Francisco Javier Bayo Bernal
Calidad de Aguas
Grado en Ingeniería Civil
Universidad Politécnica de Cartagena

TEMA 5.
LAGOS Y RESERVORIOS

1. Estado trófico
2. Estratificación térmica
3. Modelos de calidad
4. Depuración por lagunaje

1. Estado trófico

TEMPERATURA

Toma de muestras a 30 y 60 cm de profundidad

CÁLCULO DEL OXÍGENO DISUELTO

Tabla ASCE

$$OD_{sat} = 14{,}652 - 0{,}41022 \cdot T + 0{,}0079910 \cdot T^2 - 0{,}000077774 \cdot T^3$$

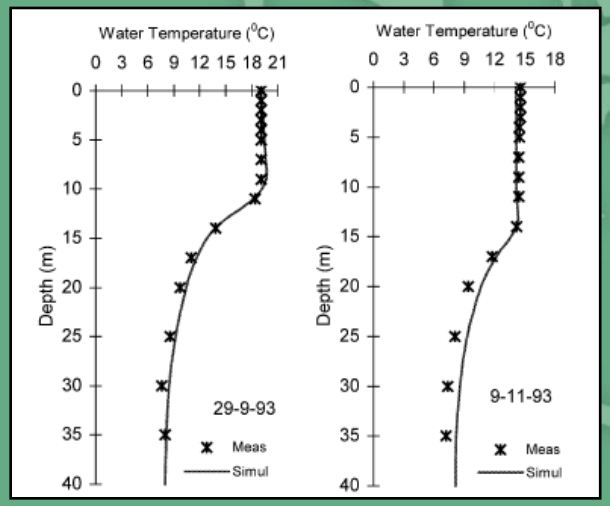
Simulación matemática de temperatura y oxígeno disuelto en un lago → Modelo unidimensional basado en la profundidad

TEMPERATURA

$$A\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(AK_Z\frac{\partial T}{\partial z}\right) - \frac{1}{\rho c_p}\frac{\partial Aq}{\partial z}$$

OXÍGENO DISUELTO

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial z}\left(AK_z\frac{\partial C}{\partial z}\right) \pm S$$



IMÁGENES TOMADAS DE:
Antonopoulos and Gianniou (2003). Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution on Lake Vegoritis, Greece. Ecological Modelling 160: 39-53.

1. Estado trófico

N - P

OLIGOTROFIA ↔ EUTROFIA

EUTROFIZACIÓN NATURAL ↔ EUTROFIZACIÓN CULTURAL

FACTORES

- Cantidad de luz
  - Zona eufótica
  - Nivel de compensación de luz
  - Zona profunda
- Nutrientes
  - Nitrógeno
  - Fósforo
- Clorofila a

Dillon & Rigler (1974)

Entre el 1-2% del peso seco del fitoplancton

Estimación de la biomasa

$$Chl\text{"a"} = 0{,}0731 \cdot P^{1{,}449}$$

$$\begin{cases} 6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{luz} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \\ C_5H_7NO_2 + 5O_2 \longrightarrow 5CO_2 + 2H_2O + NH_3 \end{cases}$$

Stumm & Morgan (1996)

$$106CO_2 + 16NH_4^+ + HPO_4^= + 106H_2O \underset{R}{\overset{F}{\Longleftrightarrow}} C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 106O_2 + 14H^+$$

IET

1. Estado trófico

ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

IET = 9,81·ln[Chl"a"] + 30,6

IET = 14,42·ln[PT] + 4,15

OLIGOTRÓFICO

Chl"a" <2,6 mg/L – PT <12 mg/L – IET <40

MESOTRÓFICO

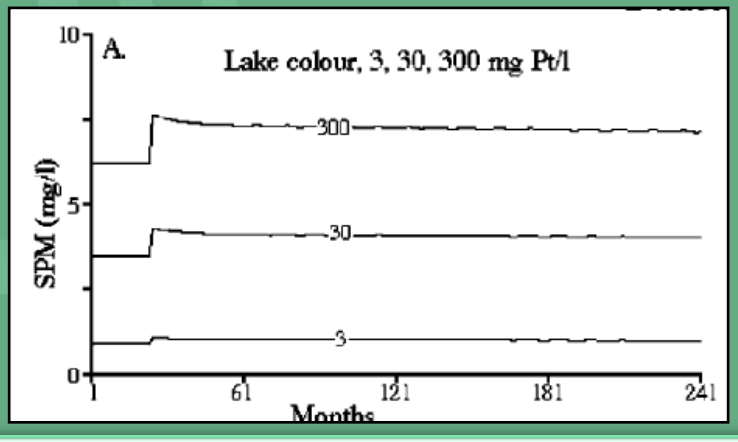
Chl"a" 2,6-7,2 mg/L – PT 12-24 mg/L – IET 40-50

EUTRÓFICO

Chl"a" 7,2-55,5 mg/L – PT 24-96 mg/L – IET 50-70

HIPEREUTRÓFICO

Chl"a" >55,5 mg/L – PT >96 mg/L – IET >70



Clasificación en niveles tróficos por colores

IMAGEN TOMADA DE:
Håkanson (2003). Liming as a method to remedy lakes contaminated by radiostrontium. Journal of Environmental Radioactivity 65: 47-75.

OECD

1. Estado trófico

Rangos de estados tróficos según la OECD

Table 5
OECD ranges of trophic state variables based on scientists' opinions (after Vollenweider and Kerekes, 1980)

Trophic-state variable	Trophic State			City Park Lake		
	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	1979–1983	1983–1984	2000–2001
TP (μg/l)						
Geometric mean	8	27	84	332	196	330
Range (*n*)	3–18 (21)	11–96 (19)	16–390 (71)			
TN (μg/l)						
Geometric mean	660	750	1900	3074	997	682
Range (*n*)	310–1600 (11)	360–1400 (8)	390–6100 (37)			
Chl-a (μg/l)						
Geometric mean	1.7	4.7	14	191.1	2.7	35.1
Range (*n*)	0.3–4.5 (22)	3–11 (16)	2.7–78 (70)			
Peak Chl-a (μg/l)						
Geometric mean	4.2	16	43	793.8[a]	63.3[a]	95.4[a]
Range (*n*)	1.3–11 (6)	5–50 (12)	10–280 (46)			
Secchi depth (m)						
Geometric mean	9.9	4.2	2.4	0.2	0.3	0.4
Range (*n*)	5.4–28 (13)	1.5–8.1 (20)	0.8–7.0 (70)			

Note: Table was adapted from USEPA Nutrient Guidance for Lakes and Reservoirs, 2000 (USEPA, 2000).
[a] Peak concentration for sampling period.

IMAGEN TOMADA DE:
Ruley and Rusch (2002). An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake. Ecological Engineering 19: 265-280.

2. Estratificación térmica

DESESTRATIFICACIÓN

TRANSPARENCIA

Entrada de luz al lago

Entrada de radiaciones de onda corta

Discos Secchi

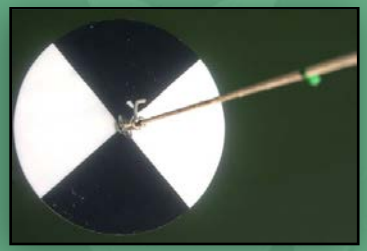


IMAGEN TOMADA DE:
http://www.tnfish.org/WaterQualitySampling_TWRA.
10/09/2012

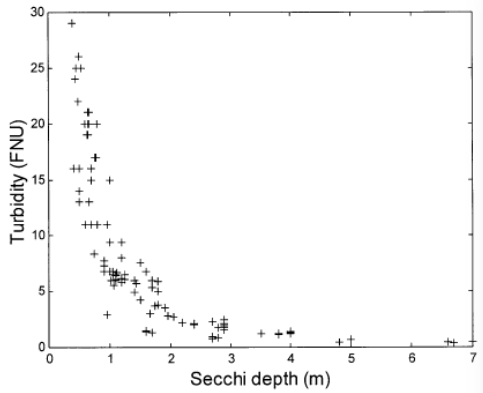


Fig. 1. The relationship between Secchi depth and turbidity.

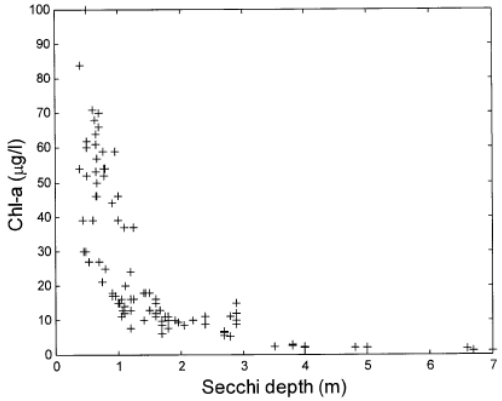


Fig. 2. The relationship between Secchi depth and chl-*a*.

IMÁGENES TOMADAS DE:
Koponen *et al.* (2002). Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. Remote Sensing of Environment 79: 51-59.

Table 2
Comparison between the variables and class limits of the general classification system developed for lakes in Finland and the OECD lake water classification scheme

Variable	Class				
	Ultraoligotrophic (excellent)	Oligotrophic (good)	Mesotrophic (satisfactory)	Eutrophic (poor)	Hypertrophic (bad)
Secchi depth (m), Finnish	>2.5	1–2.5	<1		
Secchi depth (m), OECD	>12	>6	6–3	3–1.5	<1.5
Turbidity (FNU), Finnish	<1.5	>1.5			
Turbidity (FNU), OECD	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Total phosphorous (μg/l), Finnish	<12	<30	<50	50–100	>100
Total phosphorous (μg/l), OECD	<4	<10	10–35	35–100	>100
Mean chl-*a* in the growing season (μg/l), Finnish	<4	<10	<20	20–50	>50
Max. chl (μg/l), OECD	<2.5	<8	8–25	25–75	>75

N/A = not applicable.

- ↓ Algas ➔ ↑ Transparencia
- ↑ Algas ➔ ↓ Transparencia
- No hay cambios

2. Estratificación térmica

Variación de la densidad del agua con la temperatura

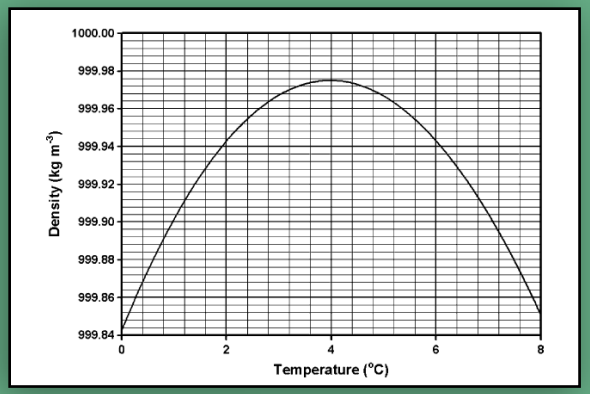
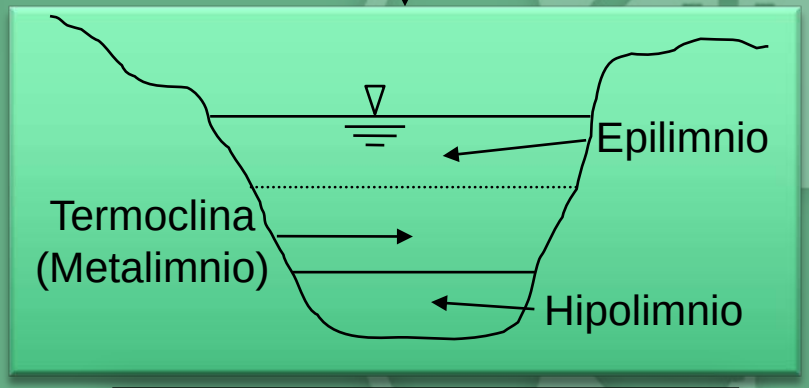
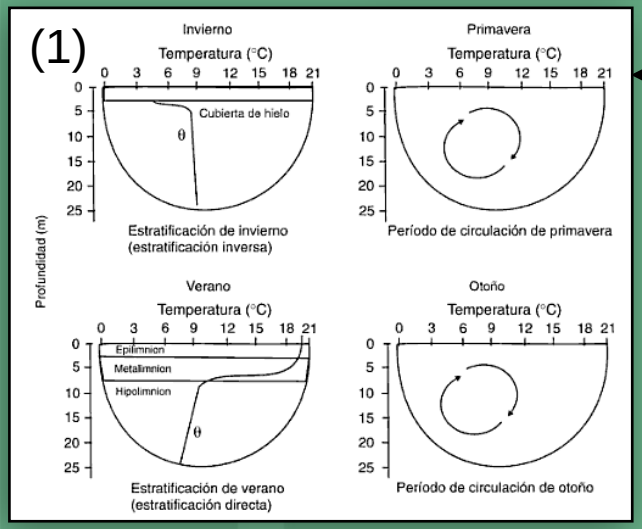


IMAGEN TOMADA DE:
Cawley (2006). Measurement of the temperature of density maximum of water solutions using a convective flow technique. International Journal of Heat and Mass Transfer 49: 1763-1772.

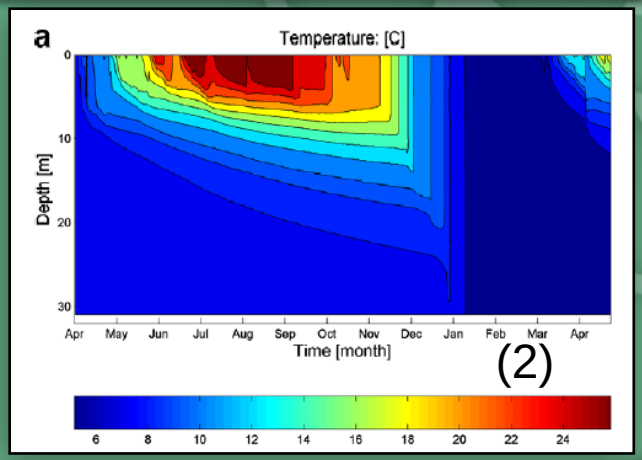
TEMPERATURA





Perfiles de temperatura en un lago de zona templada

Modelización de temperatura



IMÁGENES TOMADAS DE:
(1) Roldán Pérez y Ramírez Restrepo (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Universidad de Antioquía: Colombia. 442 pp.; (2) Dueri *et al.* (2009). Modelling the influence of thermal stratification and complete mixing on the distribution and fluxes of polychlorinated buphenyls in the water column of Ispra Bay (Lake Maggiore). Chemosphere 75: 1266-1272.

OD

2. Estratificación térmica

LAGOS ESTRATIFICADOS

Oligotrófico

Eutrófico

Hipolimnio ↓↓[O_2]

Epilimnio ↑↑ [O_2]

Hipolimnio ↓↓[O_2]

SI

NO + respiración endógena

Zona eufótica extendida por debajo de termoclina

FOTOSÍNTESIS

OXÍGENO DISUELTO

Concentración de oxígeno en el epilimnio

$$\frac{dO_e}{dt} = \frac{k_s}{h}(O_e^{sat} - O_e) + \frac{k_{th} + w_{th}}{h}(O_h - O_e) + r_e$$

Concentración de oxígeno en el hipolimnio

$$\frac{dO_h}{dt} = \frac{k_{th}}{D-h}(O_e - O_h) - \frac{S_{ox}}{D-h} - r_h$$

IMÁGENES TOMADAS DE:
Bell *et al.* (2006). Using a 1-D mixing model to simulate the vertical flux of heat and oxygen in a lake subject to episodic mixing. Ecological Modelling 190: 41-54.

2. Estratificación térmica

MEZCLADO

- Turbulencia inducida por el viento
- Mezclado convectivo
- Mezclado debido a entradas/salidas

- Características morfométricas del lago
- Meteorología
- Factores climáticos

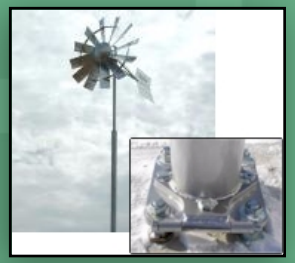
Idso (1973). On the concept of lake stability. Limnology and Oceanography 18: 681-683.

Energía cinética de turbulencia

Resistencia al mezclado de la columna de agua

Cantidad de trabajo requerido para superar fuerzas de flotación y mezclar la columna de agua hasta un valor medio de densidad, sin ganar ni perder calor

SISTEMAS ARTIFICIALES DE DESESTRATIFICACIÓN



IMÁGENES TOMADAS DE: http://www.lake-aeration.com/. 10/09/2012.

3. Modelos de calidad

Desarrollados sobre cargas de fósforo

VOLLENWEIDER

$$C_1 = \left(\frac{L_p}{Q_S}\right)\cdot\left(1+\sqrt{t_w}\right)$$

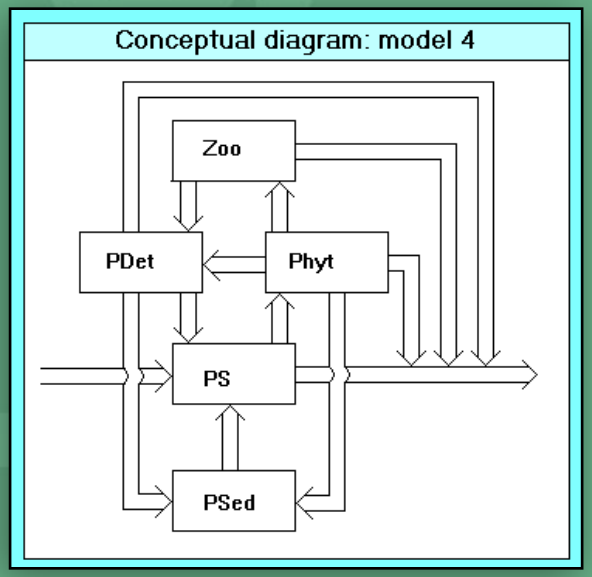
$[L_p]$
Carga de P específica sobre embalse anual (mg/m^2·y)

$[Q_s]$
Profundidad media entre TRH (m/y)

Vollenweider (1975). Input-output models with special reference tothe phosphorus loading concept in limnology. Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie 37: 53-84.

MODELO *STEPS*

SALOMONSEN



$$\frac{dPS}{dt} = (PSi - PS)\cdot\frac{Q}{V} + Decomp\cdot PDet - MyMax\cdot LightLim\cdot PLim\cdot k_1\cdot Phyt + P\,\mathrm{Re}\,l\cdot\frac{PSed}{D}$$

$$\frac{dPhyt}{dt} = \left((MyMax\cdot LightLim\cdot PLim) - MortPhyt - \frac{Q}{V} - SedPhyt\right)\cdot Phyt - Graz$$

$$\frac{dPDet}{dt} = (MortPhyt\cdot Phyt + MortZoo\cdot Zoo)\cdot k_1 - \left(Decomp + \frac{Q}{V} + SedDet\right)\cdot PDet + Graz(1-Y)\cdot k_1$$

$$\frac{dPSed}{dt} = (SedDet\cdot PDet + SedPhyt\cdot Phyt\cdot k_1)\cdot D - P\,\mathrm{Re}\,l\cdot PSed$$

$$\frac{dZoo}{dt} = Graz\cdot Y - \left(MortZoo + \frac{Q}{V}\right)\cdot Zoo$$

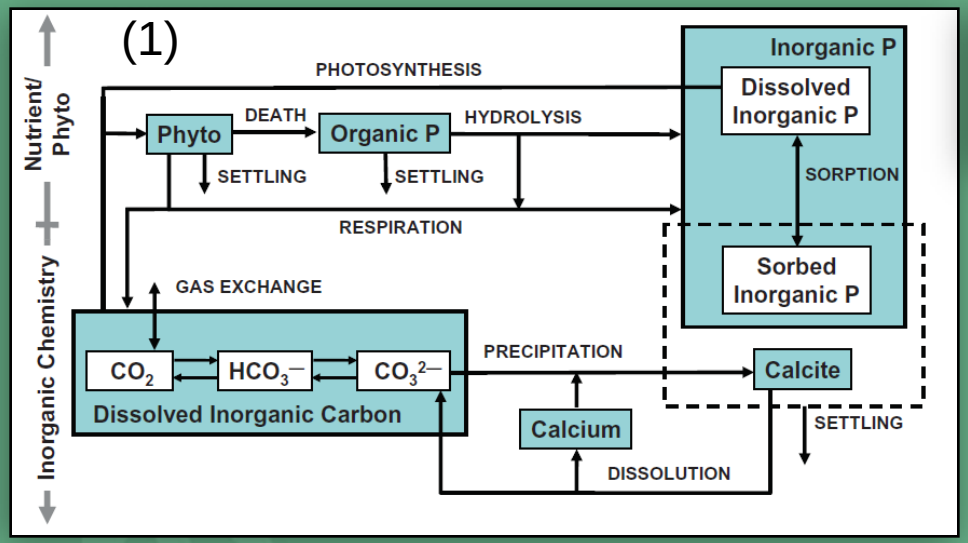
IMAGEN TOMADA DE:
Jørgensen (1994). *Fundamentals of Ecological Modelling*. Elsevier: Amsterdam.

3. Modelos de calidad

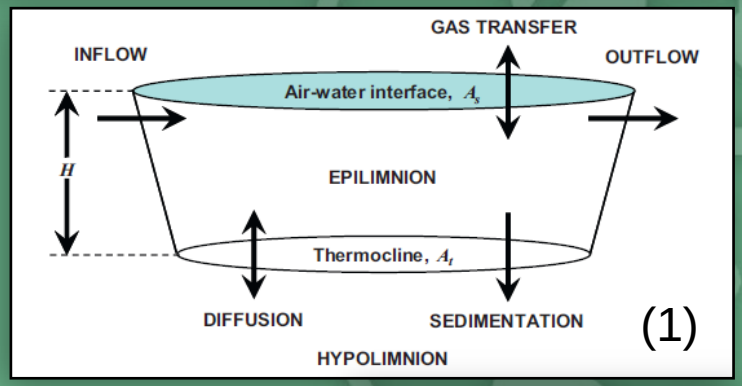
Modelización de otros compuestos

Precipitación de la calcita en epilimnio

HOMA & CHAPRA



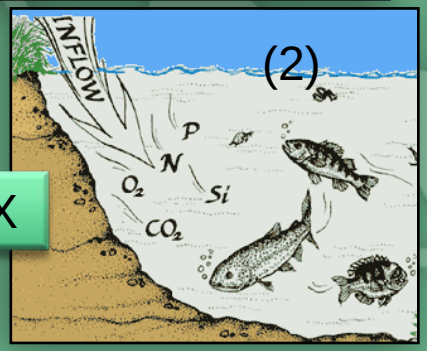
(1) $$\frac{dc}{dt} = \frac{Q_{in}}{V}c_{in} - \frac{Q_{out}}{V}c + \frac{E'_{12}}{V}(c_{hyp} - c) + S$$



Modelos de calidad del agua de la EPA

WASP

AQUATOX



IMÁGENES TOMADAS DE:

(1) Homa and Chapra (2011). Modeling the impacts of calcite precipitation on the epilimnion of an ultraoligotrophic, hard-water lake. Ecological Modelling 222: 76-90; (2) http://water.epa.gov/scitech/datait/models/aquatox/index.cfm. 15/05/2012; (3) http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/wasp.html. 15/05/2012.

4. Depuración por lagunaje

MÉTODOS NATURALES O TRATAMIENTOS BLANDOS

Capacidad de sistemas naturales para descomponer o mineralizar la materia orgánica

- FILTROS VERDES
- LECHOS DE TURBA
- **DEPURACIÓN POR LAGUNAJE**
- PLANTAS ACUÁTICAS

DEPURACIÓN POR LAGUNAJE EN RAFAH (PALESTINA)

- Sedimentación.
- Degradación.
- Síntesis.
- Fotosíntesis.
- Filtración.
- Intercambio gaseoso.
- …

IMAGEN TOMADA DE: http://skipschiel.wordpress.com/2011/11/27/water-rights-in-israel-palestine-a-dialog-part-2/. 07/08/2012

Clasificación

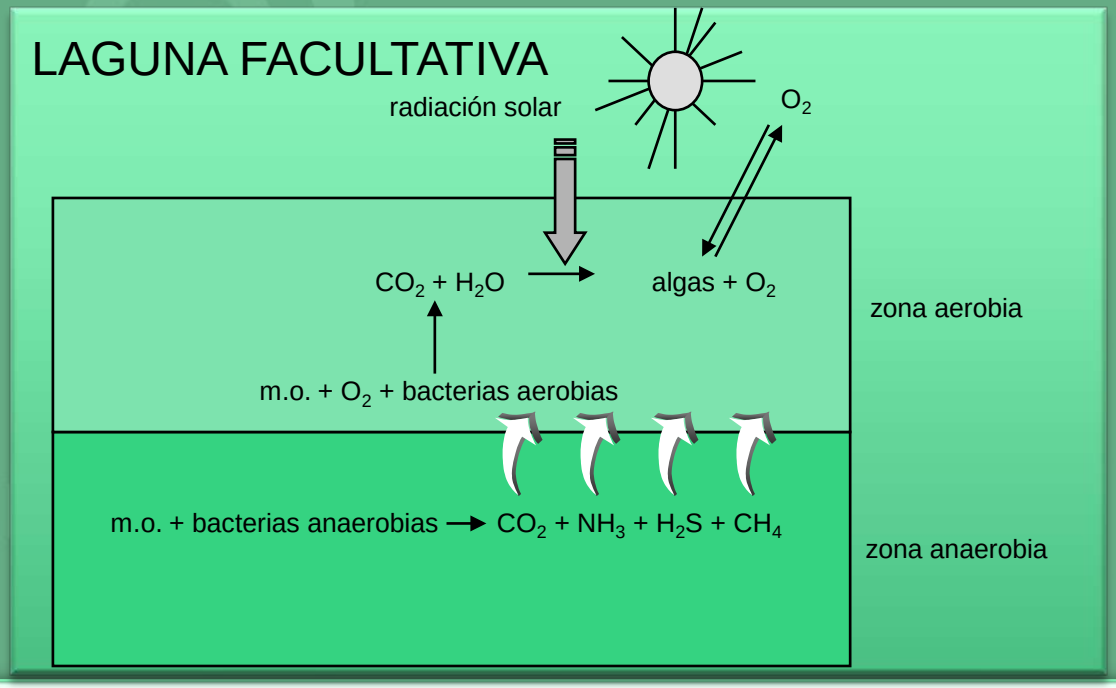
4. Depuración por lagunaje

LAGUNAS ANAEROBIAS

Profundas – $[O_2]$ – 1ª Fase en el tratamiento (↑↑ mat. org.) – DBO >> O_2 fotosíntesis + O_2 difusión ➔ Condiciones anaerobias

LAGUNAS FACULTATIVAS

Carácter intermedio – Profundidad = 1-2 m – Superior ➔ Aerobia (fotosíntesis y difusión); Inferior (sedimentos) ➔ Anaerobia



LAGUNAS AEROBIAS (MADURACIÓN, ESTABILIZACIÓN)

Poca profundidad y ↑↑ superficie – O_2 fotosíntesis + O_2 difusión en todo el volumen – Estabilización de efluentes secundarios (eliminación de patógenos)

Análisis

4. Depuración por lagunaje

PARÁMETROS → DBO_5 (*S*) – TRH (*t*)

Mezcla completa

Flujo arbitrario [Wehner & Wilhelm (1956); Thirumurthi (1974)]

$$\frac{S}{S_0} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}$$

$\sqrt{(1+4K_T td)}$

DBO_5 efluente

DBO_5 afluente

constante de reacción (T^{-1})

$$K_T = K_{20}(1{,}09)^{(T-20)}$$

factor de dispersión

d=D/uL

longitud del tanque (L)

coeficiente de dispersión axial (L^2/T)

velocidad del fluido (L/T)

d=0 → *d=∞*

Diseño

4. Depuración por lagunaje

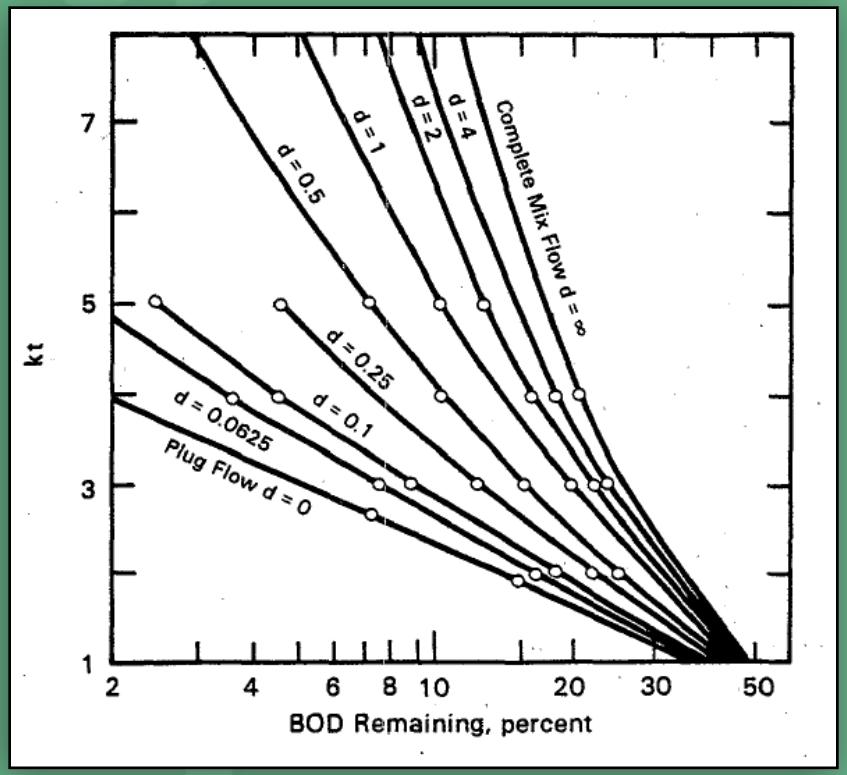


IMAGEN TOMADA DE: *Municipal Wastewater Stabilization Pond*. http://www.epa.gov/nscep/index.htlm. 07/09/2012

LAGUNAS FACULTATIVAS

Condiciones de quiescencia ➔ *d* = 0,3-1,0 – Acumulación de fango → Aireadores superficiales

LAGUNAS ANAEROBIAS

Semejante a digestor anaerobio de fangos

4. Depuración por lagunaje

ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

Salida a la atmósfera (N_2)

Asimilación por algas (NH_4^+)

Sedimentación (R-N)

Nitrificación-Desnitrificación biológica (NO_3^- NO_2^-)

ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO EN LAGUNAS FACULTATIVAS (MODELO FLUJO PISTÓN)

[Reed (1985)]

$$N = N_0 e^{-K_T\left[t+60{,}6\left(pH-6{,}6\right)\right]}$$

Nitrógeno total efluente

Nitrógeno total afluente

$$K_T = K_{20}(1{,}039)^{(T-20)}$$

$$0{,}0064\, d^{-1}$$

ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO EN LAGUNAS FACULTATIVAS (MODELO MEZCLA COMPLETA)

$$N = \frac{N_0}{1+t(0{,}000576T-0{,}00028)e^{(1{,}080-0{,}042T)(pH-6{,}6)}}$$

[Middlebrooks (1985)]

SOME ENGLISH TERMS TO BE FAMILIAR WITH

- ✓ Depuración por lagunaje → Waste stabilization ponds systems
- ✓ Escorrentía superficial → Surface runoff
- ✓ Estratificación térmica → Thermal stratification
- ✓ Lago estratificado → Stratified lake
- ✓ Lago de poca profundidad → Shallow lake
- ✓ Laguna de depuración → Sewage lagoon (Wastewater treatment lagoon)
- ✓ Laguna facultativa → Facultative pond (Oxidation pond)
- ✓ Mezclado convectivo → Convective mixing
- ✓ Perfil de temperatura vertical → Vertical temperature profile
- ✓ Turbulencia inducida por el viento → Wind-induced turbulence
- ✓ Variables de estado del modelo → Model state variables

ACTIVIDADES ON LINE

EPA – AQUATOX MODEL

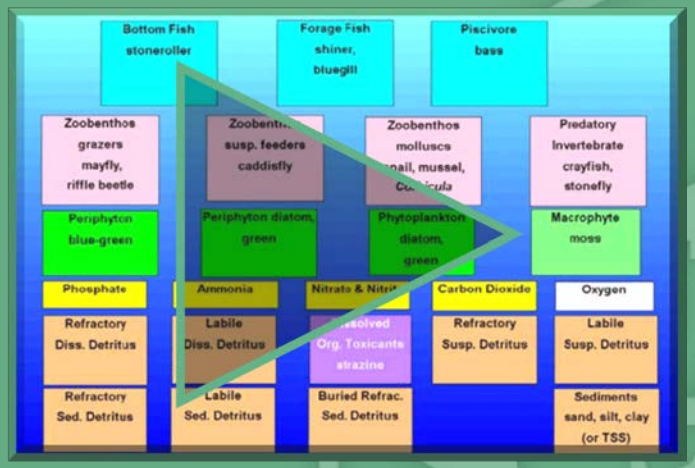
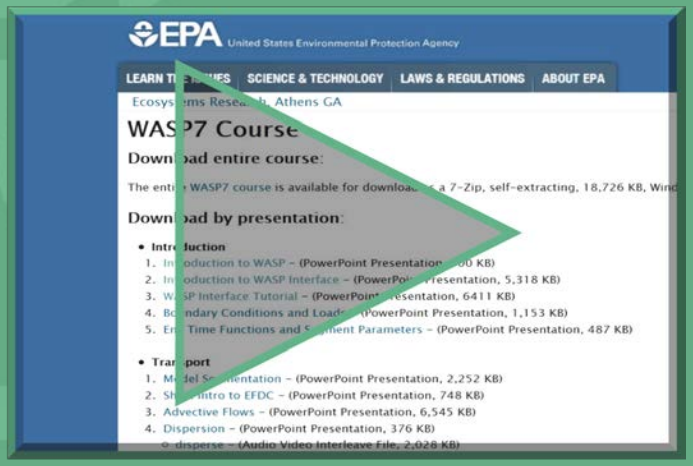


IMAGEN TOMADA DE:
http://water.epa.gov/scitech/datait/models/aquatox/whatdoes.cfm. 17/05/2012

IMAGEN TOMADA DE:
http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/courses/wasp7/index.html. 17/05/2012



EPA – WASP7 MODEL

One step beyond!

EUTROFIZACIÓN DE EMBALSES

THERMAL STRATIFICATION

LAKE AERATION

WATER QUALITY PROFILES

CLEAN LAKES(EPA)

LAKES WATER QUALITY SOCIETY

IMAGEN TOMADA DE: www.gifmania.com.es

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonopoulos, V.Z., Gianniou, S.K. (2003). Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution on Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modelling* 160: 39-53.
- Banda Gawasiri, C. (2003). *Modern Design of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates: Comparison with traditional Design Methods*. Ph Dissertation. School of Civil Engineering. University of Leeds. 128 pp.
- Bell, V.A., George, D.G., Moore, R.J., Parker, J. (2006). Using a 1-D mixing model to simulate the vertical flux of heat and oxygen in a lake subject to episodic mixing. *Ecological Modelling* 190: 41-54.
- Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G. (2005). *Water Treatment: Principles and Design, 2nd ed.* John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey.
- Dueri, S., Castro-Jiménez, J., Zaldívar, J.M. (2009). Modelling the influence of thermal stratification and complete mixing on the distribution and fluxes of polychlorinated buphenyls in the water column of Ispra Bay (Lake Maggiore). *Chemosphere* 75: 1266-1272.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Håkanson , L. (2003). Liming as a method to remedy lakes contaminated by radiostrontium. *Journal of Environmental Radioactivity* 65: 47-75.
- Homa, E.S., Chapra, S.C. (2011). Modeling the impacts of calcite precipitation on the epilimnion of an ultraoligotrophic, hard-water lake. *Ecological Modelling* 222: 76-90.
- Idso, S.B. (1973). On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography* 18: 681-683.
- Jørgensen , S.E. (1994). *Fundamentals of Ecological Modelling, 2nd ed.* Elsevier: Amsterdam.
- Koponen, S., Pulliainen, J., Kallio, K., Hallikainen, M. (2002). Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing of Environment* 79: 51-59.
- Middlebrooks, E.J. (1985). *Nitrogen Removal Model Developed for Inclusion in U.S.* Environmental Protection Agency.
- Reed, S.C. (1985). Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 57: 39-45.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Roldán Pérez , G.A., Ramírez Restrepo, J.J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical, 2ª ed.* Universidad de Antioquía: Colombia.
- Ruley, J.E., Rusch, K.A. (2002). An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake. *Ecological Engineering* 19: 265-280.
- Stumm, W., Morgan, J.J. (1996). *Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd ed.* John Wiley & Sons Inc.: New York.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., Sense, H.D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th ed.* McGraw-Hill: New York.
- Thirumurthi, D. (1969). Design principles of waste stabilization ponds. *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE* 95: 311-330.
- Thirumurthi, D. (1974). Design criteria for waste stabilization ponds. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 46: 2094-2106.
- Vollenweider, R.A. (1975). Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie* 37: 53-84.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Wehner, J.F., Wilhelm, R.H. (1956). Boundary conditions of flow reactor. *Chemical Engineering Science* 6: 89-93.