ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MARITIMA Y CIENCIAS DEL MAR

LIMNOLOGIA

Capítulo 3

Preparado por:
José Chang Gómez, Ing. M. Sc.
E mail: jvchang @ espol.edu.ec

I Término 2009
Guayaquil - Ecuador

Capitulo 3: Factores Físicos que influyen en el medio acuático (1)

La molécula del agua tiene una estructura polar, con carga positiva en un lado y negativa en el otro. Como resultado de esta estructura tiene un número de propiedades únicas, entre ellas:

- Es líquida a temperatura normal
- Es transparente a la luz visible (importante para las plantas)
- Es un excelente solvente
- Tiene un calor específico muy alto (se requiere gran cantidad de calor para cambiar la temperatura del agua)
- Tiene un calor de evaporación muy alto. Se necesita gran cantidad de calor(539 Cal/g a 100 °C) para cambiar el agua de estado líquido a gaseoso)
- Tiene un calor de fusión muy alto (se requiere de una gran cantidad de calor para cambiar del estado sólido al líquido)

Propiedades del Agua

- Estado físico: sólido, líquido, gaseoso
- Olor: inodoro
- Color: incoloro
- Sabor: insípido
- Densidad en fase de gas: 0,598 g/l
- Densidad en fase líquida: 1.000 g/l
- Densidad en fase sólida: 0,917 g/l
- Punto de Ebullición: 100º C (a 1 atm)
- Punto de fusión: 0º C (a 1 atm)
- Peso molecular: 18.016 uma
- Fórmula: H_2O

Factores Físicos que influyen en el medio acuático (2)

La temperatura del agua: La energía solar que llega a la superficie de los lagos origina el calentamiento de las masas de agua, de tal manera que a mayor o menor radiación solar, la temperatura de las aguas sube o baja.

Si el agua está quieta, las capas superiores se calientan más que las capas de agua profunda. Ello causa una diferencia de temperatura a medida que aumenta la profundidad de la columna de agua y eventualmente se produce una estratificación vertical de las diferentes masas de agua.

Es tal vez el factor que más influencia tiene en los lagos, pues determina la densidad, viscosidad y movimiento del agua.

La temperatura juega un papel importante en la distribución, periodicidad y reproducción de los organismos.

Factores Físicos que influyen en el medio acuático (3): Propiedades Térmicas

Esto se debe a que el agua presenta ciertas propiedades térmicas que son:

1. **Calor específico**. La capacidad calórica del agua a 15º C representa la unidad y, por tanto, el calor específico de otras sustancias se expresa como referencia al del agua. Una masa de agua requiere gran cantidad de calor para elevar su temperatura, pero tarda más para enfriarse; actúa como regulador térmico
2. **Calor latente de fusión**. Para convertir 1 gramo de hielo en agua se requieren 80 calorías a 0º C.
3. **Conductividad térmica.** La conductividad térmica del agua es muy baja, por tanto su calentamiento por conducción es muy lento.
4. **El calor latente de evaporación**. Es el más alto. Gran parte de la radiación solar se utiliza en la evaporación del agua, produciendo efectos beneficiosos sobre los climas y éstos a su vez sobre las comunidades.
5. **Densidad del agua**. El agua al solidificarse aumenta de volumen, por tanto el hielo flota sobre las aguas.

   Esta propiedad evita que los lagos se solidifiquen totalmente, cuando las aguas se congelan en la superficie.

Factores Físicos: Luz (iluminación)

Tiene gran importancia por el proceso fotosintético. Sin luz no hay plantas. En el agua, la luz se va extinguiendo a medida que aumenta la profundidad, las sustancias en disolución y el material que está en suspensión. Los lagos con pocos sedimentos tienen aguas transparentes que dejan penetrar profundamente la luz.

Iluminación: La radiación solar penetra en las aguas, hasta determinadas profundidades, dependiendo de los materiales que se encuentran en suspensión y del ángulo de incidencia del rayo luminosos.

La luz es indispensable para la fotosíntesis que realizan las plantas acuáticas, especialmente el fitoplancton.

Parte de la luz que penetra en el agua es absorbida selectivamente, es decir, determinadas longitudes de onda penetran más profundamente que otras. Una parte es desviada o sufre fenómenos de reflexión.

Por tanto, las condiciones ópticas de las aguas son de importancia primordial para la productividad biológica y el mantenimiento de la vida.

Penetración de la luz en distintos tipos de lagos y en agua destilada

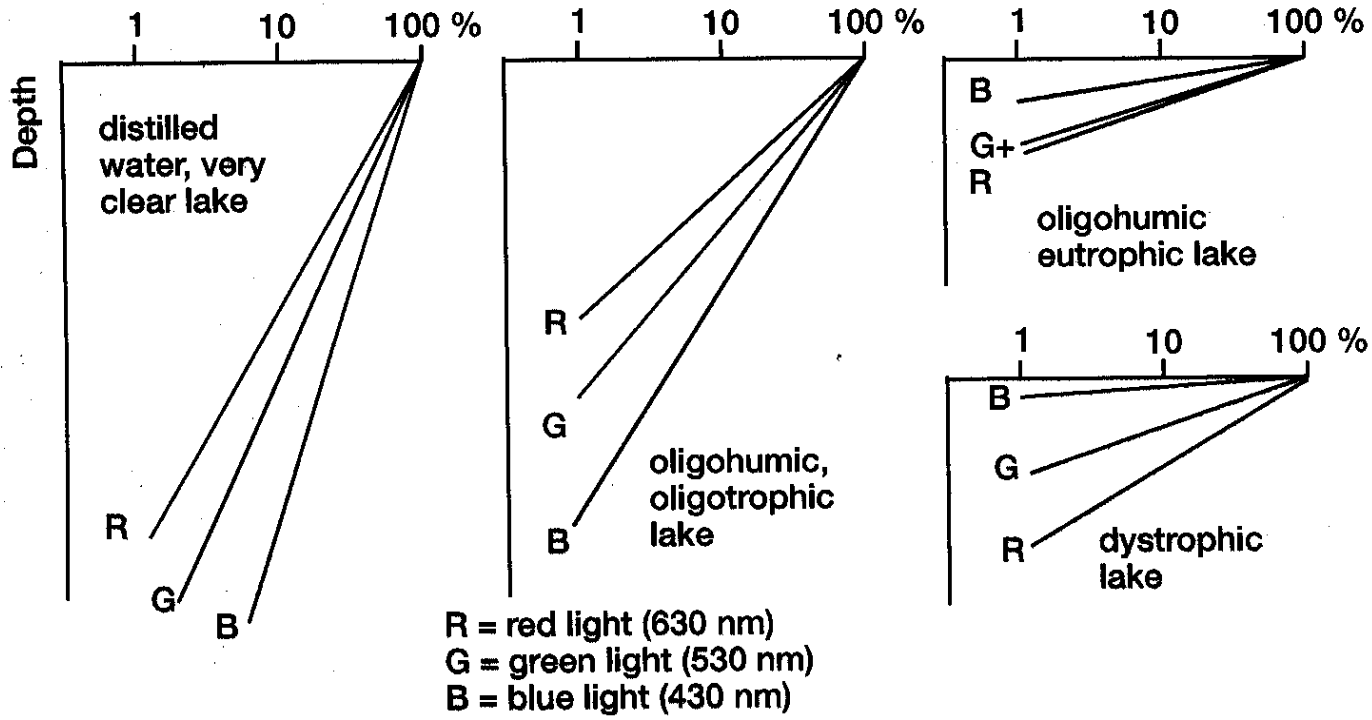


Fig. 3. Penetration of red, green and blue light radiation into water in different type of lakes.

Factores Físicos: Turbidez

Una de las propiedades ópticas del agua que influye en la penetración de la luz es la ***transparencia***. Cuando hay muchos materiales en suspensión, la penetración de la luz será menor; esto puede constituir un factor limitante para el desarrollo de los organismos vivos.

Si la **turbidez** del agua proviene de la concentración de los seres vivos, la productividad es mayor. Las diferencias de transparencia en las aguas dulces varían mucho, siendo mayor en los riachuelos de montañas y menor en las aguas de un río que recoja las aguas de zonas desprovistas de vegetación.

Existen otros factores que determinan la penetración de la luz además de la transparencia de las aguas. Estos factores son:

- intensidad luminosa,
- porcentaje de nubosidad,
- ángulo de incidencia de la luz en la superficie del agua y
- grado de agitación del agua.

Medición de la Turbidez

La turbidez puede ser expresada en tres tipos de unidades:

- **UTF** (unidad de turbiedad por formazina)
- **UTN** (unidades de turbidez nefelométricas)
- **UTJ** (unidades de turbidez Jackson)

El turbidímetro de Hellige, es del tipo nefelométrico, se basa en el efecto de Tyndall.

El control de la turbidez es fundamental durante la ejecución de trabajos de dragado en un cuerpo hídrico.

En estos casos se aplican estándares de calidad ambiental.

Importancia de la Turbidez

La turbiedad es de importante consideración en las aguas para abastecimiento público por tres razones:

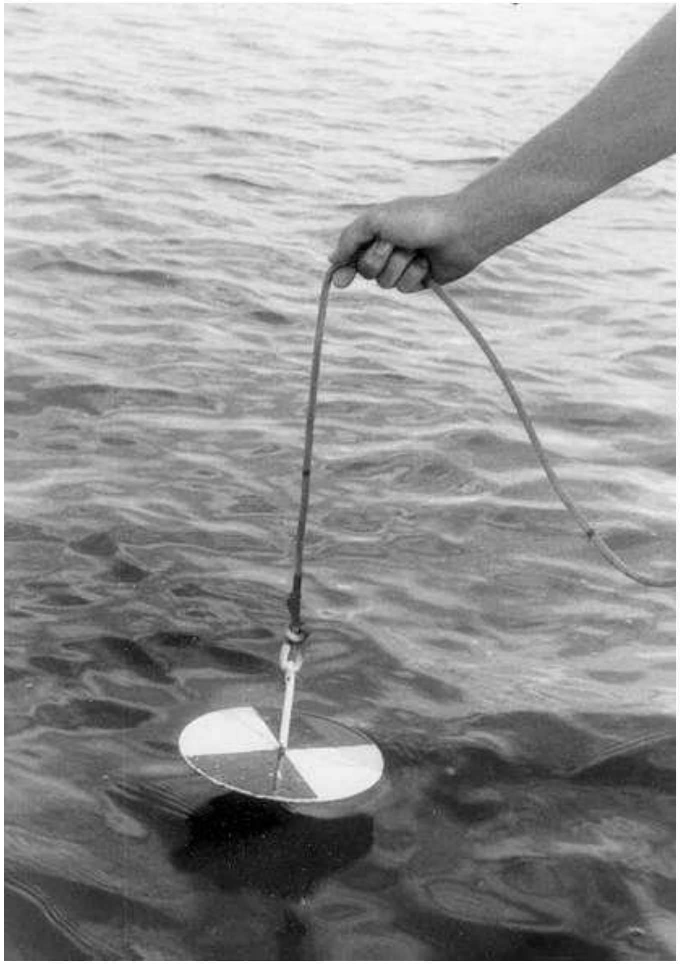
Estética: Cualquier turbiedad en el agua para beber, produce en el consumidor un rechazo inmediato y pocos deseos de ingerirla y utilizarla en sus alimentos.

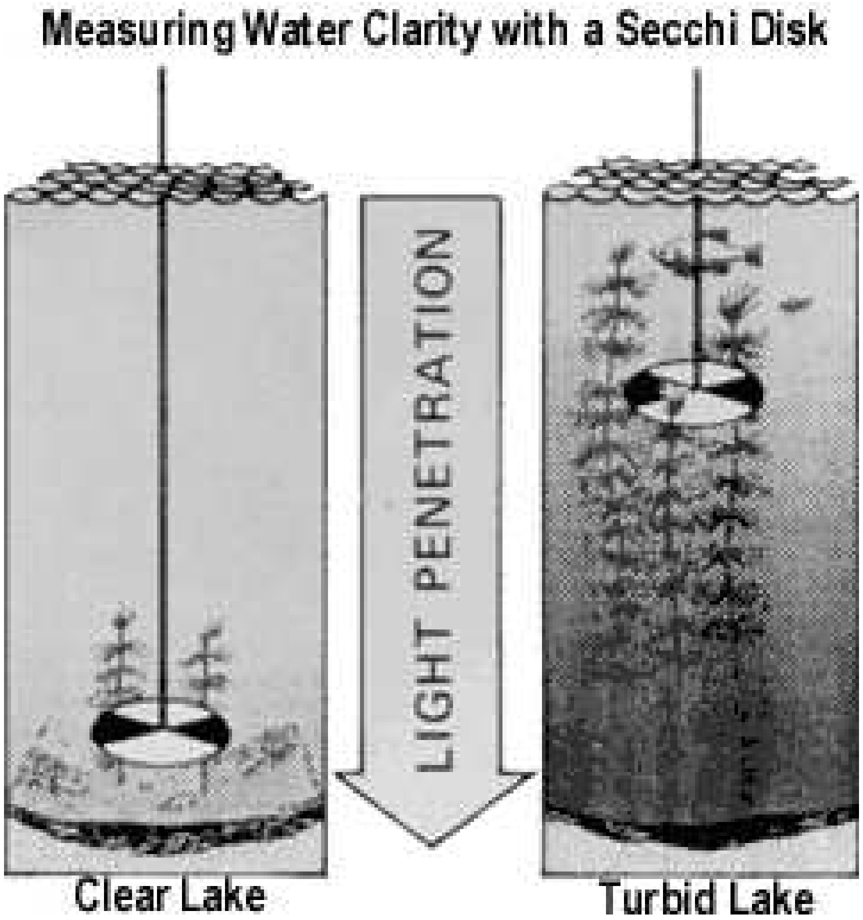
Filtrabilidad: La filtración del agua se vuelve más difícil y aumenta su costo al aumentar la turbiedad.

Desinfección: Un valor alto de la turbidez, es una indicación de la probable presencia de materia orgánica y microorganismos que van a aumentar la cantidad de cloro u ozono que se utilizan para la desinfección de las aguas para abastecimiento de agua potable.

Puede producir cambios en el ecosistema.

DISCO SECCHI





$$Zc = \text{aprox } Z_{Secchi} \times (2.6\text{-}3)$$

Transparencia (m)

Estado trófico	media	mínimo
Ultra-oligotrófico	≥ 12	≥ 6
oligotrófico	≥ 6	≥ 3
mesotrófico	6 - 3	3 – 1.5
eutrófico	3 – 1.5	1.5 – 0.7
hipertrófico	≤ 1.5	≤ 0.7

Según OECD

Factores Químicos
Gases Disueltos: Oxigeno

Gases disueltos. El oxígeno y el anhídrido carbónico disueltos en el agua son los dos gases de mayor importancia.

Tanto la concentración de oxígeno como la del anhídrido carbónico constituyen con frecuencia factores limitantes.

El **oxígeno** disuelto en el agua proviene de la fotosíntesis que realizan los vegetales con clorofila.

Como esta actividad fotosintética es mayor en las capas superiores bien iluminadas, su concentración será mayor a este nivel.

En los niveles próximos al fondo, su concentración es mínima debido a los procesos de oxidación de la materia orgánica.

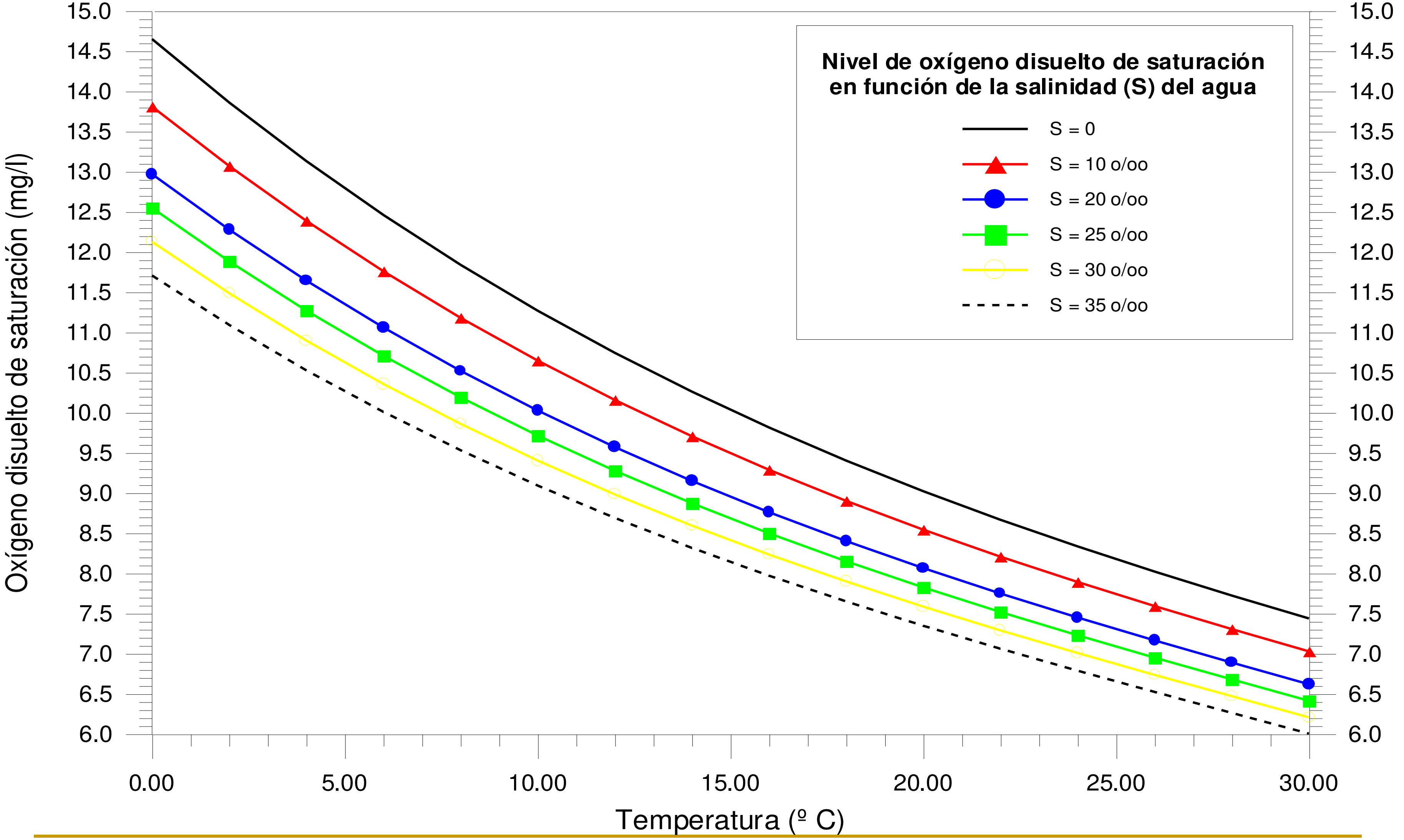
Gases disueltos: Oxígeno

- El oxígeno disuelto proviene de la mezcla del agua con el aire ocasionada por el viento y, en la mayoría de los casos, principalmente del oxígeno que liberan las plantas acuáticas en sus procesos de fotosíntesis.
- En términos generales, la solubilidad del O2 en el agua es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura y a la concentración de sales disueltas.
- En las figuras se aprecian equipos para medir oxígeno disuelto.

Gases disueltos: Oxígeno Disuelto

- Su determinación es muy importante para estudios de limnología y evaluación ambiental por que es el factor que determina la existencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas en un medio particular.
- A Partir del OD se puede cuantificar la DBO. Su contenido depende de la concentración y estabilidad del material orgánico presente, y por ello es un factor muy importante en la auto purificación de los ríos.
- Los valores de OD disminuyen con la temperatura. Concentraciones consideradas típicas para agua superficial están influenciadas por la temperatura, pero normalmente están entre 7 a 8 ppm (mg/l).
- La vida acuática requiere de OD. La mayoría de los animales acuáticos necesitan una concentración > 1ppm (mg/l) para sobrevivir. Dependiendo del tipo y condiciones de cultivo, necesitan de 4 a 5 ppm para evitar stress.
- Varía significativamente en aguas superficiales, y generalmente es muy bajo, o está ausente en aguas subterráneas.

Variación de OD vs. Temperatura y Salinidad



Factores Químicos: Gases disueltos CO_2/ Anhídrido Sulfuroso

El anhídrido carbónico (CO2) es un gas que se combina con el agua para formar ácido carbónico. Proviene de la atmósfera y de la actividad respiratoria de los organismos.

Su concentración en el agua es variable; cuando es alta, puede constituir un factor limitante para los animales, ya que en estos casos suele ir asociado a concentraciones bajas de oxígeno.

El CO2 tiene relación con el pH del medio acuático e interviene en la formación de los esqueletos, carapachos y conchas de muchos invertebrados.

Existen en el medio acuático otros gases como el **anhídrido sulfuroso** (SH3), que es muy venenoso y constituye un factor limitante cuando se acumula en aguas estancadas ricas en restos orgánicos.

Este gas proviene de la reducción del sulfato de calcio por la bacteria *Microspira aestuarii*. En los marismas se desprende a veces metano, el cual se produce por la descomposición anaeróbica de restos vegetales.

Factores Químicos: Sales minerales

Sales minerales. En las aguas dulces las sales minerales más abundantes son los carbonatos, los sulfatos y los cloruros. Los cationes de mayor importancia son el calcio (64%), el magnesio (17%), el sodio (16%) y el potasio (3%).

El calcio juega un papel fundamental, determina 2 tipos de agua:

a) *aguas duras*, cuando la concentración de calcio es < 25 mg / litro;

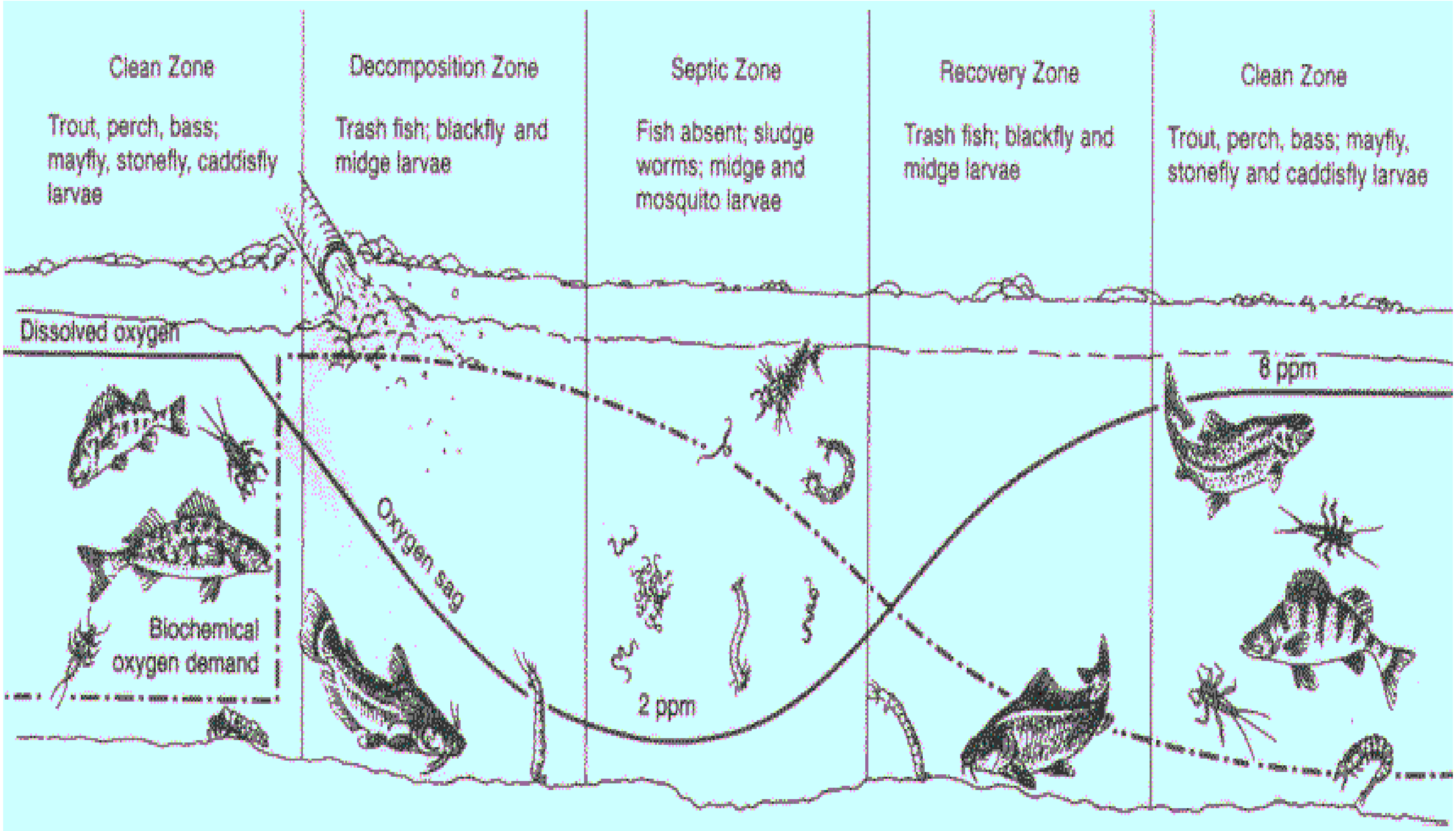
b) *aguas blandas*, si la concentración de calcio es < 9 mg/ litro.

Moluscos, crustáceos y otros invertebrados, tienen necesidad de calcio para formar sus caparazones o conchas y por tanto puede ser factor limitante para algunas especies.

La concentración de sales minerales en las aguas dulces, tienen relación con los procesos de osmorregulación de los seres vivos. Estos, presentan en mecanismos de regulación de la presión osmótica, lo cual les permite subsistir en medios de diferente concentración a la del medio interno.

Curva de Oxigeno Disuelto en un cuerpo hídrico afectado por descargas

Ref.: Streeter-Phelps Models for dissolved oxygen and BOD, Batterman, 1999.



Factores Químicos: Acidez y Alcalinidad

El agua está disociada en iones H+ y OH-. Las sales minerales disueltas en el agua se disocian en iones positivos y esta ionización varía de unos compuestos a otros.

- ❑ El pH caracteriza si el agua es ácida, básica o neutra
- ❑ Es el negativo del logaritmo de la concentración de iones [H^+]
- ❑ pH = - log [H^+]
- ❑ El pH se expresa en la práctica como una escala que va de 1 a 14.

Si el pH de una solución o del suelo es 7, existe un equilibrio entre los iones; por tanto este valor constituye el ***punto neutro***, el cual corresponde al *agua pura* (agua destilada).

Por debajo de este valor, el pH es ácido y lo será tanto más, cuanto más se aproxime a 0.

Por encima del punto neutro (7), los valores expresan alcalinidad y ésta será más alta cuanto más se aproxime a 14.

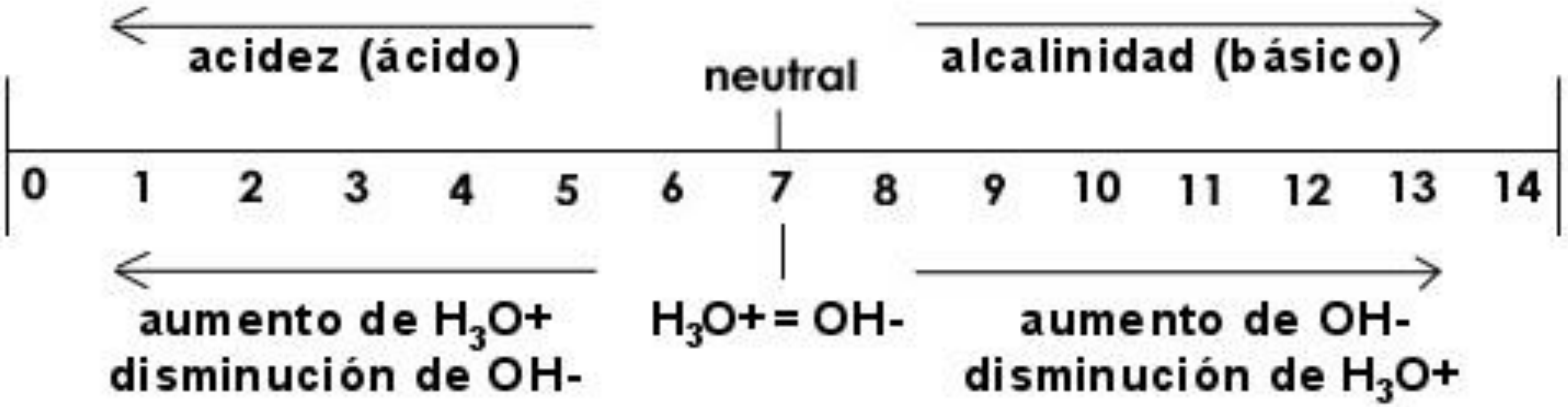
Acidez / Alcalinidad

Hay organismos que viven en aguas con un pH ácido; otros viven en medios acuáticos alcalinos.

La planta ***Elodea canadiensis*** vive en aguas con un pH ≈ 7.4 - 8.8.

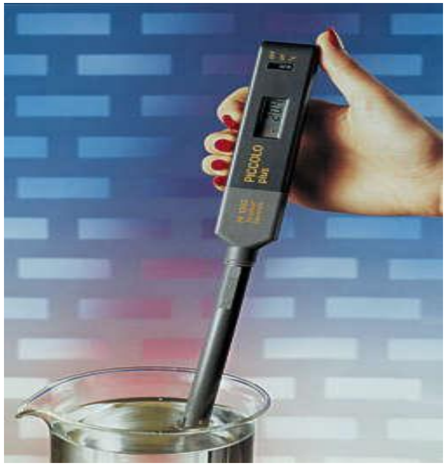
Typha angustifolia (enea) vive en aguas con un pH de 8.4 a 9. Los hongos, y otros organismos, viven en medios ácidos.

Las aguas dulces tienen el pH ≈ 6.5 -8.7; las aguas marinas entre 8 y 8.5.



Equipos de Medición del pH

- Mayor acidez-más concentración radical amonio, y corrosión de metales.
- Mayor alcalinidad-más liberación de amoniaco y turbidez en el agua.
- Es recomendable medir en el hipolimnio
- Se puede medir con un ph-metro, que debe estandarizarse con un buffer.



En la figura del extremo superior izquierdo se muestra un pH metro con resolución de 0.1,

Mientras que en la figura inferior se observa un pH metro con resolución de 0.01.

Ecosistemas en lagos y embalses: Luz y Zonificación

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.

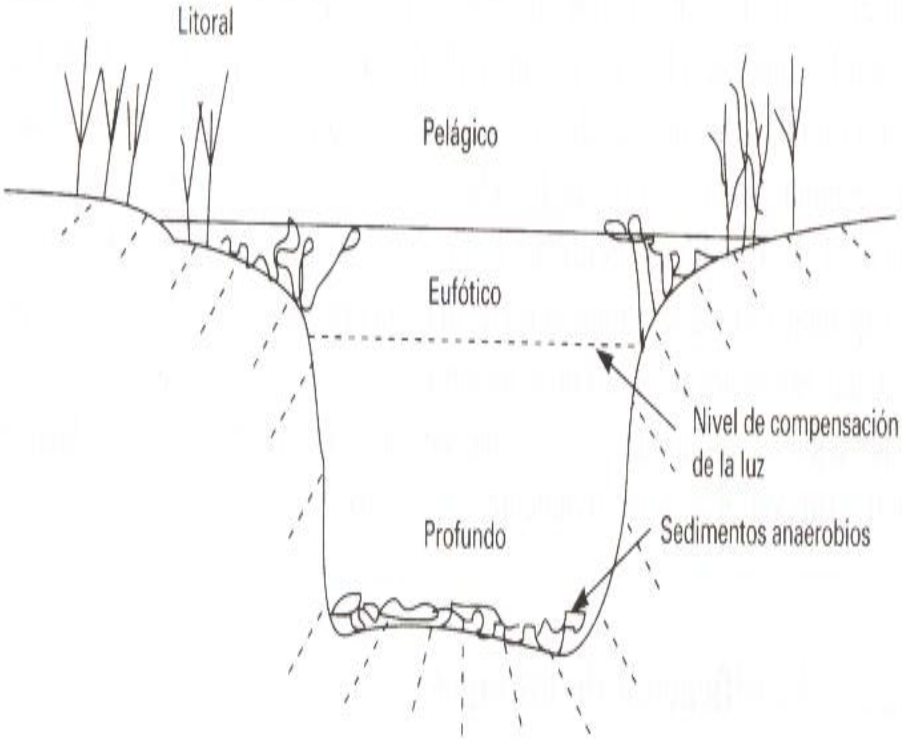


Figura 5.3. Zonificación de un lago mostrando las subdivisiones más importantes del ecosistema del lago.

Clasificación de lagos

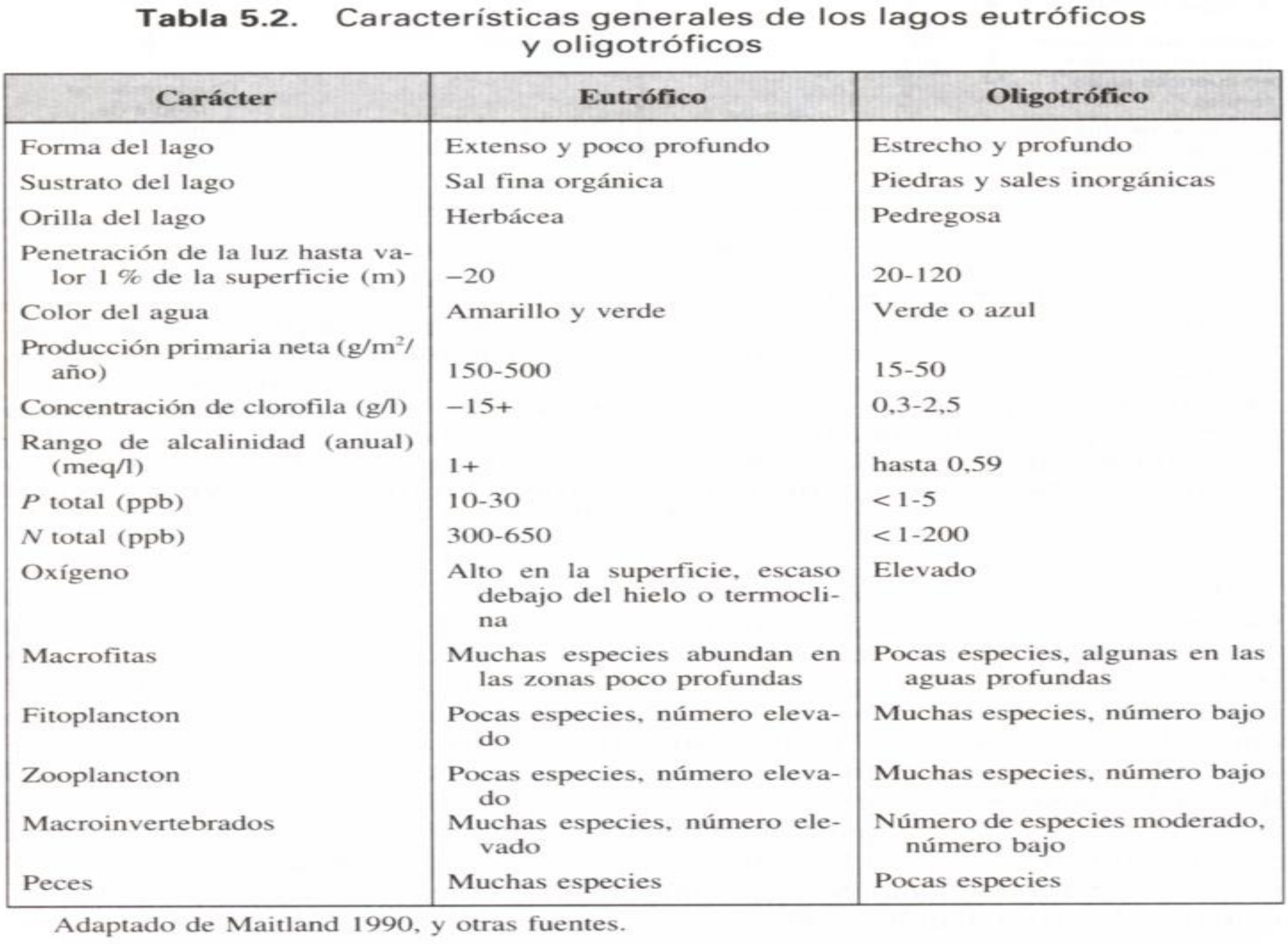
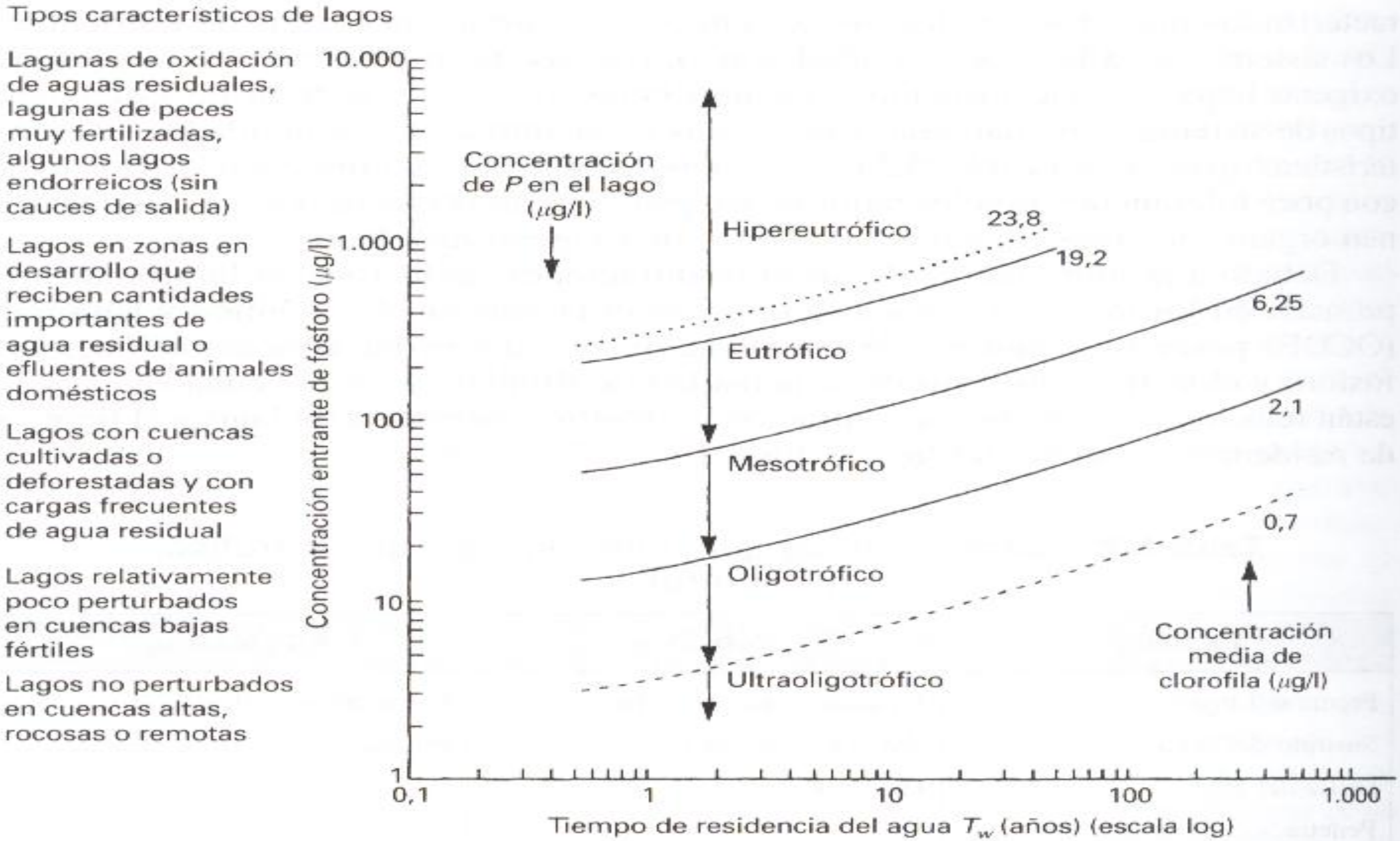


Tabla 5.2. Características generales de los lagos eutróficos y oligotróficos

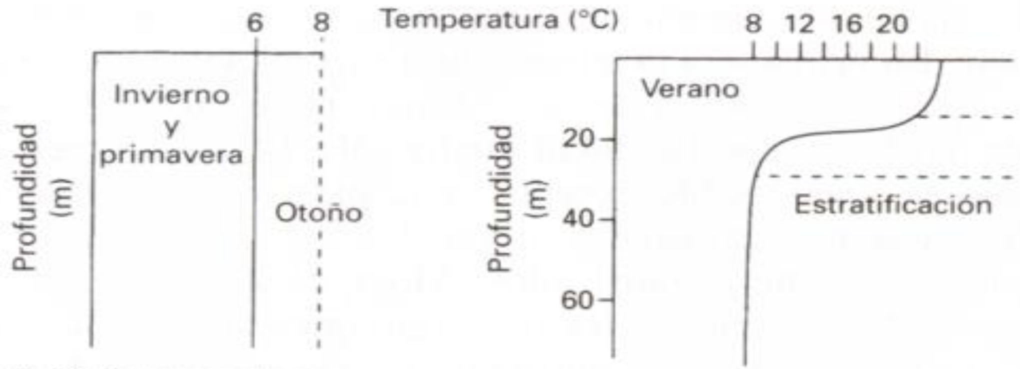
Carácter	Eutrófico	Oligotrófico
Forma del lago	Extenso y poco profundo	Estrecho y profundo
Sustrato del lago	Sal fina orgánica	Piedras y sales inorgánicas
Orilla del lago	Herbácea	Pedregosa
Penetración de la luz hasta valor 1 % de la superficie (m)	–20	20-120
Color del agua	Amarillo y verde	Verde o azul
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

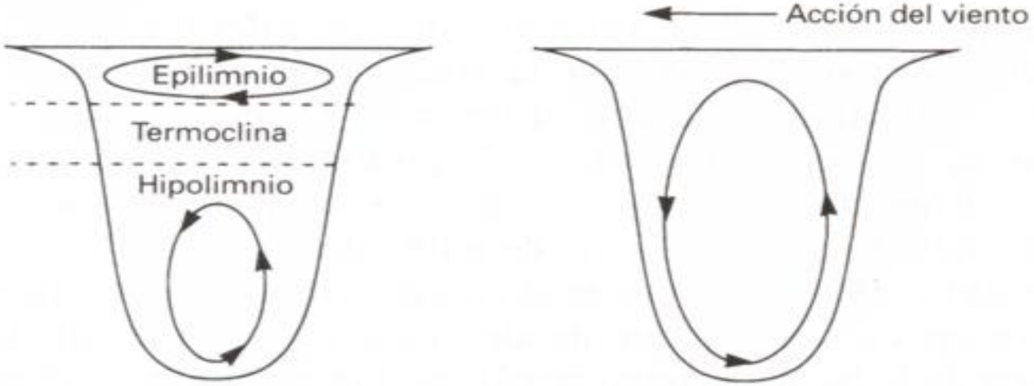


Densidad del agua y Estratificación Térmica



(a) Perfil de temperatura vertical del invierno, primavera y otoño

(b) Perfil del verano



(c) Definición de zonas según profundidad

(d) Volteado y mezclado en toda la profundidad

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

Perfiles Temperatura vs. Profundidad

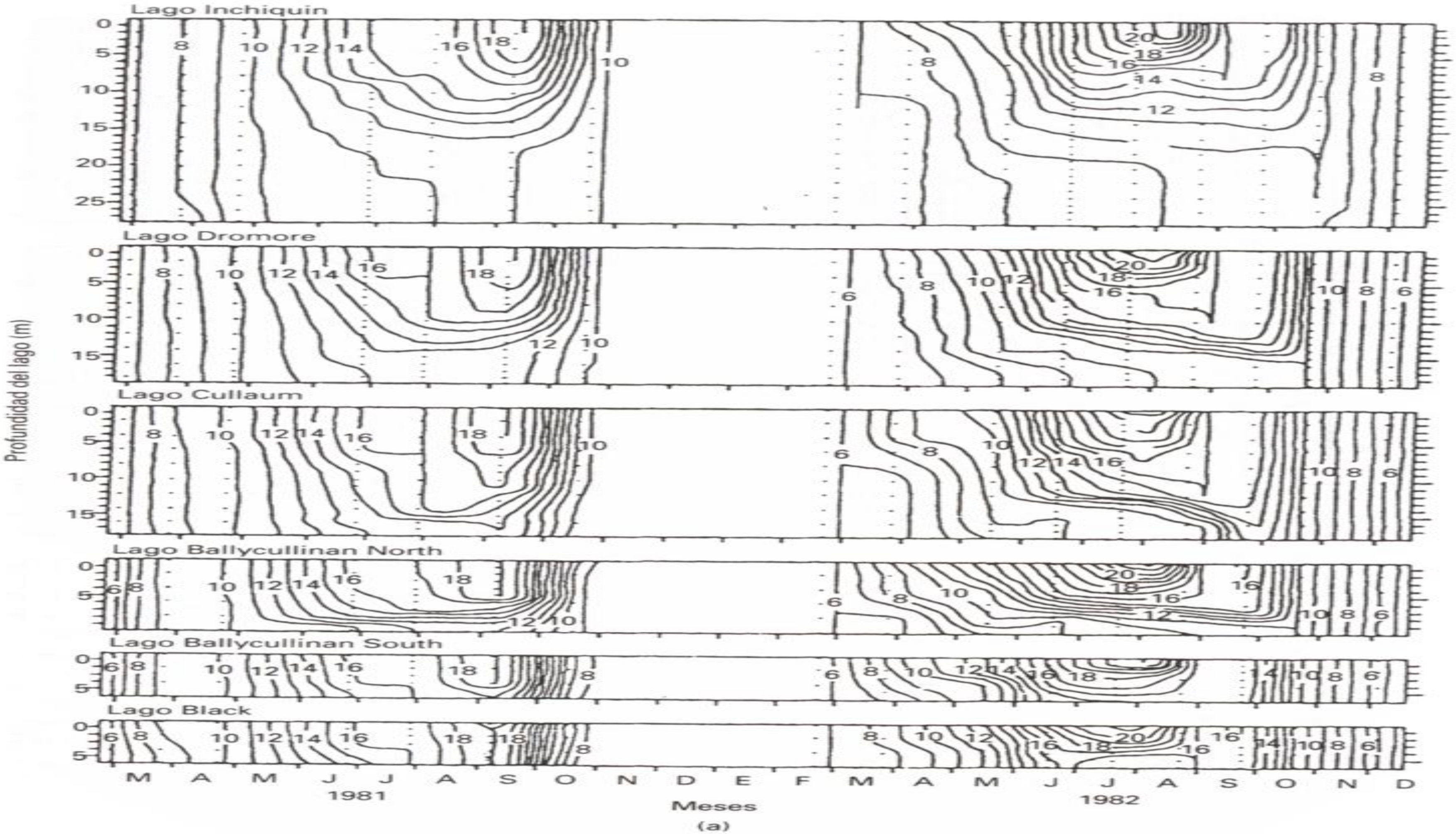


Figura 5.6. Perfiles de temperatura-profundidad (a) y oxígeno-profundidad (b) en seis lagos irlandeses. Nótese que la estratificación térmica es inestable en los lagos menos profundos y que partes del hipolimnion pueden llegar a estar anóxicas durante el verano (según Allott, 1986).

Perfiles Oxígeno Disuelto vs. Profundidad

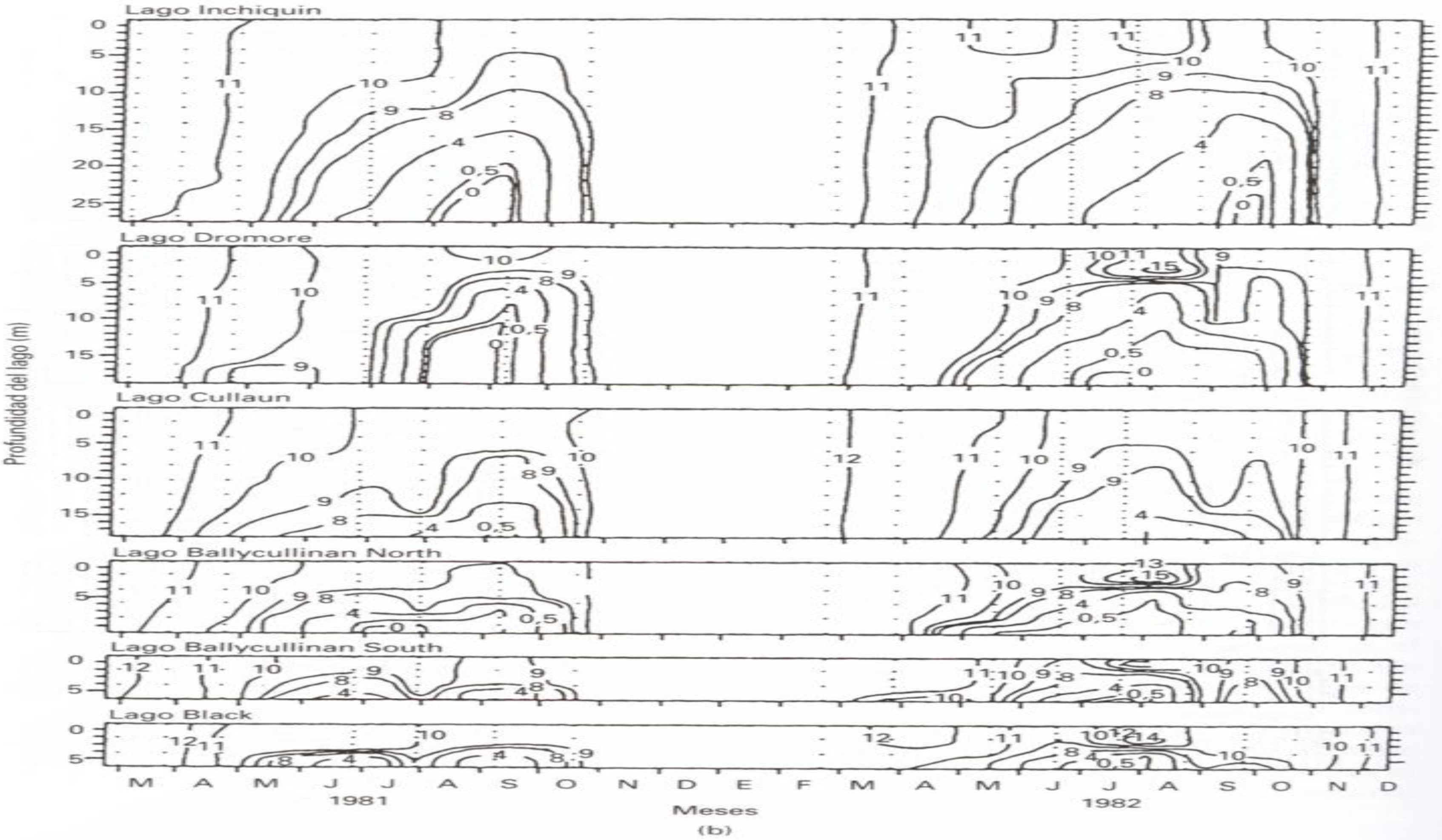


Figura 5.6 ***(continuación).*** Perfiles de temperatura-profundidad (a) y oxígeno-profundidad (b) en seis lagos irlandeses. Nótese que la estratificación térmica es inestable en los lagos menos profundos y que partes del hipolimnion pueden llegar a estar anóxicas durante el verano (según Allott, 1986).

Tendencias en nivel de agua, temperatura y radiación solar

440 INGENIERÍA AMBIENTAL

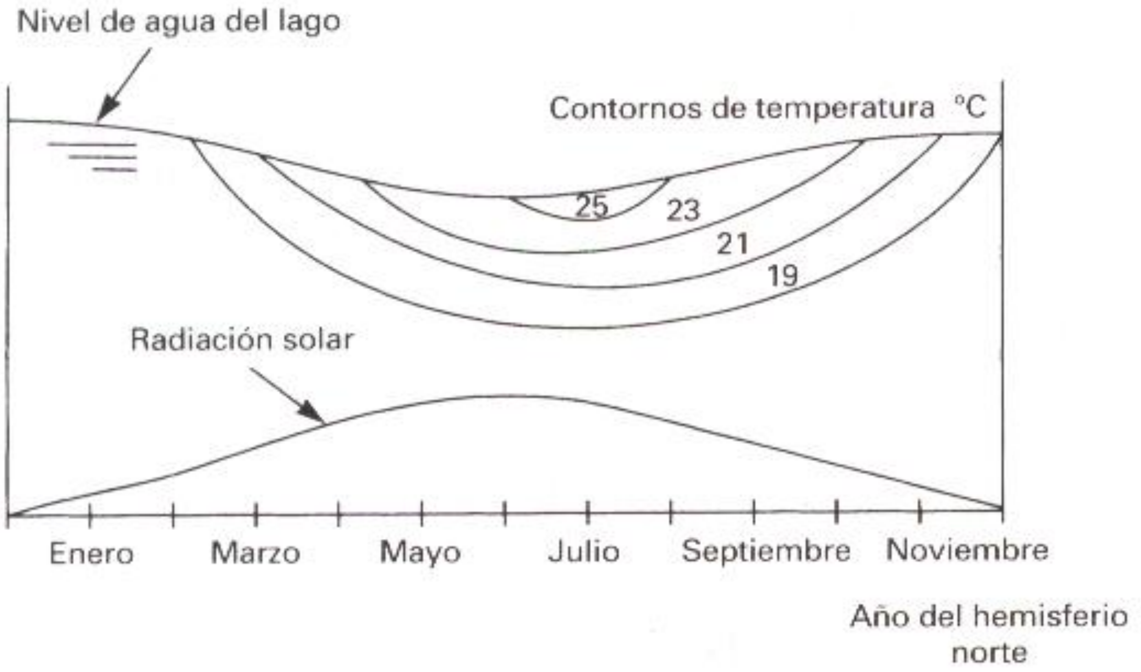
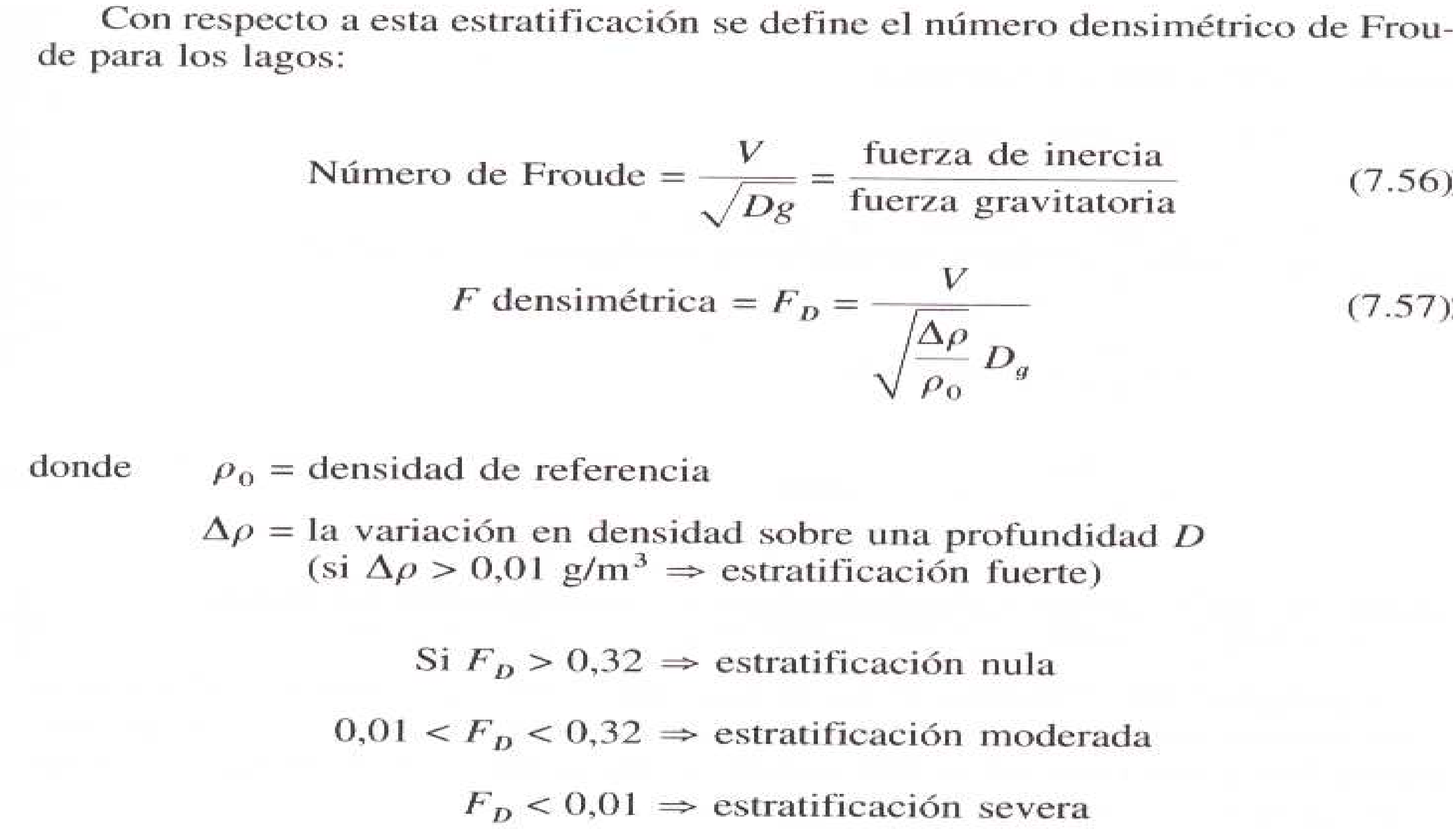


Figura 7.7. Esquema de las tendencias en nivel de agua, temperatura y radiación solar a lo largo del año en un lago moderadamente en reposo.

Tipos de Estratificación
Número de Froude para Lagos



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)

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

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

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

Clasificación por Estabilidad
Número de Richardson

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

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

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

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

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

Perfiles de Temperatura en un lago estratificado

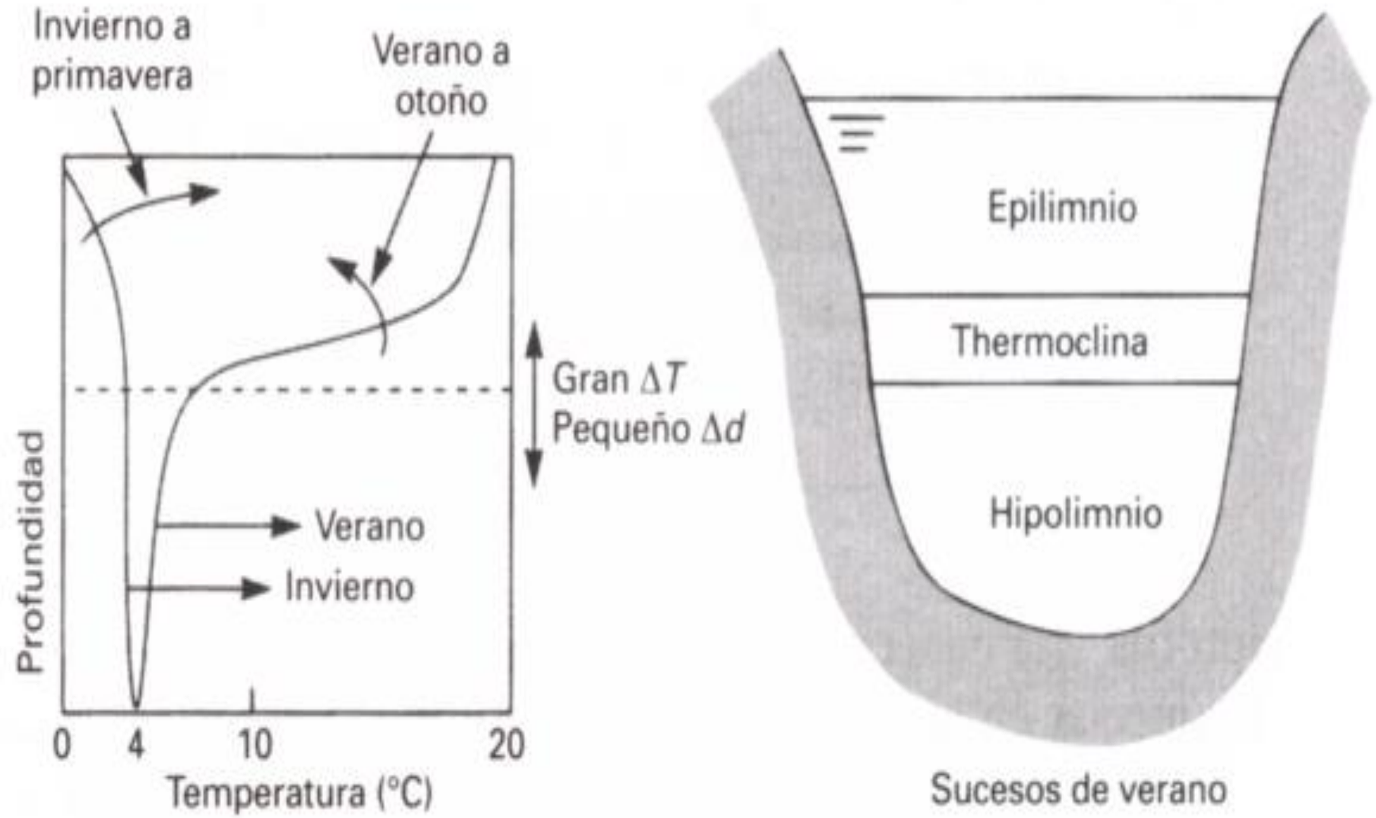


Figura 7.8. Perfiles de temperatura en un lago estratificado.

Ejercicio: Establecer categoría de estratificación de un lago

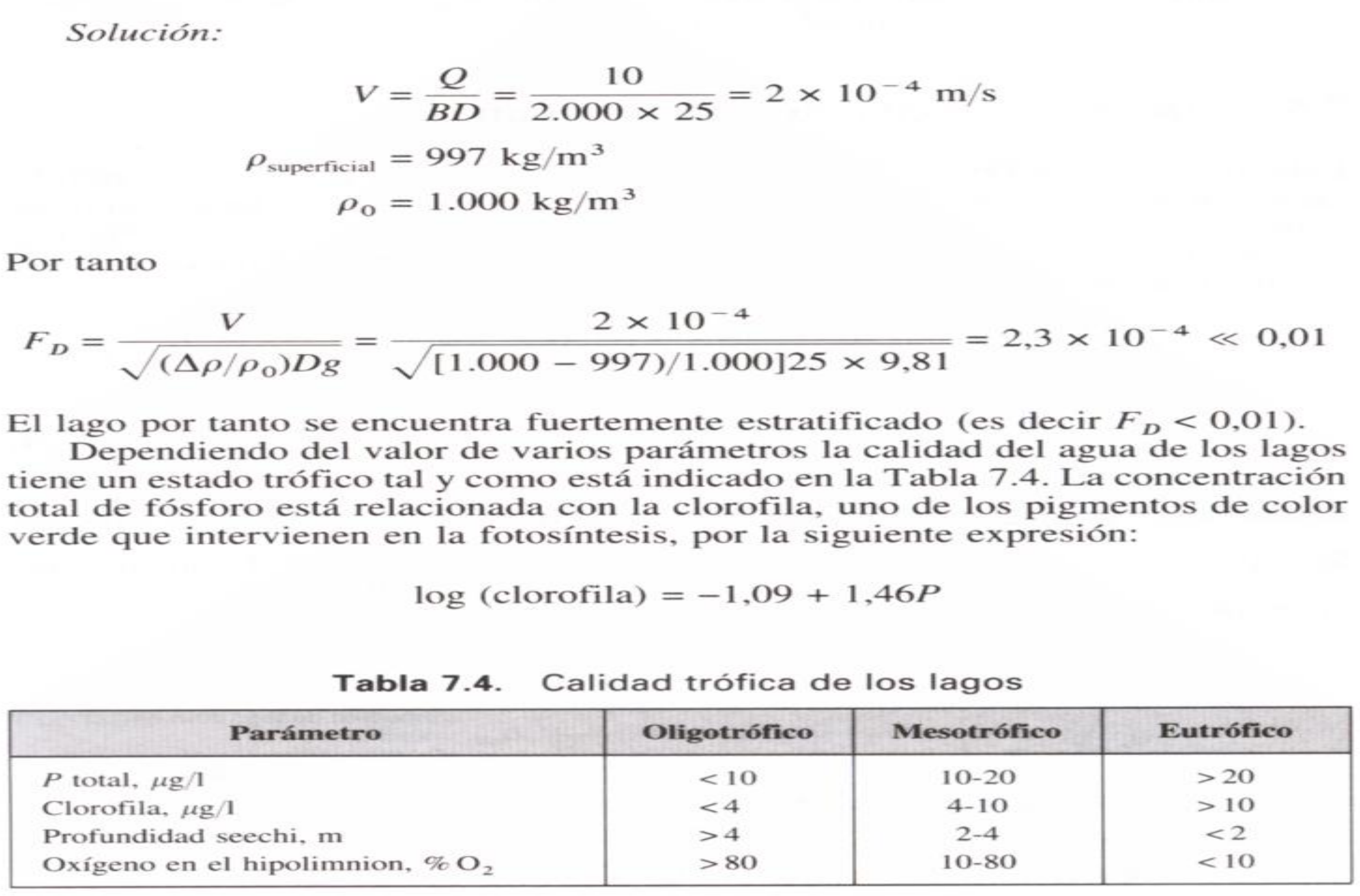
Determinar la categoría de estratificación de un lago si sus dimensiones de altura, ancho y profundidad son 10 Km., 2 Km. y 25 m respectivamente.

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



Solución:

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

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

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

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

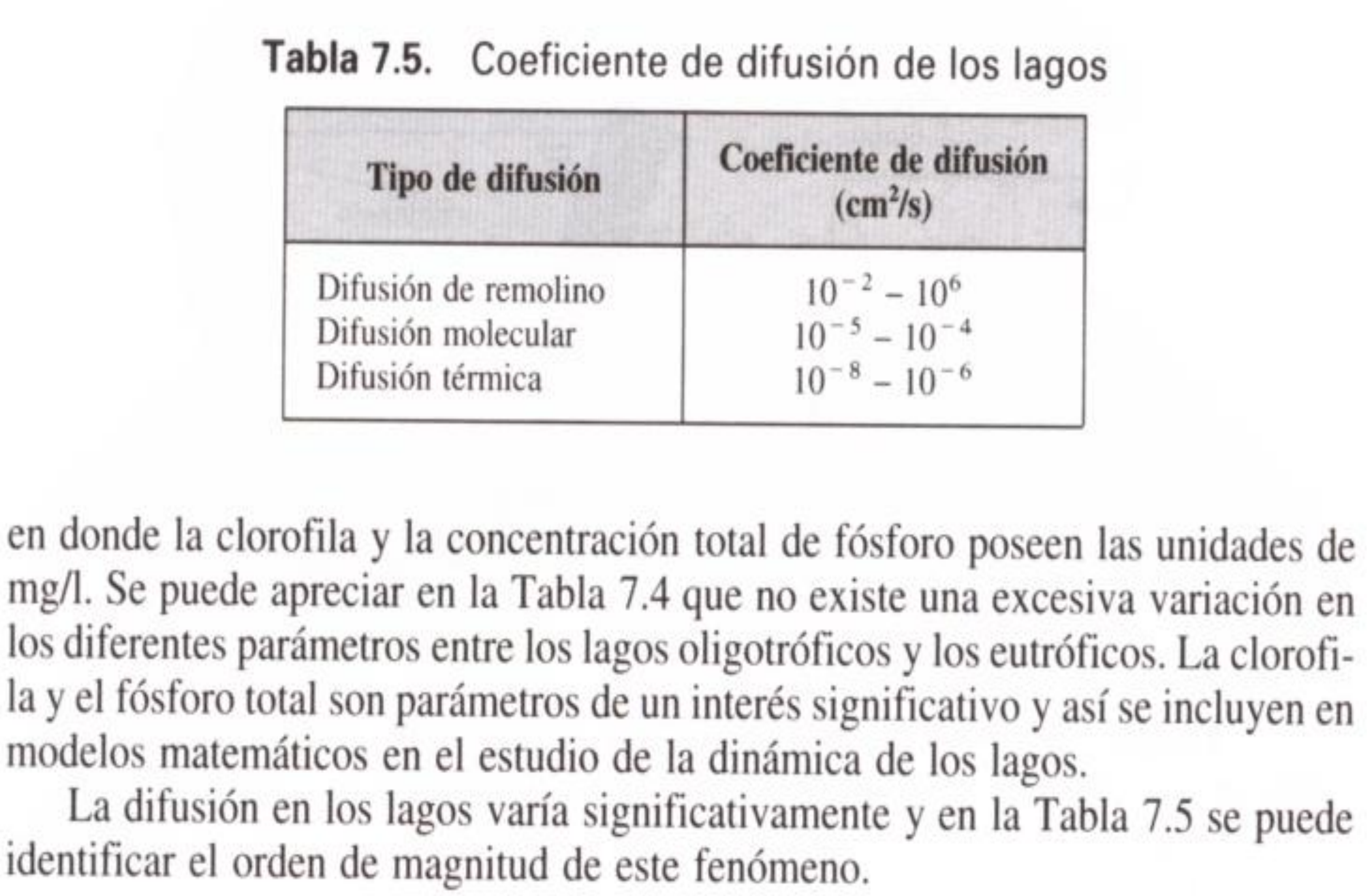


Tabla 7.5. Coeficiente de difusión de los lagos

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión (cm²/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

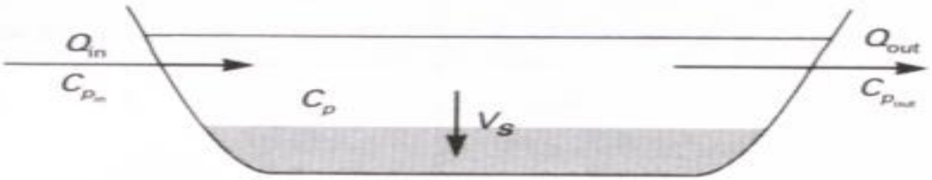
7.8.1. Balance sencillo de fósforo en un lago

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

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

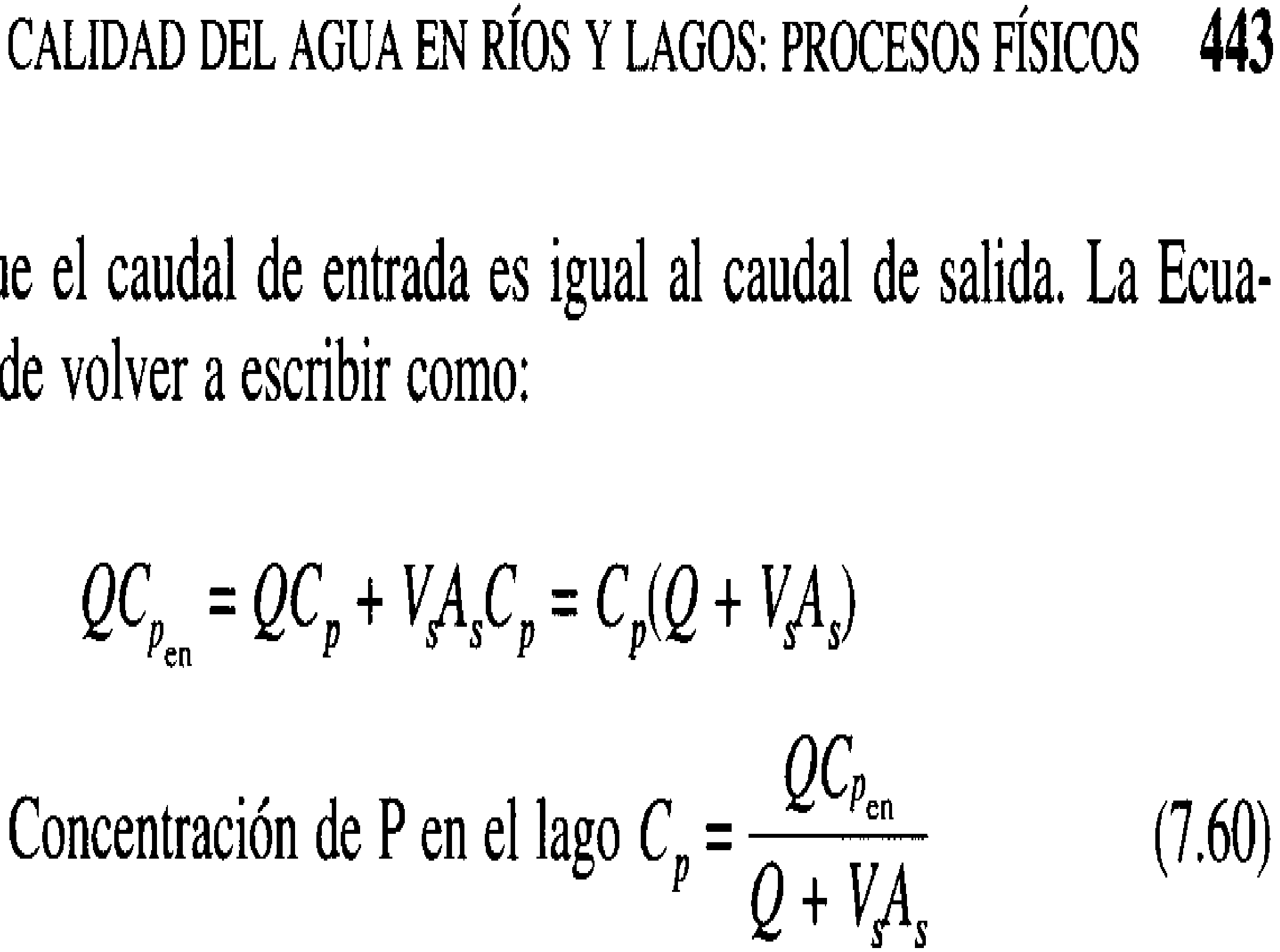
En este caso, se supone que no hay generación de fósforo en el interior del lago. Se suponen también condiciones de estado estacionario $\frac{dM}{dt} = 0$. También se supone que la concentración de fósforo de salida del lago es la misma que la del



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



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:

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

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

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:

$$\text{Ecuación (7.60)}\ C_p = \frac{QC_{P_{en}}}{Q + V_sA_s}$$

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

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

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

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:

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

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

Por tanto

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

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