



2017

## MÓDULO 1 - INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD DEL AGUA

MATERIAL DE SUPORTE DE CURSOS:

- RECOLECCIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA Y SEDIMENTO
- MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS

# Cursos e Treinamentos

## *Gestão do Conhecimento*





GOBIERNO DEL ESTADO DE SÃO PAULO

Gobernador *Geraldo Alckmin*

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE

Secretario *Ricardo Salles*



CETESB • COMPAÑÍA AMBIENTAL DEL ESTADO  
DE SÃO PAULO

Director Presidente *Carlos Roberto dos Santos*

Dirección de Gestión Corporativa,  
en ejercicio *Carlos Roberto dos Santos*

Dirección de Control y  
Licenciamiento Ambiental *Geraldo do Amaral*

Dirección de Evaluación de  
Impacto Ambiental *Ana Cristina Pasini da Costa*

Dirección de Ingeniería y  
Calidad Ambiental *Eduardo Luis Serpa*

CETESB • COMPAÑÍA AMBIENTAL DEL ESTADO DE SÃO PAULO

#### MISIÓN

Promover y supervisar la ejecución de políticas públicas ambientales y de desarrollo sostenible, asegurando la mejora continua de la calidad del medio ambiente con el fin de responder a las expectativas de la sociedad en el estado de São Paulo.

#### VISIÓN

Mejorar los patrones de excelencia de la gestión ambiental y los servicios prestados a los usuarios y a la población en general, asegurando la superación de la actuación de la CETESB como centro de referencia nacional e internacional, en el campo ambiental y en la protección de la salud pública.

#### VALORES

Los valores, principios y normas que guían la actuación de la CETESB están establecidos en su Código de Ética y Conducta Profesional.





## MÓDULO 1 - INTRODUÇÃO A LA CALIDAD DEL AGUA

### MATERIAL DE SUPORTE DE CURSOS:

- **RECOLECCIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA Y SEDIMENTO**
- **MONITOREO Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS**

### **Coordinación técnica**

Geog. Dra. Carmen Lucia Vergueiro Midaglia

Biol. Dr. Claudio Roberto Palombo

### **Docentes**

Biol. Dr. Claudio Roberto Palombo

Biol. Dr. Fabio N. Moreno

São Paulo, Abril de 2017

### **CETESB**

#### **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**

Av. Profº. Frederico Hermann Júnior, 345 - Alto de Pinheiros -

CEP: 05459-900 - São Paulo - SP

<http://www.cetesb.sp.gov.br/> / Correo electrónico: [cursos@cetesbnet.sp.gov.br](mailto:cursos@cetesbnet.sp.gov.br)

<https://www.facebook.com/escolasuperiordacetesb/>

### **INSTITUCIONES ORGANIZADORAS:**

ANA - Agência Nacional de Águas

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

UNESCO – Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

ABC/MRE – Agência Brasileira de Cooperação/Ministerio de Relaciones Exteriores

### **INSTITUCIONES COLABORADORAS:**

OTCA - Organización del Tratado de Cooperación Amazónica

ONU Ambiente – Programa GEMS/Agua

#### **Carlos Ibsen Vianna Lacava**

Director del Departamento de Apoyo Operacional - ET

#### **Tânia Mara Tavares Gasi**

Directora de la División de Gestión del Conocimiento - ETG

#### **Irene Rosa Sabiá**

Sector de Cursos y Transferencia de Conocimiento ETGC

#### **Coordinación Ejecutiva**

Claudia Maria Zaratín Bairão y Carolina Regina Moraes

#### **Equipo técnico del ETGC:**

Rita de Cassia Guimarães y Yhoshie Watanabe Takahashi.

Este documento ha sido maquetado por el ETGC - Sector de Cursos y Transferencia de Conocimiento  
Edición gráfica: Rita de Cassia Guimarães - ETGC / Portada: Vera Severo / Impresión: Gráfica CETESB

© CETESB, 2017

Este material se destina al uso exclusivo de los participantes en los Cursos y Formaciones Prácticas Especializadas, y está expresamente prohibida su reproducción total o parcial, por cualquier medio, sin la autorización expresa de la Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

## PRESENTACIÓN

El agua, uno de los bienes más importantes para la actividad biológica, buscada en todo el universo como algo imprescindible para la vida, desgraciadamente es tratada de forma inconsecuente por la mayoría de la humanidad.

Según la percepción humana, el agua es infinita e inagotable, razón por la cual se trata de forma incorrecta desde un punto de vista ecológico.

Con el fin de cambiar ese comportamiento, se necesita entender perfectamente la correlación entre la calidad y la cantidad del agua y sus múltiples usos para dejar a las próximas generaciones las posibilidades para su supervivencia a través de una comunión entre sus necesidades básicas y la preservación del medio ambiente.

La concepción de un curso de esta magnitud indica la necesidad de una progresión continua del conocimiento, que exige, con vistas a la plena comprensión de la naturaleza y la presencia humana, tratar temas que conduzcan paulatinamente a comprender el ambiente acuático natural (cada vez más raro), incluidos los cambios progresivos que han tenido lugar, tanto externos como del metabolismo interno del ecosistema hídrico.

Por lo tanto, a partir de esos presupuestos iniciales, el curso se dirigirá al conocimiento de los diversos tipos de ambientes acuáticos y sus principales compartimentos, haciendo hincapié en las características intrínsecas inorgánicas y orgánicas, las correlaciones entre las alteraciones de origen autóctono y alóctono, considerando en un principio los ambientes naturales sin ninguna interferencia antropogénica.

De esa forma, progresivamente, el conocimiento adquirido en cada uno de los módulos del curso orientará hacia una comprensión cada vez más intensa de las acciones humanas en el equilibrio de los ecosistemas acuáticos.

**Geog. Dra. Carmen Lucia Vergueiro Midaglia**

**Biol. Dr. Claudio Roberto Palombo**

Coordinación Técnica

---



## **Carmen Lucia V. Midaglia**

**(cmidaglia@sp.gov.br)**

Cuenta con un grado en Geografía por la Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias Humanas de la USP, Departamento de Geografía (1984), y otro grado en Traducción e Interpretación de Inglés por la Facultad Iberoamericana de Letras y Ciencias Humanas (1982). Realizó un posgrado en «Rural and Land Ecology Survey» en la Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC) de la Universidad de Twente, en Enschede (Holanda). Hizo un Máster en Geografía Humana por la Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias Humanas de la USP, Departamento de Geografía (1994). Tiene experiencia en medio ambiente, con énfasis en el Monitoreo de la calidad de las aguas. En 2009 concluyó su doctorado en la FFLCH-Geografía, con la propuesta de un Índice de Alcance Espacial del Monitoreo de las Aguas Superficiales (IAEM), con énfasis en la gestión espacial de Recursos Hídricos y su relación con el crecimiento de la población, poniendo de manifiesto vulnerabilidades causadas por la presión antrópica. Es profesora y coordinadora de clases en el área de supervisión del agua en la Escola Superior da CETESB, en São Paulo.



## **Claudio Roberto Palombo**

**(cpalombo@sp.gov.br)**

Biólogo de la CETESB desde 1980. Formado por el Instituto de Biociencias de la Universidad de São Paulo. Tiene una licenciatura en Ecología (1978), un máster (1989) y un doctorado (1997) por el Departamento de Ecología General del Instituto de Biociencias de la Universidad de São Paulo. Es especialista en Limnología con énfasis en ambientes alterados. Es también profesor universitario y analista técnico de los Proyectos FEHIDRO relativos a los ecosistemas acuáticos. Ha desarrollado metodologías de control integrado de hierbas acuáticas dañinas.



## **Dr. Biól. Fabio Netto Moreno**

**(fmoreno@sp.gov.br)**

Grado en Ciencias Biológicas por la Universidad Federal de Santa Catarina (1993), máster en Ingeniería Ambiental por la Universidad Federal de Santa Catarina (1998) y doctorado en Ciencias del Suelo por la Massey University (2004) de Nueva Zelanda. Posdoctorado por el Instituto de Geociencias de la Universidad de São Paulo (2009). Trabaja en la Compañía Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB), en el Sector de Aguas Superficiales. Es docente del curso de Posgrado en Química Ambiental e Ingeniería del Control de la Polución de las Facultades Osvaldo Cruz.





## SUMÁRIO

<b>Aspectos introductorios de la calidad de las aguas .....</b>	<b>13</b>
- Biol. Claudio Roberto Palombo	

<b>Introducción general .....</b>	<b>15</b>
-----------------------------------	-----------

I. Introducción .....	17
II. Actividades de la limnología .....	17
III. Distribución del agua en el Planeta .....	18
IV. La génesis de los ecosistemas lacustres .....	18
V. Tiempo de residencia .....	29
VI. Aguas continentales .....	30
VII. Propiedades físicas y químicas del agua y su importancia limnológica .....	32
VIII. Radiación en el medio acuático .....	34
IX. Elementos físicos, químicos y biológicos .....	41
X. Sedimentos .....	43
XI. La comunidad de macrófitas acuáticas .....	44
XII. La comunidad fitoplanctónica .....	46
XIII. Índice de comunidad fitoplanctónica (ICF) .....	49
XIV. La comunidad zooplanctónica .....	50
XV. Índice de comunidad zooplanctónica para reservorios (ICZRES) .....	51
XVI. La comunidad bentónica .....	52
XVII. Índice de comunidad bentónica (ICB) .....	54
XVIII. Eventos naturales que alteran la calidad del agua .....	55
XIX. Eutrofización .....	59
Referencias bibliográficas .....	68

<b>Variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua, principales parámetros de calidad del agua y contaminantes emergentes .....</b>	<b>69</b>
Biol. Fabio Netto Moreno	

1. Concepto de calidad del agua .....	71
2. Usos del agua y requisitos de calidad .....	71
3. Principales fuentes de polución del agua .....	71
4. Principales contaminantes acuáticos .....	73
5. Variables de la calidad del agua .....	74
6. Estándares de calidad del agua .....	78
7. Variaciones espaciales y temporales .....	80
Referencias bibliográficas .....	90

### Lista de tablas

Tabla 1. Distribución del agua en la Tierra .....	18
Tabla 2. Tiempo de residencia del agua .....	30
Tabla 3. Propiedad del agua .....	33
Tabla 4. Grupos de algas con representantes en el fitoplancton límnic y marino .....	49
Tabla 5. Clasificación del índice de la comunidad fitoplanctónica (ICF) .....	49
Tabla 6. Índice de la comunidad bentónica para la zona sublitoral de reservorios (ICBRES-SL) .....	54
Tabla 7. Índice de la comunidad bentónica para zona profunda de reservorios (ICBRES-P) .....	54
Tabla 8. Índice de la comunidad bentónica para ríos (ICBRIO) .....	55
Tabla 9. Clasificación de los cuerpos de agua según los niveles de eutrofización .....	61
Tabla 10. Características de ambientes oligotróficos y eutróficos .....	62
Tabla 11. Procesos físicos (mecánicos), químicos y biológicos como medidas de tratamiento .....	67

## SUMÁRIO

### Lista de figuras

Figura 1.	Esquema de la génesis tectónica .....	19
Figura 2.	Tipos de zonas de tensión tectónica .....	20
Figura 3.	Ejemplo de lagos de cráter .....	20
Figura 4.	Lagos de tipo «maar» .....	20
Figura 5.	Ejemplo de lago de caldera .....	21
Figura 6.	Ejemplo de lago con barrera volcánica .....	21
Figura 7.	Ejemplo de lago en circo .....	21
Figura 8.	Lago de morena .....	22
Figura 9.	Ejemplo de lago de fiordos .....	22
Figura 10.	Ejemplo de lago formado en un terreno de sedimentación glacial .....	22
Figura 11.	Lagos de solubilización de rocas de sal gema .....	23
Figura 12.	Lagos de solubilización de rocas de gipsita .....	23
Figura 13.	Lagos formados por la actividad de castores ( <i>Castor canadensis</i> y <i>Castor fiber</i> ) .....	24
Figura 14.	Ejemplo de lago formado a partir del impacto de un meteorito y ejemplares de meteorito .....	25
Figura 15.	Ejemplo de lago de barrera .....	25
Figura 16.	Formación de lago de meandro abandonado; vista de un lago de meandro .....	26
Figura 17.	Vista de lago de inundación .....	26
Figura 18.	Vista de la Laguna de Abaeté (Bahía) .....	26
Figura 19.	Vista de una laguna de ensenada .....	27
Figura 20.	Vista de un lago de desembocadura .....	27
Figura 21.	Vista de arrecife de coral que intercepta un río .....	27
Figura 22.	Vista de un lago formado por deposición mixta .....	28
Figura 23.	Vista de una laguna de restinga .....	28
Figura 24.	Ejemplo de represa y embalse .....	29
Figura 25.	Corte con los diversos compartimientos de un ecosistema lacustre .....	31
Figura 26.	Características de la molécula de agua y su estructura .....	32
Figura 27.	Moléculas de agua formando puentes de hidrógeno y agrupaciones .....	32
Figura 28.	Formación de la tensión superficial y aspecto de la importancia ecológica .....	33
Figura 29.	Diagrama del comportamiento de la radiación solar en un ambiente acuático .....	34
Figura 30.	Algunos aspectos de la radiación sobre ciertos componentes del ambiente acuático .....	35
Figura 31.	Esquema de la radiación solar en el Planeta; como se ve en las figuras 32 y 33, una parte es absorbida por el bioma acuático .....	35
Figura 32.	Esquema sobre el efecto de la radiación sobre la molécula de agua .....	36
Figura 33.	Esquema que destaca la dispersión y absorción de los diversos componentes del ecosistema hídrico .....	36
Figura 34.	Esquema de la dispersión en el agua según la amplitud de onda .....	37
Figura 35 A.	Disco de Secchi atado con una cuerda graduada .....	37
Figura 35 B.	Esquema de la medición de la transparencia del agua con disco de Secchi .....	38
Figura 36.	Esquema de la estratificación térmica en los lagos .....	38
Figura 37.	Ejemplos de estratificación y desestratificación en lagos .....	40
Figura 38.	Ejemplos de interacciones relacionadas con el carbono .....	43
Figura 39.	Ejemplo de la dinámica del fósforo relacionada con su interacción agua/sedimento .....	44
Figura 40.	Esquema con los diversos tipos de macrófitas acuáticas relacionadas con su posición en el ambiente hídrico .....	44
Figura 41.	Ejemplos de macrófitas acuáticas en diferentes nichos ecológicos .....	45
Figura 42 A.	Cianobacteria (ejemplo) .....	46
Figura 42 B.	Chlorophyta .....	46
Figura 42 C.	Euglenophyta .....	47
Figura 42 D.	Chrysophyta .....	47
Figura 42 E.	Pyrrophyta .....	47
Figura 42 F.	Ejemplos de los grupos genéricamente denominados «algas» .....	48
Figura 43.	Representantes de la comunidad zooplanctónica .....	50
Figura 44.	Esquema de algunos representantes del zooplancton .....	51
Figura 45.	Clasificación según la comunidad zooplanctónica para reservorios .....	52
Figura 46.	Esquema de algunos representantes de la comunidad bentónica .....	53
Figura 47.	Dibujo esquemático de las principales placas tectónicas del Planeta .....	56
Figura 48.	Ejemplo simplificado de la dinámica atmosférica del Planeta .....	57
Figura 49.	Esquema de algunos aspectos de un terremoto .....	57
Figura 50.	Algunos aspectos de la actividad volcánica .....	58

## SUMÁRIO

Figura 51.	Ejemplos de sucesión ecológica .....	58
Figura 52.	Ejemplo de eutrofización natural .....	59
Figura 53.	Esquema de la curva hipotética de la eutrofización relacionada con factores naturales y artificiales .....	60
Figura 54.	Esquema de las consecuencias del proceso de eutrofización artificial, a través del aporte de P y N, en el ecosistema lacustre .....	64
Figura 55.	Esquema simplificado de eutrofización artificial modificando el equilibrio del ecosistema lacustre .....	64
Figura 56.	Esquema del proceso de autodepuración a lo largo del tiempo tras aporte de nutrientes (efluente doméstico) .....	65
Figura 57.	Esquema simplificado de las interrelaciones de los factores que afectan al metabolismo de un lago, relacionado con la productividad .....	66
Figura 58.	Polución de las aguas por fuentes difusas (a) y puntuales (b) .....	72
Figura 59.	Variación espacial y temporal del índice de calidad de agua (ICA) de 2005 y 2015 en el estado de São Paulo (Midaglia, C.L., 2016) .....	80
Figura 60.	Evolución de la carga remanente en el estado de São Paulo, 2010 a 2015 (CETESB, 2016) .....	82
Figura 61.	Carga remanente de DBO por Unidad de Gestión de Recursos Hídricos (UGRHI) (CETESB, 2016) .....	83
Figura 62.	Transporte de contaminantes de origen difuso por la superficie y la subsuperficie (adaptado de Novotny, 2003) .....	83
Figura 63.	Variaciones en las cargas unitarias de sedimentos suspensos, fósforo total, nitrógeno total y plomo en la Región de los Grandes Lagos, Estados Unidos, en 1970, antes de la prohibición del plomo en los combustibles. Usos del suelo: 1. Agricultura en general, 2. Cultivos agrícolas; 3. Pastoreo; 4. Bosques; 5. Cultivos perennes/exóticos; 6. Lodo de aguas residuales; 7. Riego por aspersión; 8. Urbano en general; 9. Residencial; 10. Comercial; 11. Industrial; 12. Urbano en desarrollo (Fuente: Novotny, 2003) .....	86
Figura 64.	Concepto de first-flush. En un evento de drenaje urbano el flujo pico en el hidrograma puede contener una mayor fracción de la carga contaminante que en la fracción final (adaptado de Novotny, 2003) .....	87
Figura 65.	Relación entre el coeficiente de drenaje ( $CD = \text{volumen de drenaje} / \text{volumen de precipitación}$ ) y el porcentaje de áreas impermeables en áreas urbanas obtenido a partir del estudio NURP (Fuente: Novotny, 2003) .....	89



# ASPECTOS INTRODUCTORIOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

**BIOL. DR. CLAUDIO ROBERTO PALOMBO**

*Cadernos da  
Gestão do Conhecimento*



## Introdução geral

La limnología es la ciencia que estudia las aguas denominadas «dulces» o aguas interiores. Nació a comienzos del siglo XIX y se ha desarrollado y ha ampliado los conocimientos con el fin de responder mejor a la potencialmente creciente demanda para suplir las necesidades humanas del abastecimiento humano, la agricultura y la industria.

Como consecuencia de todas esas actividades, la calidad del agua que abastecerá a cada una de esas demandas exigirá, cada vez más, conocimientos que van desde el punto inicial de producción del agua, sus múltiples usos hasta su deshecho en algún punto del planeta, que puede ser puntual o disperso.

Debido a enorme cantidad de conocimientos necesarios para la plena comprensión del ciclo del agua en ese contexto, fue necesario dividirlo en diversos capítulos, en los cuales se debatirán desde el ambiente natural sin interferencia antrópica hasta las consecuencias de cada actividad humana sobre los cuerpos de agua.

En esta introducción al curso, se destacarán los aspectos teóricos y técnicos de los ambientes limnéticos léntico y lótico natural, sin la interferencia humana, para poder fijarnos luego, a lo largo del curso, en las modificaciones del ambiente acuático en los diversos niveles dentro del ecosistema.

En vista de lo expuesto, en ocasiones se observará una duplicidad de información; sin embargo, serán más detalladas en cada sección, para que, al final del curso, el alumno tenga la capacidad de comprender y evaluar las complejas relaciones de los diversos parámetros ambientales, físicos, químicos y biológicos en la dinámica de los ambientes hídricos en este planeta llamado Tierra (es lo que ecología se denomina «ecosfera»).



## ASPECTOS INTRODUCTORIOS DE CALIDAD DE LAS AGUAS

### **I. Introducción**

La limnología es la ciencia que estudia el ambiente acuático «dulce», tanto en el medio léntico (ambiente de aguas paradas o de poco movimiento, como lagos, lagunas y reservorios), como en el medio lótico (ambiente de aguas movidas, tales como ríos y rápidos). Es un término compuesto procedente del griego: *Límné*, que significa «pantano, lago, laguna», y el sufijo *Logos*, estudio.

Así, la limnología es la parte de la ciencia ambiental dirigida a la comprensión del comportamiento del ambiente acuático en sus más diversos aspectos ecológicos, es decir, la correlación entre los parámetros físicos, químicos y biológicos en la dinámica de los diversos cuerpos hídricos que se encuentran en el Planeta.

Un enfoque que debe tenerse siempre en mente es que **«cada lago es un órgano de la Tierra»**. Eso significa que se debe considerar cada ambiente acuático como único y que, aunque puedan compararse entre ellos, nunca son iguales en sus más diversos aspectos ecológicos.

Durante la historia de las ciencias ambientales, ha habido diversos intentos de clasificar los ambientes acuáticos. Uno de ellos se fijaba en su situación geográfica, como tropicales, templados, etc.; otro consideraba los aspectos químicos del agua, como la ausencia o presencia de oxígeno disuelto durante el año. Como ni la dinámica acuática ni la posición geográfica definen condiciones idénticas, esos intentos no surtieron el efecto deseado, por lo que se situó la clasificación de los cuerpos de agua en un contexto más amplio, que recurría a conceptos ecológicos pertinentes.

Así, por ejemplo, en el caso de Brasil, la atención en esos ambientes estaba relacionada principalmente con las enfermedades de transmisión hídrica, fundamentalmente las que ocasionaban epidemias generalizadas, según se vio en la historia del país.

En relación con las necesidades de agua para los ecosistemas acuáticos y para la humanidad, la literatura especializada pertinente ofrece diversos valores, dependiendo del lugar y del desarrollo social. Normalmente se definen valores entre un mínimo y un máximo para las diversas actividades humanas, pudiéndose destacar desde los aspectos fisiológicos internos a los externos (orina y heces), hasta las actividades doméstica e industrial, la producción de alimento y la agricultura en general, etc.

### **II. Actividades de la limnología**

Desde su concepción hasta la actualidad, la limnología se fue estructurando como ciencia, investigando el metabolismo de los ecosistemas acuáticos continentales, con las siguientes etapas:

- Análisis: investigación de las variables ambientales;
- Síntesis: cambios de energía y materia, relacionados con el manejo y la maximización;
- Holística: interacciones entre el ecosistema acuático y terrestre.

Sirviéndose de esas concepciones, se llevaron a cabo investigaciones y estudios para la acuicultura mundial; piscicultura, cría de crustáceos y otros organismos de interés comercial; minimización de los efectos ecológicos negativos de la creación de lagos artificiales en relación con las fases de inventario, viabilidad, proyecto básico, construcción y operación; utilización racional de los recursos hídricos; control de la calidad del agua para los diversos fines y recuperación de los ecosistemas acuáticos.

### III. *Distribución del agua en el Planeta*

En la literatura se encuentran diversas tablas, con los más variados valores, de la distribución del agua en los más diversos ambientes terrestres. Se puede destacar la localización de los ecosistemas acuáticos, sus respectivos volúmenes y porcentajes relativos. La Tabla 1 muestra uno de los ejemplos presentes en la literatura pertinente.

Tabla 1. Distribución del agua en la Tierra.

Reservorios	Volumen (km <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)
Océanos	1 320 305 000	97,24
Glaciares y casquetes polares	29 155 000	2,14
Aguas subterráneas	8 330 000	0,61
Lagos	124 950	0,009
Mares	104 125	0,008
Humedad del suelo	66 640	0,005
Atmósfera	12 911	0,001
Ríos	1.250	0,0001
<b>TOTAL</b>	<b>1 358 099 876</b>	<b>100</b>

### IV. *La génesis de los ecosistemas lacustres*

La naturaleza crea constantemente «agujeros» que son rellenados por agua, formándose así nuevos cuerpos de agua, considerados genéricamente como génesis de los ecosistemas lacustres (posteriormente se verá el caso de los ríos).

Dentro de esta concepción, tenemos:

## Lagos formados por movimientos diferenciales de la corteza terrestre:

- ▶ Por movimientos epirogénicos

Caracterizado como un proceso diastrófico (tectónico) de gran amplitud, por movimientos lentos de subida o bajada, de grandes áreas de la corteza terrestre, llevando a la formación de continentes; epirogénesis. En la Figura 1 se observa un esquema de tectónica de placas, destacando las respectivas génesis.

## Tectónica de placas

**Presiones del interior de la Tierra suben a la corteza:  
Pueden ser epirogénesis y orogénesis**

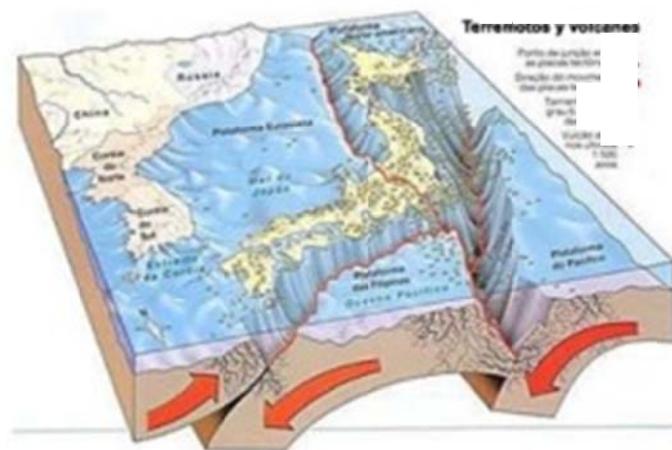


Figura 1 – Esquema de la génesis tectónica

Ejemplos de ese tipo de lagos son el mar Caspio y el Aral (Rusia), Okeechobee (Estados Unidos), Victoria (África central), Kioga (África oriental).

- ▶ Por fallas tectónicas

Resultan de movimientos tectónicos que causan la discontinuidad de la corteza terrestre. Ejemplos de ese tipo son los lagos Baikal (Rusia), Tanganica, Edward y Albert (África), Tahoe (Estados Unidos), Grande de Manacapuru, Anamá, Badajós, Piorini y Mina (Brasil). En la Figura 2 se destacan los tipos de zonas de tensión tectónica.

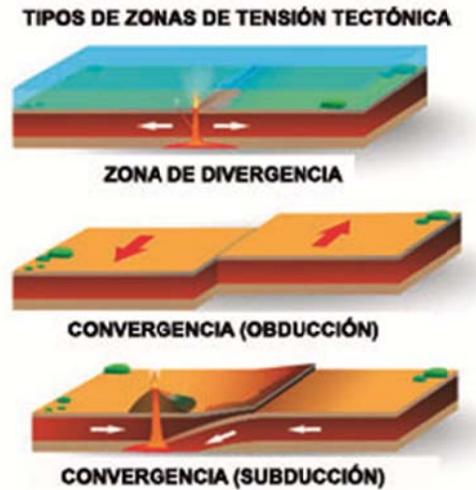


Figura 2. Tipos de zonas de tensión tectónica

### Lagos de origen volcánico

Pueden formarse a partir del cono de deyección del volcán o del represamiento de valles debido al magma.

La Figura 3 muestra un ejemplo de lago de cráter. En el planeta se pueden destacar el Big Soda (Estados Unidos) y Rotomahana (Nueva Zelanda).



Figura 3. Ejemplo de lagos de cráter



Figura 4 - Lagos de tipo «maar»

La Figura 4 muestra un ejemplo de lago tipo «maar», que surgen a partir de explosiones gaseosas subterráneas, seguidas del hundimiento de la superficie de la región afectada.

Ejemplos de este tipo se encuentran en Alemania (Toten, Gemündener y Weifelder).

Los lagos de caldera se forman por una erupción volcánica intensa, con la destrucción del cono central. Ejemplos de ellos son los lagos Crater (Estados Unidos), Bolsena y Albaner (Italia) y Toyako (Japón).

La Figura 5 muestra un ejemplo de estos tipos de lago.



**Figura 5.** Ejemplo de lago de caldera



**Figura 6.** Ejemplo de lago con barrera volcánica

Los lagos de barrera volcánica se forman en los valles preexistentes por la lava solidificada. Ejemplos son los lagos Kivu y Bunyoni (África central).

La Figura 6 muestra la presencia de la barrera volcánica.

## Lagos glaciares

Se formaron durante la última glaciación, aproximadamente hace 10 500 años, y se sitúan en regiones de alta latitud, en zonas templadas. Así, se presentan en diversas configuraciones, entre las que destacan las siguientes:

Los lagos en circo resultan de la acción de la congelación y la descongelación, son pequeños y poco profundos, comunes en las montañas, con forma circular o de anfiteatro.

Ejemplos: Watendlath (Inglaterra), Wildseelodersee (Austria) y varios en la cordillera de Alaska.

La Figura 7 muestra un lago en circo.



**Figura 7.** Ejemplo de lago en circo



**Figura 8** .Lago de morena

Los lagos de morena se formaron por la obstrucción de valles debido a los sedimentos transportados por glaciares, normalmente por bloques de arcilla.

Ejemplos: Lucerna (Suiza), Constanza (Alemania-Suiza), Finger (Estados Unidos).

En la Figura 8 se puede ver un ejemplo.

Los lagos de fiordos resultan de la excavación de valles en las laderas de las montañas por la acción de la erosión glacial; son largos, estrechos y profundos.

Ejemplo: lagos del oeste de Noruega.

En la figura 9 se ve un lago de este tipo.



**Figura 9.** Ejemplo de lago de fiordos



**Figura 10.** Ejemplo de lago formado en terreno de sedimentación glacial

Los lagos de terreno de sedimentación glacial pueden estar formados por la depresión existente en zonas de antiguos glaciares continentales, por bloques de hielo que se desprendieron de los glaciares y por una mezcla de los anteriores. Ejemplos del primer caso son los lagos Grosse Ploner (Alemania), Barret (Estados Unidos), y del segundo y el tercero el lago Pluss (Alemania).

La Figura 10 muestra un ejemplo del primer tipo.

### Lagos formados por la disolución de rocas (lagos de disolución o erosión)

Resultan de la acumulación de agua en depresiones formadas a partir de la solubilización de rocas calcáreas, de cloruro de sodio o de sulfato de calcio, denominadas *sal gema* y *gipsita*, respectivamente

Los lagos de erosión de rocas calcáreas o dolinas se encuentran en las regiones calcáreas de los Alpes, parte de Florida y de la península balcánica (antigua Yugoslavia). Ejemplos: lago Luner (Alpes austríacos), Seewli (Alpes suizos), Deep, Iamonia y Jackson (Estados Unidos) y Vrana (península balcánica). Normalmente son lagos pequeños y circulares; sin embargo, pueden fundirse entre sí, y un ejemplo es el lago Muten (Suiza). En Brasil, en Uberlândia, se encuentra el lago Poço Verde (MG); otros de las mismas características se encuentran en la costa oeste de Francia y en Siberia. En la Figura 11 se observa un lago y una roca de sal gema.



**Figura 11.** Lagos de solubilización de rocas de sal gema.

Lagos formados por la disolución de rocas de gipsita. Ejemplos: La Girotte, Tignes (Alpes Franceses), Magalhães y Uberaba (Brasil). En la Figura 12 se ve un lago y una roca de gipsita.



**Figura 12 –** Lagos de solubilización de rocas de gipsita

La actividad biológica también participa activamente en la «construcción» de sistemas de retención natural, creando un hábitat adecuado para sus necesidades ecológicas. Al respecto se puede destacar la actividad de los castores, en el Canadá, Estados Unidos y Europa. Estos animales utilizan ramas, barro, etc., Ejemplo: Lagos Beaver y Echo (Estados Unidos).

En la Figura 13 se pueden ver lagos de barrera y se destacan las dos principales especies que poseen ese comportamiento.



**Figura 13.** Lagos formados por la actividad de castores (*Castor canadensis* y *Castor fiber*)

Son raros los lagos formados por el impacto de meteoritos. La potencia del impacto del meteorito sobre la superficie terrestre está directamente relacionada con el tamaño de la cavidad producida. Ejemplo: Laguna Negra (Argentina) y Lago Chubb (Canadá). La Figura 14 muestra un ejemplo de lago y de meteorito.



**Figura 14.** Ejemplo de lago formado a partir del impacto de un meteorito y ejemplares de meteorito.

### Lagos formados por la actividad de ríos

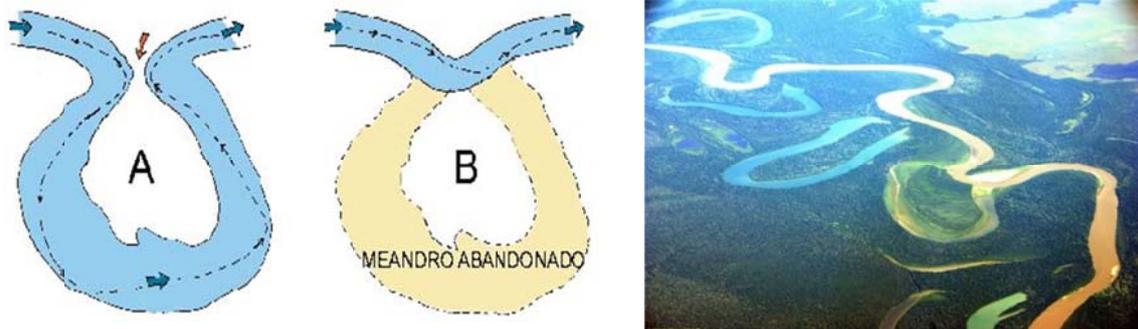
Los ríos pueden formar lagos de varias maneras, entre las que destacan:

*Lagos de barrera.* El río principal transporta cantidades de sedimentos que se depositan a lo largo del lecho, provocando un aumento de su nivel y, como consecuencia, su represamiento. Ejemplo: Lago Don Helvécio, Carioca, Belgo Minera, Trinta e Três y Jacaré (parte media del Río Doce) y varios en la Amazonia en tierra firme.



**Figura 15.** Ejemplo de lago de barrera

*Lagos de herradura o de meandros.* Algunos ríos presentan sinuosidades denominadas *meandros*. Estos lagos se forman por el aislamiento de los meandros por erosión y sedimentación en las márgenes (en inglés «oxbow lakes» y en alemán «Altwasser»). Son muy frecuentes en Brasil, principalmente en el Pantanal de Mato Grosso y en la región amazónica, allí conocidos como *sacados*. En São Paulo pueden ser vistos en el Río Mogi-Guaçu y también en el río Paraíba do Sul. En la Figura 16 se ve la formación de un lago por la interceptación de un meandro y un ejemplo.



**Figura 16.** Formación de un lago de meandro abandonado; vista de un lago de meandro.



**Figura 17.** Vista de la un lago de inundación

*Lagos de inundación.* Formados a partir de la gran variación del nivel de agua, principalmente por las precipitaciones. En el Pantanal del estado de Mato Grosso se denominan *bahías* y en la llanura amazónica *lagos de várzeas*. Existen incontables ejemplos, como el lago Castanho, Maicá, Redondo o Poção, por citar solo algunos.

También hay que destacar que en el periodo de lluvias se puede dar una intercomunicación entre los diversos lagos, formando un único sistema; en la época de sequía, permanecen aislados o se comunican por canales.

La Figura 17 muestra un ejemplo.

*Lagos formados por la actividad del viento (barrera eólica).* Se forman a partir de la deposición de arena en un río, y se dan a menudo en el nordeste brasileño. Ejemplos: Laguna Abaeté, en el estado de Bahía, y las pequeñas lagunas en el litoral sur del estado de Santa Catarina.

En la figura 18 se muestra la Laguna Abaeté (Bahía).



**Figura 18.** Vista la laguna Abaeté

## Lagos asociados a la línea costera (lagunas costeras)

Para comprender la dinámica de la formación de los lagos costeros, denominados de varias formas en la literatura, se han descrito algunas configuraciones, en particular:



**Figura 19.** Vista de una laguna de enseada

*Aislamiento de enseada marina o brazo de mar.* La formación de esos lagos se basa en la existencia de cordones de arena que se desarrollan a partir de promontorios rocosos. Su aumento progresivo se debe a la deposición de sedimentos marinos, la acción de corrientes y olas de sumersión marina. Ejemplos: Manguera, dos Quadros (Rio Grande do Sul), Araruana, Saquarema (Rio de Janeiro).

En la Figura 19 se ve un ejemplo de este tipo.

*Cierre de la desembocadura de ríos por sedimento marinos.* Se originan por la deposición de sedimentos marinos en la desembocadura de pequeños ríos o por aislamiento del estuario de varios ríos. Ejemplos: Laguna de Mundaú y Manguaba (Alagoas), Carapebus, Comprida y Cabiúnas (Rio de Janeiro).



**Figura 20.** Vista de un lago de desembocadura

En la Figura 20 se ve un ejemplo de este tipo.



**Figura 21.** Vista de un arrecife de coral que intercepta un río

*Cierre de la desembocadura de ríos por arrecifes de coral.* Esta estructura biológica puede represar la desembocadura de ríos cercanos al mar. Ejemplo: la laguna de Rodeio (Alagoas), en un cierre formado por el río São Miguel.

En la Figura 21 se ve un ejemplo de este tipo de acción.

*Cierre de la desembocadura de ríos por sedimentos fluviomarinos.* Originado a partir de sedimentos de origen fluvial y marino. Ejemplo: Laguna Feia (Rio de Janeiro), Juparanã, Nova, Palminhas, Palmas (Espírito Santo).

En la Figura 22 se ve un ejemplo de este tipo.



**Figura 22.** Vista de un lago formado por deposición mixta.



**Figura 23.** Vista de una laguna de restinga

Depresión entre las franjas de arena que constituyen las restingas. Son morfológicamente planas y las abastecen pequeños arroyos y el agua de la lluvia. Ejemplo: Laguna Água Negra, Taí. Grande e Pequeno, Periperi y Robalo (Rio de Janeiro).

En la Figura 23 se ve un ejemplo.

### **Represas y embalses (origen antrópico)**

Las diversas actividades humanas interactúan con el ambiente natural de varias formas. Una de ellas, de gran relevancia, es la interceptación de ambientes lóticos transformándolos en lénticos. Tales modificaciones acarrear alteraciones bastante significativas de la dinámica de los ecosistemas acuáticos. De esa forma, el estudio particularizado de cada nuevo ambiente formado requiere contar con información desde antes de la construcción hasta la fase final de implantación de la obra.

De hecho, todas las civilizaciones de la historia humana siempre han hecho obras para contar con recursos hídricos de manera constante y permanente.

Por tanto, este asunto exige un detalle que se irá exponiendo paulatinamente a lo largo de este curso. Por eso, aquí se citará apenas con carácter didáctico. Cabe destacar también que, debido a la importancia de este tema, hay varios conceptos que podrán repetirse durante el curso.

La Figura 24 muestra un ejemplo de represa y de embalse.



**Figura 24.** Ejemplo de represa y de embalse

#### **V. *Tiempo de residencia***

El tiempo de residencia se define como la cantidad media de tiempo que una partícula pasa en un sistema concreto; esa medida varía directamente en función de la cantidad de sustancia que está presente en el sistema, según la siguiente fórmula.

$$\frac{\text{Capacidad de un sistema para retener una sustancia}}{\text{Tasa de flujo de la sustancia en el sistema}}$$

o

$$\gamma = \frac{V}{q}$$

donde  $\gamma$  se usa como la variable para el tiempo de residencia,  $V$  es la capacidad del sistema y  $q$  es el flujo para el sistema.

La Tabla 2, describe uno de los ejemplos de la literatura, del tiempo de residencia del agua.

**Tabla 2.** Tiempo de residencia del agua.

COMPARTIMIENTOS	TIEMPO DE RESIDENCIA
Océanos	3.000 a 30.000 años*
Glaciares	1 a 16.000 años*
Aguas subterráneas	330 a 10.000 años*)
Lagos y reservorios	1 a 100 años*
Lagos salinos	10 a 10.000 años*
Humedad del suelo	2 semanas a 1 año
Humedad biológica (plantas y animales)	1 semana
Atmósfera	8 a 10 días
Pantanos y marismas	Meses a años
Ríos y arroyos	10 a 30 días

\*depende de la profundidad y otros factores ambientales

## **VI. Aguas continentales**

Las aguas continentales son las presentes en la superficie de la Tierra, distribuidas en ríos, lagos y glaciares —aunque la mayoría son subterráneas—, con una salinidad próxima de cero, por oposición al agua marina, cuya salinidad está cerca de 35 gramos de sales disueltas por litro, además del agua salubre, como la de los estuarios, que tiene una salinidad intermedia.

### ▶ **Características**

- ♦ Alta capacidad para solubilización de compuestos orgánicos e inorgánicos;
- ♦ Gradientes verticales y horizontales a través de la distribución desigual de luz, nutrientes, temperatura, gases (distribución de los organismos);
- ♦ Bajo contenido en sales disueltas → mayoría de los organismos hipertónicos → mantenimiento del equilibrio osmótico;
- ♦ Alta densidad y viscosidad (775 veces más densa que el aire) → organismos presentan profundas adaptaciones morfofisiológicas.

► **Compartimentos**

➤ *Región costera*

- ◆ Contacto entre el ecosistema terrestre y acuático (transición = ecotono);
- ◆ gran número de nichos ecológicos y cadenas alimentarias, tanto de herbívoros como de detritívoros (representantes: oligoquetos, moluscos, crustáceos, insectos);
- ◆ Todos los niveles tróficos: considerado como compartimiento autónomo;
- ◆ Poco desarrollada o ausente en lagos volcánicos;
- ◆ Se subdivide en eulitoral y sublitoral.

➤ *Región limnética o pelágica*

- ◆ Comunidades características: plancton y necton;

➤ *Región profunda*

- ◆ Ausencia de organismos fotoautotróficos;
- ◆ Comunidad bentónica formada por oligoquetos, crustáceos, moluscos, insectos;
- ◆ La diversidad y densidad poblacional dependen de la cantidad de alimento y oxígeno disuelto.

➤ Interfaz agua/aire

- Comunidades: neuston (bacterias, hongos, algas) y pleuston (macrófitas e insectos)

En la Figura 25 se destacan cada uno de esos compartimentos.

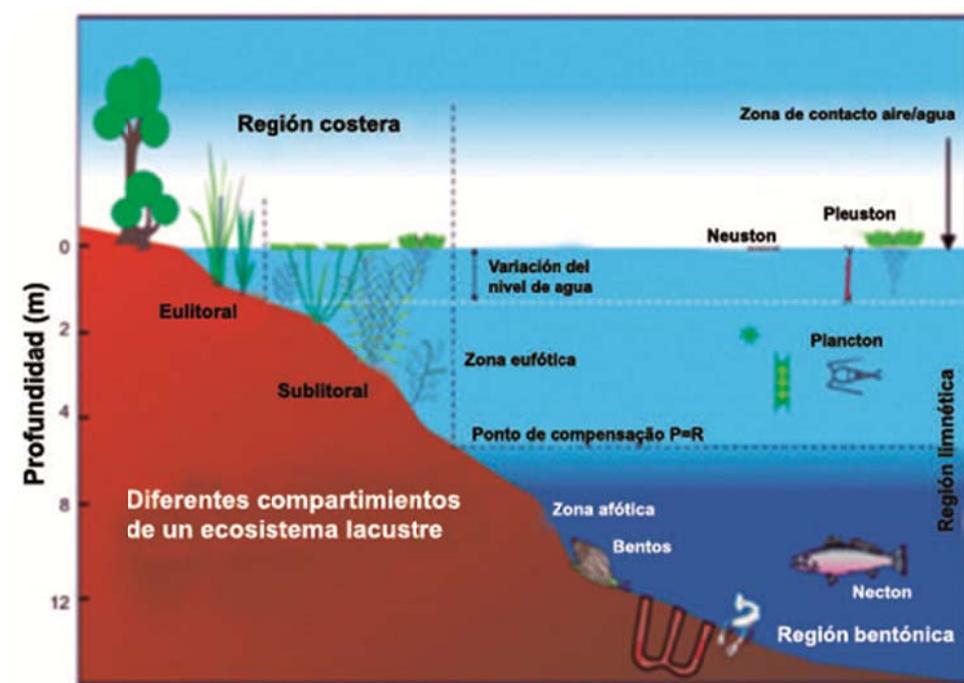


Figura 25. Corte con los diversos compartimentos de un ecosistema lacustre.

## VII. Propiedades físicas y químicas del agua y su importancia limnológica.

Discutir la importancia del agua en la limnología sería algo extremadamente redundante; sin embargo, hay que considerar algunos aspectos relevantes para entender mejor los ecosistemas acuáticos (Figuras 26 y 27)

Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

- La molécula de agua

Una simple búsqueda del término *molécula de agua* en un buscador mostrará la enorme cantidad de información disponible. Por ello, aquí solo trataremos solo algunos aspectos especialmente relevantes.

Las figuras 26 y 27 muestran algunas de las propiedades del agua, de gran interés para la limnología, pues conllevan condiciones ambientales que actúan directamente en el comportamiento de la limnosfera (físico y químico) y la biósfera (comunidad biológica).

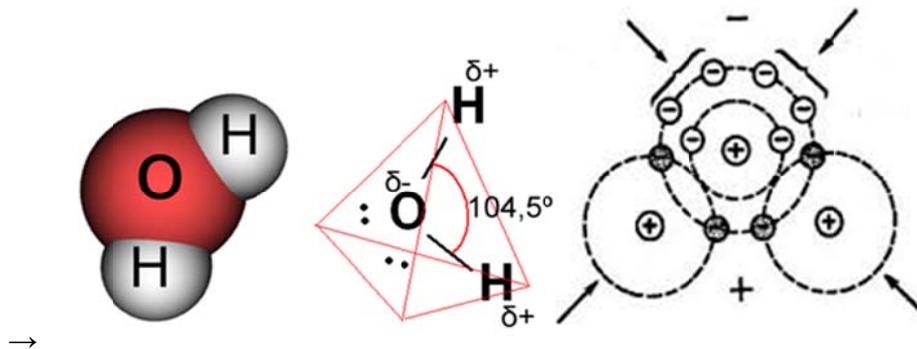


Figura 26. Características de la molécula de agua y su estructura.

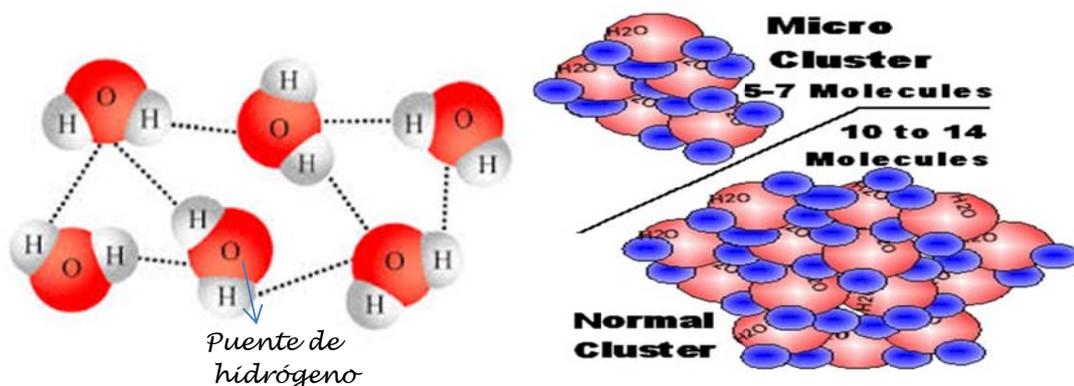


Figura 27. Moléculas de agua formando puentes de hidrógeno y agrupaciones.

❖ Propiedades del agua

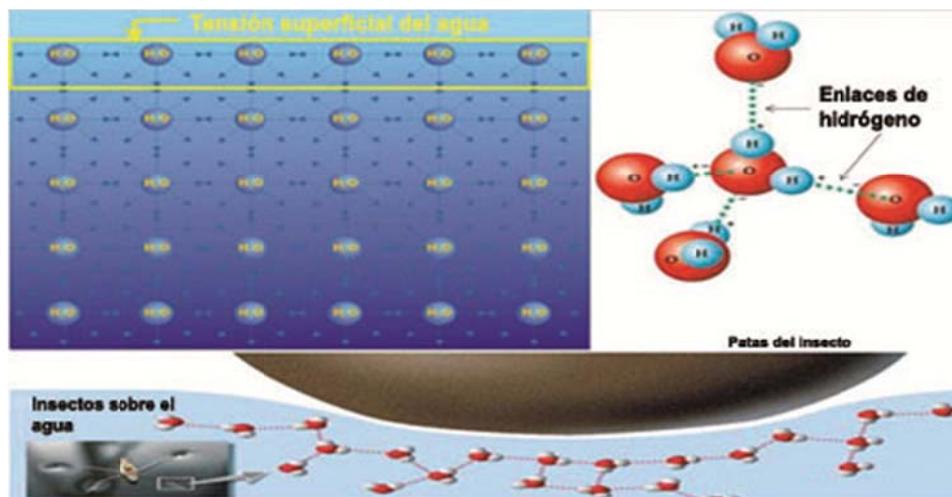
En la tabla 3 se describen algunas de las propiedades del agua, principalmente las relacionadas con sus aspectos limnológicos más significativos.

**Tabla 3.** Propiedades del agua

Propiedad	Característica
Punto de fusión a 1 atm	0,00 °C
Punto triple	0,01 °C, 4,60 torr .cm <sup>3</sup>
punto de ebullición a 1 atm	100,00 °C
Punto crítico	347,0 °C, 218 atm
Densidad sólido 0 ° C	0,917 g .cm <sup>3</sup>
Densidad líquido de 0 ° C	0,999 g .cm <sup>3</sup>
Densidad líquido de 4 ° C	1,000 g .cm <sup>3</sup>
Densidad líquido de 10 ° C	0,999 g .cm <sup>3</sup>
Densidad líquido de 25 ° C	0,997 g .cm <sup>3</sup>
Densidad líquido de 100 ° C	0,958 g .cm <sup>3</sup>
Capacidad calorífica líquido	1,00 cal. g <sup>1</sup> . °C <sup>1</sup>
Calor de fusión 0 ° C	1,44 kcal . mol <sup>1</sup>
Constante dieléctrica 25 ° C	78,5

❖ Tensión superficial del agua

**Tensión superficial:** efecto físico que se da en la interfaz entre dos fases químicas, haciendo que la capa **superficial** de un líquido se comporte como una membrana elástica. Esta propiedad se debe a las fuerzas de cohesión entre moléculas semejantes, cuya resultante vectorial es diferente en el punto de contacto (Figura 28).



**Figura 28.** Formación de la tensión superficial y aspecto de la importancia ecológica.

- Viscosidad del agua

**Viscosidad:** propiedad de los fluidos correspondiente al transporte microscópico de cantidad de movimiento por difusión; por lo tanto, cuanto mayor es la viscosidad, menor será la velocidad a que el fluido se mueve. En el ambiente acuático, deben tenerse en cuenta también la temperatura y el contenido de sales disueltas.

### VIII. Radiación en el medio acuático

En la Figura 29 están esquematizados algunos aspectos, con los respectivos ángulos de incidencia luminosa sobre un cuerpo hídrico. Destacan también las denominadas zona eufótica (donde se dan todos los procesos fóticos necesarios para el metabolismo acuático), y zona disfótica, no señalada en el esquema, que es el lugar donde se da el punto de compensación, es decir, la luz suficiente para la fotosíntesis de los autótrofos y afóticos sin más presencia de luz.

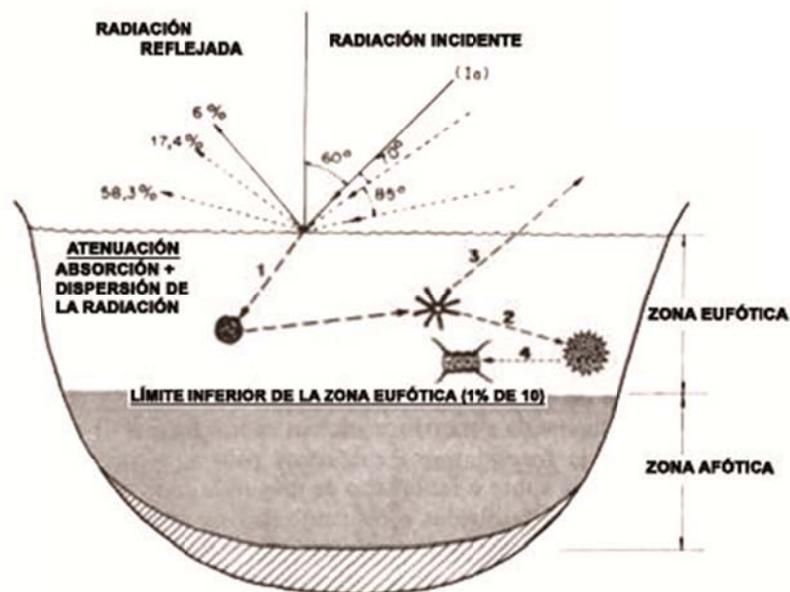
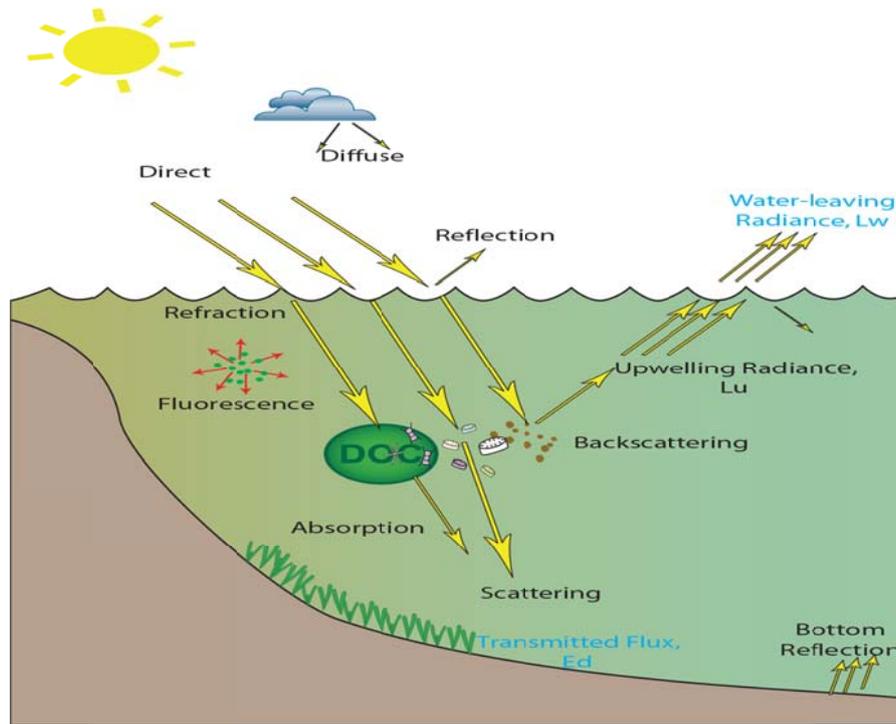


Figura 29. Diagrama del comportamiento de la radiación solar en un ambiente acuático.

La figura 30 muestra algunos aspectos de la radiación sobre algunos componentes del ambiente acuático.

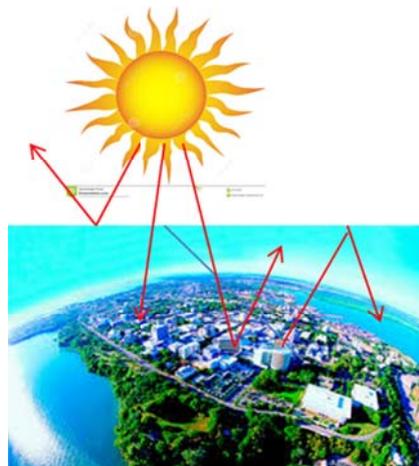


**Figura 30.** Algunos aspectos de la radiación sobre algunos componentes del ambiente acuático.

Debido a la complejidad de este tema en el contexto de los ecosistemas acuáticos, se considerarán algunos aspectos más relevantes para entender mejor su importancia y efectos ambientales.

❖ Procesos de absorción

- Radiación (Figura 31)



**Figura 31.** Esquema de la radiación solar en el Planeta; como se ve en las figuras 32 y 33, una parte es absorbida por el bioma acuático.

- Molécula de água (Figura 32)

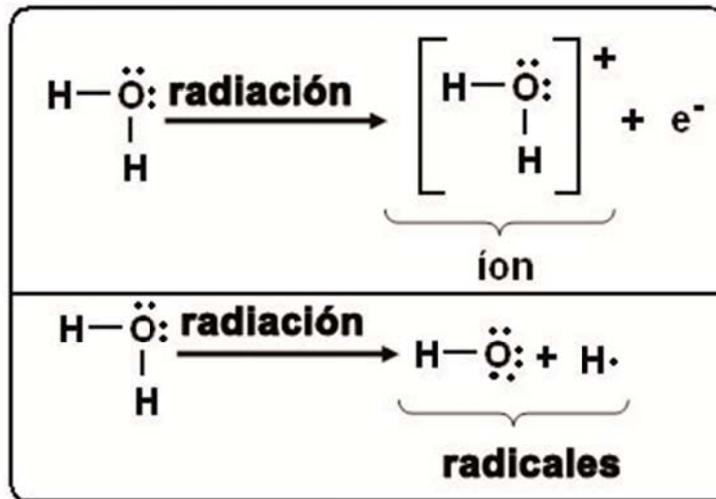


Figura 32. Esquema sobre o efeito da radiação sobre a molécula de água.

La Figura 33 destaca la incidencia luminosa, con la reflexión, dispersión y absorción en la dinámica energética del ecosistema acuático. Es necesario destacar los siguientes elementos, en el contexto de la dispersión y la absorción:

- Sustancias húmicas\*
- Organismos clorofilados

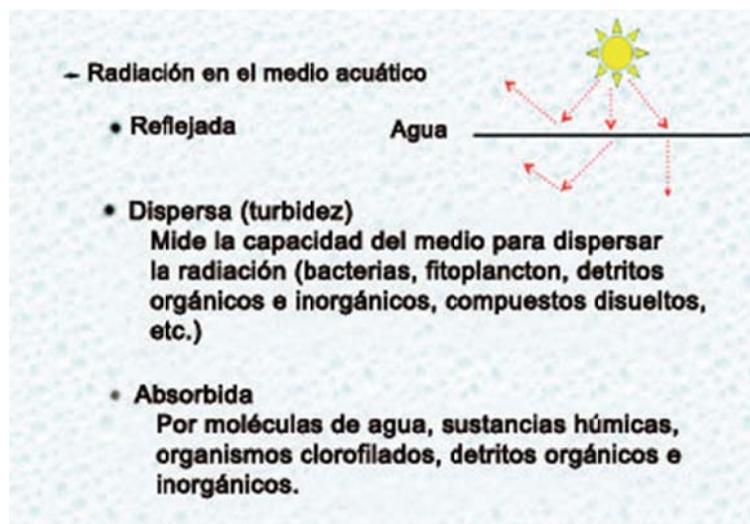
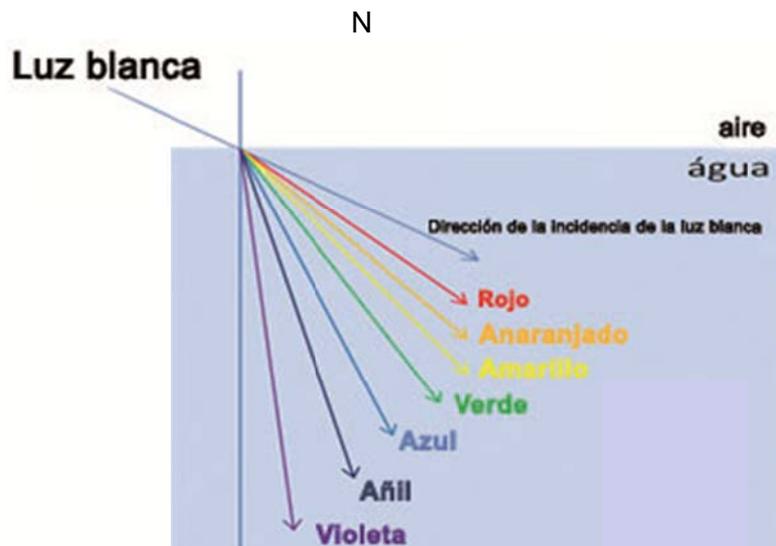


Figura 33. Esquema que destaca a dispersão e absorção dos diversos componentes do ecossistema hídrico.

**\*Sustancias húmicas:** mezcla compleja, dispersa y heterogénea de diversos compuestos orgánicos procedentes de restos de necromasa producida por los descomponedores (microorganismos = hongos y bacterias). Así, las sustancias húmicas existen en una gran variedad de estructuras y composiciones químicas (denominada sustancia universal de los ecosistemas).

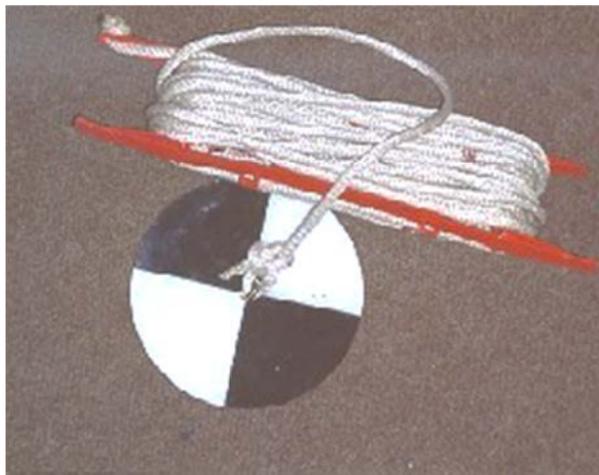
- Dispersión de la radiación (Figura 34)



**Figura 34.** Esquema de la dispersión en el agua según la amplitud de onda.

- Evaluación de la transparencia mediante el disco de Secchi\*

En las figuras 35 A y B se destacan el equipamiento (disco de Secchi) y un ejemplo de medida de transparencia mediante ese disco.



**Figura 35 A.** Disco de Secchi atado con una cuerda graduada.

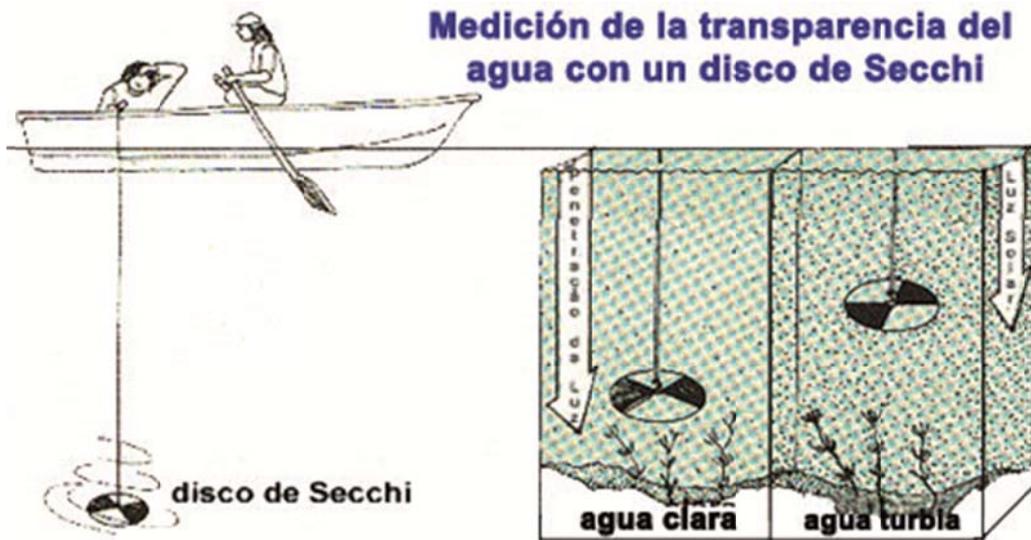


Figura 35 B. Esquema de la medición de la transparencia del agua con un disco de Secchi.

**Disco de Secchi** (creado en 1865 por Pietro Àngelo Secchi): disco especialmente construido para medir la transparencia y el nivel de turbidez de cuerpos de agua, como océanos, lagos y ríos. Tradicionalmente el disco se monta en una vara, cuerda o cinta, para bajarlo poco a poco a las profundidades de las aguas.

### **La radiación y sus múltiples efectos en aguas continentales**

La Figura 36 muestra un esquema sobre la estratificación térmica en un lago.

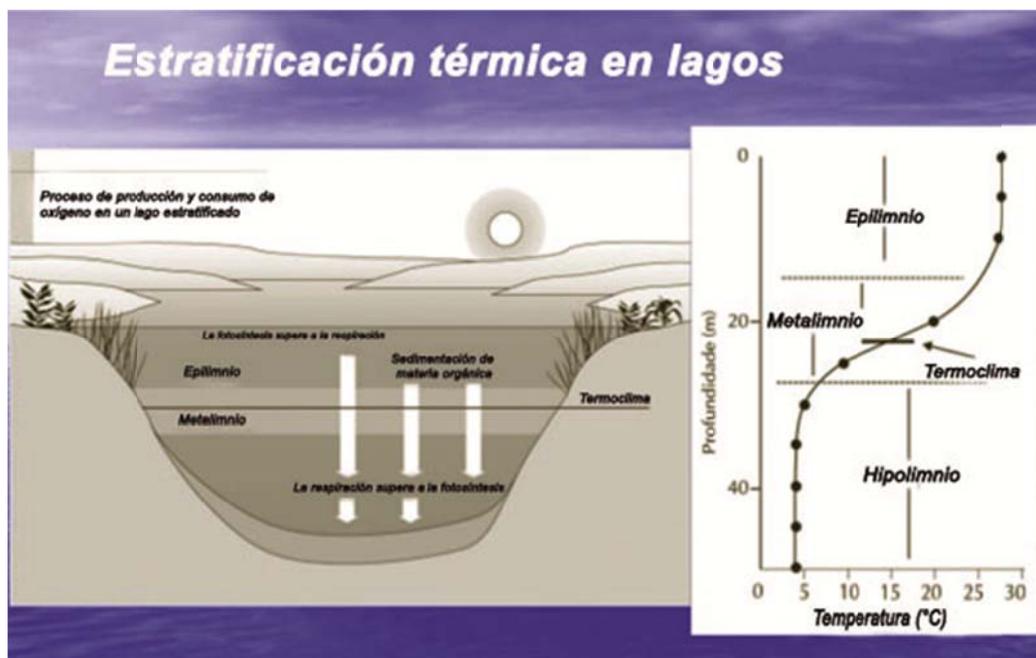


Figura 36. Esquema de la estratificación térmica en los lagos

- ❖ Efectos térmicos de la radiación sobre los cuerpos de agua
  - ▶ La inestabilidad y la estabilidad térmica de los cuerpos de agua
    - Inestabilidad: lagos que presentan una temperatura uniforme en toda la columna de agua;
    - Estabilidad: lagos que presentan estratificación térmica;
    - Los estratos que se forman son distintos desde el punto de vista físico, químico y biológico.
  
  - ▶ La estratificación térmica de los ecosistemas acuáticos continentales
    - Región de clima templado
      - Inicio de la primavera: destrucción de la capa de hielo – homotermia – circulación del agua - ± eficaz en lagos poco profundos;
      - Verano: la superficie se calienta – dificulta la mezcla – presencia de tres capas:
        - Epilimnio (superior) = temperatura uniforme y caliente;
        - Hipolimnio (inferior) = más fría y densidad máxima (~ 4 °C);
        - Metalimnio (intermediaria) = discontinuidad de temperatura → Termoclina;
      - Otoño: rotura de la estratificación térmica y circulación;
      - Invierno: congelación de la superficie – solo la inferior circula (estratificación de invierno).
    - Región de clima tropical
      - Estratificación y desestratificación diaria;
      - Estratificación de primavera, verano y otoño y desestratificación de invierno;
      - Dinámica asociada a la profundidad, variación estacional de temperatura, dirección de los vientos, posición geográfica del cuerpo de agua, presencia de macrófitas acuáticas en la región costera, etc.

La Figura 37 presenta ejemplos de estratificación y desestratificación térmica, relacionadas con el aspecto estacional y nictimeral.

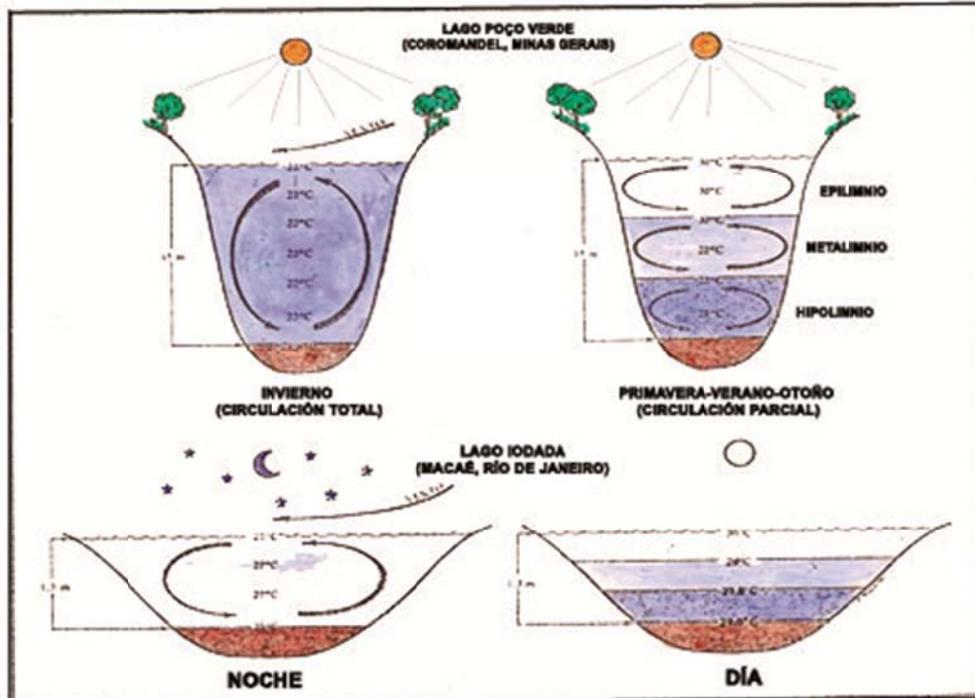


Figura 37. Exemplos de estratificação e desestratificação em lagos

❖ Classificação de los lagos en cuanto al número y tipos de circulación

- ▶ **Lagos holomícticos:** la circulación alcanza a toda la columna de agua
  - *Dimícticos:* dos circulaciones al año (otoño e invierno)
  - *Monomícticos:* una circulación al año
    - Monomíctico caliente: circulación solo en el invierno
    - Monomíctico frío: circulación solo en el verano
  - Oligomícticos y Polimícticos: lagos con pocas o muchas circulaciones al año
  - Oligomíctico: lagos profundos donde se dan escasas variaciones estacionales de temperatura
  - Polimíctico: poco profundos y muy extensos y con circulación diaria
  
- ▶ **Lagos meromícticos:** la circulación no alcanza a toda la columna de agua
  - *Meromixis geomorfológica*
  - *Meromixis química o ectogénica*

## IX. Elementos físicos, químicos y biológicos

### ❖ OXÍGENO DISUELTO

En el medio ambiente terrestre, el oxígeno procede del metabolismo fotosintético de las plantas, a través de procesos metabólicos complejos que se dan a nivel intracelular en los cloroplastos; en el medio acuático, ese elemento se denomina *oxígeno disuelto* (OD) y procede predominantemente de la fotosíntesis de la biótica acuática o por difusión en la superficie del agua (en menor medida).

La concentración de OD puede variar en función de algunas circunstancias, tales como:

- *La temperatura.* La solubilidad del oxígeno en el agua aumenta con la disminución de la temperatura. Por lo tanto, las aguas frías retienen más oxígeno que las aguas más calientes. En aguas frías, los niveles de oxígeno disuelto pueden alcanzar cerca de 10 ppm ( $\text{mg.L}^{-1}$ );
- *Salinidad.* Cuanto mayor sea la cantidad de sal disuelta en el agua, menor será el OD. Así, se puede decir que el agua del mar contiene menos OD que otras aguas;

➤ La solubilidad también depende de la *temperatura y la presión.*

#### ▶ Difusión y distribución

- *Dinámica en los lagos de región templada*
  - Hipolimnio con alto déficit de OD durante el verano (actividad de descomposición) en los lagos poco profundos y eutróficos; en los profundos y oligotróficos no hay interferencias en los niveles de OD.
- *Dinámica en los lagos de la región tropical*
  - La alta temperatura como factor controlador directo de la concentración de OD;
  - Factores controladores indirectos de la concentración de OD.
    - Extensión del periodo de estratificación térmica;
    - Concentración de materia orgánica (particulada y disuelta)

En el caso de Brasil, por ejemplo, deben destacarse algunos aspectos debido a la construcción de represas en bosques tropicales, que actúan de forma directa en la concentración de OD. La biomasa, en principio, transformada en necromasa tras el llenado, aumenta drásticamente el consumo del OD, alterando significativamente la calidad del agua del cuerpo hídrico. Dependiendo de las condiciones de estabilidad térmica del sistema, los estratos podrán sufrir anaerobiosis, con las consecuentes alteraciones en la biota acuática.

En ambientes acuáticos en proceso de eutrofización (enriquecimiento de nutrientes) puede darse una variación extremadamente elevada de la concentración de OD, llegando a picos en los periodos de mayor intensidad fótica y carencia en los demás.

En los lagos tropicales, debido a una dinámica compleja de variaciones ambientales relativas a varios parámetros, entre ellos el OD, durante el proceso evolutivo, algunos organismos acuáticos, como los peces, llevan a cabo diversas adaptaciones para soportar las bajas concentraciones de OD. Sin embargo, se debe tener en mente que esas adaptaciones ocurrieron en la historia geológica del Planeta y que los cambios rápidos no permiten la existencia de esa posibilidad, mostrando, desgraciadamente, eventos de mortandad de peces en varios episodios relatados en la literatura.

- OTROS ELEMENTOS

Para no extendernos en exceso en relación con las implicaciones de cada elemento presente en el ambiente acuático, su dinámica e interrelaciones del medio biótico/abiótico, se presentarán detalladamente durante el curso, y se destacará por ahora solamente un resumen de algunos de ellos, así:

- Carbono (C) (Figura 38)
  - Orgánico: detrítico y particulado (COP biota)
  - Orgánico total (COT) y Orgánico disuelto (COD)
  - Inorgánico ( $\text{CO}_2$ )
- Nitrógeno (N)
  - $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ , NOD (nitrógeno orgánico disuelto) y NOP (nitrógeno orgánico particulado)
    - Clasificación de los lagos según NIT (nitrógeno inorgánico total) y compuestos de nitrógeno
- Fósforo (P)
  - P soluble (Ortofosfato – más importante)
  - Total – insoluble
    - Clasificación de los cuerpos de agua
- Azufre (S)
  - $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SO}_3^{-2}$ ,  $\text{S}^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , S+metales
- Silicio (Si)
  - Soluble  $\text{SiO}_2$
  - Coloidal y particulado
- Cationes
  - Calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), hierro (Fe), manganeso (Mn)
- Aniones
  - Cloruro, sulfato, carbonato, bicarbonato.
- Oligoelementos (ppm: parte por millón; ppb: parte por mil millones)
  - Zinc (Zn), cobre (Cu), cobalto (Co), molibdeno (Mo) boro (B)
  - Actúan en pequeñas o ínfimas cantidades en el metabolismo biótico

- Elementos tóxicos
  - Mercurio (Hg), plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni)

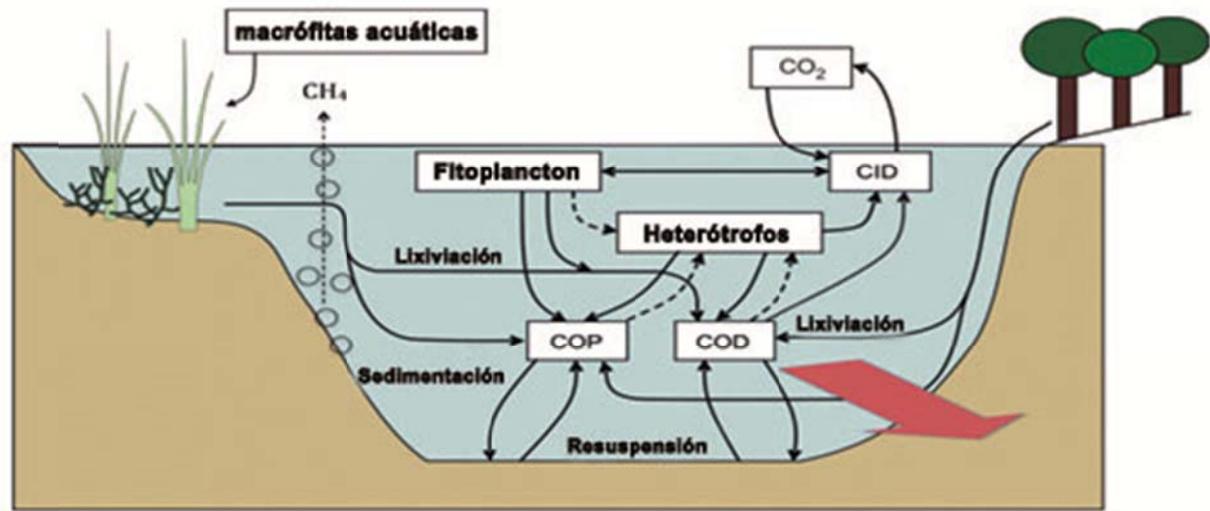


Figura 38. Ejemplos de interacciones relacionadas con el carbono

## X. Sedimentos

El estudio y la comprensión de la importancia de los sedimentos en la dinámica de un ambiente acuático exigiría un curso específico, largo y detallado. Para no extendernos demasiado con este tema, intentaremos reducirlo a los aspectos más relevantes dentro del contexto de este curso.

La importancia de los sedimentos está relacionada con la interacción de todos los procesos en el ecosistema acuático, donde se dan procesos biológicos, físicos y químicos, siendo también fundamental para el estudio de la evolución histórica entre el ecosistema hídrico y terrestre adyacente y en la evaluación de la intensidad y la forma del impacto a que los ecosistemas acuáticos están o han estado sometidos.

Con el fin de establecer algunos criterios de estudio de los sedimentos, podemos dividirlos en sedimentos orgánicos y sedimentos minerales (cada uno con aspectos ecológicos aislados y asociados en la dinámica de la columna de agua). Las capas de sedimentos límnicos pueden ser de carácter reciente o biológico y permanente.

Los sedimentos también pueden ser:

- Objeto de estudio de la paleolimnología
- Utilizados como indicador del estado trófico

- Empleados para evaluar el nivel de Contaminación

Tanto en condiciones naturales como en condiciones alteradas en los ambientes acuáticos, los sedimentos poseen una importancia significativa en la dinámica de los nutrientes. El fósforo (P) es el principal elemento que determina el estado trófico de un ambiente acuático, junto con el nitrógeno (N). En la el figura 39 se representa un ejemplo de la dinámica del fósforo relacionada con su interacción agua/sedimento.

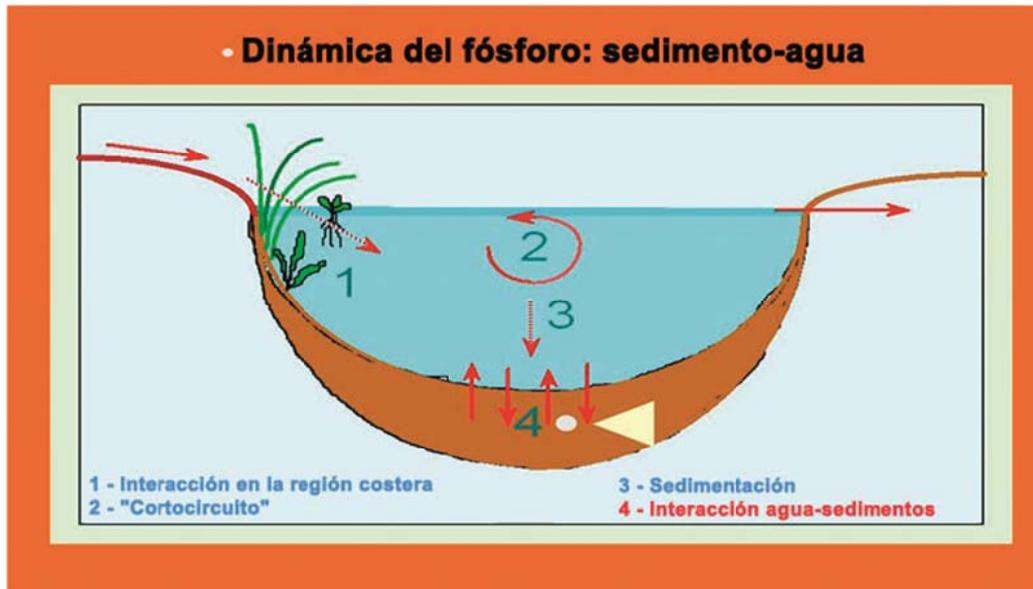
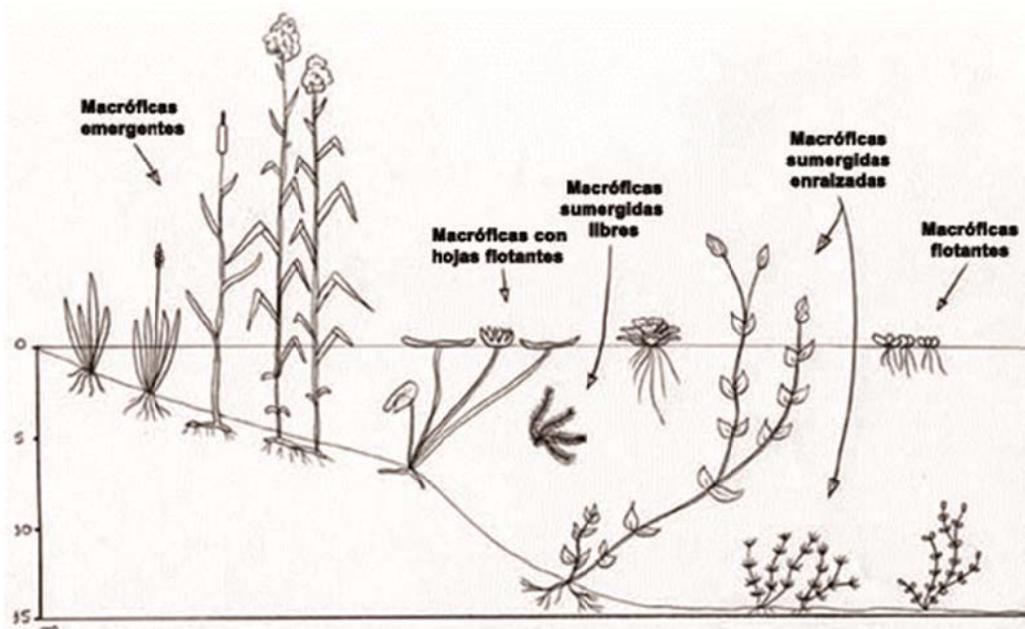


Figura 39. Ejemplo de la dinámica del fósforo relacionada con su interacción agua/sedimento.

## XI. La comunidad de macrófitas acuáticas



**Figura 40.** Esquema con los diversos tipos de macrófitas acuáticas relacionadas con su posición en el ambiente hídrico.

La Figura 41 muestra algunos tipos de macrófitas acuáticas: sumergida enraizada, con hojas flotantes y de libre flotación, respectivamente. (La literatura especializada permite identificar las diversas especies que viven tanto en armonía con el ambiente como las que se denominan equivocadamente *hierbas dañinas*).



**Figura 41.** Ejemplos de macrófitas acuáticas en diferentes nichos ecológicos.

Tanto como los sedimentos, el estudio de las macrófitas acuáticas en la dinámica de los ecosistemas hídricos también necesitaría un capítulo entero para comprender su importancia. De esta forma, se abordarán algunas cuestiones para tener un conocimiento básico de la complejidad de este tema. Así, los estudios deben dirigirse a:

- Los principales hábitats de las macrófitas acuáticas (emergentes, flotantes, etc.);
- Las comunidades vegetales de la región costera;
- La importancia de las macrófitas acuáticas en la dinámica de los ecosistemas (tanto terrestre como acuáticos en la región del ecotono);
- La relación entre las macrófitas acuáticas y las áreas inundables;
- Las adaptaciones anatómicas y fisiológicas de las macrófitas acuáticas al medio;
- La biomasa y la productividad primaria de las macrófitas acuáticas;

- La biomasa de rizomas y raíces de las macrófitas acuáticas;
- La comparación entre la productividad de macrófitas acuáticas, fitoplancton y perifíton;
- La importancia de las macrófitas acuáticas en la formación de los detritos orgánicos;
- Las macrófitas acuáticas y su papel en el almacenamiento y ciclo de nutrientes;
- La relación entre el estado trófico y la biomasa de las macrófitas acuáticas;
- El empleo de las macrófitas acuáticas en el control de la Contaminación y la eutrofización artificial;
- El control de las poblaciones de macrófitas acuáticas;
- La utilización de la biomasa de las macrófitas acuáticas.

## **XII. La comunidad fitoplanctónica**

Toda la parte biológica del ambiente acuático necesita de especialistas tanto en relación con la identificación de cada especie como con los procesos limnológicos (cantidad, metabolismo, interacción, etc.). Por lo tanto, aquí nos limitaremos a ver algunos aspectos de esas interacciones.

La clasificación del fitoplancton puede hacerse según el tamaño:

- Macro =  $>1000 \mu\text{m}$
- Meso =  $500 - 1000 \mu\text{m}$
- Micro =  $50 - 500 \mu\text{m}$
- Nano =  $10 - 50 \mu\text{m}$
- Ultra =  $0,5 - 10 \mu\text{m}$

Algunos grupos de «algas» (fitoplancton) presentes en los ambientes acuáticos: (Figuras de 42 A a F).

**Cianobacteria (ejemplo)**



**Figura 42 A**



Figura 42 B

**Chlorophyta**

**Euglenophyta**



Figura 42 C

**Chrysophyta**

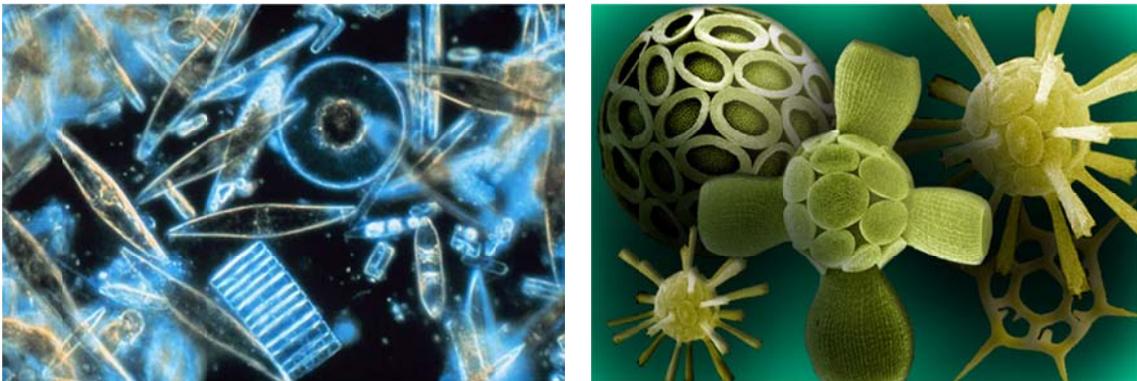
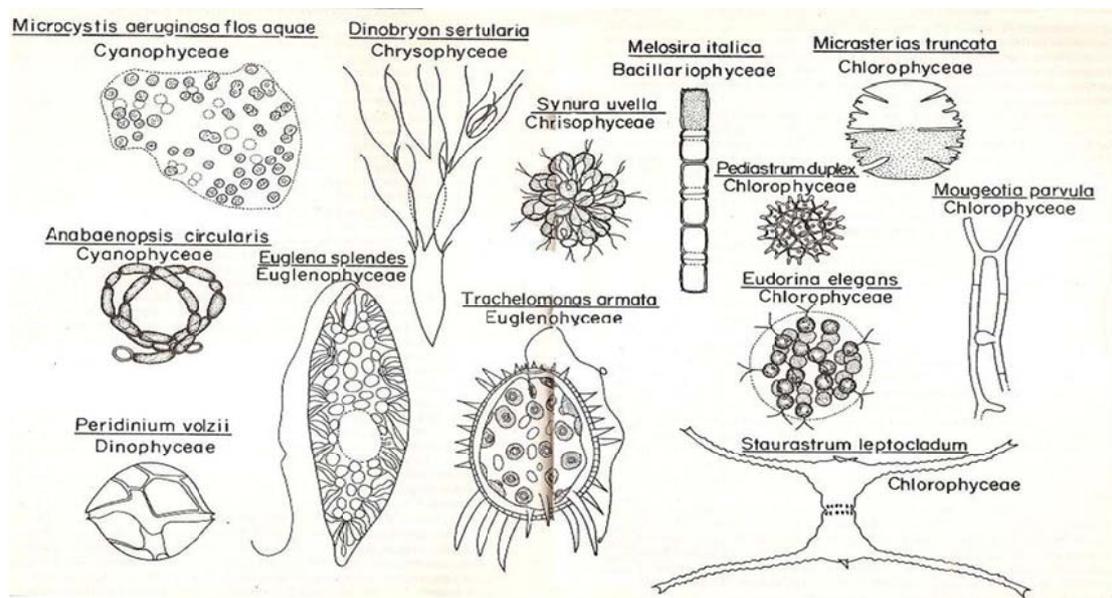


Figura 42 D



**Pyrrhophyta**

**Figura 42 E**



**Figura 42 F**

**Figura 42 A a F.** Ejemplos de los grupos denominados genéricamente *algas*

En la Tabla 4 están descritos los grupos de algas con representantes del fitoplancton límnic y marino

**Tabla 4.** Grupos de algas con representantes en el fitoplancton límnic y marino.

	Grupo filogenético	Divisiones o clases	Límnicos	Marino
PROCARIOTAS	Bacteria	Cyanobacteria		
EUCARIOTAS	ESTRAMENOPILOS	Bacillariophyceae		
		Chrysophyceae		
		Raphidophyceae		
		Eustigmatophyceae		
		Pelagophyceae		
		Silicoflagelados		
		Cryptophyceae		
	DISCICRISTATA	Euglenophyceae		
	ALVEOLATA	Dinophyceae		
	VIRIDIPLANTAE	Chlorophyceae		
		Prasinophyceae		
		Conjugatophyceae		
		Glaucophyta		

Importante
  Ausente o escaso
  Poco importante o menor diversidad o distribución

### XIII. Índice de comunidad fitoplanctónica (ICF)

Este índice utiliza la dominancia de los grandes grupos que componen el fitoplancton, la densidad de los organismos y el índice de estado trófico\* (IET), con el fin de separar en categorías la calidad del agua. Con la alteración del IET, en 2005, se estableció una nueva ponderación de esa variable, válida tanto para ríos (ICF<sub>RIO</sub>) como para reservorios (ICF<sub>RES</sub>), según muestra la Tabla 5.

**Tabla 5.** Clasificación del índice de comunidad fitoplanctónica (ICF)

Categoría	Ponderación	Niveles
ÓPTIMA	1	No hay dominancia entre los grupos Densidad total < 1.000 org·mL <sup>-1</sup> IET ≤ 52
BUENA	2	Dominancia de clorofíceas (desmidiáceas) o diatomáceas Densidad total > 1.000 y < 5.000 org·mL <sup>-1</sup> 52 < IET ≤ 59
REGULAR	3	Dominancia de clorofíceas (Chlorococcales), Fitoflagelados o dinoflagelados Densidad total > 5.000 y < 10.000 org·mL <sup>-1</sup> 59 < IET ≤ 63
MALA	4	Dominancia de cianobacterias o euglenofíceas Densidad total > 10.000 org·mL <sup>-1</sup> 63 < IET

El valor final, que genera el diagnóstico o la clasificación final de la calidad, será simplemente la media aritmética de las tres ponderaciones parciales relativas a la dominancia, la densidad y el valor de IET.

\* El índice de estado trófico (IET) tiene la finalidad de clasificar los cuerpos de agua en diferentes grados tróficos, o sea, evalúa la calidad del agua en cuanto al enriquecimiento por nutrientes y su efecto relacionado con el crecimiento excesivo de las algas y cianobacterias.

#### XIV. La comunidad zooplanctónica

Así como la comunidad fitoplanctónica exige una serie de especificaciones, la comunidad zooplanctónica también requiere profesionales con experiencia para comprender las relaciones de esos organismos con los ecosistemas acuáticos.

De esa forma, se colocarán solo algunos aspectos relativos a esos organismos. La Figura 43 muestra algunos representantes de este grupo.



Figura 43. Representantes de la comunidad zooplanctónica.

Los principales representantes de la comunidad zooplanctónica de agua dulce son: **Protozoos** (flagelados, sarcodinas y ciliados); **Metazoos**: rotíferos; cladóceros (crustáceos); Copépodos (crustáceos); larvas y huevos de peces y moluscos; larvas de insectos (*Dípteros*); algunos gusanos (turbelarios y trematodos); cnidarios (medusa). En los ecosistemas acuáticos continentales, el zooplancton está representado principalmente por los: copépodos; cladóceros; ostrácodos rotíferos; protozoos (radiolarios, foraminíferos y tintínidos); *quetognatos*; larvas y huevos de peces y moluscos; cnidarios (Hidromedusas). Estos organismos tienen un papel decisivo en la dinámica de estos ambientes, especialmente en los ciclos de los nutrientes y el flujo de energía (Figuras 43 y 44).

En los aspectos ecológicos, también se puede añadir la dinámica de la depredación de los peces e invertebrados acuáticos sobre la comunidad zooplanctónica. En condiciones de desequilibrio ecológico de las poblaciones zooplanctónicas, pueden ser controladas introduciendo peces plantófagos, una medida de manejo denominada «biomanipulación».

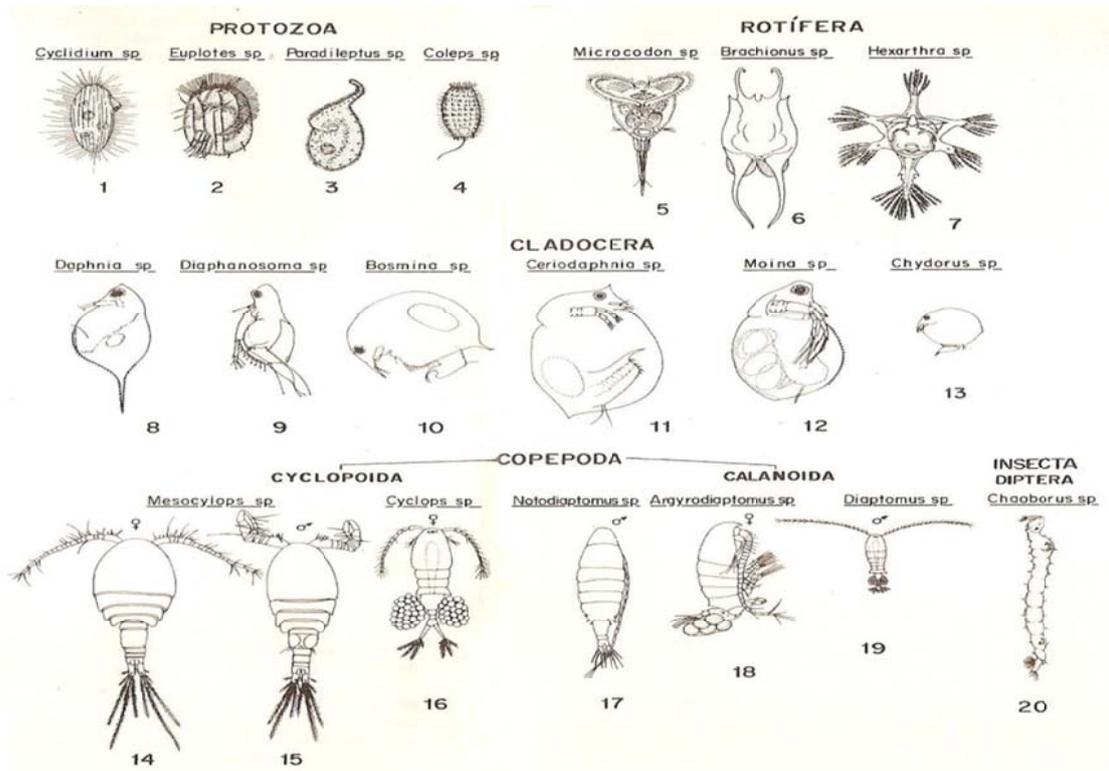
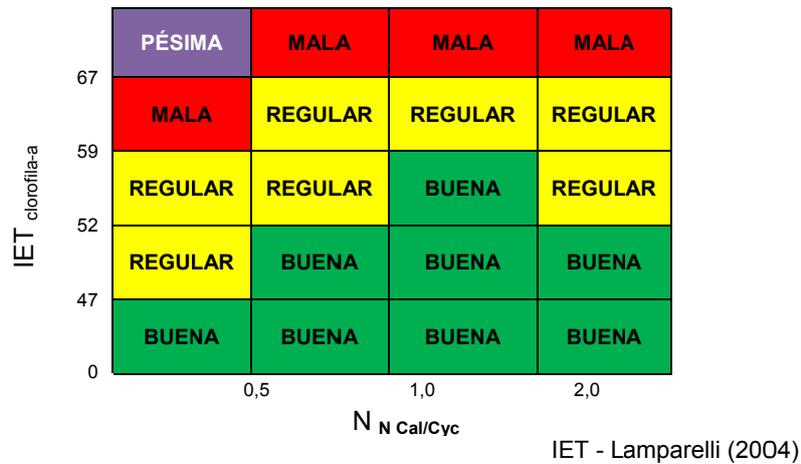


Figura 44. Esquema de algunos representantes del zooplancton.

### XV. Índice de comunidad zooplanctónica para reservorios ( $ICZ_{RES}$ )

El  $ICZ_{RES}$  relaciona la razón entre el número total de calanoides y el número total de ciclopoideas ( $N_{cal}/N_{cyc}$ ), con el índice de estado trófico (IET) para clorofila *a*. Estos dos resultados se encuentran asociados con las categorías Buena, Regular, Mala y Pésima, obtenidas a partir de la Figura 45.

**Índice de comunidade zooplanctónica para reservorios (ICZ<sub>RES</sub>)**



**Figura 45.** Clasificación según la comunidad zooplanctónica para reservorios.

Para utilizar la matriz diagnóstica ICZ<sub>RES</sub> se necesita la presencia de tres grupos zooplanctónicos (rotíferos, cladóceros y copépodos) en la muestra total. En ausencia de copépodos calanoides, se emplea  $N_{Ca}/N_{Cyc} < 0,5$ ; en presencia de calanoides y ausencia de ciclopoides, se emplea  $N_{CAL}/N_{CYC} > 2,0$ ; en ausencia de rotíferos o cladóceros, se atribuye Mala y, en ausencia de copépodos, se atribuye la condición de Pésima.

**XVI. La comunidad bentónica**

Las mismas consideraciones hechas antes, valen también para este grupo. La Figura 46 esquematiza algunos representantes del bentos.

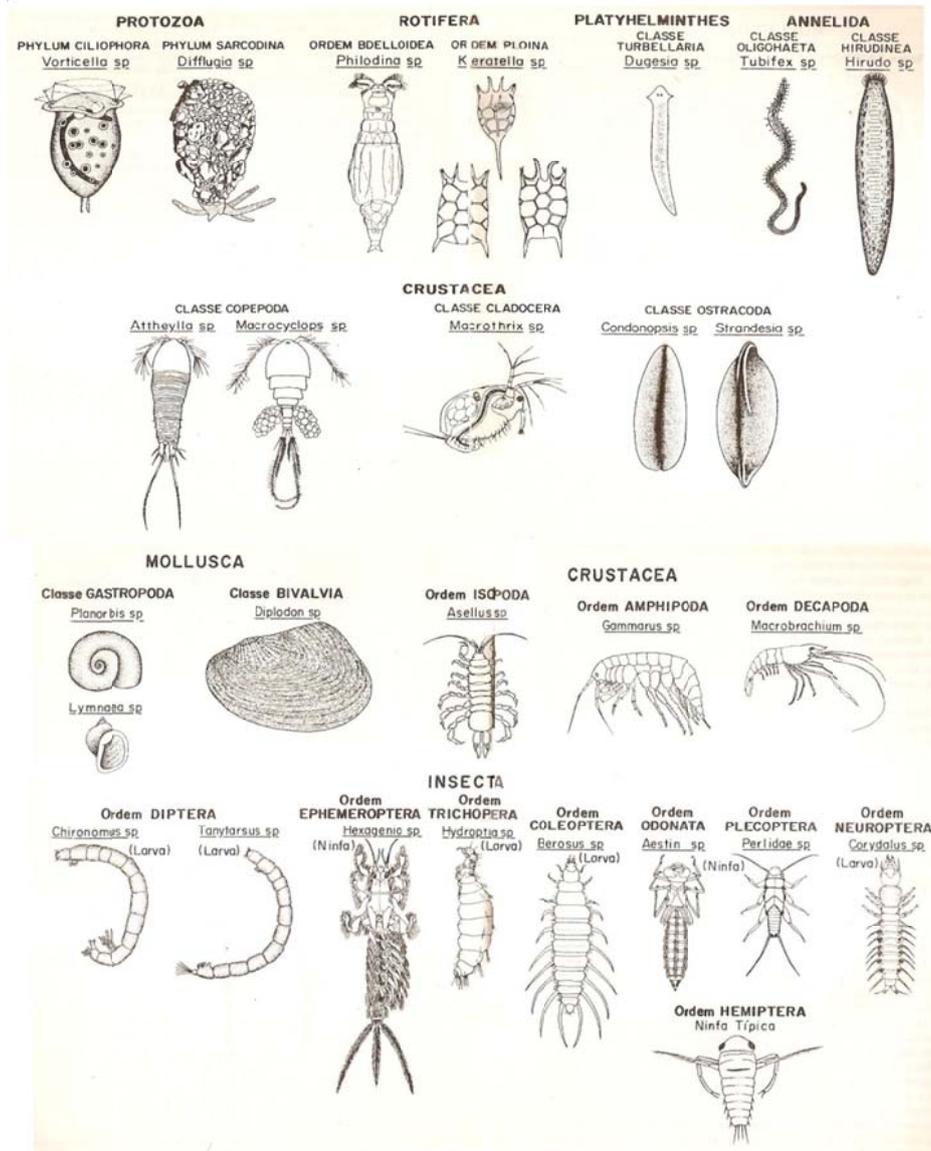


Figura 46. Esquema de algunos representantes de la comunidad bentónica

**Bentos:** comunidad de organismos (bénticos o bentónicos) que vive en el substrato de ambientes acuáticos (palabra de origen griego que significa profundidad, inferior) y se refiere a formas de vida que habitan en el fondo de los ambientes acuáticos (la palabra *bentos* tiene un sentido colectivo y debe emplearse con artículo y concordancia verbal en singular; no hay plural del término *bentos*). Representan los organismos que viven fijos o no fijos al substrato, y es un término de uso común diversas áreas científicas, tales como ecología, biología marina, limnología y oceanografía (Figura 17).

La penetración de la luz en la columna de agua establece la distribución de vegetales bentónicos en las capas superficiales del ambiente; por lo tanto, los fitobentos se dan exclusivamente en las zonas costeras. El bentos de áreas profundas está compuesto principalmente por bacterias y zoobentos.

Las comunidades bentónicas se usan a menudo como indicadores biológicos porque pueden suministrar información sobre las condiciones ambientales, debido a la sensibilidad de una única especie (indicadora) o a causa de alguna característica general que hace que la comunidad integre las señales del ambiente a lo largo del tiempo.

Debido a la compleja estructura de esta comunidad, asociadas a los aspectos específicos de los sedimentos tienen una importancia significativa para la actividad zooplanctónica en la dinámica de los nutrientes.

### **XVII. Índice de comunidad bentónica (ICB)**

Para el diagnóstico, los descriptores, detallados en la metodología, se fundieron en índices multimétricos, adecuados para cada tipo de ambiente, o sea, zona sublitoral de reservorios (Tabla 6), zona profundal de reservorios (Tabla 7) y ríos (Tabla 8).

**Tabla 6.** Índice de comunidad bentónica para la zona sublitoral de reservorios (ICB<sub>RES-SL</sub>)

Categoría	Ponderación	Niveles				
		S	ICS	H'	T/DT	Ssens
ÓPTIMA	1	≥ 25	≥ 25,00	> 3,50	< 0,10	≥ 3
BUENA	2	17 - 24	15,00 - < 25,00	> 2,25 - ≤ 3,50	0,10 - < 0,40	2
REGULAR	3	9 - 16	5,00 - < 15,00	> 1,50 - ≤ 2,25	0,40 - < 0,70	1
MALA	4	1 - 8	< 5,00	≤ 1,50	≥ 0,70	0
PÉSIMA	5	AZOICO				

**Tabla 7.** Índice de comunidad bentónica para zona profundal de reservorios (ICB<sub>RES-P</sub>)

Categoría	Ponderación	S	Niveles			
			ICS	H'	T/DT	Tt/Chi
ÓPTIMA	1	≥ 10	> 7,00	> 2,00	< 0,20	≥ 0,10
BUENA	2	7 - 9	> 3,50 - ≤ 7,00	> 1,50 - ≤ 2,00	≥ 0,20 - < 0,50	> 0,06 - < 0,10
REGULAR	3	4 - 6	> 1,00 - ≤ 3,50	> 0,50 - ≤ 1,50	≥ 0,50 - < 0,80	> 0,03 - ≤ 0,06
MALA	4	1 - 3	≤ 1,00	≤ 0,50	≥ 0,80	≤ 0,03
PÉSIMA	5	AZOICO				

**Tabla 8.** Índice de comunidad bentónica para ríos (ICB<sub>RIO</sub>)

Categoría	Ponderación	Niveles				
		S	ICS	H'	T/DT	Ssens
ÓPTIMA	1	≥ 21	> 20,00	> 2,50	≤ 0,25	≥ 3
BUENA	2	14 – 20	> 9,50 - ≤ 20,00	> 1,50 - ≤ 2,50	> 0,25 - < 0,50	2
REGULAR	3	6 – 13	> 3,00 - ≤ 9,50	> 1,00 - ≤ 1,50	≥ 0,50 - ≤ 0,75	1
MALA	4	≤ 5	≤ 3,00	≤ 1,00	> 0,75	0
PÉSIMA	5	AZOICO				

Debido a la complejidad de esa comunidad, en los anexos de los Informes de Calidad del agua de la CETESB hay más detalles sobre los cálculos.

### ***XVIII. Eventos naturales que alteran la calidad del agua***

Desde el surgimiento del Planeta Tierra, el agua ha actuado como elemento formador y ha sufrido las consecuencias de las alteraciones durante las diversas eras geológicas.

De esa forma, los cambios de la calidad del agua, tanto de las salinas como de las «dulces», sufrieron modificaciones a lo largo del tiempo, con diferencias claras entre el antes y el después del desarrollo de la civilización humana, intensificándose concomitantemente con el crecimiento de la población y la complejidad tecnológica, que suponían una mayor demanda hídrica.

Por lo tanto, hay que tener en cuenta que la calidad del agua natural no es una entidad inmutable, sino que cambia continuamente según los cambios naturales, desde el principio, e incrementándose actualmente con los cambios antrópicos.

El agua fue el principal agente de la formación inicial del planeta, según la literatura especializada en la materia. A la vez, los movimientos de las placas tectónicas (Figura 47) que provocaron la deriva continental modificaron la estructura y el relieve planetario, dividiéndolo en epinociclo (terrestre), limnociclo (aguas dulces) y talasociclo (aguas saladas).

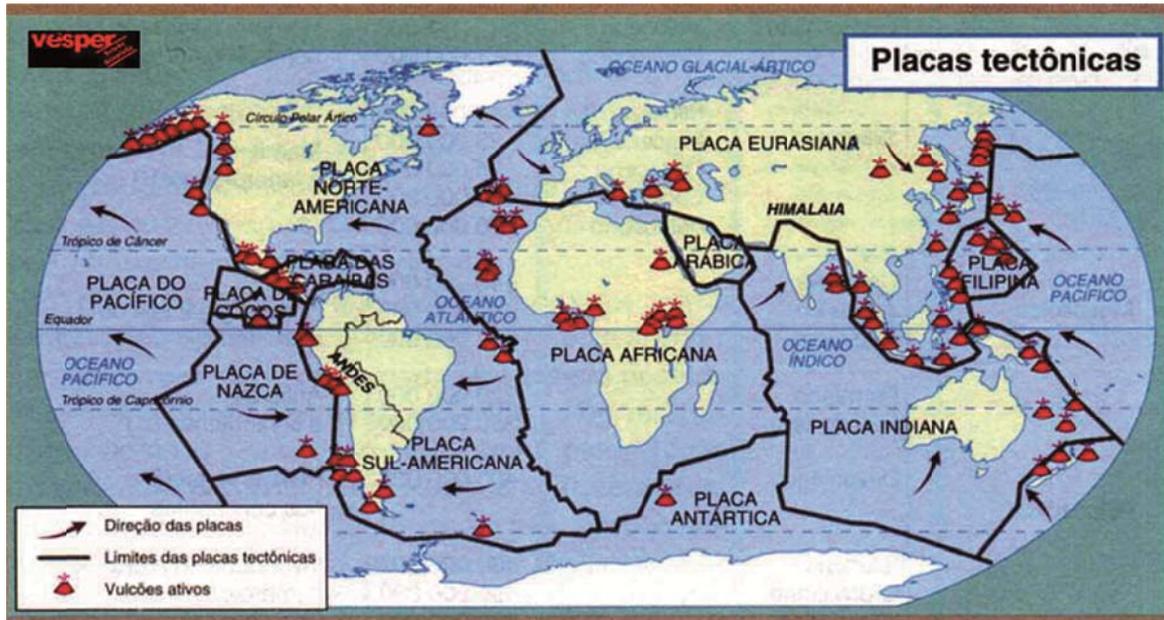


Figura 47. Dibujo esquemático de las principales placas tectónicas del Planeta.

Assí, aislar los eventos naturales que alteran la calidad del agua resulta impracticable, y lo único que puede hacerse es abstraerlos de forma puramente didáctica.

La siguiente secuencia no tiene carácter jerárquico, sino que es meramente informativa.

La dinámica atmosférica, consecuencia directa de la estacionalidad, interactuando con las posiciones longitudinales y latitudinales, actúa alterando la calidad natural del agua; sin embargo, tales perturbaciones son asimiladas por los ecosistemas acuáticos naturales.

De esta forma, se pueden destacar tanto los eventos que acarrear inundaciones por el exceso de lluvias como los largos períodos sin lluvias. Se constata que, por otro lado, a lo largo de las eras geológicas, toda la comunidad biótica de esos ambientes desarrolló adaptaciones morfofisiológicas que soportan tales impactos con su simultánea evolución, interactuando en un doble sentido, es decir, el ambiente actúa sobre los seres vivos y estos a su vez alteran el ambiente (Figura 48).

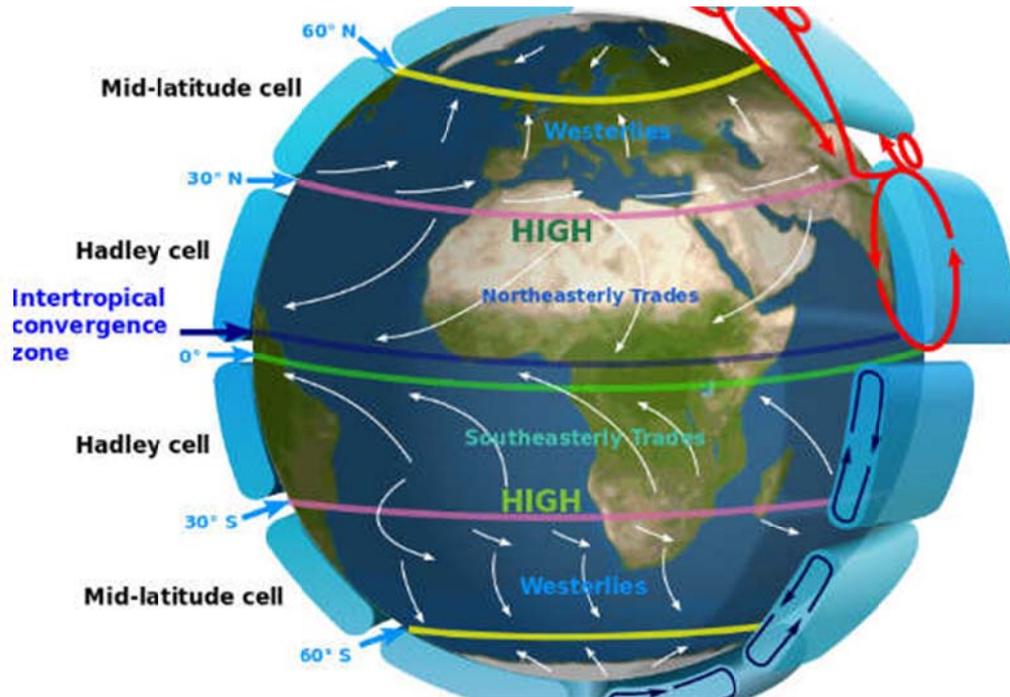


Figura 48. Ejemplo simplificado de la dinámica atmosférica del Planeta.

De esa forma, las alteraciones en la calidad del agua interfirieron en la evolución de la biósfera y esa actividad biológica modificó el ambiente para su mejor adaptación (Hipótesis Gaia).

Los terremotos, que modifican drásticamente un paisaje, pueden tanto propiciar la desaparición de un ambiente acuático como crearlo, actuando como agente activo en la calidad de las aguas afectadas (Figura 49).

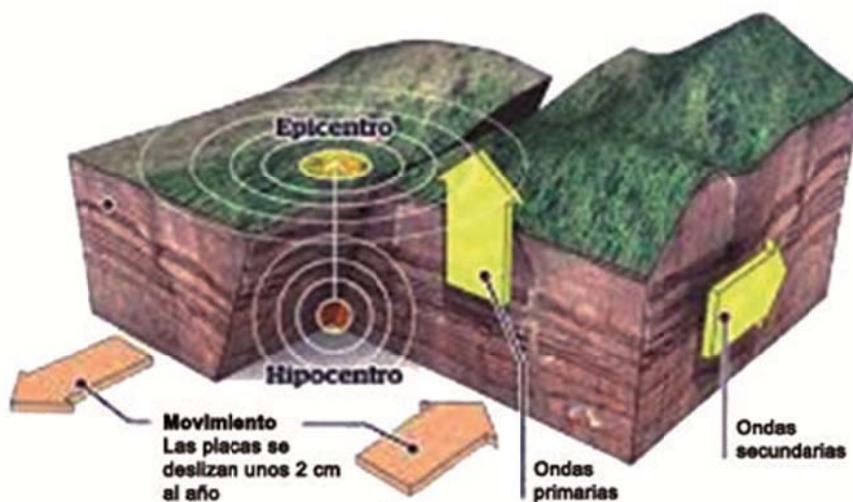


Figura 49. Esquema de algunos aspectos de un terremoto.

La actividad volcánica, que configuró el paisaje planetario, actuó y continúa actuando como agente dinámico en la calidad de las aguas, que se ven afectadas tanto por los gases y partículas calientes —denominadas ceniza volcánica— como por las lavas. La Figura 50 detalla algunos aspectos de la actividad volcánica.

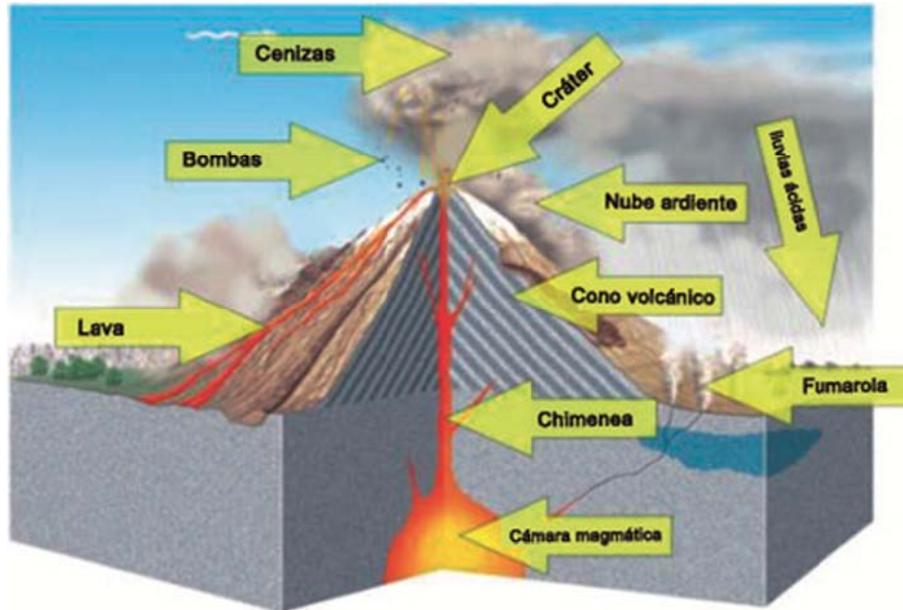


Figura 50. Algunos aspectos de la actividad volcánica.

Entre las modificaciones naturales se puede destacar la sucesión ecológica en que ambientes acuáticos se transforman en un ambiente terrestre y viceversa (Figura 51). Ante ese hecho, cabe resaltar la eutrofización natural (Figura 52).

ADAPTAÇÃO ENTRE AS ESPÉCIES E O MEIO AMBIENTE – SUCESSÃO ECOLÓGICA

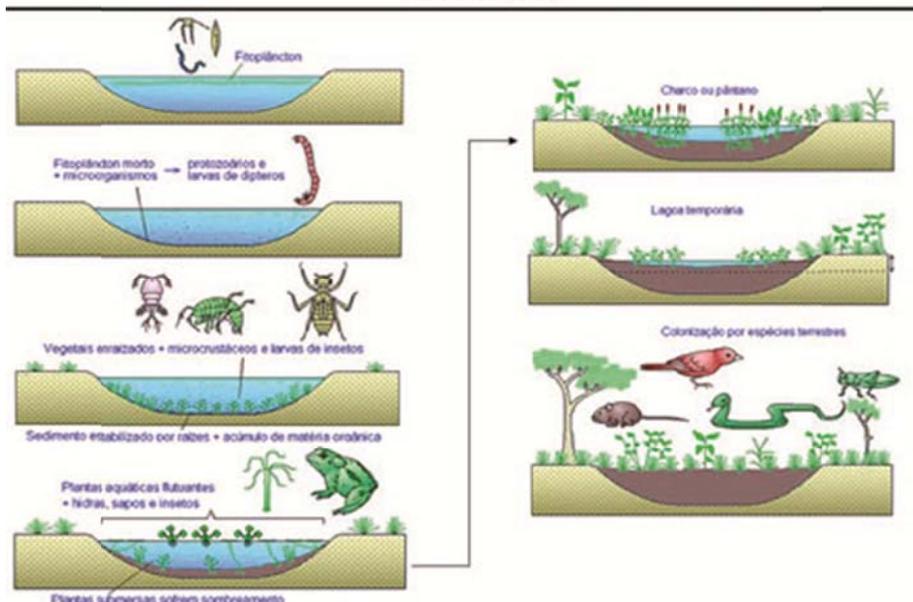


Figura 51. Ejemplos de sucesión ecológica



**Figura 52.** Exemplo de eutrofização natural

Si se considera solo cada elemento aisladamente, se observará que puede contener incontables factores que afectan tanto positiva como negativamente en la calidad del agua. Sin embargo, según los ejemplos citados, se constata que ninguno actúa aisladamente, sino que se trata de una dinámica extremadamente compleja la que permite comprender las principales variables que actúan u afectaron a la calidad del agua en un determinado ecosistema acuático.

Atualmente, la mayor preocupación es interpretar los cambios de la calidad del agua de origen antropogénico, motivo básico de ese curso.

### **XIX. Eutrofización**

La eutrofización es el proceso de fertilización excesivo, permanente y continuo de un cuerpo de agua del cual puede resultar el desarrollo masivo e indeseado de algas y macrófitas acuáticas.

La eutrofización es un proceso natural que paulatinamente va transformando un ambiente acuático en ambiente terrestre. Por otro lado, la preocupación ambiental respecto a ese proceso está relacionada con la vertiente cultural o con su aceleración (Figura 53).

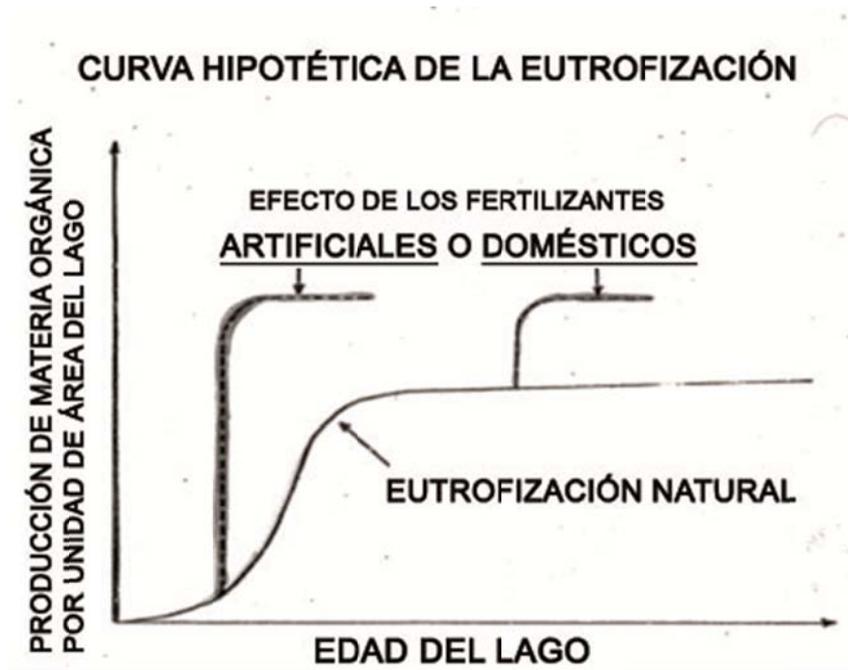


Figura 53. Esquema de la curva hipotética de la eutrofización relacionada con factores naturales y artificiales.

El proceso de la eutrofización puede estar relacionado, aisladamente o en conjunto, con:

- Presencia excesiva de nutrientes (principalmente P y N);
- Condiciones de la calidad del agua;
- Condiciones de los aspectos ecológicos;
- Características físicas y morfológicas de los cuerpos de agua;
- Velocidad de escorrentía y renovación;
- Tiempo de residencia;
- Condiciones climáticas;
- Profundidad de los cuerpos de agua.

La procedencia de los nutrientes puede tener un carácter puntual o concentrado (p. ej. efluente doméstico) o disperso o difuso (p. ej., lixiviación de área agrícola);

Entre los principales indicadores de la eutrofización se pueden contar la amplia variación de la concentración de OD, la diversidad y densidad de plancton, el nivel de transparencia, los valores de turbidez, la concentración de clorofila *a* y de nitrógeno particulado. La tabla 9 describe y establece la clasificación de los cuerpos de agua según los niveles de eutrofización.

**Tabla 9.** Clasificación de los cuerpos de agua según los niveles de eutrofización.

Categorías (estado trófico)	Valores de IET	Características
Ultraoligotrófico	IET < 47	Cuerpos de agua limpios, productividad muy baja y concentraciones de nutrientes insignificantes. No afectan a los usos del agua.
Oligotrófico	47 < ET < 52	Cuerpos de agua limpia, de baja productividad, en que no se producen interferencias indeseable en los usos del agua debido a la presencia de nutrientes.
Mesotrófico	52 < IET < 59	Cuerpos de agua con la productividad intermedia, con posibles repercusiones sobre la calidad del agua, en niveles aceptables en la mayoría de los casos.
Eutrófico	59 < ET < 63	Cuerpos de agua con una alta productividad en relación con las condiciones naturales, con una reducción de la transparencia, generalmente afectados por las actividades humanas, en los que se dan cambios no deseados en la calidad del agua debido al incremento de la concentración de nutrientes y la interferencia con sus múltiples usos.
Supereutrófico	63 < ET < 67	Cuerpos de agua con una alta productividad en relación con las condiciones naturales, de baja transparencia en general, afectados por las actividades humanas, en que con frecuencia se producen cambios indeseables en la calidad del agua, como episodios de floraciones de algas.
Hipereutrófico	ET > 67	Los cuerpos de agua afectados significativamente por las altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, con un riesgo para los usos, asociado con episodios de floraciones de algas y mortandad de peces, con consecuencias indeseables para sus múltiples usos, incluyendo sobre las actividades ganaderas en las regiones ribereñas.

\* IET = El índice de estado trófico clasifica los cuerpos de agua en diferentes grados tróficos, evaluando la calidad del agua en relación con el enriquecimiento por nutrientes y su efecto deletéreo relacionado con el crecimiento excesivo de las algas o el aumento de la infestación por macrófitas acuáticas.

Los resultados del índice, calculados a partir de la concentración de fósforo, deben ser entendidos como una medida del potencial de eutrofización (principal nutriente causador del proceso).

El cálculo del IET, a partir de la concentración de Pt, se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$IET = 10 \cdot (6 - ((0,42 - 0,36 \cdot (\ln.Pt)/\ln_2)) - Pt \text{ se expresa en } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ (ríos)})$$

$$IET = 10 \cdot (6 - (1,77 - 0,42 \cdot (\ln.Pt)/\ln_2)) - Pt \text{ se expresa en } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ (reservorios)}$$

El IET se calculó para 1.034 puntos para los que constaban concentraciones de Pt.

La eutrofización causa diversos efectos ambientales negativos, entre los que destacan:

- Desarrollo excesivo y perjudicial de plantas acuáticas, en particular florecimiento de algas, proliferación de macrófitas acuáticas, etc.;

- Alteración profunda de la biota, con sustitución de especies de peces y otros organismos;
- Descomposición orgánica, consumo y disminución de OD y la consecuente anoxia;
- Degradación de la calidad del agua, con cambios en la composición, el color, la turbidez, la transparencia, etc.;
- Desprendimiento de gases y producción de malos olores;
- Formaciones de depósitos bentales y reciclado de nutrientes;
- Perjuicios considerables para el uso del agua para abastecimiento;
- Perjuicios para el riego y la explotación hidroeléctrica;
- Perjuicios diversos para el ocio, el turismo y el paisajismo;
- Aumento de la evaporación;
- Elevación de nivel y obstáculos a la escorrentía para el drenaje de las aguas;
- Producción de sustancias tóxicas y perjuicios eventuales para el ganado;
- Condiciones propicias para la cría de mosquitos, larvas y otros vectores.

La eutrofización, tal como se mencionó, provoca en los lagos hipereutróficos el desarrollo de «blooms» o florecimiento acuático relacionado con la presencia de algas. Así, se pueden utilizar los siguientes parámetros:

- Número de células por mililitro;
- Volumen de algas por metro cúbico de agua;
- Peso de las algas por metro cúbico de agua;
- Contenido de clorofila *a* por metro cúbico de agua.

Una de las consecuencias más visibles de la eutrofización es la aparición en el ambiente hídrico de una gran infestación de macrófitas acuáticas, que conlleva:

- Pérdida de agua por la evapotranspiración;
- Dificultad para la navegabilidad;
- Impedir el flujo de agua en canales y ríos;
- Interferir con la operación en las fábricas hidroeléctricas;
- Retos para los sistemas de riego;
- Ocupar un volumen útil en las instalaciones de almacenado;
- Interferir con la actividad pesquera;
- Desvalorizar las áreas próximas;
- Crear condiciones estagnantes en el agua por la deposición de materia orgánica;
- Impedir la fotosíntesis;
- Abrigar y promover el desarrollo de vectores de enfermedades, tales como mosquitos, caracolillos, etc.

Para poder comparar dos ambientes extremos, es decir, un sistema oligotrófico y uno eutrófico, se ha elaborado la Tabla 10.

**Tabla 10.** Características de ambientes oligotróficos y eutróficos.

Parámetro	Oligotrófico	Eutrófico
Nutrientes	Bajas concentraciones y lento reciclaje de nitrógeno, fósforo y sílice.	Altas concentraciones y rápido reciclaje de nutrientes, especialmente N y P.
Oxígeno disuelto	A menudo cerca de la saturación tanto en el hipolimnio como epilimnio	Amplia variación en relación con la saturación: depresión en el hipolimnio y sobresaturación en el epilimnio (período fótico).
Comunidades	Baja biomasa de fitoplancton, zooplancton, zoobentos y peces.	Alta biomasa y sedimento de fitoplancton, zooplancton, zoobentos y peces (baja diversidad y mayor densidad).
Radiación solar subacuática	Alta transparencia en la zona eufótica	Baja transparencia en la zona eufótica.
Cuenca hidrográfica	Lagos profundos con morfometría caracterizada por valles en forma de V y poco modificada.	Lagos poco profundos, con baja estratificación, cultivados y muy modificados.

En las Figuras 54, 55 y 56 están esquematizados aspectos de la eutrofización relacionados con las alteraciones de la calidad del agua de un ecosistema lacustre. El aporte de nutrientes, principalmente de P y N, pasa de ser un factor limitante a uno favorecedor de la biota acuática, conllevando alteraciones destacadas de carácter físico, químico, bioquímico y biológico.

Con el fin de aclarar y comprender mejor la eutrofización, se pueden contemplar dos vertientes:

1. *Eutrofización natural.* Como se vio, durante su vida útil todo ambiente acuático ira paulatinamente siendo eutrofizado a lo largo del tiempo. En condiciones ambientales naturales, ese tiempo es una correlación entre los aportes de nutrientes (orgánicos e inorgánicos) y los procesos de autodepuración (Figura 56). Por tanto, se puede constatar que hay una tendencia específica de vuelta a las condiciones anteriores al impacto. Sin embargo, con el transcurrir de las eras geológicas, se da una transformación de ambiente acuático en terrestre, un fenómeno que se denomina «sucesión ecológica».
2. *Eutrofización cultural o acelerada.* Este fenómeno está relacionado con la continua descarga nutricional (puntual y dispersa) y la incapacidad temporal del proceso de autodepuración, es decir, no lograr transformar paulatinamente el desequilibrio ecológico en un nuevo equilibrio, puesto que los impactos se suceden de manera ininterrumpida (cuerpos hídricos permanentemente contaminados). La Figura 54 destaca las modificaciones del ambiente acuático

al darse el aporte de nutrientes (nitrógeno y fósforo); la Figura 56 muestra un sistema simplificado de eutrofización.

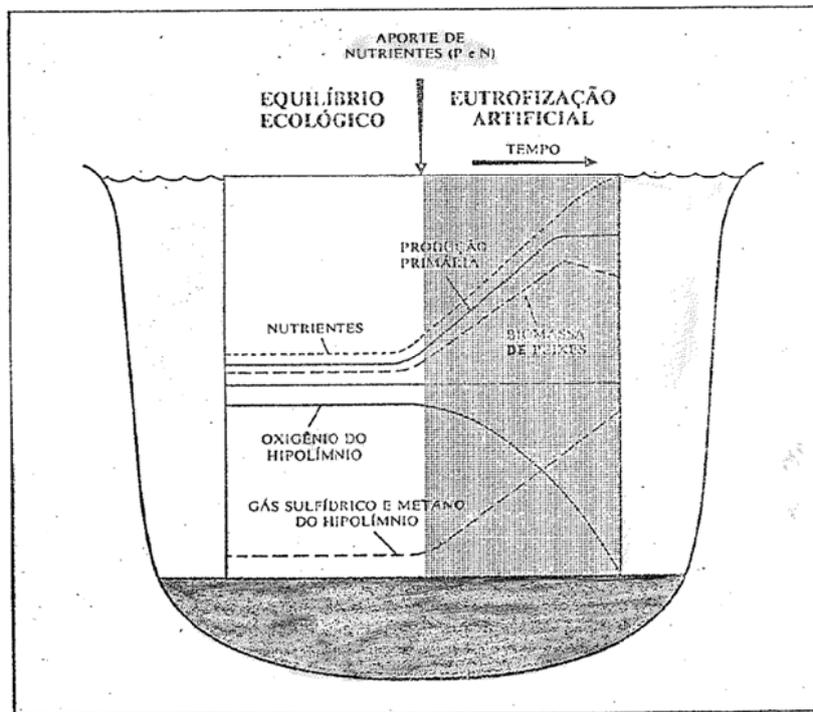


Figura 54. Esquema de las consecuencias del proceso de eutrofización artificial, mediante el aporte de P y N, en el ecosistema lacustre.

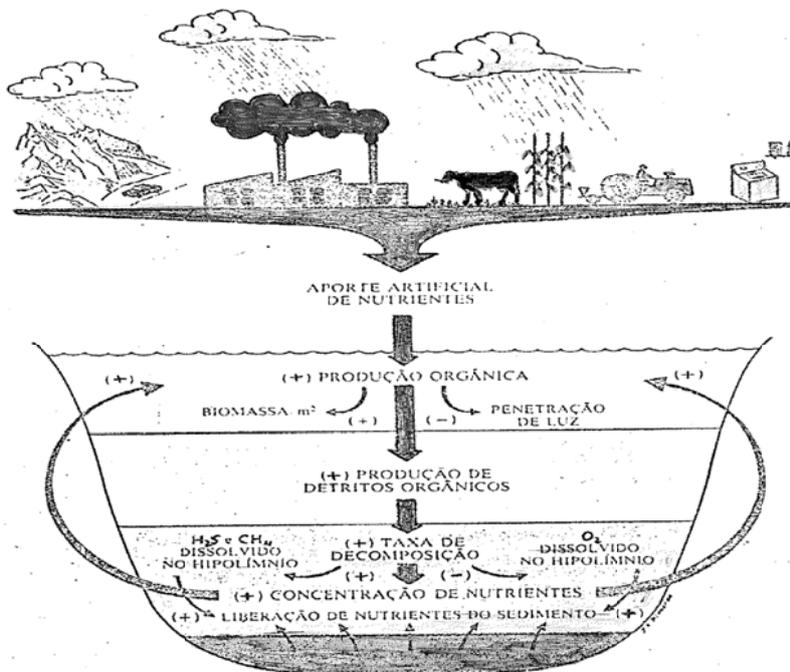
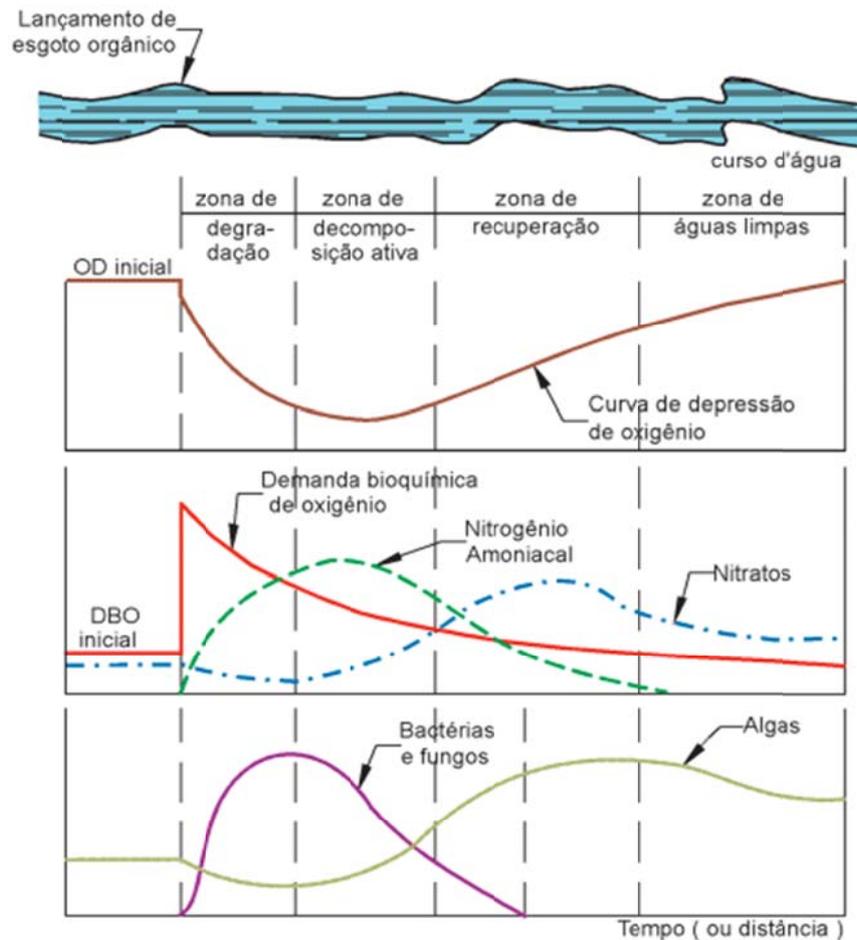


Figura 55. Esquema simplificado de eutrofización artificial que modifica el equilibrio del ecosistema lacustre.

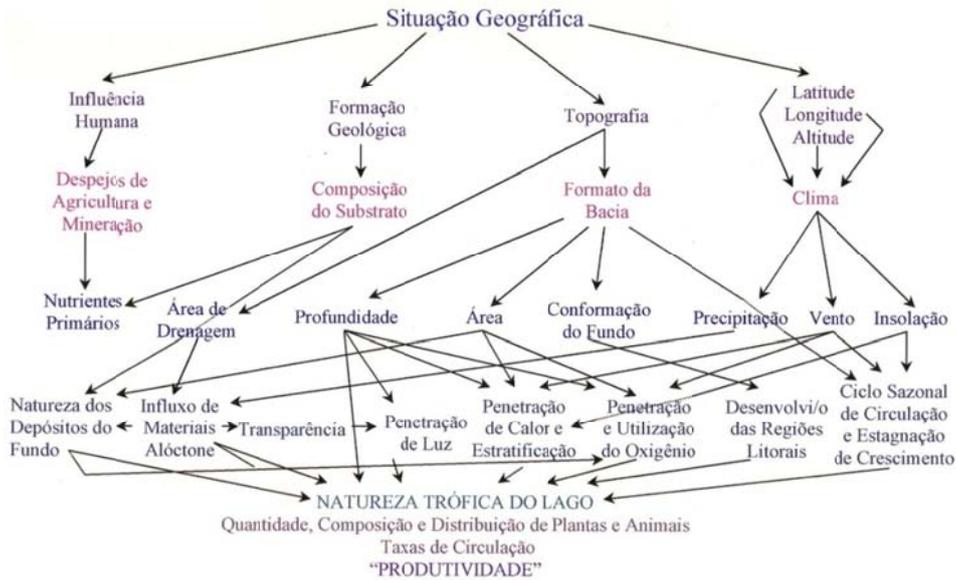


**Conseqüências do lançamento de carga orgânica em um curso d'água.**

**Figura 56.** Esquema del proceso de autodepuración a lo largo del tiempo tras aporte de nutrientes (efluente doméstico).

Con el fin de ofrecer una visión más amplia de la dinámica de un ambiente acuático, la Figura 57 muestra un esquema simplificado de las interrelaciones de los factores (abióticos y bióticos) que afectan al metabolismo (equilibrio) de un lago, en particular en relación con los procesos de productividad de varios órdenes. Dependiendo del impacto, se establece su nivel trófico.

INTERRELAÇÕES DE FATORES QUE AFETAM  
O METABOLISMO DE UM LAGO



**Figura 57.** Esquema simplificado de las interrelaciones de los factores que afectan al metabolismo de un lago, en relación con la productividad.

Visto todo lo expuesto hasta ahora, conviene añadir también algunas medidas de carácter terapéutico o correctivo para la posible recuperación o rehabilitación de un ecosistema acuático. En la literatura especializada se presentan los procesos descritos en la Tabla 11, destacándose los físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, hay que hacer hincapié en que existen puntos positivos y negativos para cada uno de ellos, principalmente en lo tocante a costos y beneficios (se denomina *Control integrado de hierbas dañinas* en la implantación de otro mecanismo dirigido a un determinado objetivo)

**Tabla 11.** Procesos físicos (mecánicos), químicos y biológicos como medidas de tratamiento.

Medidas de tratamiento	Correctivas
Procesos mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desestratificación</li> <li>Aeración del hipolimnio</li> <li>Retirada de aguas profundas</li> <li>Aducción de agua de mejor calidad</li> <li>Retirada de los sedimentos</li> <li>Cobertura de los sedimentos</li> <li>Retirada de macros y acuáticas</li> <li>Retirada de biomasa planctónica</li> <li>Aplicación de sombra</li> <li>Disminución del nivel del agua</li> </ul>
Procesos químicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación química del fósforo</li> <li>Oxidación del sedimento con nitrato</li> <li>Aplicación de herbicida</li> <li>Aplicación de cal</li> </ul>
Procesos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uso de peces herbívoros</li> <li>Uso de cianófagos</li> <li>Manipulación de la cadena trófica</li> </ul>

### **Referências bibliográficas**

CETESB *Relatórios de Qualidade da Água* vários anos.

ESTEVES, F DE A *Fundamentos de Limnologia*. Ed. Interciência/FINEP. 575 p, 1988.

TUNDISI, J.G; TUNDISI T.M. *Limnologia* Ed. Oficina de Textos. 632 p. 2008.

Páginas web: Informação diversa sobre ecologia, limnologia, cambios ambientales naturales y Contaminación de las aguas.

**VARIACIONES ESPACIALES Y  
TEMPORALES EN LA CALIDAD  
DEL AGUA, PRINCIPALES  
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL  
AGUA Y CONTAMINANTES  
EMERGENTES**

**BIOL. DR. FABIO N. MORENO**

*Cadernos da  
Gestão do Conhecimento*



# VARIACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA, PRINCIPALES PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA Y CONTAMINANTES EMERGENTES

## 1. Concepto de calidad del agua

El agua es uno de los recursos naturales más intensamente utilizados y, por lo tanto, debe estar presente en el ambiente en la cantidad y la calidad pertinentes. Dentro de ese contexto, se puede entender la calidad y la capacidad de esa agua de mantenerse de forma continua dentro de los límites asociados a su uso. Chapman (1996) propuso otros puntos de vista que podrían adoptarse para explicar el concepto de calidad del agua, a saber:

- Conjunto de concentraciones, especies químicas y particiones físicas de sustancias químicas inorgánicas y orgánicas;
- Composición y estado de la biota acuática de un cuerpo de agua; y
- Descripción de las variaciones espaciales y temporales debidas a factores internos y externos al cuerpo de agua.

## 2. Usos del agua y requisitos de calidad

Según Braga et al. (2005), el agua puede destinarse a los siguientes usos:

- Abastecimiento humano;
- Abastecimiento industrial;
- Dilución de contaminantes;
- Generación de energía eléctrica;
- Riego;
- Navegación;
- Preservación de la flora y la fauna;
- Acuicultura; y
- Recreación.

## 3. Principales fuentes de Contaminación del agua

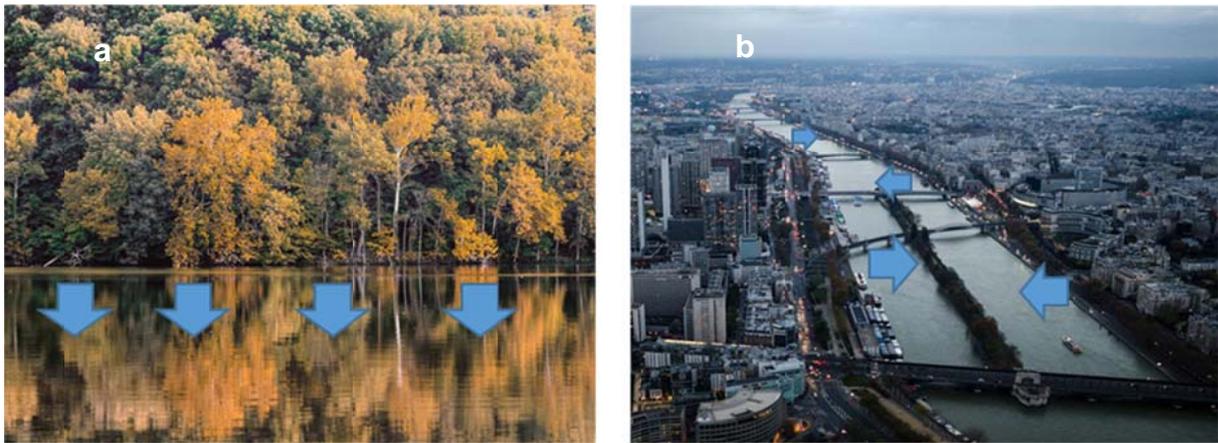
El término *Contaminación* puede utilizarse para caracterizar una alteración en la calidad de un recurso natural provocada por la adición de sustancias que perjudiquen los usos múltiples de ese recurso. En la legislación brasileña, la ley nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispone sobre la Política Nacional de Medio ambiente, define la Contaminación en los siguientes términos:

«Contaminación: degradación de la calidad ambiental resultante de las actividades que directa o indirectamente:

- perjudiquen a la salud, la seguridad y el bienestar de la población;

- *creen condiciones adversas para las actividades sociales y económicas;*
- *afecten desfavorablemente a la biota;*
- *afecten a las condiciones estéticas o sanitarias del medio ambiente;*
- *viertan materia o energía de manera no conforme con los Estándares ambientales establecidos.»*

Los efectos resultantes de la introducción de los contaminantes en el medio acuático dependen de la naturaleza del contaminante introducido, de su camino recorrido en el medio y del uso que se hace del cuerpo de agua. Los contaminantes pueden introducirse en el medio acuático de forma puntual o difusa (Figura 58).



**Figura 58.** Contaminación de las aguas por fuentes difusas (a) y puntuales (b).

Las cargas puntuales se introducen por vertidos de efluentes domésticos e industriales, y son de fácil identificación. El control de esas fuentes se da a través del tratamiento del efluente generado. Las cargas difusas se caracterizan por no originarse en un punto de descarga específico, sino de manera distribuida por la superficie de la cuenca, introduciéndose en los cuerpos de agua a intervalos intermitentes, relacionados primariamente con la presencia de lluvias. Las principales fuentes generadoras de Contaminación difusa son:

- zonas agrícolas;
- deposición atmosférica;
- desgaste de pavimentación;
- vehículos;
- restos de vegetación;
- residuos sólidos;
- polvo;
- residuos de animales;
- vertidos accidentales;
- erosión; y
- vertidos sin tratamiento de aguas residuales domésticas.

El control de la carga difusa exige medidas no estructurales, centradas en la prevención y el control de la emisión de contaminantes, así como en la implementación de medidas estructurales que propicien la reducción o eliminación de

los contaminantes por la escorrentía superficial de zonas agrícolas y urbanas (Puerto, 2012).

La generación de la carga contaminante es una consecuencia inevitable del desarrollo, por lo que es de fundamental importancia para la gestión de la calidad del agua establecer una estrategia de manejo, principios y metodologías que propicien la integración de la gestión de los recursos hídricos con la gestión ambiental y la ocupación del suelo.

Entre los impactos derivados de la alteración de la calidad del agua por la introducción de cargas contaminantes, pueden citarse:

- alteraciones estéticas;
- depósito de sedimentos;
- depleción de la concentración de oxígeno disuelto;
- contaminación por organismos patógenos;
- eutrofización; y
- daños a la biota debido a la presencia de sustancias tóxicas.

#### 4. Principales contaminantes acuáticos

Según Braga *et al.* (2005), los contaminantes pueden clasificarse según su naturaleza en:

- Materia orgánica biodegradable;
- Contaminantes orgánicos refractarios (productos fitosanitarios, detergentes sintéticos, derivados del petróleo, sustancias organocloradas);
- Metales tóxicos (mercurio, cadmio, plomo y arsénico);
- Nutrientes (fósforo y nitrógeno);
- Organismos patógenos (bacterias, virus y protozoos);
- Sólidos en suspensión;
- Calor; y
- Radioactivos (sustancias radioactivas y radiación procedente del espacio exterior).

Además de esos, una nueva categoría de contaminantes —denominados *contaminantes emergentes*— ha llamado la atención de la comunidad científica y de los organismos ambientales. Estas sustancias han sido detectadas en concentraciones muy bajas en el aire, el agua, el suelo, los alimentos y en tejidos humanos y animales, y se caracterizan por no presentar criterios reguladores, por no ser persistentes en el ambiente y por poder interferir en la fisiología de receptores diana. Dentro de esta categoría, se incluyen los productos de higiene personal, sustancias farmacéuticas, incluidos estrógenos naturales y sintéticos, agentes plastificantes, retardantes de llama y nanomateriales (Yan *et al.*, 2010).

## 5. Variáveis de la calidad del agua

La calidad del agua está representada por un conjunto de variables de naturaleza física, química, y biológica, utilizadas para evaluar las características del agua. Para el diagnóstico de la calidad de las aguas en el estado de São Paulo, la Red de Monitoreo de la CETESB (CETESB, 2016) evalúa las siguientes variables:

### 5.1) Físicas

- *Conductividad.* Es la expresión numérica de la capacidad de un agua de conducir la corriente eléctrica. Depende de las concentraciones iónicas y de la temperatura e indica la cantidad de sales existentes en la columna de agua, por lo que representa una medida indirecta de la concentración de contaminantes.
- *Color.* Está asociado al grado de reducción de intensidad que la luz sufre al atravesar el agua (una reducción que se da por absorción de parte de la radiación electromagnética), debido a la presencia de sólidos disueltos, principalmente material en estado coloidal orgánico e inorgánico.
- *Sólidos.* Corresponden a toda materia que permanece como residuo, tras la evaporación, secado o calcinación de la muestra, a una temperatura predefinida durante un tiempo determinado, operaciones esas que permiten definir las diversas fracciones de sólidos presentes en el agua (sólidos totales, en suspensión, disueltos, fijos y volátiles). Para el recurso hídrico, los sólidos pueden causar daños a los peces y a la vida acuática.
- *Temperatura.* En general, a medida que la temperatura aumenta, disminuye la solubilidad del oxígeno disuelto y aumentan las tasas de reacción físicas, químicas y biológicas. Los organismos acuáticos poseen límites de tolerancia térmica superior e inferior, temperaturas óptimas para crecimiento, temperatura preferida en gradientes térmicos y limitaciones de temperatura para migración, desove e incubación del huevo.
- *Transparencia.* A partir de la medida del disco de Secchi, se puede calcular la profundidad de la zona fótica, o sea, la profundidad de penetración vertical de la luz solar en la columna de agua, que indica el nivel de la actividad fotosintética de lagos o reservorios.
- *Turbidez.* Es el grado de atenuación de la intensidad que un haz de luz sufre al atravesarla, debido a la presencia de sólidos en suspensión, tales como partículas inorgánicas (arena, limo, arcilla) y residuos orgánicos, como algas y bacterias, plancton en general, etc.
- *Caudal.*

### 5.2) Químicas

- *Alcalinidad.* Puede definirse como su capacidad de reaccionar cuantitativamente con un ácido fuerte hasta un determinado valor de pH. Los principales componentes de la alcalinidad son las sales del ácido carbónico, o sea, bicarbonatos y carbonatos, y los hidróxidos.
- *Cafeína.* Se ha utilizado como marcador de la presencia de materia fecal de origen humano y de algunas sustancias farmacéuticas del grupo de los contaminantes emergentes.

- *Carbono orgánico total (COT)*. Procede de la materia viva y también como componente de varios efluentes y residuos, y es un indicador útil del grado de Contaminación del cuerpo de agua. El análisis del COT considera las partes biodegradables y no biodegradables de la materia orgánica, no sufriendo interferencia de otros átomos que estén vinculados a la estructura orgánica, cuantificando solo el carbono presente en la muestra.
- *Cloruros*. Son fuentes importantes de cloruro las descargas de aguas residuales, que pueden presentar concentraciones que superan  $15 \text{ mg L}^{-1}$ , lo que puede conferir un sabor salado al agua. En las regiones costeras, a través de la llamada intrusión de la cuña salina, se encuentran aguas con niveles altos de cloruro.
- *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*. Es la cantidad de oxígeno consumido durante un determinado periodo de tiempo, a una temperatura de incubación específica. Un periodo de tiempo de 5 días, a una temperatura de incubación de  $20^\circ\text{C}$ , suele usarse y referirse como  $\text{DBO}_{5,20}$ . Los mayores aumentos en términos de DBO en un cuerpo de agua son provocados por desechos de origen predominantemente orgánico. La presencia de un alto contenido de materia orgánica puede inducir al agotamiento completo del oxígeno en el agua, provocando la desaparición de peces y otras formas de vida acuática.
- *Demanda química de oxígeno (DQO)*: es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación de la materia orgánica de una muestra mediante un agente químico, como el dicromato de potasio. Los valores de la DQO normalmente son mayores que los de la  $\text{DBO}_{5,20}$ , y es una prueba que se realiza en un plazo menor. El aumento de la concentración de DQO en un cuerpo de agua se debe principalmente a desechos de origen industrial.
- *Dureza*. Es la medida de su capacidad de precipitar jabón, es decir, que en las aguas duras los jabones se transforman en complejos insolubles, que no forman espuma hasta que el proceso se agota. Hay cuatro compuestos principales que otorgan dureza a las aguas: bicarbonato de calcio, bicarbonato de magnesio, sulfato de calcio y sulfato de magnesio, que proceden de la disolución de piedra caliza.
- *Fenoles y sus derivados*. Aparecen en las aguas naturales a través de las descargas de efluentes industriales. Los fenoles son tóxicos para el hombre, los organismos acuáticos y los microorganismos presentes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y de efluentes industriales.
- *Hierro*. Puede proceder del arrastre del suelo en procesos erosivos o de descarga de efluentes de industrias metalúrgicas. Aunque no es tóxico, causa problemas diversos para el abastecimiento público de agua, pues le da al agua color y sabor.
- *Fósforo*. Procede principalmente de las descargas de aguas residuales. También puede haber fósforo en cantidades excesivas en los detergentes en polvo, las industrias de fertilizantes, los plaguicidas, las sustancias químicas en general, las conservas de alimentos, los mataderos, los frigoríficos y los productos lácteos, así como en el agua de drenaje en zonas agrícolas y urbanas. Por ser un nutriente limitante para procesos biológicos, el exceso de fósforo conduce a procesos de eutrofización de las aguas naturales.
- *Metales*. Pueden estar solubles o adsorbidos a partículas en suspensión en las aguas superficiales. Ejemplos de metales evaluados en programas de monitoreo son el aluminio, arsénico, cadmio, plomo, cobre, cromo, mercurio, manganeso, níquel y zinc. La exposición de los organismos acuáticos a los metales puede provocar efectos tóxicos agudos o crónicos, dependiendo de la

concentración. Algunos metales, como el mercurio, pueden bioacumularse y biomagnificarse, potenciando su efecto nocivo a lo largo de la cadena alimentaria.

- **Nitrógeno:** Está asociado a la descarga de aguas residuales domésticas, industriales y fertilizantes. Puede estar presente en forma molecular, de amoníaco, nitrito y nitrato. La presencia de nitrógeno amoniacal indica eventos recientes de Contaminación. En concentraciones excesivas, también está asociado al proceso de eutrofización. El amoníaco en el agua es muy tóxico para los peces.
- **Oxígeno disuelto (OD).** Es indispensable para los organismos aeróbicos. Unas aguas con bajo contenido de OD indican aporte de materia orgánica. La descomposición de la materia orgánica por las bacterias aerobias va acompañada del consumo y la reducción del OD. La ausencia de oxígeno favorece el crecimiento de organismos anaeróbicos, que liberan sustancias que dan al agua olor, sabor y aspectos indeseables.
- **Potencial de hidrógeno (pH).** Además de influir en diversos equilibrios químicos que se dan naturalmente, el pH tiene efectos sobre la fisiología de diversas especies acuáticas. Bajo determinadas condiciones de redox, el pH puede contribuir a la precipitación de metales pesados y tener un efecto sobre las solubilidades de nutrientes. Los criterios de protección de la vida acuática fijan el pH entre 6 y 9.
- **Sustancias orgánicas.** Pertenecen a este grupo los contaminantes no biodegradables o cuya tasa de biodegradación sea muy lenta. En el medio acuático pueden ser tóxicos para la biota o bioacumularse en los tejidos de algunos organismos. Son sustancias procedentes de procesos industriales, de cultivos agrícolas o de la eliminación de residuos de diferentes tipos. Se citan como ejemplos los productos fitosanitarios, las sustancias organocloradas (bifenilos policlorados, dioxinas y furanos), derivados del petróleo, etc.
- **Surfactantes.** Se definen como compuestos que reaccionan con el azul de metileno en determinadas condiciones. Las aguas residuales poseen de 3 a 6 mg L<sup>-1</sup> de detergentes. Los vertidos indiscriminados de detergentes en las aguas naturales llevan a perjuicios de orden estético provocados por la formación de espumas. También se ha achacado a los detergentes la aceleración de la eutrofización, pues contienen fósforo en sus formulaciones.

### 5.3) Microbiológicas

- **Coliformes termotolerantes.** Son los microorganismos que pueden fermentar la lactosa a 44-45 °C, cuyos principales representantes son la *Escherichia coli* y, también algunas bacterias de los géneros *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. De estos microorganismos, solo *E. coli* es de origen exclusivamente fecal.
- ***Escherichia coli*.** Principal bacteria del subgrupo de los coliformes termotolerantes, de origen exclusivamente fecal. Fermenta la lactosa y el manitol, produciendo ácido y gas, a 44,5 ± 0,2 °C en 24 horas. Produce indol a partir de triptófano, oxidasa negativa, no hidroliza la urea y presenta actividad de las enzimas β-galactosidasa y β-glucuronidasa. *E. coli* está presente en gran número en las heces humanas y de animales de sangre caliente y

raramente se detecta en ausencia de Contaminación fecal. Se considera el indicador más adecuado de contaminación fecal en aguas dulces.

- *Enterococos*. Es un valioso indicador bacteriano para determinar la extensión de la contaminación fecal de aguas superficiales recreativas. Estudios realizados en torno a aguas de playas marinas y de agua dulce han mostrado que las gastroenteritis asociadas al baño están directamente relacionadas con la calidad de las aguas recreativas y que los enterococos son los indicadores bacterianos más eficientes de la calidad del agua.

#### 5.4) Hidrobiológicas

- *Clorofila a*. Es uno de los pigmentos responsables del proceso fotosintético. La clorofila *a* es la más universal de las clorofilas (*a*, *b*, *c*, y *d*), por lo que supone un indicador de la biomasa algal y se considera la principal variable indicadora del estado trófico de los ambientes acuáticos.
- *Comunidad fitoplanctónica*. Constituida principalmente por algas clorofíceas, diatomeas, euglenofíceas, crisofíceas, dinofíceas y xantofíceas y cianobacterias. Puede utilizarse como indicadora de la calidad del agua y del estado trófico, principalmente en reservorios, y el análisis de su estructura permite evaluar algunos efectos derivados de alteraciones ambientales. La presencia de algunas especies en altas densidades puede comprometer la calidad de las aguas, causando restricciones a su tratamiento y distribución. Se otorga una atención especial a las cianobacterias, que poseen especies potencialmente tóxicas. La presencia de esos organismos se ha relacionado con eventos de mortandad de animales y daños a la salud humana.
- *Comunidad zooplanctónica*. Está formada por animales microscópicos que viven en suspensión, siendo los grupos dominantes en ambientes de agua dulce los rotíferos, cladóceros y copépodos. Esta comunidad es importante en el mantenimiento del equilibrio del ambiente acuático y puede actuar como reguladora de la comunidad fitoplanctónica (utilizándola como alimento) y en el reciclado de nutrientes, además de servir de alimento para diversas especies de peces.
- *Comunidad bentónica*. Corresponde al conjunto de organismos que vive todo o parte de su ciclo de vida en el sustrato de fondo de ambientes acuáticos. Los macroinvertebrados, por ejemplo, se dan en todo tipo de ecosistema acuático, muestran una amplia variedad de tolerancia a varios grados y tipos de Contaminación, tienen una baja motilidad y están continuamente sujetos a las alteraciones de calidad del ambiente acuático. Introducen el componente temporal en el diagnóstico, ya que, en cuanto monitores continuos, hacen posible la evaluación a medio y largo plazo de los efectos de vertidos regulares, intermitentes y difusos, de concentraciones variables de contaminantes.

#### 5.5) Ecotoxicológicas

- *Ensayo ecotoxicológico con Ceriodaphnia dubia*. Se realiza con muestras de agua bruta y se utiliza para evaluar la presencia de efectos tóxicos, agudos y crónicos en los cuerpos de agua donde está prevista la preservación de la vida acuática. El resultado del ensayo se expresa como agudo (cuando se da un efecto significativo en la supervivencia de los organismos, dentro del periodo

inicial de 48 horas) o crónico (cuando se da un efecto significativo en la reproducción y/o supervivencia de los organismos, dentro del periodo de siete días de ensayo). La muestra se considera no tóxica si no se detecta ningún tipo de efecto tóxico para los organismos sometidos a prueba.

- *Ensayo de mutación reversa (test de Ames)*. También denominado ensayo salmonella/microsoma, es eficiente para detectar una gran variedad de compuestos mutagénicos causantes de algunas enfermedades genéticas o que pueden inducir tumores en seres humanos y en animales de experimentación. Una respuesta positiva en el test de Ames indica la presencia en la muestra de uno o más compuestos que pueden interactuar con el material genético y causar una mutación. Las muestras de manantiales utilizados para el abastecimiento público que presentan actividad mutagénica sugieren la necesidad de aplicar niveles de tratamiento diferenciados, así como la reducción de las fuentes de contaminación en las ETA.

## 5.6) Bioanalíticas

- *Determinación de la actividad estrogénica*. Los perturbadores endócrinos son compuestos que pueden interferir en la producción o acción de las hormonas, pudiendo causar daños al sistema reproductor e inmunológico de organismos superiores, especialmente acuáticos. Estos compuestos pueden llegar a los manantiales por la contaminación con aguas residuales o con plaguicidas u otros compuestos aplicados en el suelo. Diversas clases de compuestos pueden conllevar una actividad estrogénica (un tipo de interferencia endocrina), como hormonas naturales y sintéticas (estradiol, estriol, etinilestradiol), fitoestrógenos u otros contaminantes (bisfenol A, PCB, plaguicidas).

## 6. Estándares de calidad del agua

Los Estándares de calidad del agua expresan características de orden físico, químico y biológico deseables en las aguas, con el fin de atender a sus usos preponderantes. Tales usos, en Brasil, están protegidos por los Estándares fijados en las siguientes legislaciones: [Resolución CONAMA nº 357/2005](#), [orden ministerial del Ministerio de Salud nº 2914/11](#), [Resolución CONAMA nº 274/2000](#) y [Resolución CONAMA nº 430/2011](#), que establece los Estándares para la descarga de efluentes en los cuerpos de agua.

### 6.1) Resolución CONAMA n.º 357/2005

El Consejo Nacional de Medio ambiente (CONAMA) definió las clases de calidad de aguas dulces, salinas y salobres por medio de la Resolución CONAMA 357/2005. Para cada clase de calidad, se asocian usos preponderantes actuales o futuros, fijándose o adoptándose Estándares de calidad, los cuales corresponden a los valores límites de los parámetros de calidad establecidos por la legislación. Esta resolución también presenta las directrices ambientales para la clasificación de los cuerpos de agua, es decir, las metas u objetivos de calidad del agua que han de lograrse o mantenerse

obligatoriamente en un tramo en función de los usos preponderantes que se pretenden a lo largo del tiempo. La clasificación es uno de los instrumentos previstos en la Política Nacional de Recursos Hídricos, definida por la Ley nº 9433/1997, que es fundamental para la gestión de los recursos hídricos y para la planificación ambiental. La [Resolución CONAMA n.º 357/2005](#) estableció 13 clases para los cuerpos de agua, 5 de ellos de agua dulce, 4 de aguas salobres y 4 de aguas salinas. En el estado de São Paulo, los cuerpos de agua dulce se clasificaron por el [Decreto estatal nº 10.755 de 1977](#), pero no incluyó las aguas salinas y salobres, que deben seguir los Estándares de clase 1, según el artículo 42 de la Resolución CONAMA nº 357/2005.

#### 6.2) Orden ministerial del Ministerio de Salud nº 2914/2011

Establece los procedimientos y responsabilidades relativos al control y la vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano y su patrón de potabilidad. Además, establece competencias y responsabilidades para la Unión, las secretarías de Salud estatales y municipales y para los responsables de los sistemas de abastecimiento de agua y de soluciones alternativas de abastecimiento para el consumo humano, y define las penalizaciones a los responsables que no observen las determinaciones recogidas en la orden ministerial.

#### 6.3) Resolución CONAMA n.º 274/2000

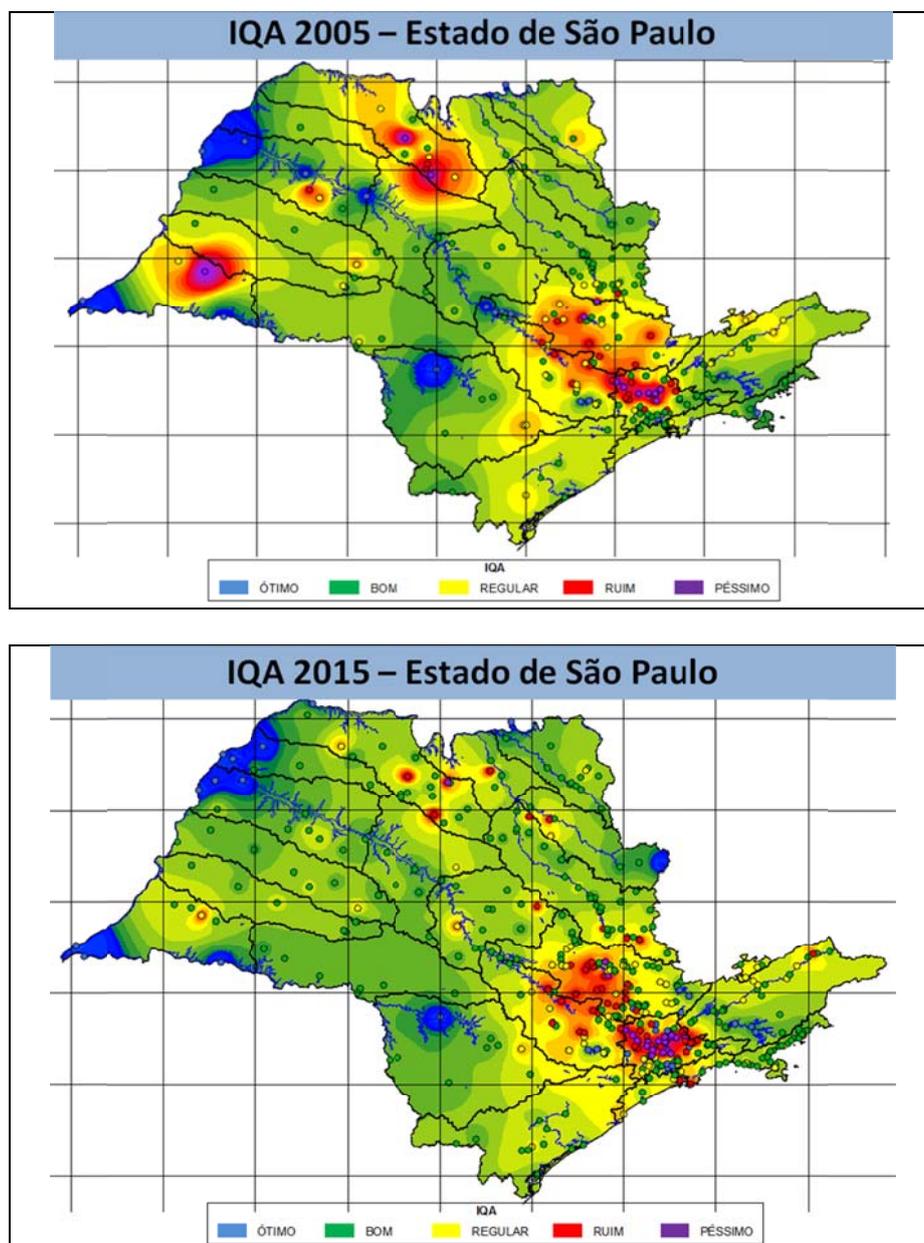
Define los criterios de las aguas brasileñas (dulces, salinas y salobres) destinadas a la balneabilidad (recreación de contacto primario) y establece una clasificación, propia o impropia, basada en los resultados obtenidos para el análisis de coliformes fecales (termotolerantes) en un conjunto de cinco muestras consecutivas, recogidas semanalmente en el mismo lugar.

#### 6.4) Resolución CONAMA n.º 430/2011

Regula las condiciones y normas de descarga de efluentes en los cuerpos de agua receptores y complementa y modifica la Resolución CONAMA n.º 357/2005. Según esta resolución, la descarga indirecta de efluentes, es decir, los que se someten o no a un tratamiento mediante la red colectora, debe seguir lo dispuesto en esa resolución, siempre y cuando se verifique la inexistencia de una ley o norma específica y otras disposiciones del órgano ambiental competente, y no confiera al cuerpo receptor unas características de calidad que no respeten las metas de su clasificación.

## 7. Variações espaciais e temporais

El monitoreo sistemático es uno de los principales instrumentos utilizados para evaluar la evolución de la calidad de las aguas a nivel espacial y temporal, puesto que se basa en el seguimiento continuo de los aspectos cuantitativos y cualitativos de las aguas. Para ello, se necesitan levantamientos de campo, obtención de muestras de agua, análisis de laboratorio, medición de caudales, etc. Las informaciones obtenidas a partir del monitoreo hacen posible la elaboración de un diagnóstico de la calidad del agua, lo que a su vez permite identificar áreas prioritarias para el control de la Contaminación de las aguas, tales como tramos de ríos y estuarios donde su calidad pueda estar más comprometida, haciendo posible acciones preventivas y correctivas por parte de los órganos ambientales (Figura 59).



**Figura 59.** Variação Espacial e Temporal do índice de qualidade de água (IQA) de 2005 e 2015 em el estado de São Paulo (Midaglia, C.L., 2016).

Las alteraciones en la calidad y cantidad del agua en los sistemas fluviales se ven influidas predominantemente por fuentes puntuales y por la escorrentía subterránea (básica) en los periodos de sequía. En periodos de lluvia, por otro lado, la calidad del agua se ve más influida por fuentes difusas que propician el aporte de contaminantes a partir de procesos de escorrentía superficial y subsuperficial (Horowitz, 2013). Por otro lado, en los lagos y reservorios pueden darse alteraciones químicas en función del tiempo de retención del agua y de las características morfométricas de esos cuerpos de agua, según se vio en el capítulo 1.

## 7.1 Fuentes puntuales

Las aguas residuales domésticas representan también una contribución significativa a la degradación de la calidad de los cuerpos de agua en áreas urbanizadas y en las regiones agrícolas, no solo en el estado de São Paulo, sino también a nivel nacional (CETESB, 2016). Uno de los aspectos más importantes de la calidad de las aguas afectadas por las aguas residuales domésticas es la cuantificación de las cargas afluentes, que se expresa como la masa de un determinado contaminante por unidad de tiempo:

$$\text{Carga (kg d}^{-1}\text{)} = \text{Contribución (g m}^{-3}\text{)} \times \text{Caudal (m}^3 \text{d}^{-1}\text{)} \times 0,001 \text{ (kg g}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Por otro lado, la carga de las aguas residuales domésticas que se vierte sin tratamiento en los cuerpos receptores se denomina *carga orgánica remanente* y se representa por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Esa carga se obtiene a partir de la carga orgánica potencial, que representa la cantidad de materia orgánica generada por habitante diariamente y los porcentajes de recogida y tratamiento, así como por la eficiencia global del sistema de tratamiento de aguas residuales. Para fines de cálculo de la carga orgánica remanente en el Estado de São Paulo, se adopta el valor obtenido de la literatura especializada correspondiente a 0,054 kg habitante<sup>-1</sup> día para la carga orgánica potencial ( $C_{OP}$ ).

$$C_R = [C_{OP} - (C_{OP} \times C \times T \times E)] \times 0,001 \quad (2)$$

En donde:

$C_{OP}$  = Población x 0,054 (kg DBO habitante<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>);

$C_R$  = Carga remanente (t DBO d<sup>-1</sup>);

$C$  = Coeficiente de recolección de aguas residuales;

$T$  = Coeficiente de tratamiento de aguas residuales;

$Y$  = Coeficiente de eficiencia del sistema

0,001 = Factor de conversión (t kg<sup>-1</sup>)

La Figura 60 presenta la evolución de la carga anual remanente de la DBO en el estado de São Paulo entre 2010 y 2015. Se observa una reducción de la carga remanente de la DBO de un 18 % entre 2010 y 2015, lo que significa que unas 225 t

DBO  $d^{-1}$  dejaron de verse a los cuerpos de agua del estado. No obstante, en relación con 2014, esa reducción fue solo del 4,9 %.

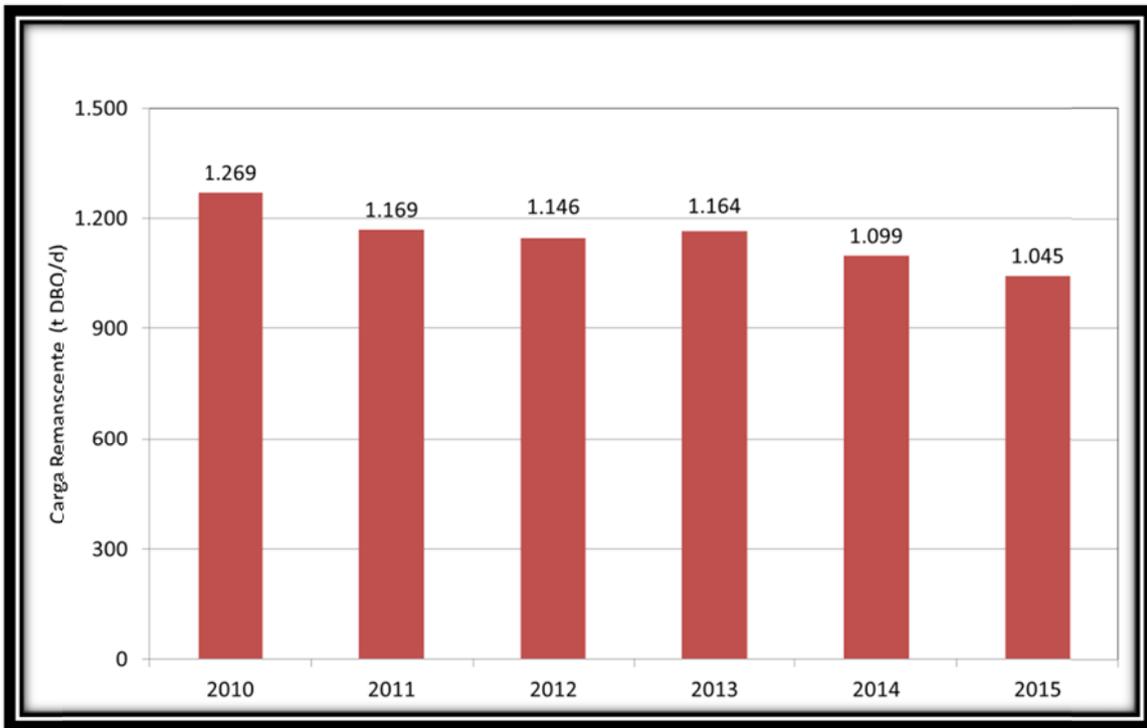


Figura 60. Evolución de la carga remanente en el estado de São Paulo de 2010 a 2015 (CETESB, 2016).

En términos espaciales, la Figura 61 pone de manifiesto las cargas remanentes de DBO para cada una de las 22 unidades de gestión de recursos hídricos (UGRHI) del estado de São Paulo. En función de la concentración de población en la RMSP y de los índices de saneamiento, la carga remanente del Alto Tietê de 579 t DBO  $d^{-1}$  es responsable del 55 % de la carga vertida en los cuerpos de agua del estado de São Paulo. Por lo tanto, en el tramo del río Tietê, situado en la UGRHI 6, concentra en el río Tietê una carga destacada de DBO. La UGRHI 5 tiene la segunda mayor carga remanente y es la del Piracicaba, Capivari y Jundiaí, con 102 t DBO  $d^{-1}$ , que representa un porcentaje del 10 % de la carga remanente generada en el estado de São Paulo, siendo la carga remanente generada en esta UGRHI distribuida por los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiaí.

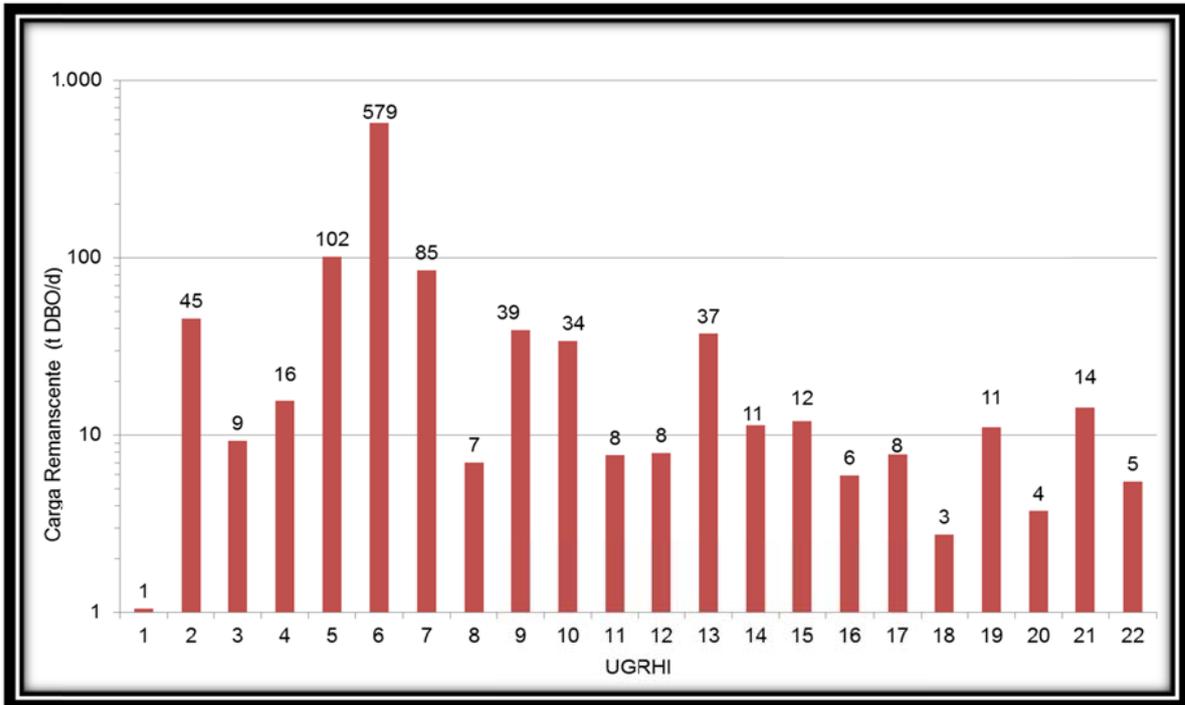


Figura 61. Carga remanente de DBO por unidade de gestão de recursos hídricos (UGRHI) (CETESB, 2016).

## 7.2 Fuentes difusas

Las alteraciones en la calidad del agua por fuentes difusas pueden proceder del aire, de la superficie terrestre y de zonas subsuperficiales, así como de los sistemas de drenaje urbanos. Las cargas de contaminantes procedentes de fuentes difusas son transportadas tanto por la superficie del suelo como por la subsuperficie antes de llegar a los cuerpos receptores (Figura 62).

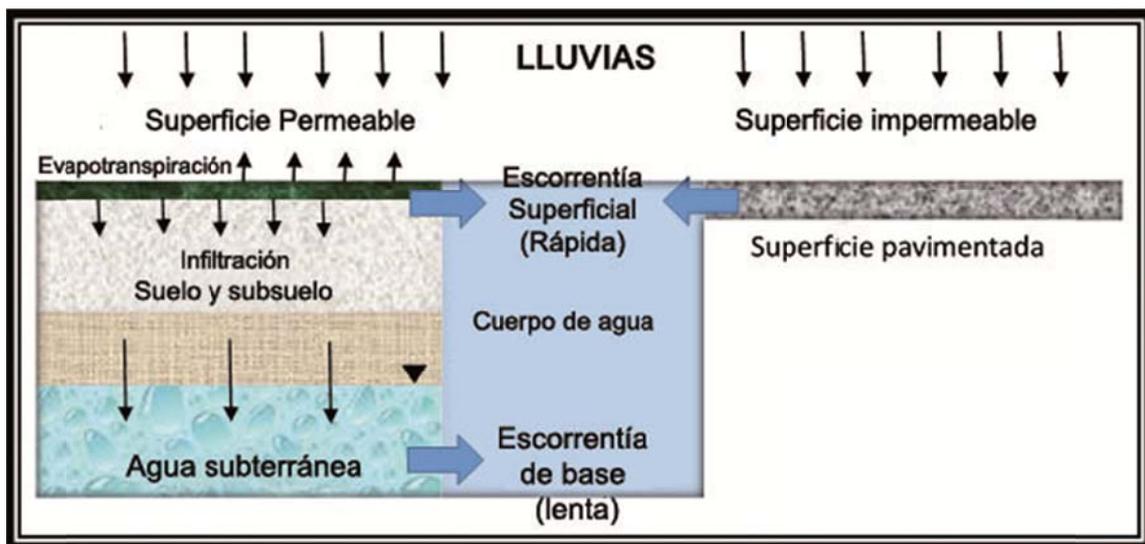


Figura 62. Transporte de contaminantes de origen difuso por la superficie y subsuperficie (adaptado de Novotny, 2003).

Según Novotny (2003), las cargas difusas pueden proceder de:

1. Fuentes atmosféricas

- Cargas de contaminantes en deposición seca y húmeda (Contaminación de la atmósfera).

2. Fuentes terrestres

- Contaminantes acumulados en superficies impermeables tras el lavado y transporte por el flujo superficial;
- Erosión de partículas de suelo y de contaminantes asociados en áreas permeables debido a la precipitación y a la escorrentía superficial y que son transportados por el flujo superficial;
- Contaminantes disueltos de suelos y transportados por el flujo superficial;

3. Fuentes subsuperficiales

- Constituyentes químicos aplicados en la superficie de suelos y lixiviados en dirección a las aguas subterráneas mediante la infiltración;
- Constituyentes químicos transportados por el flujo horizontal en las aguas subterráneas;
- Infiltración en las aguas subterráneas a partir de colectores de aguas residuales y pluviales y de otras instalaciones subterráneas;
- Fuga de contaminantes de tanques de almacenamiento subterráneo y de rellenos sanitarios al agua subterránea;

4. Fuentes diversas

- Sólidos acumulados en colectores de aguas residuales;
- Erosión de canales de drenaje;
- Erosión de márgenes y del lecho de ríos;
- Sustancias químicas liberadas de sedimentos acuáticos contaminados

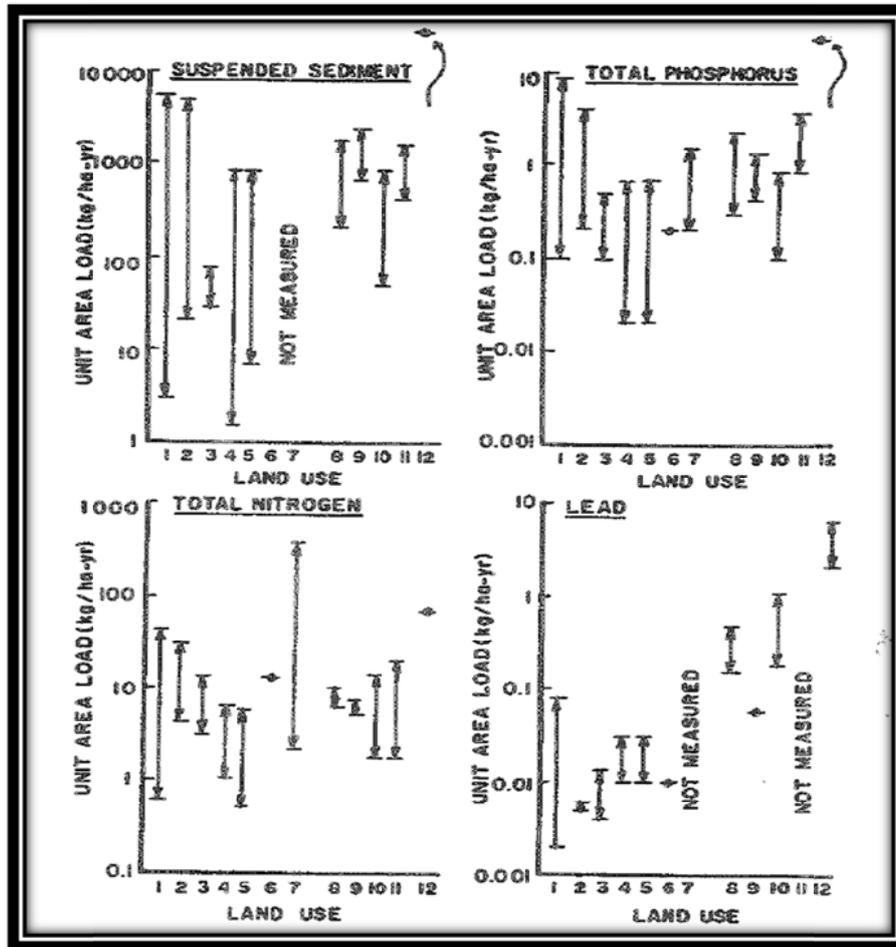
Es preciso aclarar también que el vertido de aguas residuales domésticas puede verse como una carga puntual o difusa, principalmente en aquellos municipios que no cuentan con un sistema universal de recolección y tratamiento de aguas residuales. En ese caso, también deben considerarse como carga difusa las contribuciones de tiempo seco relacionadas con el vertido de aguas residuales domésticas no tratadas (Menegon Jr, 2005).

Los flujos y cargas superficiales son intermitentes y se dan solo durante episodios de lluvias o deshielo. El componente de flujo que transporta la carga de superficie se denomina *escorrentía superficial*, y equivale a la precipitación residual, que tiene un sentido de flujo aproximadamente horizontal, con una velocidad que varía entre centímetros por segundo y metros por segundo. En cuanto a las cargas subsuperficiales que proceden del agua que se infiltra en el suelo y de la lixiviación de

contaminantes en el perfil, a partir de la aplicación de sustancias en la superficie del suelo (como fertilizantes y plaguicidas), su sentido de flujo es predominantemente vertical, aunque puede cambiar a casi horizontal, dependiendo de la capa freática. El aporte de esas cargas en los cuerpos de agua receptores es continuo y el componente de flujo que las transporta se denomina *escorrentía básica* o *escorrentía subterránea*, y procede de la descarga de agua subterránea (Novotny, 2003).

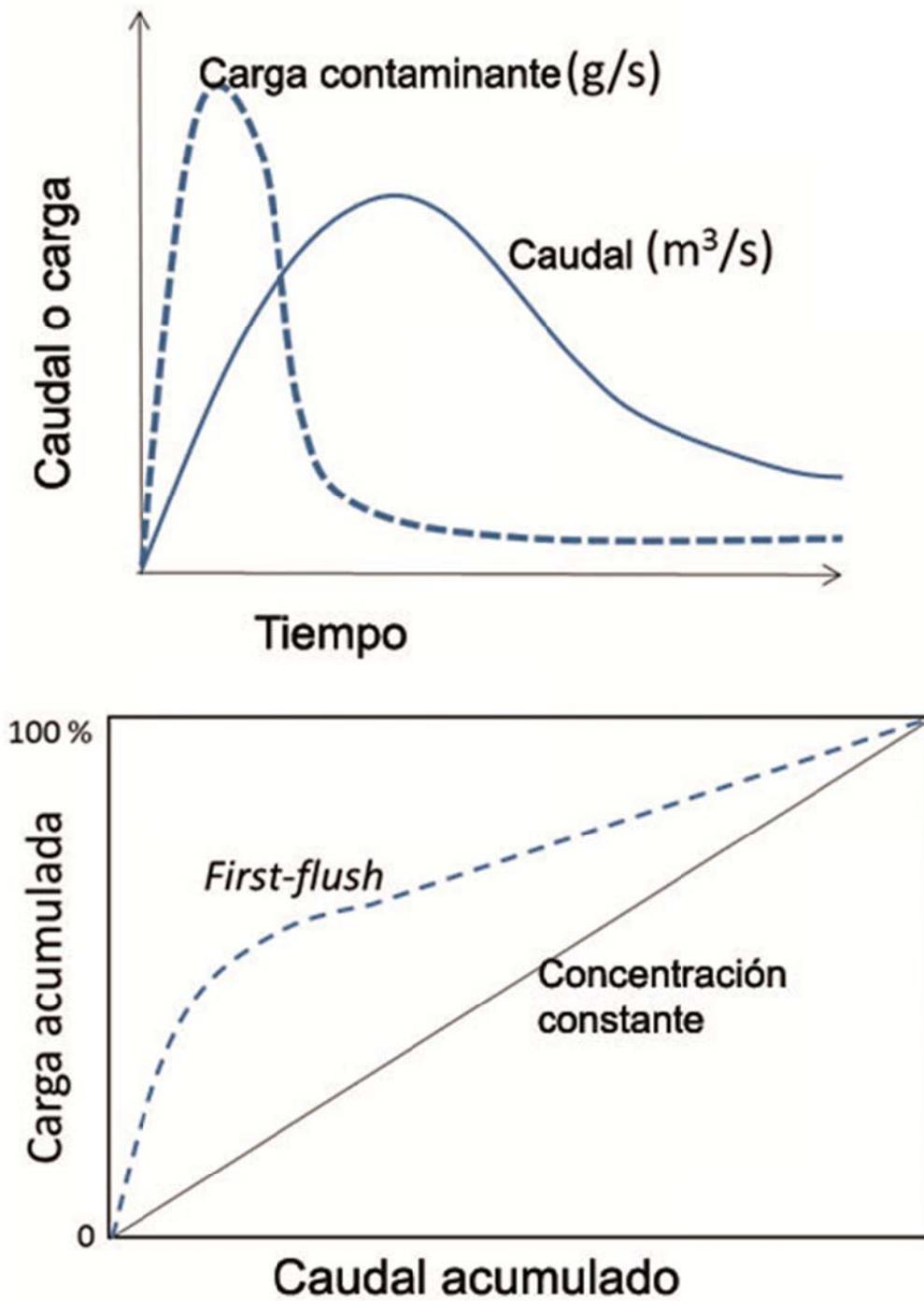
Las cargas superficiales de origen difuso se denominan *coeficientes de exportación* o *cargas unitarias* y sus valores o funciones representan la Contaminación generada por unidad de área y de tiempo, para cada uso de suelo, o ponderado sobre una pequeña cuenca. Sus unidades para un determinado uso del suelo o para un tramo uniforme de la cuenca pueden expresarse, anualmente, en  $\text{kg ha}^{-1}$  o en  $\text{kg persona}^{-1}$ , y su cuantificación en una cuenca depende en gran medida del uso y la ocupación del suelo y de factores demográficos, geográficos e hidrológicos.

En un principio, se pensaba que las cargas unitarias podrían estar correlacionadas con el uso y la ocupación del suelo. Sin embargo, el Proyecto Nacional de Escorrentía Urbana (National Urban Runoff Project - NURP, 1983 apud Novotny, 2003) desarrollado en la Región de los Grandes Lagos de Estados Unidos, obtuvo resultados para la concentración de contaminantes en la escorrentía superficial que solo se pudieron correlacionar con el área impermeable de la cuenca, en vez de con el uso urbano del suelo. También se dieron variaciones considerables en los resultados para la carga unitaria de contaminantes de uso agrícola, dentro de la misma categoría de cultivo, en una región relativamente homogénea desde el punto de vista meteorológico e hidrológico (Figura 63).



**Figura 63.** Variaciones en las cargas unitarias de sedimentos suspensos, fósforo total, nitrógeno total y plomo en la Región de los Grandes Lagos, Estados Unidos, en 1970, antes de que se prohibiera el plomo en los combustibles. Usos del suelo: 1. Agricultura en general, 2. Cultivos agrícolas; 3 Pastoreo; 4. Bosques; 5. Cultivos perennes/exóticos; 6. Lodo de aguas residuales; 7. Riego por aspersión; 8. Urbano en general; 9. Residencial; 10. Comercial; 11. Industrial; 12. Urbano en desarrollo (Fuente: Novotny, 2003).

Según Menegon Jr. (2005), las cargas difusas se ven afectadas por diversos factores que pueden influir tanto en la escorrentía como en la concentración, y para cuyo cálculo se usan el volumen de precipitación, la duración del evento y el intervalo entre los eventos. Muchos investigadores han intentado caracterizar la distribución de la concentración dentro de un evento de descarga de escorrentía superficial partiendo del concepto de *first flush*, que se refiere a la primera porción del flujo (caudal de pico) que contiene la mayor parte de la carga contaminante. Como norma general, se asumió que en las áreas urbanas el caudal inicial correspondiente al 40 % de la escorrentía superficial puede contener cerca del 60 % de la carga contaminante (Figura 64). No obstante, esa regla no se aplica a eventos de escorrentía superficial en áreas agrícolas, y el efecto del *first flush* no puede constatararse a partir de descargas de colectores separados de aguas residuales (USEPA, 1983).



**Figura 64.** Concepto de *first-flush*. En un evento de escorrentía urbana el caudal de pico en el hidrograma puede contener una mayor fracción de la carga contaminante que la fracción final (adaptado de Novotny, 2003).

## Concentraciones medias de evento

Teniendo en cuenta que no existen Estándares de concentración dentro de un evento de escorrentía, el Proyecto Nacional de Escorrentía Urbana (NURP) centró su atención en las concentraciones medias de evento (CME), que pueden ser definidas como la masa del contaminante que pasa por la escorrentía dividida por el volumen total de caudal en un evento de lluvias:

$$CME = \sum Q_i C_i / \sum Q_i \quad (3)$$

en donde:

$Q_i$  = Medida sencilla del caudal en el hidrograma del evento

$C_i$  = Concentraciones correspondientes en el polutograma

Por lo tanto, el CME representa la concentración de una muestra compuesta ponderada por el caudal relacionado con un evento de escorrentía superficial que, en la gran mayoría de los casos, es más importante que medidas discretas de las concentraciones en intervalos de tiempo dentro de cada evento (Novotny, 2003).

El estudio NURP también concluyó que la correlación de la CME con variables tales como el volumen de escorrentía, la localización geográfica, los efectos del uso del suelo, la inclinación, el tipo de suelo y las características de la precipitación no pueden explicar las semejanzas o diferencias en la CME entre las diversas localidades del muestreo en los Estados Unidos. Como esas variables no tienen impactos significativos en las CME y no explican las variabilidades espaciales o temporales, se combinaron los datos de todos los emplazamientos de la muestra para obtener una CME característica (mediana o percentil 90) por variable. Además, recurriendo a los datos y la metodología del estudio NURP, puede utilizarse esta relación para calcular la carga unitaria de una cuenca:

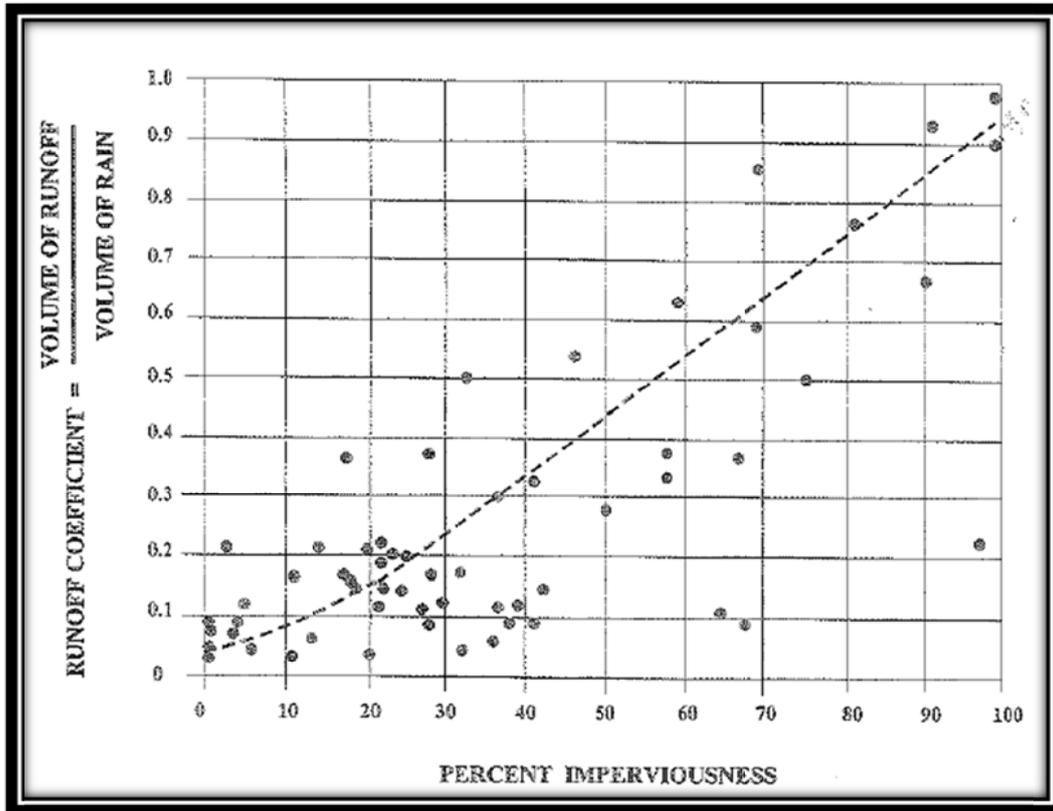
$$\text{Carga (kg ha}^{-1}\text{)} = 0,01 \text{ CR} \times \text{R} \times \text{CME} \quad (4)$$

donde:

CR = Coeficiente de escorrentía (adimensional) extraído de la relación mostrada en la Figura 65;

R = Precipitación (mm);

CME = Concentración media de evento ( $\text{mg L}^{-1}$ ) ( $= \text{g m}^{-3}$ )



**Figura 65.** Relación entre el coeficiente de escorrentía (CR = volumen de escorrentía / volumen de precipitación) y el porcentaje de áreas impermeables en áreas urbanas obtenido a partir del estudio NURP (Fuente: Novotny, 2003).

Por ejemplo, para una área urbana residencial común que presenta un porcentaje de área impermeable del 50 %, el coeficiente de escorrentía (CR), según muestra la Figura 65, será igual a 0,45. Si se desea calcular la carga unitaria anual del carbono orgánico disuelto (COD) en esa área con una precipitación anual de 800 mm, se debe utilizar la mediana y el percentil 90 para el COD, que corresponden a 82 y 176 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Esos valores se obtuvieron a través de la ecuación 3 y representan la CME característica para el COD en el área urbana residencial. Así, a través de la ecuación 4, la carga unitaria mediana y del percentil 90 para el COD será de 295,2 y 633,6 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

## Referências Bibliográficas

CETESB. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2015**. São Paulo, 2016. 401 p. (Série Relatórios). Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>>. Consultado em dezembro de 2016.

CHAPMAN, D. **Water Quality Assessments**. 2<sup>nd</sup> Ed., London, E&FN Spon, 1996. 626 pp.

BRAGA, B. , HESPANHOL, I., CONEJO, J. G. L., MIERZWA, J. C., BARROS, M. T. L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N. EIGER, S. . **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2<sup>a</sup> Ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 318 pp.

HOROWITZ, A. J. A review of selected inorganic surface water quality-monitoring practices: are we really measuring what we think, and if so, are we doing it right? **Environmental Science and Technology**, 47: 2471-2486, 2013.

MENEGON, Jr. N. **Aplicação do Modelo Matemático de Qualidade da Água-SIMOX-III- na Bacia do Rio Camanducaia**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NOVOTNY, V. **Water Quality: Diffuse Pollution and watershed Management**. 2<sup>nd</sup> Ed., New Jersey: John Willey & Sons, 864 pp.

PORTO, R. L (Org.). **Fundamentos para a Gestão da Água**. São Paulo: SMA, 232 pp.

YAN, S., SUBRAMANIAM, S. B., TYAGI, R. D., SURAMPALLI, R. Y., ZHANG, T. C. Emerging contaminants of environmental concern: source, transport, fate , and treatment. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive waste Management**. 14(1): 2-20; 2010.

## INSTITUIÇÕES COLABORADORAS



## INSTITUIÇÕES ORGANIZADORAS



Cooperação  
**Representação  
no Brasil**



**MINISTÉRIO DO  
MEIO AMBIENTE**