} = C_p(Q + V_s A_s) = 0{,}01(10{,}05 + 12) = 0{,}2205\ \text{g/s}$$

$$0{,}2205 = 10 \times 0{,}01 + 0{,}05 \times C_{p_{en}}$$

Por tanto

$$C_{p_{en}} = 2{,}41\ \text{mg/l}$$

C La concentración de P aceptable en el vertido de agua residual debe ser menor de 2,41 mg/l.

Principios de dilución en un cuerpo de agua

Dilución Inicial

- Cuando los desperdicios con un constituyente en concentración C_W son descargados en un curso de caudal Q_W dentro de un riachuelo que contiene los mismos constituyentes en concentración C_R cuyo caudal Q_R. la concentración de la mezcla resultante está dada por el balance de los siguientes componentes

$$C_W Q_W + C_R Q_R = C(Q_W + Q_R)$$

$$C = \frac{C_W Q_W + C_R Q_R}{Q_W + Q_R}$$

Concentración del Oxígeno disuelto en la mezcla

Si las aguas residuales con un contenido de Oxígeno Disuelto (OD) de 0.8mg/L es descargado con un flujo de 5 Mgal /día en un cuerpo de agua saturado con oxígeno (temperatura 12.77 ^{0}C), cuya tasa de flujo es de 26 Mgal /día.

a) Determine el contenido del oxígeno disuelto de la mezcla resultante.

b) Si el caudal del riachuelo fuera de solamente 6.5 Mgal /día y su temperatura 26.6 ^{0} C, ¿Cuál sería el contenido del oxígeno disuelto de la mezcla resultante?

Recuerde factores de conversión:

Si tiene Mgal /d: multiplicar por 0.0438 para obtener m3/s

Para unidades de temperatura: F = ^{0}C x (9/5) + 32

C = (^{o} F -32) x (5/9)

Tabla de solubilidad del oxígeno

Temperatura ^0C	^0F	Oxígeno disuelto mg/L	Temperatura ^0C	^0F	Oxígeno disuelto mg/L
0	32.0	14.6	16	60.8	9.9
2	35.6	13.8	18	64.4	9.5
4	39.2	13.1	20	68.0	9.1
6	42.8	12.4	22	71.6	8.7
8	46.4	11.8	24	75.2	8.4
10	50.0	11.3	26	78.8	8.1
12	53.6	10.8	28	82.4	7.8
14	57.2	10.3	30	86.0	7.5

Solución

$$C = \frac{C_W Q_W + C_R Q_R}{Q_W + Q_R}$$

$$C_R = 10.6 mg/L (tabla 19.8)$$

$$C = \frac{0.8 mg/L(5.0 Mgal/day) + 10.6 mg/L(26.0 Mgal/day)}{(5.0 + 26.0) Mgal/day}$$

$$= 9.02 mg/L$$

- El contenido de oxígeno disuelto de la mezcla a 80^0F cuando el caudal del río es igual a 6.5 Mgal/día:

$$C = \frac{0.8(5.0) + 8.0(6.5)}{5.0 + 6.5} = 4.87 mg/L$$